

Ověřování modelů v požární bezpečnosti

Kamila Cábová a kol.





Výsledek projektu VI20162019034, podpořeného Ministerstvem vnitra České republiky v rámci Programu bezpečnostního výzkumu ČR.



Ověřování modelů v požární bezpečnosti

Kamila Cábová a kol.

Na přední a zadní straně přebalu monografie jsou obrázky
z práce na validaci modelu hašení připravené v rámci projektu na VŠB-TU Ostrava.

Ověřování modelů v požární bezpečnosti

Kamila Cábová, Lucie Hasalová, Tomáš Apeltauer, Petr Kučera, František Wald

Vydalo
České vysoké učení technické v Praze,
ve spolupráci s Vysokým učení technickým v Brně,
Vysokou školou báňskou - Technickou universitou Ostrava
a Technickým ústavem požární ochrany

Tisk Powerprint
ISBN 978-80-01-06616-4, on line ISBN 978-80-01-06620-1



Obsah

Symboly.....	6
Úvodem	13
1 Modelování.....	15
1.1 Validace a verifikace.....	15
1.1.1 Ověřování modelů.....	15
1.1.2 Validace	15
1.1.3 Kalibrace.....	16
1.1.4 Studie citlivosti.....	17
1.1.5 Verifikační příklad	18
1.2 Metoda dílčích součinitelů spolehlivosti.....	18
1.2.1 Zajištění bezpečnosti	18
1.2.2 Podstata metody dílčích součinitelů	19
1.2.3 Návrhové hodnoty požární odolnosti.....	23
1.2.4 Mechanické zatížení při požáru	25
1.2.5 Požární zatížení	27
1.3 Zjednodušené modely.....	34
1.3.1 Analytické modely prostorového požáru.....	34
1.3.2 Lokální požáry.....	44
2 Požár	49
2.1 Požární scénáře	49
2.1.1 Obecně.....	49
2.1.2 Prvky scénáře	50
2.1.3 Návrhový požár.....	51
2.1.4 Vstupní data	52
2.2 Matematické modely požáru.....	53
2.2.1 Hoření látek.....	53
2.2.2 Tepelná degradace pevných látek.....	54
2.2.3 Spalování v plynné fázi	54
2.2.4 Model požáru	55
2.3 Dělení matematických modelů požáru	55
2.3.1 Dělení podle využití.....	55
2.3.2 Deterministické modely	56
2.3.3 Modelování pyrolýzy	59
2.4 Kvalita vstupů do modelu.....	62
2.4.1 Vstupní data	62
2.4.2 Vstupy do zónových modelů	63
2.4.3 Vstupy do CFD modelů.....	63
2.5 Verifikační příklady	66
2.5.1 Zónový model požáru v průmyslové hale.....	66
2.5.2 Zónový model požáru v otevřeném parkovacím domě.....	69

2.5.3	CFD model požáru v malém požárním úseku.....	73
2.5.4	Studie citlivosti sítě v CFD modelu požáru.....	78
2.5.5	Další verifikační příklady CFD modelů.....	84
3	Modelování sprinklerové ochrany	85
3.1	Zabezpečení aktivními požárně bezpečnostními zařízeními	85
3.1.1	Koordinace požárně bezpečnostních zařízení	85
3.1.2	Interakce požárně bezpečnostních zařízení	86
3.2	Principy sprinklerové ochrany.....	87
3.2.1	Základní termíny hašení požárů sprinklerovou ochranou	87
3.2.2	Hasební efekt vody	88
3.2.3	Tepelná bilance při hašení vodou	89
3.3	Modely pro kontrolu, potlačení a uhašení požáru sprinklerovou ochranou	89
3.3.1	Základní dělení modelů	90
3.3.2	Zjednodušené modely	90
3.3.3	Pokročilé modely.....	91
3.3.4	Aplikace zjednodušených a pokročilých modelů.....	91
3.4	Modelování sprinklerové ochrany.....	92
3.4.1	Změna průběhu požáru při aktivaci sprinklerové ochrany.....	92
3.4.2	Rozvoj požáru před aktivací sprinklerové hlavice.....	93
3.4.3	Rozvoj požáru po aktivaci sprinklerové hlavice	94
3.4.4	Strategie modelování procesu hašení.....	97
3.5	Zjednodušené modely hašení	97
3.5.1	Otevírací teplota sprinklerové hlavice	97
3.5.2	Index reakční doby	98
3.5.3	Součinitel C	100
3.5.4	Intenzita dodávky vody.....	100
3.5.5	Vzdálenost od požáru.....	101
3.5.6	Vzdálenost mezi sprinklery	101
3.5.7	Pravděpodobnost kontroly nebo potlačení požáru	101
3.5.8	Spolehlivost sprinklerové ochrany	102
3.5.9	Součinitel ochlazení	102
3.5.10	Shrnutí vstupních součinitelů	102
3.5.11	Validace zónových modelů.....	103
3.6	Pokročilé modely hašení.....	110
3.6.1	Průtok vody	110
3.6.2	Součinitel přesahu	111
3.6.3	Úhel rozstříku a tvar rozstříku	112
3.6.4	Velikost kapek	113
3.6.5	Počet kapek.....	114
3.6.6	Počáteční rychlost pohybu kapek.....	115
3.6.7	Koeficient zhášení.....	116
3.6.8	Propojení s modelem požáru	117
3.6.9	Shrnutí zadávání vstupních hodnot	117

3.7	Výstupní součinitele modelů hašení.....	118
3.8	Zohlednění interakce při modelování hašení	119
3.9	Kontrola návrhu modelování hašení.....	120
4	Evakuace	122
4.1	Proces evakuace	122
4.1.1	Strategie evakuace osob.....	122
4.1.2	Analýza doby evakuace osob.....	124
4.2	Modely evakuace osob.....	126
4.2.1	Nástroje	126
4.2.2	Vstupní data modelu.....	127
4.3	Verifikace a validace modelu	133
4.3.1	Principy řešení	133
4.3.2	Souhrnné zdroje	136
4.3.3	Ověřovací příklady	138
4.3.4	Výsledky a jejich zpracování	145
4.4	Příklady programů	146
4.4.1	EXODUS	146
4.4.2	PATHFINDER	151
5	Odezva konstrukce	155
5.1	Modelování konstrukcí při požáru	155
5.1.1	Úvod.....	155
5.1.2	Typy modelů a jejich vstupy.....	156
5.1.3	Volba modelu	157
5.2	Ověřování modelů konstrukcí.....	158
5.2.1	Způsoby ověření	158
5.3	Verifikační příklady	160
5.3.1	Chování ocelového nosníku při požáru.....	161
5.3.2	Ocelový sloup vystavený účinkům požáru	170
5.3.3	Rozvoj teplot v průřezu dřevěného prvku.....	173
5.3.4	Mechanické chování ocelobetonové stropní desky při požáru.....	178
5.3.5	Dřevobetonová stropní deska vystavená účinkům požáru	183
5.3.6	Stabilita ocelového nosníku s průřezem 4. třídy při požáru.....	188
6	Literatura.....	194

Symbols

V textu je použito značení podle evropských norem, které se v podrobnostech v jednotlivých požárních normách liší. Symboly jsou objasněny v textu u vzorců a častěji použité jsou shrnuty dále.

a	vzdálenost
b	tepelná pohltivost ohraničující konstrukce, šířka
b_{eff}	účinná šířka
b_i	tepelná pohltivost i -té vrstvy povrchové plochy jedné ohraničující konstrukce
b_j	tepelná pohltivost povrchové plochy j -té ohraničující konstrukce
c_a	měrné teplo oceli
c_c	měrné teplo betonu
c_p	měrné teplo požárně ochranného materiálu
d	hloubka, výška, průměr spřaženého sloupu z dutého průřezu vyplněného betonem, tloušťka, průměr sprinklerové trysky, průměr kapky
d_i	rozměr i -té povrchové plochy prvku
d_p	tloušťka požárně ochranného materiálu
d_v	střední průměr kapky
$f_{a,max,\theta}$	charakteristická hodnota nejvyšší hladiny napětí pracovního diagramu konstrukční oceli při zvýšené teplotě
$f_{a,max,\theta_{cr}}$	pevnost oceli při kritické teplotě θ_{cr}
$f_{c,\theta}$	charakteristická hodnota válcové pevnosti betonu v tlaku při teplotě θ
$f_{fi,d}$	návrhová pevnost za požáru
f_y	mez kluzu oceli při pokojové teplotě
$f_{y,\theta}$	mez kluzu oceli při teplotě θ
h	výška průřezu
h_{eff}	účinná tloušťka spřažené desky
h_{eq}	vážený průměr výšek oken ve všech stěnách
h_{fi}	výšková redukce betonu mezi pásnicemi
h_i	výška i -tého okna
h_{net}	návrhová hodnota tepelného toku na jednotku plochy
$h_{net,c}$	návrhová hodnota složky tepelného toku na jednotku plochy vlivem proudění
$h_{net,d}$	návrhová hodnota tepelného toku na jednotku plochy prouděním a sáláním
$h_{net,r}$	návrhová hodnota složky tepelného toku na jednotku plochy vlivem sálání
h_s	výška parapetu svislých otvorů
h_w	výška svislých otvorů, výška stojiny ocelového profilu
\dot{h}	tepelný tok na jednotku plochy povrchu
\dot{h}_i	tepelný tok na jednotku plochy povrchu vlivem i -tého požáru
\dot{h}_{net}	čistý tepelný tok na jednotku plochy povrchu
$\dot{h}_{net,c}$	čistý tepelný tok na jednotku plochy povrchu vlivem proudění
$\dot{h}_{ne,r}$	čistý tepelný tok na jednotku plochy povrchu vlivem sálání
\dot{h}_{tot}	celkový tepelný tok na jednotku plochy povrchu
k	součinitel (většinou s indexem), opravný součinitel
k_θ	redukční součinitel pevnostních nebo deformačních vlastnosti v závislosti na teplotě materiálu θ ; $k_\theta = X_{k\theta} / X_k$
k_b	převodní součinitel materiálů ohraničujících požární úseky
$k_{c,\theta}$	redukční součinitel pro výpočet pevnosti betonu v tlaku $f_{c,\theta}$ při zvýšené teplotě
$k_{E,\theta}$	redukční součinitel modulu pružnosti při teplotě oceli θ
l, ℓ	délka
m	hmotnost; součinitel hoření
\dot{m}	rychlost pohybu plynů
\dot{m}_{fi}	rychlost vytváření produktů pyrolýzy

\dot{m}_{in}	rychlost plynu vstupujícího otvory
\dot{m}_{out}	rychlost plynu odcházejícího otvory
p	obvod, přetlak před hlavici sprinkleru (MPa)
p_t	je přetlak před hlavici sprinkleru (bar)
$q_{f,d}$	návrhová hodnota hustoty požárního zatížení vztažená na jednotku plochy
$q_{f,k}$	charakteristická hodnota hustoty požárního zatížení vztažená na jednotku plochy
$q_{t,d}$	návrhová hodnota hustoty požárního zatížení vztažená na jednotku plochy
$q_{t,k}$	charakteristická hodnota hustoty požárního zatížení vztažená na jednotku plochy
r	vodorovná vzdálenost mezi svislou osou požáru a bodem u stropu, pro který se počítá tepelný tok
t	čas v minutách, doba vystavení požáru, tloušťka
t^*	náhradní čas v hodinách zohledňující vliv otvorů a kvalitu povrchů, čas po iniciaci
$t_{fi,d}$	návrhová hodnota doby požární odolnosti
$t_{fi,req}$	požadovaná doba požární odolnosti
t_g	doba potřebná pro dosažení referenční rychlosti (s)
t_i	požární odolnost z hlediska tepelné izolace
t_{lim}	doba dosažení nejvyšší teploty plynů v případě požáru řízeného palivem
t_{max}	doba dosažení nejvyšší teploty plynů
t_α	doba potřebná k dosažení rychlosti uvolňování tepla 1 MW
u	obsah vlhkosti v ochranném materiálu v %, rychlost větru, rychlost proudění plynů ($m \cdot s^{-1}$)
w_f	šířka plamene; součinitel odvětrání
w_i	šířka i -tého okna
w_t	součet šířek oken ve všech stěnách ($w_t = \sum w_i$); součinitel odvětrání vztažený k celkové ploše ohraničujících konstrukcí A_t
y	součinitel
z	výška
z'	poloha virtuálního zdroje tepla ve svislém směru
z_0	virtuální počátek výšky z
A	plocha, plocha průřezu
A_d	návrhové hodnota mimořádného zatížení
A_f	plocha požárního úseku
A_{fi}	plocha požáru
A_h	plocha vodorovných otvorů ve střeše požárního úseku
$A_{h,v}$	celková plocha otvorů v konstrukcích ohraničujících požární úsek ($A_{hv} = A_h + A_v$)
A_i / V_i	součinitel průřezu i -té části ocelového průřezu pro nechráněný prvek
A_j	plocha povrchu j -té konstrukce ohraničující požární úsek, bez otvorů
A_m	plocha přímo ohřívajícího povrchu prvku na jednotku délky
A_m / V	součinitel průřezu konstrukčního prvku
$A_{p,i} / V_i$	součinitel průřezu i -té části ocelového průřezu (s obkladem po obvodě)
C	součinitel vedení tepla do patice sprinklerové hlavice ($m \cdot s^{-1}$) ^{1/2}
C_i	součinitel ochrany i -té povrchové plochy prvku
D	hloubka požárního úseku; průměr ohně
E	modul pružnosti; účinek zatížení
E_d	návrhová hodnota účinku zatížení pro pokojovou teplotu
$E_{fi,d}$	návrhová hodnota účinku zatížení za požáru nezávislý na čase
	časově nezávislá návrhová hodnota účinku zatížení za požáru
$E_{fi,d,t}$	návrhový účinek zatížení, včetně nepřímých požárních zatížení, za požáru v čase t
G_k	charakteristická hodnota stálého zatížení
H	vzdálenost mezi zdrojem požáru a stropem, výška požárního úseku
H_u	čistá výhřevnost včetně vlhkosti
H_{u0}	čistá výhřevnost suchého materiálu
H_{ui}	čistá výhřevnost i -tého materiálu

$I_{i,\theta}$	moment setrvačnosti redukované i -té části průřezu vztažený k jedné z os
K	Kevlin, odporový součinitel průtoku hlavice sprinkleru ($l \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1/2}$)
L	délka, rozpětí, systémová délka
L_f	délka plamene podél osy
L_H	vodorovný průmět
L_h	vodorovná délka plamene
M	ohybový moment
$M_{k,i}$	množství i -tého hořlavého materiálu
M_{Rd}	návrhová hodnota momentové únosnosti při pokojové teplotě
M_{Sd}	návrhová hodnota působícího momentu při pokojové teplotě
$N_{b,fi,t,Rd}$	návrhová hodnota vzpěrné únosnosti za požáru v čase t
N_{Ed}	návrhová hodnota působící síly při pokojové teplotě
$N_{fi,\theta,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti taženého prvku při rovnoměrném rozdělení teploty v průřezu
$N_{fi,cr}$	pružná kritická síla (= Eulerova síla) za požáru
$N_{fi,Ed}$	návrhová hodnota osově síly za požáru
$N_{fi,pl,Rd}$	návrhová hodnota plastické únosnosti v tlaku celého spřaženého průřezu za požáru
$N_{fi,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti prvku v tlaku (= vzpěrná únosnost) za požáru
$N_{fi,Sd}$	návrhová hodnota osově síly za požáru
$N_{fi,t,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti taženého prvku při nerovnoměrném rozložení teploty v čase t
$N_{pl,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti taženého prvku při pokojové teplotě
Q	rychlost uvolňování tepla za požáru
\dot{Q}	rychlost uvolňování tepla, kW
\dot{Q}_0	referenční rychlost uvolňování tepla (1 000 kW)
\dot{Q}_{act}	rychlost uvolňování tepla v čase aktivace sprinkleru (kW)
$\dot{Q}(\Delta t)$	snížení rychlosti uvolňování tepla (kW) v čase Δt
O_{lim}	redukovaný koeficient otvorů vlivem odvětrání
Q^*_D	součinitel uvolňování tepla vztažený na průměr D lokálního požáru
Q^*_H	součinitel uvolňování tepla vztažený na výšku H požárního úseku
Q_c	část rychlosti uvolňování tepla Q prouděním
$Q_{fi,k}$	charakteristická hodnota požárního zatížení
$Q_{fi,k,i}$	charakteristická hodnota požárního zatížení i -tým materiálem
Q_k	charakteristická hodnota proměnného zatížení
$Q_{k,1}$	charakteristická hodnota hlavního proměnného zatížení
Q_{max}	největší rychlost uvolňování tepla
R	únosnost, konstanta ideálního plynu (= 287 J kg ⁻¹ K ⁻¹)
R_{XX}	kritérium únosnosti pro XX minut při zatížení podle nominální normové teplotní křivky
R_d	návrhová hodnota únosnosti prvku při pokojové teplotě
$R_{fi,d,t}$	návrhová hodnota únosnosti za požáru v čase t
RHR_f	největší rychlost uvolňování tepla na metr čtvereční
RTI	součinitel času odezvy (Response Time Index) (m·s) ^{1/2}
T	teplota v K; tahová síla
T_0	počáteční teplota v K (= 293 K)
T_w	teplota plamene u okna v K
T_z	teplota plamene podél jeho osy v K
V	objem prvku na jednotku délky
$V_{fi,t,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti ve smyku při nerovnoměrném rozložení teploty v čase t
V_i	objem i -té části ocelového průřezu na jednotku délky v m ³ /m
$V_{pl,Rd}$	návrhová hodnota únosnosti ve smyku neoslabeného průřezu při pokojové teplotě
W	šířka stěny s okny, průřezový modul
W_1	šířka stěny 1, u které se předpokládá největší plocha oken
W_2	šířka stěny požárního úseku, kolmé ke stěně 1
W_c	šířka jádra plamene

$X_{d,fi}$	návrhová hodnota pevnostních nebo deformačních vlastností materiálu za požáru
X_k	charakteristická hodnota pevnostních nebo deformačních vlastností materiálu při pokojové teplotě
$X_{k,\theta}$	charakteristická hodnota pevnostních nebo deformačních vlastností materiálu při teplotě θ
α	úhel, koeficient rozvoje požáru ($\text{kW}\cdot\text{s}^{-2}$)
α_c	součinitel přestupu tepla prouděním
α_h	poměr vodorovných ploch otvorů ku podlahové ploše požárního úseku
α_{slab}	součinitel zohledňující předpoklad pravoúhlého rozdělení napětí při návrhu desky
α_v	poměr svislých ploch otvorů ku podlahové ploše požárního úseku
δ	excentricita
δ_{hi}	součinitel aktivní požární ochrany
δ_{q1}	součinitel nebezpečí vzniku požáru vzhledem k velikosti úseku
δ_{q2}	součinitel nebezpečí vzniku požáru vzhledem k druhu provozu
β	rychlost zuhelnatění
γ	součinitel
γ_G	dílčí součinitel stálého zatížení
γ_{GA}	dílčí součinitel stálého zatížení pro mimořádnou návrhovou situaci
$\gamma_{Q,1}$	dílčí součinitel proměnného zatížení
$\gamma_{M,fi}$	dílčí součinitel materiálu za požáru
$\gamma_{M,fi,a}$	dílčí součinitel pro konstrukční ocel za požáru
$\gamma_{M,fi,c}$	dílčí součinitel pro beton za požáru
$\gamma_{M,fi,s}$	dílčí součinitel pro výztuž za požáru
$\gamma_{M,fi,v}$	dílčí součinitel pro spřahovací trny za požáru
γ_Q	dílčí součinitel nahodilého zatížení
γ_v	dílčí součinitel pro spřahovací trn pro návrh při pokojové teplotě
γ_{M1}	dílčí součinitel materiálu pro únosnost při vzpěru
ε	poměrné protažení, součinitel
ε_a	poměrné protažení ocelového profilu sloupu
$\varepsilon_{a,\theta}$	poměrné protažení ocelového profilu sloupu za požáru
$\varepsilon_{ae,\theta}$	mezní poměrné protažení za požáru
$\varepsilon_{amax,\theta}$	poměrné protažení na mezi kluzu za požáru
$\varepsilon_{ap,\theta}$	poměrné protažení na mezi úměrnosti za požáru
$\varepsilon_{au,\theta}$	mezní poměrné protažení pro mez kluzu
ε_c	poměrné protažení betonu sloupu
$\varepsilon_{ce,\theta}$	poměrné protažení betonu při zvýšené teplotě
ε_f	fiktivní emisivita plamenů
ε_m	emisivita povrchu
$\varepsilon_{p,\theta}$	poměrné teplotní přetvoření předpínací oceli
ε_s	poměrné protažení výztuže sloupu
$\varepsilon_{s,\theta}$	poměrné teplotní přetvoření betonářské oceli
$\varepsilon_{s,fi}$	poměrné přetvoření betonářské nebo předpínací oceli při teplotě θ
$\varphi_{a,\theta}$	redukční součinitel pro ocelový profil, závisející na vlivu namáhání od teploty
$\varphi_{c,\theta}$	redukční součinitel pro beton, závisející na vlivu namáhání od teploty
$\varphi_{s,\theta}$	redukční součinitel výztuž, závisející na vlivu namáhání od teploty
κ_1	součinitel podmínek působení pro nerovnoměrné rozdělení teploty po průřezu
κ_2	součinitel podmínek působení pro nerovnoměrné rozdělení teploty po délce nosníku
λ	tepelná vodivost
λ_a	tepelná vodivost oceli
λ_c	tepelná vodivost betonu
λ_p	tepelná vodivost požárně ochranného materiálu
$\lambda_{0,fi}$	šťhlost sloupu za požáru

$\bar{\lambda}_{\theta, \max}$	poměrná štíhlost pro teplotu $\theta_{a, \max}$
η	součinitel, výtokový součinitel
η_{fi}	redukční součinitel účinku zatížení $\eta_{fi} = E_{d, fi} / E_d$
$\eta_{fi, t}$	redukční součinitel únosnosti $\eta_{fi, t} = R_{d, fi, t} / R_d$
θ	teplota ve °C
θ_a	teplota konstrukční oceli, teplota prvku dosažená v čase t
$\theta_{a, t}$	teplota oceli v čase t , předpokládá se rovnoměrně rozdělená po všech částech průřezu
$\theta_{a, cr}$	kritická teplota ocelového prvku
$\theta_{a, \max}$	maximální teplota prvku dosažená v čase t
$\theta_{a, com}$	teplota v tlačené pásnici prvku dosažená v čase t
θ_c	teplota betonu
θ_{cr}	kritická teplota konstrukčního prvku, kritická teplota betonářské výztuže
θ_d	teplota teplotní pojistky (°C)
θ_g	teplota plynů v příslušném požárním úseku ve °C (dříve značeno T_N)
θ_m	povrchová teplota prvku
θ_i	teplota v části plochy A_i
θ_{im}	mezní teplota
θ_{max}	nejvyšší teplota
θ_r	sálavá teplota okolí prvku
θ_s	teplota výztuže
θ_v	teplota spřahovacích trnů
θ_w	teplota stojiny
θ_0	počáteční teplota plynů před požárem ve °C (v soustavě českých norem se značilo T_0)
μ_{fi}	stupeň využití za požáru; $\mu_{fi} = N_{Ed, fi} / N_{Rd}$
μ_0	stupeň využití v čase $t = 0$
ζ	součinitel
ρ	hustota, hustota vody ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
ρ_a	hustota oceli
ρ_c	hustota betonu
ρ_p	hustota požárně ochranného materiálu
σ	napětí, Stephan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)
$\sigma_{a, \theta}$	napětí oceli při zvýšené teplotě
$\sigma_{c, \theta}$	tlakové napětí betonu při zvýšené teplotě
$\sigma_{c, fi}$	tlakové napětí betonu za požáru
$\sigma_{s, fi}$	napětí ve výztuži za požáru
τ_F	doba volného hoření ohně (předpokládá se 1 200 s)
τ	časová konstanta
χ	součinitel vzpěrnosti při pokojové teplotě
χ_i	součinitel vzpěrnosti za požáru
$\chi_{T, fi}$	součinitel příčné a torzní stability za požáru
χ_z	součinitel vzpěrnosti při vybočení kolmo k ose z
$\psi_{0,1}$	součinitel kombinace charakteristické hodnoty proměnného zatížení
$\psi_{1,1}$	součinitel kombinace časté hodnoty proměnného zatížení
$\psi_{2,1}$	součinitel kombinace kvazistálé hodnoty proměnného zatížení
ψ_{fi}	součinitel kombinace za požáru, buď $\psi_{1,1}$ nebo $\psi_{2,1}$
ϕ	součinitel jímavosti tepelné izolace
Δl	prodloužení
$\Delta l / l$	poměrné prodloužení (od teploty)
Δt	časový interval, rozdíl mezi časem po aktivaci sprinkleru a časem jeho aktivace, $\Delta t = t - t_{act}$ (s)
$\Delta \theta_{a, t}$	zvýšení teploty ocelového nosníku během časového intervalu Δt
$\Delta \theta$	zvýšení teploty během časového intervalu Δt

$\Delta\theta_{ea}$	rozdíl mezi otevírací teplotou a teplotou okolního prostředí
Φ	polohový faktor
Γ	součinitel vlivu otvorů a kvality povrchů
Γ_{lim}	součinitel vlivu otvorů a kvality povrchů pro požár řízený palivem

Indexy

a	konstrukční ocel
b	šířka
c	proudění, beton, tlak
cr, crit	kritický
d	návrhový
D	pro průměr
ef, eff	účinný
f	pásnice, při požáru, požární úsek
fi	požár, návrh na účinky požáru
g	plynu
h	vodorovný
H	pro výšku
char	zuhelnatění
ins	izolace
k	charakteristický
lim	mezní
max	největší
mean	průměrná hodnota
min	nejmenší
mod	modifikační
n	návrh pro pokojovou teplotu
net	čistý
p	deska, ochranný
pr	ochranný
r	zbytkový, sálání
req	požadovaný
s	výztuž
sh, shadow	zastínění
t	v čase t
ten	v tahu
tot	celkový
w	svar
0	základní hodnota
05	pěti procentní
20°C	při pokojové teplotě
θ	při teplotě θ , při zvýšené teplotě

Poznámka:

Teplota ve °C se v evropských normách většinou značí θ a teplota v K se značí T .

Úvodem

V požární bezpečnosti se již řadu let konstrukce a evakuace navrhují pomocí tabulek, analytických a diskretních modelů. V úzkém rozsahu použití přináší tabulky přesné řešení, které zohledňuje konkrétní experimentální poznání, rizika jsou v použití mimo meze dané experimenty. Analytické modely se v praxi osvědčily v řadě oblastí. Jje jejich princip spočívá v převedení řešení na jednoduchý analyticky uchopitelný vztah. V požární bezpečnosti budov je použití omezeno složitostí problematiky jen na některé případy, např. předpověď teploty lokálními požáry nebo přestup tepla do prvku ocelové konstrukce. Rozvoj výpočetní techniky umožnil diskretizaci výpočtů pokročilými modely ve všech inženýrských disciplínách. Ve stavební praxi především při řešení požární problematiky, která zde je jednou z nejsložitějších.

Velké katastrofické požáry a zemětřesení přinesly společnosti poučení, zájem o poznání a jeho implementaci. Příkladem dobré praxe je zpráva a poučení z tragédie zřícení budov WTC v New Yorku (FEMA, 2005), která je významným dokladem možností pokročilých modelů a impulzem k jejich širší aplikaci. Výzvy pro USA jsou rozpracovány v 29. a 30. bodě poučení z katastrofy. Je doloženo, že využití pokročilého modelování v oblasti požární bezpečnosti je jediná cesta k zajištění spolehlivosti budov, které využívají možností současných materiálů a konstrukčních řešení.

Nedílnou součástí modelů je ověření jejich správnosti. U modelů, které matematickými vztahy rozšiřují oblast platnosti experimentů, je ověření zřejmé z vlastního řešení. Analytické modely je třeba validovat a určit oblast jejich platnosti. Na základě dobré praxe inženýři intuitivně extrapolovali rozsah jednoduchých modelů. Numerické diskretní modely jsou k dispozici již od sedmdesátých let minulého století. Ve všech oblastech použití pro ně byly vypracovány metodiky, které zajišťují jejich správnou aplikaci. Metodiky jsou připraveny i pro modely v požární bezpečnosti. Vzhledem k tomu, že v Evropské unii je bezpečnost řešena jednotlivými státy samostatně, vznikla a stále se rozvíjí podpora ověřování kvality modelů na národních úrovních.

V České republice se na problematiku implementace pokročilých modelů zaměřil projekt VI20162019034 Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb. Na řešení pracoval kolektiv pracovníků z MV GR HZS Technický ústav požární ochrany Petra Bursíková, Lucie Hasalová, Dana Smolíková, Jan Karel, Ondřej Suchý, Libor Ševčík, Václav Vystrčil, z VŠB TU Ostrava, Fakulty bezpečnostního inženýrství Karla Barčová, Dana Chudová, Bohdan Filipi, Michaela Ogurková, Petr Kučera, Jiří Pokorný, Adam Thomitzek z VUT v Brně, Fakulty stavební Jiří Apeltauer, Tomáš Apeltauer, Petr Beneš, Kateřina Gryndlerová Floryánová, Radka Matuszková, Petra Okřinová, Luděk Vrána a Lucie Dobiášová a z ČVUT v Praze, Fakulty stavební Lukáš Blesák, Kamila Cábová, Otto Dvořák, Petr Hejtmánek, Anna Kuklíková, Matyáš Kožich, Zuzana Kubíková, Kateřina Mrázková, Hana Najmanová, Marek Pokorný a František Wald. První a pátá kapitola monografie je z habilitační práce Kamily Cábové. Druhou kapitolu připravila Lucie Hasalová (verifikační příklady Kamila Cábová), třetí Petr Kučera a čtvrtou Tomáš Apeltauerá. Text editovali Matyáš Kožich a František Wald. Monografii laskavě oponovali Martin Beneš a Michal Strejček.

Za kolektiv autorů Kamila Cábová

1 Modelování

1.1 Validace a verifikace

1.1.1 Ověřování modelů

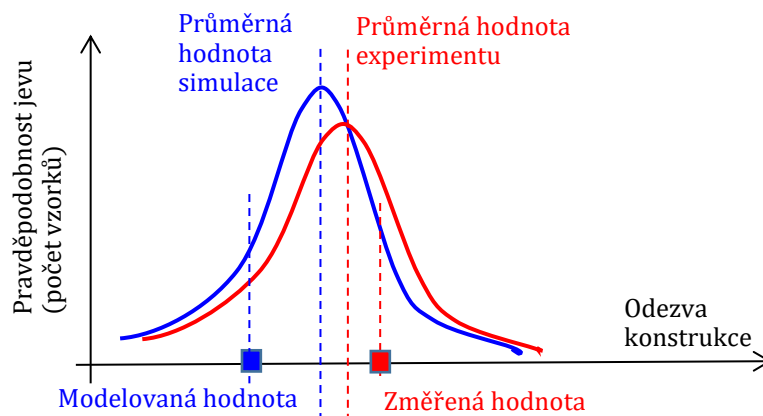
V pracích o konečných prvcích a dynamické analýze plynů autoři přikládají velkou váhu verifikačním příkladům pro ověření správného použití modelů i ověření správnosti popisu jevů. Existuje více názorů, jak by měly být studie rozvíjeny, jak složité by měly být teoretické či praktické otázky, a zda by příklady určené pro ověřování měly odkazovat pouze na analytická a numerická řešení nebo i experimentální data. Některé z těchto otázek souvisí s rozdíly mezi verifikací a validací. Pomocí verifikace se výpočetní řešení porovnává s přesnými analytickými nebo numerickými referenčními řešeními a mezi sebou, zatímco validací se porovnává numerické řešení s experimentálními daty. Podle (AIAA, 1998) lze příklad ověřit porovnáním shody mezi numerickým řešením a čtyřmi verifikačními postupy analytickými, přesným numerickým algebraickým nebo diferenciálním postupem a experimentem (Oberkampff & Trucano, 2002). Na rozdíl od numerických řešení připravených pro fázi validace představují numerická řešení pro verifikaci matematické modely s malým fyzickým významem (AIAA, 1998). Numerickým modelům pro srovnání mezi analytickými a numerickými modely předchází jejich validace (ASME, 2006).

Verifikační příklady se připravují pro správné použití programu. Význam databází, které shromažďují dobře zdokumentované verifikační příklady pro zlepšení spolehlivosti numerických řešení, je doložen například v (Oberkampff & Trucano, 2008). Nejznámějším klasickým zdrojem je National Agency for Finite Element Methods and Standards (NAFEMS) s přibližně 280 verifikačními příklady (NAFEMS, 2013). Některé komerční programy jako jsou ANSYS a ABAQUS přinášejí sady dobře zdokumentovaných testů. Například ABAQUS poskytuje ve třech příručkách širokou škálu příkladů (včetně 93 z NAFEMS) od jednoduchých jednodívkových testů až po složité inženýrské problémy validovaných experimenty (SIMULIA, 2011).

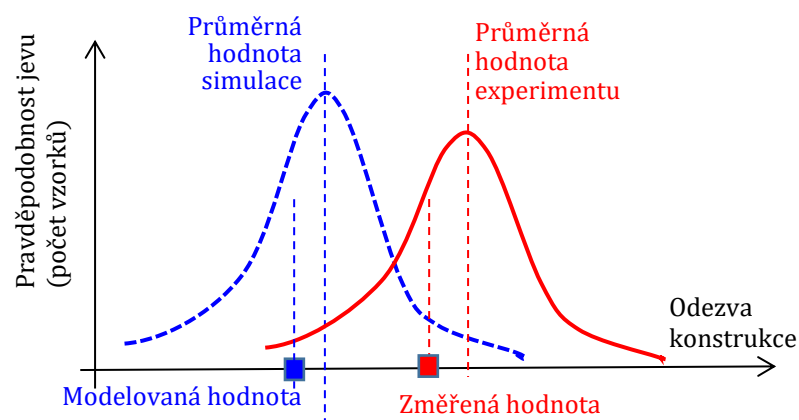
1.1.2 Validace

Pravděpodobnostní rozdělení výsledků experimentů výrazně ovlivňuje validaci každého modelu. Obrázky 1.1 a 1.2 popisují případ, ve kterém se při deterministickém řešení vybere dvojice hodnot představující odezvu. Experimentální data mají stochastickou povahu a popisují se pravděpodobnostní distribuční křivkou. Pro úplné porovnání je třeba výsledky prezentovat pravděpodobnostním způsobem s využitím pravděpodobnostní distribuční křivky. Počítá se opakovaně s proměnou vybraných vstupních dat, která se mění podle simulace

pravděpodobnosti. Takové rozsáhlé výpočty lze provádět automaticky pomocí specializovaných optimalizačních balíčků (např. LS-OPT®, HyperStudy® nebo ModeFrontier®), které jsou zahrnuty v dnešních komerčních výpočetních systémech. Obrázek 1.1 ukazuje případ, kdy číselný model velmi dobře předpovídá experiment s rozložením pravděpodobnosti v blízkosti zvoleného experimentu. Obrázek 1.2 představuje opačnou situaci pro stejnou dvojici hodnot odezvy. Oba obrázky ukazují, že deterministické srovnání pouze dvou veličin může být problematické. Nemusí vypovídat o prediktivních schopnostech numerického modelu (Wang a kol., 2012).



Obrázek 1.1: Příklad pravděpodobnostního porovnání numerického řešení a experimentu, které ukazuje dobré prediktivní schopnosti modelu



Obrázek 1.2: Příklad pravděpodobnostního porovnání numerického řešení a experimentu, které dokládá špatné prediktivní schopnosti numerického modelu

1.1.3 Kalibrace

Chování materiálu se do výpočtu zavádí materiálovým modelem, který popisuje mechanické a teplotní charakteristiky. Materiálový model je třeba kalibrovat tak, aby data ve vědecky orientovaném modelu odpovídala skutečně změřeným materiálovým hodnotám při experimentu a v návrhovém modelu odpovídala požadovaným charakteristickým hodnotám. V literatuře o verifikaci a validaci (Oberkampf & Trucano, 2002) je kalibrace modelu nepřijatelné řešení,

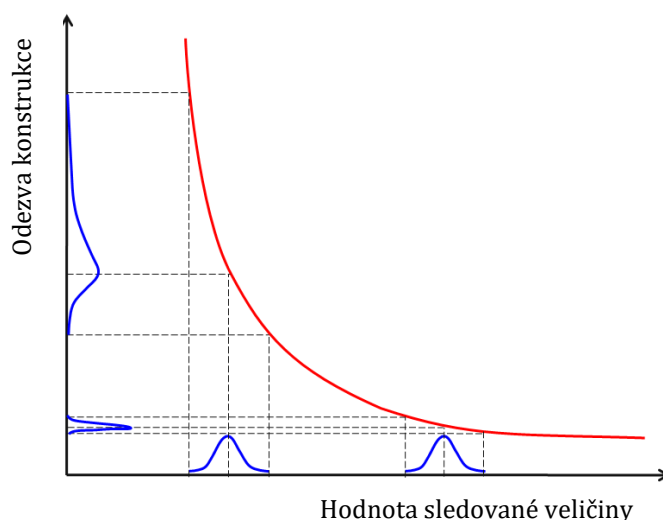
kterého se je třeba při numerickém modelování vyvarovat. Kalibrace ve výpočtu znamená neodůvodněnou úpravu vstupních dat numerického modelu tak, aby se numerické výsledky posunuly blíže k experimentálním datům. Nesrovnalosti mezi experimentem a numerickou simulací mohou být způsobeny neidentifikovanými vstupními parametry. Manipulací se vstupními daty se generuje chybné řešení (Kwaśniewski a Bojanowski, 2015).

Zlepšit model kalibrací lze pouze v případě úplného stochastického popisu experimentálních dat při pravděpodobnostní analýze simulace úpravou fyzikálního modelu pomocí několika různých simulovaných událostí. Proto je kalibrace integrálně důležitým prvkem modelů evakuace, které mají z podstaty vždy stochastickou povahu. Jednotlivé parametry modelu se kalibrují tak, aby se jeho chování shodovalo s reálným chováním předlohy modelu. Vzhledem ke stochastické povaze modelu pohybu osob se upravují pouze parametry, které nejsou známy či změřeny, viz kap. 4 monografie.

1.1.4 Studie citlivosti

Studie citlivosti je nepostradatelnou částí validace i verifikace modelu. Proměnné ve studii ověří citlivost na vstupy tak, aby bylo jasné, které jsou podstatné a jak, které mají přibližně lineární odezvu a které jsou zanedbatelné. Stejně jako u analytické studie vychází studie citlivosti numerických modelů z vícedimenzionální matice vstupních dat. Volí se jedna vstupní hodnota a pro ostatní se uvažuje hodnota střední.

Rozlišení odezvy systému závisí na rozdílu vstupních parametrů a jejich rozsahu. Při návrhu verifikačních příkladů je třeba brát v úvahu i nelinearitu reakce. Numerické experimenty se volí, aby přiměřená změna vstupních dat přinesla přiměřenou změnu odezvy systému. Obrázek 1.3 přináší dva případy, kdy stejná odchylka ve vstupních datech způsobuje díky rozdílného rozložení odezvy rozdílné výsledky.



Obrázek 1.3: Citlivost odezvy na změnu parametru (Kwaśniewski, 2009)

1.1.5 Verifikační příklad

Správný verifikační příklad (angl. Benchmark case) má být jednoduchý a snadno pochopitelný (Gillie, 2009). Složitější příklad přináší méně spolehlivé ověření. Odpovědi na složité otázky, například pro pokročilé modely materiálu oceli nebo betonu, lze získat pouze numerickým řešením. Srovnání numerických řešení různých softwarových nástrojů ukazuje často neočekávaný nesoulad mezi výsledky. Podobné výsledky se nepovažují za silný důkaz spolehlivosti řešení. Dvě různá numerická řešení lze porovnat pouze na základě analýzy citlivosti řešení na změnu hlavních vstupů při ověření citlivosti na velikost zvolené sítě (Wald a kol., 2014).

Pro zachování jednoduchosti nemusí verifikační příklad nutně vycházet z praktických otázek. Slouží k ověření výpočetních modelů, které řeší určitý jev. Kritická je volba modelu materiálu. Modely skutečných konstrukčních materiálů se všemi požadovanými nelinearitami umožňují pouze přibližná řešení. Najít vhodnou rovnováhu mezi jednoduchostí a praktickým uplatněním řešeného příkladu je obtížné. Vhodným řešením je hierarchický přístup. Připraví se soubor verifikačních příkladů, od jednoduchých příkladů s analytickým řešením po složitější příklady, které jsou již bližší praxi. Součástí verifikačního příkladu jsou úplná vstupní data, která jsou přehledně doložena. Všechny předpoklady jako jsou vlastnosti materiálu, okrajové podmínky, rozložení teploty, zatížení, velké/malé deformace a posunutí musí být jasně identifikovány. Pro validační příklady by měla být pro srovnání s experimentem uvedena všechna měření a podrobný popis zkušební postupu (Wald a kol., b, 2014).

Numerické verifikační příklady vždy obsahují studii citlivosti volby sítě, která prokáže asymptotickou konvergenci sledované veličiny. Na nejméně třech řešeních se dokládá vhodná přesnost zvoleného dělení na prvky. Pro výpočty metodou konečných prvků se doporučuje ověřit Grid Convergence Index (GCI), která využívá Richardsonovu extrapolaci (Roache, 1998). Při ověření lze využít i jiných prvků, např. prvků 3D pro ověření prvků 2D nebo prvků s integrací ve více bodech. U výpočtů metodou konečných objemů je studie citlivosti sítě rovněž neopomenutelnou částí ověření modelu.

1.2 Metoda dílčích součinitelů spolehlivosti

1.2.1 Zajištění bezpečnosti

Otázky týkající se bezpečnosti, včetně požární bezpečnosti, jsou v Evropské unii řešeny na národní úrovni a právní požadavky jsou určeny předpisy jednotlivých zemí. V kontextu Evropské unie jako celku jsou požadavky na požární bezpečnost založeny na nařízení EU č. 305/2011. Dokument Evropského parlamentu a Rady stanoví harmonizované podmínky pro uvádění stavebních výrobků na trh jako základní požadavek na stavební práce. V příloze I této směrnice jsou shrnuty

základní požadavky na konstrukční odolnost a stabilitu a požární bezpečnost. Stavební práce musí být navrženy a zhotoveny tak, aby v případě výskytu požáru byla zajištěna nosnost konstrukce po požadované dobu, bylo zabráněno rozvoji a šíření požáru a kouře uvnitř budovy, bylo zabráněno šíření požáru do sousedních nemovitostí, aby mohly osoby opustit budovu nebo se zachránit jinými možnostmi, a aby byla zajištěna bezpečnost při práci záchranných týmů.

Zatímco požadavky jsou národní, pro jejich zajištění se využívá mezinárodních znalostí v evropských/celosvětových experimentálních a návrhových normách. Požáry se považují za první mimořádné zatížení a požadavky na jejich modelování i obecné zásady pro použití pokročilých modelů jsou shrnuty ČSN EN 1991-1-2:2002. Přestup tepla do konstrukce a návrh konstrukce je předmětem jednotlivých materiálově orientovaných norem ČSN EN 199x-1-2:200x. K problematice validace a verifikace v požárním navrhování se v Evropě i v zámoří připravují a do praxe zavádí národní normy, které vychází z mezinárodních ISO/TR 15656:2003 a ISO/FDIS 16730:2008.

Současné návrhové normy využívají koncepce mezních stavů ČSN EN 1990:2015. Koncepce umožňuje probabilisticky zajistit společensky tolerované riziko selhání navrhované konstrukce. Přednostně se využívají dílčí součinitele spolehlivosti, které pro levou stranu rovnice spolehlivosti, pro odezvu konstrukce od zatížení, zavádí dílčí součinitele spolehlivosti zatížení a pro pravou stranu, pro únosnost konstrukce, zavádí dílčí součinitele spolehlivosti materiálu a konstrukčních prvků. Lze využít i návrh úplným pravděpodobnostním výpočtem. Ten se obecně považuje za nejpresnější, ale také za nejpracnější i méně bezpečný. Pravděpodobnostní charakteristiky vstupů a jejich citlivost na návrh není známa a u složitých modelů může vézt k nepřijatelným pochybením. Dílčí součinitele spolehlivosti zahrnují stoleté inženýrské poznatky praxe při rozvoji modelování.

1.2.2 Podstata metody dílčích součinitelů

Většina národních i mezinárodních norem pro navrhování konstrukcí včetně evropských norem Eurokódu využívá metodu dílčích součinitelů v návaznosti na koncepci mezních stavů. Podstatou metody dílčích součinitelů je ověření, že konstrukce splňuje požadovanou podmínku spolehlivosti, např. podmínku, že odolnost konstrukce je větší než příslušný účinek zatížení. V podmínce pro zatížení F to jsou materiálové vlastnosti X a geometrické údaje a jejich příslušné návrhové hodnoty F_d , X_d a a_d . Stanovené podmínky spolehlivosti musí být splněny ve všech návrhových situacích a vzhledem ke všem mezním stavům, tj. žádný mezní stav nesmí být překročen.

Návrhové hodnoty základních veličin F_d , X_d a a_d jsou odvozeny na základě charakteristik těchto veličin, například charakteristických nebo reprezentativních hodnot, dílčích součinitelů γ a kombinačních součinitelů ψ , popřípadě dalších součinitelů. Součinitele γ , ψ se nazývají prvky

spolehlivosti (reliability elements). Pro prvky spolehlivosti jsou v Eurokódech uvedeny doporučené hodnoty i obecné vztahy vycházející z předchozích zkušeností, kalibračních studií a pravděpodobnostních metod teorie spolehlivosti. Ve skriptech (Studnička a kol., 2011) se uvádí hodnoty doporučené technickou komisí TC 250 Evropské komise pro standardizaci CEN v normě ČSN EN 1990:2015.

Metoda dílčích součinitelů přihlíží k vlivům různých nejistot základních veličin i k nejistotám chování konstrukcí právě prostřednictvím různých prvků spolehlivosti a charakteristik základních veličin. Pravděpodobnostní základy metody dílčích součinitelů umožňují efektivní kalibraci prvků spolehlivosti vzhledem k předchozím předpisům a zkušenostem, zobecnění praktických postupů pro ověřování spolehlivosti konstrukcí z nových materiálů i pro neobvyklé mezní stavy. V těchto případech, pro které nejsou zatím stanovena příslušná pravidla pro ověřování spolehlivosti, lze vycházet z obecných pokynů uvedených v ČSN EN 1990:2015 nebo v mezinárodní normě ČSN ISO 2394:2016. Oba dokumenty uvádí podklady postupů podle teorie spolehlivosti v metodě dílčích součinitelů a postupy kalibrace prvků spolehlivosti s využitím pravděpodobnostních metod.

Mezní stavy únosnosti

Zatížení působící v jednotlivých návrhových situacích, např. sněhem, větrem a seizmická zatížení, je třeba stanovit v závislosti na lokálních podmínkách. V souladu s koncepcí mezních stavů přijatou v Eurokódech i v mezinárodních normách ISO se při praktickém navrhování konstrukcí rozlišují dva základní druhy mezních stavů:

- mezní stavy únosnosti,
- mezní stavy použitelnosti.

Pro vybrané návrhové situace se stanoví kritické zatěžovací případy, při požárním navrhování požární scénáře. Zatěžovací případ určuje slučitelné uspořádání zatížení, souboru deformací a imperfekcí, které se mají uvažovat současně. Pro každý kritický zatěžovací případ musí být stanoveny návrhové hodnoty účinků.

Návrhové hodnoty geometrických údajů

Geometrické údaje jsou popsány charakteristickými hodnotami geometrických veličin, u imperfekcí přímo návrhovými hodnotami těchto odchylek. Charakteristické hodnoty geometrických veličin obvykle odpovídají rozměrům uvedeným v projektu. Pokud je to třeba, mohou hodnoty geometrických veličin odpovídat předepsaným kvantilům příslušného statistického rozdělení.

Návrhové hodnoty vlastností materiálu

Vlastnosti materiálu jsou popsány charakteristickými hodnotami, které s předepsanou pravděpodobností nebudou podkročeny. Charakteristická hodnota určité vlastnosti odpovídá stanovenému kvantilu, obvykle s pravděpodobností 0,05, předpokládaného statistického rozdělení této vlastnosti v konstrukci. Materiálové vlastnosti se stanovují z normalizovaných zkoušek za stanovených podmínek. Někdy je nezbytné transformovat výsledky zkoušek na hodnotu, o které se předpokládá, že vystihuje skutečné chování materiálu v konstrukci. Pevnost materiálu může mít dvě charakteristické hodnoty, dolní a horní. Jestliže není dostatek informací o statistickém rozdělení určité vlastnosti, použije se nominální hodnota. Pokud překročení mezního stavu není významně citlivé na proměnlivost uvažované vlastnosti, lze za charakteristickou hodnotu považovat průměr. Charakteristické hodnoty materiálových vlastností X_k jsou uvedeny v přeslušných normách pro jednotlivé konstrukční materiály, tj. v ČSN EN 1992 až 1999. Návrhová hodnota vlastnosti materiálu nebo výrobku X_d se určí ze vztahu:

$$X_d \geq X_{rep} / \gamma_m \quad (1.1)$$

kde γ_m je dílčí součinitel materiálu podle příslušné normy, tj. ČSN EN 1992 až 1999, kterým se zohlední nepříznivé odchylky vlastnosti materiálu od její charakteristické hodnoty a náhodná část převodního součinitele. η je převodní součinitel vystihující účinek doby trvání zatížení, vliv objemu a rozměru, účinky vlhkosti, teploty atd.

Klasifikace zatížení

Zatížení, vlivy prostředí a v mnoha případech rovněž očekávané užité vlastnosti konstrukce jsou obecně závislé na čase, umístění stavby a konkrétních podmínkách, ve kterých konstrukce působí. Tyto okolnosti se uvažují prostřednictvím vybraných návrhových situací charakterizujících určitý časový úsek, očekávaná nebezpečí, podmínky působení a odpovídající mezní stavy konstrukce. Při návrhu se berou v úvahu všechny okolnosti, při kterých se žádá, aby konstrukce plnila svou funkci, a podle toho je nutné stanovit příslušné návrhové situace. Vybrané návrhové situace musí být dostatečně přísné a obsahovat varianty zahrnující všechny předvídatelné podmínky, ve kterých se konstrukce během své výstavby a provozu může vyskytnout. V ČSN EN 1990:2015 se rozlišují čtyři základní návrhové situace:

- trvalé návrhové situace, které se vztahují k podmínkám normálního používání konstrukce,
- dočasné návrhové situace, které se vztahují k dočasným podmínkám, např. během výstavby konstrukce nebo její opravy,
- mimořádné návrhové situace, které se vztahují k výjimečným podmínkám pro konstrukci a její provoz, např. při požáru, výbuchu, nárazu,
- seizmické návrhové situace, které se vztahují k výjimečným podmínkám pro konstrukci při seizmických jevech.

Návrhové hodnoty účinků zatížení

Návrhová hodnota zatížení F_d se vyjadřuje na základě reprezentativních hodnot zatížení F_{rep} , které jsou u stálých a mimořádných zatížení totožné s charakteristickými hodnotami, u proměnných zatížení rozeznávají tři reprezentativní hodnoty:

- kombinační hodnota daná součinem $\psi_0 Q_k$ se používá při ověřování mezních stavů únosnosti a u nevratných mezních stavů použitelnosti,
- častá hodnota daná součinem $\psi_0 Q_k$ se používá při ověřování mezních stavů únosnosti, u kterých se uplatňuje mimořádné zatížení, a při ověřování vratných mezních stavů použitelnosti a
- kvazistálá hodnota daná součinem $\psi_2 Q_k$ se používá při ověřování mezních stavů únosnosti, u kterých se uplatňuje mimořádné zatížení, a při ověřování vratných mezních stavů použitelnosti a dlouhodobých účinků.

Kombinační hodnoty souvisejí s použitím kombinací zatížení, ve kterých je snížena pravděpodobnost současného výskytu nepříznivých hodnot několika nezávislých zatížení. Častá hodnota je stanovena tak, že celková doba, ve které je tato hodnota přestoupena po dobu určitého časového intervalu, je pouze malou část tohoto intervalu (0,01). Kvazistálá hodnota je určena tak, že celková doba, ve které je tato hodnota během uvažovaného časového intervalu přestoupena, je významnou částí uvažovaného intervalu. V běžných případech se volí hodnota 0,5. Kvazistálá hodnota může být rovněž stanovena jako průměrná hodnota v uvažovaném časovém intervalu. U zatížení větrem a zatížení dopravou se kvazistálá hodnota zpravidla uvažuje nulová. Návrhová hodnota zatížení F_d se popisuje vztahem F:

$$F_d \geq \gamma_f \cdot F_{rep} \quad (1.2)$$

kde γ_f je dílčí součinitel zatížení, kterým se přihlíží k možným nepříznivým odchylkám zatížení od reprezentativních hodnot.

Zhodnocením požárního rizika se podle ČSN EN 1993-1-2:2005 určí příslušné požární scénáře a pro ně návrhové požáry. Chování konstrukce závislé na čase a zatížení před mimořádnou situací se neuvažuje. Chování konstrukce po mimořádné situaci se uvažuje u staveb s velkými společenskými náklady na rekonstrukci, např. u tunelů. Pro každý návrhový požární scénář se stanoví návrhový požár v požárním úseku. Návrhový požár se současně uplatní pouze v jednom požárním úseku v budově, pokud není v návrhovém požárním scénáři stanoveno jinak. U konstrukcí, kde se národními předpisy stanoví požadavky na požární odolnost konstrukcí, lze předpokládat, že příslušný návrhový požár je, pokud se nepočítá přesněji, dán normovým požárem. Pokročilé modely požáru mají uvažovat vlastnosti plynu, hmotnostní výměnu a energetickou výměnu.

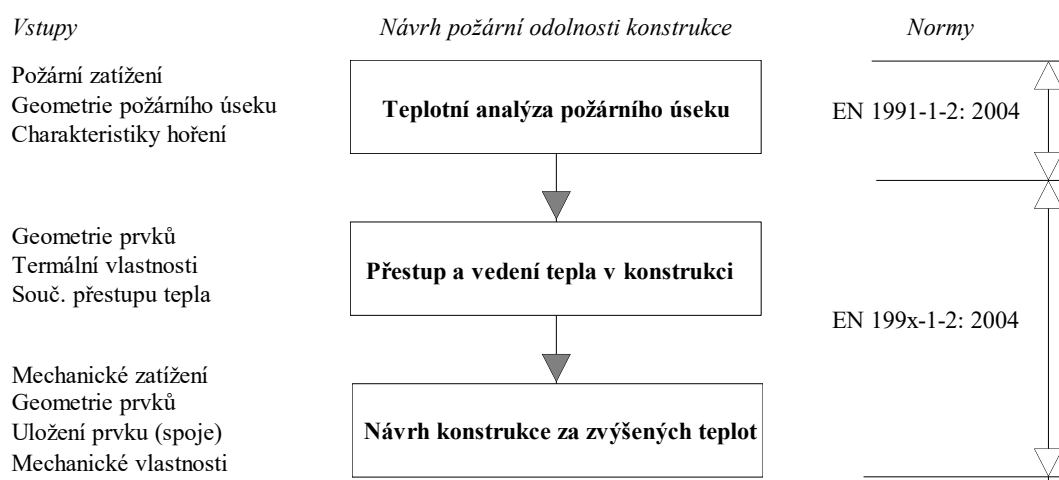
Podle ČSN EN 1993-1-2:2005 lze použít jednozónový model, který předpokládá rovnoměrné, časově závislé rozdělení tepla v požárním úseku. Vhodnější je dvouzónový model,

kteřý předpokládá horní vrstvu s časově závislou tloušťkou a s časově závislou rovnoměrnou teplotou a dolní vrstvu s časově závislou rovnoměrnou a nižší teplotou. Nejpřesnější je výpočet dynamickou analýzou kapalin a plynů, který udává vývoj teploty v úseku, a to zcela časově a prostorově závislým způsobem. Součinitel přestupu tepla prouděním se u pokročilých modelů uvažuje, pokud nejsou k dispozici podrobnější údaje, hodnotou $\alpha_c = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$. Pro přesnější výpočet rozdělení teplot po délce prvku lze v případě lokálního požáru uvažovat použití kombinace výsledků získaných z dvouzónového modelu, z řešení dynamickou analýzou kapalin a plynů a z analytického modelu lokálního požáru. Teplotní pole v blízkosti prvku lze uvažovat z maximálního účinku daného těmito třemi modely požáru (Węgrzyński a Sulik, 2016).

1.2.3 Návrhové hodnoty požární odolnosti

Evropské normy ČSN EN 199x-1-2: 2004 umožňují návrh požární odolnosti konstrukcí. Postupně se řeší teplotní analýza požárního úseku, přestup tepla do konstrukce a vedení tepla v konstrukci a návrh konstrukce za vysokých teplot, viz obrázek 1.4. Teplotní analýza je založena na popisu požárního zatížení, geometrii požárního úseku, vlastnostech ohraničujících konstrukcí a možnosti odvětrání. Návrh konstrukce za vysokých teplot řeší odezvu konstrukce na teplotní a mechanická zatížení (Schleich a kol, 1999).

Podle normy ČSN EN1991-1-2: 2004 se teplotní analýza požárního úseku řeší dynamickou analýzou kapalin a plynů, zónovými modely podle přílohy D, které jsou založeny na energetické bilanci při hoření v požárním úseku, modely pro lokální požáry uvedenými v příloze C a parametrickými teplotními křivkami v příloze A. Zjednodušeně se teplota v požárním úseku odhaduje na nominální teplotní křivce pomocí ekvivalentní doby vystavení účinkům požáru dle přílohy F.



Obrázek 1.4: Hlavní části návrhu konstrukce za požární situace, vstupy do výpočtu, podpora evropskými normami

Výpočetní model konstrukčního systému pro návrh konstrukce za vysokých teplot má vystihovat očekávané chování konstrukce při požáru. Je možno uvažovat s modelem celé konstrukce, kde lze vhodně zohlednit namáhání od teploty. Při výpočtu celé konstrukce je třeba uvážit odpovídající způsob porušení pro zatížení požárem, tepelně závislé vlastnosti materiálů a tuhosti prvků, účinky teplotních roztažení a deformací, nepřímých teplotních zatížení. Místo návrhu celé konstrukce lze pro některé požární situace navrhnout konstrukci po přiměřených částech. K ověření požadavků požární odolnosti postačuje i návrh prvků. Model části konstrukce se sestaví s ohledem na očekávanou teplotní roztažnost a deformace tak, aby interakce s okolní konstrukcí mohla být aproximována časově nezávislými okrajovými podmínkami. Dále je třeba uvážit odpovídající způsob porušení při zatížení požárem, teplotně závislé vlastnosti materiálů, teplotní roztažnost a deformace, tj. uvažuje se s rozdílem teplot po průřezu. Okrajové podmínky, podpory a reakce části konstrukce lze pokládat za neměnné po dobu trvání požáru. Vnitřní síly a reakce pro čas $t = 0$ je možné stanovit z výpočtu pro pokojovou teplotu. Zjednodušení modelů se liší podle jednotlivých materiálů.

Přestup tepla do konstrukce a rozvoj tepla v konstrukci závisí na materiálu. Řeší se zjednodušeně pomocí grafů a tabulek, přírůstkovými metodami a metodou konečných prvků. Pro ocelové konstrukce je přestup tepla do konstrukce shrnut v normě ČSN EN 1993-1-2:2004 kap. 4.2.3 a pro hliníkové konstrukce dokumentu ČSN EN 1999-1-2:2004 kap. 4.2.3. Kovy mají vysokou tepelnou vodivost a vliv šíření tepla v průřezu je možno zanedbat. Pro ocelobetonové konstrukce je v normě ČSN EN 1994-1-2:2004 přestup tepla do konstrukce a šíření tepla uvažováno podle jednotlivých průřezů, např. pro nosníky v kap. 4.3.4.2.2 a pro sloupy v příloze F2. Pro železobetonové konstrukce je rozložení teplot po průřezu řešeno na více úrovních přesnosti v Příloze A normy ČSN EN 1992-1-2:2004. Hlavní výhodou dřevěných konstrukcí je nízká tepelná vodivost dřeva, součinitel tepelné vodivosti měkkého dřeva $\lambda = 0,17 \text{ W m}^{-1}\text{K}^{-1}$. Problematika rozložení teploty po průřezu je nahrazena modely zuhelnatění dřeva.

Ověření požární odolnosti

Požární odolnost lze ověřit z hlediska času

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ} \quad (1.3a)$$

kde $t_{fi,d}$ je návrhová doba požární odolnosti, $t_{fi,requ}$ požadovaná doba požární odolnosti; nebo z hlediska únosnosti

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t} \quad (1.3b)$$

kde $R_{fi,d,t}$ je návrhová hodnota únosnosti prvku při požáru v čase t , $E_{fi,d,t}$ návrhová hodnota příslušných účinků zatížení při požární situaci v čase t ; nebo z hlediska teploty

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d} \quad (1.3c)$$

kde θ_d je návrhová hodnota teploty materiálu; $\theta_{cr,d}$ návrhová hodnota kritické teploty materiálu. Požadavky na konstrukci jsou vyjádřeny pomocí $t_{fi,requ}$; $E_{fi,d,t}$; $\theta_{cr,d}$. Předpokládaná odolnost se značí jako $t_{fi,d}$; $R_{fi,d,t}$; θ_d . Volba hlediska ověřování nemá na spolehlivost návrhu vliv. Požární specialisté upřednostňují posuzování konstrukcí z hlediska času, protože přímo ukazuje rezervy spolehlivosti konstrukce při požáru.

1.2.4 Mechanické zatížení při požáru

Mechanické zatížení při požáru E_d se stanoví podle obecného pravidla pro mimořádné návrhové situace, které je v normě ČSN EN 1990: 2015 zachyceno symbolickým vztahem

$$E_d = E \{G_{k,j}; P; A_d; (\psi_{1,1} \text{ nebo } \psi_{2,1}) Q_{k,1}; \psi_{2,i} Q_{k,i}\} j \geq 1; i > 1 \quad (1.4)$$

kde symbol $G_{k,j}$ označuje stálá zatížení, P předpětí, A_d mimořádné zatížení $Q_{k,1}$ hlavní proměnné zatížení a $Q_{k,j}$ označuje vedlejší proměnná zatížení. Součinitele $\psi_{1,i}$ a $\psi_{2,i}$ pro častou a kvazistálou hodnotu proměnných zatížení jsou uvedeny v tabulce 1.1 převzaté z normy ČSN EN 1990: 2015. Kombinace zatížení v závorkách $\{ \}$ vztahu (1.4) lze vyjádřit výrazem

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + A_d + (\psi_{1,1} \text{ nebo } \psi_{2,1}) Q_{k,1} + \sum_{j > 1} \psi_{2,i} G_{k,j} \quad (1.5)$$

Podle obecných vztahů (1.4) a (1.5) platných pro všechny mimořádné situace se u hlavního proměnného zatížení Q_1 umožňuje volba mezi častou hodnotou $\psi_{1,1} Q_{k,1}$ a kvazistálou hodnotou $\psi_{2,1} Q_{k,1}$ v závislosti na konkrétních podmínkách daného objektu. Pro mimořádnou situaci při požáru se v ČSN EN 1991-1-2: 2004 navrhuje kvazistálá hodnota $\psi_{2,1} Q_{k,1}$. V národní příloze ČSN EN 1991-1-2: 2004 se tato hodnota zpřesňuje a u některých objektů, zejména u halových konstrukcí, u nichž je zatížení sněhem nebo větrem hlavním proměnným zatížením, se doporučuje uvažovat častou hodnotu $\psi_{1,1} Q_1$ místo kvazistálé hodnoty $\psi_{2,1} Q_{k,1}$. Uvedené zpřesnění bylo přijato z toho důvodu, že kvazistálé hodnoty těchto zatížení jsou nulové (podle tabulky 1.1 pro zatížení sněhem a větrem je $\psi_{2,1} = 0$) a byla obava, že by halové konstrukce při požáru nemusely být dostatečně spolehlivé.

Teplotní změny konstrukce při požáru se v závislosti na konstrukčním materiálu projeví účinky teploty na vlastnosti materiálu a jako nepřímá zatížení od teplotních změn. Změny teploty při požáru významně ovlivňují vlastnosti konstrukčních materiálů a zpravidla jsou hlavním součinitelem určujícím nosnou způsobilost konstrukcí. Účinky teploty redukuje především pevnost popřípadě mez kluzu materiálu a přímo se uplatní při stanovení odolnosti konstrukce R . Nevstupují do obecných vztahů (1.4) a (1.5) pro výpočet účinků mechanických zatížení E . Vlivy

teploty na vlastnosti konstrukčních materiálů jsou popsány v samostatných kapitolách x.2 pro jednotlivé materiály.

Tabulka 1.1: Doporučené hodnoty součinitelů ψ pro pozemní stavby (ČSN EN 1990: 2015)

Zatížení	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Kategorie užitných zatížení pro pozemní stavby, viz (ČSN EN 1991-1-1: 2004)			
Kategorie A: obytné plochy	0,7	0,5	0,3
Kategorie B: kancelářské plochy	0,7	0,5	0,3
Kategorie C: shromažďovací plochy	0,7	0,7	0,6
Kategorie D: obchodní plochy	0,7	0,7	0,6
Kategorie E: skladovací plochy	1,0	0,9	0,8
Kategorie F: dopravní plochy, tíha vozidla ≤ 30 kN	0,7	0,7	0,6
Kategorie G: dopravní plochy, 30 kN < tíha vozidla ≤ 160 kN	0,7	0,5	0,3
Kategorie H: střechy	0	0	0
Zatížení sněhem, viz norma (ČSN EN 1991-1-3: 2004)*			
Finsko, Island, Norsko, Švédsko	0,7	0,5	0,2
Ostatní členové CEN, pro stavby umístěné ve výšce $H > 1000$ m n.m.	0,7	0,5	0,2
Ostatní členové CEN, pro stavby umístěné ve výšce $H \leq 1000$ m n.m.	0,5	0,2	0
Zatížení větrem, viz norma (ČSN EN 1991-1-4: 2004)	0,6	0,2	0
Teplota (ne od požáru) pro pozemní stavby, viz norma (ČSN EN 1991-1-5: 2004)	0,6	0,5	0

Poznámka: *) Pro země, které zde nejsou uvedené, se součinitele ψ stanoví podle místních podmínek.

Nepřímá zatížení konstrukce v důsledku roztažení a přetvoření, způsobená teplotními změnami od požáru, vyvolávají síly a momenty, které se při výpočtu účinků zatížení podle obecných vztahů (1.4) a (1.5) berou v úvahu. Nepřímá zatížení od požáru se při výpočtu konstrukce neuvažují, pokud jsou zanedbatelná nebo příznivá, přihlíží se k nim konzervativními předpoklady výpočtu konstrukce a/nebo konzervativními požadavky na požární bezpečnost. Při rozboru vlivu nepřímých zatížení od požáru na nosnou způsobilost konstrukce se mají brát v úvahu vyvolaná teplotní roztažení prvků (např. sloupů ve vícepodlažních rámových konstrukcích s tuhými stěnami), rozdílná přetvoření staticky neurčitých prvků od teploty (např. spojených stropních desek), teplotní gradienty v průřezu vyvolávající vnitřní napětí, přetvoření přilehlých prvků od teploty (např. posun hlavic sloupů způsobený roztažením stropní desky nebo roztažením zavěšených kabelů) a teplotní roztažení prvků působících na prvky mimo požární úsek. Ostatní zatížení uvedená v kombinačních pravidlech (1.4) a (1.5) se uvažují podobně jako při návrhu pro pokojovou teplotu. Základním vodítkem je obecné pravidlo v ČSN EN 1990:2015, že v kombinacích se uvažují pouze ta zatížení, která se mohou během požáru fyzicky vyskytnout. Reprezentativní hodnoty (redukované charakteristické hodnoty) proměnných zatížení se stanoví

podle zásad uvedených v ČSN EN 1990: 2015. Případy, kdy vzhledem k tání není nutno uvažovat zatížení sněhem, se posuzují individuálně. Zatížení vznikající při výrobním procesu, např. brzdné síly jeřábu a snížení užitečného zatížení vlivem hoření se podle normy ČSN EN1991-1-2: 2004 neuvažují.

Současné působení požáru s dalším nezávislým mimořádným zatížením se obvykle neuvažuje. V závislosti na konkrétních podmínkách daného objektu se během požáru mohou uplatnit druhotná zatížení vyvolaná požárem, např. ráz vyvolaný zřícením nosného prvku nebo těžkých strojních vybavení. Při návrhu konstrukce se k těmto nepříznivým jevům přihlíží například tím, že se navrhnu požární stěny, které odolávají vodorovným rázům.

Postup návrhu zatížení lze ukázat na příkladu halového objektu s obchodními plochami, který je poněkud složitější. Necht' u nosného prvku je vítr Q_1 hlavním zatížením a užitečné zatížení Q_2 je vedlejší. Podle obecného vztahu (1.5) pro účinek zatížení při požáru platí:

$$E_{fi,d} = G_k + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \psi_{2,2} \cdot Q_{k,2} = G_k + 0,2 \cdot Q_{k,1} + 0,6 \cdot Q_{k,2} \quad (1.6)$$

Uvažování součinitele ψ plyne z tabulky 1.1. Pro vítr se uvažuje častá hodnota, $\psi_{1,1} = 0,2$, pro užitečné zatížení kvazistálá hodnota, které u obchodních ploch odpovídá součinitel $\psi_{2,2} = 0,6$. Účinek zatížení při pokojové teplotě podle vztahu (6.10) v normě ČSN EN 1990: 2015 je:

$$E_d = \gamma_G \cdot G_k + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,2} \cdot Q_{k,2} = 1,35 \cdot G_k + 1,5 \cdot Q_{k,1} + 1,5 \cdot 0,7 \cdot Q_{k,2} \quad (1.7)$$

Součinitel kombinační hodnoty $\psi_{0,2}$ pro užitečné zatížení obchodních ploch je podle tabulky 1.1 uvažován hodnotou $\psi_{0,2} = 0,7$.

1.2.5 Požární zatížení

Tepelný tok

Energie předávaná částicemi teplejšího tělesa částicím chladnějšího tělesa se nazývá tepelný tok. U pevných a kapalných látek se teplo přenáší vedením (kondukcí). V plynném prostředí se teplo sdílí prouděním (konvekcí) a sáláním (radiací). Tepelné zatížení se udává čistým tepelným tokem \dot{h}_{net} dopadajícím na povrch prvku. Při přenosu tepla na plochu vystavenou účinkům požáru lze čistý tepelný tok \dot{h}_{net} rozdělit na části přenášené prouděním a sáláním:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad \text{ve W/m}^2 \quad (1.8)$$

Podle normy EN 1991-1-2: 2004 se návrhová hodnota tepelné pohltivosti povrchu prvku $\dot{h}_{net,d}$ stanovuje ze vztahu:

$$\dot{h}_{net,d} = \gamma_{n,c} \cdot \dot{h}_{net,c} + \gamma_{n,r} \cdot \dot{h}_{net,r} \quad \text{ve W/m}^2 \quad (1.9)$$

kde $\gamma_{n,c}$, $\gamma_{n,r}$ jsou součinitele pro přepočet národních zkoušek. V ČR se používá $\gamma_{n,c} = 1,0$ a $\gamma_{n,r} = 1,0$. Složka tepelného toku sdílená prouděním se stanoví ze vztahu:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad \text{ve W/m}^2 \quad (1.10)$$

kde α_c je součinitel přestupu tepla prouděním ve $W m^{-2} K^{-1}$; θ_g teplota plynů v blízkosti prvku vystaveného účinkům požáru ve $^{\circ}C$; θ_m povrchová teplota prvku ve $^{\circ}C$. Na straně vystavení požáru se součinitel přestupu tepla prouděním α_c uvažuje pro nominální teplotní křivku a křivku venkovního požáru $\alpha_c = 25 W m^{-2} K^{-1}$; pro parametrické teplotní křivky a dynamickou analýzu plynů $35 W m^{-2} K^{-1}$; pro uhlovodíkovou křivku $50 W m^{-2} K^{-1}$. Na straně odvrácené od požáru se koeficient přestupu tepla prouděním α_c uvažuje při sálání počítaném samostatně hodnotou $4 W m^{-2} K^{-1}$ a při zahrnutí vlivu sálání hodnotou $9 W m^{-2} K^{-1}$. Složka čistého sálavého tepelného toku na jednotku plochy se počítá jako:

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad \text{ve } W/m^2 \quad (1.11)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$. Emisivita požáru se uvažuje obecně jako $\varepsilon_f = 1,0$. Emisivita povrchu prvku se navrhuje konzervativně $\varepsilon_m = 0,8$. Pro uhlíkovou ocel lze počítat $\varepsilon_m = 0,7$, pro nerezové oceli $\varepsilon_m = 0,4$; pro čistý povrch slitin hliníku $\varepsilon_m = 0,3$ a pro hliníkové povrchy opatřené nátěry $\varepsilon_m = 0,8$. V případě prvků vystavených požáru ze všech stran lze teplotu sálání θ_r přibližně nahradit teplotou plynů θ_g kolem tohoto prvku.

Hustota požárního zatížení

Požární zatížení lze charakterizovat návrhovou hustotou $q_{f,d}$, která je definována jako:

$$q_{f,d} = q_{f,k} \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad \text{v } MJ/m^2 \quad (1.12)$$

$q_{f,k}$ je hustota charakteristického požárního zatížení vztažená na podlahovou plochu A_f v MJ/m^2 , m součinitel hoření (u celulózových materiálů se předpokládá $m = 0,8$); δ_{q1} součinitel, vyjadřující nebezpečí vzniku požáru v závislosti na velikosti požárního úseku, viz tabulku 1.2, a δ_{q2} součinitel, který zohledňuje nebezpečí vzniku požáru vlivem druhu provozu, viz tabulku 1.3.

$$\delta_n = \prod_{i=1}^{10} \delta_{ni} \quad (1.13)$$

je součinitel, kterým se do výpočtu zavádí aktivní požární ochrana, tj. aktivní požárně bezpečnostní opatření a zařízení jako jsou samočinná hasicí zařízení, elektronická požární signalizace, detektory, hasičské jednotky aj., viz tabulku 1.4. Pro běžnou požární ochranu, jako jsou bezpečné přístupové cesty, technické prostředky požární ochrany, zařízení pro odvod kouře ze schodišť, které mají být vždy k dispozici, se hodnoty δ_{ni} v tabulce uvažují rovny 1,0. Pokud však běžná požární ochrana není předpokládána, uvažuje se hodnota δ_{ni} rovna 1,5. Pokud jsou schodiště v případě požárního poplachu přetlakově větrána, lze součinitel δ_{n8} z tabulky uvažovat roven 0,9. Vychází se z předpokladu, že jsou splněny požadavky příslušných evropských norem na výše uvedená zařízení.

Vliv součinitele aktivní požární ochrany δ_n na průběh teploty při požáru v kanceláři o rozměrech 7 x 11 m s oknem o velikosti 1,3 x 9 m pro návrhovou hustotu požárního zatížení

$q_{f,k} = 511 \text{ MJ/m}^2$ je znázorněn na obrázku 1.5. Křivky jsou vypočteny zónovým modelem v programu OZone V.2.2.

Tabulka 1.2: Součinitel nebezpečí vzniku požáru velikostí požárního úseku δ_{q1}

Podlahová plocha úseku A_f v m^2	25	250	2 500	5 000	10 000
Nebezpečí vzniku požáru δ_{q1}	1,10	1,50	1,90	2,00	2,13

Poznámka: V tabulce lze mezilehlé hodnoty lineárně interpolovat.

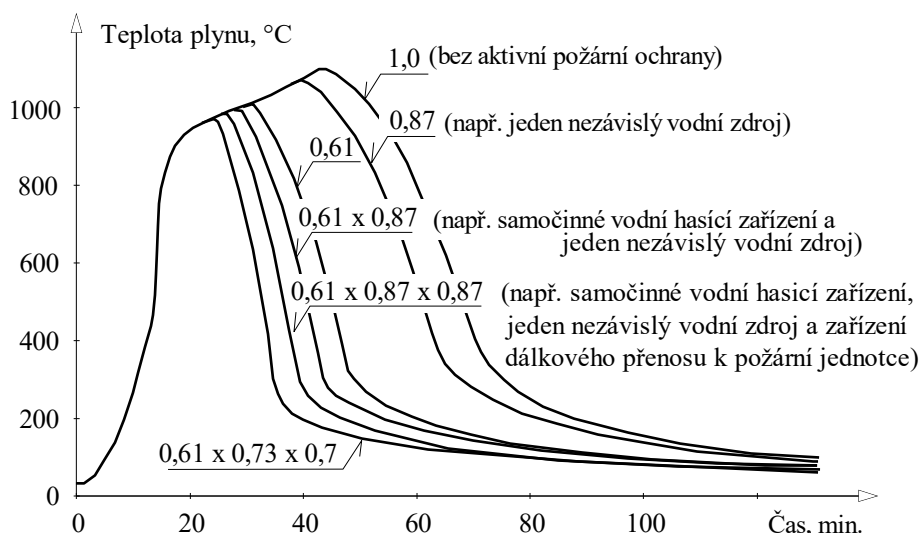
Tabulka 1.3: Součinitel nebezpečí vzniku požáru vlivem druhu provozu δ_{q2}

Příklady provozu	Nebezpečí vzniku požáru δ_{q2}
Umělecké galerie, muzea, bazény	0,78
Kanceláře, byty, hotely, papírenský průmysl	1,00
Výroba strojů a motorů	1,22
Chemické laboratoře, lakovny	1,44
Výroba zábavné pyrotechniky nebo barev	1,66

Tabulka 1.4: Součinitel aktivní požární ochrany δ_{ni}

Aktivní požárně bezpečnostní opatření			δ_{ni}	
Samočinné hasicí zařízení	Samočinné vodní hasicí zařízení	δ_{n1}	0,61	
	Nezávislé vodní zdroje	žádný	δ_{n2}	1,00
		jeden	δ_{n2}	0,87
		dva	δ_{n2}	0,70
Samočinné požární hlásiče	Elektrická požární signalizace	tepelné	δ_{n3}	0,87
		kouřové	δ_{n4}	nebo 0,73
	Zařízení dálkového přenosu k požární jednotce	δ_{n5}	0,87	
Manuální hašení požáru	Závodní požární jednotka	δ_{n6}	0,61	
	Externí (veřejná) požární jednotka	δ_{n7}	nebo 0,78	
	Bezpečné přístupové cesty	δ_{n8}	0,9 nebo 1,0 nebo 1,5	
	Technické prostředky požární ochrany	δ_{n9}	1,0 nebo 1,5	
	Zařízení pro odvod kouře	δ_{n10}	1,0 nebo 1,5	

Poznámka: V ČR se nezapočítává veřejná požární jednotka.



Obrázek: 1.5 Vliv aktivní požární ochrany na průběh teploty při požáru v kanceláři ($q_{f,k} = 511 \text{ MJ/m}^2$)
7 x 11 m s oknem 1,3 x 9 m, řešeno programem OZone V.2.2

Charakteristické požární zatížení

Požární zatížení lze stanovit z výhřevnosti hořlavých materiálů v požárním úseku nebo z hustoty požárního zatížení pro daný provoz. Charakteristické požární zatížení $Q_{f,k}$ se stanoví z hodnoty čisté výhřevnosti H_{ui} v MJ/kg pomocí vztahu:

$$Q_{f,k} = \sum M_{k,i} \cdot H_{ui} \cdot \psi_i = \sum Q_{f,i,k} \quad \text{v MJ} \quad (1.14)$$

kde $M_{k,i}$ je množství hořlavého materiálu v kg a ψ_i součinitel pro stanovení chráněného požárního zatížení. Pro materiál v nehořlavých požárně odolných obalech lze uvažovat $\psi_i = 0$. Hustota charakteristického požárního zatížení $q_{f,k}$ na jednotku plochy je definována:

$$q_{f,k} = Q_{f,k} / A \quad \text{v MJ/m}^2 \quad (1.15)$$

kde A je podlahová plocha, A_f plocha požárního úseku nebo referenčního prostoru, nebo vnitřní povrchová plocha a A_t plocha požárního úseku pro stanovení $q_{f,k}$ nebo $q_{t,k}$. Stálá požární zatížení, u kterých se nepředpokládá změna během životnosti objektu, se mohou uvažovat hodnotami, které jsou výsledkem odborného rozboru. Proměnná požární zatížení, která se mohou během životnosti objektu měnit, se doporučují vyjádřit hodnotami, u nichž se očekává, že nebudou v 80 % doby překročeny (80 % kvantil).

Hodnoty čisté výhřevnosti se stanovují podle normy ČSN EN ISO 1716: 2003. Vliv vlhkosti materiálu lze uvažovat takto:

$$H_u = H_{u0} \cdot (1 - 0,01 \cdot u) - 0,025 \cdot u \quad \text{v MJ/kg} \quad (1.16)$$

kde u je vlhkost, vyjádřená jako procentní podíl hmotnosti v suchém stavu; H_{u0} hodnota čisté výhřevnosti suchého materiálu. Hodnoty čisté výhřevnosti některých pevných látek, kapalin a plynů jsou uvedeny v tabulce 1.5.

Tabulka 1.5 Hodnoty čisté výhřevnosti H_u v MJ/kg hořlavých materiálů pro výpočet požárního zatížení

Hodnoty čisté výhřevnosti H_u v MJ/kg pro hořlavé materiály			
Pevné látky	Dřevo		17,5
	Jiné celulózové materiály	oděvy, korek, bavlna, papír, lepenka, hedvábí, sláma, vlna	20
	Uhlíkaté látky	antracit, dřevěné uhlí, uhlí	30
Chemické látky	Parafínová řada	methan, ethan, propan, butan	50
	Olefinová řada	ethylen, propylen, butylen	45
	Aromatická řada	benzen, toluen	40
	Alkohol	methanol, ethanol, ethylalkohol	30
	Paliva	benzin, petrolej, nafta	45
	Čisté uhlovodíkové plasty	polyethylen, polystyren, polypropylen	40
Ostatní výrobky	ABS (plast)		35
	Polyester (plast)		30
	Polyizokyanát a polyuretan (plast)		25
	Polyvinylchlorid, PVC (plast)		20
	Živice, asfalt		40
	Kůže		20
	Linoleum		20
	Gumové pneumatiky		30

Poznámka: Hodnoty uvedené v této tabulce neplatí pro výpočet energetického obsahu paliv.

Provozy lze klasifikovat podle hustoty požárního zatížení, vztahující se k podlahové ploše, a pro návrh využít její charakteristické hodnoty $q_{f,k}$ v MJ/m², jak uvádí tabulka 1.6. Hodnoty hustoty požárního zatížení uvedené v tabulce 1.6 jsou platné, je-li součinitel nebezpečí vzniku požáru vlivem druhu provozu δ_{q2} roven jedné, viz tabulku 1.3. Pravděpodobnost dosažení hustoty požárního zatížení lze ve výpočtech zohlednit pomocí 80% kvantilu Gumbelova rozdělení, viz normu ČSN EN 1993-1-2: 2004. Tímto rozdělením se popisuje pravděpodobnost nejvyšších hodnot, viz (Čermák 1993). Distribuční funkci Gumbelova rozdělení:

$$F_X(x) = \exp[-\exp(-x)] \quad (1.17)$$

lze pro výpočet hodnoty v požadovaném kvantitu vyjádřit parametry α a μ ve tvaru:

$$F_X(x) = \exp[-\exp(-\alpha(x - \mu))] \quad (1.18)$$

Pro kvantil, zde 80 %, lze funkci vyjádřit jako:

$$x_{0,8} = [-\ln(-\ln 0,8)]/\alpha + \mu \quad (1.19)$$

Parametry funkce se určí ze vztahu:

$$\alpha = [-\ln(-\ln 0,8)] - 0,57722/(x_{0,8} - E_x) \quad (1.20)$$

Respektive:

$$\mu = E_x - 0,57722/\alpha \quad (1.21)$$

pro průměrnou hodnotu, která se vypočte jako:

$$E_x = \frac{0,57722}{\alpha} + \mu \quad (1.22)$$

Tabulka 1.6 Hustota požárního zatížení $q_{f,k}$ v MJ/m² pro různé provozy (ECCS, 2001)

Provoz	80% kvantil	Průměr	Odchylka	90% kvantil	95% kvantil	Parametry α/μ Gumbelova roz.
Byty	948	780	234	1085	1217	0,0054782/674,9
Nemocnice (pokoje)	280	230	69	320	359	0,018578/198,7
Hotely (pokoje)	377	310	93	431	484	0,013784/288,1
Knihovny	1 824	1 500	450	2087	2340	0,002849/1297,3
Kanceláře	511	420	126	584	655	0,010174/369,1
Školní třídy	347	285	85,5	397	445	0,014993/246,2
Nákupní centrum	730	600	180	835	936	0,007122/518,7
Divadla (kina)	365	300	90	417	468	0,014243/259,3
Doprava (prostory pro veřejnost)	122	100	30	139	156	0,04273/86,2

Poznámka: % hodnoty jsou stanoveny za předpokladu Gumbelova rozdělení.

Rychlost uvolňování tepla

Rozvoj a útlum požáru je výrazně ovlivněn uvolňováním tepla v čase. Ve fázi rozvoje požáru lze rychlost uvolňování tepla popsat vztahem:

$$Q = 10^6 \cdot (t/t_\alpha)^2 \quad (1.23)$$

kde Q je rychlost uvolňování tepla ve W; t čas v s; t_α doba potřebná pro dosažení rychlosti uvolňování tepla 1 MW. Rychlost rozvoje požáru, doba t_α a nejvyšší rychlost uvolňování tepla RHR_f jsou uvedeny v tabulce 1.7 pro jednotlivé provozy.

Tabulka 1.7 Rychlost rozvoje požáru a RHR_f pro jednotlivé provozy

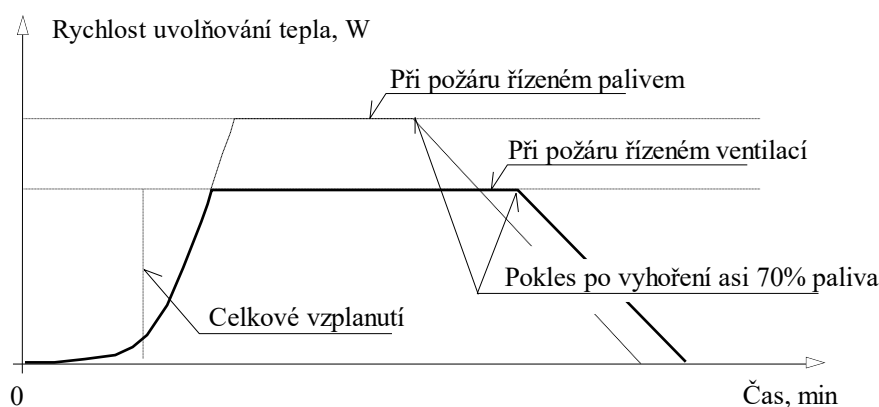
Provoz	Rychlost rozvoje požáru	t_α v s	RHR_f v kW/m ²
Byty	Střední	300	250
Nemocnice (pokoje)	Střední	300	250
Hotely (pokoje)	Střední	300	250
Knihovny	Velká	150	500
Kanceláře	Střední	300	250
Školní třídy	Střední	300	250
Nákupní centrum	Velká	150	250

Divadla, kina	Velká	150	500
Doprava (prostory pro veřejnost)	Malá	600	250

Hodnoty rychlosti rozvoje požáru a RHR_f podle tabulky 1.7 lze použít, pokud je součinitel δ_{q2} roven 1,0. Při velmi rychlém šíření požáru odpovídá $t_\alpha = 75$ s. Fáze rozvoje končí vodorovnou částí křivky, která odpovídá ustálenému stavu a rychlosti uvolňování tepla Q dané $(RHR_f A_f)$, kde A_f je největší plocha požáru v m^2 , kterou je požární úsek v případě rovnoměrně rozděleného požárního zatížení. V případě lokálního požáru je tato plocha dána skutečnou plochou paliva. RHR_f je největší rychlost uvolňování tepla, produkovaná 1 m^2 požáru řízeného palivem v kW/m^2 . Vodorovná část křivky končí při útlumu hoření, při dohořívání, viz obrázek 1.6. Útlum hoření se vyjadřuje lineárním poklesem teplot, který začíná po vyhoření 70 % požárního zatížení a končí po jeho úplném vyhoření. Při požáru řízeném ventilací se podle obsahu dostupného kyslíku úroveň vodorovné části křivky snižuje. Snižování lze stanovit výpočetním programem, vycházejícím z jednozónového modelu, nebo pomocí zjednodušeného vztahu:

$$Q_{max} = 0,10 \cdot m \cdot H_u \cdot A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} \quad \text{v MW} \quad (1.24)$$

kde A_v je plocha otvorů v m^2 ; h_{eq} střední výška otvorů v m; H_u hodnota čisté výhřevnosti dřeva $H_u = 17,5$ MJ/kg; m součinitel hoření $m = 0,8$. Podle českých dokumentů (ČSN 73 0802: 2000) se hořlavé látky v posuzovaném prostoru určovaly nahodilým a stálým požárním zatížením, které se vztahovalo na jednotku půdorysné plochy a vyjadřovalo ekvivalentním množstvím dřeva o výhřevnosti 16,5 MJ/kg. V případě, že je při požáru řízeném ventilací největší hodnota rychlosti uvolňování tepla snížena, protahuje se křivka rychlosti uvolňování tepla podle energie uvolněné z požárního zatížení.



Obrázek 1.6: Rychlost uvolňování tepla během požáru

1.3 Zjednodušené modely

1.3.1 Analytické modely prostorového požáru

Teplotu v požárním úseku lze předpovědět analytickými modely pro lokální požár, pro požár v celém prostoru, pro ohřev prvků vně požárního úseku při prostorovém požáru nebo pro putující požár (Horová, 2015). Analytické modely využívají pro popis požáru v celém prostoru hlavních fyzikálních závislostí popisujících hoření. Parametrické modely pro popis rozvoje teploty v požárním úseku berou v úvahu požární zatížení, tepelně technické vlastnosti ohraničujících konstrukcí, otvory v požárním úseku případně i rychlost rozvoje požáru. Modely předpokládají rovnoměrné rozložení teploty v požárním úseku, což je určuje k popisu rozvoje teploty v požárních úsecích omezené velikosti po celkovém vzplanutí v prostoru. Vstupem do výpočtu jsou hustota požárního zatížení, největší rychlost uvolňování tepla a tepelné ztráty ohraničujících konstrukcí. Vztahy pro ohřev prvků vně požárního úseku při prostorovém požáru jsou obecně shrnuty v příloze ČSN EN 1991-1-2:2004 a pro ocelové konstrukce rozvedeny v ČSN EN 1993-1-2:2004.

Prostorové vzplanutí

Pro vyšetřování rozvoje požáru lze analyticky přibližně odhadnout podmínky pro prostorové vzplanutí (flashover) (Drysdale, 1996). Předpokladem vzplanutí je dostatek paliva a odpovídající ventilace. Horké plyny se drží u stropu a geometrie místnosti umožňuje záření tepla do prostoru paliva, jehož teplota stoupne a nastane prostorové vznícení. Na problematiku byla zaměřena řada experimentů (Walson a Thomas, 1995) a předpoklady, že teplota horní vrstvy překročí 400 až 600 °C a rychlost uvolňování tepla na úrovni podlahy 20 kW/m², byly zpřesněny. Pro místnost s jedním oknem lze stanovit kritickou hodnotu tepla pro odhad prostorového vzplanutí jako:

$$Q_{fo} = 0,0078 \cdot A_t + 0,378 \cdot A_v \cdot \sqrt{h_v} \quad (1.25)$$

Dobu, za kterou požár dosáhne vzplanutí, lze odhadnout, viz (Buchanan, 2017), jako:

$$t_{fo} = t_\alpha \cdot \sqrt{Q_{fo}} \quad (1.26)$$

kde t_α je doba potřebná pro dosažení rychlosti uvolňování tepla 1 MW, která je pro jednotlivé druhy provozu definována v normě ČSN EN 1991-1-2: 2004 tabulka E5.

Analytické modely

Analytické modely prostorového požáru nazývané jako parametrické teplotní křivky jsou založeny na pracích Kawagoe (Kawagoe 1958), který k závislosti teploty v požárním úseku na čase, tj. k nominální teplotní křivce, přidal rovnováhu tepla v požárním úseku, kterou lze vyjádřit ve tvaru:

$$\dot{q}_C = \dot{q}_L + \dot{q}_W + \dot{q}_R + \dot{q}_B \quad (1.27)$$

kde \dot{q}_C je teplo uvolněné při hoření, \dot{q}_L ztráta tepla sáláním a odvodem plynů otvory, \dot{q}_W ztráta tepla v ohraničujících konstrukcích, \dot{q}_R ztráta tepla sáláním ohraničujících konstrukcí a \dot{q}_B teplo akumulované v plynu v požárním úseku. Předpokládá se, že palivo plně vyhoří uvnitř požárního úseku, teplota plynů bude rovnoměrná a prostup tepla ohraničujícími konstrukcemi je rovnoměrný v čase i prostoru a konstantní.

Teplo uvolněné při hoření se popisuje hustotou požárního zatížení, tj. energii, která se uvolňuje při hoření, na jednotku plochy. Požární zatížení sestává z částí konstrukce, např. stěny a podlaha, stálé zatížení, a z vybavení, např. nábytek, proměnné zatížení. Rychlost uvolňování tepla RHR se liší u požáru řízeného ventilací a u požáru řízeného palivem. Pokud je dostatečný přívod kyslíku, požár je řízen palivem. Omezený přívod vzduchu otvory v ohraničujících konstrukcích snižuje rychlost uvolňování tepelné energie. Kawagoe popsal rychlost hoření u požáru řízeného ventilací s jedním okenním otvorem v místnosti jako:

$$\dot{m} = 0,092 \cdot A_v \cdot \sqrt{h_v} \quad \text{v kg/s} \quad (1.28)$$

kde A_v je plocha otvoru v m^2 a h_v jeho výška v m. Přestože rychlost závisí na tvaru místnosti a poměru plochy okenních otvorů a plochy stěn, stala se tato závislost základem pro analytický popis požáru po celkovém vzplanutí. Odpovídající rychlost uvolňování tepla při rovnoměrném hoření lze vypočítat jako:

$$Q_{vent} = \dot{m} \cdot H_{u,i} \quad \text{v MW} \quad (1.29)$$

kde $H_{u,i}$ je čistá výhřevnost. Délku požáru lze vyjádřit jako:

$$t_b = E / Q_{vent} \quad (1.30)$$

kde E je energie v palivu, kterou lze hořením uvolnit v MJ. Ventilace v požárním úseku se zohledňuje koeficientem otvorů $O = A_v \cdot \sqrt{h_{eq}} / A_t \text{ v m}^{1/2}$, kde h_{eq} je vážený průměr výšky okenních otvorů ve všech stěnách v m a A_t celková plocha ohraničujících konstrukcí (podlahy, stěn a stropu) včetně otvorů v m^2 . Jestliže se tento výraz násobí tíhovým zrychlením g , získá se rychlost plynů procházejících otvory. Experimenty potvrdily, že se při zvětšování otvorů dosáhne hodnoty, při níž je již rychlost hoření na ventilaci nezávislá. Rychlost hoření je pak podmíněna charakterem a povrchem paliva. Požáry řízené palivem se dělí na pomalé, přibližně $t_{lim} = 25$ min, průměrné, 20 min a krátké, 15 min. Rychlost uvolňování tepla lze určit jako:

$$Q_{fuel} = E / t_{lim} \quad (1.31)$$

Není-li délka požáru známa, odhaduje se rychlost uvolňování tepla RHR z množství paliva a teploty plynů v požárním úseku. Rozvoj teploty v požárním úseku závisí též na ztrátách tepla plynů. Ke ztrátám dochází na hranicích úseku vlivem sdílení tepla prouděním (konvekce), sáláním (zářením, radiací) a vedením (kondukcí). Ztráty se vyjadřují pomocí koeficientu povrchů

$b = \sqrt{(\rho \cdot c \cdot \lambda)}$ v $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-0,5} \text{K}^{-1}$, kde ρ je hustota v kg m^{-3} , c měrné teplo v $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ a λ tepelná vodivost ve $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$.

Analytický popis jednotlivých členů vztahu (1.27) byl řadou autorů zpřesňován. V 70. letech 20. století publikovali (O Connor a Martin, 1998) analytické modely prostorových požárů, založené na konvenčních rovnicích rovnováhy hmotnosti a energie. Zjednodušení výpočtu nabízejí křivky nazvané BFD (Barnett, 2002), ve kterých popisuje celý průběh, ohřev i ochlazování, pouze jedna rovnice. Část křivky s ochlazováním je popsána nelineárně. Křivky, které jsou používány v Austrálii, vznikaly za pomoci dat získaných z 142 zkoušek požáru. Pettersson (Pettersson a kol., 1973) upravil rovnici podle výsledků vlastních experimentů a matematicky vyjádřil ve formě vhodné pro praktické použití. Jím navržené řešení vyžaduje numerickou integraci, při ručním výpočtu se v praxi pomocné parametry odečítají z grafů. V české praxi se parametrické předpovědi využívalo od roku 1986 v normě Požární bezpečnost staveb, Výrobní objekty. Její poslední verze ČSN 73 0804:2010 ji již neobsahuje.

Analytický model v ČSN EN 1991-1-2: 2004

ČSN EN 1991-1-2:2004 uvádí v příloze A parametrickou teplotní křivku, která zohledňuje poslední experimenty a hořlavost současných materiálů. Předpovědi lze využít pro požární úseky do podlahové plochy 500 m^2 , bez otvorů ve střeše a s největší výškou požárního úseku 4 m . Křivka vychází z nominální normové křivky. Popisuje se výrazem:

$$\theta_g = 1325 \cdot (1 - 0,324 e^{-0,2 \cdot t^*} - 0,204 e^{-1,7 \cdot t^*} - 0,472 e^{-19 \cdot t^*}) + 20 \quad (1.32)$$

kde θ_g je teplota plynů v požárním úseku ve $^{\circ}\text{C}$. Náhradní čas t^* v hod zohledňující vliv otvorů a kvality povrchů se stanoví takto:

$$t^* = t \cdot \Gamma \quad (1.33)$$

kde vliv otvorů a kvality povrchů se uvažuje součinitelem:

$$\Gamma = \frac{(O/O_{\text{ref}})^2}{(b/b_{\text{ref}})^2} \quad (1.34)$$

Koeficient otvorů O se počítá jako:

$$O = A_v \cdot \sqrt{h_{\text{eq}}} / A_t \quad \text{v } \text{m}^{1/2} \quad (1.35)$$

kde A_v je celková plocha svislých otvorů, h_{eq} vážený průměr výšek oken, A_t celková plocha konstrukcí (podlahy, stěn a stropu, včetně otvorů). Koeficient otvorů lze uvažovat v rozsahu $0,02 \leq O \leq 0,20$. Referenční koeficient otvorů se uvažuje $O_{\text{ref}} = 0,04$. Koeficient povrchů:

$$b = \sqrt{(\rho \cdot c \cdot \lambda)} \quad \text{v } \text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1} \quad (1.36)$$

je možno měnit v rozsahu $100 \leq b \leq 2\,200$. Referenční koeficient povrchů byl stanoven pro požární úsek z lehkého betonu jako $b_{\text{ref}} = 1160 \text{ m}^{1/2}$. Součinitel vlivu otvorů a kvality povrchů se upravuje v normě ČSN EN 1991-1-2:2004 jako:

$$\Gamma = \frac{(O/O_{\text{ref}})^2}{(b/b_{\text{ref}})^2} = \frac{(O/0,04)^2}{(b/1160)^2} = \frac{(O/b)^2}{(0,04/1160)^2} \quad (1.37)$$

Pro $\Gamma = 1,0$ se křivka do teploty 1300 °C blíží nominální normové teplotní křivce.

Nejvyšší teplota

Součástí modelu je předpověď času, při němž se dosáhne nejvyšší teploty požáru θ_{max} . Předpokládá se, že je požár řízen ventilací nebo palivem. V případě, že je požár řízen ventilací počítá se čas k dosažení nejvyšší teploty takto

$$t_{\text{max,fuel}} = 0,2 \cdot 10^{-3} q_{\text{t,d}} / O$$

kde $q_{\text{t,d}}$ je návrhová hodnota hustoty požárního zatížení. V případě, že je požár řízen palivem, dosáhne se nejvyšší teploty v čase t_{lim} . Při malé rychlosti rozvoje požáru, viz tabulku 1.7, se předpokládá čas k dosažení nejvyšší teploty při požáru řízeném palivem $t_{\text{lim}} = 25$ min, při střední rychlosti $t_{\text{lim}} = 20$ min a při velké rychlosti $t_{\text{lim}} = 15$ min. Modelování řízení požáru palivem nebo ventilací je umožněno zápisem času k dosažení nejvyšší teploty ve tvaru:

$$t_{\text{max}} = \max [t_{\text{lim}}; (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{\text{t,d}} / O)] \quad (1.38)$$

Ve výpočtu se uvažuje náhradní čas plného rozvinutí požáru t_{max}^* , který se stanoví jako:

$$t_{\text{max}}^* = t_{\text{max}} \cdot \Gamma \quad (1.39)$$

V případě, že je požár řízen palivem $t_{\text{max}} = t_{\text{lim}}$, počítá se náhradní čas ze vztahu:

$$t^* = t \cdot \Gamma_{\text{lim}}$$

kde se součinitel vlivu otvorů a kvality povrchů pro požár řízený palivem Γ_{lim} uvažuje, obdobně vztahu (1.33), jako:

$$\Gamma_{\text{lim}} \leq \frac{(O_{\text{lim}}/b)^2}{(0,04/1160)^2} \quad (1.40)$$

Nejvyšší účinný koeficient otvorů se vypočítá pro danou hustotu požárního zatížení $q_{\text{t,d}}$ z výrazu:

$$O_{\text{lim}} = 0,1 \cdot 10^{-3} / t_{\text{lim}} \quad (1.41)$$

Hustota požárního zatížení, vztažená k celé ploše povrchu požárního úseku, se stanoví jako:

$$q_{\text{t,d}} = q_{\text{f,d}} \cdot A_{\text{f}} / A_{\text{t}} \quad (1.42)$$

kde $q_{\text{f,d}}$ je hustota požárního zatížení, A_{t} plocha ohraničujících konstrukcí úseku a A_{f} plocha podlahy.

V případech malých požárních zatížení vzhledem k ventilaci požárního úseku při palivem řízeném požáru se součinitel vlivu otvorů a kvality povrchů modifikuje, aby lépe vystihoval okrajové podmínky při hoření. V normě ČSN EN 1991-1-2: 2004 se pro

$$O > 0,04 \text{ a } q_{\text{t,d}} < 75 \text{ a } b < 1160 \quad (1.43)$$

upravuje součinitel vlivu otvorů a kvality povrchů Γ_{lim} součinitelem:

$$k = 1 + \left(\frac{0 - 0,04}{0,04} \right) \cdot \left(\frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \cdot \left(\frac{1160 - b}{1\ 160} \right) \quad (1.44)$$

Chladnutí

V první části chladnutí požárního úseku ještě dohořívá zbylé palivo. Po jeho vyhoření závisí pokles teploty jen na akumulované tepelné energii, na ventilaci a teplotní charakteristice požárního úseku. K dispozici jsou analytické modely chladnutí, viz (Reichel, 1977). Na základě dokumentace skutečných požárů byl do normy ČSN EN 1991-1-2: 2004 převzat zjednodušený lineární popis poklesu teploty. Pro krátké požáry se chladnutí charakterizuje klesáním teploty 625 °C za hod

$$\text{pro } t^*_{\max} \leq 0,5 \quad \text{jako } \theta_g = \theta_{\max} - 625 \cdot (t^* - t^*_{\max} \cdot x) \quad (1.45)$$

Pro delší požáry se předpokládá klesání 250 °C za hod

$$\text{pro } 0,5 < t^*_{\max} < 2 \quad \text{jako } \theta_g = \theta_{\max} - 250 \cdot (3 - t^*_{\max}) (t^* - t^*_{\max} \cdot x) \quad (1.46)$$

$$\text{pro } t^*_{\max} \geq 2 \quad \text{jako } \theta_g = \theta_{\max} - 250 \cdot (t^* - t^*_{\max} \cdot x) \quad (1.47)$$

kde t^* je dáno v (1.33) a

$$t^*_{\max} = (0,2 \cdot 10^{-3} \cdot q_{t,d} / 0) \cdot \Gamma \quad (1.48)$$

Jestliže $t_{\max} > t_{\lim}$, počítá se pro požár řízený ventilací s náhradním časem t^*_{\max} , tj. dosazuje se

$$x = 1,0 \quad (1.49)$$

jestliže $t_{\max} = t_{\lim}$, uvažuje se pro požár řízený palivem s časem t_{\lim} Γ . Do výrazu se dosazuje

$$x = t_{\lim} \Gamma / t^*_{\max} \quad (1.50)$$

Ohraničující konstrukce

Ve výpočtu se odlišné vlastnosti stropu a stěn, popřípadě podlahy a vícevrstvé ohraničující konstrukce zohledňují váženými průměry. Při výpočtu tepelné pohltivosti ohraničujících konstrukcí $b = \sqrt{(\rho \cdot c \cdot \lambda)}$ lze hustotu ρ , měrné teplo c a tepelnou vodivost λ konstrukcí ohraničujících požární úsek uvažovat při teplotě okolí, viz tabulku 1.8. Pro povrch ohraničujících konstrukcí s různými vrstvami materiálů lze b uvažovat pro $b_1 < b_2$ jako $b = b_1$. Pro $b_1 > b_2$ se vypočítá mezní tloušťka s_{\lim} materiálu vystaveného požáru podle vztahu:

$$s_{\lim} = \sqrt{\frac{3600 \cdot t_{\max} \cdot \lambda_1}{c_1 \cdot \rho_1}} \quad (1.51)$$

kde ρ_1 je hustota první vrstvy vystavené požáru, c_1 její měrné teplo a λ_1 tepelná vodivost. Pro $s_1 > s_{\lim}$ se uvažuje $b = b_1$ a pro $s_1 < s_{\lim}$ se uvažuje:

$$b = \frac{s_1}{s_{\lim}} b_1 + \left(1 - \frac{s_1}{s_{\lim}} \right) \cdot b_2 \quad (1.52)$$

Index 1 představuje vrstvu přímo vystavenou požáru, index 2 další vrstvu atd. s_i je tloušťka i -té vrstvy $b_i = \sqrt{(\rho_i c_i \lambda_i)}$; ρ_i hustota i -té vrstvy; c_i měrné teplo i -té vrstvy a λ_i tepelná vodivost i -té vrstvy. Při různých součinitelích b pro stěny, strop a podlahu lze zavést $b_j = \sqrt{(\rho \cdot c \cdot \lambda)}$ jako:

$$b = \sum (b_j \cdot A_j) / (A_t - A_v) \quad (1.53)$$

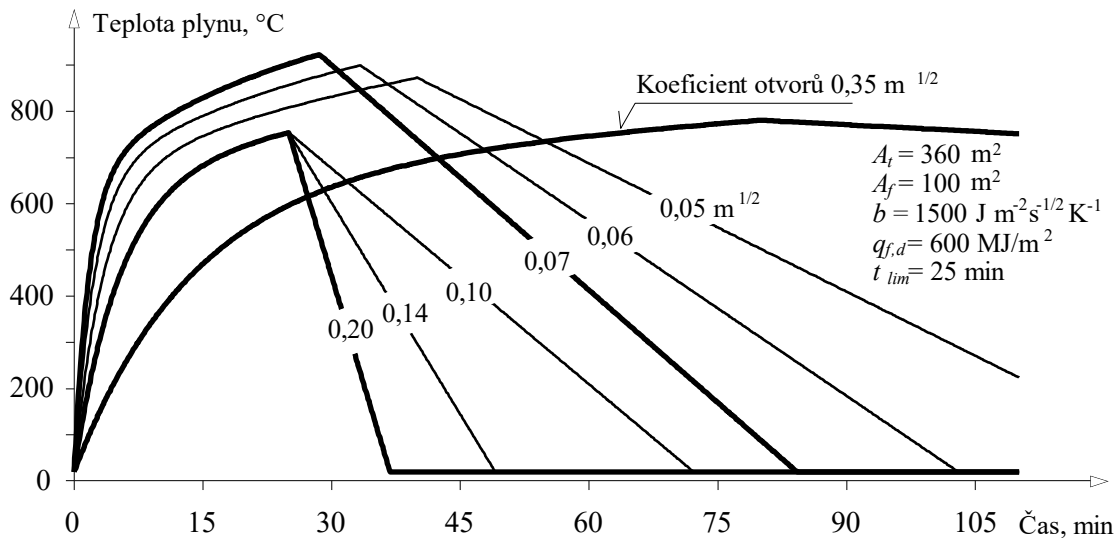
kde A_j je plocha povrchu j -té ohraničující konstrukce bez otvorů a b_j tepelná charakteristika povrchu j -té ohraničující konstrukce.

Tabulka 1.8: Vlastnosti povrchových vrstev ohraničujících konstrukcí při 20 °C, podle (Reichel, 1987) a (Buchanan, 2003)

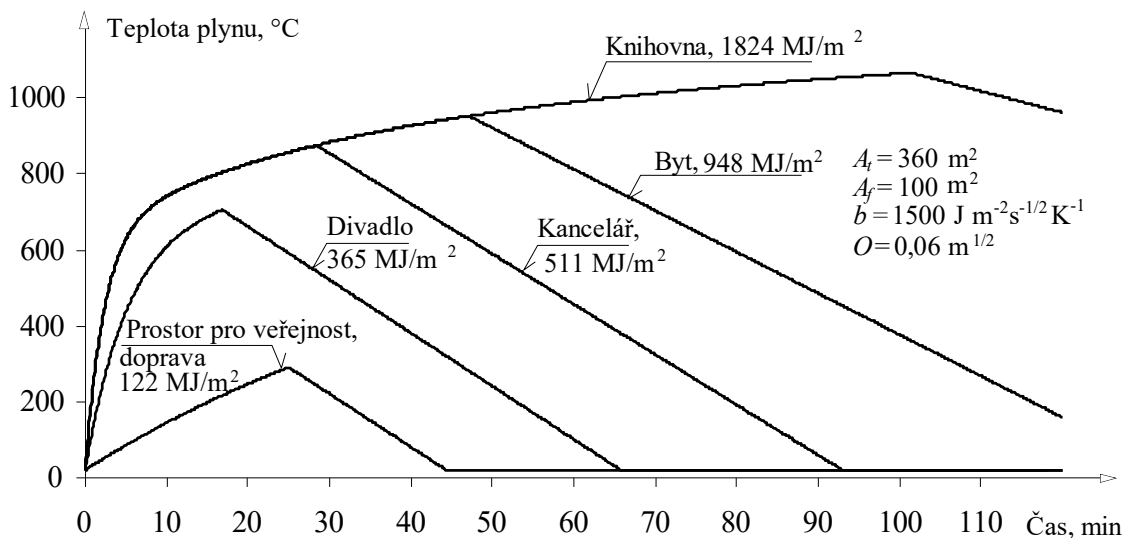
Materiál	Hustota ρ kg / m ²	Tepelná pohltivost λ_i teplá / studená strana W m ⁻¹ K ⁻¹	Měrné teplo c J kg ⁻¹ K ⁻¹	Koeficient $b = \sqrt{\rho c \lambda}$ J m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹
Beton	2 300	2,0	900	2 034
Čedičová, skelná vlna	120	0,070/0,039	920	88
Dřevo měkké	600	0,17/0,14	2 510	506
Dřevotřískové desky	600	0,11	2 510	407
Lehký beton	1 200	0,48/0,44	960	744
Lehký beton	500	0,22/0,19	840	304
Ocel	7 850	58,00	440	14 154
Omítka vápenná	1 600	0,87/0,70	840	1 081
Pěnový polyuretan	80	0,030	1 010	49
Pěnový polystyrén	30	0,041	1 550	44
Rohože ze skelné vlny	260	0,070/0,048	880	127
Rohože z křem. vláken	128	0,35/0,40	800	60
Sádrokartonová deska	750	0,15	1 380	394
Sklo	2 600	0,76	840	1 288
Vláknocementový nástrík	118	0,035	800	57
Vzduch	1,1	0,026	1 040	5
Zdivo	1 800	0,86/0,77	920	1 193
Zdivo	1 300	0,40/0,58	960	707
Zdivo	800	0,58/0,55	960	667
Železobeton	2 400	1,57/1,34	840	1 779
Žula	2 500	3,10	840	2 551

Citlivost křivky

Tvar teplotních křivek závisí nejvíce na ventilaci a energii v palivu v požárním úseku. Parametrické teplotní křivky stanovené podle (1.53) až (1.68) jsou na obrázku 1.7 a 1.8 zobrazeny pro požární úsek s $A_t = 360 \text{ m}^2$; $A_f = 100 \text{ m}^2$, $b = 1500 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}$. Vliv otvorů je znázorněn na obrázku 1.7 pro konstantní požární zatížení $q_{f,d} = 600 \text{ MJ/m}^2$ a $t_{lim} = 25 \text{ min}$ při změně koeficientu otvorů O od hodnoty $0,20 \text{ m}^{1/2}$ do hodnoty $0,035 \text{ m}^{1/2}$. Na obrázku 1.8 je vliv požárního zatížení zobrazen při koeficientu otvorů $O = 0,06 \text{ m}^{1/2}$ pro typy provozů podle tabulky 1.6 při 80 % kvantitu hustoty požárního zatížení (Vila Real, 2003). Vliv součinitelů vyjadřujících nebezpečí vzniku a rozvoje požáru δ_{qi} a δ_{hi} není zohledněn.



Obrázek 1.7: Vliv otvorů při konstantním požárním zatížení $q_{f,d} = 600 \text{ MJ/m}^2$

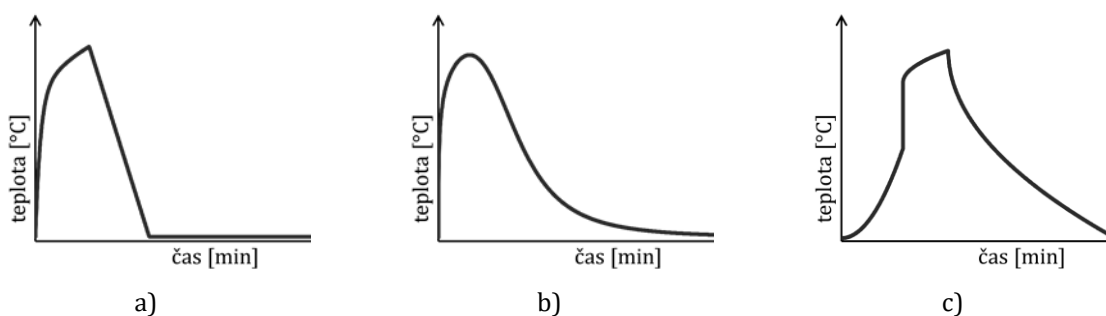


Obrázek 1.8: Vliv požárního zatížení při konstantním koeficientu otvorů $O = 0,06 \text{ m}^{1/2}$

Další analytické modely požáru

Příloha A normy EN 1991-1-2:2004 byla v některých zemích CEN nahrazena národními křivkami. Navržená křivka Přílohy A evropské normy poskytuje v některých případech nevhodné zvýšení/snížení teploty v požárním úseku. Například pro obytné a administrativní prostory je stanovena hodnota maximální teploty v čase 20 min. Pro požární prostory s velkými otvory a obalovými konstrukcemi s nízkou tepelnou vodivostí vytváří rychlý nárůst a následný pokles teploty. Pro požární prostory s malými otvory a vysokou tepelnou vodivostí obalových konstrukcí se naopak předpokládá příliš pomalý pokles teploty (Zehfuss, 2011). Parametrická teplotní křivka v Příloze A popisuje pouze plně rozvinutou fázi požáru, bez zohlednění růstové fáze. Provedenými požárními zkouškami s nábytkem bylo dokázáno, že i v malých prostorech může trvat několik minut, než se od počáteční fáze dosáhne plně rozvinutého požáru (Zehfuss a Hosser, 2007). Hlavním nedostatkem dle (Zehfuss, 2011) je, že parametrická teplotní křivka v příloze A v EN 1991-1-2:2004 nemá přímou souvislost s rychlostí uvolňováním tepla. Pro použití v moderních budovách je v Příloze A omezení součinitele povrchů, který závisí na tepelné pohltivosti konstrukcí ohraničujících požární úsek $b < 100; 2200 > [J/(m^2s^{1/2}K)]$. Díky němu nelze parametrické teplotní křivky využít např. pro výpočet teploty plynu v úseku se skleněnou fasádou (Horová, 2015).

V dánské národní příloze k EN 1991-1-2:2004 lze najít úpravu pro výpočet parametrické teplotní křivky (DS/EN 1991-1-2 DK NA:2014), kde je teplota v požárním úseku popsána jednou rovnicí pro celý průběh požáru. Omezení, kdy lze křivku použít, zůstává obdobné jako v současné příloze A. Další alternativou ke křivce v příloze A je parametrická požární křivka iBMB (Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz TU Braunschweig). Tuto křivku předložili v roce 2003 němečtí výzkumní pracovníci Jochen Zehfuss a Daniela Hosser a postup výpočtu je obsažen v německé národní příloze (DIN EN 1991-1-2/NA:2010). Křivka je přímo odvozena z rychlosti uvolňování tepla a je charakterizována třemi body, ve kterých se mění její sklon (Zehfuss, 2011). Zohledňuje účinek prostorového vzplanutí, kdy v růstové fázi dojde v požárním úseku k prudkému nárůstu teploty. Na obrázku 1.9 je zobrazen schematický tvar parametrických křivek.



Obrázek 1.9: Schematické tvary parametrických křivek:

a) křivka podle přílohy A; b) DS/EN 1991-1-2 DK NA:2014; c) DIN EN 1991-1-2/NA:2010-12

Validace analytických teplotních křivek

Křivky lze validovat např. na zkoušce v Cardingtonu č. 6 (Barnett, 2002), při které hořel kancelářský nábytek. Budovu tvořil osmipodlažní ocelový skelet se spřaženými ocelobetonovými stropy, viz obrázek 1.10. Požární úsek, 7,5 m x 18,0 m x 4,0 m (šířka x délka x výška), byl vyzděn pórobetonovými tvárnicemi. Podlaha byla betonová. V úseku se nacházel jeden ventilační otvor o rozměrech 18,0 m x 2,0 m (šířka x výška). Požární zatížení $q_{t,d} = 159 \text{ MJ/m}^2$ se skládalo z nábytku, dřeva a kancelářských potřeb (O'Connor a Martin, 1998).



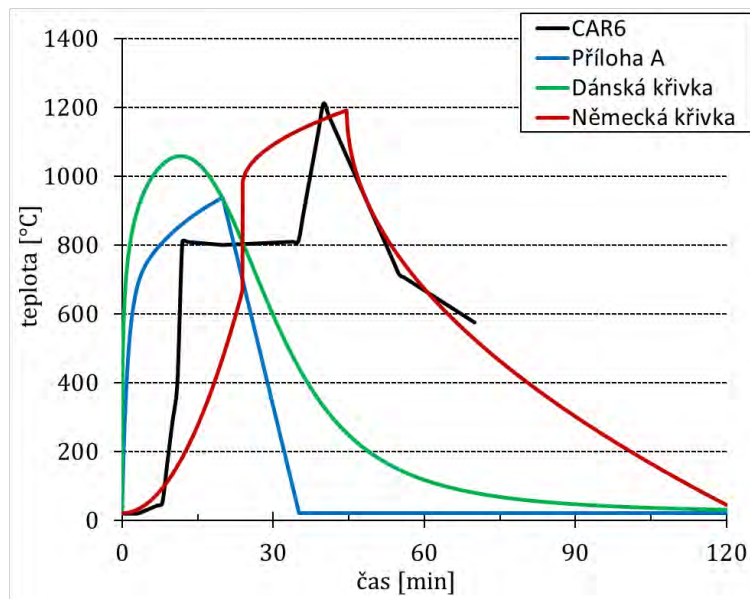
a)



b)

Obrázek 1.10: Požární zkouška č. 6 v Cardingtounu,
a) konstrukce experimentálního osmipodlažního objektu; b) průběh požární zkoušky

Na obrázku 1.11 jsou uvedeny výsledky aplikace všech tří parametrických teplotních křivek, křivka podle přílohy A, křivka podle dánské národní přílohy a křivka podle německé národní přílohy, společně s teplotou plynu, která byla naměřena během experimentu, viz (Cábová a Kučera, 2018).

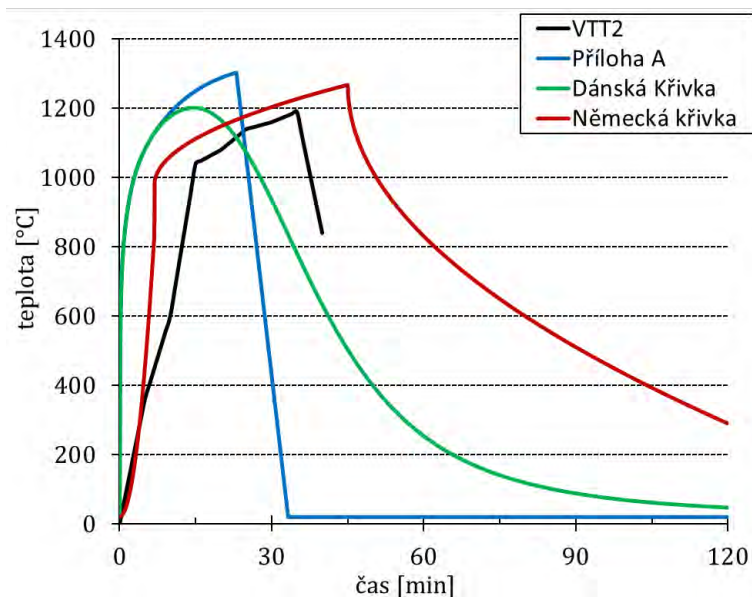


Obrázek 1.11: Validace parametrických modelů pro 6. požární zkoušku v Cardingtonu

Z porovnání na obrázku 1.11 je patrné, že křivka podle německé národní přílohy téměř přesně vystihuje maximální teplotu, naměřenou při požární zkoušce, v grafu označeno CAR6. Teploty se v počáteční fázi německé křivky velice odlišují od výsledků zkoušky (jsou velice nízké). Skutečně naměřené hodnoty ukazují velice strmý nárůst teploty v přibližně 10. minutě. Těchto teplot je v křivce dosaženo až při prostorovém vzplanutí, přibližně o 10 minut později, asi 20. minuta. V případě parametrické teplotní křivky podle současné přílohy A a zároveň i křivky podle dánské národní přílohy je opět na obrázku 1.10 vidět, že v době, kdy se skutečně naměřené hodnoty pohybují okolo svého maxima, jsou teploty v těchto křivkách velice nízké, nebo dokonce již na hodnotě teploty okolí, 20 °C. Většina požárního zatížení vyhoří v obou případech, již v průběhu prvních 30 minut, což je ale oproti zkoušce velice odlišné.

Další validační zkouškou je požární zkouška Centra technického výzkumu ve Finsku, VTT. Zkouška se uskutečnila v místnosti s betonovými obvodovými konstrukcemi. Podlaha byla tvořena žáruvzdornými tvárnicemi. Rozměry požárního úseku byly 2,2 m x 4,0 m x 2,6 m (šířka x délka x výška). V úseku se nacházel jeden malý ventilační otvor o rozměrech 3,0 m x 1,2 m (šířka x výška). Požární zatížení $q_{t,d} = 152 \text{ MJ/m}^2$ se skládalo z dřeva (Ranby, 2000).

Na obrázku 1.12 je zobrazena validace tří parametrických teplotních křivek, křivka podle přílohy A v EN 1991-1-2:2004, křivka podle dánské národní přílohy A v DS/EN 1991-1-2 DK NA:2014 a křivka podle německé národní přílohy A v DIN EN 1991-1-2/NA:2010, společně s teplotou plynu, která byla naměřena během experimentu.



Obrázek 1.12: Validace parametrických modelů pro požární zkoušku VTT

Na obrázku 1.12 je vidět, že parametrická teplotní křivka podle německé národní přílohy je zde na straně bezpečnosti, a to jak ve fázi růstu, tak i ve fázi poklesu teplot. Hodnoty maximálních teplot se velice podobají skutečně získaným hodnotám, s rozdílem do 100 °C. Fáze poklesu začíná přibližně o 10 minut později než ve skutečnosti. Na obrázku 1.12 lze pozorovat, že průběhy parametrické teplotní křivky podle Přílohy A v EN 1991-1-2:2004 a podle dánské národní přílohy jsou v počáteční růstové fázi téměř totožné. U parametrické teplotní křivky podle Přílohy A začíná fáze poklesu skoro o 15 minut dříve, než je tomu ve skutečnosti. Požár tedy skončí ještě dříve, než je ve skutečně naměřených hodnotách dosaženo maximální teploty. Obdobně je tomu i u dánské křivky, která začíná klesat ještě dříve, ale pozvolněji.

1.3.2 Lokální požáry

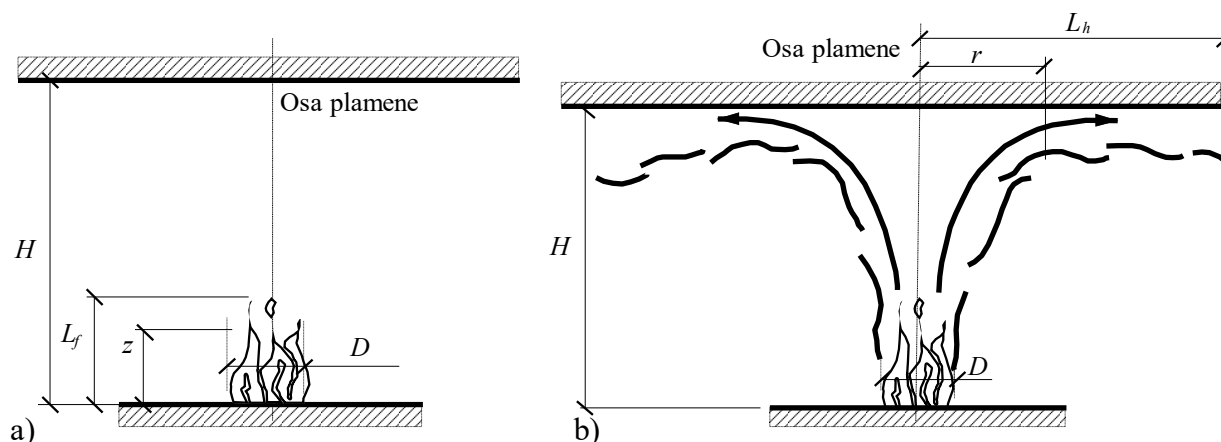
Lokální požár nastane v případě, že nedojde k rozšíření hoření po celé ploše požárního úseku, ale jeho průběh je pouze místní. Rozlišují se případy, kdy plamen nezasahuje strop, viz obrázek 1.13a, a když plamen strop zasahuje, viz obrázek 1.13b. Délka plamene L_f lokálního požáru závisí na rychlosti uvolňování tepla Q a na průměru ohně D . Tepelný tok z lokálního požáru na konstrukční prvek se vypočítá ze vztahu (1.63) a vychází z polohového součinitele, stanoveného podle kapitoly 1.4.3. Délku plamene L_f lokálního požáru lze stanovit jako:

$$L_f = -1,02 \cdot D + 0,0148 \cdot Q^{2/5} \quad \text{v m} \quad (1.54)$$

kde D je průměr ohně v m; Q rychlost uvolňování tepla ve W z ohně. Pokud plamen nezasahuje strop úseku, $L_f < H$; viz obrázek 1.13a, nebo jde-li o požár ve volném prostoru, je teplota θ_z v oblaku hořících plynů po výšce svislé osy symetrie plamene dána vztahem:

$$\theta_z = 20 + 0,25 \cdot Q_c^{2/3} \cdot (z - z_0)^{-5/3} \leq 900 \text{ ve } ^\circ\text{C} \quad (1.55)$$

kde z je proměnná výška v m podél osy plamene. Část rychlosti uvolňování tepla sdílená prouděním ve W lze uvažovat $Q_c = 0,8 Q$.



Obrázek 1.13: Model lokálního požáru: a) plameny nezasahují strop, b) plameny zasahují strop

Virtuální počátek osy z_0 lze stanovit jako:

$$z_0 = -1,02 \cdot D + 0,00524 \cdot Q^{2/5} \text{ v m} \quad (1.56)$$

Pokud plamen zasahuje strop, tj. pro $L_f \geq H$, kde H je vzdálenost mezi zdrojem požáru a stropem v m, viz obrázek 1.13b. Tepelný tok \dot{h} ve W/m^2 , dopadající na jednotku povrchové plochy v úrovni stropu vystavené účinkům požáru, lze vypočítat takto:

$$\text{jestliže } y \leq 0,3 \text{ jako } \dot{h} = 100\,000 \quad (1.57a)$$

$$\text{jestliže } 0,30 < y < 1,0 \text{ jako } \dot{h} = 136\,300 - 121\,000 \cdot y \quad (1.57b)$$

$$\text{jestliže } y \geq 1,0 \text{ jako } \dot{h} = 15\,000 \cdot y^{-3,7} \quad (1.57c)$$

kde součinitel y je dán vztahem:

$$y = \frac{r + H + z'}{L_h + H + z'} \quad (1.58)$$

a kde r je vodorovná vzdálenost mezi svislou osou ohně a bodem u stropu v m, pro kterou se počítá tepelný tok a H vzdálenost mezi zdrojem požáru a stropem v m. Vodorovnou délku plamene lze stanovit z výrazu:

$$L_h = 2,9 \cdot H \cdot (Q \cdot H^*)^{0,33} - H \text{ v m} \quad (1.59)$$

Q_H^* je součinitel rychlosti uvolňování tepla, daný vztahem:

$$Q_H^* = Q / (1,11 \cdot 10^6 \cdot H^{2,5}) \quad (1.59)$$

z' je poloha virtuálního zdroje tepla ve svislém směru v m, může nabývat záporné hodnoty, která se vypočte pro

$$Q_D^* < 1,0 \text{ jako } z' = 2,4 \cdot D \cdot (Q_D^{*2/5} - Q_D^{*2/3}) \quad (1.60)$$

$$Q_D^* \geq 1,0 \text{ jako } z' = 2,4 \cdot D \cdot (1,00 - Q_D^{*2/5}) \quad (1.61)$$

$$\text{kde } Q_D^* = Q / (1,11 \cdot 10^6 \cdot H^{2,5}) \quad (1.62)$$

Přestup tepla do stropu

Čistý tepelný tok \dot{h}_{net} , dopadající na jednotku povrchové plochy v úrovni stropu vystavené účinkům požáru, je dán vztahem:

$$\dot{h}_{net} = \dot{h} - \alpha_c \cdot (\theta_m - 20) - \Phi \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_m + 273)^4 - 293^4] \quad (1.63)$$

\dot{h} je tepelný tok ve $W m^{-2}$; α_c součinitel přestupu tepla prouděním ve $W m^{-2} K^{-1}$; θ_m povrchová teplota prvku ve $^{\circ}C$; Φ polohový součinitel; ε_m emisivita požáru; ε_f emisivita povrchu a σ Stefan-Boltzmannova konstanta ve $W m^{-2} K^{-4}$. Výpočet lze použít, jestliže je průměr ohně omezen $D \leq 10$ m a rychlost uvolňování tepla z ohně $Q \leq 50$ MW.

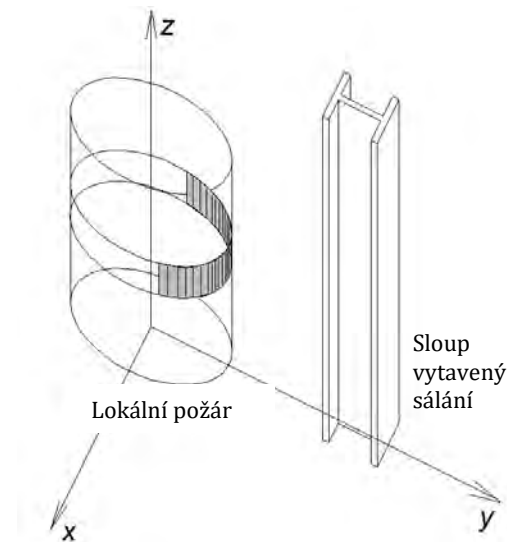
V případě několika oddělených lokálních požárů lze ze vztahu (1.63) stanovit jednotlivé tepelné toky $\dot{h}_1, \dot{h}_2 \dots$ dopadající na jednotku povrchové plochy v úrovni stropu vystavené účinkům požáru. Celkový tepelný tok lze vypočítat jako:

$$\dot{h}_{tot} = \dot{h}_1 + \dot{h}_2 + \dots \leq 100\,000 \text{ ve } W/m^2 \quad (1.64)$$

Přestup tepla do sloupu

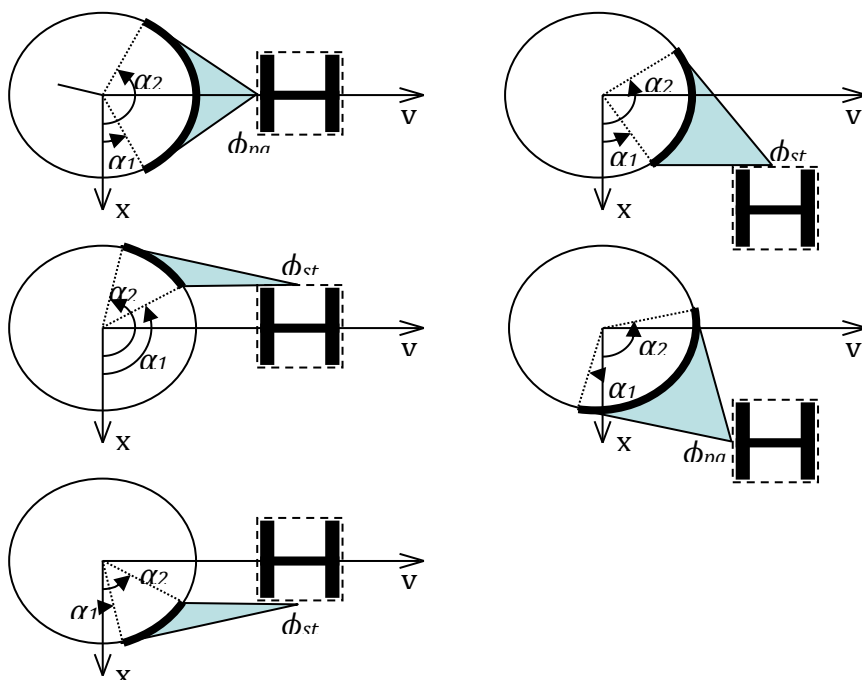
Výpočet teploty sloupu s plamenem ve tvaru válce, viz (Sokol a kol, 2008), vychází z modelu lokálního požáru v ČSN EN 1991-1-2:2004. Uplatní se v těch případech, kdy se posuzují účinky lokálního požáru na sloup ve volném prostoru nebo v požárním úseku o velkých rozměrech a relativně velké výšky, například průmyslové, sportovní haly. Pod stropem se vytvoří nízká vrstva horkých plynů o nízké teplotě. Horní část sloupu pod stropem bude chladná. Sloup se ohřívá vlivem sálání z plamenů lokálního požáru ve své spodní části. Sloup blízko lokálního požáru se nejvíce ohřívá, pokud je mimo půdorys požáru. Pro numerickou stabilitu výpočtu se vzdálenost povrchu sloupu od povrchu plamenů volí asi 300 mm.

V případě nízkého požárního úseku malých rozměrů a sloupu ve větší vzdálenosti od požáru se projeví vliv horké vrstvy plynů akumulovaných pod stropem. Sálání z plamenů se neuplatní nijak výrazně. Sloup dosáhne vysokých teplot v horní části a použije se model podle Hasemiho shrnutý v příloze C normy ČSN EN 1991-1-2:2004. Pokud sloup není v kontaktu s oblakem horkých plynů ani s plameny, ale je obklopen chladným vzduchem o běžné teplotě $20^{\circ}C$, uskutečňuje se přenos tepla do sloupu sáláním. Lokální požár lze nahradit válcovou plochou, viz obrázek 1.14, jejíž teplota se určuje podle vztahu C.2 normy. Teplota válcové plochy se mění jednak v čase t a také po výšce z , což výpočet přenosu tepla sáláním komplikuje.



Obrázek 1.14: Lokální požár modelovaný jako prstenec dělený po výšce pro určení polohového součinitele

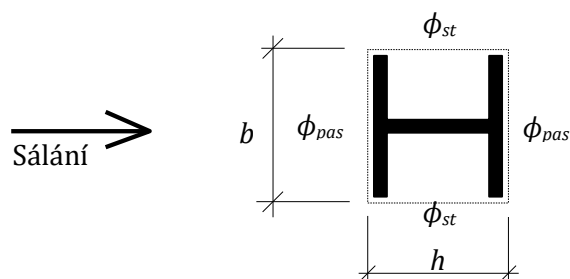
Vzhledem k tomu, že výpočet lze použít pouze pro rovinné plochy, je prstenec na sálající válcové ploše rozdělen na dílčí plošky, jak je patrné z obrázku 1.14. Polohový součinitel a následně sálavý tepelný tok se určí pro každou tuto dílčí plošku na prstenci válcové plochy. Zohlední se, že na posuzovaný bod na sloupu nedopadá tepelný tok z celého prstence, ale jen z jeho části, která je z bodu přímo viditelná, viz obrázek 1.15 (Sokol a kol, 2008).



Obrázek 1.15: Části prstence pro výpočet sálavého tepelného toku dopadajícího na povrch sloupu vzhledem k vzájemné poloze sloupu a požáru (Sokol a kol, 2008)

Podobný přístup lze uplatnit i pro přijímající plochu na povrchu sloupu. Pro průřezy tvaru I nebo H je tvar průřezu sloupu zjednodušen na obdélníkový obrys, na který dopadá sálavý tepelný tok,

viz obrázek 1.16. Zjednodušení zanedbává sálání plochy na plochu v dutých částech sloupu, které je významné při trvání požáru nad 30 minut. V pokročilých modelech se sálání na plochy dutých částí sloupu uvažuje. Takto lze postupovat i pro jiné tvary průřezu sloupu, například pro duté průřezy sloupů.



Obrázek 1.16: Obálka průřezu a polohové součinitele na povrchu sloupu na plochách vystavených sálání (Sokol a kol, 2008)

Výsledný tepelný tok od účinků sálání z jednoho prstence s konstantní teplotou na sledovaný bod sloupu se určí jako součet tepelných toků z jednotlivých dílčích plošek prstence. Působí na všechny povrchy sloupu, na které sálavý tepelný tok dopadá.

$$h_{net,zisk} = \sum_{povrchy} \sum_{plošky} \varphi \cdot \varepsilon \cdot \sigma \left((\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right) \quad (1.65)$$

Emisivita, teplota sálajícího povrchu prstence i teplota sloupu se předpokládá konstantní. Ve vztahu lze součet dílčích tepelných toků nahradit jediným výpočtem tepelného toku s celkovým polohovým součinitelem, který vyjadřuje účinek sálání z prstence na posuzovaný bod sloupu. Tepelný tok se tedy určí jako:

$$h_{net,zisk} = \varphi_{celk} \cdot \varepsilon \cdot \sigma \left((\theta_g + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4 \right) \quad (1.66)$$

kde celkový polohový součinitel je

$$\varphi_{celk} = \frac{b \cdot (\varphi_{pas1} + \varphi_{pas1}) + h \cdot (\varphi_{st1} + \varphi_{st2})}{2 \cdot b + 2 \cdot h} \quad (1.67)$$

Na straně nevystavené sálání odevzdává sloup teplo svému okolí. Přestup tepla prouděním a sáláním pro teplotu prostředí 20 °C se určí z:

$$h_{net,ztraty} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot ((\theta_m + 273)^4 - (20 + 273)^4) + \alpha_c \cdot (\theta_m - 20) \quad (1.68)$$

kde součinitel přestupu tepla lze uvažovat $\alpha_c = 35 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

Celkový tepelný tok, který přispívá k zahřívání sloupu, se určí jako součet dílčích tepelných toků z jednotlivých prstenců podle vztahu (1.65) zmenšený o ztráty tepla do okolního prostředí (1.66), jako:

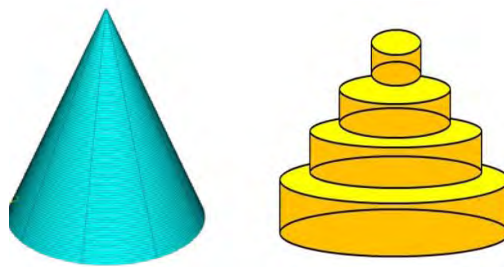
$$h_{net} = \sum_{prstence} h_{net,zisk} - h_{net,ztraty} \quad (1.69)$$

Teplota sloupu se stanoví přírůstkovou metodou podle ČSN EN 1993-1-2:2004 jako:

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \cdot \rho_a} \cdot h_{net} \cdot \Delta t \quad (1.70)$$

kde se uvažuje součinitel zastínění $k_{sh} = 1,0$ protože vliv stínění je zahrnut v určení polohového součinitele ϕ_{celk} , A_m/V je součinitel průřezu, c_a je měrné teplo oceli, ρ_a je hustota oceli a Δt je časový přírůstek roven nebo menší než 5 s.

Výše popsaný koncepčně jednoduchý model vede k numericky náročnému výpočtu polohového součinitele. Jeho vyčíslení tabulkovým procesorem je pro několik do sebe vložených cyklů obtížné. Řeší se programem. Pro velkou plochu požáru s malou výškou plamene je výše popsané řešení nepřesné. V práci (Francis a kol., 2019) je výpočet validován, verifikován a zpřesněn převedením na soustavu válců, viz obrázek 1.17, které tvoří kužel plamenu. Je zde rozveden i výpočet teploty pro sloup uvnitř požáru.



Obrázek 1.17: Nahrazení plamene ve tvaru kužele válcí (Francis a kol., 2019)

2 Požár

2.1 Požární scénáře

2.1.1 Obecně

Pro ověření návrhu požární bezpečnosti stavby se definují kritéria přijatelnosti (SFPE, 2007) a (SFPE, 2016), která činí maximální či minimální přípustné hodnoty veličin spojených s požárem, s prvky požárně bezpečnostních zařízení nebo evakuací osob. Kritéria přijatelnosti například jsou: teplota v daném požárním úseku nepřesáhne po určitou dobu stanovenou hodnotu, po určité době bude zachována viditelnost větší než stanovená hodnota, stabilní hasicí zařízení zareaguje do stanoveného času, a nedojde tak k šíření požáru, zařízení pro odvod kouře a tepla dokáže zajistit nebo výška neutrální roviny bude nad stanovenou výškou (Särdqvist, 1996). Kritéria jsou jednoznačná a při jejich nesplnění je návrh požární bezpečnosti stavby přepracován. Výsledné řešení se opět posoudí porovnáním s kritérii přijatelnosti a splněním globálních a dílčích cílů projektu (Hurley a Rosenbaum, 2015).

Postupy založené na návrhu požární bezpečnosti staveb provází řada voleb. Jde o volby cílů a kritérií, jak bylo popsáno výše, a volby požárních scénářů. Návrh požární bezpečnosti stavby se posuzuje pro daný požární scénář. Požární scénář představuje specifický/typický požár pro

danou budovu a její užívání. Vytvoří-li se pro danou budovu nereálný požární scénář, i při splnění funkčních kritérií a úspěchu návrhu požární bezpečnosti stavby, nezíská se z požárního hlediska budova bezpečná. Volbě požárního scénáře je třeba věnovat náležitou pozornost.

Prvním krokem při stanovování požárních scénářů je výběr skupiny reprezentativních scénářů. Pro výběr jsou k dispozici metody analýzy rizik (Paleček et al., 2005). Jedná se o analýzu, co se stane, když (WHAT-IF), analýzu způsobů a důsledků poruch (FMEA), studii nebezpečí a provozuschopnosti (HAZOP), analýzu stromu událostí (ETA) a analýzu stromu poruch (FTA). Pro řešení lze vyjít z historických a statistických dat pro budovy podobného charakteru užívání a z provozních deníků konkrétních provozů. Při velkém počtu požárních scénářů se k jejich redukci nejčastěji využívá výběr z hraničních scénářů. Hraniční scénáře zahrnují skupinu scénářů, které nemusí být pro zadavatele přijatelná. Vybírají se ze tří skupin: a) základní požární scénáře, které mohou nastat s vysokou pravděpodobností, b) scénáře, které mohou nastat s nízkou pravděpodobností, ale nelze je vyloučit, protože by vedly k selhání požárně bezpečnostního řešení, c) scénáře, které nastanou s velmi nízkou pravděpodobností a které mají fatální následky (nejhorší scénáře). Na základě doporučení projektanta a odsouhlasení investora a posuzovatele lze některé scénáře vyloučit. Vylučuje se tak, aby pravděpodobnost jejich vzniku, byla v požadovaných mezích.

2.1.2 Prvky scénáře

Požární scénář zahrnuje tři základní oblasti: popis požáru, popis budovy a popis jejích uživatelů.

Popis požáru definuje jeho časový průběh od vznícení/vzplanutí přes rozvoj požáru, prostorové vzplanutí, plně rozvinutou fázi a uhasínání. Při výběru, fáze požáru se vychází z cílů návrhu požární bezpečnosti staveb. Jednou ze základních charakteristik požáru v rámci daného požárního scénáře je fáze rozvoje požáru, např. čas do aktivace stabilního hasicího zařízení, nebo analýza po dosažení prostorového vzplanutí pro evakuaci/odolnost konstrukcí (Paleček a kol, 2000). Další charakteristikou požáru je, zda se jedná o požár prostorový, lokální nebo putující požár. Popis požáru je vždy úzce spojen s charakteristikami budovy a jejích uživatelů. Instalace sprinklerového zařízení ovlivní fázi rozvoje požáru, stejně tak i přítomnost/vzdálenost jednotek požární ochrany nebo požární hlídky v objektu atd. Velmi důležité pro rozvoj požáru a dosažení prostorového vzplanutí jsou ventilační podmínky. Požárních scénář ovlivní v budovách (Hurley a Rosenbaum, 2015):

- uspořádání vnitřních a vnějších prostor budovy (velikost, ventilační otvory, vchody/východy, patra atd.)
- požární zatížení (interiérové vybavení, obložení atd.),
- typ nosných konstrukcí,
- instalace aktivních prvků požární ochrany,

- typ užití budovy a její každodenní provoz v závislosti na čase (směnný provoz, počet osob atd.),
- provoz budovy a údržba,
- podmínky pro zásah jednotek požární ochrany,
- teplota okolního prostředí a proudění větru.

Uživatele lze z hlediska požární scénáře rozdělit:

- počet osob a jejich rozmístění,
- zdravotní stav osob,
- faktory chování osob ovlivňující evakuaci.

2.1.3 Návrhový požár

Návrhový požár je idealizovaným modelem reálného požáru v dané situaci. Návrhový požár vychází z požárního scénáře. Je vstupem do matematického modelu požáru. Návrhový požár se vyjadřuje jako časová závislost tepelného výkonu požáru. Řešení lze ověřit i jinými veličinami, např. posloupnosti dosažených teplot, koncentrací toxických zplodin (Särdqvist, 2002). Návrhový požár vyjadřuje vývoj dané konkrétní veličiny v čase.

Pro daný scénář se návrhový požár připravuje v krocích (Hurley a Rosenbaum, 2015):

- 1) Určení předmětu, který začne hořet podle požárního scénáře jako první.
- 2) Stanovení křivky tepelného výkonu v čase pro první hořící předmět.
- 3) Změnu v rychlosti hoření paliva způsobí:
 - a. ventilační podmínky a jejich změna v čase,
 - b. spuštění prvků aktivní ochrany,
 - c. ohraničující konstrukce, zpětné sálání a možnost prostorového vzplanutí,
 - d. vyhoření paliva atd.

- 4) Dojde k rozšíření požáru na další předměty nebo objekty v jeho blízkosti?

Pokud ano, lze vytvořit pro každý další hořící předmět křivku tepelného výkonu. Lze též připravit jednu souhrnnou křivku tepelného výkonu, která zahrne všechny hořící předměty a posloupnost jejich vzplanutí. Vzplanutí dalších předmětů lze posoudit podle dosažení povrchové teploty nebo kritického tepelného toku. Parametry vzplanutí ovlivní šíření požáru. Rychlost šíření požáru je řízena volbou tepelného výkonu požáru prvního objektu. Definuje se teplotní pole a jeho vývoj v čase. Postup ovlivní vzplanutí dalších objektů, podrobněji v části o semi-empirických modelech.

- 5) Do výběru vhodného návrhového požáru kroky 3 až 4 se opakují.

2.1.4 Vstupní data

Tepelný výkon požáru v jednotlivých fázích požáru a délku jeho působení lze předpovědět pomocí: experimentu, empirickou korelací, modely rozvoje požáru (Staffanson, 2010).

Experimenty

Měření rychlosti uvolňování tepla (HRR – Heat Release Rate) je založeno na principu kyslíkové kalorimetrie. Jednotlivé testy se liší velikostí vzorku a geometrickým uspořádáním experimentu od malého pokusu v kónickém kalorimetru, přes SBI test, Room corner test až po kalorimetry k popisu hoření nábytku nebo automobilů (Filipi, 2003). Princip stanovení tepelného výkonu je u zkoušek stejný (Hyatt, 2003). Po iniciaci vzorku jsou spaliny jímány a je v nich analyzováno množství spotřebovaného kyslíku případně v pokročilejších metodách množství CO a CO₂. Dopotčítává se množství uvolněného tepla. Vychází se z předpokladu, že výhřevnost většiny běžných pevných hořlavých látek vztažená na spotřebu množství kyslíku je konstantní, rovna přibližně 13,1 MJ/kg kyslíku. Rychlost vývinu tepla při hoření lze vypočítat ze znalosti rychlosti úbytku hmotnosti pevné fáze (MLR, Mass Loss Rate) a efektivní výhřevnosti látky.

Experimenty s hořením konkrétních materiálů či jejich sestavou jsou nejpresnější vstupní data do modelu. Nejvyšší vypovídající hodnotu mají velkorozměrové experimenty. Jsou finančně a časově náročné. Jejich výhodou je, že kromě rychlosti uvolňování tepla nebo hmotnostního úbytku látky při hoření, poskytují informace o času do vzplanutí, kritickém toku pro vzplanutí nebo povrchové teplotě pro vzplanutí. Přenos dat z velkorozměrových zkoušek do modelu se neobejde bez voleb uživatele při interpretaci dat. Je třeba posoudit, zda scénář použitý při experimentu odpovídá modelu z hlediska intenzity iniciačního zdroje, jeho umístění a ventilačních podmínek. Nevýhodou velkorozměrových zkoušek je to, že tepelný výkon není vztažen na plochu. Přepočet HRR a MLR na plochu je pro geometricky komplikované objekty složitý. Pokud model nemá stejnou geometrii lze HRR a MLR ve vstupech do modelu přepočítat na plochu. Pokud nejsou data pro konkrétní materiál k dispozici, hledají se data popisující chování při hoření látek podobného charakteru. Musí se zajistit, aby měřítko požáru v modelu a ve skutečnosti byla stejná pro tepelný výkon a časový průběh požáru.

Pro stanovení požárně technických charakteristik látek, které lze využít pro definování návrhového požáru, se využívají i laboratorní testy se vzorky látek v měřítku desítek mm. Vzorky jsou při experimentu vystaveny definovanému zdroji tepla za přítomnosti iniciačního zdroje. Menší měřítko umožňuje větší dostupnost prováděných zkoušek, lepší proveditelnost a přesně stanovené podmínky zkoušky. Při interpretaci dat z měření a jejich aplikaci v modelu požáru nelze z tvaru křivky tepelného výkonu usuzovat na fázi rozvoje a dohořívání požáru. Lze volit, zda bude do modelu použita maximální dosažená hodnota tepelného výkonu nebo hodnota průměrná. Otázkou je, při jakém tepelném výkonu zdroje se zkouší. Intenzita tepelného výkonu zářiče silně

ovlivňuje rychlost vývinu tepla. Je třeba uvažovat, zde se jedná se o pomalu či rychle se rozvíjející požár, v jaké vzdálenosti od zdroje hoření je vyšetřovaný objekt atd.

Empirické korelace

Pokud nejsou k dispozici data experimentální, lze využít empirických vztahů, které byly odvozeny z experimentů. Podmínky experimentů, ze kterých byly korelace odvozeny, musí odpovídat svým charakterem studované modelové situaci. Empirické korelace mají limity platnosti a nelze je aplikovat pro každý případ. Korelace obvykle vyjadřují velikost požáru nebo jeho jinou charakteristiku na základě typických rozměrů požáru jako je průměr, výška plamene a tak dále. Příkladem jsou vztahy pro rychlost odhořívání látek za různých podmínek, určení tepelného výkonu podle výšky plamene nebo obráceně výšky plamene pro požár o daném tepelném výkonu, sálavé teplo působící na okolní objekty, dosažení podmínek pro prostorové vzplanutí v závislosti na ventilačních podmínkách a další.

Modely rozvoje požáru

O návrhových požárech se mluví u modelů, jejichž cílem je posuzovat následky požáru. Numerické modely pro rozvoj požárů se stále vyvíjí a využít se připravuje. Modely rozvoje požáru zahrnují popis velkého množství fyzikálních a chemických dějů a uplatní se ve spojení se CFD modely požáru. Složitost modelů, nároky na množství a kvalitu vstupů a schopnosti uživatelů jsou vysoké. Komplexní pyrolyzní modely jsou popsány dále v kap. 2.3.3.

2.2 Matematické modely požáru

2.2.1 Hoření látek

Matematické modely požáru se liší úrovní popisu probíhajících dějů a úrovní časového a prostorového rozlišení výstupů modelu. Základem modelu požáru je definice zdroje hoření, tj. jeho geometrie, tepelný výkon a produkty spalování. Volba zdroje hoření v modelu vychází z návrhového požáru, z možnosti definování zdroje hoření v konkrétním softwaru a z dostupnosti vstupních dat. Pro pochopení matematických modelů požáru je třeba znát jevy při požáru a jejich implementaci do matematického modelu. Jinak nelze výsledky modelu správně interpretovat.

Hoření probíhá v plynné fázi. Reakce hoření se přímo účastní pouze plynná paliva. Kapaliny se nejprve odpaří. Pevné látky tepelně degradují a tím se uvolní hořlavé plyny. Za přítomnosti kyslíku plyny při vzniku spalných produktů a uvolnění tepla shoří. Uvolněné teplo přispívá k tepelné degradaci pevné látky či odpaření kapaliny a tím zvyšuje intenzitu uvolňování hořlavých plynů.

2.2.2 Tepelná degradace pevných látek

Při působení tepelné energie pevné látky degradují. Dochází k jejich rozkladu, při kterém se uvolňují do okolí hořlavé plyny. Proces se nazývá pyrolýza. V jiných oborech se pyrolýzou rozumí pouze proces tepelného rozkladu bez přístupu kyslíku. Při dosažení rozkladné teploty dojde k heterogenní reakci, při které se pevná látka přemění na plynnou. Skutečný počet probíhajících reakcí a jejich povahu, endotermní nebo exotermní reakce, je obtížné určit. Jedná se o desítky až stovky reakcí. Pro zjednodušenou představu se uvažuje s jednou či více souhrnných heterogenních reakcí. Vstupuje do nich pevná látka a odchází hořlavé plyny a pevný zbytek.

Rychlost rozkladné reakce je v každém místě pevné látky funkcí její teploty. Tepelný rozklad neprobíhá pouze při jedné hodnotě teploty, ale přes teplotní interval konečné šířky, který je pro různé látky různý. Rozklad pevné látky proto neprobíhá pouze v jednom místě vzorku. Uvažuje se, že se uskuteční v konečně silné vrstvě. Tato vrstva (pyrolýzní fronta) se, jak se materiál postupně prohřívá, posouvá od povrchu materiálu směrem do středu.

Při tepelném rozkladu jsou v závislosti na teplotě a poréznosti materiálu různou rychlostí uvolňovány hořlavé plyny. Plyny se pohybují směrem ven z materiálu ve směru koncentračního gradientu. V opačném směru se kyslík transportuje z okolí k rozkladné zóně.

2.2.3 Spalování v plynné fázi

Reakce spalování jsou reakce exotermické, při kterých je uvolněno velké množství tepla. Každá hořlavá látka uvolní při spálení jednotkového množství různé množství tepla. Množství uvolněného tepla se vyjadřuje výhřevností ΔH_c (J/mol nebo J/kg). Výhřevnost (Net Heat of Combustion) se definuje jako množství tepla, které se uvolní dokonalým spálením jednotkového množství látky za standardních podmínek. Reakcí vznikající voda se uvažuje v plynném skupenství. Pokud se uvažuje, že vznikající voda je ve skupenství kapalném, hovoří se o spalném teple (Gross Heat of Combustion). Spalné teplo má pro stejnou látku vyšší hodnotu než výhřevnost, protože se při kondenzaci vodní páry na vodu uvolní další teplo. Výhřevnost a spalné teplo mají stejnou jednotku a v angličtině i často stejné označení. Vodní pára je v prostředí požáru ve formě plynné, a proto se při výpočtech a v modelech požáru uvažuje výhřevnost. V praxi se místo teoretické výhřevnosti materiálů nevhodně využívá efektivní výhřevnost, která v sobě zahrnuje efektivitu spalování v reálných podmínkách.

Výhřevnost látek přímo ovlivňuje, kolik tepla bude uvolněno do plynné fáze, a tak i vývoj teplotního pole v modelu požáru. Výhřevnost nic neříká o tom, jaké produkty spalováním vzniknou. V modelech požáru je třeba, kromě uvolněného množství tepla, věnovat pozornost definici spalné reakce reaktantů a produktů. Pro jednoduché látky, zejména plyny a některé hořlavé kapaliny, jsou spalné reakce snadno definovatelné, protože je známo chemické složení plynného paliva, které do spalné reakce vstupuje. U složitějších směsí a pro převážnou část

pevných hořlavých látek se definuje spalná reakce na základě skutečného složení hořlavých par vzniklých tepelnou degradací látky obtížně. V modelech požáru je třeba popsat obecnou spalnou reakci tak, aby co nejlépe reprezentovala skutečnou spalnou reakci v celé šíři teplot.

2.2.4 Model požáru

Model požáru se skládá ze dvou částí: modelu pyrolýzy (model pro pevnou fázi), a modelu hoření (model pro plynnou fázi). Výstupem modelu pyrolýzy je rychlost uvolňování hořlavých plynů. Ta závisí na rychlosti rozkladu látky v závislosti na teplotě a rychlosti dosažení rozkladné teploty materiálu. Výstupem modelu hoření je rychlost uvolňování tepla a spalných produktů. Uvolněné teplo a spalné produkty se dále šíří do okolí. Pro předpověď vývoje koncentračního a teplotního pole v prostoru vzhledem k umístění zdroje hoření je dále třeba modelovat transport hmoty a sdílení tepla v plynné fázi.

2.3 Dělení matematických modelů požáru

Matematické modely požárů se dělí na pravděpodobnostní a deterministické. Pravděpodobnostní modely přistupují k požáru jako k sérii událostí. Každé události je na základě experimentů nebo statistických dat přiřazena pravděpodobnost, se kterou tato událost nastane. Pravděpodobnostní modely nejsou předmětem této kapitoly. Deterministické modely se dělí na analytické, zónové a CFD modely. Deterministické modely mohou využívat pravděpodobnostních vstupů.

Modely požáru lze dělit podle jejich aplikace na modely, které sledují následky přítomnosti zdroje hoření a modely rozvoje požáru, které jsou založeny na fyzikálním popisu procesu tepelné degradace, komplexní pyrolýzní modely. Modely požáru lze dělit i podle jejich schopnosti modelovat pyrolýzu.

2.3.1 Dělení podle využití

Převážná část pokročilých matematických modelů pro ověření požární bezpečnosti staveb jsou modely posuzující následky požáru (Consequence Based Modeling). Modelem se předpovídají následky požáru, jehož velikost a průběh byl specifikován uživatelem. Průběh vývinu tepla a spalných produktů, časový průběh požáru, zadává uživatel jako vstup. Následky přítomnosti zdroje hoření v objektu nebo na otevřeném prostranství jsou popsány vývojem teplotního pole a koncentračního pole, zplodin, v čase a prostoru vzhledem k umístění zdroje. Cílem modelu je studovat interakci s okolním prostředím, tj. popsat vliv na konstrukce, funkci systémů požární ochrany, např. čas do spuštění, počet aktivovaných zařízení atd., a pohyb osob, zakouření atd. Jelikož požár je vstupem do modelu, nelze jej z principu použít pro simulaci rozvoje požáru a jeho šíření. Druhou skupinou modelů jsou modely, které časový průběh požáru a jeho velikost předpovídají (Fire Development Modeling, Material Based Modeling). Jedná se o modely rozvoje

požáru. Modely jsou založeny na popisu procesu tepelné degradace pevných látek a hoření v plynné fázi.

2.3.2 Deterministické modely

Deterministické modely jsou založeny na řešení matematických rovnic, které popisují fyzikální děje probíhající při požáru. Deterministické modely se dělí na tři skupiny: analytické modely, modely zónové a CFD modely (modely typu pole). Analytické modely, jsou založeny na řešení empirických a semi-empirických rovnic a označují se jako zjednodušené modely. Zónové a CFD modely patří mezi tzv. pokročilé modely, které se uplatňují při návrhu a ověření požární bezpečnosti staveb.

Zónové modely

Zónové modely se využívají pro předpověď požáru v místnosti či komplexu místností, ve kterých je umístěn zdroj hoření. Zónové modely předpovídají pro specifikovanou velikost požáru výšku rozhraní mezi studenou a horkou vrstvou plynů a teplotu plynu a složení spalin v horké a studené vrstvě v každé místnosti v čase. V jednom nebo více objemech se řeší rovnice zachování hmoty a energie. Zónové modely lze v některých softwarových nástrojích doplnit simulací spuštění detekčních systémů a sprinklerových hlav. Zónový model reprezentuje teplotu horké vrstvy a složení spalin v celé vrstvě jednou hodnotu. Předpověď zónového modelu není proto prostorově detailní, ale pro řadu aplikací je zjednodušení dostačující. Výhodou zónových modelů je krátká výpočetní doba, která se i s běžnou uživatelskou výpočetní technikou pohybuje podle počtu řešených místností v řádu minut, maximálně desítek minut.

Modely počítačové dynamiky tekutin

Modely počítačové dynamiky tekutin (CFD) dokáží předpovídat vývoj prostředí v okolí požáru s vysokou úrovní prostorového detailu. Mohou být simulovány jak vnitřní, tak venkovní prostory a velké množství různě geometricky složitých prostor. Jádrem každého CFD programu je soustava parciálních diferenciálních rovnic, které vyjadřují zákon zachování hmoty, energie a hybnosti v prostoru požáru a jeho okolí, v tzv. výpočetní doméně. Rovnice popisují, jak se spojitě mění tok tekutin, zde plynu, v čase a prostoru. Tuto soustavu rovnic nelze vyřešit analyticky a získat tak přesné řešení v každém bodě domény. Proto se využívá numerických metod, které řeší bilanční rovnice v diskrétních objemech. Každý objem odpovídá jedné buňce výpočetní sítě, která vyplňuje výpočetní doménu. Výsledkem výpočtu je informace, jak se proměnné jako je teplota, koncentrace zplodin, rychlost proudění atd. mění v prostoru a v čase. V rámci jednoho kontrolního objemu jsou hodnoty proměnných, jako je teplota, tlak, koncentrace atd., konstantní. Přesnost je určena hlavně velikostí kontrolních objemů, tzn. velikostí výpočetní sítě. S narůstajícím počtem buněk neúměrně

narůstá výpočetní náročnost, protože soustava parciálních diferenciálních rovnic je řešena v každém kontrolním objemu sítě, viz kapitolu CFD modely.

S vysokou úrovní detailu při popisu fyziky a prostorového rozlišení se pojí nároky na odbornost a časovou náročnost výpočtů. Podle velikosti geometrie probíhají výpočty v řádu jednotek až stovek hodin. Časově náročná je příprava simulace a vyhodnocení výstupů. Kompletní zhotovení CFD simulace se pohybuje v řádu měsíců (SFPE 2016), (Novozhilov, 2001), (Yeoh a Yuen, 2009) a (Yan, 2008).

Výběr modelu

Od analytických, přes zónové až po CFD modely roste složitost, úroveň detailu, časová náročnost, množství výstupů a nároky na znalosti uživatelů. Při modelování se vychází z hlavního fyzikálního jevu. Modely se volí co nejjednodušší, které ale již dokáží popsat studovanou otázku. Složitost se zvyšuje dalšími požadavky požárního scénáře. Pro dané zadání se podle silných a slabých stránek skupin volí vhodný model (Wegrzynski, 2016).

Analytické modely – vhodné oblasti použití

- Požáry, které lze považovat za časově ustálené.
- Stanovení řádových hodnot a hranic fyzikálních veličin, kterých lze při požáru dosáhnout, např. maximální teplota.
- Výpočetní doména svou velikostí koreluje s měřítkem, na kterém probíhá studovaný děj.
- Verifikace složitějších modelů.
- Lokální požáry.
- Verifikace pokročilejších modelů.

Analytické modely – nevhodné oblasti použití

- Neustálený děj či rostoucí požár.
- Klíčový studovaný děj probíhá na prostorově nebo časově menším měřítku, než je zachycen ve zjednodušeném modelu.
- Geometrie nebo velikost prostoru silně ovlivňují výsledky simulace.
- Dochází k intenzivnímu proudění plynů, např. silný vliv odvětrávání.

Zónové modely – oblasti použití

- Tam, kde stačí informace o průměrné hodnotě veličin v horké vrstvě spalin.
- Díky rychlosti výpočtu pro pravděpodobnostní studie.
- Pravidelná a vzájemně propojené požární úseky.
- Studie toku plynu mezi jednotlivými místnostmi.

- Studované jevy se pohybují v hranicích platnosti submodelů zónového modelu.
- Neustálené otázky růstu požáru.

Zónové modely – nevhodné oblasti použití

- Tam kde jsou důležité lokální hodnoty fyzikálních veličin.
- Ve velkých místnostech či prostorách, kde nelze předpokládat rychlé vytvoření vrstvy horkých plynů.
- Geometricky složité prostory, jejichž zjednodušení pro potřeby zónového modelu by vedlo k chybě vzhledem ke změně proudění plynů atd.
- Nelze studovat proudění a promíchávání plynů na lokálním měřítku, pouze globální výměnu plynů mezi teplou a studenou vrstvou a mezi místnostmi.

CFD model – oblasti použití

- Studium ustálených i neustálených dějů.
- Komplexní simulace lokálního chování při toku tepla a hmoty v téměř neomezeném geometrickém uspořádání.
- Lze spojit s dalšími modely, např. modely ventilace, které se vzájemně ovlivňují.
- Umožňuje studovat vysokou úroveň detailu probíhajících procesů.
Je omezeno pouze časovou a prostorovou diskretizací.
- Geometrická komplexita je omezena jen časem na přípravu a časem výpočtu, respektive dostupnou výpočetní technikou.
- Lze studovat chování v oblastech vzdálených od zdroje požáru se zanedbáním lokálního chování v blízkosti zdroje požáru (s významným zjednodušením zdroje požáru jako objemového zdroje tepla a hmoty).

CFD model – nevhodné oblasti použití

- Každá analýza vyžaduje individuální přístup.
- Hoření s nedostatečným přísunem vzduchu.
- Modelování rozvoje požáru, šíření plamene a procesu tepelného rozkladu látek ve větším prostorovém měřítku, v aktivním vývoji.
- Z časových důvodů pro analýzu velkého množství scénářů nebo pravděpodobnostní studie.

2.3.3 Modelování pyrolýzy

Na základě toho, zda model požáru obsahuje model jak pevné fáze, tak plynné fáze nebo pouze plynné fáze a jakým způsobem mezi sebou komunikují, lze modely požáru dělit na empirické, semi-empirické, analytické a komplexní pyrolýzní modely.

Empirické pyrolýzní modely

Empirické pyrolýzní modely ignorují fyzikálně-chemický proces rozkladu pevných materiálů. V uživateli definovaném čase dojde ke vzplanutí objektu, předmětu nebo jejich sestavy a hoří podle uživatelem stanovené výkonové křivky požáru. Lze je aplikovat na všechny typy materiálu bez ohledu na jejich strukturu, chování při hoření i jejich geometrické uspořádání. Empirické modely pracují s představou fiktivního objektu. Používají se u objektů složených z velkého množství materiálů nebo s komplikovanou geometrií. Výhodou je, že vyžadují minimální množství vstupních dat, pro které máme dostupné způsoby měření. Hlavními nevýhodami je předpoklad, že tepelná historie, které byl vzorek vystaven při experimentu, ze kterého byla odvozena křivka tepelného výkonu požáru do modelu, je stejná jako v modelu. To platí jen výjimečně. Model se nepřizpůsobí změně tepelného zdroje v modelu, ventilačních podmínek, proudění, chlazení nebo ohřátí prostředí a chování materiálů v modelu hoření. Materiál začne hořet v daném čase a hoří takovou rychlostí, jak bylo na počátku definováno.

Semi-empirické modely

V semi-empirických modelech řídí uživatel svým zadáním prohřívání látky a vzplanutí při řízení hoření. Čas do vzplanutí je počítán na základě energetické bilance pevné látky a výpočtem vedení tepla materiálem. Pokud povrchová teplota materiálu dosáhne zadané teploty vzplanutí, materiál začne hořet. Po vzplanutí se uvažuje sdílení tepla v pevné fázi. Povrchová teplota ani teplota uvnitř materiálu neovlivňují rychlost hoření a obráceně. Materiál hoří podle výkonové křivky požáru, jak bylo zadáno uživatelem. Semi-empirickým modelem lze napodobit scénář šíření hoření od zdroje. Objekt až do té doby, než začne hořet, odráží podmínky v modelu (vystavení tepelnému toku, ventilace atd.). Jakmile začne objekt hořet, hoří uživatelem specifikovanou rychlostí a výkonem.

Pro modelování prohřívání látky je třeba zadat materiálové vlastnosti látky. Na materiál působí tepelný tok sáláním i prouděním, jeho povrch se ohřívá a teplo je vedeno dovnitř materiálu. Emisivita povrchu materiálu je poměr pohlceného a odraženého dopadajícího sálavého tepla povrchem. Rychlost vedení tepla materiálem závisí na teplotním gradientu, který je ovlivněn součinitelem tepelné vodivosti, specifickou tepelnou kapacitou a hustotou (objemovou hmotností) materiálu. Tepelná vodivost a specifická tepelná kapacita závisí pro mnoho materiálů výrazně na teplotě. Většina dostupných dat v literatuře je změřena při pokojové teplotě. Závislost

parametrů sdílení tepla v pevné fázi na teplotě se v modelech většinou zanedbává. Zanedbání může vézt ke zkreslení času do vzplanutí. Významným parametrem, který ovlivňuje předpověď semi-empirického modelu je reakční teplo, teplo, které je třeba dodat materiálu, aby došlo k tepelnému rozkladu pevné látky. Neuvažuje-li se v energetické bilanci reakční teplo, je modelem předpovídaná povrchová teplota materiálu nadhodnocena a dojde ke zkreslení času do vzplanutí.

Semi-empirické modely v porovnání s empirickými vyžadují větší množství vstupů, které ovlivňují výstupy modelu a jeho schopnost napodobit šíření hoření. V praxi jsou oblíbeny a jsou využívanou alternativou lokálního požáru. Rychlost šíření požáru je vstup do modelu.

Analytické modely pyrolýzy

Analytické modely pyrolýzy předpovídají rychlost uvolňování hořlavých plynů pomocí matematických vztahů. Jsou mezistupněm mezi empirickými a komplexními modely. Při dosažení teploty povrchu při vzplanutí hoří materiál ustáleným výkonem a teplota povrchu zůstává konstantní. Je rovna teplotě vzplanutí. Tepelný výkon při hoření je dán součinem efektivní výhřevnosti a rychlosti úbytku hmotnosti pevné látky. Ta je modelem počítána na základě energetické bilance na povrchu pevné látky a znalosti tepla pro zplynění pevné látky.

Základním předpokladem analytických modelů je, že pyrolýza probíhá pouze na povrchu pevné látky. Většina modelů uvažuje vedení tepla pouze jednorozměrné, kolmo na povrch materiálu. Tento předpoklad je oprávněný u objektů typu desky atd., kde lze zbylé dva rozměry vzhledem k tloušťce materiálu považovat za nekonečně dlouhé. Toto však nelze předpokládat u většiny objektů, např. u nábytku. V některých případech lze uvažovat, že materiál má v celé tloušťce v daném čase stejnou teplotu (thermally thin). Většinou uvažujeme teplotní profil po tloušťce materiálu (thermally thick). Tomu odpovídá tvar rovnice vedení tepla v energetické bilanci. Pro řešení energetické bilance je třeba definovat okrajové podmínky. Zjednodušeně lze uvažovat konstantní tepelný tok na povrchu a izolovanou zadní stranu materiálu. Lze uvažovat i tepelný tok proměnný v čase, který se získá z řešení chování plynné fáze.

Nevýhodou analytických modelů je velké množství předpokladů, které jsou potřeba pro správnou definici, aplikaci a interpretaci výsledků. Modely lze proto využít jen pro omezené množství materiálů a jejich geometrických uspořádání. V praxi se příliš nevyužívají.

Komplexní pyrolýzní modely

Základem každého komplexního pyrolýzního modelu je výpočet bilance hmoty a energie v pevné fázi, pomocí nichž jsou procesy, které při tepelném rozkladu probíhají, popsány. Výstupem komplexního pyrolýzního modelu je rychlost uvolňování hořlavých plynů, která se využije jako vstupní data/okrajová podmínka do modelu hoření. V některých případech lze do modelu

zahrnout i procesy sdílení tepla mezi pevnou látkou a plynem v pevné fázi a transport hmoty v pevné fázi.

Komplexní modely se dělí do dvou skupin podle toho, zda rozkladná reakce probíhá konečně nebo nekonečně rychle. Uvažuje-li se, že rychlost reakce je výrazně vyšší než rychlost procesů sdílení tepla, lze považovat rozkladnou reakci za nekonečně rychlou. Reakce probíhá na nekonečně tenké vrstvě v tzv. pyrolýzní zóně, kde při dosažení pyrolýzní teploty dojde k odebrání reakčního tepla a tvorbě produktů rozkladné reakce. Pyrolýza probíhá pouze na povrchu nebo se pyrolýzní zóna u materiálů, které nechávají při rozkladu pevný zbytek, posouvá směrem od povrchu. Rychlost uvolňování hořlavých plynů se určuje z energetické bilance v pyrolýzní zóně, pyrolýzní teplota se určuje z výpočtu teplotního profilu v pevné látce.

Předpoklad, že procesy sdílení tepla jsou výrazně pomalejší než rozkladná reakce, lze považovat za platný v případě vysokých tepelných toků, působících na povrch pevné látky. Při nižších tepelných tocích již reakci nelze považovat za nekonečně rychlou, probíhá v konečně silné vrstvě materiálu a lze určit její rychlost. Reakční rychlost je funkcí teploty. Model počítá teplotní profil v pevné fázi z energetické bilance. Pro výpočet teplotního profilu je nutné znát materiálové vlastnosti pevné látky, mezi které patří hustota, tepelně-technické charakteristiky látky a optické vlastnosti látky. Na základě teploty pevné fáze je určena reakční rychlost. Rychlost tvorby hořlavých plynů se počítá z hmotnostní bilance.

Vstupy do komplexních modelů se dají rozdělit do tří skupin. První skupinou jsou tzv. reakční parametry, které vystupují v rovnici pro rychlost rozkladné reakce. Druhou skupinou jsou materiálové vlastnosti. Sem spadají tepelně technické charakteristiky látky, parametry týkající se optických vlastností látky a parametry související s porézností materiálu. Poslední skupinou vstupů jsou konstanty pro danou matematickou a numerickou implementaci komplexního modelu. Jedním z hlavních důvodů, proč komplexní pyrolýzní modely přetrvávají spíše v rovině výzkumné, je velké množství vstupních dat a chybějící ověřené metody, jak tato data získat.

Data se do komplexních modelů stanovují experimentálně a metodami numerické optimalizace. Experimenty se získají hodnoty, které jsou libovolně přenositelné mezi komplexními modely. Část vstupních hodnot komplexních modelů přímo změřit nelze. Numerickou optimalizací se získá sada vstupních parametrů najednou. Lze ji proto použít pouze pro konkrétní model, pro který byla stanovena.

Tepelný rozklad látek představuje komplikovaný proces jak v pevné fázi, tak v plynné fázi. Skutečné množství probíhajících reakcí je vysoké, vznikají meziprodukty reakcí, reakce mohou být současné či následné. Pro specifické účely, jako je spalování biomasy, jsou k dispozici detailní rozkladná schémata. V oblasti modelování požáru nelze všechny detaily využít, protože vstupní data nejsou k dispozici nebo je jich tak vysoký počet, že se model požáru stává nepraktický a výpočetně náročný. Základem je rozkladné schéma. Aby schéma dostatečně vystihovalo tepelný

rozklad, je třeba volit kompromis mezi jednoduchostí, s malým množstvím parametrů, a podrobný popisem s velkým množstvím parametrů. Schéma tepelného rozkladu se určuje na základě měření pomocí dvou metod termické analýzy: termogravimetrie (TG) a diferenční kompenzační kalorimetrie (DSC). Termogravimetrická analýza poskytne informaci o rychlosti hmotnostního úbytku v čase při zahřívání látky. Z TG křivky lze odečíst, v jakém teplotním rozsahu probíhá tepelný rozklad a v kolika krocích. Lze určit minimální počet rozkladných reakcí a pro každou reakci kinetické (reakční) součinitele A , E , n . Lze určit reakční rychlost, rychlost tepelného rozkladu v závislosti na teplotě. Diferenční kompenzační kalorimetrie odhaluje povahu probíhajících reakcí. Řeší se, zda se jedná o reakce endotermní či exotermní. Z DSC křivky lze vypočítat energii, kterou reakce spotřebují nebo která se uvolní, a reakční teplo při tepelném rozkladu. TGA i DSC jsou standardními metodami termické analýzy. O kvalitě předpovědi rozhoduje rychlost ohřevu vzorku a volba atmosféry, ve které bude rozklad probíhat.

Vstupní data je třeba v modelu validovat. V tomto případě je vhodnou globální hodnotou pro validaci hmotnostní úbytek, která lze porovnat s úbytkem získaným laboratorními zkouškami malých a středních měřítek.

2.4 Kvalita vstupů do modelu

2.4.1 Vstupní data

Vstupy do modelu se váží k modelu samotnému, jeho matematickému popisu, případně numerické implementaci modelu. Matematický popis a jeho numerickou implementaci uživatel z pravidla neovlivní. Jedná se o práci vývojářů daného modelu. Povinností uživatele je vstupům do modelu, tj. fyzice za modelem, porozumět. Uživatel posuzuje vhodnost modelu pro studium daného požárního scénáře a vhodnost vstupních data, která do modelu zadává a kvalitu výstupu modelu.

Vstupní data se dají obecně dělit na tři skupiny: požárně technické charakteristiky, tepelně technické charakteristiky a ostatní parametry. Požárně technické charakteristiky látek popisují chování látky při hoření a při procesech s hořením souvisejících. Tepelně technické charakteristiky ovlivňují, jak rychle se látka ohřívá, pokud na ní působí tepelný tok. Mezi ostatní parametry patří prostupnost látek pro sálavé teplo, přestup tepla z pevné látky do plynu, emisivita, porozita a další. Některé jsou specifické pouze pro daný model.

Některé vstupy lze měřit přímo. Většina je dopočítávána z měření jiných veličin. V obou případech je třeba si uvědomit, že podmínky, za kterých zkouška probíhá, ji vstupy ovlivňují. Příkladem je průtok plynů kolem vzorku, hmotnost vzorku, orientace vzorku, intenzita ohřevu,

vzdálenost od zdroje a další. Ne každý má velký vliv na výstup modelu. Další otázkou je citlivost na teplotní a vlhkostní závislosti nebo na koncentraci kyslíku.

2.4.2 Vstupy do zónových modelů

Zónové modely využívají pro spalování a proudění plynů empirické korelace. Model obvykle využívá dílčí submodely. Modely obsahují vztahy pro tvorbu vzestupného proudu spalin, pohyb vzestupného proudu a pro šíření spalin pod stropem. Použití vstupních hodnot mimo rozsah validace modelu obvykle neumožňuje uživatelské rozhraní modelu. Ovlivnit chování modelu lze volbou konkrétních korelací, např. pohyb spalin v místnosti nebo chodbě. V zónových modelech je obvykle omezeno použití atypických geometrií, pro které není určen (Franssen, 2004).

Kvalita výstupu modelu je ovlivněna definováním průběhu uvolňování tepla, případně uvolňování spalin a toxických zplodin hoření. Zónové modely obvykle umožňují využít libovolnou křivku uvolňování tepla, případně pouze kvadratických křivek, tj. t^2 požár. Vzestupný proud spalin ovlivní definice rozměrů ohniska požáru a jeho umístění v prostoru, horizontálně a vertikálně. Některé zónové modely umožňují vstupy definovat rozsahem hodnot a pravděpodobností. Model iteruje s náhodně dosazenými vstupy a náhodně volenými scénáři. Výstupem je rozsah hodnot, v jakém se výstupy mohou pohybovat. Většina zónových modelů neumožňuje 3D vizualizaci modelového prostoru. Rozměry a vzájemné pozice místností jsou v modelu definovány pouze číselně. V tomto případě je pro uživatele obtížně kontrolovatelné, jestli geometrie modelu odpovídá skutečnosti.

2.4.3 Vstupy do CFD modelů

CFD modely jsou komplexní modely požáru. Výstupy mohou být detailní a ve spojení s pokročilými vizualizacemi výsledků, se CFD stalo atraktivním nástrojem i v oblastech, kde jsou rychlejší a stejně přesné jednodušší modely požáru. O kvalitě předpovědi rozhodují následující aspekty (Bounagui, 2003).

Výpočetní síť

Principem CFD modelu je hledání přibližného řešení řídicích rovnic toku tekutin v diskrétních objemech daných výpočetní sítí. Vytvoření kvalitní výpočetní sítě je základním předpokladem pro vytvoření kvalitní CFD simulace. Podle aplikace, složitosti geometrie a možností numerického řešení daného výpočetního programu jsou výpočetní sítě tvořeny různými druhy mnohostěnů, nejčastěji šestistěny, pětistěny a čtyřstěny. V rámci jedné sítě mohou být buňky stejných nebo různých typů a různých velikostí. Prvky se navrhují podle složitosti a geometrie požárního úseku. V CFD programu na sebe musí buňky navazovat. Řešiče, které pracují pouze s buňkami ve tvaru kvádrů, nedovolují vytvářet zakřivené objekty a geometricky složité předměty, jsou pro uživatele

méně přívětivé. V praxi nejčastěji využívaném požárním CFD softwaru FDS (Fire Dynamics Simulator) je síť tvořena pouze z kvádrů. Software FDS pro numerické řešení parciálních diferenciálních rovnic používá metodu sítí, která je robustní, ale vyžaduje pravidelnou síť. Ve vývoji je modelování geometricky komplexních objektů v FDS za využití hybridní sítě, která u hranic zakřivených objektů využívá jiných buněk než kvádrů, ve zbytku buňky ve tvaru kvádrů.

Hoření je komplexní úloha, ve které se uvažují procesy, které probíhají v rozdílných prostorových i časových měřítcích. Při požáru uvnitř místnosti se při transportu spalin a tepla uplatní konvekce, která probíhá na velkém prostorovém měřítku. V úloze se výrazně projeví difuzní transport v blízkosti povrchů pevných látek a oblasti plamene, který probíhá na malém prostorovém měřítku. Pro zachycení všech detailů spojených s procesy hoření v plynné fázi je třeba výpočetní síť s prostorovým rozlišením menším než jeden milimetr. Pro některé aplikace z oblasti požární bezpečnosti staveb, jako např. zakouřený prostor atria obchodního centra, nelze dosáhnout vhodně jemnou sítí ani se současnými nejvýkonnějšími počítači. Pro ověření dostatečné výšky neutrální roviny na nechráněných únikových cestách to ale není nutné. Velikost buňky sítě se pohybuje v řešených úlohách v místech dál od zdroje požáru v řádech stovek mm. V blízkém okolí zdroje hoření a pro aplikace, kde rozhoduje tvar a velikost plamene, se navrhuje výpočetní buňka v řádech desítek mm. Byly publikovány korelace mezi velikostí požáru a buňky výpočetní sítě. Univerzální pravidlo pro volbu velikosti buňky sítě však není k dispozici. Citlivost výpočtu na velikost sítě je třeba řešit vždy. Pokud se např. modeluje evakuace, je třeba analyzovat, jak velikost sítě změní výšku rozhraní kouřové vrstvy a zajistit/doložit, že přesnost řešení je dostatečná. Pokud se modelují účinky stabilního hasicího zařízení, je třeba znát a doložit, jak velikost sítě ovlivní dobu do jeho spuštění.

Model turbulence

Turbulence a víry probíhající v menším měřítku, než je velikost jednoho kontrolního objemu, jsou z numerického hlediska v rámci výpočetní sítě nezachytitelné. Při většině požárů, kromě speciálních případů jako např. laminární plamen svíčky, nastává turbulentní proudění plynů. Turbulence silně ovlivňuje stoupající proud horkých spalin nasáváním čerstvého vzduchu z okolí. Turbulentní proudění je dominantnější než difuzní procesy při mísení hořlavých plynů a kyslíku. Schopnost modelu co nejvěrněji popsat časově proměnnou a nahodilou turbulentní strukturu toku plynů v oblasti požáru tak ovlivňuje přesnost, s jakou model dokáže předpovědět dynamiku požáru.

Turbulence se modeluje metodou přímé numerické simulace DNS (Direct Numerical Simulation), metodou velkých vírů LES (Large Eddy Simulation) a metodou středovaných Navierových-Stokesových rovnic RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) (Yeoh, 2009). DNS se pro požáry využívá v oblasti vědy a výzkumu. Vyžaduje buňky o velikosti méně než 1 mm. V tomto

rozlišení lze přímo uvažovat i nejmenší vírové struktury. Pro praktické CFD požární úlohy se využívá metoda LES nebo RANS. U metody LES jsou ty vírové struktury, které jsou větší, než je velikost výpočetní sítě, počítány přímo. Menší vírové struktury jsou modelovány pomocí korelací. Při využití metody RANS nejsou vírové struktury přímo počítány. Turbulentní struktury jsou modelovány. Turbulentní proudění je silně nahodilé a veličiny, které ho popisují, jako například rychlost, silně fluktuují. V případě metody RANS se pracuje s hodnotami průměrnými v čase. Tokové pole proto realisticky reprezentuje celkový vývoj systému v čase, ale nedokáže zachytit okamžité fluktuace, jako je tomu u LES. CFD software s modelem turbulence RANS lze např. použít pro odhad průměrné výšky plamene, nelze jej ale využít pro zachycení fluktuace plamene v čase. Pro modelování požáru je pro přesnější popis turbulentního toku a jeho nahodilého charakteru, vhodnější metoda LES, která ale klade vyšší nároky na velikost sítě. Pokud nebude výpočetní síť pro danou aplikaci dostatečně jemná, bude tokové pole a tím dynamika požáru bude výrazně zkreslena.

Okrajové podmínky

CFD je obecně aplikovatelné na řadu otázek v letectví, automobilovém průmyslu, biomedicíně, chemických procesech, energetice, sportu, a mnoha dalších. Obecný princip CFD je ve všech programech zachován stejný. Jednotlivé programy se liší numerickým řešením rovnic a implementovanými modely, které popisují procesy specifické pro určitou problematiku. U CFD programů v oblasti požární bezpečnosti se jedná kromě toku tekutin vyvolaného volnou konvekcí o matematický popis procesu spalování plynů, radiaci a výměnu tepla a hybnosti mezi horkými plyny a stěnami/objekty ve výpočetní doméně. Všechny procesy jsou složité a v požárních úlohách se vzájemně ovlivňují. Matematický popis se v mnoha případech zjednodušuje. Vývojáři a uživatelé CFD programů hledají vhodný poměr mezi komplexitou daného modelu a přesností výsledků. Je vhodný nejpřesnější matematický model, který poskytne velmi reálnou predikci a zvýší časovou náročnost výpočtu nebo model, který je zjednodušením daného děje, ale pro analýzu poskytne uspokojivou predikci v reálně únosném výpočetním čase? Výpočetní čas simulace se výrazně liší podle velikosti domény, velikosti buněk, a použitých modelů. Jedná se o výpočty časově náročné, které se pro konkrétní aplikace podle možností výpočetní techniky stále pohybují v řádech hodin i dní.

Uživatel CFD programu si musí být vědom toho, jaké fyzikální modely k popisu jednotlivých procesů implementuje, jaké jsou limity a zjednodušení modelů proti skutečné fyzikální podstatě procesu a jaká omezení plynou z numerického řešení. Např. u programu, který uvažuje zjednodušenou spalnou reakci, při které vznikající plyny obsahují pouze vodní páru, CO_2 a CO a uživatel použije defaultní plyn jako palivo, nelze očekávat detaily o toxicitě spalin.

Při vyhodnocování výsledků CFD simulace je třeba uvažovat limity modelu a ty zohlednit při interpretaci výsledků. CFD programy, které se využívají pro popis stabilních hasicích zařízení, popisují rozstřík kapek a jejich interakci s okolním prostředím, viz kapitolu 3. Rozsáhlou oblastí je simulace odvětrání kouře a tepla. Modely v tomto případě popisují nucené proudění, na které je třeba zaměřit citlivost ověření velikosti sítě. Pro studium detekce požáru se modely zaměřují na přesné modelování rozvoje požáru a šíření plamene.

2.5 Verifikační příklady

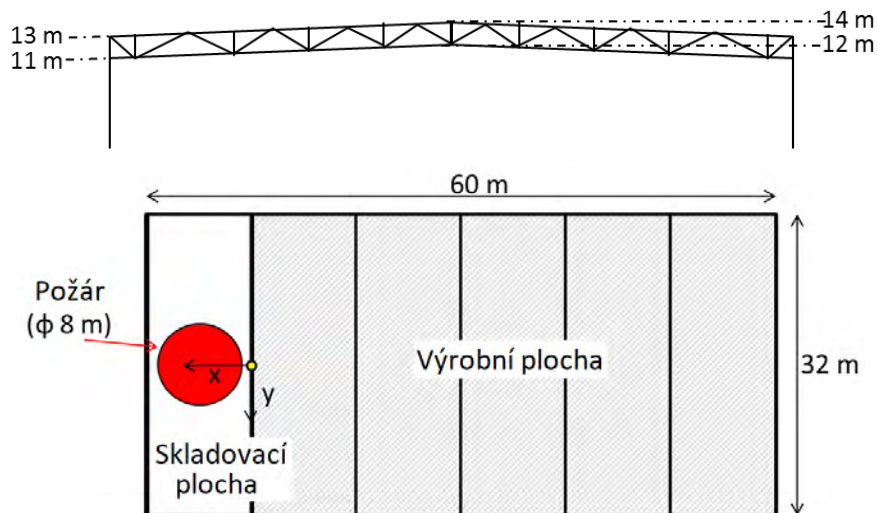
2.5.1 Zónový model požáru v průmyslové hale

Předmětem ověřovacího příkladu je výpočet teploty poblíž vazníků průmyslové haly pomocí zónového modelu OZone verze 3.0.4/2018. V hale je uvažován lokální požár na kruhové ploše o průměru 8 m. Vstupní hodnoty pro rychlost uvolňování tepla jsou použity dle normy ČSN EN 1991-1-2. Analýza je zaměřena na vazníky, jejichž prvky jsou vystaveny účinkům požáru.

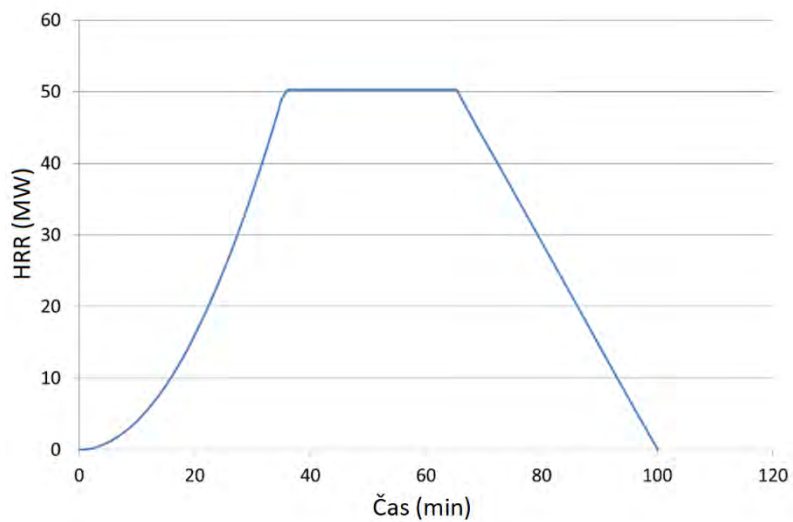
Popis budovy a požární scénář

Skladovací hala na obrázku 2.1 je 60 m dlouhá a 32 m široká s vrcholem ve výšce 14 m. Vazníky s pasy průřezu HEA 220 a diagonálami L60×60×6 jsou umístěny v osových vzdálenostech 10 m. Dolní pásnice vazníku je ve výšce 12 m. Hala slouží pro výrobu. Na konci budovy je malá skladovací plocha, ve které se předpokládá lokální požár. Je uvažováno s požárem 10 t celulózného materiálu, který je skladován na ploše 50 m². Ve výpočtu je použita ekvivalentní kruhová plocha požáru o průměru 8 m. Křivka rychlosti uvolňování tepla (HRR) na obrázku 2.2 je uvažována podle přílohy E v EN 1991-1-2. Předpokládá se, že

- a) střední rychlost rozvoje požáru je $t_{\alpha} = 300$ s,
- b) zdroj požáru je celulóza s výhřevností 17,5 MJ/kg a
- c) rychlost uvolňování tepla na jednotku plochy je 1000 kW/m².



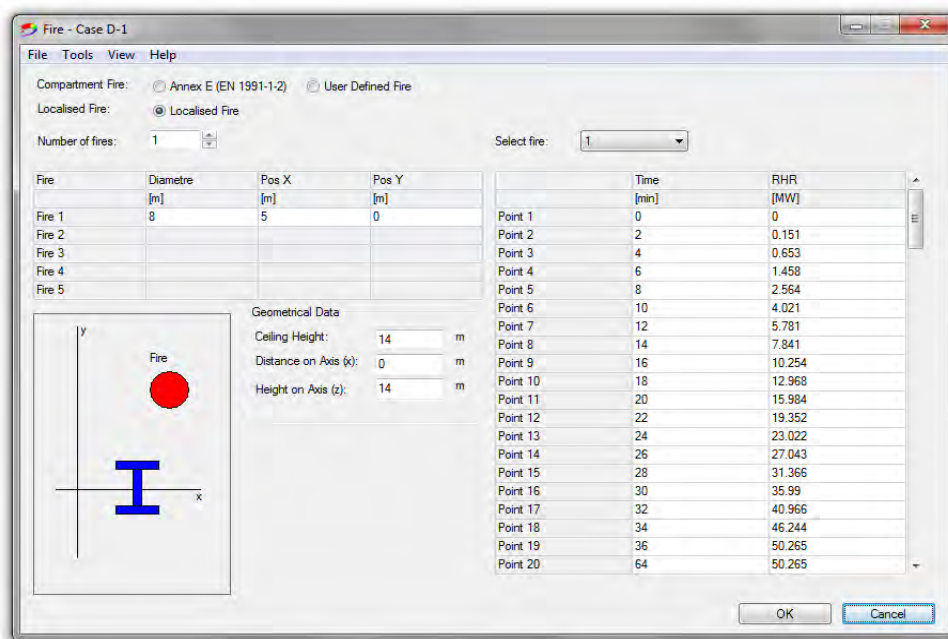
Obrázek 2.1: Průmyslová budova – Řez a Půdorys



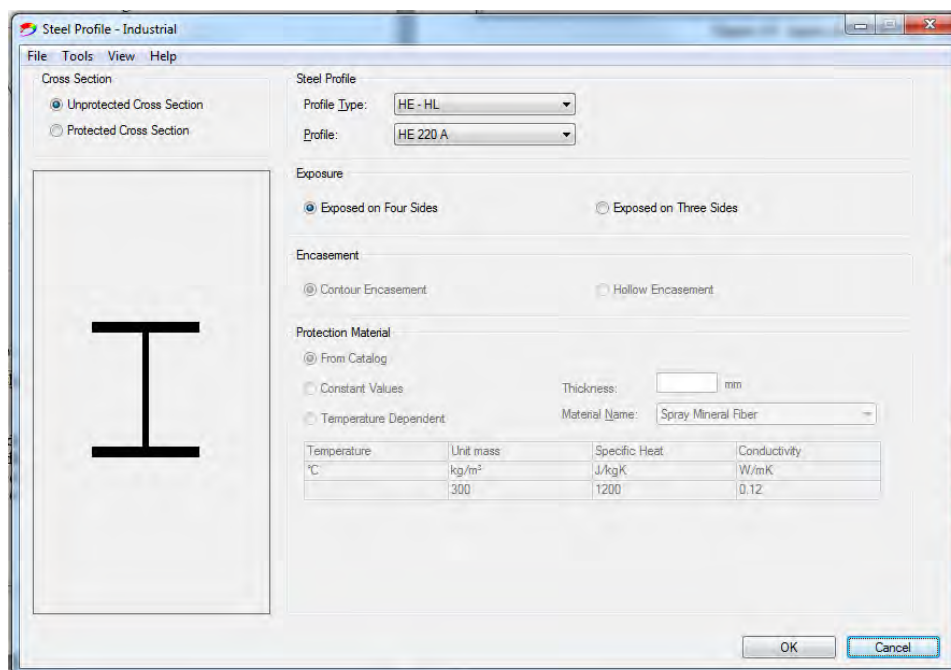
Obrázek 2.2: Křivka HRR pro lokální požár v hale

Vstupní data do programu OZone

Analýza je zaměřena na vazníky, jejichž prvky jsou vystaveny účinkům požáru. Vstupní data jsou zadána do softwaru OZone následovně:



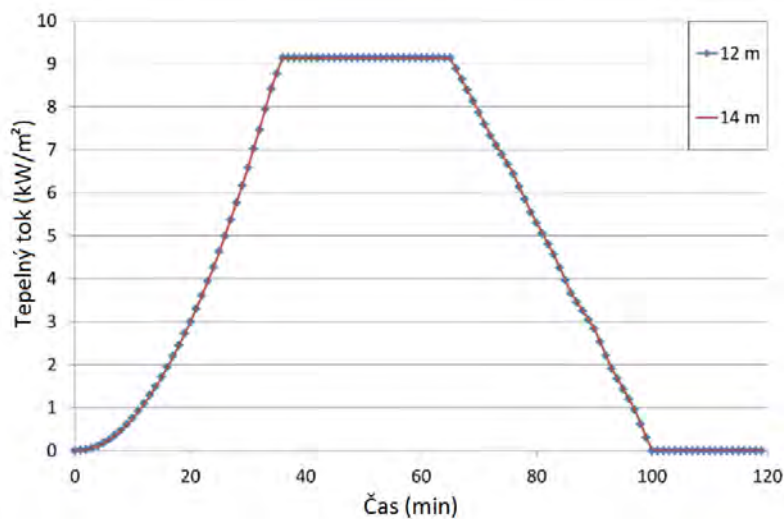
Obrázek 2.3: Vstupní data specifikující požární scénář



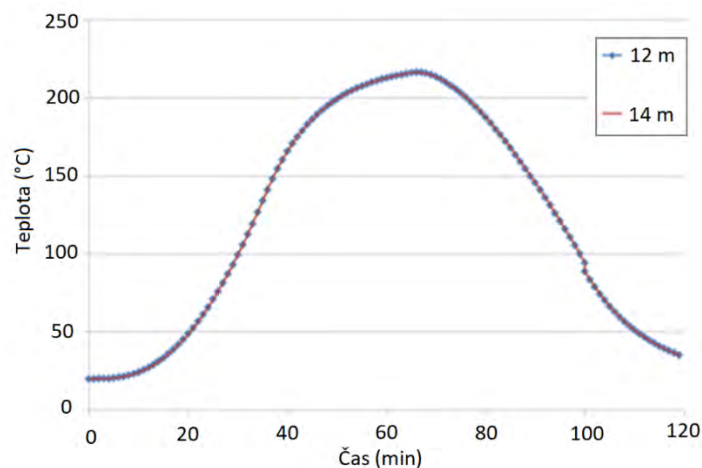
Obrázek 2.4: Vstupní data specifikující analyzovaný prvek

Výsledky

Při požáru o průměru 8 m a maximální HRR 50 MW je výška plamene 9,7 m. Plameny nezasáhnou strop. Tepelný tok dopadající na horní a dolní pas vazníku (radiační) je přes 9 kW/m² (obrázek 2.5). Teplota dolního pasu vazníku dosáhne 210 °C (obrázek 2.6).



Obrázek 2.5: Přijatý radiační tepelný tok spodním a horním pasem vazníku



Obrázek 2.6: Teplota spodního a horního pasu vazníku

Shrnutí

Příklad uvádí výpočet radiačního tepelného toku dopadající na prvky vazníku a jeho teplotu v zónovém modelu. Výpočet je proveden na základě metody popsané v (Francis, 2018). V uvedeném případě je uvažováno pouze s radiačním tepelným tokem, tepelný tok prouděním je zanedbán. Vstupní hodnoty zvoleného požárního scénáře se opírají o normu ČSN EN 1991-1-2.

2.5.2 Zónový model požáru v otevřeném parkovacím domě

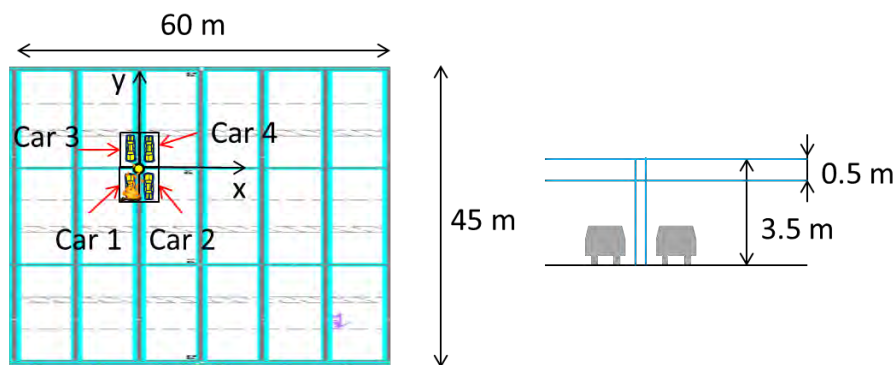
Předmětem ověřovacího příkladu je výpočet tepelného toku a teploty ocelového sloupu v budově otevřené garáže (ECCS 75, 1993). Výpočet je proveden pomocí zónového modelu OZone verze 3.0.4/2018. V budově je uvažován lokální požár, při kterém hoří čtyři automobily. Vstupní hodnoty pro rychlost uvolňování tepla vychází z experimentů naměřených ve Francii. Analýza je

zaměřena na ocelový sloup, jehož teplota je počítána po segmentech dle metody uvedené v (Francis a kol., 2018).

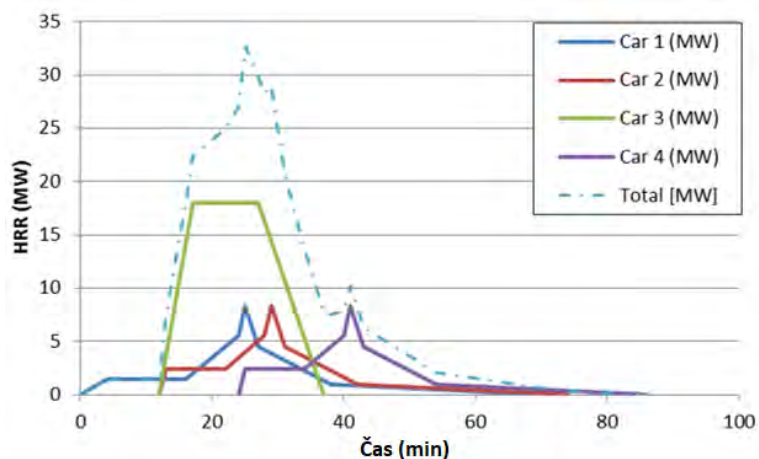
Popis budovy a požární scénář

Celkové rozměry budovy otevřeného parkoviště jsou 60 m x 45 m, s pravidelným rastrem nosné konstrukce 10 m x 15 m. Výška stropu je 3,5 m, viz obrázek 2.7. Hlavní nosníky jsou 0,50 m vysoké a ocelové sloupy podpírající tyto nosníky jsou z profilu HEA 300. Parkovací místa mají standardní rozměry 2,5 m x 5 m; s plochou 12,5 m², což je ekvivalentní lokálnímu požáru o průměru 4 m. Nosníky umístěné pod stropem ovlivňují šíření kouře pod stropem.

Uvažovaný požární scénář zahrnuje čtyři vozidla stojící kolem sloupu. Tři vozidla jsou velké automobily, zatímco poslední auto je dodávka. Tato situace je jedním z požárních scénářů, které je nutné podle francouzských předpisů ověřit. Uvažovaná hodnota rychlosti uvolňování tepla je uvedena na obrázku 2.8. Uvedená data pochází z experimentů provedených ve Francii v roce 1996. Požár začíná u vozu 1 a po 12 min se rozšiřuje na automobily 2 a 3. Po dalších 12 min se oheň rozšíří na vozidlo 4.



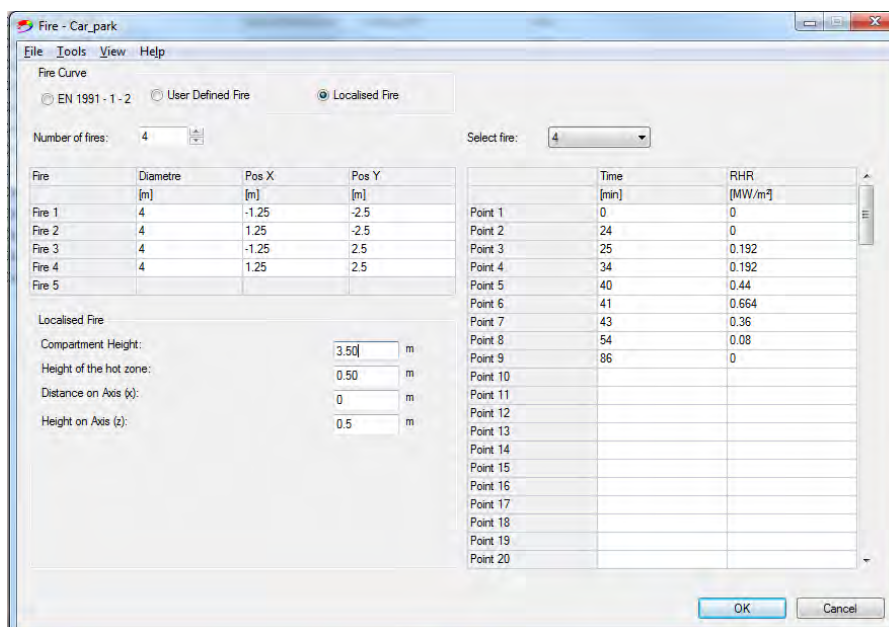
Obrázek 2.7: Rozměry budovy otevřené garáže a umístění vozidel



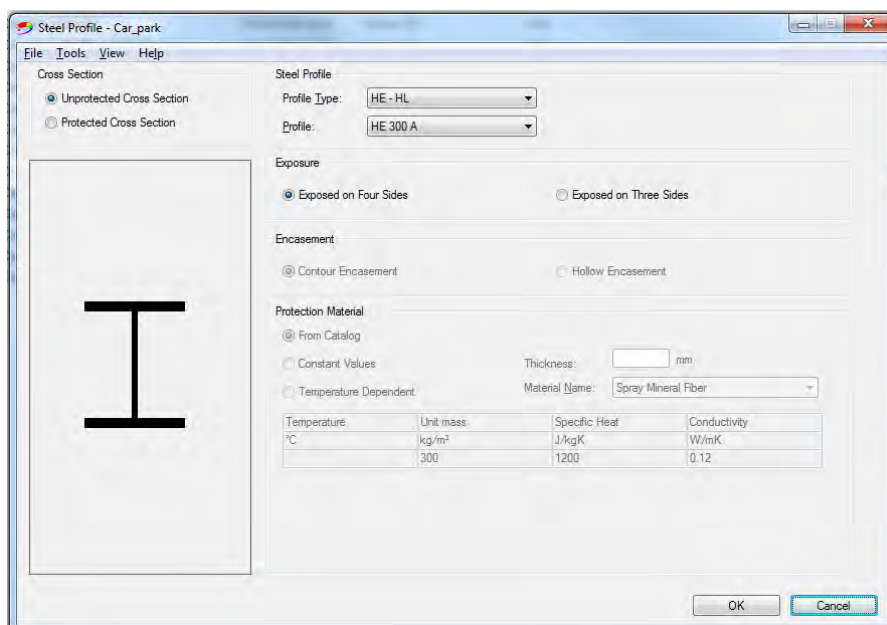
Obrázek 2.8: Křivka HRR pro jednotlivá vozidla

Vstupní data do programu OZone

Analýza je zaměřena na ocelový sloup, který se nachází nejbližší požáru. Pro výpočet je potřeba zadat čtyři zdroje požáru, jejich polohu vůči řešenému sloupu a křivku HRR pro každý tento zdroj. Dále pak výšku stropu, výšku, ve které může být zóna horkých plynů zadržována (ovlivněno výškou nosníků) a výšku, ve které má být na sloupu proveden výpočet. Dále musí být definován průřez sloupu v záložce Steel Profile. Vstupní data jsou zadána do softwaru OZone následovně:



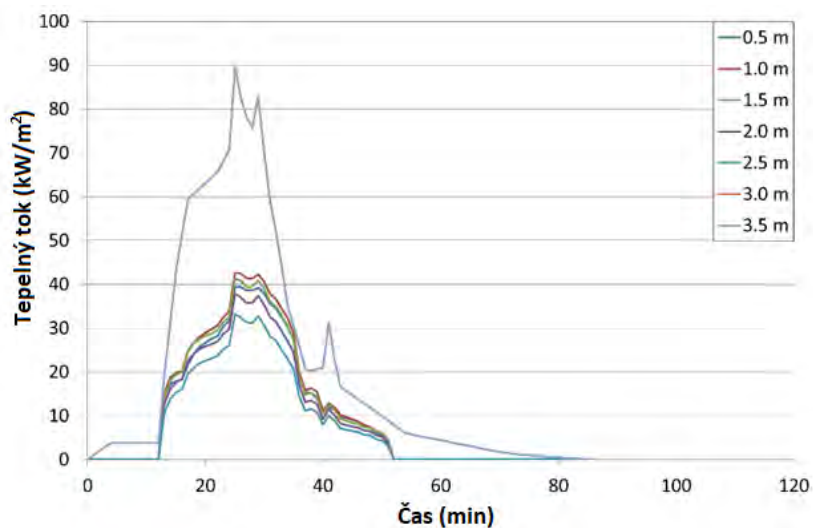
Obrázek 2.9: Vstupní data specifikující požární scénář



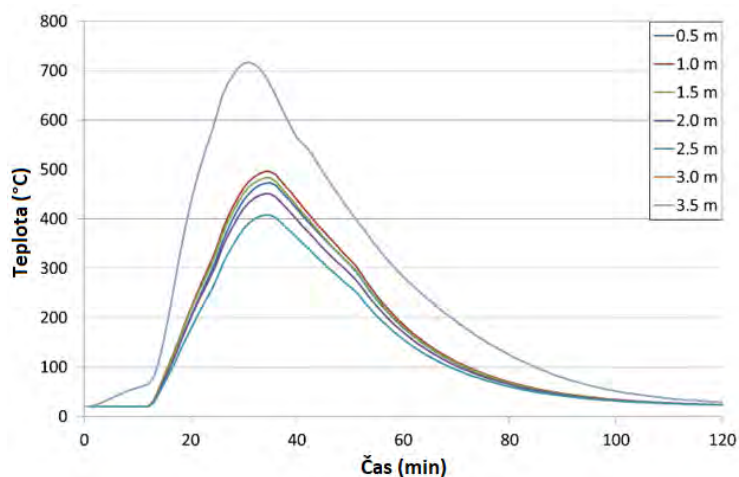
Obrázek 2.10: Vstupní data specifikující analyzovaný prvek

Výsledky

Software umožňuje grafické znázornění výsledků tepelného toku a teploty prvku daného segmentu. Obrázek 2.11 uvádí výsledky pro řešený sloup po segmentech o délce 0,5 m. V horké vrstvě plynů pod stropem (mezi 3,0 m a 3,5 m) dosahuje teplota sloupu 700°C. Mimo tuto vrstvu je maximální teplota sloupu 500 °C ve výšce 1 m.



Obrázek 2.11: Přijatý radiální tepelný tok po výšce sloupu



Obrázek 2.12: Teplota po výšce sloupu

Shrnutí

Příklad uvádí výpočet radiačního tepelného toku dopadající na ocelový sloup a jeho teplotu v zónovém modelu (Węgrzyński 2016). Výpočet je proveden na základě metody popsané v (Francis a kol., 2018). Vstupní hodnoty zvoleného požárního scénáře se opírají výsledky experimentů automobilů.

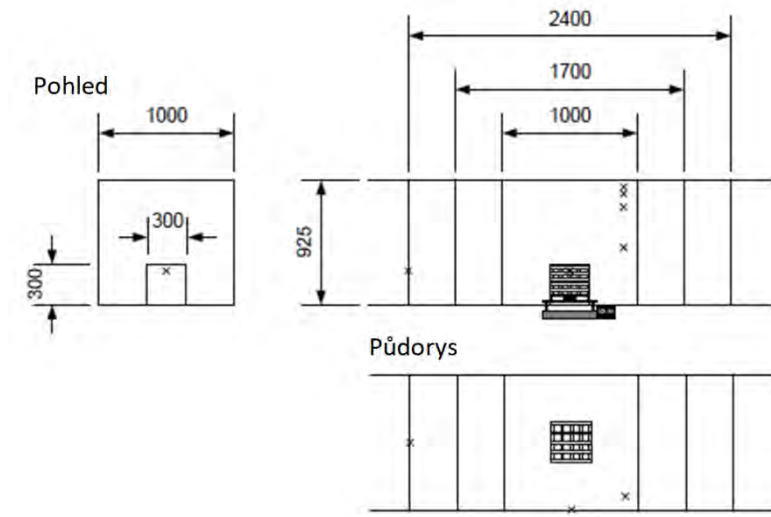
2.5.3 CFD model požáru v malém požárním úseku

Předmětem ověřovacího příkladu je výpočet teploty plynu pod stropem malého požárního úseku pomocí softwaru FDS (Lopes, Vaz, 2004). Vstupní hodnoty v modelu, tj. geometrie požárního úseku, materiálové vlastnosti a rychlost uvolňování tepla, jsou převzaty z požární zkoušky v projektu BRANFORSK (Lonnermark a Ingason, 2005).

Popis požární zkoušky

Požární zkouška v malém úseku o rozměrech 1,00 m x 1,00 m x 0,925 m je součástí série požárních zkoušek provedených v rámci projektu BRANFORSK (Lonnermark a Ingason, 2005). V úseku se nachází jeden otvor o rozměrech 0,30 m x 0,30 m. Požární zatížení tvoří dřevěná hranice umístěná na půdorysné ploše 0,30 m x 0,30 m. Teplota plynu je zaznamenána pomocí pěti termočlánků. Čtyři termočlánky jsou umístěny na svislici v rohu, 10 cm od každé stěny požárního úseku, ve vzdálenosti 5 cm, 10 cm, 20 cm a 50 cm pod stropem. Jeden termočlánek je umístěn na ose větracího otvoru, 5 cm pod horním okrajem. Schéma úseku s vyznačenou polohou termočlánků (na obrázku jako „x“, rozměry v mm) je uvedeno na obrázku 2.13. Popis materiálu ohraničujících konstrukcí požárního úseku není součástí zprávy o zkoušce.

Během požární zkoušky byla zaznamenána rychlost uvolňování tepla (HRR) z hořící hranice dřeva a průběh teploty plynu na pěti uvedených termočláncích.



Obrázek 2.13: Uspořádání požární zkoušky (Lonnermark a Ingason, 2005)

Numerický model

Software

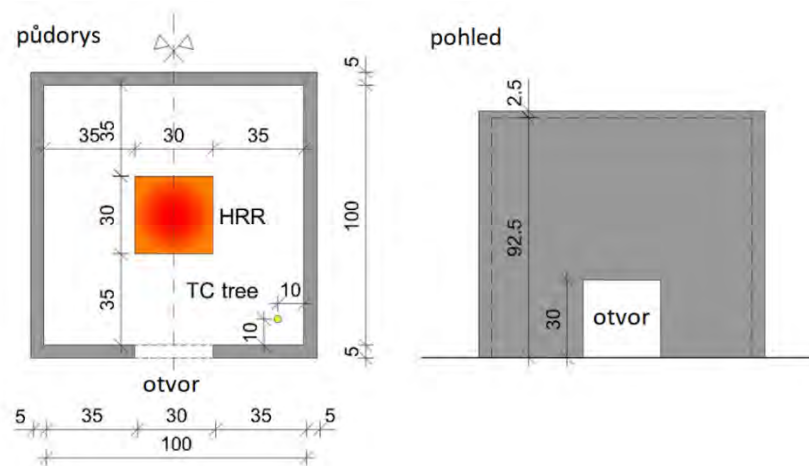
Výpočet je proveden pomocí softwaru Fire Dynamics Simulator (FDS), verze 6.5.2. Výsledky jsou zobrazeny v postprocesoru Smokeview, verze 6.3.12.

Výpočetní čas

Obecně se doporučuje ponechat velikost výpočetního kroku v základním nastavení softwaru, tzn. nenastavovat vlastní hodnotu. V tomto případě je však časový krok výpočtu zvolen 0,1 s. Celkový čas simulace je 1800 s.

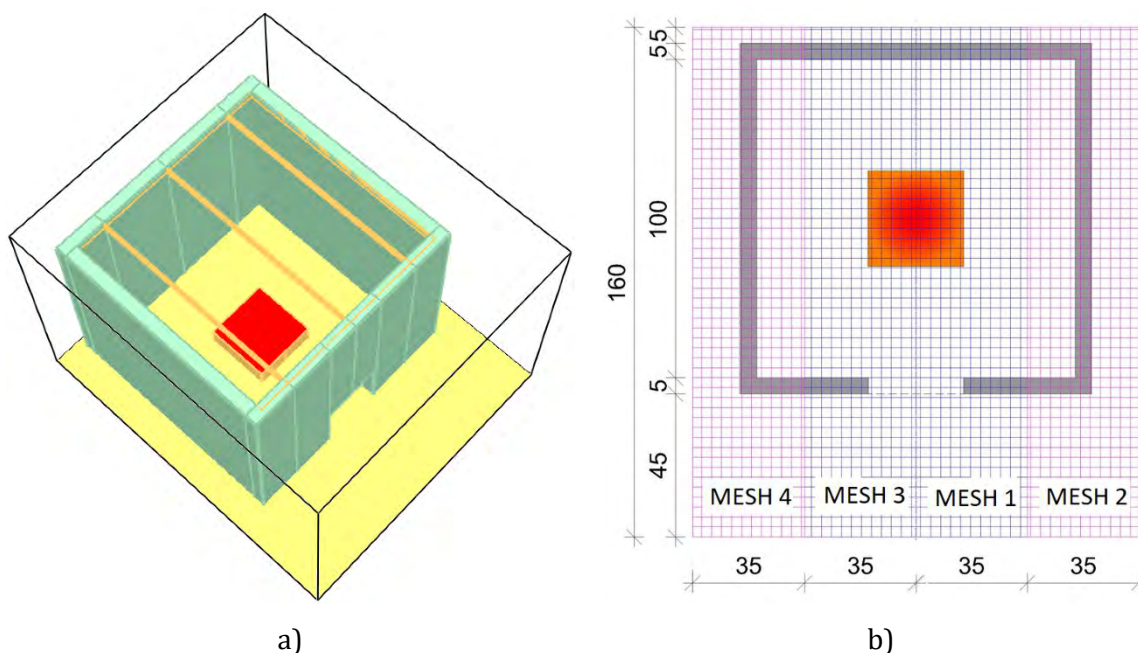
Výpočetní oblast a síť

Rozměry modelu odpovídající rozměrům úseku z požární zkoušky jsou uvedeny na obrázku 2.14 (rozměry v cm). Na obrázku 2.15 je vizualizace modelu celého požárního úseku.



Obrázek 2.14: Geometrie modelu

K výpočtu jsou použity čtyři sítě o rozměrech 0,35 m x 1,60 m x 1,20 m, viz obrázek 2.15. Každá síť je rozdělena na buňky o rozměrech 0,03 m x 0,03 m x 0,03 m. Velikost buněk sítě je zvolena jako vhodný poměr mezi správností dosažených výsledků a potřebným časem pro výpočet. Před ventilačním otvorem je síť rozšířena o 50 cm, aby ve výpočtu nebylo narušeno přirozené proudění plynů dovnitř a ven požárního úseku.



Obrázek 2.15: a) Vizualizace modelu s výpočetními sítěmi pro symetrickou polovinu; b) Výpočetní síť modelu (rozměry v cm)

Materiály

Materiál ohraničujících konstrukcí je zvolen s ohledem na typ požární zkoušky a fakt, že se jedná o snadno přemístitelné příčky. V modelu je použit sádrokarton s tepelně technickými vlastnostmi uvedenými v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Tepelně technické vlastnosti sádrokartonu

Měrná tepelná kapacita [kJ/(kg·K)]	0,84
Součinitel tepelné vodivosti [W/(m·K)]	0,48
Emisivita povrchu	0,9
Absorpční součinitel [1/m]	0,0005

Okrajové podmínky

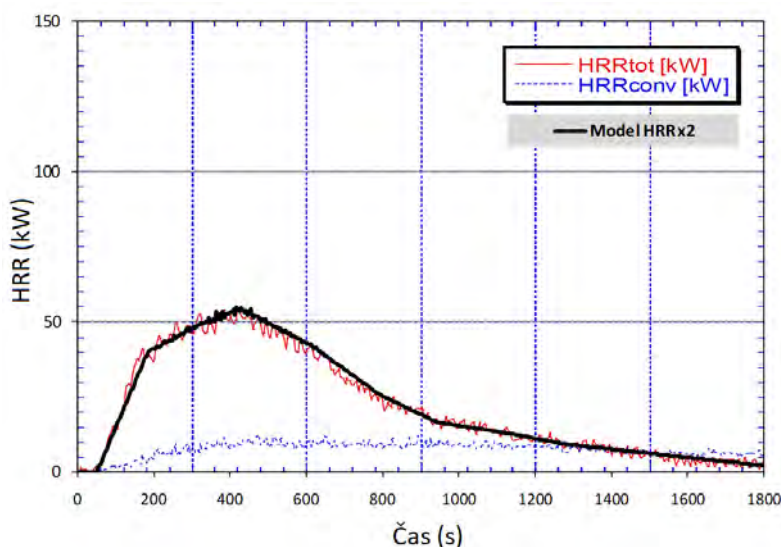
Hranice výpočetní oblasti je kromě podlahy ponechána jako otevřená (VENT typu OPEN).

Geometrie pevných těles

Stěny a strop požárního úseku jsou ze sádkartonu, jehož vlastnosti jsou definovány v tabulce 2.1. Tloušťka ohraničujících konstrukcí je v modelu zvolena 0,05 m. Větrací otvor o velikosti 0,3 m x 0,3 m je vytvořen pomocí otvoru ve stěně (příkaz HOLE). V modelu rozměry otvoru nepatrně přesahují hranici stěny, aby došlo ke správnému vykreslení v grafické vizualizaci ve Smokeview. Dřevěná hranice je v modelu simulována pomocí tělesa o rozměrech 0,3 m x 0,3 m x 0,1 m. Těleso má vlastnosti povrchu typu INERT, tzn. nereagující s okolním prostředím. Na tomto tělese je umístěn zdroj hoření.

Zdroj a reakce hoření

Hoření dřevěné hranice není v modelu simulováno. Zdroj požáru je nahrazen plochou s definovanou závislostí HRR na čase. Na obrázku 2.16 je vidět průběh HRR v čase zaznamenaný během požární zkoušky a zjednodušená křivka, která je použita v modelu. Jelikož je v FDS výkon požáru zadáván pomocí rychlosti uvolňování tepla na jednotku plochy (HRRPUA), vstupní hodnoty HRR jsou upraveny pomocí plochy 0,30 m x 0,30 m², na které se nachází zdroj požáru. Hodnota HRRPUA použitá v modelu je rovna 604,44 kW/m². Plocha s daným výkonem požáru je umístěna 10 cm nad podlahou. Postupné uvolňování tepla je v modelu zadáno pomocí závislosti podílu HRRPUA na čase, jak je uvedeno v tabulce 2.2.



Obrázek 2.16: Náhrada rychlosti uvolňování tepla požáru dřevěné hranice zjednodušenou křivkou

Tabulka 2.2: Závislost HRRPUA na čase

HRR na jednotku plochy je 604,44 kW/m ²	
Čas [s]	Podíl [-]
0,0	0,000
48,0	0,000
181,0	0,736
314,0	0,906
419,0	1,000
610,0	0,774
790,0	0,472
943,0	0,302
1105,0	0,245
1276,0	0,170
1800,0	0,038
1860,0	0,000

Pro reakci hoření, která se ve vstupech definuje, je pro jednoduchost využít propan. Byly použity vlastnosti propanu v databázi programu FDS. Ve zdrojovém kódu není proto třeba blíže specifikovat počet atomů uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku atd., pouze specifikace &REAC FUEL='PROPANE'. Ve skutečnosti je látkou vstupující do reakce hoření dřevo. Definice tohoto reaktantu se doporučuje pouze zkušeným uživatelům.

Měřící zařízení

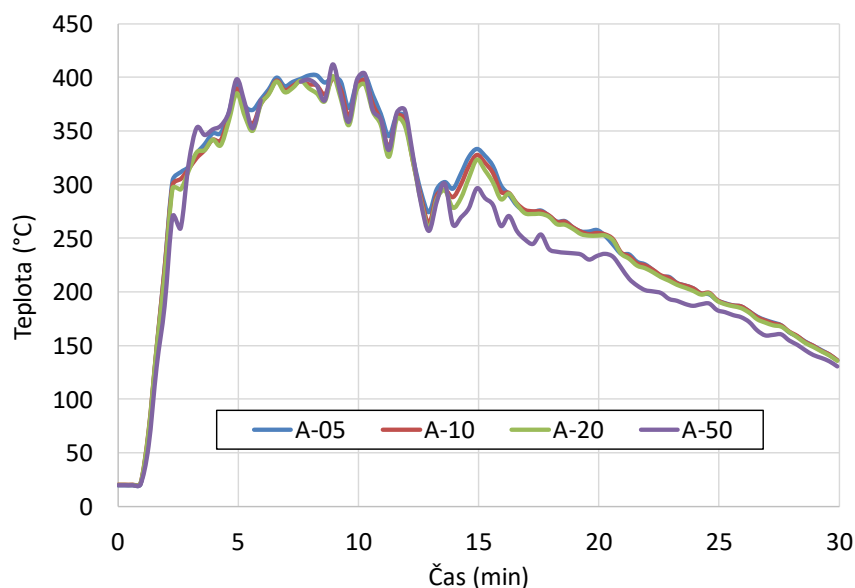
Teplota plynu je v modelu řešena pomocí příkazu TEMPERATURE. Body pro výpočet teploty jsou umístěné 5 cm, 10 cm, 20 cm a 50 cm pod stropem.

Další parametry výpočtu

V modelu je použita výpočetní metoda velkých vírů, Large Eddy Simulation (LES), se základním nastavením hodnot. Ostatní parametry, které zde nejsou zmíněny, jsou v modelu ponechány v základním nastavení FDS. Vstupní kód modelu požáru je popsán na konci této kapitoly.

Výsledky

Průběhy teploty plynu vypočítané softwarem FDS na termočláncích umístěných 5 cm, 10 cm, 20 cm a 50 cm pod stropem jsou znázorněny v grafu na obrázku 2.17.



Obrázek 2.17: Vypočítané teploty plynu v daných výškách pod stropní konstrukcí

Shrnutí

Příklad uvádí výpočet teploty plynu při hoření dřevěné hranice v malém požárním úseku pomocí softwaru FDS. Pro zjednodušení výpočtu a zkrácení potřebného času řešení je dřevěná hranice nahrazena plochou vydávající shodné množství tepla. Většina parametrů výpočtu je ponechána v základním nastavení. Model si tak zachovává jednoduchost a praktičnost. Díky validaci pomocí výsledků požární zkoušky provedené v rámci projektu BRANDFORSK (Lönnermark a Ingason, 2004) je ověřená dostatečná shoda modelu s reálnou zkouškou. Příklad lze využít jako ověřovací příklad pro jednoduchou předpověď teploty plynu při požáru.

2.5.4 Studie citlivosti sítě v CFD modelu požáru

Předmětem ověřovacího příkladu je studie citlivosti velikosti sítě a její optimalizace při výpočtu v softwaru FDS. Síť ovlivňuje zásadně kvalitu/přesnost předpovědi výsledků a délku výpočtu. Příklad řeší tři různé zdroje požáru umístěné v suterénu třípodlažního objektu. V suterénu jsou použity čtyři různé výpočetní sítě. Příklad je převzat ze studie provedené v rámci Fire Risk Management Program IRC/NRC vypracované s cílem zvýšení požární bezpečnosti Kanadských domů.

Numerický model

Software

Numerické simulace byly provedeny pomocí výpočetního nástroje Fire Dynamics Simulator (FDS), verze 6.5.2.

Výpočetní oblast a síť

Výpočetní oblast odpovídá geometrii třípodlažní budovy o rozměrech 10,77 m x 9,24 m x 8,22 m. Jedním z nejvýznamnějších faktorů ovlivňujících kvalitu výsledků a délku výpočtu je hrubost výpočetní sítě, kterou zadává uživatel. V uvedeném modelu je použita pro 1.NP a 2.NP výpočetní síť o velikosti buněk 0,20 m x 0,20 m x 0,20 m. Pro suterén, kde se nachází zdroj požáru, je vytvořena samostatná síť jejíž velikost buněk se v jednotlivých simulacích mění. Pro první simulaci je použita velikost buněk 0,20 m x 0,20 m x 0,20 m; pro druhou simulaci je velikost buněk 0,14 m x 0,14 m x 0,14 m; pro třetí simulaci je použita velikost buňky 0,10 m x 0,10 m x 0,10 m a pro čtvrtou simulaci 0,08 m x 0,08 m x 0,08 m. Velikosti buněk sítě použité v přízemí jsou uvedeny v tabulce 2.3. Pro každý ze tří požárních scénářů jsou při simulacích postupně použity všechny čtyři hrubosti výpočetní sítě suterénu.

Tabulka 2.3: Velikost buněk výpočetní sítě použité v přízemí

Označení sítě	Počet buněk v síti	Velikost buňky (m)
1	54 x 54 x 40	0,20
2	75 x 65 x 20	0,14
3	108 x 90 x 27	0,10
4	135 x 120 x 36	0,08

Materiály

V modelu jsou pro zachování jednoduchosti příklady stropy a podlahy uvažovány jako ocelové a na stěny je použit sádrokarton. Vstupní data jsou uvedena níže.

Ocel

Měrná tepelná kapacita x hustota x tloušťka: 20 [K]/K·m²

Tloušťka 0,005 [m]

Sádrokartonové desky

Součinitel tepelné vodivosti: 0,48 [W/m·K]

Tepelná difuzivita: 4,1·10⁻⁷ [m²/s]

Tloušťka: 0,013 [m]

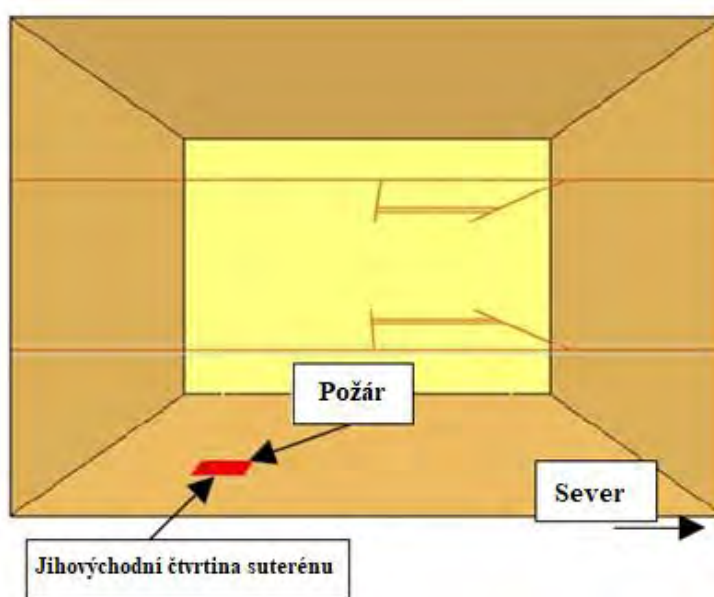
Okrajové podmínky

Podlaha a stropy jsou považovány za tenké stěny, to znamená, že teplota se předpokládá po celé šířce stejná. Vnější stěny jsou považovány za tepelně silné stěny. Model provádí jednorozměrný výpočet přenosu tepla po celé jejich tloušťce.

Geometrie pevných těles

Pro výzkum optimalizace hrubosti sítě FDS modelu je simulována třípodlažní budova pomocí uzavřeného objemu o rozměrech 10,77 m x 9,24 m x 8,22 m, viz. obrázek 2.18. Ve stěně v prvním podlaží je umístěn dveřní otvor o rozměrech 0,9 m x 2,4 m (příkaz HOLE). Objekt je rozdělen na tři podlaží (suterén, 1NP a 2NP). Stropy jsou simulovány pomocí dvou rovin ve výškách 2,7 m a 5,5 m. V těchto rovinách jsou umístěny otvory pro schodiště o rozměrech 3 m x 0,9 m (příkaz HOLE). Všechny otvory jsou během celé simulace považovány za otevřené.

Na podlaze suterénu je umístěna plocha o rozměrech 1 m x 1 m. Tato plocha simuluje zdroj požáru = propanový hořák.



Obrázek. 2.18: FDS Model objektu – přední pohled

Zdroj a požární scénáře

Zdroj požáru je aproximován jako obdélníkový objekt představující propanový hořák o ploše 1,0 m x 1,0 m. Zdroj má definovanou závislost HRR na čase. Pro tuto studii jsou brány v úvahu tři velikosti požáru s maximálními hodnotami HRR v rozsahu od 1500 do 3000 kW, viz tabulka 2.4. Je počítáno s rychlou rychlostí rozvoje požáru. Požáry začínají na $t = 0$ simulace a rostou s druhou mocninou času ($\alpha = 0,0469 \text{ [kW/s}^2\text{]}$) až na maximální hodnotu, kde lze HRR ve fázi rozvoje až do maximální hodnoty popsat vztahem E.5 v ČSN EN 1991-1-2. Jelikož je v FDS výkon požáru zadáván pomocí rychlosti uvolňování tepla na jednotku plochy (HRRPUA), vstupní hodnoty HRR jsou upraveny pomocí plochy 1,0 m². Čas do dosažení maximálních hodnot HRR tří simulovaných požárů je shrnut v tabulce 2.4

Tabulka 2.4: Čas do dosažení maximálních hodnot rychlosti uvolňování tepla

Q_{peak} (kW)	t_{peak} (s)
1500	179
2500	231
3000	253

Ve zdrojovém kódu je nutné definovat reakci hoření, při této simulaci byl využit propanový hořák. Vlastnosti propanu jsou k dispozici v databázi programu FDS. Není proto potřeba bližší specifikace ve zdrojovém kódu pomocí definice počtu atomů uhlíku, vodíku, kyslíku, dusíku atd., postačí zadat specifikaci &REAC FUEL='PROPANE'.

Měření

Teplota plynu je v modelu řešena pomocí příkazu TEMPERATURE. Body pro výpočet teploty jsou umístěny v suterénu na pozicích dle tabulky 2.5, kde:

- SWQP jsou body v jihozápadní čtvrtině suterénu,
- NWQP body v severozápadní čtvrtině suterénu,
- NEQP body v severovýchodní čtvrtině suterénu,
- TC - N° číselné označení termočlánků.

Tabulka 2.5: Pozice termočlánků

Označení	Pozice (m)			Umístění vůči světovým stranám
	x	y	z	
TC2	2,69	6,93	2,63	SWQP
TC12	8,07	6,93	2,63	NWQP
TC17	8,07	2,31	2,63	NEQP

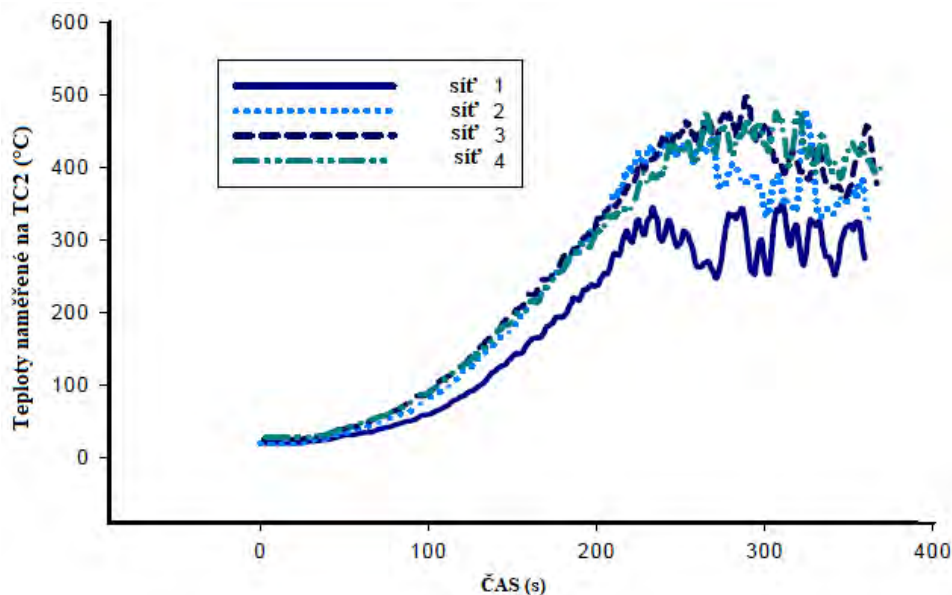
Výsledky

Měřenými parametry je teplota plynu, která byla zaznamenána v měřících bodech suterénu rozděleného na čtvrtiny dle světových stran.

Požár s maximálním výkonem 1 500 kW

V této simulaci je použita maximální hodnota HRR = 1500 kW dosažena za $t = 179$ s. Na obrázku 2.19 jsou znázorněny teploty vypočítané na TC2, který se nachází 0,1 m pod stropem suterénu v oblasti SWQP (jihozápadní čtvrtina suterénu). V grafu jsou uvedeny výsledky teplot vypočítaných při různém nastavení hrubosti výpočetních sítí pro zadaný požární scénář. Čím je síť jemnější, tím jsou výsledky přesnější a teplota naměřená na TC2 je vyšší. Zároveň výrazně roste čas potřebný k vyřešení numerického modelu.

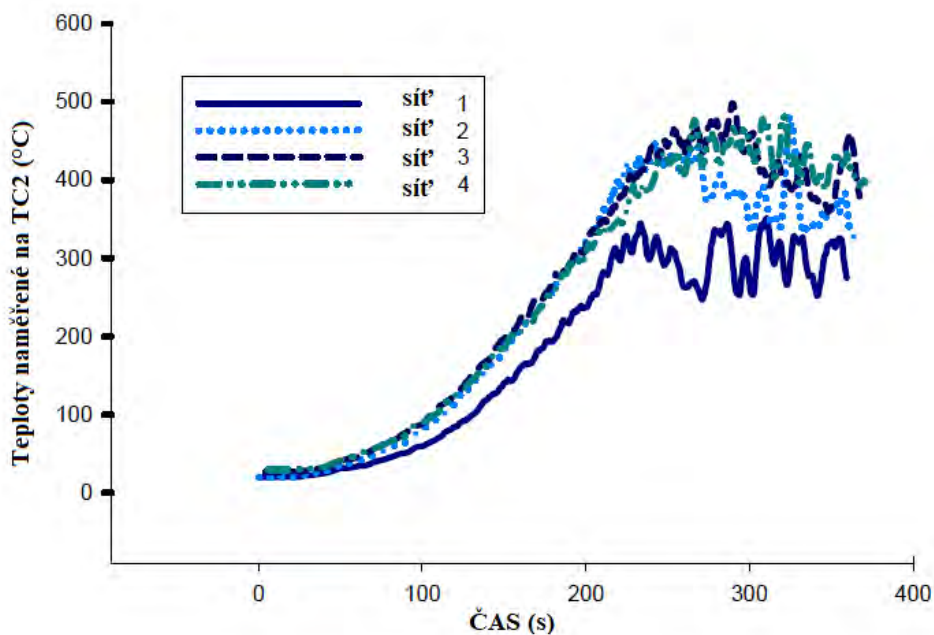
Z porovnání křivek v grafu se jako ideální velikost buňky sítě v přízemí budovy pro tento požární scénář jeví velikost 0,08 x 0,08 x 0,08 m. V rostoucí fázi se výsledky s touto sítí shodují s předchozími, ve fázi chladnutí však neklesá tak výrazně.



Obrázek. 2.19: Průběh teplot na TC2 pro různá nastavení hrubosti výpočetní sítě suterénu pro max HRR = 1 500 kW

Požár s maximálním výkonem 2 500 kW

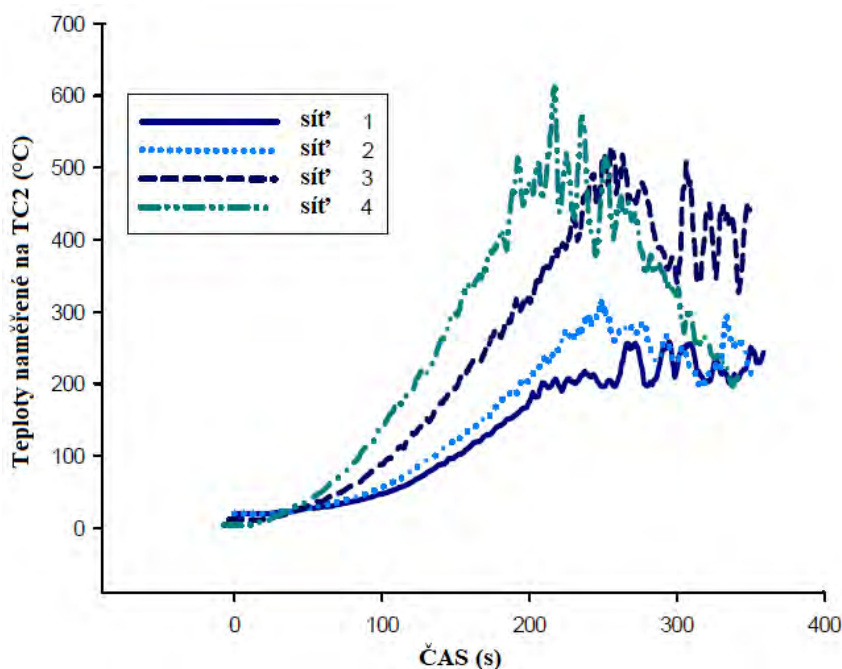
V této simulaci je použita maximální hodnota HRR = 2500 kW dosažena za $t = 231$ s. Na obrázku 2.20 jsou znázorněny teploty měřené na TC2, který se nachází 0,1 m pod stropem suterénu v oblasti SWQP (jihozápadní čtvrtina suterénu). V grafu je opět vidět, že čím je síť jemnější, tím jsou výsledky přesnější a teplota naměřená na TC2 je vyšší. Zároveň opět výrazně roste čas potřebný k vyřešení numerického modelu. U sítí 3 a 4 se výsledky téměř shodují, nicméně rozdíl v čase potřebném pro výpočet je velmi výrazný. Z toho vyplývá, že hrubost sítě 3 je pro přesnost výpočtu dostačující, ideální hrubost sítě suterénu je tedy pro tento požární scénář 0,10 x 0,10 x 0,10 m.



Obrázek. 2.20: Průběh teplot na TC2 pro různá nastavení hrubosti výpočetní sítě suterénu pro max HRR = 2 500 kW

Požár s maximálním výkonem 3 000 kW

V této simulaci je použita maximální hodnota HRR = 3000 kW dosažena za $t = 253$ s. Na obrázku 2.21 jsou znázorněny teploty měřené na TC2, který se nachází 0,1 m pod stropem suterénu v oblasti SWQP (jihozápadní čtvrtina suterénu). Pozorovaný fenomén je opět shodný. Čím je síť jemnější, tím jsou výsledky přesnější a teplota naměřená na TC2 je vyšší a zároveň výrazně roste čas potřebný k vyřešení numerického modelu. Hrubost sítě 3 se pro přesnost výpočtu jeví jako dostačující. Naměřené teploty se, ale v tomto případě neshodují, tak jako u požárního scénáře s max HRR = 2500 kW. To je z důvodu, že u požáru s max HRR = 3000 kW dochází po 280 s simulace k poklesu teploty z důvodu nedostatku kyslíku. Ideální hrubost sítě suterénu je tedy pro tento požární scénář 0,10 x 0,10 x 0,10 m.



Obrázek. 2.21: Průběh teplot na TC2 pro různá nastavení hrubosti výpočetní sítě suterénu pro max HRR = 3 000 kW

Shrnutí

Příklad uvádí studii citlivosti sítě pro optimalizaci velikosti výpočetní sítě vzhledem k přesnosti získaných dat. Dokládá časovou náročnost výpočtu numerických modelů softwaru FDS.

Numerické simulace jsou připraveny pro tři různé velikosti požáru a čtyři různé hrubosti sítě v suterénu objektu, kde se nachází zdroj požáru. Hrubost sítě v 1.NP a 2.NP je pro všechny simulace shodná.

2.5.5 Další verifikační příklady CFD modelů

Další příklady ověřující zkoumané jevy pomocí CFD modelů je možné dohledat v technických dokumentacích softwarových nástrojů. Např. FDS uvádí příklady v dokumentu Technical Reference Guide, Volume 2 – Verification (McGrattan a kol. 2019). Je zde možné najít příklady ověřující proudění plynů (kap. 3 The Basis Flow Solver), turbulenční model (kap. 4 Turbulence), model turbulentního proudění v blízkosti stěn (kap. 5 Boundary Effects), model proudění plynu potrubím (kap. 7.1.1 Flow of a Gas through a Simple Duct), zachování energie při hoření (kap. 7.2.1 The Heat from a Fire), radiační model (kap. 9 Thermal Radiation), model detektoru kouře (kap. 10.8 Smoke Detector Model), vedení tepla pevnou látkou (kap. 11 Heat Conduction), hoření kapaliny (kap. 11.3 Evaporation of a Liquid Surface), hoření pomocí definice procesu tepelné degradace (kap. 11.8 A Simple Two-Step Pyrolysis Example), atd.

Některé z uvedených příkladů jsou součástí instalačního balíčku (soubor Examples).

3 Modelování sprinklerové ochrany

3.1 Zabezpečení aktivními požárně bezpečnostními zařízeními

3.1.1 Koordinace požárně bezpečnostních zařízení

Aktivní požárně bezpečnostní zařízení hrají významnou roli zejména v prvotní fázi požáru, po jeho iniciaci, před prostorovým vzplanutím. Zařízení mohou upozornit osoby v objektu na nebezpečí požáru a zároveň prostřednictvím zařízení dálkového přenosu přímo informovat jednotky požární ochrany. Případně mohou samy významně zmírnit nebo zcela eliminovat působení požáru v zasaženém objektu.

S rostoucí velikostí budov a jejich větší komplexností je požárem ohroženo více osob a majetku než dříve. Jedná se zejména o shromažďovací prostory, obchodní centra a skladové haly. U těchto staveb již není běžná pasivní ochrana, rozdělení stavby na požární úseky a zajištění požární odolnosti stavebních konstrukcí dostačující. Využitím aktivních požárně bezpečnostních zařízení a opatření (např. stabilní hasicí zařízení, elektrická požární signalizace, zařízení pro odvod kouře a tepla) se projektantům usnadňuje dispoziční řešení objektu, protože požární úseky mohou být větší, resp. klesají požadavky na pasivní požární zajištění (Reichel, 1987).

Hlavní cíle použití aktivních prvků požární ochrany jsou tyto (ČSN 73 0802, 2009):

- bezpečná evakuace osob,
- snížení tepelného zatížení stavebních konstrukcí,
- zkrácení doby působení požáru,
- zlepšení podmínek pro zásah jednotek PO.

Správná funkce požárně bezpečnostních zařízení je podmíněná optimálním projektovým řešením, odborně provedenou montáží, včetně ověření provozuschopnosti, pravidelnou údržbou a kontrolou zařízení (Kučera a kol., 2008).

Součástí projektového návrhu je rovněž koordinace požárně bezpečnostních zařízení. Rozsáhlé nebo rizikové stavby jsou charakteristické současnou instalací více druhů požárně bezpečnostních zařízení v jednom prostoru nebo požárním úseku. Kumulace těchto zařízení v jednom prostoru vyvolává potřebu řešení jejich koordinace a interakce.

Koordinací požárně bezpečnostních zařízení se rozumí takové nastavení časové posloupnosti uvádění jednotlivých zařízení do činnosti, při kterém je dosaženo maximálního účinku každého zařízení. Z pohledu koordinace a interakce požárně bezpečnostních zařízení jsou zpravidla řešeny zejména elektrická požární signalizace, včetně zařízení dálkového přenosu, stabilní hasicí zařízení a zařízení pro odvod kouře a tepla. Především ve výrobních prostorách, jsou provedeny posouzení koordinace a interakce zařízení také zařízení pro detekci hořlavých

plynů a par a automatická výbuchová zařízení. Součástí posouzení koordinace vyhrazených požárně bezpečnostní zařízení je také vazba na ostatní instalovaná požárně bezpečnostní zařízení.

3.1.2 Interakce požárně bezpečnostních zařízení

Interakcí požárně bezpečnostních zařízení se rozumí vzájemné ovlivnění působení (činnosti) zařízení, a to jak v pozitivním, tak v negativním smyslu. Cílem je zamezit vzájemnému negativnímu ovlivnění činnosti jednotlivých zařízení.

Přípustnost kombinací požárně bezpečnostních zařízení je ovlivněna principem funkce těchto zařízení. Standardní kombinační možnosti jednotlivých druhů stabilního hasicího zařízení (SHZ) a zařízení pro odvod kouře a tepla (ZOKT) jsou schematicky popsány v tabulce 3.1.

Tabulka 3.1: Kombinace SHZ a ZOKT (Kučera a kol., 2013)

Druh SHZ	Varianta provedení SHZ	Druh ZOKT	Možnost kombinace
Vodní	Sprejová, mlhová	Samočinné spouštění	ZPRAVIDLA NE
		Manuální spouštění	ZPRAVIDLA ANO
	Sprinklerová (standardní)	Samočinné nebo manuální spouštění	ANO
	Sprinklerová ESRF	Samočinné spouštění	OMEZENĚ
		Manuální spouštění	ANO
Drenčerová	Samočinné nebo manuální spouštění	ANO	
Pěnová		Samočinné nebo manuální spouštění	ANO
Plynová		Samočinné nebo manuální spouštění	NE
Prášková (aerosolová)		Samočinné nebo manuální spouštění	NE
Vysvětlivky:	SHZ – stabilní hasicí zařízení ZOKT – zařízení pro odvod tepla a kouře ESFR – speciální druh sprinklerové hlavice pro použití v regálových skladech		

Kombinační možnosti SHZ a ZOKT v tabulce 3.1 nelze generalizovat. Může se vyskytnout řada situací, které budou vyžadovat odlišný způsob řešení. Při společných návrzích sprinklerových hasicích zařízení a ZOKT je třeba respektovat určitá omezení vyplývající z konkrétně zvolené kombinace, viz tabulku 3.2. Popisovaná limitující doporučení jsou založena nejen na teoretických předpokladech, ale také na poznatcích z likvidačních pojišťovacích událostí (VdS 2815, 2018). Jednotlivá zařízení jsou uváděna do činnosti různými způsoby, zpravidla jde o kouřové detektory, tepelné detektory a manuální spouštění. Při kombinacích zařízení má spouštěcí mechanismus značný význam. Nejde jen o prostou funkční posloupnost zařízení, ale zejména o dosažení požadovaného ochranného cíle.

Tabulka 3.2: Kombinační možnosti SHZ a ZOKT (VdS 2815, 2018)

ZOKT	Sprinklerová zařízení	Sprinklery ESFR
Nucené větrání	Možná kombinace	Omezeně možná kombinace (ZOKT až po iniciaci SHZ)
Přirozený odvod tepla a kouře (iniciováno kouřovým hlásičem)	Kombinace je možná a smysluplná při respektování návrhových předpisů	Nepřípustná kombinace
Přirozený odvod tepla a kouře (iniciováno tepelným čidlem)	Kombinace je možná a smysluplná při respektování návrhových předpisů	Spouštění ZOKT po ESFR (ESFR 68 °C, RTI <50; ZOKT 141 °C, RTI >80) Nutno dbát konstrukčních požadavků
Přirozený odvod tepla a kouře (manuální spouštění)	Kombinace je smysluplná	Kombinace je smysluplná
Vysvětlivky: SHZ – stabilní hasicí zařízení ZOKT – zařízení pro odvod tepla a kouře ESFR – speciální druh sprinklerové hlavice pro použití v regálových skladech RTI – index reakční doby sprinklerové hlavice		

Při manuálním spouštění ZOKT jsou zařízení spouštěna zpravidla až po iniciaci stabilních hasicích zařízení. ZOKT v tomto případě slouží zpravidla jako podpora hasebnímu zásahu záchranářů. Typickými případy jsou prostory, kde lze předpokládat intenzivní rozvoj požáru (velká množství hořlavých látek, intenzivní odhořívání materiálů, značné množství uvolněného tepla apod.).

Při instalaci zařízení ESFR je třeba možný negativní účinek ZOKT vyloučit (např. zamezit otevření většího počtu hlavice nebo sousedních hlavice z důvodu odklonění původně vertikálního sloupce kouřových plynů způsobeného vlivem odvětracích zařízení). Kombinační možnosti těchto typů zařízení jsou významně omezeny.

3.2 Principy sprinklerové ochrany

3.2.1 Základní termíny hašení požárů sprinklerovou ochranou

Simulace vlastního procesu hašení se v praxi obvykle zjednodušuje na základní principy zhášení a pohyb vodní kapky.

Kontrola požáru – omezení rozšiřování požáru a zamezení škod na stavebních konstrukcích (chlazením objektů, okolních zplodin hoření a/nebo smáčením okolních hořlavých látek).

Potlačení požáru – prudké snížení uvolňování tepla a zabránění rozšiřování požáru. Voda se aplikuje přímo a v dostatečném množství přes plameny na hořící povrch paliva.

Uhašení požáru – kompletní uhašení plamenného nebo žhnoucího požáru kdy dojde k zastavení uvolňování tepla.

3.2.2 Hasební efekt vody

Všechny látky v každém skupenství vyzařují energii v elektromagnetickém spektru. Základem tohoto jevu je pohyb jejich nabitých částic, což je zvláštní případ mechanického pohybu. Je to chaotický neuspořádaný pohyb a zúčastní se jej veškeré částice (elektrony, protony, neutrony, atomy i molekuly). Daný pohyb nelze pozorovat, patrné jsou však jeho důsledky (ohřev látek) (Krempaský, 1988).

Zmíněné charakteristiky platí samozřejmě i pro vodu a její ohřev. Při dodávání tepla do vody (zahřívání vody) dochází nejdříve k porušení vodíkových vazeb (můstků) mezi molekulami vody. Dalším dodáváním tepla dochází ke zrychlování pohybu jednotlivých molekul vody, tepelná energie působí přímo na jednotlivé molekuly, a teplota vody roste až na teplotu varu (mikroskopické pohyby jednotlivých molekul se v makroskopickém měřítku projeví ohřevem vody).

Hasební efekt vody spočívá zejména v odvádění tepla, když je voda ohřívána a posléze dojde k jejímu odpaření.

Z fyzikálního hlediska je pro ohřev třeba dodat teplo odpovídající měrné tepelné kapacitě vody, tzn. přibližně $4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (se musí dodat 4180 J tepelné energie 1 kg vody, aby se ohřála o 1 K, resp. 1 °C). Pro vypaření vody o hmotnosti 1 kg je následně třeba dodat asi 2,26 MJ tepla (Krempaský, 1988). V podmínkách požáru je dále možné počítat s tím, že na ochlazování prostoru požáru se dále podílí i vodní pára, která se ohřívá na teplotu prostředí a odvádí další teplo.

Hasební voda je obvykle aplikována třemi rozdílnými cestami:

- I. Voda je aplikována v drobných kapkách s průměrem menším než 1,0 mm do plamenů, které jsou ochlazovány odváděním tepla na ohřev a odpaření vody (Särdqvist, 1996). Když adiabatická teplota plamenů klesne pod cca 1 600 K (za stechiometrických podmínek), plamenné hoření uhasíná (Rasbash, 1986). Pro zastavení difuzního hoření (při kterém dochází k mísení oxidačního prostředku s hořlavou látkou až v pásnu spalování) postačuje odvést 30–35 % uvolněného tepla. Skutečnost je ovlivněna zejména tím, že difuzní plameny ztrácejí teplo radiací (v důsledku obsahu žhavých částic uhlíku v plameni) a spalování neprobíhá za ideálních podmínek. Tyto skutečnosti nám poukazují na fakt, že pro uhašení difuzních plamenů, které se vyskytují při požárech nejčastěji, postačuje odvést 1/3 reakčního tepla.
- II. Voda je aplikována přímo na povrch hořlavé látky. Ochlazení povrchu má za následek snížení rychlosti pyrolýzy a plamen uhasíná v důsledku nedostatečného přísunu plynného paliva do pásma spalování. Tento hasební efekt nastupuje obvykle po sražení plamenů v plynné fázi v místnosti. Další možností, jak ochladit povrch hořlavé látky je použití kapek velkých 2 až 3 mm např. prostřednictvím plného vodního proudu nebo tříštěním vody

na hrotu sprinklerové hlavice za nízkého tlaku. Tyto kapky se nedokáží odpařit v plynné fázi plamenů a dopadají až na povrch hořlavé látky..

III. Dále lze vodu aplikovat na povrch hořlavé látky v rámci požární obrany ještě před započítáním procesu hoření.

3.2.3 Tepelná bilance při hašení vodou

Při ohřátí vody z 10 °C na 100 °C se spotřebuje:

$$Q_1 = \Delta t \cdot c = 90 \cdot 0,00418 = 0,38 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.1)$$

Při odpaření vody se spotřebuje:

$$Q_2 = 2,26 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.2)$$

Při ohřátí vodní páry na konečnou teplotu prostředí je třeba odvést:

$$Q_3 = (600 - 100) \cdot 0,00201 = 1,01 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.3)$$

Ve výpočtu se uvažuje, že k rapidnímu omezení spalování v místnosti dojde při ochlazení plynů v místnosti na teplotu cca 600 °C (přibližná teplota kdy dochází v místnosti k celkovému vzplanutí). Při této teplotě dochází k omezení tepelné radiace pod kritickou hodnotu pro celkové vzplanutí (cca 20 kW·m⁻²) a ke zpomalení pyrolýzy hořlavých hmot. Ohřátí vodní páry na 600 °C lze tedy považovat za teplotní rozhraní mezi lokálním a plně rozvinutým požárem v místnosti.

Celkové množství tepla odebrané 1 kg vody aplikované do místnosti, ve které je požár na rozhraní lokálního a plně rozvinutého, se stanoví:

$$Q_w = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0,38 + 2,26 + 1,01 \doteq 3,6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3.4)$$

Pro uhašení difuzních plamenů postačuje odebrání 1/3 reakčního tepla. Pokud se předpokládá odpaření všech vodních kapek aplikovaných do místnosti, lze chladící kapacitu vody ztrojnásobit na 10,8 MJ·kg⁻¹. Model zhášení plamenů při plně rozvinutém požáru tedy předpokládá, že do prostoru je dodáno takové množství vody, že se to vyrovná množství tepla uvolněného hořením.

Tepelnou bilanci při hašení využívají pouze pokročilé modely požáru, a to různým způsobem. Řeší se obvykle ochlazování plynné fáze pomocí menších kapiček a chlazení pyrolýzních povrchů pomocí větších kapek. Další otázkou pak je roztékání vody po povrchu hořlavin a jeho smáčení. V těchto situacích modely využívají značná zjednodušení komplikovaných fyzikálně chemických jevů.

3.3 Modely pro kontrolu, potlačení a uhašení požáru sprinklerovou ochranou

Pro minimalizaci negativních projevů požáru a nasimulování kontroly, potlačení a uhašení požáru sprinklerovou ochranou prostřednictvím matematických modelů požáru, je třeba porozumět jeho

průběhu. Pro výběr správného matematického modelu pro vyjádření jevů, které jakkoliv souvisí s požárem, je třeba vědět, jakému účelu bude model sloužit. Je zřejmé, že škála možných modelů je velmi široká, každý z nich je zaměřen na určitou oblast požární bezpečnosti (Shestopal, 2003). Modelování účinnosti sprinklerové ochrany popsané v dalších kapitolách je zaměřeno na modely požáru užívané pro uzavřené prostory.

3.3.1 Základní dělení modelů

Výchozí dělení matematických modelů požáru je na zjednodušené, deterministické a pravděpodobnostní. Pro potřeby kontroly, potlačení a uhašení požáru sprinklerovou ochranou jsou modely děleny na:

- zjednodušené modely – obvykle zahrnují *zónové modely požáru*, které vyjadřují ideální průběh požáru v uzavřeném prostoru, a jde nyní již nejen o tradiční metodický postup pro stanovení zjednodušeného rozvoje požáru, šíření zplodin hoření, ale také kontrolu požáru sprinklerovou ochranou. Vlastní koncept zónových modelů využívá empirie, neboť je založen na fyzikálních jevech pozorovaných při skutečných požárech.

Zjednodušené modely hašení jsou určeny pro základní návrh systému sprinklerové ochrany.

- pokročilé modely – dnes zastupují převážně CFD modely, které řeší základní mechanismy přenosu hmoty, energie a hybnosti, avšak pro specifikaci požáru využívají speciální submodely, jež zahrnují okrajové podmínky a formulaci procesu hoření, hašení nebo přenosu tepla. Modely CFD jsou vhodné pro celou řadu problémů, které nemohou zjednodušené modely pokrýt. Například zahrnují vliv teplotních gradientů v prostoru před požárem, simulaci pohybu plyných zplodin hoření uzavřeným prostorem nebo model rozstříku sprinklerových hlavice vhodný pro účely této metodiky.

Pokročilé modely hašení komplexně posuzují účinnost sprinklerové ochrany.

Poznámka: CFD modely lze použít jako zjednodušené modely pro stanovení základních návrhových součinitelů sprinklerové ochrany.

3.3.2 Zjednodušené modely

Zjednodušené modely hašení poskytují uživateli informaci o *času aktivace sprinklerové hlavice* a teplotě dosažené při otevření sprinklerové hlavice. Po aktivaci sprinklerové ochrany jsou pro zjednodušené modely hašení předdefinovány ochlazovací schopnosti aktivované sprinklerové hlavice ve vztahu k tepelnému výkonu požáru (HRR), detailněji je tento postup uveden v kapitole 3.4.

U těchto typů modelů obvykle dochází k předem definovanému snížení tepelného výkonu požáru. Dochází ke snížení teplot plynů a teplot konstrukcí. Průběh zaznamenaných výstupních součinitelů po aktivaci sprinklerových hlavice je třeba uvažovat jako orientační.

Přehled vybraných zónových programů umožňujících simulovat čas do aktivace sprinkleru a teplotu dosaženou při otevření sprinklerové hlavice:

- ARGOS (Dánsko) – zónový model požáru (databáze požárů a vstupních komponent),
- B-RISK (Nový Zéland) – zónový model požáru (pravděpodobnostní vyjádření výsledků),
- CFAST (USA) – zónový model požáru,
- OZone (Belgie) – zónový model požáru (strategie simulace požáru).

3.3.3 Pokročilé modely

Pokročilé modely poskytují z pohledu modelování hašení širší možnosti využití. Informují nejen o součinitelích týkajících se aktivaci sprinklerové hlavice, ale také simulují několik typů interakcí:

- sprchového proudu (proudu kapek) s okolním prostředím,
- vodních kapek se zdrojem požáru,
- s ostatními systémy požárně bezpečnostních zařízení
(zejména pak se zařízením pro odvod tepla a kouře).

Výše uvedené interakce mají vliv na způsob rozvoje požáru po aktivaci sprinklerové hlavice a schopnosti simulovat ochlazování prostředí v blízkosti aktivované sprinklerové ochrany a rozhodují o případné kontrole, potlačení nebo uhašení požáru.

Přehled vybraných programů, které využívají pokročilých modelů hašení:

- ANSYS FLUENT (USA) – program používaný pro analýzu proudění,
- FireFOAM (USA) – CFD model požáru s modelem sprinklerového hašení,
- FDS (USA) – CFD model požáru (proudění tekutin s nízkou rychlostí),
- SMARTFIRE (UK) – CFD model požáru.

3.3.4 Aplikace zjednodušených a pokročilých modelů

Při modelování procesů kontroly, potlačení a uhašení požáru lze simulovat průběh fyzikálních a chemických veličin, interakce mezi vodními kapkami a prostředím požáru. V tomto případě se užívá pokročilých modelů. Musí se ovšem zohlednit fakt, že modely fyzikálních procesů hašení značně zjednodušují komplexní jevy, které proces kontroly, potlačování a uhašení požáru provázejí. V důsledku těchto zjednodušení se mohou výsledky simulací větší nebo menší měrou lišit od skutečnosti. Lze konstatovat, že zejména problematiku uhašení požáru (zastavení pyrolýzy) současné modely nejsou schopny uspokojivě řešit. Simulace procesu uhašení tak je problémem, na který se bude třeba zaměřit při vývoji pokročilých modelů v blízké budoucnosti.

Druhou možností je zjednodušit procesy hašení na úpravu pevně definovaného tepelného výkonu požáru v reakci na spuštění sprinklerové hlavice. Tento postup lze aplikovat jak pro zjednodušené, tak pro pokročilé modely. Jedná se o konzervativní postup pro většinu řešených úloh.

3.4 Modelování sprinklerové ochrany

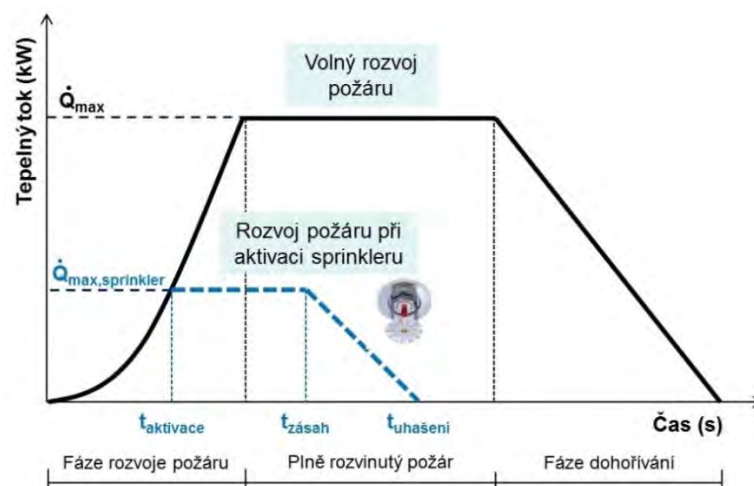
3.4.1 Změna průběhu požáru při aktivaci sprinklerové ochrany

Při aktivaci sprinklerového zařízení (resp. sprinklerové hlavice) dochází v hořícím prostoru ke změně podmínek z hlediska rozvoje požáru, tj. podmínek pro uhašení požáru, potlačení nebo udržení požáru pod kontrolou s následným uhašením jinými prostředky (např. zásahem jednotek PO do úplného uhašení požáru).

Ve fázi rozvoje požáru má sprinklerové zařízení zásadní vliv. Při jeho aktivaci dochází k prudkému snížení uvolňovaného tepla z požáru a k zabránění rozšíření požáru užitím dostatečného množství hasiva na hořící povrch paliva. U tohoto stabilního hasicího zařízení je intenzita dodávky vody obvykle nastavena pro činnost všech sprinklerových hlavíc na limitní účinnou plochu.

V ostatních fázích požáru, plně rozvinutém požáru a dohořívání, bude význam sprinklerové ochrany minimální. Během těchto fází může toto požárně bezpečnostní zařízení aktivně přispívat ke kontrole požáru, jeho efektivita je však vzhledem k míře rozvoje požáru zanedbatelná. Účinky požáru mohou mimoto způsobit poškození vlastního zařízení sprinklerové ochrany. Ovlivnění fází požáru aktivací sprinklerové ochrany je znázorněno na obrázku 3.1.

Poznámka: Předložený rozvoj průběhu požáru lze pokládat za orientační, neboť ve skutečnosti mohou vzniknout různorodé varianty jeho průběhu.



Obrázek 3.1: Popis průběhu požáru při uvedení sprinklerové ochrany do činnosti v porovnání s volným rozvojem

3.4.2 Rozvoj požáru před aktivací sprinklerové hlavice

Z výsledků reálných požárních zkoušek vyplývá, že lze počáteční fázi požáru charakterizovat jednoduchou, na čase závislou parabolickou křivkou. Křivka je známá jako křivka *t-kvadratického požáru*, kde rychlost uvolňování tepla \dot{Q} (kW) je úměrná druhé mocnině času.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \quad (3.5)$$

kde α koeficient rozvoje požáru (kW.s⁻²)

t čas po iniciaci (s)

Rovnice t-kvadratického požáru se v literatuře objevuje v podobě (ČSN EN 1991-1-2, 2004):

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 \cdot \left(\frac{t}{t_g}\right)^2 \quad (3.6)$$

kde \dot{Q}_0 referenční rychlost uvolňování tepla (=1000 kW)

t_g doba potřebná pro dosažení referenční rychlosti (s)

Z praktických důvodů jsou vytvořeny čtyři kategorie rozdělující požáry podle rychlosti rozvoje (pomalá, střední, rychlá a velmi rychlá). V následující tabulce 3.3 jsou uvedeny příklady požárních scénářů pro jednotlivé charakteristické rychlosti rozvoje požáru.

Tabulka 3.3: Příklady požárních scénářů pro jednotlivé kategorie požárů

Rychlost rozvoje požáru	t_g (s)	α (kW·s ⁻²)	Příklady scénářů
Pomalá	600	0,003	Podlahová krytina
Střední	300	0,012	Kancelářský nábytek Prodejní pulty
Rychlá	150	0,047	Lůžkoviny Čalouněné paravánové systémy
Velmi rychlá	75	0,19	Čalouněný nábytek Lehký dřevěný nábytek Nahromaděný balicí materiál Uskladněná plastová pěna Kartonové nebo plastové krabice vertikálně uspořádané v regálech

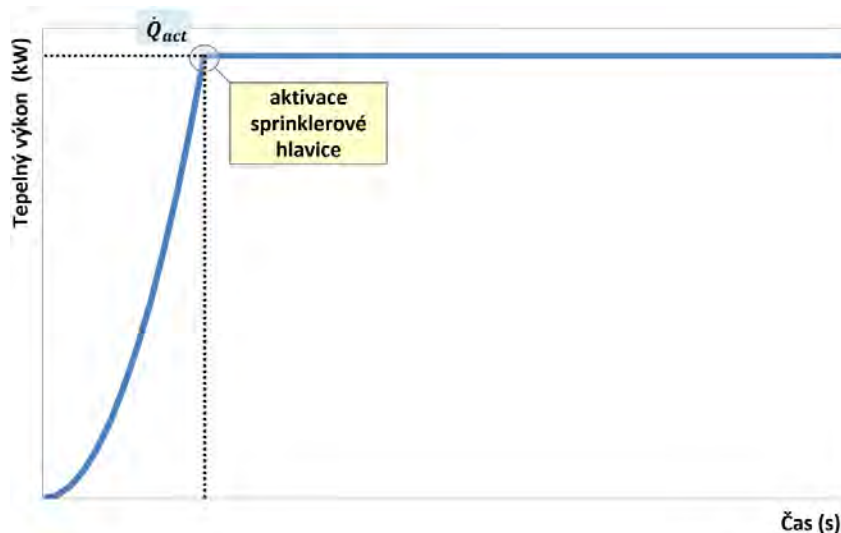
Poznámka: Pro označení rychlosti uvolňování tepla \dot{Q} (resp. tepelného výkonu) se může používat i zkratka HRR nebo RHR (zkratka Heat Release Rate nebo Rate Of Heat Release).

3.4.3 Rozvoj požáru po aktivaci sprinklerové hlavice

Rozvoj požáru po aktivaci sprinklerové hlavice závisí na principu modelování tepelného výkonu požáru. Pokud je průběh tepelného výkonu v modelu pevně definovaný, lze jej po aktivaci sprinklerové hlavice upravit. V tomto případě se nejedná o simulaci procesu hašení. Další možností je, že uvolňování tepla závisí na komplexním pyrolyzním modelu, v tomto případě lze simulovat proces hašení. Dochází zde mimo jiné k ochlazení plynů a povrchů pomocí vodních kapek.

Konstantní tepelný výkon po aktivaci sprinklerové hlavice

Nárůst tepelného výkonu probíhá podle definované křivky do okamžiku reakce sprinklerové hlavice (viz obrázek 3.2). Po reakci se předpokládá lokalizace požáru a konstantní výkon požáru po celou dobu hašení. Jedná se značně konzervativní přístup vhodný zejména v případě, pokud jsou pochybnosti o možnosti uhašení požáru pomocí sprinklerové ochrany, např. při vysokém požárním zatížení. V případech, kdy $\dot{Q}_{act} > 5,0$ MW se používá konstantní rychlost uvolňování tepla po celou dobu rozvoje požáru (Nystedt, 2011). U požárů zastíněných zařizovacími předměty, např. hořící předmět pod stolem, může být zhoršena účinnost sprinklerového zařízení a je vhodné použít popsany přístup.



Obrázek 3.2: Průběh požáru s konstantním tepelným výkonem po aktivaci sprinklerové hlavice

Pokles tepelného výkonu po aktivaci sprinklerové hlavice

Zjednodušený výpočet snížení rychlosti uvolňování tepla (resp. tepelného výkonu) $\dot{Q}(\Delta t)$ (kW) je (Madryzkowski a Vettori, 1992):

$$\dot{Q}(\Delta t) = \dot{Q}_{act} \cdot e^{[-\Delta t / 3,0(\dot{w})^{-1,85}]} \quad (3.7)$$

kde $\dot{Q}(\Delta t)$ snížení rychlosti uvolňování tepla (kW) v čase Δt

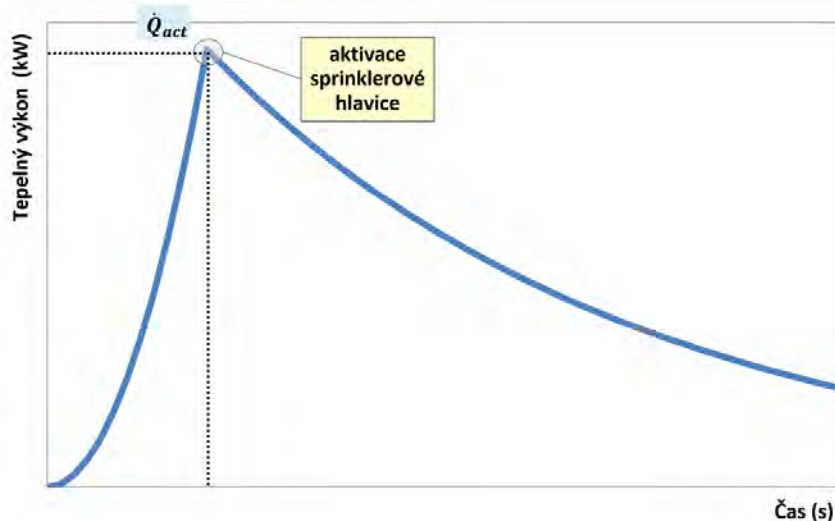
\dot{Q}_{act} rychlost uvolňování tepla v čase aktivace sprinkleru (kW)

Δt rozdíl mezi časem po aktivaci sprinkleru a časem jeho aktivace, tj. $\Delta t = t - t_{act}$ (s)

\dot{w} intenzita dodávky vody sprinklerovou hlavicí ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Poznámka: Vztah byl odvozen pro sprinklerové hlavice s minimální intenzitou dodávky vody $0,07 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ($4,2 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$).

Rovnice byla sestavena na základně požárních experimentů s omezenou rychlostí uvolňování tepla, která v době aktivace sprinklerové hlavice odpovídala 500 kW, výjimečně dosahovala hodnot okolo 1400 kW. Proto jsou tyto vztahy považovány za dosti konzervativní a lze jich použít i pro rychlosti uvolňování tepla v čase aktivace sprinkleru \dot{Q}_{act} , vyšších než 1400 kW.

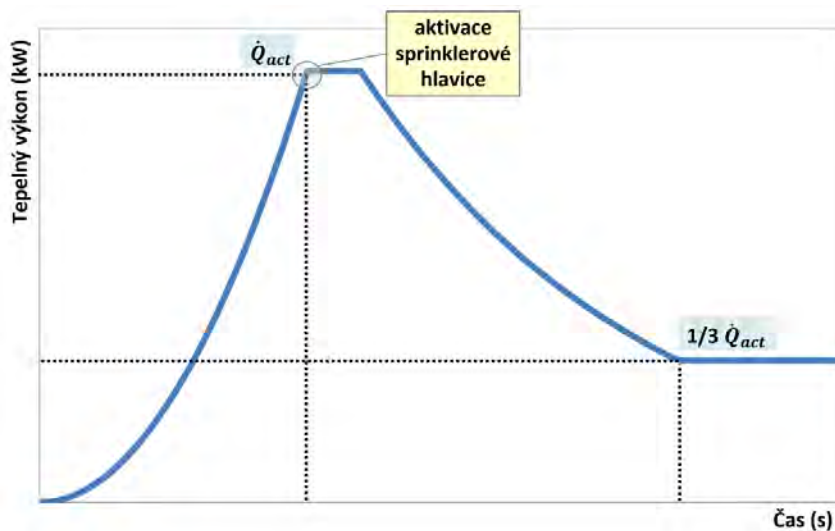


Obrázek 3.3: Průběh požáru s klesajícím tepelným výkonem po aktivaci sprinklerové hlavice

Pokles tepelného výkonu po aktivaci sprinklerové hlavice snížením výkonu požáru

Podle publikace (Nystedt, 2011) byl navržen tento postup při hodnocení aktivace sprinkleru při $\dot{Q}_{act} \leq 5,0$ MW:

- po aktivaci sprinkleru bude rychlost uvolňování tepla po dobu jedné minuty neměnná,
- poté se předpokládá snížení hodnoty rychlosti uvolňování tepla \dot{Q}_{act} na $1/3$,
- hodnota rychlosti uvolňování tepla může být uvažována jako $1/3 \dot{Q}_{act}$ po dobu rozvoje požáru, neboť se předpokládá, že sprinklerové zařízení nemusí požár zcela uhasit.



Obrázek 3.4: Průběh požáru se sníženým konstantním tepelným výkonem po aktivaci sprinklerové hlavice

Komplexní simulace procesu hašení

V případě použití analytického nebo komplexního pyrolýzního modelu, je proces hoření ovlivňován vstupem paliva do výpočetní oblasti. Tato modely umožňují také zohlednit vliv působení hasiva na proces modelování procesu hoření. Voda aplikovaná sprinklerovou hlavici se může uplatňovat jak v kapalně fázi odebráním skupenského výparného tepla, tak v plynné fázi snížením koncentrace kyslíku. Některé modely zohledňují také ochlazování pevné fáze hořlavých hmot, čímž se omezuje vývoj pyrolýzních plynů.

3.4.4 Strategie modelování procesu hašení

U všech modelů požáru se využívají dva základní přístupy k modelování procesu hašení:

- statický přístup – simulace je rozdělena do dvou fází. Nejprve se provede vstupní simulace, kdy se stanoví doba reakce sprinklerové hlavice (na základě otevírací teploty nebo modelu pro reakci sprinklerové hlavice). Poté se simulace spustí znovu s upraveným průběhem tepelného výkonu (HRR), kdy v okamžiku aktivace sprinklerové hlavice dochází k zastavení rozvoje požáru podle původní křivky a následně je předdefinován průběh uvolňování tepla;
- dynamický přístup – úprava průběhu uvolňování tepla se provede, jakmile model předpoví spuštění sprinklerové hlavice. Poté dojde k zastavení rozvoje požáru podle původní křivky a následně se nastaví nový průběh uvolňování tepla (lineární nebo kvadratickou křivkou).

3.5 Zjednodušené modely hašení

3.5.1 Otevírací teplota sprinklerové hlavice

Sprinklerové hlavice mají různé otevírací teploty podle prostředí, v jakém jsou instalovány. Teplota se navrhuje přibližně o 30°C vyšší, než je maximální teplota prostředí chráněného prostoru. Otevírací teplota sprinklerové hlavice se v modelu zadává bez dalšího upřesnění podle konkrétního projektu řešené stavby.

Za normálních klimatických podmínek je vhodná otevírací teplota 68°C nebo 74°C. U nevětraných uzavřených prostorů, např. pod světlíky, trapézovou střešní krytinou, nebo při zvýšených provozních teplotách je třeba použít sprinklerové hlavice s vyššími otevíracími teplotami. Jmenovité otevírací teploty sprinklerů uvádí tabulka 3.4.

Tabulka 3.4: Jmenovité otevírací teploty sprinklerů (ČSN EN 12845, 2018)

Jmenovitá otevírací teplota (°C)	Barva kapaliny	Jmenovitá otevírací teplota (°C)	Barva ramene sprinkleru
57	Oranžová	57 až 77	Bez barvy
68	Červená	80 až 107	Bílá
79	Žlutá	121 až 149	Modrá
93 a 100	Zelená	163 až 191	Červená
121 a 141	Modrá	204 až 246	Zelená
163 a 181	Fialová	260 až 302	Oranžová
204 až 343	Černá	320 až 343	Černá

3.5.2 Index reakční doby

Pro stanovení citlivosti prvků snímajících teplotu se používá tzv. index reakční doby (RTI, Response Time Index). Tento index zohledňuje samotný reakční čas a otevírací teplotu, zároveň bere v úvahu i teplotu prostředí nebo rychlost proudění plynů, je to tedy míra tepelné citlivosti prvku (Sze, 2009).

Zmenšením objemu skleněné pojistky, která je schopna se prohřát daleko rychleji, dojde ke zvýšení její citlivosti a snížení její reakční doby. Průměr baňky však není jediným součinitelem ovlivňujícím RTI, významným faktorem ovlivňujícím RTI je i přestup tepla do těla hlavice i potrubí. Haskestad a Smith (1976) popsali rychlost nárůstu teploty tepelné pojistky jako:

$$\frac{d(\Delta\theta_d)}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI}(\theta_g - \theta_d) \quad (3.8)$$

Tepelná pojistka je propojena s ostatními pevnými částmi hlavice, dochází tedy k odvodu tepla dále do tělesa hlavice. Ztráta není v rovnici zohledněna, pro přesnější stanovení RTI je na místě zohlednit tyto tepelné ztráty za použití následujících rovnic (Heskestad a Smith, 1976):

$$\frac{d(\theta_{dv})}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI_v}(\theta_g - \theta_{dv}) \quad (3.9)$$

$$\text{kde } \theta_{dv} = \left(1 + \frac{C}{\sqrt{u}}\right) \cdot a \quad RTI_v = \left(\frac{RTI}{1 + \frac{C}{\sqrt{u}}}\right) \quad (3.10)$$

θ_d je teplota teplotní pojistky (°C)

u rychlost proudění plynů (m·s⁻¹)

RTI součinitel reakční doby (Response Time Index), (m·s)^{1/2}

θ_g teplota proudícího plynu (°C)

θ_{dv}, RTI_v virtuální hodnota

C součinitel C (m·s⁻¹)^{1/2}

Rovnice (3.9) a (3.10) mají ve výsledku stejný tvar, přesto v rovnici (3.10) je využit pomyslný výraz označený indexem v pro teplotu tepelné pojistky a RTI , který zahrnuje účinky vodivosti paty sprinklerové hlavice (Heskestad a Smith, 1976).

Hodnota RTI bez zohlednění probíhajícího vedení tepla lze vyjádřit jako (Kučera et al., 2008):

$$RTI = \tau \cdot \sqrt{u} \quad (3.11)$$

kde:
$$\tau = \frac{-t_r}{\ln\left(1 - \frac{\Delta\theta_{ea}}{T_g}\right)} \quad (3.12)$$

$$RTI = \frac{-t_r \cdot \sqrt{u}}{\ln\left(1 - \frac{\Delta\theta_{ea}}{\theta_g}\right)} \quad (3.13)$$

- τ je časová konstanta (-)
- u rychlost proudění vzduchu ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- t_r doba aktivace (s)
- $\Delta\theta_{ea}$ rozdíl mezi otevírací teplotou a teplotou okolního prostředí ($^{\circ}\text{C}$)
- θ_g teplota proudícího plynu ($^{\circ}\text{C}$)
- C součinitel C (m/s)^{1/2}

V opačném případě pro zohlednění vlivu kondukce mezi tepelnou pojistkou a ostatními částmi hlavice lze využít rovnici (Tsui a Spearpoint, 2010):

$$RTI = \frac{-t_r \sqrt{u}}{a \cdot \ln\left(1 - \frac{\Delta\theta_{ea}}{\theta_g \cdot a}\right)} \quad (3.14)$$

kde:
$$a = \left(1 + \frac{C}{\sqrt{u}}\right)^{-1} \quad (3.15)$$

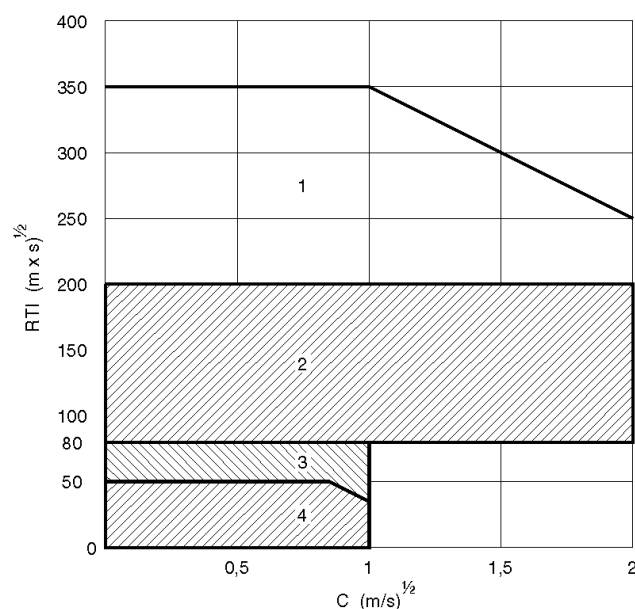
Tabulka 3.5 popisuje dělení sprinklerových hlavice do čtyř kategorií v závislosti na rozsahu RTI a průměru baňky.

Tabulka 3.5: Přehled základního rozdělení tepelné odezvy sprinklerových hlavice

Tepelná odezva		Průměr baňky (mm)	RTI ($\text{m}\cdot\text{s}$) ^{1/2}
Rychlá	Quick response	3	Menší než 50
Speciální	Special response	4	50 až 80
Standardní A	Standard response A	5	80 až 200
Standardní B	Standard response B	8	200 až 400

3.5.3 Součinitel C

Součinitel C zohledňuje vedení tepla do patice sprinklerové hlavice. Nízké hodnoty součinitele představují nízký odvod tepla ze sprinklerové hlavice a vysoké znamenají silné ochlazování baňky. Pokud nejsou tepelné ztráty z baňky do připojení hlavice, součinitel C nabývá hodnoty 0 a model přechází na řešení pouze jednoho vstupního součinitele.



Obrázek 3.5: Vztah mezi součinitelem C a RTI pro různé typy sprinklerových hlavice podle tepelné odezvy: 1 – standardní B, 2 – standardní A, 3 – speciální, 4 – rychlá (Husted a Westerman, 2009)

3.5.4 Intenzita dodávky vody

Projektem SHZ je definována *intenzita dodávky vody na plochu chráněného prostoru*. Tento vstup používají některé z modelů pro stanovení průběhu tepelného výkonu během simulovaného procesu hašení (Husted a Westerman, 2009).

Tabulka 3.6: Intenzita dodávky a typy sprinklerových hlavice pro různé třídy nebezpečí (ČSN EN 12845, 2018)

Třída nebezpečí	Intenzita dodávky (mm·min ⁻¹)	Typ sprinkleru
LH – malé nebezpečí	2,25	Normální, sprejový, stropní, zapuštěný, zakrytý, stranový aj.
OH – střední nebezpečí	5	Normální, sprejový, stropní, zapuštěný, zakrytý, stranový aj.
HHP – vysoké nebezpečí výroba HHS – vysoké nebezpečí skladování (stropní nebo střešní sprinklery)	≤ 10	Normální, sprejový
HHS – vysoké nebezpečí skladování (regálové sprinklery)	> 10	Normální, sprejový a sprejový s plochým výstřikem

3.5.5 Vzdálenost od požáru

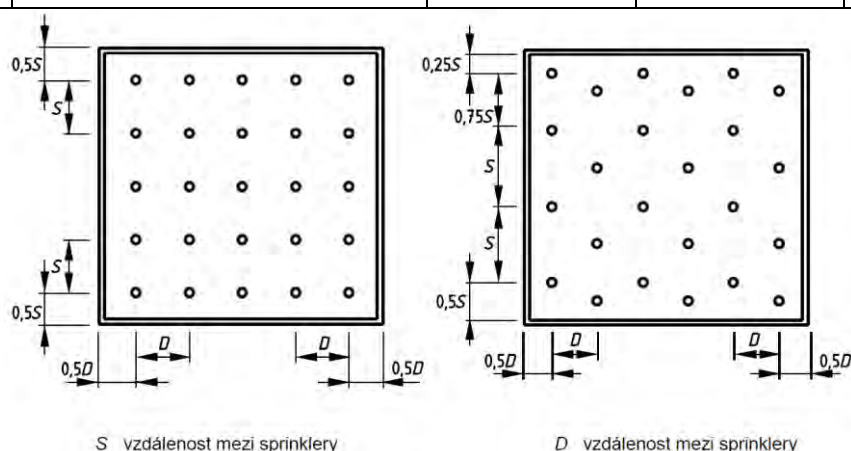
Souřadnice sprinkleru v prostoru (m) osy požáru vůči umístění sprinklerové hlavice. Není-li definováno konkrétní místo požáru, doporučuje se použít nejvyšší přípustnou vzdálenost sprinklerové hlavice od tohoto místa.

3.5.6 Vzdálenost mezi sprinklery

Vzdálenost mezi sprinklery je dána osovou vzdáleností mezi sprinklerovými hlavicemi. Rozměr je dán plošným rozmístěním sprinklerových hlavic, kdy se vychází z plochy, kterou chrání jedna sprinklerová hlavice, viz tabulku 3.7 a obrázek 3.6.

Tabulka 3.7: Maximální pokrytí a rozmístěných sprinklerů, vyjma stranových (ČSN EN 12845, 2018)

Třída nebezpečí	Maximální plocha chráněná jedním sprinklerem (m ²)	Maximální vzdálenosti (m), viz obrázek 3.6		
		Standard	Šachovnice	
		S a D	S	D
LH	21	4,6	4,6	4,6
OH	12	4,0	4,6	4,0
HHP a HHS	9	3,7	3,7	3,7



Obrázek 3.6: Schéma doporučeného rozmístění stropních sprinklerů (ČSN EN 12845, 2018)

3.5.7 Pravděpodobnost kontroly nebo potlačení požáru

Stochastický model řeší pravděpodobnost potlačení, popř. kontroly, požáru jako podmíněnou pravděpodobnost, předpoklad je, že je sprinklerový systém funkční, nebo na základě distribuční funkce definované uživatelem. Jestliže jsou při každé iteraci modelem generovaná náhodná čísla nižší než definovaná pravděpodobnost potlačení hoření, používá se pro vývoj tepelného výkonu předem definovaný průběh potlačování hoření.

Pokud generovaná náhodná čísla převyšují pravděpodobnost potlačení, sprinklerový systém funguje v režimu kontroly požáru a výkon požáru zůstává konstantní od doby aktivace sprinklerové hlavice.

3.5.8 Spolehlivost sprinklerové ochrany

Údaj o spolehlivost sprinklerové ochrany je potřebný pro stochastické (pravděpodobnostní) modely. Odhad spolehlivosti sprinklerové ochrany je uveden v tabulce 3.8.

Tabulka 8: Odhad spolehlivosti sprinklerové ochrany (Budnick, 2001)

	Komerční objekty	Občanské objekty	Kombinace
Nižší limit spolehlivosti	88,1	93,9	92,2
Průměr	93,1	96,0	94,6
Vyšší limit spolehlivosti	98,1	98,1	97,1
Počet referenčních studií	9	7	16

3.5.9 Součinitel ochlazení

Součinitel ochlazení zohledňuje vliv kapek sprinklerové hlavice na proudění plynů přes ventilační otvory modelového prostoru. Ventilační otvor má definovaný výtokový součinitel, který je součinitelem ochlazování redukován. Podle experimentálních poznatků (Crocker a kol., 2010) dochází k omezení hmotnostního toku přes dveře o 16 %, což dává součinitel ochlazení 0,84.

3.5.10 Shrnutí vstupních součinitelů

Přehled vstupních součinitelů pro definici sprinklerových hlavice pro vybrané zónové modely ARGOS (Deibjerg a kol., 2003), B-RISK (Wade a kol., 2016), CFAST (Peacock a kol., 2018) jsou uvedeny v tabulce 3.9.

Tabulka 3.9: Porovnání vybraných zónových modelů z hlediska součinitelů charakterizujících sprinklery

Vstupní součinitel	Argos	B-RISK	CFAST
Otevírací teplota sprinkleru (°C)	Ano	Ano	Ano
RTI je součinitel reakční doby ($m \cdot s$) ^{1/2}	Ano	Ano	Ano
Součinitel c ($m \cdot s^{-1}$) ^{1/2}	Ano	Ano	Ne
Intenzita dodávky vody ($mm \cdot min^{-1}$)	Ne	Ano	Ano
Vzdálenost od požáru (m)	Ano	Ano	Ne
Souřadnice sprinkleru v prostoru (m)	Ne	Ano	Ano
Vzdálenost mezi sprinklery (m)	Ano	Ne	Ne
Spolehlivost sprinkleru (-)	Ne	Ano	Ne
Pravděpodobnost potlačení nebo kontroly (-)	Ne	Ano	Ne
Součinitel ochlazení (-)	Ne	Ano	Ne

Poznámka: Program Ozone zohledňuje vliv sprinklerové ochrany ve stanovení hustoty požárního zatížení podle Přílohy E (ČSN EN 1991-1-2, 2004).

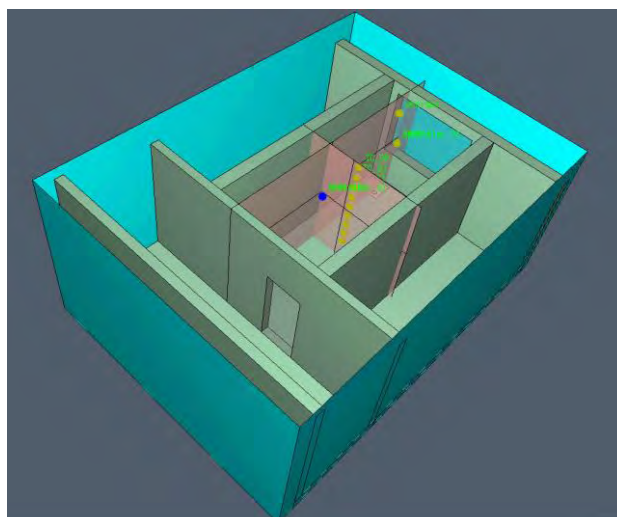
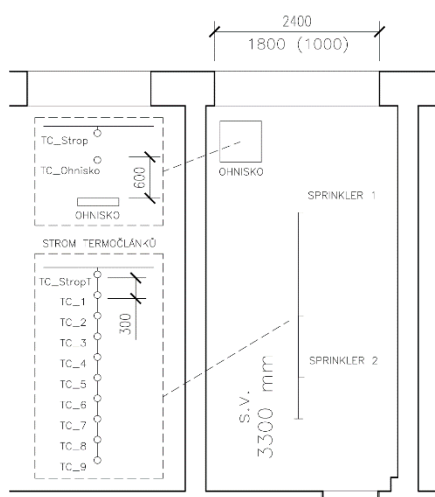
3.5.11 Validace zónových modelů

Zjednodušené modely hašení (zónové modely), jak už bylo dříve uvedeno, slouží pro stanovení základních informací o času aktivace sprinklerové hlavice a teplotě dosažené při otevření sprinklerové hlavice. Pro určení vhodnosti předpovídání aktivace sprinklerových hlavice je proto zpracován příklad validace experimentálně jejich naměřených součinitelů vybranými zónovými modely požáru.

Popis experimentální měření a jeho výsledků

K požárním zkouškám byl zvolen stávající objekt určený k demolici a využívaný HZS MSK k výcviku v oblasti Dolní Vítkovice (Kučera et al., 2017). Zkoušky probíhaly v třípodlažním, plně podsklepeném objektu určenému k demolici v oblasti Dolní Vítkovice, který HZS MSK používá k výcviku. Konstrukční systém objektu se skládá z železobetonových sloupů a cihelných obvodových stěn, stropy jsou železobetonové monolitické nebo z betonových vložek kladených do ocelových nosníků. Plochá střecha je pokryta asfaltovou hydroizolací.

Zkoušky byly provedeny v místnosti o půdorysných rozměrech 2,79 m x 5,6 m, střední světlé výšky 3,3 m, ve které se nachází jedno okno o rozměrech 2,4 m x 1,8 m uzavřené železnými okenicemi. Prostor byl ventilován netěsnostmi mezi okenicemi a dveřmi o rozměru 0,9 m x 1,97 m. Jako palivo byl použit n-heptan nebo petrolej rozlitý na hladinu vody ve vaně o rozměrech 600 mm x 600 mm nebo dřevěné hranoly uložené v redukované hranici požáru podle (ČSN EN 3-7+A1, 2008). Místo ohniska požáru se nacházelo v rohu místnosti v blízkosti okna. Plášťové termočlánky typu K u průměru 1,5 mm byly rozmístěny na stromu ve středu místnosti v deseti úrovních po 30 cm a dále na stropě nad ohniskem hoření, u sprinklerové hlavice a v prostoru plamenného hoření. Rozmístění termočlánků a geometrie místnosti jsou zobrazeny na obrázku 3.7. Naměřené hodnoty, druh použitého paliva a typ odezvy hlavice jsou uvedeny v tabulce 3.10. Na obrázku 3.8 jsou uvedeny fotografie ze zkoušky.



Obrázek 3.7: Zkušební místnosti - půdorys a 3D model



Obrázek 3.8: Zkušební místnost – po zapálení a po aktivaci sprinkleru

Tabulka 3.10: Přehled výsledků naměřených součinitelů sprinklerových hlavice

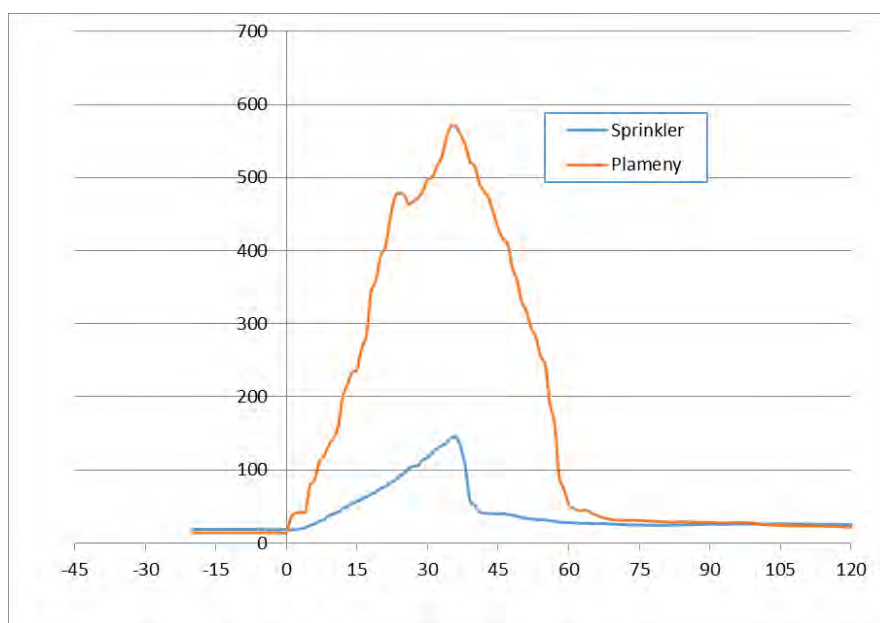
Zkouška č.	Palivo	Hlavice	Součinitel K	Doba do spuštění [s]	Teplota při aktivaci [°C]
V1701	n-Heptan	TY 325 standard	80	45	176,1
V1702	n-Heptan	TY 325 standard	80	38	145,9
V1703	n-Heptan	TY 3231 rychlá	80	27	114,1
V1704	n-Heptan	TY 3231 rychlá	80	24	109,6
V1707	n-Heptan	RA 1414 rychlá	80	24	87,4
V1708	n-Heptan	RA 1414 rychlá	80	25	102,7

Z naměřených hodnot lze zjistit, že rozptyl hodnot doby do spuštění i teploty při aktivaci u hlavice se standardní reakcí (38 až 45 s a 145,9 až 176,1 °C) je vyšší než u hlavice s rychlou reakcí (24 až 27 s a 87,4 až 114,1 °C). Rozptyl teplot mohl být způsoben umístěním termočlánku 2 cm od baňky hlavice nebo nestandardním natočením hlavice, což mohlo způsobit ovlivnění proudění plynů okolo hlavice a naměřené hodnoty.

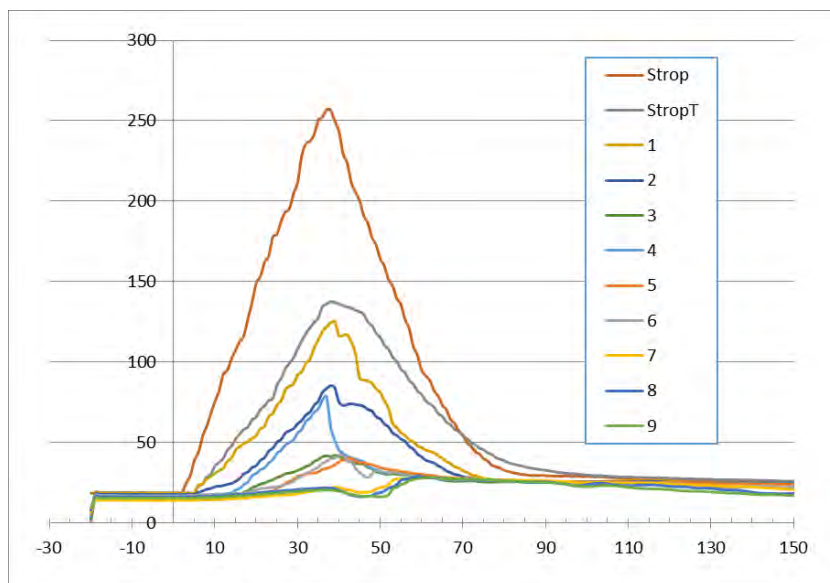
Předpoklady pro validaci naměřených součinitelů

Vstupní součinitele pro zónové modely jsou voleny tak, aby se co nejvíce shodovaly s podmínkami při experimentu. Mezi ně patřila otevírací teplota sprinklerové hlavice, součinitel C, rychlost reakce hlavice, použité palivo a jeho množství, atmosférické podmínky, geometrie místnosti, použité materiály ve stavebních konstrukcích a další. Pro modelování byly použity tyto programy:

- CFAST
- B-RISK
- Argos
-



Obrázek 3.9: Zkouška č. V1701 - průběh teplot na sprinklerové hlavici a v ohnisku



Obrázek 3.10: Zkouška č. V1701 - průběh teplot na termočláncích v místnosti

Porovnání otevíracího času sprinklerových hlavice

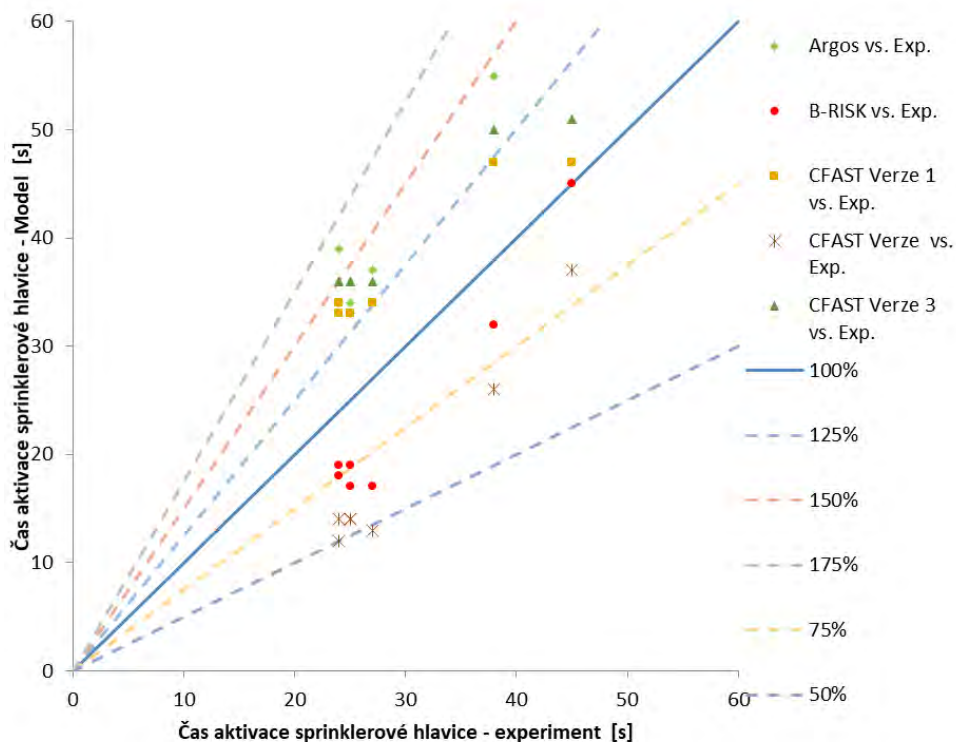
Hlavice v zónových modelech byly namodelovány se stejnými součiniteli jako při experimentu a byly umístěné stejně jako při experimentu, pokud to příslušný zónový model umožňoval (Šimonek, 2018). Za dobu aktivace je považován časový úsek od doby zapálení ohniska požáru po okamžik prasknutí tepelné pojistky a uvedení sprinkleru do funkce. Srovnání časů získaných při měření v Dolních Vítkovicích a časů získaných pomocí výše zmíněných programů je uvedeno v tabulce 11.

Tabulka 3.11: Porovnání časů aktivace sprinklerových hlavice

Test	Časy aktivace sprinklerové hlavice										
	Při experimentu	Argos	/exp. [%]	B-RISK	/exp. [%]	CFAST Verze 1	/exp. [%]	CFAST Verze 2	/exp. [%]	CFAST Verze3	/exp. [%]
V1701	45	47	104,4	45	100,0	47	104,4	37	82,2	51	113,3
V1702	38	55	144,7	32	84,2	47	123,7	26	68,4	50	131,6
V1703	27	37	137,0	17	63,0	34	125,9	13	48,1	36	133,3
V1704	24	39	162,5	18	75,0	34	141,7	12	50,0	36	150,0
V1706	25	33	132,0	17	68,0	33	132,0	14	56,0	36	144,0
V1707	24	34	141,7	19	79,2	33	137,5	14	58,3	36	150,0
V1708	25	34	136,0	19	76,0	33	132,0	14	56,0	36	144,0
V1709	136	134	98,5	107	78,7	-	-	135	99,3	-	-

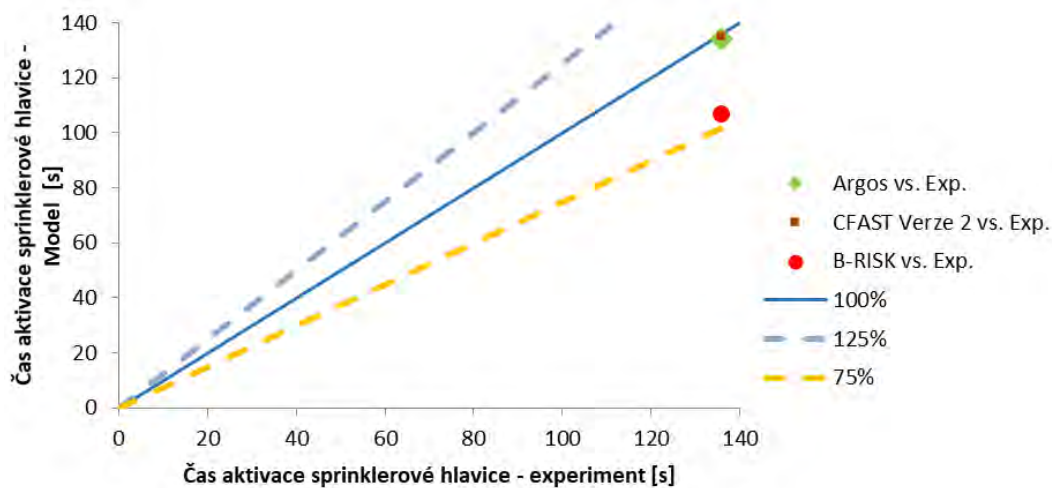
Z grafu měření V1701 až V1708 a pro měření V1709 je patrná míra, s jakou se liší modelovaná data od naměřených. Z obrázku 11 lze zjistit, že hodnoty, získané pomocí programu Argos, leží zhruba v oblasti 125 až 150 % hodnot experimentálních dat. Většina dat, získaných

pomocí programu B-RISK, se pohybuje okolo 75 % experimentální hodnoty až na hodnotu, naměřenou při testu V1701, která je zcela identická s hodnotou naměřenou při experimentu. Hodnoty získané pomocí programu CFAST při vstupu požáru Verze 1 a 3 leží většinou mezi 125 a 150 %, až na hodnotu naměřenou při testu V1701, která se s 104,44 % vcelku blíží experimentálně naměřené hodnotě. Data získaná pomocí programu CFAST při vstupu Verze 2 se nachází okolo 50 a 75 % experimentální hodnoty.



Obrázek 3.11: Porovnání časů aktivace sprinklerové hlavice pro testy V1701 až V 1708

Obrázek 3.12 popisuje závislost naměřených hodnot pomocí zónových modelů na experimentálně zjištěné hodnotě. T-kvadratický rozvoj požáru nebyl pro měření V1709 uvažován, proto byly porovnávány pouze tři varianty namodelovaných dat. Je patrné, že Argos i CFAST s hodnotou okolo 99 % vykazují téměř vynikající shodu s realitou, zatímco hodnota, kterou naměřil B-RISK, se nachází zhruba na 70 % experimentálně naměřené hodnoty.



Obrázek 3.12: Porovnání časů aktivace sprinklerové hlavice pro test V1709

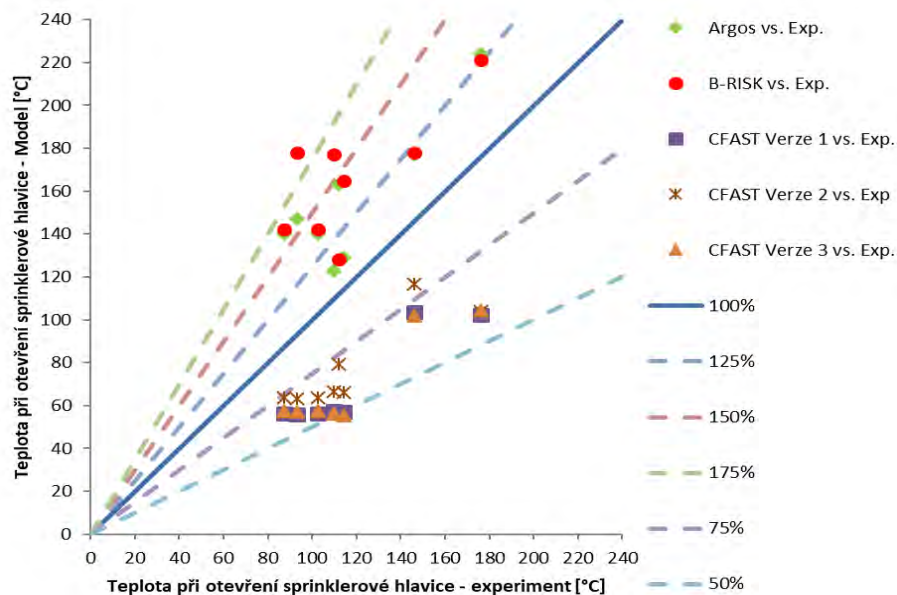
Porovnání teplot při otevření sprinklerové hlavice

Další porovnávanou hodnotou byly teploty horní horké vrstvy, při kterých došlo k otevření sprinklerové hlavice. Teplota naměřená při experimentu byla odečtena z termočlánku na pozici Sprinkler 1, jehož polohu lze vidět na obrázku 3.12. Na základě porovnání naměřených hodnot pomocí zónových modelů s daty získanými při experimentu bylo dosaženo poměrné hodnoty, která je udána v tabulce 3.12 v procentech.

Stejně jako je tomu u experimentálních dat, namodelované otevírací teploty pro hlavice se standardní odezvou použité pro testy V1701 a V1702 mají větší rozptyl hodnot než hlavice s rychlou odezvou užitě pro testy V1703 až V1708. Na základě výše uvedených dat byl sestaven graf na obrázku 3.13, ze kterého je patrná míra, s jakou se odlišují namodelované hodnoty od experimentálně naměřených. Pro Argos v rozmezí zhruba 110 až 160 %, B-RISK se pohybuje ve stejném rozmezí, až na hodnotu pro test V1706, která je 190 % experimentální hodnoty. CFAST pro všechny variace vstupu namodeloval data ležící v rozmezí 50 až 75 % až na test V1702, který se přiblížil na 80 % experimentální hodnoty.

Tabulka 3.12: Porovnání teplot při otevření sprinklerové hlavice

Test	Při experimentu	Teplota při otevření sprinklerové hlavice									
		Argos	/exp. [%]	B-RISK	/exp. [%]	CFAST Verze 1	/exp. [%]	CFAST Verze 2	/exp. [%]	CFAST Verze 3	/exp. [%]
V1701	176,1	224	127,2	221	125,5	102,14	58,0	104,1	59,1	104,45	59,3
V1702	145,9	177	121,3	178	122,0	103,48	70,9	116,79	80,0	101,68	69,7
V1703	114,1	129	113,1	165	144,6	57,08	50,0	66,02	57,9	55,58	48,7
V1704	109,6	123	112,2	177	161,5	57,59	52,5	66,52	60,7	56,08	51,2
V1706	93,2	147	157,7	178	191,0	56,02	60,1	63,12	67,7	57,17	61,3
V1707	87,4	140	160,2	142	162,5	56,32	64,4	63,45	72,6	57,46	65,7
V1708	102,7	140	136,3	142	138,3	56,32	54,8	63,45	61,8	57,46	55,9
V1709	112,1	163	145,4	128	114,2	-	-	79,28	70,7	-	-



Obrázek 3.13: Porovnání teplot při aktivaci sprinklerové hlavice pro testy V1701 až V1709

Shrnutí výsledků validace

Obecně největší nesrovnalosti byly v hodnotách teplot, při kterých došlo k otevření sprinklerové hlavice, které byly v několika případech větší o 50 až 90 % než experimentální hodnota. Časy otevření vykazují menší odlišnosti od reality, a to většinou okolo 20 až 40 % experimentální hodnoty, a průběhy teplot horní horké vrstvy například programu B-RISK jsou s realitou velmi podobné.

3.6 Pokročilé modely hašení

3.6.1 Průtok vody

Proces atomizace vodních kapek není plně pochopen a nelze jej zatím matematicky popsat. Do simulace se vloží už hotové kapky. Vstupní součinitele modelů pro potlačení hoření popisují kam, jak velké a v jakém množství budou kapky do domény vstupovat a dále s jakou počáteční rychlostí se budou doménou pohybovat. Praktická implementace se v jednotlivých výčetních modelech liší, ale základní součinitele sprinklerové hlavice je u všech modelů stejné.

Průtok vody sprinklerovou hlavicí lze určit jako součin součinitel K a odmocniny pracovního tlaku. Průtok vody udává dodávku vody, tedy kolik vody v modelu musí být rozděleno do kapek vkládaných do domény za daný čas.

Průtok sprinklerové hlavice je závislý zejména na průměru trysky a tlaku před tryskou. Průtok sprinkleru Q ($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$) se vyjádří takovou rovnicí, kdy záleží, v jakých jednotkách je udáván přetlak před hlavicí sprinkleru (Rybář, 1993):

$$Q = K \cdot \sqrt{p_t} \quad (3.16)$$

nebo

$$Q = K \cdot \sqrt{10 \cdot p} \quad (3.17)$$

kde p_t je přetlak před hlavicí sprinkleru (bar)

p přetlak před hlavicí sprinkleru (MPa)

K součinitel ($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1/2}$) pro rovnici (3.16) nebo ($\text{l}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{MPa}^{-1/2}$) pro rovnici (3.17), který vyjadřuje odporový součinitel průtoku hlavice sprinkleru; součinitel K se určí:

$$K = \mu \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (3.18)$$

kde μ výtokový součinitel (-)

d průměr sprinklerové trysky (m)

ρ hustota vody ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

Tabulka 3.13 udává přehled průtoků vody sprinklerovými hlavicemi v závislosti na součiniteli K a doporučené třídě nebezpečí.

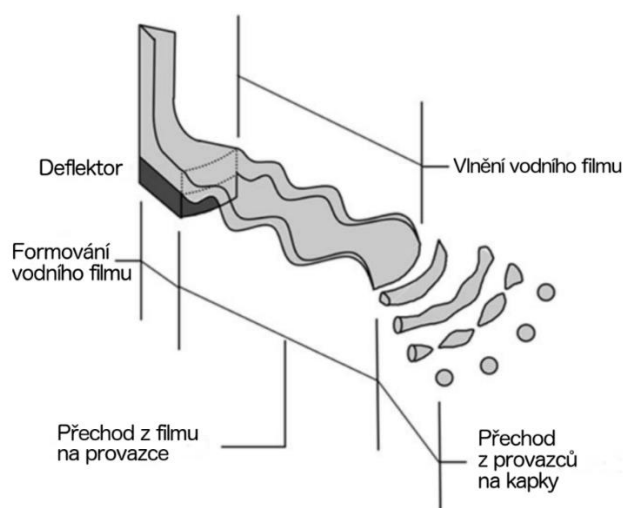
Tabulka 3.13: Přehled průtoků vody sprinklerovými hlavice v závislosti na součiniteli K a třídě nebezpečí

Součinitel K	Doporučeno pro třídu nebezpečí	Nominální průměr trysky	Průtok ($l \cdot \text{min}^{-1}$) při min. tlaku (bar) / třída nebezpečí				
			0,35 / OH	0,50 / HHP, HHS	0,70 / LH	1,00 / regál	2,00 / regál
57	LH	10	34	40	48	57	81
80	OH, HHP, HHS	15	47	57	67	80	113
115	OH, HHP, HHS	20	68	81	96	115	163
160	HHP, HHS	25	95	113	134	160	226

3.6.2 Součinitel přesahu

Součinitel přesahu (Offset Factor) je vzdálenost, ve které se při rozstříku sprinklerové hlavice plně vytvoří proud kapek, přičemž významnou roli hraje právě úprava jeho deflektoru.

Atomizaci kapek lze rozdělit do tří fází. Nejprve se vytváří vodní film. Vytváření filmu začíná v bodě, kde vodní paprsek narazí na deflektor. Vodní film na deflektoru zůstává stabilní. Jakmile opustí deflektor, začíná druhá fáze, kdy dochází rozpadu vodního filmu na provazce. Vodní film se rozpadá, jakmile ztratí kontakt s deflektorem a při kontaktu se vzduchem stane nestabilním a začnou se vytvářet vlny. Těmito vlnami se plát vody rozpadne na provazce. Tyto provazce se vlní podélně. V důsledku vlnění se provazce rozpadají na jednotlivé kapičky vody a formování kapiček (obrázek 3.14).



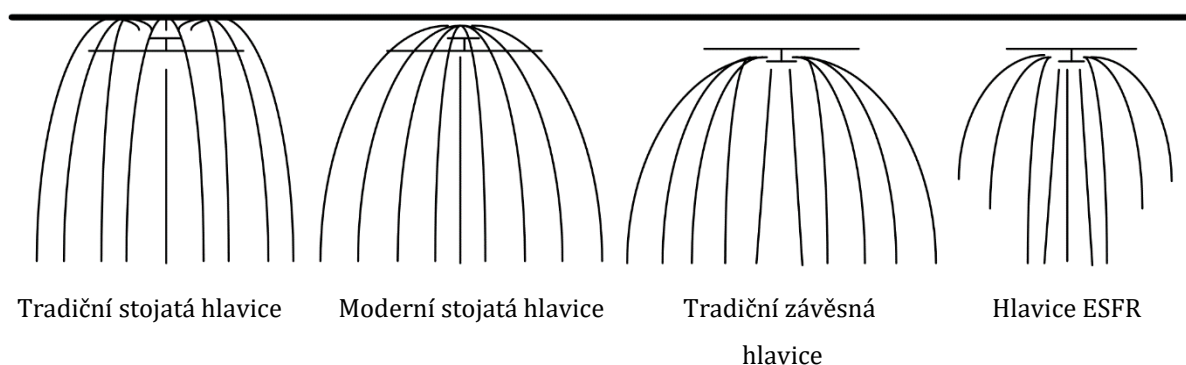
Obrázek 3.14: Formování kapek sprinklerového proudu (Marshall, 2004)

Součinitel přesahu vymezuje kouli, na jejíž povrch se při simulaci umístí začátek dráhy pohybu rozstříku kapiček. Například v programu FDS je tento součinitel přednastaven na hodnotu 0,05 m (McGrattan a kol., 2019), avšak experimentální výzkum Shepparda vymezil součinitel přesahu na hodnotu 0,2 m pro různé typy sprinklerových hlavíc (Sheppard, 2002). Z hlediska trajektorie

pohybu kapek je tedy součinitel přesahu hranicí, od které již je sprinklerový proud roztržštěný na kapičky konečné distribuce velikosti.

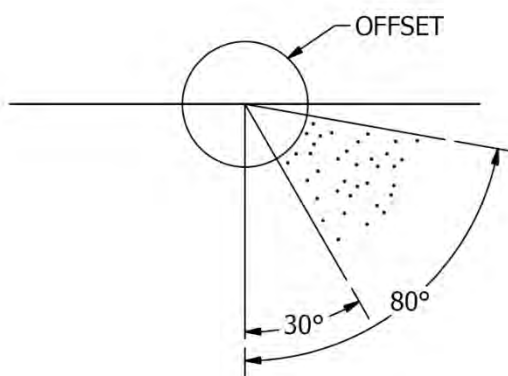
3.6.3 Úhel rozstřiku a tvar rozstřiku

Základní tvary rozstřiku sprinklerových hlavice jsou znázorněny na obrázku 3.15 a úzce souvisí s úhly rozstřiku, které se dělí na vnější a vnitřní. Vnější úhel je úhlem vnějšího povrchu kužele rozstřikované vody od svislé osy sprinklerové hlavice. Vnitřní úhel rozstřiku je úhlem rozhraní plochy, kde již není voda (např. při rozstřiku ve tvaru dutého kužele) od osy svislé sprinklerové hlavice.



Obrázek 3.15: Tvary rozstřiku sprinklerových hlavice (Sheppard, 2002)

Například hodnoty 30 a 80 vymezují vystřikující kapičky v pásu mezi 30° a 80° osy sprinklerové hlavice.



Obrázek 3.16: Ukázka tvaru úhlů rozstřiku sprinklerové hlavice (McGrattan a kol., 2013)

Součinitel přesahu, viz část 3.6.2 a úhel rozstřiku, pod kterým jsou kapky do simulace vkládány, bezprostředně ovlivňuje, jaký tvar bude sprchový kužel mít, a tedy jaké je plošné pokrytí vodou.

3.6.4 Velikost kapek

Velikost kapek ve vytvořeném sprchovém proudu ve skutečnosti není stejná. Kapky mají v celém rozsahu velikostí mezi sebou až o řád rozdílnou velikost (desetiny mm až jednotky mm). V modelu lze volit kapky, které mají jednotnou velikost. Toto nastavení je ale primárně pro testovací účely numerických algoritmů modelů a nedoporučuje se pro praktické aplikace. Častěji mají kapky vytvořené v modelu různou velikost, která jim byla přiřazena na základě pravděpodobnosti rozdělení kolem uživatelem definovaného průměru kapky. Tento průměr je obvykle volen tak, že 50 % objemu vody je uloženo v kapkách menších než daný průměr a 50% objemu v kapkách větších než daný průměr. Pro různé programové implementace pak lze volit součinitele distribučních funkcí a ovlivňovat tak rozdělení velikosti kapek ve vytvořeném sprchovém proudu. Změna těchto nastavení z defaultních hodnot je doporučena jen pro pokročilé uživatele a v případě, že je distribuce velikosti kapek experimentálně známa. V takovém případě může uživatel implementovat vlastní distribuci velikosti kapek formou tabulky s velikostí frakce kapek a počtem kapek v každé frakci.

Analyzátory pro měření velikosti kapek shromažďují a zaznamenávají data, která jsou typicky ve formě počtu čísel na velikost třídy. Data jsou uspořádána do matematické reprezentace, která je označována jako *distribuce velikosti kapky*. Matematická reprezentace je nejčastěji závislá na použitém analyzátoru. Někteří výrobci analyzátorů však v dnešní době umožňují uživatelům spíše vybrat distribuční funkci ze seznamu než používat výchozí funkce rozdělení velikosti kapek (Schick, 2008).

Mezi nejběžněji používané funkce distribuce velikosti vodních kapek patří distribuční Rosin-Rammlerova funkce nebo Log-normální distribuce. Dále také Analýza ASTM Standard E799-03, která je nejvhodnější pro analyzátory klasifikované jako čítače jednotlivých částic, např. PDPA (Schick, 2008).

Rosin-Rammlerova distribuce podle (Särdqvist, 2002) je dána vztahem

$$P_v(d) = \frac{1,36 \cdot d^2}{d_v^2} \cdot e^{-0,693 \cdot d^2/d_v^2} \quad (3.19)$$

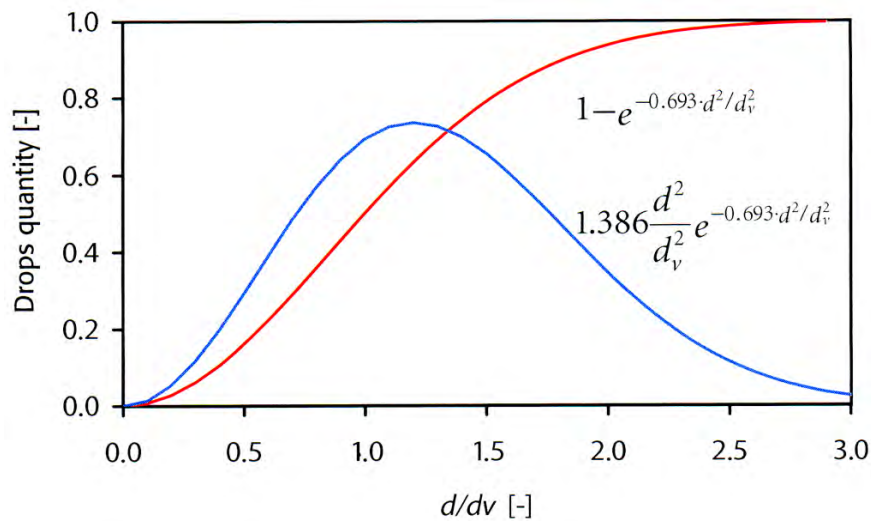
kde d_v střední objemový průměr (mm)
 d průměr určité kapky (mm)

Kumulativní distribuční funkce představuje objemové procento kapek s průměrem menším, než je d , může být popsána pomocí následující rovnice (Särdqvist, 2002)

$$V(d) = \int_0^d P_v(d) dd = 1 - e^{-0,693 \cdot d^2/d_v^2} \quad (3.20)$$

kde d_v přibližně závislé na kořenu (root) průměru trysky

Rosin-Rammlerova distribuční funkce udává pravděpodobnost, že kapky mají určitý průměr. Na obrázku 3.17 je zobrazena společně s kumulativní distribuční funkcí.



Obrázek 3.17: Rosin-Rammlerova distribuce a kumulativní distribuční funkce (Sheppard, 2002)

Rosin-Rammlerova distribuční funkce patří mezi empirické vzorce, kterými lze popsat distribuci kapek. Další funkcí je log-normální distribuce, která je spojena s přirozeným logaritmem proměnné x . Funkce využívá tvarový součinitel θ , lokalizační součinitel σ a součinitel měřítka m . Příklad, kdy $\theta = 0$ a $m = 1$ se nazývá standardní log-normální distribuce a je dána rovnicí (Schick, 2008)

$$f(x) = \frac{e^{-((\ln x)^2/2\sigma^2)}}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \quad x \geq 0; \sigma > 0 \quad (3.21)$$

Příklad, kdy $\theta = 0$ se nazývá 2-parametrová log-normální distribuce

$$f(x) = \frac{e^{-((\ln((x-\theta)/m))^2/(2\sigma^2))}}{(x-\theta)\sigma\sqrt{2\pi}} \quad x \geq 0; m; \sigma > 0 \quad (3.22)$$

Bez ohledu na to, jakou funkci distribuce velikosti kapky modely používají, všechny v podstatě provádějí stejný úkol.

3.6.5 Počet kapek

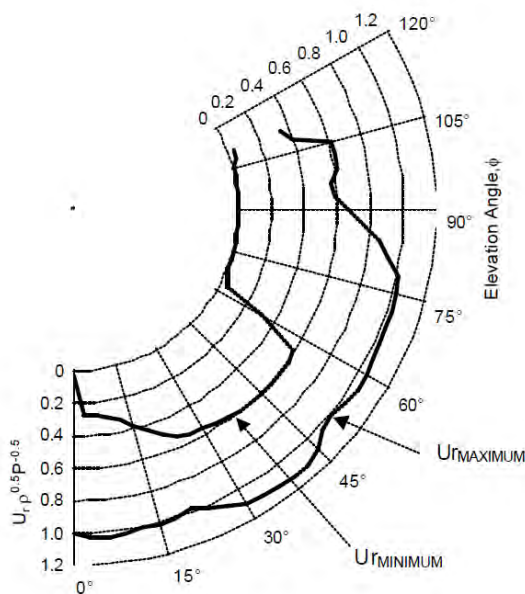
Z numerického hlediska není možné vytvořit v modelu počet kapek, který by odpovídal realitě (kolem 10^8). Celkové množství vody, které je sprinklerovou hlavici distribuováno do domény, je proto rozděleno do uživatelem specifikovaného množství kapek, které reprezentují celý sprchový proud (obvykle v řádech 10^3). Čím větší počet kapek, tím přesněji bude sprchový proud reprezentovat realitu. Celkové množství vody bude rovnoměrněji rozloženo mezi kapky jednotlivých velikostí (frakcí). Fyzikální představa pohybu kapek prostředím a jejich interakce

s okolím, zejména odpařování, bude blíže realitě. Tento součinitel dále také přímo ovlivňuje plošnou distribuci vody. Velké množství kapek je neekonomické z hlediska výpočetního času a často vede k numerické nestabilitě výpočtu, malé množství kapek nevytvoří sprchový proud, který by byl reprezentativní v rámci využití modelového nástroje. Počet kapek je třeba otestovat podobně jako velikost sítě hydrodynamického řešiče modelu požáru.

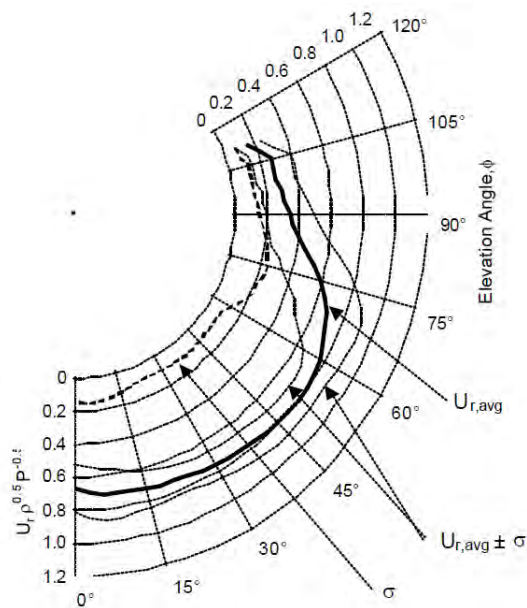
3.6.6 Počáteční rychlost pohybu kapek

Aby se kapky doménou modelu pohybovaly, musí jim být udělena počáteční rychlost. Počáteční rychlost kapek se pro zjednodušení uvažuje stejná pro všechny kapky. Jejich rychlost se pak s časem a vzdáleností mění. Trajektorie kapek při jejich pohybu doménou je počítána. Jako aproximace pro počáteční rychlost kapek se často udává rychlost vypočtená jako podíl průtoku vody sprinklerem a plochy výtokového otvoru. Jedná se ale pouze o hrubý odhad, který v sobě nijak nezahrnuje proces atomizace kapek.

Vektor rychlosti kapek poblíž sprinklerové hlavice je orientovaný v radiálním směru. Tvar rychlostního profilu závisí na konkrétním typu sprinklerové hlavice bez rozlišení, jestli se jedná o zavěšené nebo stojaté hlavice. Maximální rychlost v radiálním směru se pohybuje mezi $5,8$ a $14,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Rychlost kapek na hranici přesahu se mění s úhlem od osy sprinklerové hlavice (Sheppard, 2002).



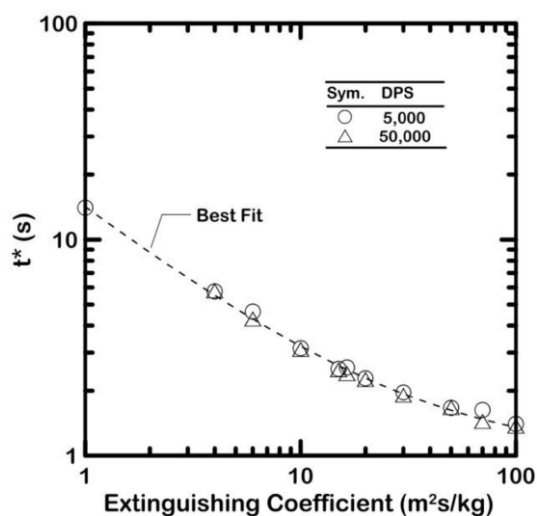
Obrázek 3.18: Maximální a minimální bezrozměrná radiální rychlost naměřena pro skupinu sprinklerových hlavic (Sheppard, 2002)



Obrázek 3.19: Kombinovaná osově symetrická rychlost jako funkce úhlu odklonu od osy, vč. standardní odchylky (Sheppard, 2002)

3.6.7 Koeficient zhášení

Koeficient zhášení je v programu FDS definován jako vlastnost povrchu. Je součinitelem modelů, nejedná se o fyzikální veličinu ani jinak měřitelnou hodnotu. Jedná se o konstantu empirické korelace z experimentálních dat. Pro většinu aplikací neexistuje jeho ověřená hodnota. V praxi tak lze jeho používání doporučit velkou opatrností. Hodnota manuálu FDS (McGrattan a kol., 2019) je $4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$. Vztah mezi dobou hašení t^* a koeficientem zhášení pro různá množství kapiček vody (DPS) uvádí obrázek 3.20.



Obrázek 3.20: Vztah mezi dobou hašení a koeficientem zhášení (Lee, 2019)

3.6.8 Propojení s modelem požáru

Po vytvoření sprchového proudu se jednotlivé kapky pohybují okolním prostředím, tedy plynem a kapky a okolní plyn se vzájemně ovlivňují. Při pohybu kapek dochází k výměně hybnosti mezi kapalinou a plynem, kapka se odpařuje, významně u horkých plynů v případě požáru, a dochází k výměně tepla a hmoty s okolím. Trajektorie kapky, tj. její pohyb doménou, závisí kromě její rychlosti také na její hmotnosti a na směru a rychlosti proudění okolního plynu. Z tohoto popisu je tedy zřejmé, že pro správnou předpověď modelu je třeba popsat dostatečně dobře nejen samotný sprchový proud, ale také plynnou fázi tedy model požáru.

Teplotní a rychlostní pole musí být vyřešeno s dostatečnou přesností podle zamýšlené aplikace výsledků modelu, aby byla úroveň komplexity modelu zachována na obou úrovních tedy požár i potlačení hoření.

V kapitole 3.3.2 byly vysvětleny účinky vody v kontextu k modelování kontroly, potlačení a uhašení požáru a vysvětlen princip sprinklerové ochrany. Z textu je zřejmé, že modelovat hašení lze pouze tehdy, je-li zdroj požáru modelován pomocí komplexního pyrolýzního modelu. V takovém případě je výkon požáru počítán modelem a může se tedy snižovat v interakci s účinky vody (sprchového proudu), který také modelujeme. Ve valné většině případů ale modeluje se pouze účinek vody na potlačení hoření. Tepelný výkon požáru je uživatelským vstupem. Při vložení sprinkleru do modelu dojde k vytvoření sprchového proudu, bude simulována interakce kapek s okolním plynem, tepelný výkon požáru jakožto uživatelský vstup modelu se ale vlivem účinků vody nezmění. V praxi se užívají dvě strategie, jak změnit tepelný výkon požáru v momentě, kdy dojde k aktivaci sprinklerové hlavice.

3.6.9 Shrnutí zadávání vstupních hodnot

Cílem zpracovatele je vytvořit takovou modelovou představu sprchového proudu, aby výsledky modelu bylo možno interpretovat v oblasti využití pokročilých modelů potlačení hoření. Volbu základních vstupních dat musí zpracovatel odůvodnit s ohledem na aplikaci a interpretaci výsledků modelu.

Tento výčet součinitelů není úplným výčtem vstupních součinitelů, které programové nástroje modelující potlačení hoření nabízí. Je ale základním výčtem součinitelů, které je třeba zadat pro to, aby mohl být sprchový proud vůbec vytvořen a aby jeho charakteristika odpovídala užitému zařízení.

Vstupní data vyjma průtoku vody sprinklerovou hlavicí nejsou běžně dostupná a v současné době jsou obtížně měřitelná (vysoká instrumentační a finanční náročnost měření). Právě to zanáší do použití modelů potlačení hoření v oblasti využití značnou nejistotu, proto je vhodné používat citlivostní analýzu výsledků nebo validaci modelu, je-li to možné.

Přehled vstupních součinitelů pro definici sprinkleru modelu FDS (McGrattan et al., 2019) včetně přednastavených (defaultních) hodnot jsou uvedeny v tabulce 3.14. třeba je upozornit, že přednastavené hodnoty nemusí být hodnotami ověřenými.

Tabulka 3.14: Přednastavené vstupní součinitele pro simulaci sprinklerové hlavice pro program FDS

Vstupní součinitel		Veličina	Defaultní hodnota
Vstupní součinitel			
Otevírací teplota sprinkleru	Temperature	°C	74
RTI - index reakční doby	RTI	$(\text{m}\cdot\text{s})^{1/2}$	100
Součinitel c	c factor	$(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})^{1/2}$	0
Průtok vody sprinkleru	Flow Rate	$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$	0
Pracovní tlak	Operating Pressure	bar	1
Součinitel K	K factor	$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{bar}^{-1/2}$	1
Součinitel přesahu (Offset factor)	Offset	m	0,05
Úhel rozstříku	Spray Angle (Latitude Angle)	stupně	60, 70
Velikost kapek	Orifice Diameter	m	0
Počet kapek	Particles per Second	$\text{počet}\cdot\text{s}^{-1}$	5000
Počáteční rychlost pohybu kapek	Particle Velocity	$\text{M}\cdot\text{s}^{-1}$	0
Zhášecí koeficient	Extinguishing Coefficient	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$	4
Souřadnice sprinkleru v prostoru	Coordinate	m	0

3.7 Výstupní součinitele modelů hašení

Výstupní součinitele zjednodušených i pokročilých modelů hašení jsou obdobné jako výstupy modelů požáru.

Základními výstupy z programů, které využívají modelů hašení, jsou:

- rychlost uvolňování tepla,
- teploty plynů v prostoru požáru,
- teplotu na povrchu a vnitřní teplotu pevných látek,
- plocha zasažená požárem,
- koncentrace kouře a odhad viditelnosti,
- rychlost proudění plynů větracími otvory,
- rozdělení tlaku v místnosti,
- tvorba, pohyb a koncentrace toxických zplodin (vodní páry, CO₂, CO),
- doba do rozhodujících událostí (např. pokles tepelného výkonu po aktivaci sprinklerů),
- aktivace požárně bezpečnostních zařízení (např. aktivace sprinklerů),

Dalšími součiniteli mohou být:

- celkový tepelný tok a jeho složky (konvekce, kondukce a radiace),
- optická hustota kouře,
- rychlost hoření,
- vývoj tepla na jednotku objemu,
- poměr vzduch/palivo,
- výška plamene.

Veškeré výsledky simulace průběhu požáru se zahrnutím jeho potlačení a hašení prostřednictvím sprinklerové ochrany musí být přehledně zaznamenané, aby byly snadno kontrolovatelné. K prezentaci získaných výsledků se doporučuje používat numerické (např. tabulkové) a grafické vyjádření, např. grafy, kontury, vektorové pole, ISO-plochy nebo animace, s přesným popisem sledovaných veličin.

3.8 Zohlednění interakce při modelování hašení

Zohlednění *interakce* zejména mezi sprinklerovým hasicím zařízením a zařízením pro odvod tepla a kouře (ZOKT) je obtížné předpovídat, neboť do výjimečně složitého problému hašení se ventilace zavádí jako doplňková proměnná. Obecně existují tři druhy interakce mezi sprinklery a systémy přirozené nebo nucené požární ventilace, určené pro odsávání nebo odvětrávání kouře při požáru:

1. Vliv ZOKT na činnost sprinklerových hlavice – používá-li se pro odvod horkých zplodin hoření vztlaku (přirozené odvětrání), je vhodné rozdělit prostor na kouřové sekce ohraničené kouřovými zástěnami. K odvodu zplodin hoření se používají samočinně nebo manuálně otevírané střešní otvory, světlíky. Při rozmístování sprinklerových hlavice v modelu je nutno brát ohled na rozmístěné kouřové zástěny, neboť mohou sahat více než jeden metr pod strop. Kouřové zástěny mohou rovněž ovlivnit, které sprinklerové hlavice se budou otevírat, zejména je-li začínající požár přímo pod závěsem nebo na hranici dvou kouřových zástěn. Může se tak spustit nadměrný počet sprinklerových hlavice, čímž se sníží intenzita dodávky vody pod přijatelnou úroveň nebo se zvýší rozsah poškození vodou. Stejně následky může mít i umístění sprinklerových hlavice poblíž otvorů nuceného větrání.
2. Vliv ZOKT na účinnost sprinklerových hlavice – při samočinném hašení, kdy jsou sprinklery v procesu kontroly nebo potlačení požáru, může vstup čerstvého vzduchu vlivem odvodu kouře vést ke zvýšení počtu aktivovaných sprinklerových hlavice, a tedy i ke zvýšení požadavků na celkový přítok vody. Pokles účinnosti sprinklerů je možno v modelu

překonat nastavením manuální aktivace větracích otvorů místo samočinné nebo použitím samočinných odvětrávacích otvorů s opožděnou aktivací oproti sprinklerům.

3. Vliv sprinklerů na účinnost ZOKT – v určité vzdálenosti se vodní proud ze sprinkleru může střetnout s pomalu se pohybující vrstvou horkých plynů. Poměrně často se stává, že vodní proud tuto horkou vrstvu ochladí, a sníží tak její vztlak. Vzhledem k tomu, že schopnost zařízení, používajícího přirozené větrání odvádět kouř závisí na vztlaku horkých plynů, stane se toto zařízení neúčinné.

Při poměrně chladné vrstvě plynů nebo při vysoké intenzitě skrápění může být kouř z horké vrstvy srážen a způsobovat ztrátu viditelnosti.

3.9 Kontrola návrhu modelování hašení

Posuzovatel při kontrole předloženého modelu musí vycházet ze základních teoretických předpokladů. Prvním z nich je zhodnocení tepelného výkonu požáru. K nárůstu tepelného výkonu požáru dochází podle definované křivky do okamžiku reakce sprinklerové hlavice. Po aktivaci sprinklerů může dojít ke dvěma variantám. V prvním případě po aktivaci sprinklerů zůstává tepelný výkon konstantní, což značí situaci, že model předpokládá, že po spuštění sprinklerů dojde k lokalizaci požáru. Pro posuzovatele je klíčové nalézt odpověď na otázku: Jak byl stanoven čas, kdy dojde k aktivaci sprinklerů. V druhém případě po aktivaci sprinklerů tepelný výkon požáru klesá, model tedy předpokládá, že dochází k hašení požáru. K této situaci může dojít dvěma způsoby: snížení tepelného výkonu je zadáno přímo uživatelem v rámci křivky tepelného výkonu anebo rychlost poklesu tepelného výkonu je simulována programem na základě tzv. existenčního koeficientu. Došlo-li ke snížení tepelného výkonu prostřednictvím uživatele, musí posuzovatel zhodnotit, zda je reálné hašení daného materiálu prostřednictvím sprinklerů a také zjistit, jak byla stanovena rychlost poklesu tepelného výkonu požáru. Také v případě, že došlo k poklesu tepelného výkonu požáru za použití programu na základě extinkčního koeficientu, musí existovat reálný předpoklad, že daný materiál je možno uhasit prostřednictvím sprinklerů. Uživatel modelu pak musí být schopen vysvětlit, jak byla stanovena hodnota koeficientu zhášení.

Při hodnocení modelů je zapotřebí zohlednit o jaký druh modelu se jedná. V případě použití zjednodušeného modelu hašení, je i postup hodnocení poněkud snazší oproti posouzení pokročilých modelů. U zjednodušených modelů hašení musí posuzovatel zhodnotit zejména technické součinitele sprinklerové hlavice, její prostorové umístění, případně její další specifické součinitele. Mezi technické součinitele, které musí být posuzovatelem ověřeny, náleží dotaz na volbu definice aktivační teploty sprinklerové hlavice. Sprinklerové hlavice mají různé otevírací teploty podle prostředí, v jakém jsou instalovány. Dalším technickým součinitelem sprinklerové

hlavice je index reakční teploty. Tento index zohledňuje samotný reakční čas a otevírací teplotu, zároveň bere v úvahu i teplotu prostředí nebo rychlost proudění plynů, je to tedy míra tepelné citlivosti prvku. Použitý index reakční teploty musí odpovídat reálné situaci a uživatel modelu musí vysvětlit svoji volbu. Také volba součinitele nazývaného součinitel C , který zohledňuje vedení tepla do patice sprinklerové hlavice, musí být uživatelem modelu zdůvodněna. Nízké hodnoty součinitele C představují nízký odvod tepla ze sprinklerové hlavice a vysoké znamenají silné ochlazování baňky. Pokud nejsou tepelné ztráty z baňky do připojení hlavice, součinitel C nabývá hodnoty 0 a model přechází na řešení pouze jednoho vstupního součinitele. Při kontrole technických součinitelů nesmí být opomenuta posuzovatelem intenzita dodávky vody. Tento vstup používají některé z modelů pro stanovení průběhu tepelného výkonu během simulovaného procesu hašení (Husted a Westerman, 2009). Mezi otázky posuzovatele, které souvisí s prostorovým umístěním sprinklerové hlavice, patří definice vzdálenosti sprinklerové hlavice od ohniska požáru a definice pozic jednotlivých hlavíc v prostoru, příp. mezi sebou. Dalšími dotazy při hodnocení může být nastavení spolehlivosti sprinklerové hlavice, volba pravděpodobnosti uhašení nebo potlačení požáru po aktivaci sprinklerové hlavice nebo také zda je zohledněn vliv sprinklerové hlavice na okolní podmínky.

Práce s pokročilými modely jako je např. CFD je náročná a vyžaduje vysoké teoretické i praktické dovednosti uživatele modelu. Posuzovatel se musí při kontrole modelu držet obdobné struktury otázek, jako u zjednodušených modulů. V případě kontroly technických součinitelů sprinklerové hlavice musí klást důraz na volbu aktivační teploty sprinklerové hlavice, index reakční teploty, definici součinitele C , a vymezení součinitele K , popř. pracovního tlaku a průtoku sprinklerovou hlavicí s ohledem na konkrétní podmínky. Při kontrole specifických součinitelů musí být dotazy směřovány na vhodnost stanovení součinitele tvaru rozstříku pro daný model, zda jsou posouzeny součinitele rozstříkovaných kapek, velikost, počet a jejich vliv na nejistotu výpočtu, jak je stanovena distribuce kapek v jejich proudu, zda je stanovena počáteční rychlost pohybu kapek a zda je uvažováno se zhášecím koeficientem. Další otázky posuzovatele související s hašením by se měly týkat definice procesu hašení při pevně zadaném průběhu tepelného výkonu vstupujícího do výpočetní domény, vymezení vzdálenosti sprinklerových hlavíc v modelu, a zda je vhodně zohledněn vliv ochlazení sprinklerové hlavice vnějšími podmínkami, např. prouděním, aktivací požárně bezpečnostního zařízení?

4 Evakuace

4.1 Proces evakuace

4.1.1 Strategie evakuace osob

Cílem evakuace je zajistit, aby osoby uvnitř postiženého objektu byly schopny v případě kritické situace, nejčastěji požáru, tento objekt opustit, přesunout se do bezpečného místa, nebo zůstat na místě nezasáženém požárem po dobu nezbytnou pro potlačení požáru. Vše bez vystavení životu či zdraví nebezpečným podmínkám, či dokonce bez uvědomění si jejich existence. Taková situace představuje ideální řešení požární bezpečnosti (Grosshandler a Brynel, 2005).

Požadavek na nulové vystavení evakuovaných osob účinkům požáru může znamenat zásadní komplikace při návrhu dotčeného objektu. Efektivnější přístup k řešení požární bezpečnosti představuje hledání takové úrovně expozice, která umožní efektivní evakuaci osob, a zároveň neznamena ohrožení evakuačního procesu ani zdraví evakuovaných osob. Uvedený postup znamená nutnost časového hodnocení dopadu návrhového požárního scénáře na evakuované osoby z hlediska jejich místa a podmínek.

Počáteční rozmístění osob v budově a způsob, jakým se jejich poloha mění v běžné situaci i v průběhu evakuace, je ovlivněna charakteristikou budovy a osob, systému požární bezpečnosti a analyzovaném požárním scénáři. Podmínky osob závisí na jejich komplexním stavu před vznikem požáru a na jeho následných účincích, zejména působením vysoké teploty a toxických zplodin hoření.

Současná evakuace

Strategie zahrnuje současnou evakuaci všech osob z budovy do určeného prostoru, nejčastěji na volné prostranství. Nejrozsáhlejší dostupnou případovou studií současnosti je evakuace Světového obchodního centra v roce 2001 (Jason, 2005), (Galea, 2008), (Galea, 2008b) a (Galea a Blake, 2004). Případná evakuace velkého počtu osob může způsobit vysoké hustoty osob v oblasti únikových cest. Zvýšená hustota osob v prostoru únikových cest může znamenat výrazné prodloužení celkové doby evakuace, její redukce lze dosáhnout snížením této hustoty nebo úpravou reakční doby, které ale musí být odůvodněné. Úplná evakuace osob je obvykle spontánních strategií evakuovaných osob, případně je řízena zasahujícími jednotkami.

Postupná evakuace osob

V případě postupné evakuace osob se požaduje po některých skupinách osob setrvání na místě po určitou dobu, aby bylo dosaženo efektivnějšího využití únikových cest, protože v místech zúžení únikových cest v případě vysoké hustoty osob dochází k poklesu intenzity proudění. Osoby

v těchto skupinách nicméně mohou pociťovat stres vyplývající z pobytu v nebezpečném prostředí (Cepolina, 2009) a (Pauls, 1994). Postupná evakuace je založena na principu, kdy osoby z nejvíce ohrožených podlaží nebo oblastí, tedy části budovy přímo zasažené požárem a části sousední, jsou evakuovány přednostně. Výsledkem této strategie je snížení doby zdržení v kritických místech únikových cest, snížení hustoty evakuovaných osob v těchto místech, a celkové zkrácení doby evakuace. Efektivita této strategie nicméně silně závisí na dostupném požárním zabezpečení v budově, adekvátním výcviku personálu a komunikačním vybavení v budově.

Setrvání osob na místě

Strategie je využívána zejména v případě výškových budov, typickým postupem je uzavření přístupových dveří do místnosti a vyčkání příchodu zasahujících jednotek. V minulosti byla strategie aplikována také v případě osob se sníženou pohyblivostí, která znemožňovala současnou evakuaci vlastními silami. Pro tuto strategii lze nalézt případové studie zpracované především pro výškové budovy (Proulx, 2001). Studie označuje setrvání osob na místě v případě požáru za efektivní za následujících předpokladů:

- budova disponuje vysokým počtem podlaží (obvykle 6 a více), což činí úplnou evakuaci málo efektivní,
- budova je rezidenčního typu s uzavřenými místnostmi a prostředky pro vytvoření chráněných prostor,
- budova má konstrukci z nehořlavých materiálů,
- v budově je instalováno požární zabezpečení se zvukovou signalizací a hlasovou komunikací, která umožňuje instruovat osoby v budově.

Obecně platí, že efektivita této strategie je silně závislá na kvalitě komunikace mezi osobami v budově a zasahujícími jednotkami nebo operátorem. Nedostatečné informování osob o nezbytném postupu při této strategii se ukazuje jako hlavní příčina jejího selhání (Ronchi a Nilsson, 2013).

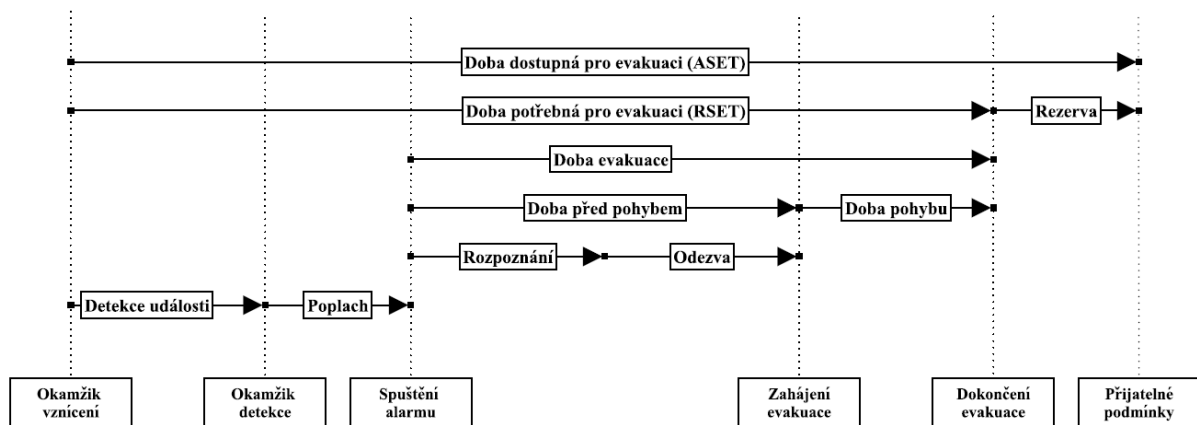
Evakuace osob do chráněného prostoru

V případě, že evakuované osoby jsou dočasně nebo trvale málo pohyblivé či zcela nepohyblivé, a nemohou využívat schodiště, vyžaduje jejich evakuace externí asistenci. Jestliže se současně jedná o budovy s vysokým počtem podlaží (např. nemocnice), může být efektivní strategie jejich dočasného přemístění do chráněného prostoru v rámci budovy a vyčkání na příchod zasahujících jednotek a dokončení evakuace.

4.1.2 Analýza doby evakuace osob

Doba dostupná pro evakuaci (ASET)

Predikce pohybu osob v průběhu evakuace je základním postupem při analýze efektivity požárního zabezpečení objektu. Obecně platí, že dostatečná ochrana je zajištěna v případě, kdy doba potřebná pro evakuaci (Required Safe Egress Time - RSET) je kratší než doba dostupná pro evakuaci (Available Safe Egress Time - ASET) (Hurley, 2015). Vzájemné vztahy mezi jednotlivými složkami doby potřebné a dostupné pro evakuaci jsou zachyceny na obrázku 4.1.



Obrázek 4.1: Vztahy mezi jednotlivými složkami evakuace

Doba dostupná pro evakuaci představuje časový interval, po který jsou v místě evakuace přijatelné podmínky pro evakuované osoby. Příklad stanovení takových podmínek může být následující:

- viditelnost přesahuje 10 metrů,
- koncentrace CO nepřesahuje 950 ppm,
- teplota vzduchu nepřesahuje 80 °C ve výšce 2 m.

Pro stanovení průběžných hodnot vybraných veličin po dobu evakuace je vhodné použít pokročilý model požáru, přičemž přijatelné podmínky trvají až do okamžiku, kdy libovolná z vybraných hodnot poprvé překročí stanovený limit. Při stanovení limitu pro přijatelné podmínky se využívá některý z obecně uznávaných zdrojů, např. (Hurley, 2015b) a (Smith, 2010), další podrobnosti lze nalézt v této kapitole včetně příkladu vybraných kritérií přijatelnosti.

Doba potřebná pro evakuaci (RSET)

Doba potřebná pro evakuaci je komplexní veličina, která je složena z řady dalších dílčích intervalů. Nejistota jejich stanovení může znamenat výrazné prodloužení celkové doby potřebné pro evakuaci a vyčerpání časové rezervy mezi dokončením evakuace a limitem pro přijatelné podmínky v budově, případně překročení tohoto limitu a ohrožení unikajících osob.

Celková doba potřebná pro evakuaci se skládá podle obrázku 4.1 z následujících základních časových intervalů:

- doba detekce události,
- doba spuštění poplachu,
- doba evakuace.

Doba detekce události je časový interval, který uplyne mezi vznícením požáru a jeho detekcí příslušným požárním zabezpečením, personálem budovy nebo jejími obyvateli. Pro určení tohoto časového intervalu lze požit požární model podobně jako v případě stanovení doby dostupné pro evakuaci, kdy se hledá okamžik překročení kritické hodnoty některé z veličin, které jsou pro detekci požáru rozhodující.

Doba spuštění poplachu závisí především na způsobu detekce požáru. Reakční doba elektronického požárního systému bude výrazně kratší než reakce obslužného personálu budovy či dokonce osob, které se v budově momentálně nachází.

Doba evakuace závisí především na podrobné znalosti lidského chování v krizových situacích a pro její určení jsou využívány pokročilé softwarové modely. Většina z těchto modelů pracuje samostatně s dobou před pohybem a dobou pohybu osob. Doba před pohybem je jako časový interval od okamžiku, kdy je konkrétní osoba na základě vzniklé situace poprvé vystavena vnějším podnětům, alarm, kouř, teplota apod., až do okamžiku, kdy zahájí samotnou evakuaci na bezpečné místo. Doba pohybu představuje časovou náročnost dokončení procesu evakuace na bezpečné místo.

Pro každou osobu je doba před pohybem intervalem od první výstražné zprávy do případného zahájení evakuace. Existují různé druhy klasifikace této doby, nejčastější rozdělení je na následující základní intervaly (ISO/TR 13387-8, 1999), (Hurley, 2016) a (Purser a Bensilum, 1998):

- rozpoznání nebezpečí,
- odezva na nebezpečí.

Doba před pohybem se může u jednotlivých osob nebo u jejich skupin velmi lišit. Rozptyl doby před pohybem závisí na řadě faktorů, včetně vzdálenosti osob od místa požáru a jejich znalostech o požáru, existenci a rozložení únikových východů, stavu výstražného zařízení a systému řízení. V otevřeném uspořádání prostoru, sportovní nebo kulturní události) lze očekávat nízkou variabilitu doby před pohybem, protože osoby zahájí evakuaci přibližně ve stejnou dobu. V případě komplexní geometrie prostoru lze očekávat naopak velký rozptyl této doby. Osoby v bezprostřední blízkosti požáru tak mohou za určitých okolností dokončit evakuaci dříve, než se osoby ve vzdálených částech budovy o požáru dozví.

Časový interval rozpoznání nebezpečí představuje období od spuštění poplachu po okamžik, kdy osoby na spuštěný poplach začínají reagovat. Během této doby osoby dále pokračují

v činnosti, kterou vykonávaly před zjištěním poplachu nebo příznaků požáru, tedy např. konkrétní pracovní aktivity, nakupování nebo odpočinek. Doba rozpoznání se velmi liší v závislosti na konkrétních faktorech, jakými je typ a účel budovy, charakteristika osob či instalované požární zabezpečení. Časová variabilita intervalu je velmi vysoká a pohybuje se v rozmezí několika sekund až po mnoho minut. Jeho délka je také odlišná u jednotlivých osob ve stejném prostoru v budově a také u podobných skupin osob v různých prostorech.

Časový interval odezvy na nebezpečí trvá od okamžiku, kdy si osoby uvědomí vznik kritické situace, až do okamžiku, kdy se rozhodnou pro konkrétní způsob strategie evakuace. Typické činnosti vykonávané osobami v tomto časovém úseku jsou následující:

- ověřování reálnosti alarmu, hledání příznaků požáru,
- zastavení strojů ve výrobě, úschova cenných předmětů,
- vyhledání ostatních členů rodiny nebo skupiny,
- vyrozumění dalších osob,
- hledání vhodné únikové cesty,
- snaha o hašení požáru.

Analýza doby pohybu je zaměřena na posouzení doby potřebné pro evakuaci osob do bezpečného místa. Konkrétní výsledek bude závislý na celé řadě vstupních údajů, mezi které patří zejména dispozice budovy, znalost budovy jejími obyvateli, místo požáru a způsob řízení požární bezpečnosti. Pro posouzení doby pohybu lze aplikovat pokročilé modely pohybu osob na základě existujících informací a složitosti situace. Takto lze analyzovat proces evakuace a jeho časovou náročnost s dostatečnou přesností, studovat variantní řešení uspořádání prostoru, rozložení únikových východů apod.

4.2 Modely evakuace osob

4.2.1 Nástroje

Dostupné nástroje pro modelování evakuace osob se rozdělují podle jejich přístupu k chování osob a reprezentaci okolního prostoru. Modely, které popisují chování osob pomocí jednoduchých rovnic, mají tento popis založen na empirických údajích a rovnicích, které jsou implementovány do softwarového nástroje (Stamatis, 2003). Tyto modely mohou být použity pro relativně dobré hodnocení doby evakuace v závislosti na stanovených předpokladech a na množství parametrů. Omezující jsou pro tyto modely komplexní scénáře a velký počet osob.

Hydraulické modely reprezentují osoby jako reagující výhradně na vnější empirické podněty, a to vždy stejným způsobem, nedávají prostor pro individuální rozhodování. Rychlost chůze a směr pohybu se odvozuje pouze podle fyzikálních a geometrických parametrů, jakými je

zejména lokální hustota osob a kapacita jednotlivých klíčových prvků infrastruktury. Výsledkem tohoto přístupu je většinou relativně optimistické hodnocení času potřebného pro evakuaci.

Behaviorální modely lze označit za pokročilé modely. Uvažují kromě fyzikální charakteristiky prostoru také jednotlivce jako samostatnou entitu. Zahrnují reakce na podněty, např. požární nebezpečí, a individualitu každého jednotlivce, vlastní reakční doba, preference určitého únikového východu apod. Poskytují nejlepší odhad doby evakuace.

Data vstupující do modelu se dělí na geometrii a populaci. Třetí kategorií dat může být riziko, které na osoby působí. Informace o geometrii je snadno dostupná a pevně definována, představuje základní prostorové vymezení modelu. V rámci studie variuje dílčí geometrické uspořádání, např. počet únikových východů nebo jejich šířka. Informace o populaci a jejich vlastnostech je více neurčitá, se vychází většinou z historické zkušenosti, obvyklá skladba návštěvníků objektu, nebo kvalifikovaného odhadu v případě nového typu události, případně předchozího sběru dat a jejich analýzy. Informace o riziku je obvykle výstupem pokročilého modelu požáru.

4.2.2 Vstupní data modelu

Geometrie

Geometrie modelu pohybu osob popisuje prostorové uspořádání a geometrii budov či únikových a evakuačních cest, jejich omezení a případnou částečnou nedostupnost. Geometrii budovy je nutno zohlednit ve všech důležitých detailech, jakými je rozvržení v úrovních a podlažích, parametrech či vlastnostech překážek, stěn, schodů, ramp, dveří a východů. Zdrojem dat pro geometrii je optimálně elektronický výkres, nejčastěji formáty DXF nebo DWG, který lze importovat do většiny pokročilých nástrojů pro modelování pohybu osob. V současné době se intenzivně prosazuje také informační modelování staveb (BIM), moderní nástroje pro modelování evakuace osob podporují import Industry Foundation Classes (IFC), což souborový formát (datové schéma) pro koordinaci mezi BIM modely z různých zdrojů a pro neutrální výměnu BIM dat.

Nástroje pro pokročilé modely pohybu osob nicméně musí nabízet vlastní prostředky pro tvorbu geometrie v případě, že externí data nejsou k dispozici. V naprosté většině případů je po importu nutné provést dílčí editaci v prostředí modelu, jako např. a odstranění nadbytečných čar a dalších prvků, které jsou v modelu nežádoucí, a na přiřazení konkrétních funkcí nebo vlastností vybraným objektům, např. dveře, schodiště apod. Právě nástup BIM a formátu IFC tento zdlouhavý a nákladný proces významným způsobem urychluje.

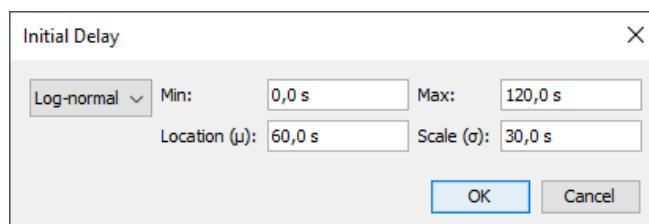
Populace

Reakční doba

V pokročilých modelech evakuace bývá jako takto zjednodušeně označován interval mezi spuštěním signálu pro evakuaci a reakcí konkrétní modelované osoby na tento signál. V případě, že není k dispozici konkrétní informace o reakční době osob, lze využít jako zdroje pro její stanovení některý standard (RIMEA, 2009) nebo vhodný zdroj z literatury (Galea, et al., 2017).

Evakuační scénáře rozdělují reakční dobu do tří základních skupin:

- Rychlá evakuace: Všechny evakuované osoby mají reakční dobu nulovou. Jde o extrémní variantu, která při simulaci znamená vysoké zatížení evakuačních tras a únikových východů.
- Plynulá evakuace: Osobám je přiřazena rovnoměrně rozložená reakční doba obvykle v intervalu 0-60 s. Znamená menší riziko zahlcení únikových východů.
- Pomalá evakuace: Osobám je přiřazena rovnoměrně rozložená reakční doba v intervalu stanoveném na základě komplexního hodnocení podle typu budovy, charakteristiky osob, požárního systému a způsobu řízení požární bezpečnosti.
- Reakční doba podle vybraného statistického rozdělení: Vychází se z konkrétního standardu nebo zdroje literatury. Nejčastějším typem je log-normální rozdělení reakční doby, příklad zadání povinných parametrů je na obrázku 4.2.



The image shows a dialog box titled "Initial Delay" with a close button (X) in the top right corner. Inside the dialog, there is a dropdown menu set to "Log-normal". Below this, there are four input fields: "Min:" with the value "0,0 s", "Max:" with the value "120,0 s", "Location (μ):" with the value "60,0 s", and "Scale (σ):" with the value "30,0 s". At the bottom right of the dialog, there are two buttons: "OK" and "Cancel".

Obrázek 4.2: Příklad povinných parametrů reakční doby s lognormálním rozdělením

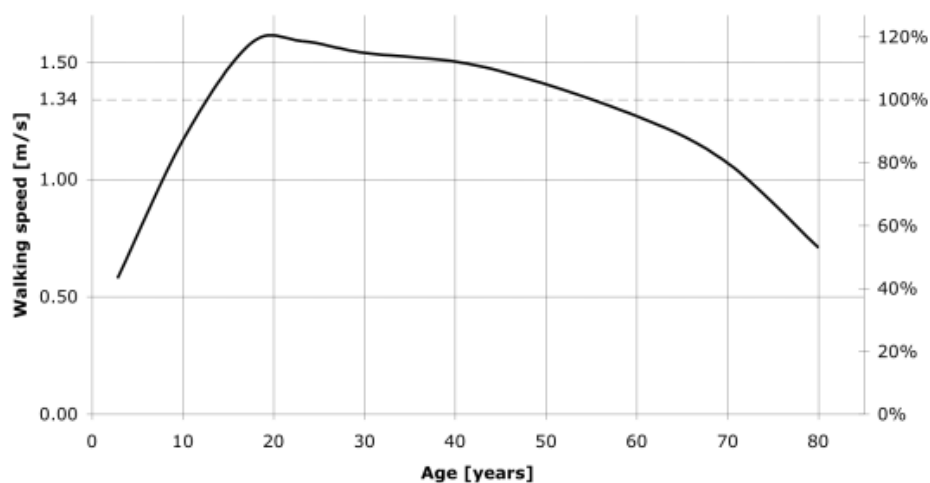
Rychlost pohybu

Rychlost pohybu osoby je důležitý parametr populace modelu, pro její stanovení je k dispozici několik zdrojů. V tuzemském prostředí lze využít normovaných hodnot podle ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb, Nevýrobní objekty (ČSN 73 0802, 2009). Hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.1 a z výsledků je patrné, že norma neuvažuje s rozdílnými rychlostmi podle věku nebo schopnosti pohybu. Osoby s omezenou schopností pohybu jsou započteny při posudku evakuace zvětšením šířky únikového pruhu.

Tabulka 4.1: Rychlost evakuovaných osob ČSN 73 0802

Úsek evakuační trasy	Rychlost [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]
Rovný úsek	0,583
Schody dolů	0,500
Schody nahoru	0,417

Alternativním zdrojem dat o rychlosti osob po rovině je práce (Weidmann, 1993). Dokument stanovuje orientační rozdělení rychlosti podle věku, které je na obrázku 4.3 a tabulce 4.2., a určuje střední rychlost pohybu pro muže a ženy, která činí $1,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, resp. $1,27 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obrázek 4.3: Statistické rozdělení rychlosti chůze v závislosti na věku (Weidmann, 1993)

Tabulka 4.2: Podrobné rozdělení rychlosti chůze v závislosti na věku podle (Weidmann, 1993).

Osoby	Minimum	Maximum	Osoby	Minimum	Maximum
Ženy < 30 let	0,516	1,433	Muži < 30 let	0,580	1,610
Ženy 30-50 let	1,255	1,371	Muži 30-50 let	1,410	1,514
Ženy > 50 let	0,605	1,255	Muž > 50 let	0,671	1,392
Ženy se sníž. poh.	0,409	0,676	Muži se sníž. poh.	0,460	0,760

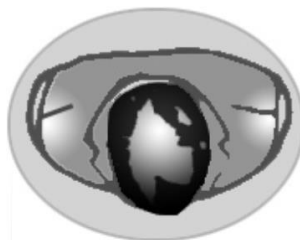
Pokud se jedná o pohyb po schodech, je vhodným zdrojem informací práce Fruina (Fruin a Pedestrian, 1971). Dokument rozlišuje různé věkové skupiny podobné, a zabývá se rychlostí jejich chůze po schodech s různým sklonem a oběma směry (nahoru i dolů). Výsledný soubor dat je v tabulce 4.3. Výsledky je vzhledem k rozdílné metodice měření a zpracování výsledků obtížné snadno porovnávat. Zatímco (Weidmann, 1993) stanovuje maximální a minimální hodnotu pro chůzi po rovině, dokument (Fruin a Pedestrian, 1971) dává k dispozici data pro chůzi na schodech s různým sklonem jako průměrnou hodnotu (nikoliv rozsah).

Tabulka 4.3: Rychlost podle (Fruin a Pedestrian, 1971) na schodech s různým sklonem

Osoby	Sklon 32° dolů	Sklon 27° dolů	Sklon 32° nahoru	Sklon 27° nahoru
Věk < 30 let [m·s ⁻¹]				
Ženy	0,594	0,671	0,538	0,559
Muži	0,828	0,930	0,559	0,610
Průměr	0,757	0,813	0,549	0,584
Věk 30-50 let [m·s ⁻¹]				
Ženy	0,508	0,650	0,478	0,544
Muži	0,691	0,813	0,513	0,589
Průměr	0,645	0,777	0,503	0,579
Věk > 50 let [m·s ⁻¹]				
Ženy	0,472	0,564	0,391	0,452
Muži	0,569	0,599	0,432	0,411
Průměr	0,549	0,594	0,422	0,422
Celkový průměr	0,671	0,772	0,508	0,574

Rozměry

Jednotlivec je z hlediska minimálního prostoru, který zaujímá, a interakcí s okolními osobami, popisován tzv. osobní elipsou, viz obrázek 4.4 a tabulku 4.4. Koncept byl poprvé uvedený do praxe (Fruin a Pedestrian, 1971). Prostor je definován jako eliptická čára znázorňující 95 % percentil půdorysných rozměrů oblečeného dospělého muže s určitým přidaným prostorem, který odráží snahu jednotlivce vyhnout se přímému dotyku s okolními osobami. Včetně přidaného prostoru tak má základní elipsa těla rozměry 61 cm v delší ose a 46 cm v kratší ose, plocha této elipsy je 0,22 m².



Obrázek 4.4: Zobrazení osobní elipsy jako minimálního prostoru, který jednotlivec zaujímá

Tabulka 4.4: Rozměry lidského těla podle tří vybraných evropských zemí

Země původu	Šířka [cm]	Hloubka [cm]	Plocha elipsy [m ²]
Velká Británie – muž	51,0	32,5	0,26
Velká Británie – žena	51,0	32,5	0,26
Polsko – muž	47,5	27,5	0,21
Polsko – žena	41,0	28,5	0,18
Francie – muž	51,5	28,0	0,23
Francie – žena	47,0	29,5	0,22
Průměr	45,6	28,2	0,20
Zjištěná maxima	51,5	32,5	0,26

Kromě tendence osob dodržovat určitý odstup od svých susedů se při pohybu zohlední také dynamika houpavého pohybu jejich těla. To vytváří v okolí objektů určitou hraniční vrstvu, o kterou je skutečná šířka úseku redukována na každé straně, a kterou nelze zahrnout do kapacitních výpočtů. Značí se jako efektivní šířka úseku, viz tabulku 4.5.

Tabulka 4.6: Efektivní šířka úseků evakuační trasy

Úsek	Hraniční vrstva [mm]
Schodiště, zdi, dveře	150
Zábradlí	90
Chodby	200

Další údaje

Mezi další údaje patří například věková struktura nebo limity expozice nebezpečných látek.

Věková struktura evakuovaných osob bývá v modelech aplikována jako obecný parametr vyšší úrovně, od kterého jsou následně odvozeny další, především dynamické parametry, jako např. rychlost pohybu. Pokud jsou k dispozici konkrétní údaje o věkovém složení a současně je možné jej nezbytné v modelu definovat, aplikuje se standardní rozdělení se střední hodnotou 50 let a směrodatnou odchylkou 20 let. Součástí některých modelů bývá rovněž stanovení minimální a maximální hodnoty tohoto rozdělení (které tak nepokrývá celý možný rozsah intervalu). V takovém případě se volí při dodržení předchozích parametrů minimální věk osoby 10 let a maximální věk 85 let.

Limity expozice nebezpečných látek jsou důležitým vstupním údajem v případě, že v pokročilém modelu se také definuje *riziko*, nejčastěji prostřednictvím pokročilého modelu požáru. Stanovuje se úroveň, pro kterou je působení těchto látek možné pokládat za snesitelné, nebo slučitelné se životem. Obvykle se jedná o hustotu kouře, produkty hoření (toxické zplodiny) a vysokou teplotu.

V případě hustoty kouře se stanovuje přijatelné meze na základě negativního vlivu zakouřeného prostoru na rychlost pohybu a na schopnost osob nalézt cestu. Rovněž posuzujeme, jaká hustota kouře bude tolerována při strategii setrvání na místě. Ukazuje se, že při působení nedráždivého kouře klesá rychlost chůze s jeho hustotou. Při optické hustotě $0,5 \text{ m}^{-1}$ se empiricky rychlost chůze zmenšuje z původní hodnoty cca $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ bez působení kouře na hodnotu $0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, tedy jednu čtvrtinu. V této situaci se lidé chovají podobně jako v úplné tmě, což prakticky znamená, že nahmatávají cestu podél zdi. Dráždivé působení kouře tyto negativní dopady dále urychluje.

V případě stanovení kritérií přijatelnosti pro produkty hoření na základě jejich koncentrace v prostředí, například při stanovení doby dostupné pro evakuaci, lze využít řady zdrojů, které tuto úroveň konkrétně definují konkrétně. Preferovaným zdrojem by měly být koncentrace uváděné

v jednotkách ppm (počet částic toxické zplodiny na milion částic), protože takto uváděné koncentrace jsou současně obvyklým výstupem pokročilých modelů požáru. Mezi klíčové toxické produkty hoření se řadí oxid uhelnatý a kyanovodík. Zatímco oxid uhelnatý je přítomen ve všech typech hoření, kyanovodík je produktem hoření materiálů obsahujících dusík. Jde zejména o umělé hmoty jako polyuretan nebo nylon, které jsou součástí moderního vybavení domů nebo dopravních prostředků.

Oxid uhelnatý (CO) se přednostně váže na hemoglobin červených krvinek, což vede k hypoxii a následně k asfyxii (přerušeni dodávky vzduchu). Dopad na člověka uvádí tabulka 4.6.

Tabulka 4.7: Dopady působení oxidu uhelnatého (CO)

CO [ppm]	Doba expozice	Dopady
1 000	30 min	Neschopnost evakuace
2 500	30 min	Smrt
6 000	5 min	Neschopnost evakuace
12 000	5 min	Smrt

Kyanovodík (HCN) je bezbarvá, velmi těkavá kapalina s intenzivním pachem hořkých mandlí. Kyanovodík je velmi silný jed. Smrtečná dávka (LD50) kyanovodíku je 1,5 mg/kg těla. Projevy dechové nedostatečnosti jsou v případě HCN mírně odlišné od CO, nicméně nastávají podstatně rychleji. Na rozdíl od působení CO, který se váže na hemoglobin, působí HCN přímo na mozek. Dostupné studie ukazují, že vystavení mírným dávkám HCN vede i po poměrně dlouhé době k méně nebezpečné hyperventilaci, zatímco silnější expozice na úrovni 200 ppm znamená ztrátu vědomí už po dvou min, viz tabulku 4.7.

Tabulka 4.8: Dopady působení kyanovodíku (HCN)

HCN [ppm]		Dopady a doba expozice
<80	1 hod	Mírná hyperventilace
100	30 min	Ztráta vědomí
200	2 min	Ztráta vědomí
300+	s	Smrt
1000	Okamžitě	Ztráta vědomí a smrt

Oxid uhličitý (CO₂) je méně rizikový produkt hoření, který se podobně jako oxid uhelnatý (CO) vyskytuje ve všech typech požárů. Koncentrace v plynu v takovém případě dosahují jednotek promile. Samotný oxid uhličitý není toxický až do koncentrace 5 %, nicméně stimuluje dýchání a při této hraniční koncentraci je frekvence dýchání až trojnásobná. U jiných, nebezpečnějších produktů hoření tak výrazně zkracuje dobu kritické expozice. Působení vysoké teploty je závažné v situacích, kdy jsou osoby evakuovány v okolí ohniska požáru a v situacích, kdy musí při úniku procházet pod vrstvou horkých zplodin. Tehdy je důležité kritéria přijatelných podmínek při působení radiace a konvekce.

Vysoké teploty mohou vést k ohrožení života třemi základními mechanismy:

- tepelný šok z přehřátí,
- povrchové popáleniny,
- popálení dýchacího ústrojí.
- Působení vysoké teploty se dělí na:
 - Radiace. Zaměřuje se na vlivy bolesti a popálení pokožky, snesitelné meze působení jsou uvedeny v tabulce 4.9
 - Konvekce. Kritickou hranicí pro posouzení vlivu je teplota přibližně 120 °C. Pod touto hranicí se uvažuje pouze o přehřátí, nad touto hranicí o bolesti a popálení pokožky.

Tabulka 4.9: Dopady působení vysoké teploty

Teplota [°C]	Působení	Doma expozice	Dopady
60	Vedení (např. kov)	s	Popáleniny
100	Konvekce	30 min	Přehřátí
120	Konvekce	5 min	Popálení kůže a dýchacích cest
185	Konvekce	1 min	Popálení kůže a dýchacích cest
190	Radiace	Okamžitě	Bolest na kůži

Pro kritéria přijatelnosti dále platí, že mez snesitelnosti popálení kůže je obvykle nižší než u dýchacího ústrojí v případě suchého vzduchu, kdy je vlhkost vzduchu nižší než 10 %. Při nasycení vzduchu vodní parou je kritická hodnota popálení dýchacího ústrojí již 60 °C, k tomuto nasycení může dojít už při prostém hašení požáru vodou.

4.3 Verifikace a validace modelu

4.3.1 Principy řešení

Proces verifikace a validace modeluje pro hodnocení spolehlivosti výsledků, které modely pohybu osob poskytují, a pro vymezení oblasti jejich reálné použitelnosti klíčový. Při konkrétní aplikaci modelu pohybu osob k procesu verifikace a validace přistupuje ještě proces kalibrace modelu, který zahrnuje dílčí modifikaci těch parametrů, které jsou zatíženy z principu neodstranitelnou nejistotou, například některými geometrickými nebo dynamickými parametry osob. Při evakuaci se vždy jedná o řešení pravděpodobnostní úlohy.

Pomocí verifikace modelu se stanoví, zda praktická realizace výpočtu modelu dostatečně věrně reprezentuje jeho koncept a očekávané výsledky. Definice je obecně akceptována a znamená soulad modelu s požadavky uživatele, které vyplývají z řešeného problému. Neúspěšná verifikace modelu je z uživatelského hlediska neopravitelná, model vykazuje v takovém případě závažné nedostatky v některém ohledu a je třeba úzce vymežit jeho použitelnost, případně zvolit jiný model.

Klíčové komponenty modelu, které je třeba podrobit verifikaci, lze rozdělit následujícím způsobem:

- doba před pohybem,
- pohyb a navigace,
 - rychlost chůze v koridoru,
 - rychlost chůze po schodech,
 - pohyb kolem rohu koridoru,
 - protisměrné proudění osob,
 - skupinové chování osob,
 - vliv demografického složení na rychlost pohybu,
 - vliv omezené viditelnosti na rychlost pohybu,
 - fyziologické působení kouře, produktů hoření a vysoké teploty na osoby,
- volba východů,
 - přiřazení konkrétního východu,
 - sociální faktory při volbě východu,
 - preference únikových východů,
- dostupnost evakuační trasy a její výběr,
 - dynamická změna preference východu při změně jeho dostupnosti,
- podmínky proudění osob a jeho omezení.
 - vznik kongesce,
 - maximální intenzita proudění pohybu osob.

Kalibrace modelu představuje konfiguraci jednotlivých parametrů modelu tak, aby se jeho chování maximálně shodovalo s reálným očekáváním, viz obrázek 4.5. Vzhledem ke stochastické a povaze modelu pohybu osob s řadou empiricky nezjistitelných parametrů se kalibrují pouze parametry, které nejsou pro danou úlohu přesně známé nebo empiricky změřitelné. Model požáru nelze, vzhledem k jeho deterministické povaze, kalibrovat.

Acceleration Time:	Constant	1,1 s
Persist Time:	Constant	1,0 s
Collision Response Time:	Constant	1,5 s
Slow Factor:	Constant	0,1
Wall Boundary Layer:	Constant	0,15 m
Comfort Distance:		0,08 m

Obrázek 4.5: Příklad empiricky obtížně zjistitelných parametrů osob, jako například rychlost akcelerace

Při kalibraci modelu se rozděluje proces do základních skupin podle použitých parametrů na kalibraci podle:

- Agregovaných mikroskopických veličin
Úpravou parametrů modelu se dosáhne shody jím produkovaných agregovaných veličin s realitou. Nejčastěji používanými veličinami je intenzita proudění osob, průměrná rychlost ve sledovaném profilu nebo statistické rozložení hustoty na sledovaném úseku.
- Makroskopických vlastností
Hledá se shodu chování modelu s jeho očekávanými makroskopickými vlastnostmi, např. vztahu mezi hustotou osob a rychlostí jejich pohybu nebo hustotou a intenzitou proudění.
- Prostorového uspořádání
Cílem je nalézt odpovídající výskyt klíčových skupinových projevů, např. klastrování.

Validaci modelu se stanoví, obrázek 4.6, zda jsou, z pohledu použití modelu a jeho výpočetní metody, výsledky modelu v souladu s empirickými výsledky. Jde o konečný test modelu, který je od verifikace a kalibrace zcela oddělen, a to především z pohledu použitých dat. Data musí být rozdílná nejen fyzicky, ale i typově. Pokud lze, je proces validace oddělen i personálně, tedy je prováděn jiným pracovníkem než tím, který provedl předchozí kalibraci. V případě neúspěšné validace se lze zpravidla vrátit ke kalibraci modelu a proces se opakuje. Musí se vzít v úvahu skutečnosti:

- Existuje pouze málo existujících empirických dat o chování osob v případě požáru, což omezuje počet a variabilitu validačních testů.
- Validační testy jsou závislé na technologii sběru těchto dat, jejich přesnosti a podrobnosti poskytované dokumentace.
- Schopnosti současných evakuačních modelů jsou z toho důvodu z hlediska behaviorálních vlastností omezeny.

Příklady vhodných dílčích datových sad nicméně lze v některých studiích identifikovat. Dále jsou shrnuty klíčové zdroje pro validační testy a doporučení proměnných veličin, které jsou vhodné pro validaci výsledků modelu a příslušných empirických dat.

Doba před pohybem

Srovnává se doba evakuace a vytížení únikových východů. Vhodným zdrojem je (Bayer a Rejnö, 1999).

Pohyb a navigace

Srovnává se doba evakuace. Vhodným zdrojem je (Kuligowski a Peacock, 2010).

Dostupnost východů, volby a výběru trasy

Srovnává se vytížení únikových východů. Vhodným zdrojem je (Nilsson a Johansson, 2009).

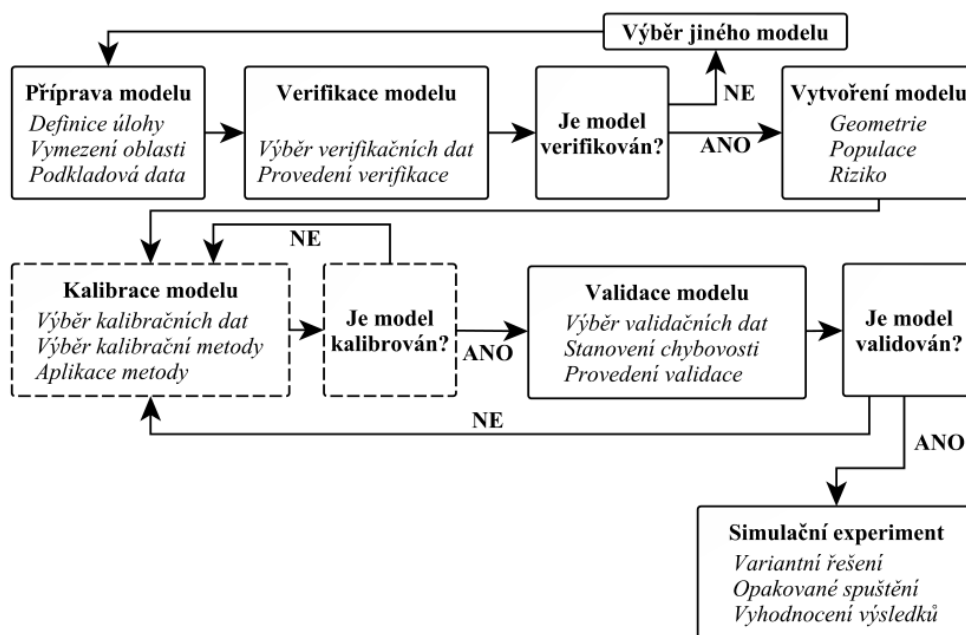
Proudění osob a jeho omezení

Srovnává se doba evakuace, rychlost pohybu a intenzitu proudění. Vhodným zdrojem je (Frantzisch, Nilssonlsson a Eriksson, 2007), (Hoogendoorn a Daamen, 2005) a (Seyfried, Rupprecht a Winkens, 2007).

Úplná validace

Srovnává se doba evakuace. Vhodným zdrojem je (Grosshandler, Bryner, a Madrzykowksi, 2005),

Proces verifikace a validace modelu se provádí samostatně, případně prokazuje verifikaci a validaci použitého nástroje již existující verifikační a validační studií. Při požadavku na prokázání ověření použitého modelu lze použít zdroje, které poskytující příslušné verifikační a validační testy.



Obrázek 4.6: Tvorba modelu od verifikace po validaci pravděpodobnostního řešení

4.3.2 Souhrnné zdroje

Na počátku snah o standardizaci procesu ověření modelu pohybu osob stojí britská směrnice IMO Guidelines 1238 (IMO, 2007), ze které částečně vychází velmi rozsáhlý německý standard RIMEA (RIMEA, 2009), paralelně s tím vznikl v USA předpis NIST Technical Note 1822 (Ronchi a Nilsson, 2013). V současnosti byla zahájena snaha o sjednocení dokumentů v rámci organizace ISO.

Směrnice Guidelines for Evacuation Analysis for New and Existing Passenger Ships (IMO, 2007) je britský předpis vydaný International Maritime Organization, který primárně slouží pro analýzu evakuace osob z velkých lodí. Obsah směrnice je podobný dokumentu RIMEA, je definována struktura evakuační analýzy a poskytuje informace o vstupních datech, reakční době a rychlosti pohybu osob. V další části jsou definovány základní evakuační scénáře pro ověření

modelů, součástí je také vzorová analýza evakuace osob z lodí o více palubách a různých počátečních hustotách osob.

Směrnice Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungs-Analysen (RIMEA, 2009) je základní dokument pro evakuační analýzy aplikovaný v Německu. Směrnice vznikla v rámci výzkumného projektu RIMEA za účasti expertů z Německa, Rakouska a Švýcarska, stejnojmenným sdružením je nadále podporována a vyvíjena stejnojmenným sdružením, které nyní zahrnuje tři desítky členů, vedle univerzitních pracovišť také některé přední soukromé společnosti. Jde o velmi komplexní směrnici, která řeší proces tvorby modelu pěších a jeho simulace v celé šíři.

Dokument The Process of Verification and Validation of Building Fire Evacuation Models (Ronchi, Nilsson a Kuligowski, 2013) aktuálně základní dokument pro verifikaci a validaci modelů evakuace osob v USA. Jeho autory jsou týmy z National Institute of Standards and Technology v USA a Lund University ve Švédsku. Dokument je méně rozsáhlý a podrobný než standard RIMEA, zaměřuje se spíše na obecnější doporučení a akceptační kritéria protokolu prokazujícího verifikaci a validaci modelu.

Rovněž probíhá intenzivní aktivita v rámci mezinárodní organizace ISO, Technical Committee 92 Fire safety, Subcommittee 4 Fire safety engineering, Working Group 7 Assessment, verification and validation of fire models and computer codes. Předpokládaným výsledkem aktivity pracovní skupiny je vznik mezinárodního obecného standardu pro verifikaci a validaci modelů evakuace a požáru. Personální složení i aktivity pracovní skupiny vycházejí z výše popsaných tří základních dílčích standardů, konečný dokument bude tyto postupy sjednocovat a rozšiřovat.

4.3.3 Ověřovací příklady

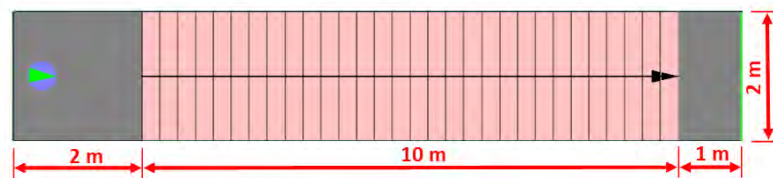
V následující kapitole jsou uvedeny vybrané ověřovací příklady. Jejich výčet je zde pouze ilustrativní, kompletní seznam lze nalézt v uvedené literatuře (Ronchi, Nilsson a Kuligowski, 2013).

Rychlost pohybu po schodech

Aplikovaná geometrie

Schodiště. Optimální rozměry: šířka $w = 2$ m, délka $l = 10$ m. Ostatní parametry schodiště v původním nastavení nástroje, viz obrázek 4.7.

Schéma



Obrázek 4.7: Geometrie úlohy rychlost pohybu po schodech

Základní scénář

Jedna osoba je umístěna na horní či spodní část schodiště. Osoba má pevně stanovenou rychlost pohybu na schodišti v obou směrech $v = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, doba před pohybem je nulová. Ostatní parametry jsou ponechány v základním nastavení daném výrobcem. Výjimkou jsou dynamické charakteristiky, které mohou negativně ovlivnit výsledek.

Rozšířený scénář

Osoba má pevně stanovenou rychlost v souladu s ČSN 73 0802 $v = 0,500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ při pohybu směrem dolů a $v = 0,417 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ při pohybu směrem nahoru. Doba před pohybem je nulová. Ostatní parametry scénáře jsou shodné se základní variantou.

Očekávaný výsledek

Osoba projde celým schodištěm v čase $t = l / v$. V případě schodiště o délce 10 m a základního scénáře je tento čas $t = 10$ s, v případě stejného schodiště a rozšířeného scénáře je tento čas $t = 20$ s pro pohyb směrem dolů a $t = 20,7$ s pro pohyb směrem nahoru.

Verifikační metoda

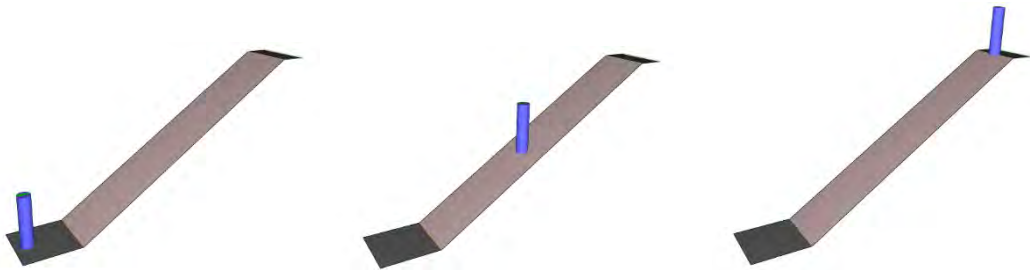
Kvantitativní verifikace. Uživatel porovnává rozdíl mezi získanou a očekávanou výslednou hodnotou testu.

Doporučení

V případě existence atypického schodiště, např. točitých schodů, je třeba tento test rozšířit také o tyto varianty. Obecně také platí, že současné modely zpravidla nejsou schopny korektně reprezentovat únavu evakuovaných osob zejména při pohybu směrem nahoru. Výsledky testu mohou být závislé na aplikované reprezentaci prostoru. V případě diskrétní sítě má na výsledek vliv orientace koridoru v prostoru, je vhodné test realizovat pro různé varianty orientace, nejméně dvě, v takovém případě s rotací 0° a 45° . Dále je vhodné provést test vlivu rozlišení sítě na získanou hodnotu, tedy analogii citlivostní analýzy.

Příklad průběhu testu

Příklad průběhu testu je na obrázku 4.8.



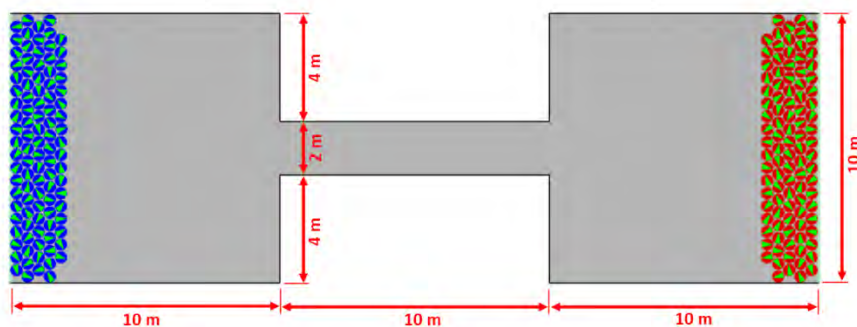
Obrázek 4.8: Průběh testu pohybu po schodech

Protisměrné proudění osob

Aplikovaná geometrie

Dvě místnosti o rozměrech 10 m a 10 m, spojené koridorem o délce 10 m a šířce 2 m, viz obrázek 4.9.

Schéma



Obrázek 4.9: Geometrie úlohy o protisměrném proudění osob

Základní scénář

Do jedné místnosti je umístěna skupina 100 osob s okamžitou reakční dobou a rychlostí chůze, které je zvolena podle typu budovy. Skupina 100 osob se přemístí z jedné místnosti do druhé, čas

je zaznamenán. Test se opakuje pro dalších 10, 50 a 100 osob ve druhé místnosti s identickými parametry jako v první místnosti. Obě populace se nyní pohybují do opačných místností koridorem, čas je zaznamenán.

Rozšířený scénář

Není stanoven.

Očekávaný výsledek

Doba pohybu osob koridorem narůstá se zvyšující se intenzitou protisměrného proudění.

Verifikační metoda

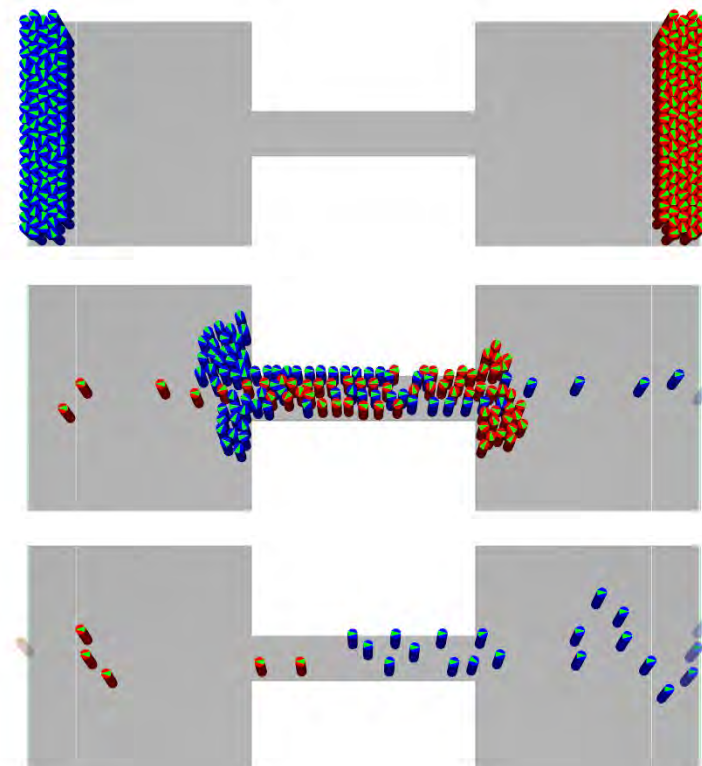
Kvalitativní verifikace. Srovnává chování modelu v pro jednotlivé intenzity protisměrného proudění.

Doporučení

Dosažené výsledky vyžadují pečlivý kvalitativní rozbor a komentář.

Příklad průběhu testu

Příklad průběhu testu je na obrázku 4.10.



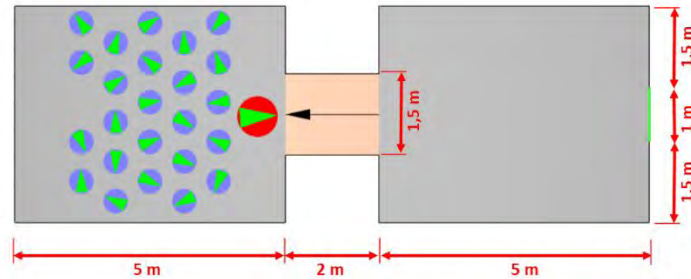
Obrázek 4.10: Průběh testu o protisměrném proudění osob

Osoby s omezenou pohyblivostí

Geometrie

Dvě místnosti o rozměrech 5 m a 4 m spojené rampou o délce 2 m a šířce 1,5 m. Ve druhé místnosti je umístěn východ, viz obrázek 4.11.

Schéma



Obrázek 4.11: Geometrie prostorů pro test s osobou s omezenou pohyblivostí

Základní scénář

Scénář 1: Místnost 1 je obsazena skupinou 24 osob s rychlostí pohybu $1,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a standardním půdorysem těla a 1 osobou s omezenou rychlostí pohybu $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v místnosti a $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v koridoru, přičemž půdorys osoby zabírá více než polovinu šířky koridoru (model osoby na kolečkovém křesle). Všechny osoby odejdou východem ve druhé místnosti.

Scénář 2: Identický test bez osoby s omezenou pohyblivostí, všech 25 osob má identické vlastnosti.

Rozšířený scénář

Není stanoven.

Očekávaný výsledek

Osoby v prvním případě dosáhnou východu za delší dobu než ve druhém případě.

Verifikace

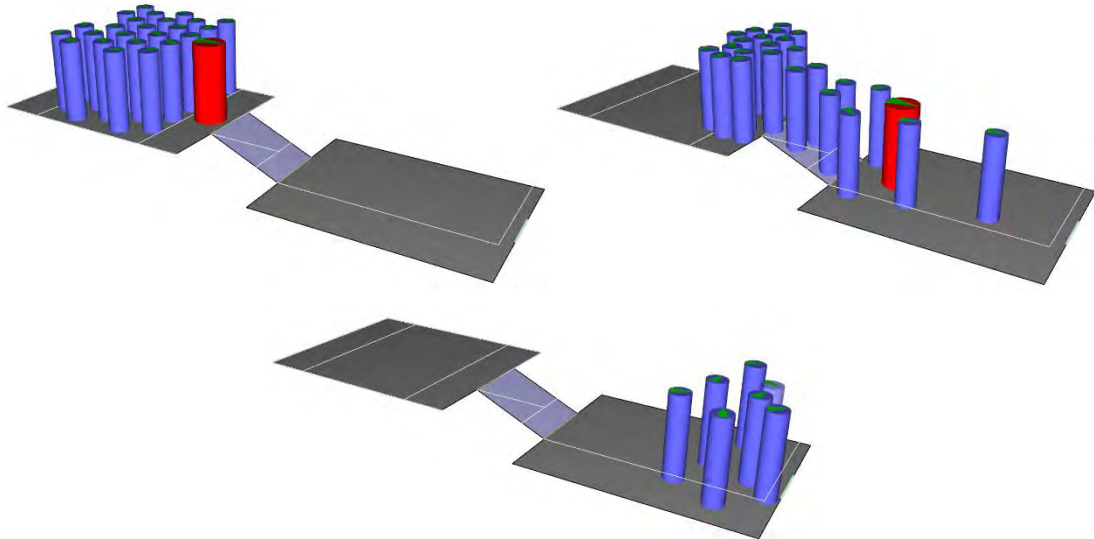
Kvalitativní verifikace. Uživatel porovnává výsledky a zjišťuje, zda má přítomnost osoby s omezenou schopností pohybu negativní vliv na výsledek modelu.

Doporučení

Test by měl být realizován s využitím vizualizace chování osob v rámci použitého nástroje. Limit 10 s není pevně stanoven, jde o optimální hodnotu vycházející z vlastností aktuálně používaných modelů.

Příklad průběhu testu

Příklad průběhu testu je na obrázku 4.12.



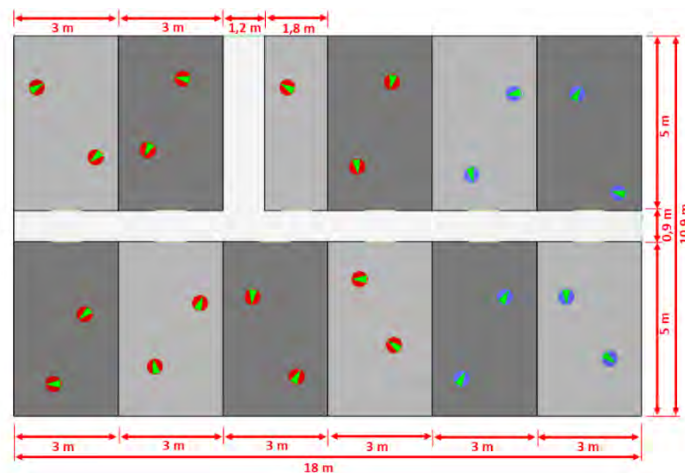
Obrázek 4.12: Průběh s osobou s omezenou pohyblivostí

Pevné přiřazení únikového východu

Aplikovaná geometrie

Dvě místnosti o rozměrech 5 m a 4 m spojené koridorem o délce 2 m a šířce 1,5 m. Ve druhé místnosti je umístěn východ, viz obrázek 4.13.

Schéma



Obrázek 4.13: Geometrie prostorů pro test s únikovým východem

Základní scénář

V místnostech jsou rozmístěny osoby podle schématu s okamžitou reakční dobou a rychlostí pohybu podle typu budovy. Osoby v místnostech 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9 a 10 jsou přiřazeny k hlavnímu východu, ostatní osoby k sekundárnímu východu.

Rozšířený scénář

Není stanoven.

Očekávaný výsledek

Osoby opustí geometrii preferovanými východy. Test ověřuje deterministické schopnosti modelu.

Verifikační metoda

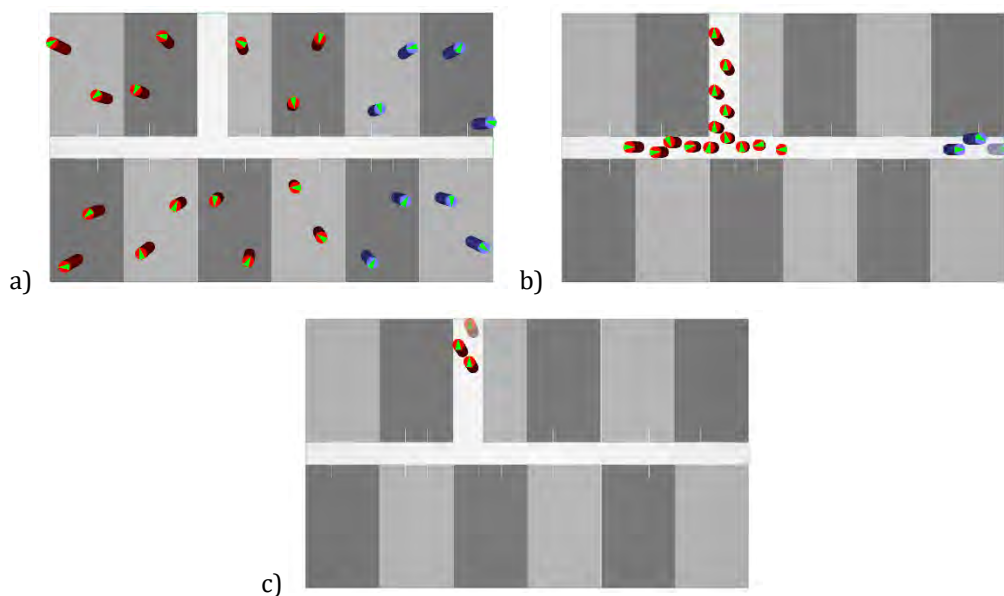
Kvalitativní verifikace. Uživatel zjišťuje, zda je model schopen reprodukovat přiřazení konkrétního východu konkrétní osobě.

Doporučení

Nejsou kladeny zvláštní požadavky. Je vhodné použít vizualizační nástroj. Uživatel modelu musí vzít v úvahu, zda jeho aplikovaný model pracuje na deterministickém nebo pravděpodobnostním principu.

Příklad průběhu testu

Příklad průběhu testu je na obrázku 4.14.



Obrázek 4.14: Vztahy mezi jednotlivými složkami evakuačního procesu

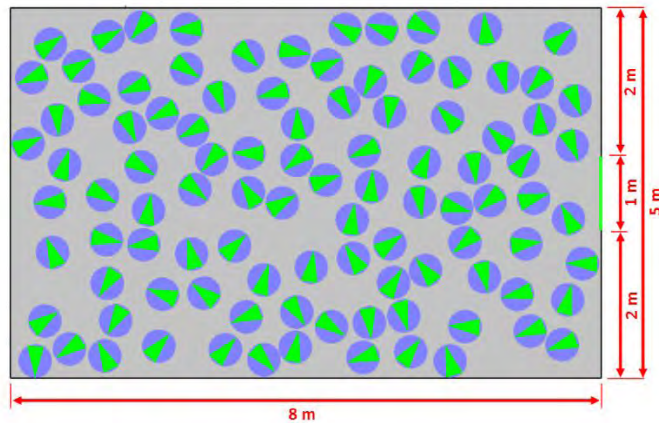
Maximální intenzita proudění osob

Aplikovaná geometrie

Místnost o rozměrech 8 m a 5 m s východem o šířce 1 m umístěným ve středu kratší strany.

Schéma

Vizualizace je na obrázku 4.15.



Obrázek 4.15: Vizualizace maximální intenzity proudění osob

Základní scénář

V místnosti je 100 osob s přiřazeným únikovým východem, který má pevně stanovenou maximální propustnost.

Rozšířený scénář

Není stanoven.

Očekávaný výsledek

Intenzita proudění osob východem nepřesáhne stanovené maximum.

Verifikační metoda

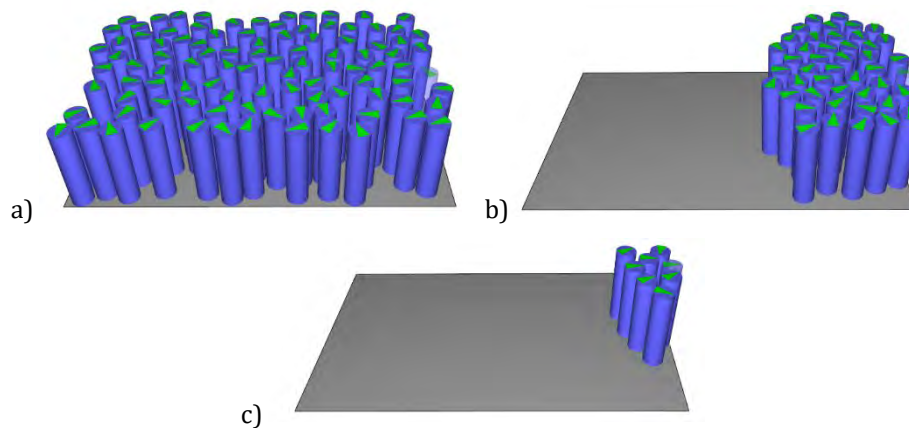
Kvantitativní verifikace. Uživatel porovnává očekávanou a stanovenou maximální hodnotu.

Doporučení

Test je citlivý na použití konkrétní sítě reprezentující prostor. Maximální doporučená hodnota intenzity při průchodu dveřmi je v tomto případě $80 \text{ osob} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$.

Příklad průběhu testu

Příklad průběhu testu je na obrázku 4.16.



Obrázek 4.16: Příklad průběhu testu intenzita proudění osob východem

4.3.4 Výsledky a jejich zpracování

Vzhledem ke statistické či přímo stochastické povaze některých klíčových parametrů pokročilých modelů evakuace je nezbytné model spouštět opakovaně a výsledky zpracovávat statisticky. Jako příklad statistických parametrů lze uvést třeba rychlost pohybu nebo reakční dobu evakuovaných osob, stochastickou povahu mají většinou neměřitelné parametry modelovaných osob, jako například asertivita, ovlivňující pořadí při průchodu dveřmi nebo změnu fronty, případně jejich rozmístění v prostoru na počátku simulace modelu.

Opakované spouštění modelu zajistí zohlednění těchto parametrů, přičemž optimální počet běhů modelu s příslušným rozmítáním parametrů představuje desítky samostatných simulací. Při statistickém zpracování výsledků se nepracuje s přesnými hodnotami, ale s těmito základními veličinami:

- střední hodnota,
- směrodatná odchylka (kvadratický průměr odchylek hodnot od jejich aritmetického průměru),
- interval spolehlivosti (pokrytí neznámé hodnoty s předem zvolenou statistikou jistotou).

Vztah mezi směrodatnou odchylkou získanou z jednotlivých běhů simulace a hledaným intervalem spolehlivosti v případě Gaussova rozdělení vyjadřuje tabulka 4.9.

Tabulka 4.9: Výpočet intervalu spolehlivosti v případě Gaussova rozdělení

Interval spolehlivosti	Násobitel směrodatné odchylky
68,2 %	1,00
80,0 %	1,28
90,0 %	1,65
95,0 %	1,96
95,4 %	2,00
98,0 %	2,33
99,0 %	2,58
99,7 %	3,00

Jako příklad lze uvést situaci, kdy se hledá hladina spolehlivosti pro celkový evakuační čas z objektu 95 %. V takovém případě při zpracování evakuačních časů jednotlivých simulací se určí střední hodnotu tohoto času T_{mean} a směrodatnou odchylku. Hladina spolehlivosti 95 % je potom vypočtena následujícím způsobem

$$T_{95} = T_{\text{mean}} + 1,65$$

Hodnota T_{95} znamená, že skutečná střední hodnota celkového evakuačního času nepřesahuje tuto hodnotu s pravděpodobností 95 %. Zjednodušeně řečeno může uživatel očekávat, že pouze 5 ze 100 běhů simulace bude nad touto hranicí.

4.4 Příklady programů

4.4.1 EXODUS

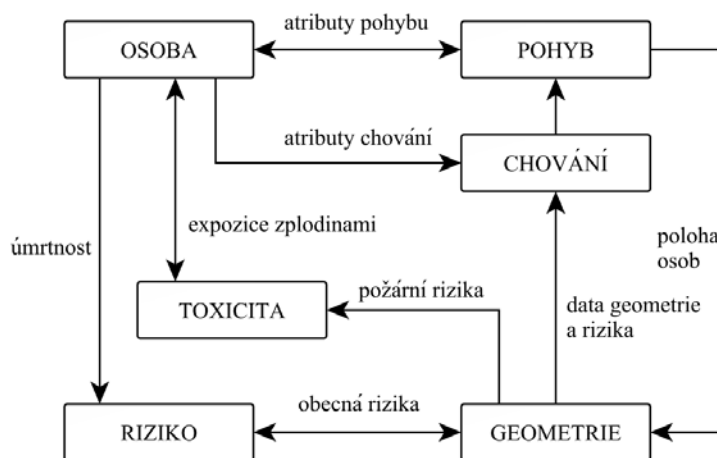
V současné době existuje více než šest desítek samostatných nástrojů pro modelování pohybu osob a jejich evakuace. Aplikace v sobě zahrnují různé modely, různé definice uzavřeného prostoru (kontinuální nebo diskrétní), odlišným způsobem definují skupiny osob (homogenní nebo skupiny samostatných osob), jejich pohyb a chování (deterministické, pravděpodobnostní, nebo jejich kombinace), apod. Většina aplikací také odráží i účel, pro který byly vytvořeny, zaměření vývojáře (inženýr, psycholog, architekt) a vývoje počítačové techniky. V této kapitole budou představeny základní nástroje, které lze považovat za nástroje referenční, a současně představují odlišné přístupy k reprezentaci evakuovaných osob a prostoru.

EXODUS je skupina nástrojů vyvíjená týmem Fire Safety Engineering Group na University of Greenwich. Obsahuje několik dílčích nástrojů, které jsou přizpůsobeny pro analýzu specifických evakuačních problémů z nestandardních objektů: airEXODUS pro evakuaci z letadel, maritimeEXODUS pro evakuaci z velkých lodí a railEXODUS pro evakuaci z vlakových souprav.

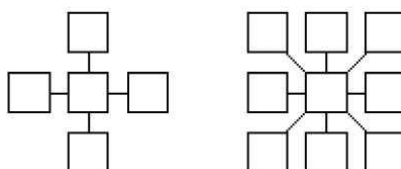
Základní aplikací v této skupině je buildingEXODUS (dále jen EXODUS), který slouží pro modelování pohybu osob a jejich evakuaci z pozemních staveb a jako jediný je dostupný pro komerční a akademickou sféru. EXODUS je použitelný v zástavbě a je vhodnou aplikací pro prakticky veškeré typy pozemních staveb nebo otevřené prostory. Exodus může být použit k ověření stavebních předpisů, hodnocení evakuačních parametrů všech typů konstrukcí a zkoumání efektivity pohybu osob v rámci těchto struktur.

Princip řešení

Nástroj pracuje se šesti základními submodely: Geometrie, Pohyb, Chování, Osoba, Riziko a Toxicita, viz obrázek 4.17.

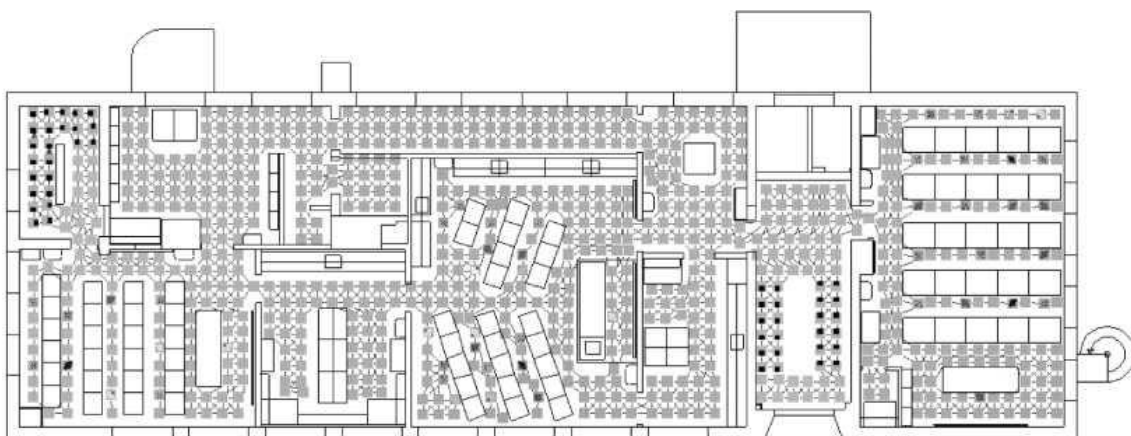


Obrázek 4.17: Propojení jednotlivých submodelů nástroje EXODUS



Obrázek 4.18 Příklad propojení uzlů spojnícemi, které definují možnosti pohybu mezi jednotlivými uzly

Model GEOMETRIE vymezuje celkový prostor pro pohyb osob, viz obrázek 4.18. Geometrii lze definovat několika způsoby. Je možné ji načíst z knihovny objektů, které jsou uživateli k dispozici, případně ji lze interaktivně konstruovat pomocí nástrojů v aplikaci, nebo ji lze importovat CAD výkres ve formátu DXF, v tom případě je ale nutné počítat s nutností řady dodatečných editačních kroků, protože pouze výjimečně importovaný výkres vyhovuje ve všech ohledech požadavkům nástroje, obrázek 4.19.



Obrázek 4.19: Příklad geometrie prostoru vyplněné sítí uzlů

Model POHYB řídí fyzický pohyb jednotlivých osob z aktuální pozice do nejvhodnějšího sousedního uzlu, případně kontroluje dobu čekání na místě v případě, takový vhodný sousední uzel není aktuálně k dispozici (příkladem mohou být fronty). Model kromě běžného pohybu vpřed zahrnuje také komplikovanější manévry, jak např. obcházení pomalejších osob rychlejšími, úkroky bokem nebo jiné úhybné manévry.

Model CHOVÁNÍ definuje chování jednotlivce v aktuální situaci na základě osobních vlastností a preferencí, výstupy jsou předávány pohybovému submodelu. Model funguje na dvou úrovních — globální a lokální. Lokální úroveň definuje reakci na situaci v bezprostředním okolí (např. existenci překážky nebo nebezpečí), globální úroveň definuje celkovou strategii jednotlivce, např. snahu opustit prostor východem nejbližším provozuschopným či nejnámějším, byť vzdálenějším.

Pohyb jednotlivce v prostoru bývá v běžných situacích řízen tzv. potenciálovou mapou. Lze si ji představit jako zvlněný terén, ve kterém se nachází modelovaná osoba. Preferovaný východ se nachází v nejnižším bodě terénu, případně nebezpečí nebo požár naopak v bodě nejvyšším. Modelovaná osoba vyhledává nejméně náročnou cestu touto potenciálovou mapou tak, aby v každém následujícím kroku přešla na uzel se stejným nebo nižším potenciálem. Na obrázek je vidět, jakým způsobem potenciálovou mapu ovlivňuje počet otevřených dveří v jednoduché čtvercové místnosti. V prvním případě je možné opustit prostor dvěma východy, v dalších případech pouze jedním, viz obrázek 4.20.



Obrázek 4.20: Pohyb jednotlivce v prostoru bývá definován potenciálovou mapou, její konkrétní podoba je ovlivněna mnoha faktory včetně způsobu propojení jednotlivých uzlů nebo počtu otevřených dveří

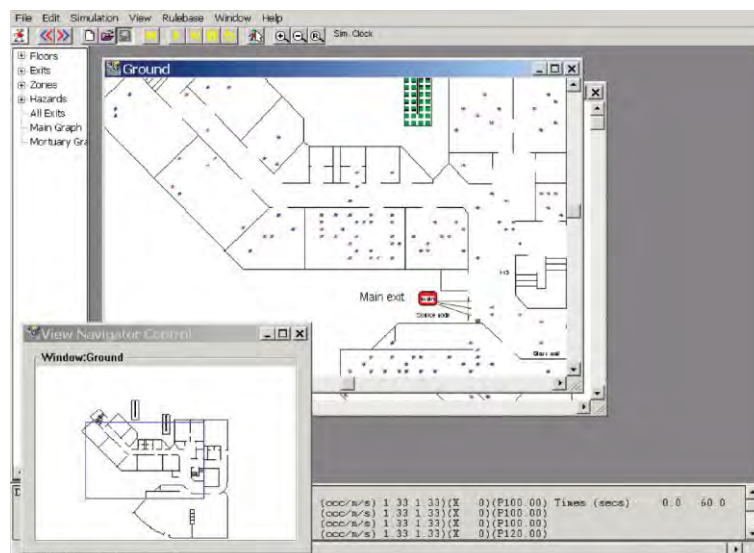
Model OSOBA popisuje jednotlivce jako sestavu definovaných pevně stanovených vlastností a proměnných hodnot, jako např. pohlaví, věk, rychlosti chůze, reakční doba apod. Některé z těchto vlastností jsou pevně stanoveny po celou dobu simulace, jiné se dynamicky mění prostřednictvím vstupů od jiných submodelů.

Model RIZIKO kontroluje fyzikální prostředí, provádí distribuci rizika v případě požáru (toxické látky, kouř, vysoká teplota) v atmosféře, kontroluje otevírání, zavírání a dostupnost únikových východů.

Model TOXICITA stanovuje účinky toxických látek produkovaných modelem RIZIKO na jednotlivé osoby. Účinky jsou zároveň vstupem do modelu CHOVÁNÍ a následně do modelu POHYB.

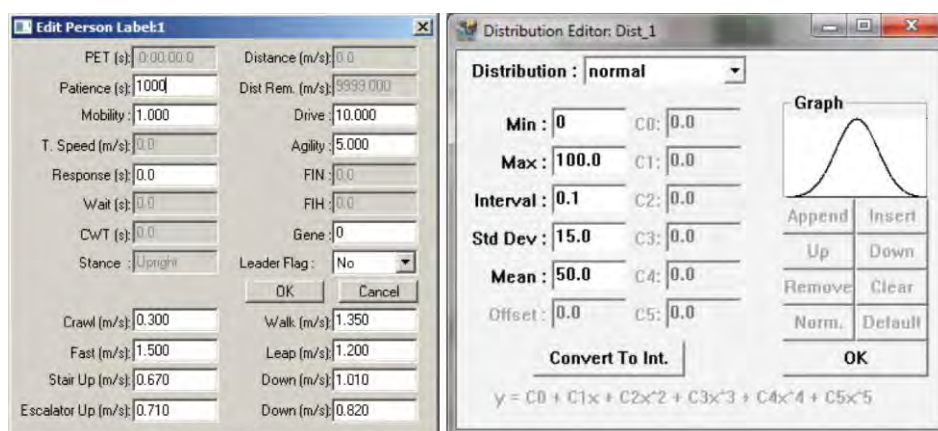
Uživatelské prostředí

EXODUS pracuje ve čtyřech základních režimech. Režim GEOMETRIE umožňuje uživateli konstrukci prostředí modelu. Je možné použít integrované nástroje a prostředí sestavit od základů samostatně, je možné využít importu existujícího CAD výkresu ve formátu DXF, případně je možné využít knihovny předdefinovaných objektů, které jsou k dispozici, viz obrázek 4.21.



Obrázek 4.21: Konstrukce geometrie v nástroji EXODUS neobsahuje téměř žádné nadbytečné vizualizační prvky, podobá se síťovému modelu

Režim POPULACE slouží pro generování modelovaných osob. Každá osoba disponuje identickou sadou parametrů, které lze definovat a sledovat jejich případné změny v průběhu simulace. Některé parametry jsou konstantní (např. věk nebo pohlaví), některé jsou dynamické a v průběhu simulace se mění v závislosti na aktuální situaci (např. prošlá vzdálenost, čas strávený evakuací, expozice škodlivinami apod.). V rámci skupiny lze také konkrétním jedincům přiřadit specifické úkoly nebo vlastnosti, jako např. znalost konkrétních východů v modelovaném prostoru. K dispozici jsou nástroje pro snadné sestavení vlastností včetně statistického rozdělení klíčových parametrů i s využitím uživatelské knihovny. Na obrázku 4.22 je příklad definice vlastností konkrétního jedince i možnost stanovení statistického rozdělení klíčových vlastností (v tomto případě reakční doby) pro celou skupinu osob.



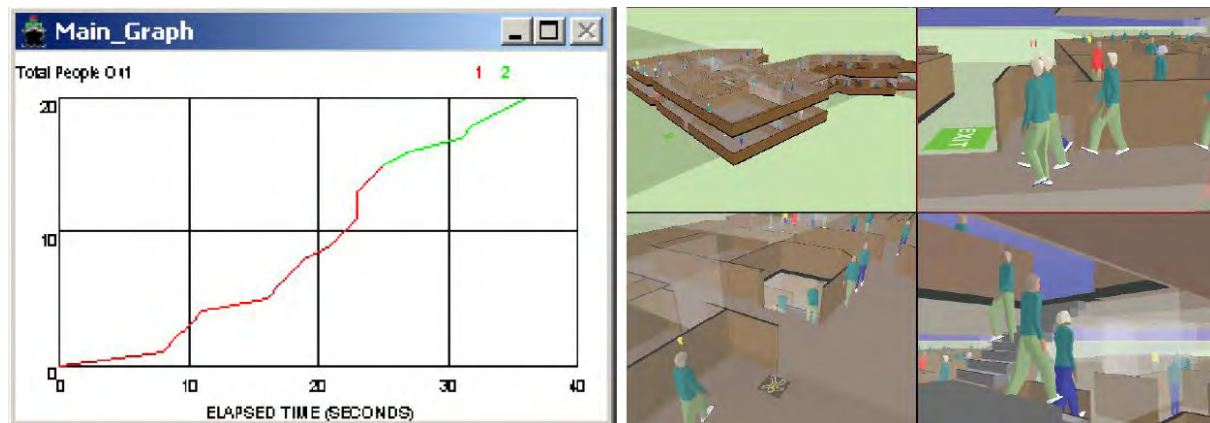
Obrázek 4.22: Definice vlastností osob v režimu Populace umožňuje editovat jednotlivce i definovat statistické rozdělení klíčových parametrů pro celou skupinu

Po nastavení vlastností evakuovaných osob přichází na řadu režim SCÉNÁŘ, který umožňuje definovat konkrétní události a kritické prvky modelu, jako například počet a vlastnosti únikových východů, doba jejich otevření, zda prostor obsahuje kouř, vysoké teploty nebo toxické látky apod. Na obrázek 4.23 je ukázka struktury definice rizika obsaženého v modelu.



Obrázek 4.23: Příklad definice rizika v modelu, které je možné specifikovat do značných podrobností

Režim SIMULACE přichází na řadu vždy jako poslední a slouží pro simulaci modelu definovaného v předchozích krocích, simulaci je možné spustit interaktivně uživatelem nebo automaticky v dávkovém režimu. Výstupy ze simulace lze znázorňovat analyticky v podobě grafů, k dispozici je pokročilá 3D vizualizace probíhající evakuace na obrázku 4.24. Výsledky se také ukládají do samostatných datových souborů pro pozdější zpracování externími nástroji.



Obrázek 4.24: Výsledek simulace je možné zobrazit formou grafu nebo využít pokročilou 3D vizualizaci probíhající evakuace

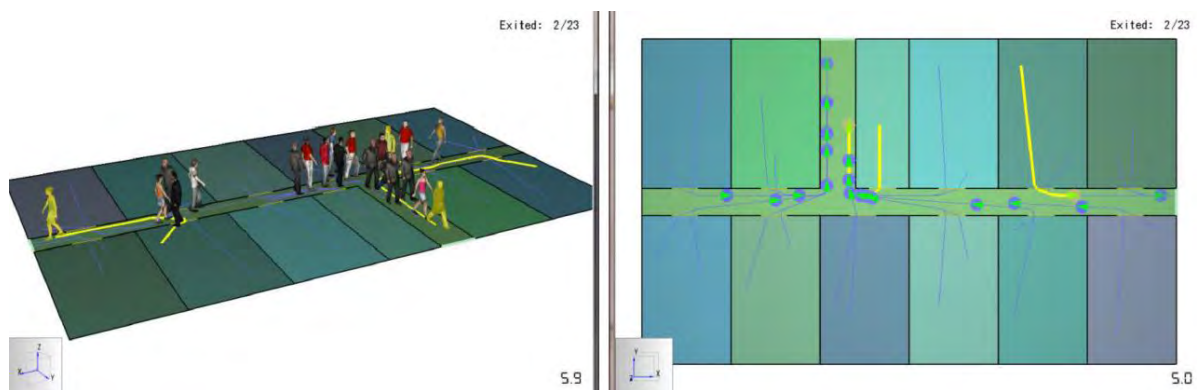
4.4.2 PATHFINDER

Pathfinder je analytický nástroj vyvíjený firmou Thunderhead Engineering, Inc. Nástroj je založen na agentní technologii, je využitelný pro simulaci evakuace i volného pohybu osob a skládá se ze

tří hlavních modulů: grafického uživatelského rozhraní pro tvorbu modelu, simulátoru pro jeho simulaci, a 3D vizualizačního nástroje.

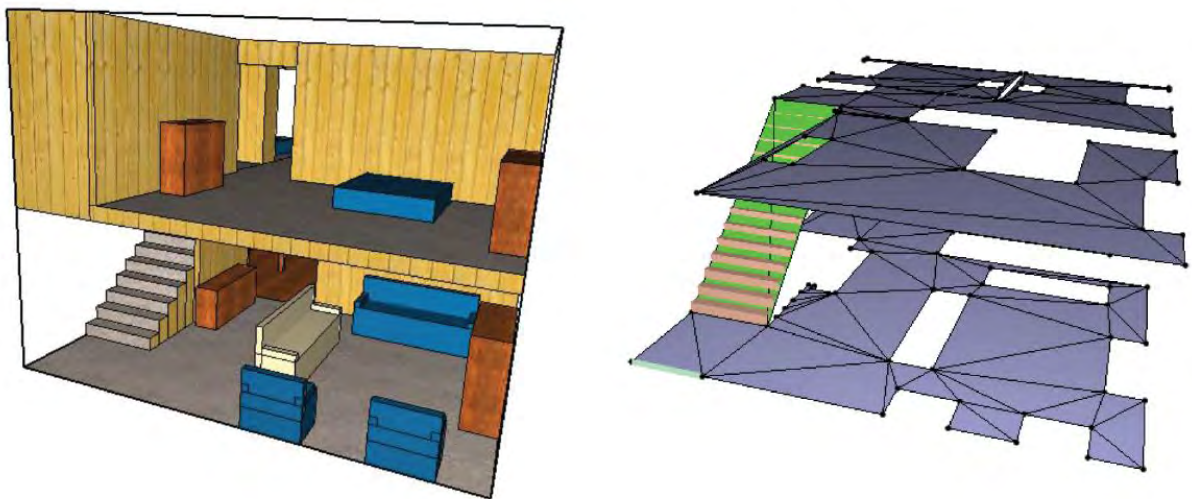
Princip řešení

Nástroj při modelování pohybu osob pracuje se dvěma základními přístupy: režimem SFPE a režimem inverzního řízení (steering). Režim SFPE vychází z konceptu založeného na modelu proudění, kdy je pohyb osob v modelu ovlivněn především hustotou osob v jednotlivých místnostech, pro pohyb osob únikovými východy je určující především jejich šířka. Přestože se tedy jedná o agentní model, jeho fundamentální principy jsou blízké makroskopickým modelům. Režim inverzního řízení předpokládá, že si každá jednotlivá osoba určí svoji trajektorii k cíli a na základě následných událostí ji průběžně přehodnocuje.



Obrázek 4.25: Srovnání chování modelovaných osob v režimu inverzního řízení (steering) a SFPE

Na obrázek 4.25 je vidět srovnání výsledků simulace pro identický problém, kdy osoby opouštějí prostor s několika místnostmi a dvěma únikovými východy. V režimu inverzního řízení opustily modelované osoby za 18 s, v případě režimu SFPE byl evakuační čas o 4 s pomalejší zejména vinou fronty, která utvořila u jednoho únikového východu. Velmi důležitou vlastností režimu SFPE je možnost vzájemného překrytí osob v prostoru zejména v místech vzniku front. To přirozeně vede k odlišným výsledkům evakuace a limituje také možnosti vizualizace. Režim inverzního řízení tak lze označit za komplexnější a obecně pokročilejší.

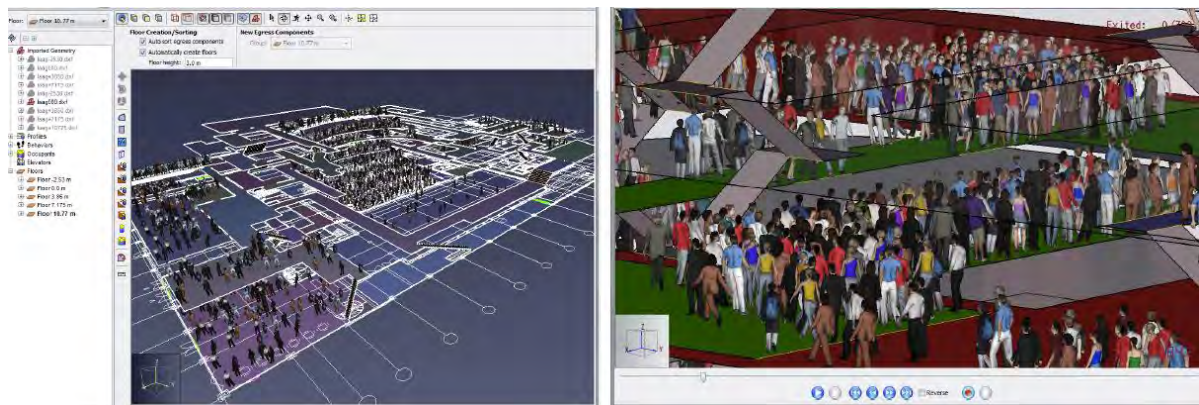


Obrázek 4.26: Příklad vytvořené navigační mřížky v nástroji Pathfinder

Tvorba geometrie modelovaného prostoru je založena na tzv. navigační mřížce (meshi). Podobně jako v případě metody konečných prvků a modelování požáru je i zde podlahová plocha rozdělena pomocí triangulační sítě. Jednotlivé prvky sítě zde mají konkrétní vlastnosti a modelované osoby se mohou přirozeně pohybovat pouze v místech, kde je tato síť definována. Příklad vytvořené navigační mřížky je na obrázku 4.26.

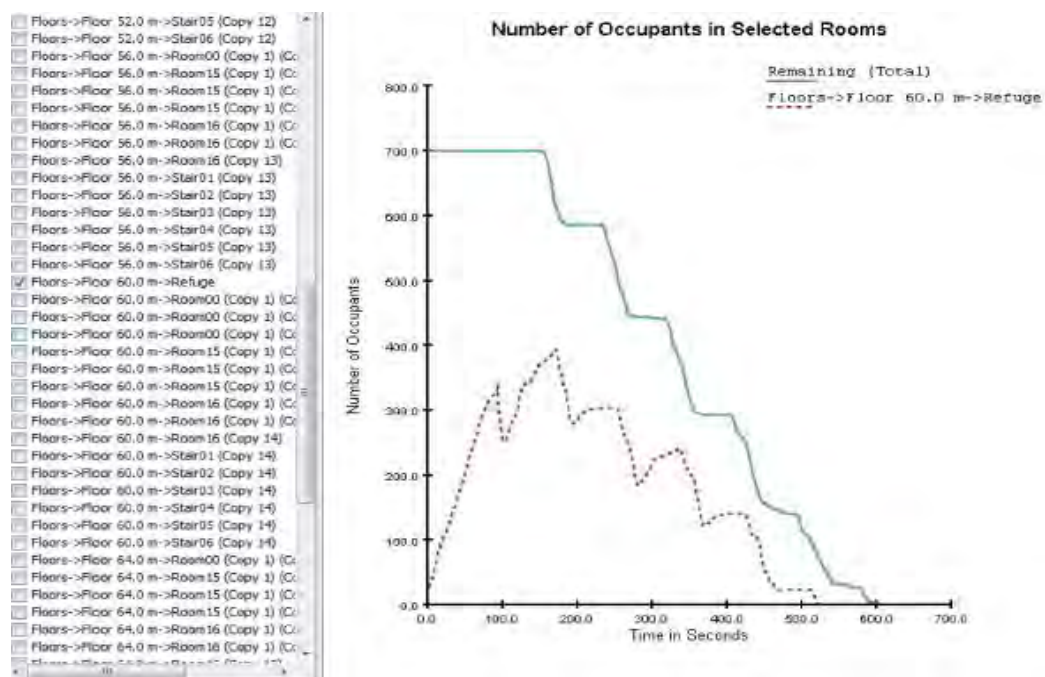
Uživatelské prostředí

Nástroj Pathfinder obsahuje grafické uživatelské rozhraní, které slouží pro vytváření modelu a jeho simulaci. Na obrázek 4.27 vlevo je zachycen model divadla obsahující přibližně 2 200 osob včetně importované čárové grafiky ve formátu DXF. V případě potřeby je možné simulaci modelu vizualizovat v pokročilém 3D režimu. Na obrázek 4.27 vpravo je zobrazen tento typ vizualizace, konkrétně se jedná o shromaždiště osob před nastoupením do výtahu. Pro lepší zobrazení lze využít průhlednosti.



Obrázek 4.27: Model divadla obsahující přibližně 2 200 osob a importovanou grafiku ve formátu DXF a vizualizace shromaždiště osob nastupujících do výtahu ve 3D s využitím transparentnosti

Kromě 3D vizualizace poskytuje nástroj Pathfinder také statistický výstup v podobě grafů, textové sumarizace výsledků a s možností exportu do formátu CSV. Na obrázek 4.28 je příklad statistického výstupu zachycující počet zachráněných osob a počet osob zůstávajících v budově a připravených k evakuaci.



Obrázek 4.28: Příklad statistického výstupu zachycující počet zachráněných osob a počet osob zůstávajících v budově a připravených k evakuaci

5 Odezva konstrukce

5.1 Modelování konstrukcí při požáru

5.1.1 Úvod

Podobně jako v ostatních oblastech požární bezpečnosti staveb lze při posuzování únosnosti konstrukcí při požáru použít pokročilé metody. Na rozdíl od zjednodušených postupů (ruční výpočet pomocí analytických vzorců, resp. výpočet pomocí tabulkových procesorů nebo přímé hodnocení pomocí tabulkových dat), které jsou uvedeny v normách, pokročilé postupy vyžadují využití specializovaných softwarových nástrojů. Řešení těchto softwarových nástrojů je založeno na metodě konečných prvků (MKP). Při posuzování požární odolnosti konstrukcí jsou tyto nástroje využívány pro modelování přestupu tepla do konstrukce, modelování rozvoje tepla v konstrukci a modelování chování konstrukce.

Pokročilý postup řešení vyžaduje zavedení odpovídajících vstupních dat a metod. Při působení požáru musí být zohledněny vlastnosti materiálů závislé na teplotě. Tepelné a mechanické vlastnosti oceli, betonu, hliníku a jiných materiálů by měly být převzaty z odpovídajících norem ČSN EN 199x-1-2 nebo z experimentů. Definované mechanické okrajové podmínky, zatížení a interakce by měly odpovídat skutečným vlastnostem analyzovaného prvku nebo konstrukce. V závislosti na typu analýzy může být mechanické zatížení reprezentováno tlaky a silami nebo předepsanými posuny. V případě potřeby mohou být časové nebo teplotně závislé okrajové podmínky reprezentovány definicemi kontaktů. Stejně tak v závislosti na uvažovaném požárním scénáři mohou být teplotní podmínky modelovány použitím různých časových a teplotně závislých okrajových podmínek včetně předepsaných teplotních polí, tepelného toku, proudění a záření, adiabatické teploty povrchu atd. Kombinace mechanického zatížení je nutné uvažovat pro mimořádné zatížení požárem dle ČSN EN 1990. Model konstrukčního systému pro globální analýzu za zvýšených teplot by měl co nejlépe vystihovat očekávané chování řešeného systému.

Posouzení odolnosti konstrukce při požáru je možné provést na prvku, části konstrukce či celé konstrukci. Zjednodušené postupy se zpravidla provádějí na prvcích, celá konstrukce se naopak posuzuje pomocí komplexního numerického modelu. Velikost modelu konstrukce (prvek, část či celá konstrukce) je vybírána tak, aby co nejlépe vystihovala očekávané chování konstrukce.

Ověření požární odolnosti lze provést z hlediska času, únosnosti a teploty, viz ČSN EN 1991-1-2. Ověření z hlediska času, tj. požadovaná požární odolnost je menší než čas do porušení, nejlépe dokládá rezervy ve spolehlivosti konstrukce. Vyžaduje ale přímé řešení, které je vhodné pouze pro jednoduché výpočty. Pro složitější výpočty je nejvhodnější ověření únosnosti při

požadované požární odolnosti. Při výpočtu se ověřuje, že po příslušnou dobu trvání požáru je splněna únosnost a stabilita konstrukce.

5.1.2 Typy modelů a jejich vstupy

Pro posouzení chování konstrukcí při požáru jsou využívány modely teplotní, modely konstrukční a modely sdružené.

Teplotní model řeší přestup tepla z okolního prostředí do konstrukce nebo její části a vedení tepla uvnitř materiálu konstrukce. Takový model bývá zpravidla co nejjednodušší. Většinou se jedná o dvourozměrný model průřezu části konstrukce. Průřez musí mít definovaný materiál včetně jeho tepelně technických charakteristik. Na hranici průřezu je nutné předepsat teplotu plynu/tepelný tok/adiabatickou teplotu povrchu, která na konstrukci působí. Některé softwarové nástroje vyžadují zadání koeficientů přestupu tepla. K samotnému řešení je nutné model doplnit výpočetní sítí, stanovit výpočetní krok a výpočetní čas. Výsledky bývají zaznamenány v textových souborech, které je možné číst a zobrazovat pomocí post-procesorů nebo je využít do konstrukčních modelů.

Konstrukční model řeší mechanickou analýzu konstrukce nebo její části. Model zpravidla zahrnuje tak velkou část konstrukce, aby provedená analýza co nejlépe vystihovala očekávané chování konstrukce. Pokud je použit model části konstrukce, okrajové podmínky by měly odpovídat vnitřním silám a podepření vycházející z celé konstrukce. Modely mohou být tvořeny z různých typů prvků – prutových, deskových, desko-stěnových nebo objemových prvků. Volbě typu prvku a volbě sítě modelu by měla být věnována zvláštní pozornost. Ovlivňují totiž přesnost výsledků. Zvolený prvek sítě (lineární, kvadratický nebo vyšší) úzce souvisí se zvolenou hustotou sítě a metodou řešení. Použití prvků vyššího řádu umožňuje nasazení větších velikostí prvků, což může poskytnout podobnou nebo lepší aproximaci studovaného konstrukčního chování. Vybrané konečné prvky by se měly vztahovat ke zkoumanému konstrukčnímu chování (pokud jde o velikost průhybů, napětí a pootočení), zvolené metodě analýzy (lineární nebo nelineární) a materiálovým vlastnostem (lineární nebo nelineární). Sít i volba typu prvku by rovněž měly umožňovat modelování imperfekcí. Konstrukční model rovněž zahrnuje mechanické chování materiálů. Vlastnosti materiálů se uvažují podle materiálových norem ČSN EN 199X-1-2 nebo z materiálových zkoušek za zvýšené teploty. V závislosti na typu analýzy, tj. lineární nebo nelineární, a požadavcích na přesnost lze použít různé modely chování materiálu: a) lineární elastický – dokonale plastický materiál bez zpevnění, b) lineární elastický – dokonale plastický materiál se zpevněním, c) lineární elastický – nelineární model zpevnění materiálu založený na skutečné křivce napětí-deformace. Do konstrukčního modelu se zavádí veškerá zatížení, která mohou v průběhu životnosti na konstrukci působit. Aplikují se zatěžovací stavy včetně součinitelů zatížení a volené kombinace zatížení. Zvláštní pozornost se věnuje mimořádným kombinacím

zatížení konstrukce vystavené požáru. Dále model zahrnuje imperfekce, které zohledňují geometrické odchylky od dokonalého tvaru, zbytkových napětí a nedokonalostí v okrajových podmínkách, např. podepření.

Některé softwarové nástroje sdružují všechny části analýzy konstrukce vystavené účinkům požáru – model požáru, výpočet přestupu tepla do konstrukce a posouzení mechanické odezvy konstrukce. Takové modely jsou nazývány sduženými modely. Většina obecných multifyzikální softwarových nástrojů sdružuje výpočet přestupu tepla do konstrukce a posouzení mechanické odezvy konstrukce. Výpočet teploty plynu bývá častěji řešen odděleně. V tomto případě je vhodné dbát na shodnou úroveň řešení všech částí výpočtu.

5.1.3 Volba modelu

Pro modelování chování konstrukcí při požáru existují různé metody a přístupy s odlišným stupněm sofistikovanosti. Výpočet může být proveden: ručně, pomocí výpočetního programu nebo kombinací obou metod.

Pro modelování je třeba vybrat vhodný softwarový nástroj. Každý nástroj má svou specifickou oblast využití. Některé softwarové nástroje řeší přestup tepla do konstrukcí odděleně od mechanické analýzy. Jiné mají obě části propojeny. Existují i softwary sdružující všechny části analýzy konstrukce vystavené účinkům požáru – model teplotního pole, výpočet přestupu tepla do konstrukce a posouzení mechanické odezvy konstrukce. Před aplikací softwaru na řešený problém musí uživatel ověřit, zda model vybraný pro analýzu konstrukce, prvku nebo globální, vypovídá o chování řešeného problému z hlediska: typu analýzy a metody řešení, geometrie, teplotně závislých vlastností materiálu, mechanických okrajových podmínek a zatížení, a teplotních okrajových podmínek. Zvláště je třeba prověřit vhodnost volené globální analýzy, tj. statického modelu. Dále je nutné ověřit, zda je software na daný problém validován. Informace o oblasti použití softwaru a jeho validaci jsou uvedeny v dokumentaci každého softwaru. Uživatel by měl vždy používat aktuální verzi softwaru, která je dostupná.

Základní výčet MKP modelů, které jsou vhodné k modelování konstrukcí vystavených požáru, je uveden v tabulce 5.1. Výběr softwarových nástrojů je proveden na základě četnosti používání, jejich aktuálnosti, vývoji a technické podpory. Nejedná se o úplný výčet nástrojů (Wald, 2017).

Podle požadavků na výsledky je možné posouzení provést na prvku, části konstrukce či celé konstrukci. Zjednodušené postupy se zpravidla provádějí na prvcích, celá konstrukce se naopak posuzuje pomocí komplexního numerického modelu. Velikost modelu konstrukce (prvek, část či celá konstrukce) je vybírána tak, aby co nejlépe vystihovala očekávané chování konstrukce.

Volba vhodného modelu pro analýzu konstrukce je úzce propojena se způsobem výpočtu teplotního účinku na konstrukci a teplotního pole v okolí konstrukce. Pokud je pro stanovení teploty plynu v okolí konstrukce použit zjednodušený model, přesnost vysoce komplexní numerické analýzy chování konstrukce je tímto ovlivněna. Při volbě vysoce pokročilých modelů konstrukce pomocí výpočetních softwarů je proto vhodné použít ke stanovení teplotního účinku na konstrukci i pokročilý model požáru.

Tabulka 5.1: Výčet vybraných softwarových nástrojů k modelování konstrukcí vystavených požáru

Modely konstrukcí vystavené požáru, aktivně podporované	
Název	Stručný popis, odkaz
ANSYS Mechanical	Obecný nelineární multifyzikální program nabízí analýzu konstrukcí a termodynamickou analýzu a řešení dalších otázek. Poskytuje úplný popis chování prvků, materiálové modely a řešení rovnic pro širokou škálu mechanických konstrukčních otázek, tepelnou analýzu a sdružené fyzikální úkoly zahrnující termo-konstrukční a termo-elektrickou analýzu. Analyzovat lze po částech nebo pomocí jedné analýzy. https://www.ansys.com/ .
Abaqus	Obecný software pro analýzu konečných prvků. Poskytuje funkce vícefázového modelování, jako jsou sdružené modely akusticko-konstrukční, piezoelektrické a konstrukční vlastnosti. Má rozsáhlou řadu materiálových modelů, https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/ (ABAQUS, 2009)
SAFIR	Program modeluje chování stavebních objektů vystavených požáru. Konstrukce lze vytvořit z prutových prvků, jako jsou nosníky a sloupy, ve spojení s rovinnými prvky, jako jsou desky a stěny. Objemové prvky mohou být použity pro analýzu detailů v konstrukci jako jsou spoje. Využívá pre-processor GiD, https://www.uee.uliege.be/cms/c_2383458/en/safir (Franssen, 2005)
Vulcan	Konečně prvkový program, kterým lze modelovat globální 3D chování ocelobetonových a ocelových budov za požáru. Zahrnuje geometrickou a materiálovou nelinearitu prutových, sloupových a deskových prvků s plným membránovým působením v deskách. Pracovní diagramy a tepelné vlastnosti oceli a betonu jsou zahrnuty jako funkce teploty s rovnoměrným nebo nerovnoměrným teplotním rozdělením. Program Vulcan byl vyvinut pro analýzu chování budovy při požáru. Odlišuje se od tradičních komerčních balíčků FEA jednoduchostí a rychlostí použití, http://www.vulcan-solutions.com/ (Huang a kol, 1999).
ATENA	Program pro analýzu konstrukcí konečnými prvky. Byl připraven přednostně pro simulaci chování betonových a drátkobetonových konstrukcí včetně praskání, drcení a vyztužování betonu, https://www.cervenka.cz/products/atena/ .

5.2 Ověřování modelů konstrukcí

5.2.1 Způsoby ověření

Základem bezchybných a spolehlivých výsledků při hodnocení požární bezpečnosti staveb pokročilými modely je správné použití principů validace a verifikace (ASME, 2012). V některých

oblastech modelování se využívá rovněž kalibrace. Např. v nastavení materiálových modelů určitého softwaru pomocí experimentálních výsledků (doporučeno pouze pokročilé uživatele) nebo v modelech evakuace. Kalibrace vstupů nesmí být zneužita k úpravě výsledků.

Verifikace využívá srovnání výpočetních řešení s vysoce přesnými (analytickými nebo numerickými) referenčními řešeními a mezi sebou. Vybraná referenční řešení, tzv. verifikační příklady (benchmark cases). v oblasti modelování konstrukcí při požáru jsou uvedena v této kapitole. Verifikační příklad je zpravidla jednoduchý, detailně popsáný, obsahuje vstupy i výstupy příkladu, umožňuje opakovatelnost se shodnými výsledky. Nejvyššího stupně ověření lze dosáhnout, pokud proces verifikace zahrnuje studii citlivosti sítě, která prokáže asymptotickou konvergenci výsledků.

K rychlému ověření správného postupu při modelování chování konstrukcí pomocí pokročilých softwarových nástrojů slouží tzv. check-list. Check-list je seznam bodů, které by měl uživatel softwaru projít a zodpovědět si, zda je neopomněl, splnil či se nad nimi alespoň zamyslel. Otázkami v jednotlivých bodech check-list pokrývá kontrolu vybrané metody, resp. softwarového nástroje, kontrolu vstupních dat výpočtu a kontrolu kvality záznamu výpočtu.

5.1.1 Kontrolní seznam

Seznam slouží ke kontrole správného postupu při modelování chování konstrukcí pomocí pokročilých softwarových nástrojů. Seznam pokrývá kontrolu vstupních dat výpočtu a kontrolu kvality záznamu výpočtu. Jednotlivé body seznamu nelze plošně aplikovat na všechny druhy softwarů.

Zvolená metoda a výběr nástroje

- Jaká je zvolená metoda výpočtu (výpočet teploty okolí, přestupu tepla a mechanického chování konstrukce) a proč je vybrán konkrétní softwarový nástroj?
- Je definován vybraný softwarový nástroj včetně čísla verze softwaru?
- Odpovídá vybraný model konstrukce úrovni ostatních částí posouzení (modelu teplotního účinku)?
- Je vybraný výpočetní program vhodný pro řešený problém? Je softwarový nástroj na danou oblast validován?
- Jaké jsou okrajové podmínky použitého softwaru?

Předpoklady numerického modelu

- Jsou uvedeny veškeré předpoklady modelu?
- Je vybraný statický model vhodný?
- Vystihuje zvolená velikost modelu konstrukce (prvek, část či celá konstrukce) očekávané chování konstrukce?

Zohledňuje vybraný typ analýzy očekávané chování konstrukce (lineární, nelineární)? Geometrie

- Je správně zadána geometrie konstrukce?
- Jsou zadány veškeré průřezy konstrukcí?
- Jsou zadány veškeré materiály?
- Je materiálový model dostatečný pro zvolený typ analýzy (popis mechanických i tepelně technických vlastností)?
- Jsou zavedeny imperfekce konstrukce?
- Je konstrukce správně podepřena?

Zatížení

- Je konstrukce správně zatížena (mechanické i teplotní zatížení)?
- Jsou zavedeny vhodné kombinace zatížení?
- Je uvažováno se správnými kombinačními součiniteli?
- Numerická síť a vlastnosti výpočtu:
- Obsahuje model numerickou síť?
- Jaký typ prvku je zvolen?
- Je vhodně zvolen zatěžovací krok výpočtu?

Ostatní

- Jsou definovány veškeré okrajové podmínky (počáteční teplota, vlhkost)?
- Je v modelu uvažováno s aktivními prvky požární bezpečnosti ovlivňující konstrukci (chlazení konstrukce)?

Výsledky a vyhodnocení

- Byla provedena citlivostní studie na vstupy s velkým vlivem na výsledky?
- Jsou definována kritéria selhání konstrukce?
- Jsou posouzeny veškeré relevantní mezní stavy?
- Jsou zadány všechny potřebné výstupy?
- Jsou výsledky výpočtu zpracovány přehledně v grafech, obrázcích i numericky?
- Jsou výsledky dostatečně popsány?
- Jsou výsledky výpočtu relevantní? Je zhodnocena jejich přesnost?
- Je uvedena veškerá použitá literatura?

5.3 Verifikační příklady

5.3.1 Chování ocelového nosníku při požáru

Příklad uvádí výpočet mechanického chování ocelového nosníku při požáru v softwaru VULCAN. Výpočet je předveden v pěti variantách lišících se způsobem uložení nosníku a zatížením teplotou. Ve všech případech je nosník zatížen spojitým mechanickým zatížením a teplotou.

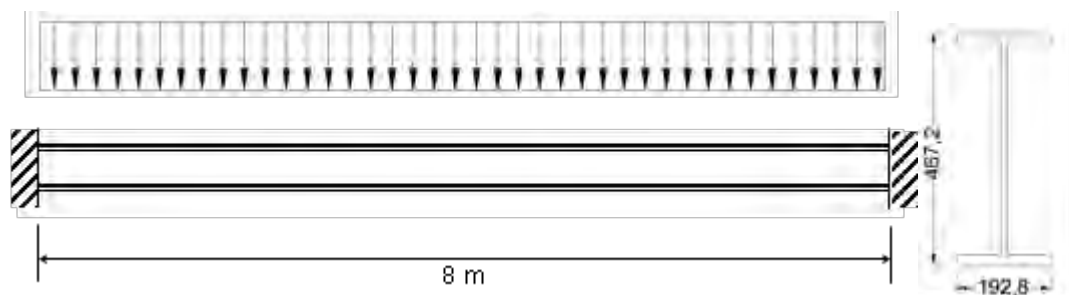
Popis konstrukce

Ocelový nosník průřezu UB 457x191x98, třídy oceli S355 a délky 8 m je vystaven rovnoměrně rozloženému zatížení o velikosti 20 kN/m. Nosník je po celé své délce vystaven požáru ze tří stran. Účinky požáru jsou modelovány pomocí normové teplotní křivky a pomocí parametrické teplotní křivky. Rozložení teploty po průřezu ocelového nosníku je uvažováno jako nerovnoměrné – zohledňuje uložení betonové desky na horní pásnici nosníku.

Výpočet byl proveden v 5 variantách, které se liší způsobem uložení nosníku a zatížením teplotou, viz tabulku 5.2. Délka nosníku (L) a mechanické zatížení (q) se u těchto variant nemění, viz obrázky 5.1, 5.2 a 5.3.

Tabulka 5.2: Varianty výpočtů ocelového nosníku v programu VULCAN

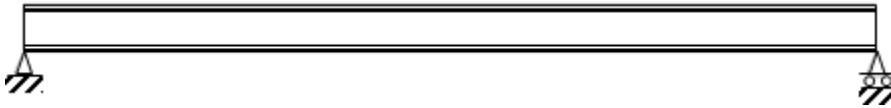
Teplota plynu	Označ.	Popis	
Nominální normová teplotní křivka	BMS_1	Vetknutý ocelový nosník	
	BMS_2	Kloubově uložený ocelový nosník	
	BMS_3	Prostě uložený ocelový nosník	
Parametrická teplotní křivka	BMS_8	BMS_8A	Prostě uložený ocelový nosník, parametrická teplotní křivka A
		BMS_8B	Prostě uložený ocelový nosník, parametrická teplotní křivka B



Obrázek 5.1: BMS_1 Vetknutý ocelový nosník



Obrázek 5.2: BMS_2 Kloubově uložený ocelový nosník



Obrázek 5.3: BMS_3 Prostě uložený ocelový nosník

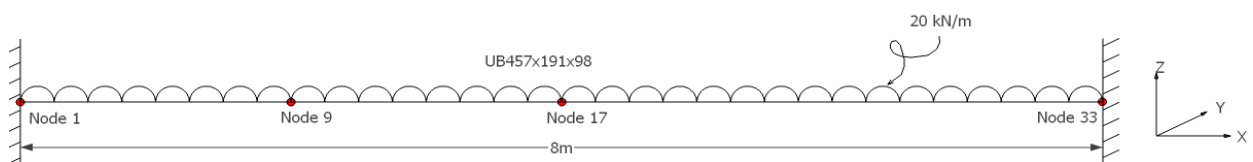
Numerický model

Software a parametry výpočtu

Výpočet byl proveden pomocí programu VULCAN. Celkový čas výpočtu je 90 min. Časový krok výpočtu je 1 min. Limitní počet iterací je ve výpočtu omezen na 200. Zatížení je navyšováno v deseti krocích. Tolerance vypočtené hodnoty v následujícím časovém kroku je 0,001.

Geometrie a materiály

Nosník o délce 8 m je vytvořen z 32 elementů typu Beam. Okrajové body elementů jsou vzdáleny 0,25 m, viz obrázek 5.4. Nosníku je přiřazen průřez o rozměrech odpovídající průřezu UB 457x191x98. Mechanické vlastnosti materiálu nosníku (ocel třídy S355) jsou v modelu zavedeny podle ČSN EN 1993-1-1. Mez kluzu je 355 MPa, modul pružnosti 210 000 MPa a Poissonovo číslo 0,3. Vliv zvýšené teploty na materiál je zaveden rovněž podle ČSN EN 1993-1-2. Vliv tečení je ve výpočtu zanedbán. Seznam výpočtů s detaily materiálů, zatížení a okrajových podmínek je uveden v tabulce 5.3.



Obrázek 5.4: Model nosníku s vetknutými koncovými body

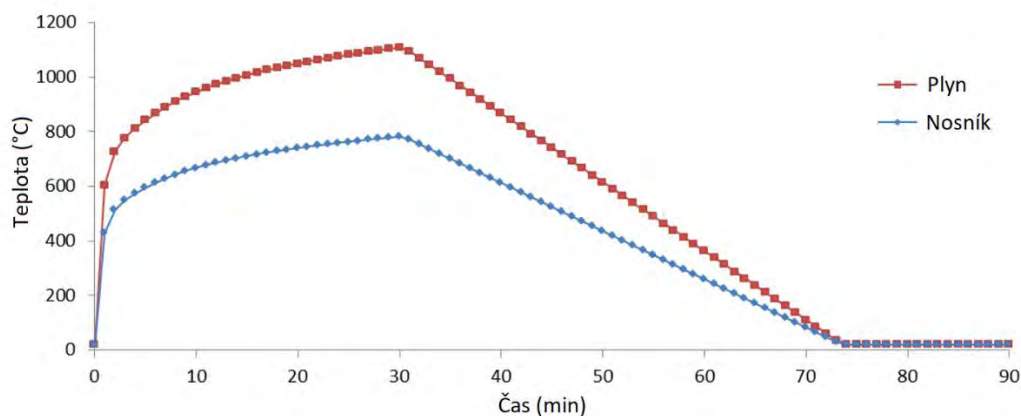
Tabulka 5.3: Detaily provedených analýz ocelových nosníků v programu VULCAN

Název	Mechanické vlastnosti materiálu	Mechanické zatížení [kN/m]	Zatížení teplotou	Teplotní vlastnosti materiálu	Tečení	Okrajové podmínky
BMS_1	EN1993-1-3	20	Normová teplotní křivka	EN1993-1-3	NE	Vetknutý
BMS_2	EN1993-1-3	20	Normová teplotní křivka	EN1993-1-3	NE	Kloubově uložený
BMS_3	EN1993-1-3	20	Normová teplotní křivka	EN1993-1-3	NE	Prostě podepřený
BMS_8A	EN1993-1-3	20	Parametrická teplotní křivka A	EN1993-1-3	NE	Kloubově uložený
BMS_8B	EN1993-1-3	20	Parametrická teplotní křivka B	EN1993-1-3	NE	Kloubově uložený

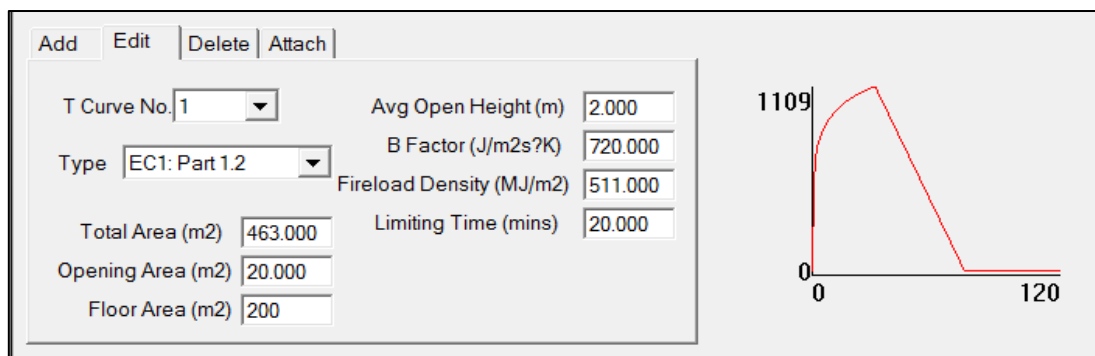
Zatížení

Mechanické zatížení nosníku odpovídá rovnoměrně rozloženému zatížení o velikosti 20 kN/m.

Nosník je po celé své délce vystaven požáru ze 3 stran. Účinky požáru jsou modelovány pomocí normové teplotní křivky a pomocí parametrické teplotní křivky, viz ČSN EN 1991-1-2:2006. Parametrická křivka je aplikována ve dvou variantách simulující požár v úseku o podlahové ploše 200 m² (varianta A) a požár v úseku o podlahové ploše 100 m² (varianta B), viz obrázek 5.5 a 5.7. Způsob zadání teplotních křivek v softwaru je vidět na obrázku 5.6 a 5.8.

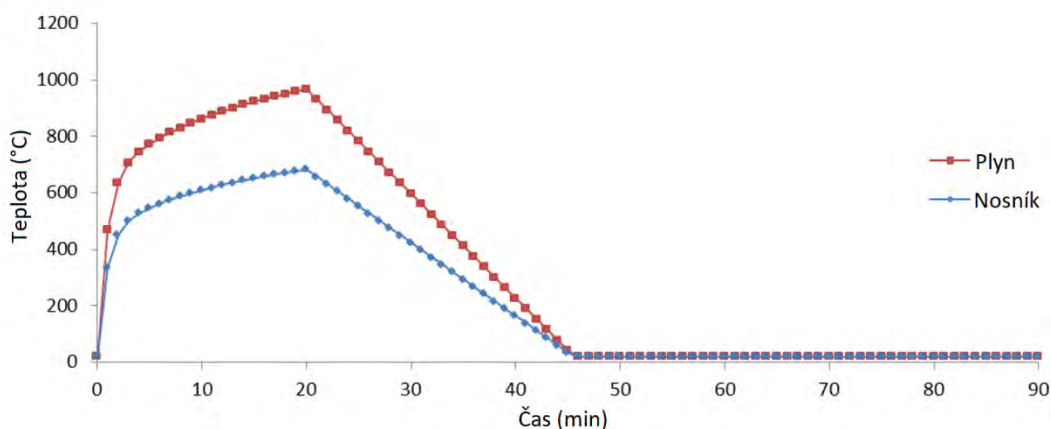


Obrázek 5.5: Teplota plynu a nosníku (Parametrická teplotní křivka A)

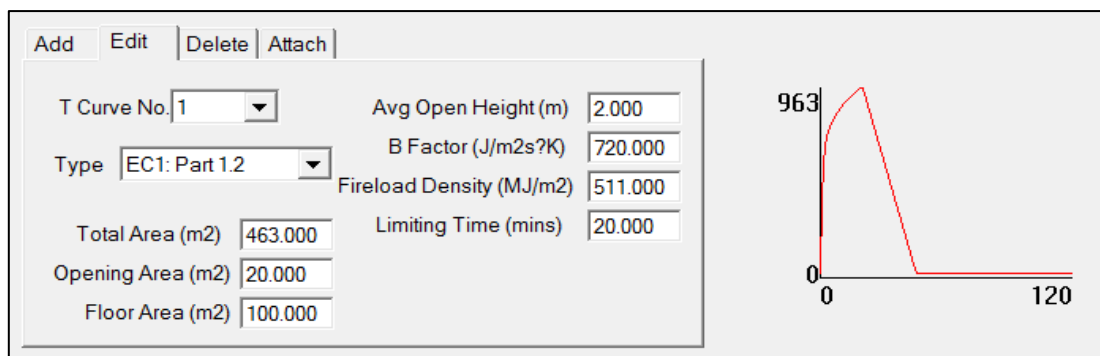


Obrázek 5.6: Zadání parametrické teplotní křivky A v softwaru

Rozložení teploty po průřezu ocelového nosníku je uvažováno jako nerovnoměrné. V modelu není počítán přestup tepla z plynu do konstrukce. Teplota konstrukce je předepsána pomocí procentuálního podílu teploty plynu pro horní pásnici, stojinu a spodní pásnici. V případě, že horní pásnice podpírá betonovou stropní desku, je uvažováno s teplotou ocelové pásnice o max. velikosti 60 % teploty plynu. Teplota stojiny a spodní pásnice je předepsána jako 70 % teploty plynu. Na obrázku 5.9a je znázorněna závislost teploty plynu na čase a teploty částí ocelového průřezu při aplikaci normové teplotní křivky. Na obrázku 5.9b je znázorněno rozložení teploty po průřezu.



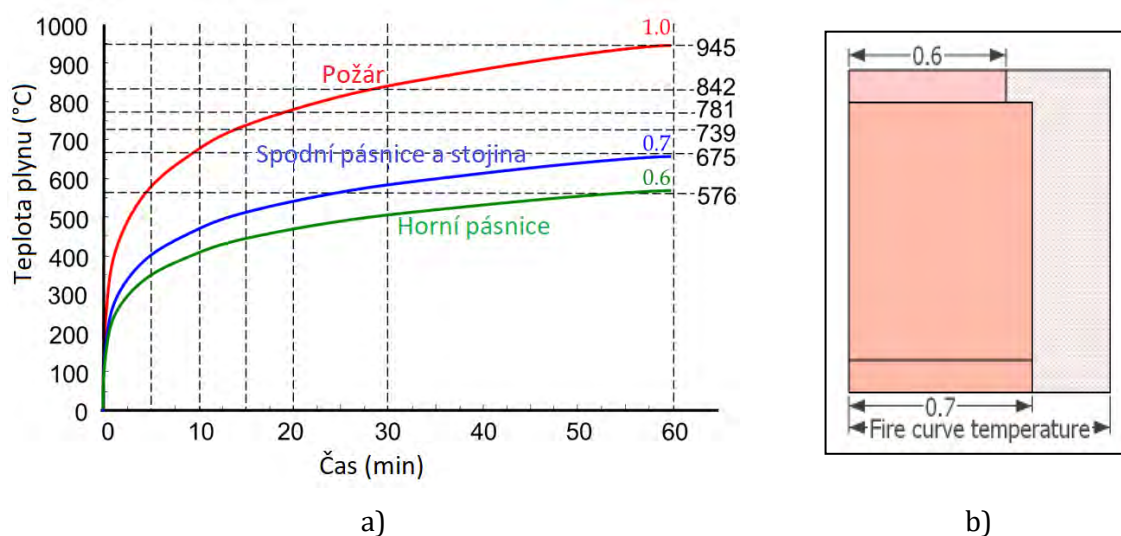
Obrázek 5.7: Teplota plynu a nosníku (Parametrická teplotní křivka B)



Obrázek 5.8: Zadání parametrická teplotní křivky A v softwaru

Okrajové podmínky

Nosník je modelován v několika variantách, které se liší způsobem uložení, viz tabulka 5.2 a 5.3. Vetknuté koncové body mají zabráněno posunu i pootočení ve všech směrech. Vnitřní body mají zabráněno posunu v ose Y (z roviny nosníku) a pootočení v e směrech X, Z. Koncové body kloubově uloženého nosníku mají zabráněno posunu ve směru X, Y, Z a pootočení ve směru X, Z. Koncové body prostě uloženého nosníku mají zabráněno posunu ve směru X, Y, Z (jeden bod) a Y, Z (druhý bod) a zabráněno pootočení ve směru X, Z.



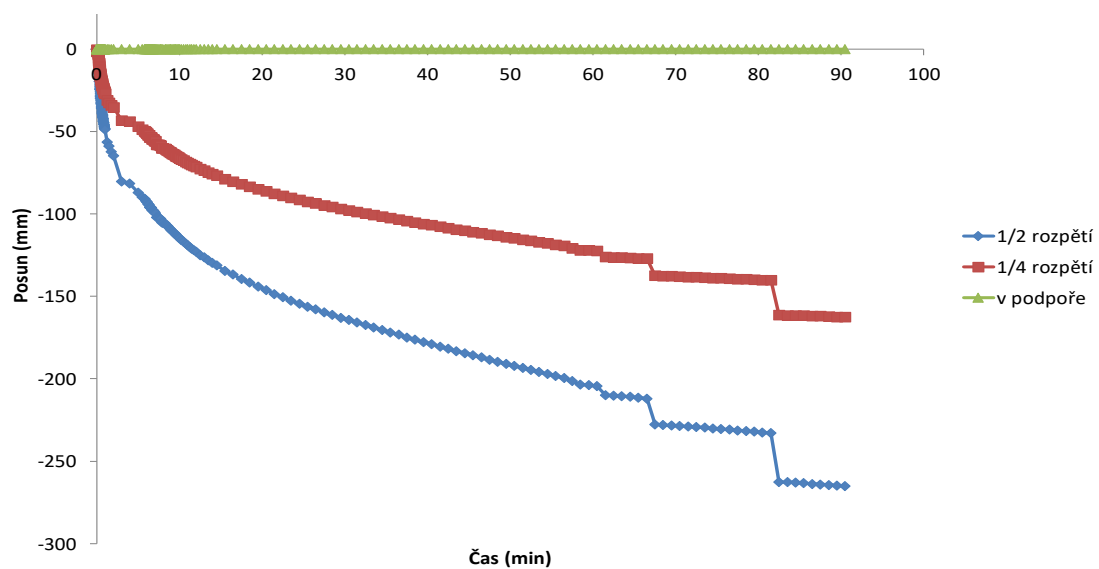
Obrázek 5.9: a) Závislost teploty plynu a částí nosníku na čase; b) Rozložení teploty po průřezu

Výstupy

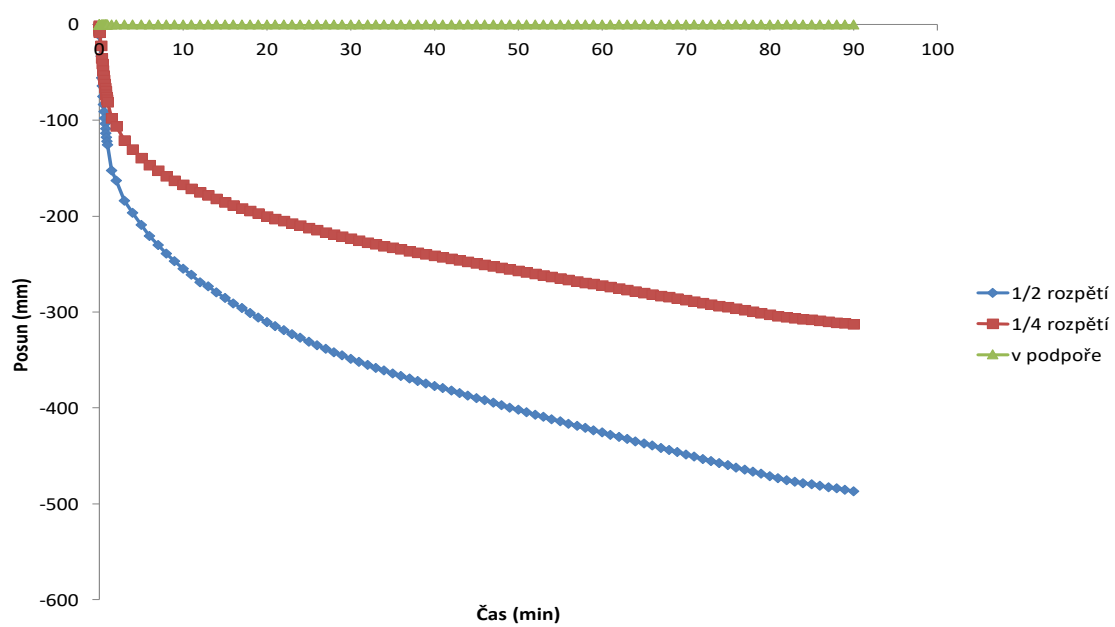
Výsledkem výpočtů je svislý průhyb (ve směru osy Z) v polovině rozpětí nosníku (bod 17), průhyb (ve směru osy Z) ve čtvrtině rozpětí nosníku (bod 9) a osová síla ve středu rozpětí nosníku (ve směru osy X).

Výsledky

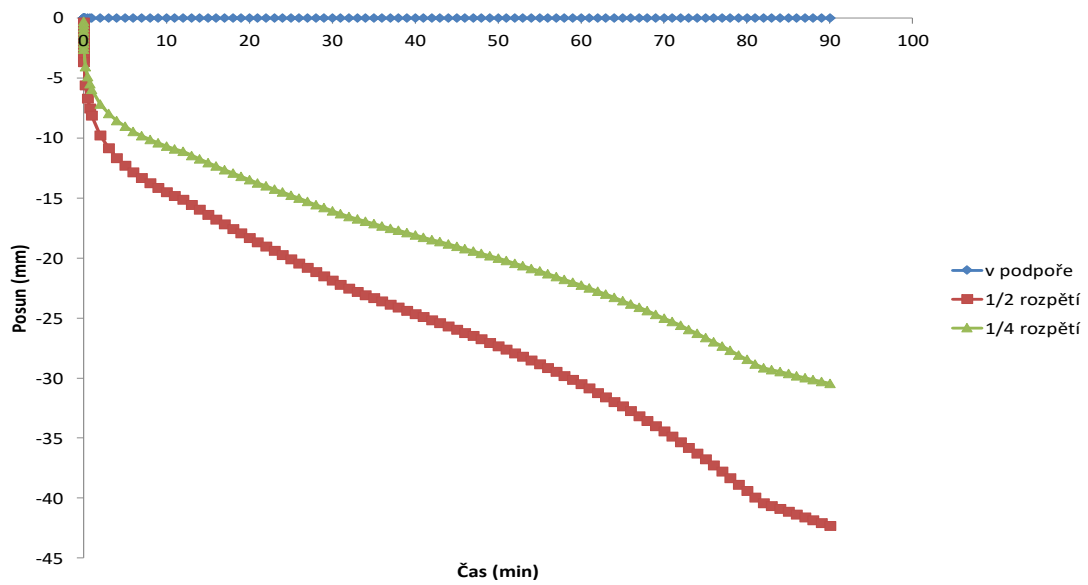
Průhyby nosníků BMS_1, BMS_2 a BMS_3 v polovině rozpětí a ve čtvrtině rozpětí nosníku jsou uvedeny na obrázku 5.10 až 5.12. Svislý průhyb koncového bodu je uveden pro kontrolu. Ve všech případech je koncový bod nosníku svisle podepřeno a průhyb by měl být roven 0. Průhyby nosníků BMS_8A a BMS_8B v polovině rozpětí a ve čtvrtině rozpětí nosníku jsou uvedeny na obrázku 5.13 až 5.14.



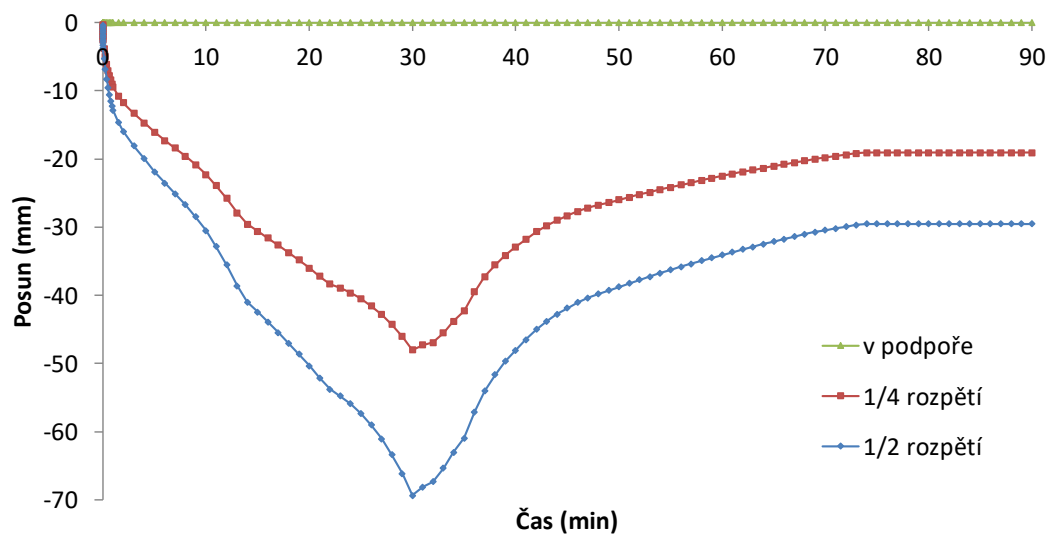
Obrázek 5.10: BMS_1 Vodorovný posun v podpoře, $\frac{1}{4} L$ a $\frac{1}{2} L$



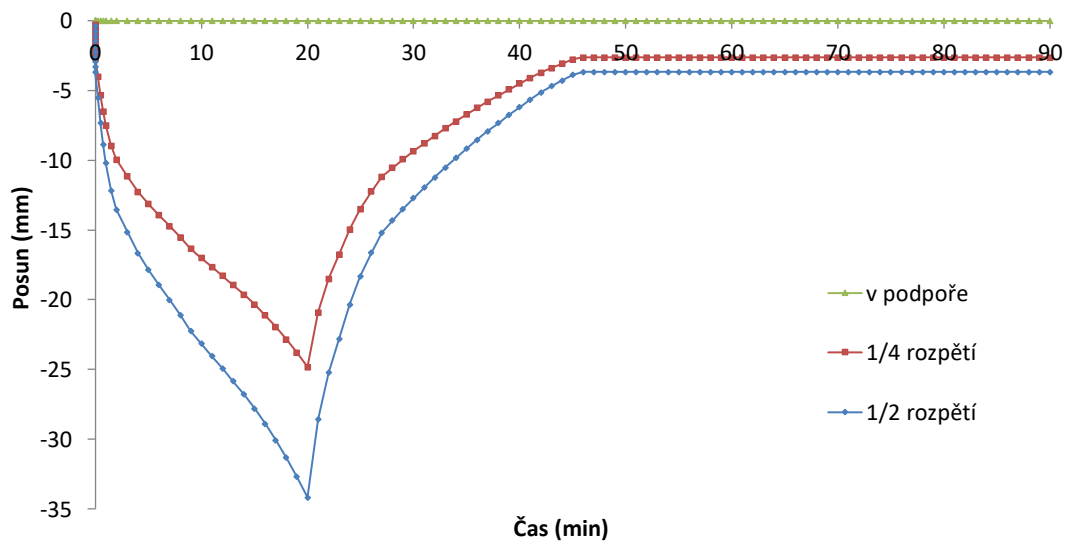
Obrázek 5.11: BMS_2 Vodorovný posun v podpoře, $\frac{1}{4} L$ a $\frac{1}{2} L$



Obrázek 5.12: BMS_3 Vodorovný posun v podpoře, $\frac{1}{4}$ L a $\frac{1}{2}$ L

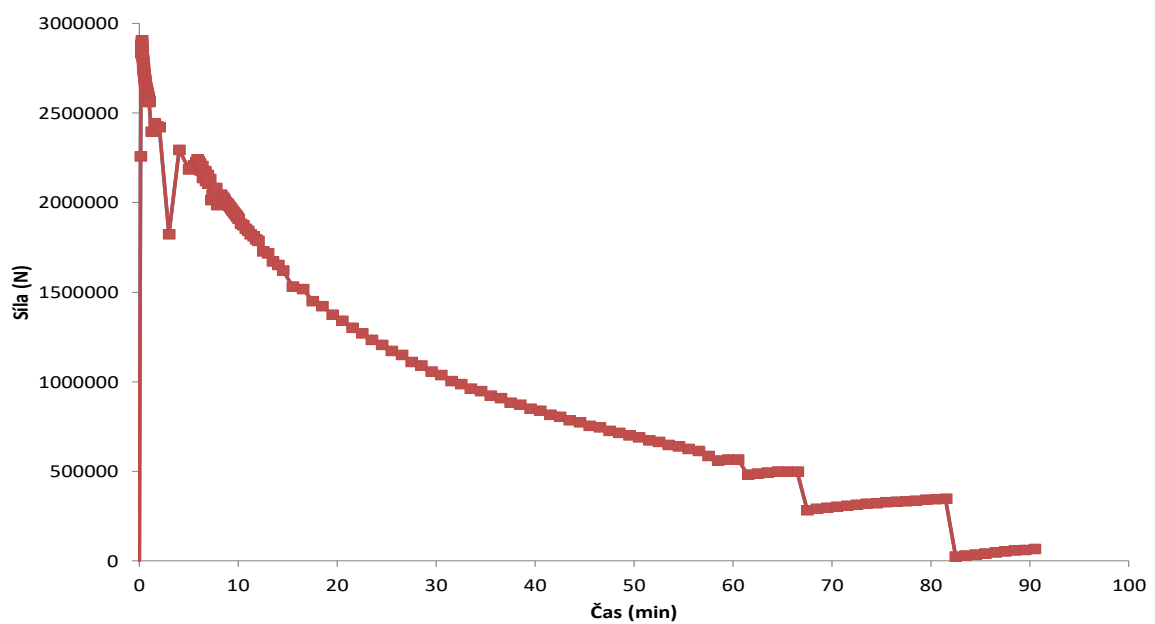


Obrázek 5.13: BMS_8A Vodorovný posun v podpoře, $\frac{1}{4}$ L a $\frac{1}{2}$ L

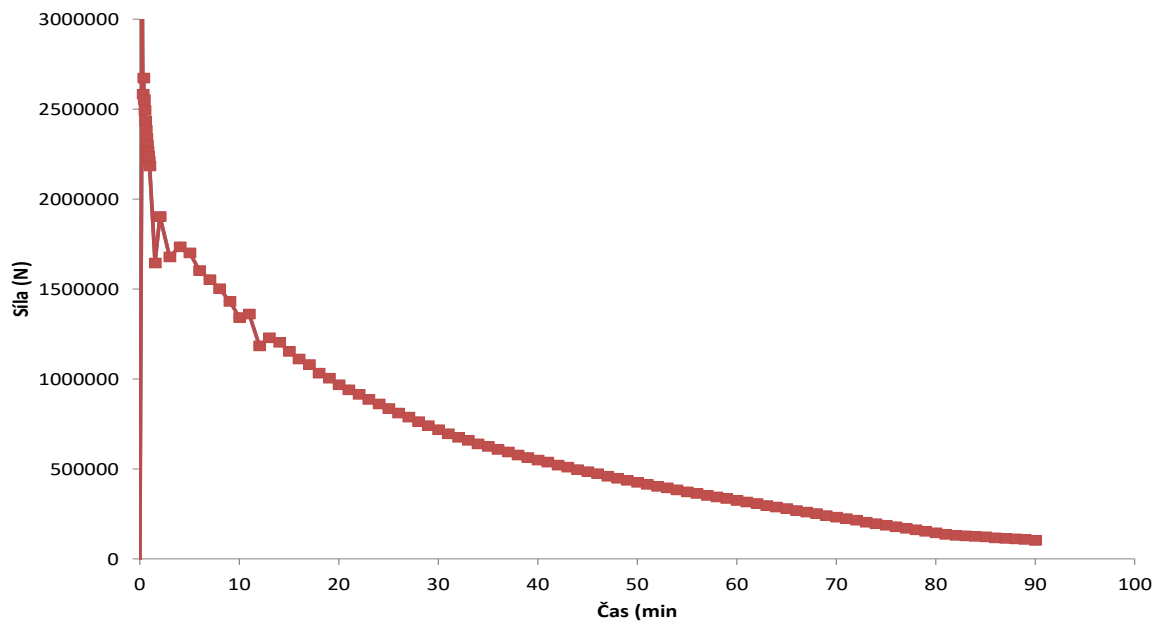


Obrázek 5.14: BMS_8B Vodorovný posun v podpoře, $\frac{1}{4}$ L a $\frac{1}{2}$ L

Na obrázcích 5.15 a 5.16 jsou uvedeny vypočítané osové síly. V grafech jsou vidět lokální výkyvy hodnot, které jsou způsobeny nastavením hodnoty tolerance výpočtu. Změnou nastavení tolerance se obvykle tento jev vyřeší.



Obrázek 5.15: BMS_1 Průběh osové síly uprostřed rozpětí nosníku



Obrázek 5.16: BMS_2 Průběh osové síly uprostřed rozpětí nosníku

Shrnutí

Příklad uvádí výpočet mechanického chování ocelového nosníku při požáru v softwaru VULCAN v pěti variantách lišících se způsobem uložení nosníku a zatížením teplotou. Z výsledků výpočtů je patrný vliv okrajových podmínek na celkové chování konstrukce. Při simulaci je proto nutné dbát na důkladné zadání všech okrajových podmínek.

5.3.2 Ocelový sloup vystavený účinkům požáru

Příklad uvádí výpočet mechanického chování ocelových sloupů různých průřezů vystavených účinkům požáru. Sloupy jsou zahřívány rovnoměrně po průřezu pomocí teploty, která lineárně stoupá v čase. Výpočet je proveden ve dvou programech pro modelování chování konstrukce – SAFIR a VULCAN.

Popis konstrukce

Analýza je provedena pro dva průřezy sloupů, viz obrázky 5.17 a 5.18. První sloup je kruhového uzavřeného průřezu (CHS) o průměru $d = 76$ mm a tloušťce stěny $t = 2,9$ mm (CHS 76x2.9), dále značen jako Sloup 1. Druhý sloup je otevřeného průřezu (UC 152x152x23), dále značen jako Sloup 2. Oba sloupy mají délku $L = 3,5$ m, v patě jsou vetknuty (v uzlu 1 je zabráněno posunu i pootočení ve všech třech směrech) a ve vrcholu jsou posuvně uloženy tak, aby byl umožněn pouze vertikální posun v důsledku zatížení a tepelné roztažnosti (v uzlu 21 je zabráněno posunu a pootočení ve směrech os/kolem os x, y).

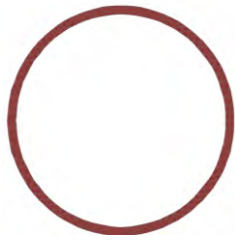
Sloupy jsou z oceli třídy S275 s Youngovým modulem pružnosti rovným 205 000 MPa a Poissonovým součinitelem 0,3. Jak tepelné, tak mechanické vlastnosti oceli jsou definovány v souladu s normou ČSN EN 1993-1-2:2005.

Oba sloupy jsou zatíženy svislým statickým zatížením ve vrcholu sloupu a vodorovným zatížením ve středu jejich rozpětí. Vodorovné zatížení je aplikováno tak, aby vznikla počáteční imperfekce, která způsobí deformaci 1/1000 délky sloupu. Tabulka 5.4 znázorňuje zatěžovací stavy uvažované pro oba sloupy. Sloupy jsou namáhány ve vrcholu (uzel 21) a uprostřed rozpětí (uzel 11) osamělou silou působící ve směrech x, y a z (podrobněji, viz tabulku 5.4).

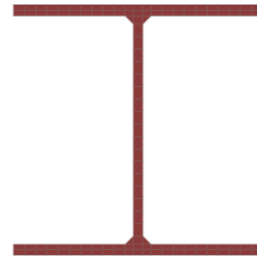
Ve výpočtu je uvažováno s rovnoměrným ohřevem sloupů po jejich průřezu. Teplota aplikovaná na sloupy se lineárně zvyšuje v čase, viz obrázek 5.23.

Numerický model

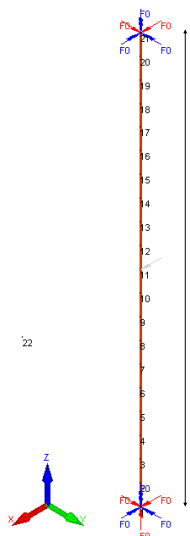
Analýza chování konstrukce je provedena s využitím programů SAFIR (vyvinutého na univerzitě v Liege) a VULCAN (vyvinutého na univerzitě v Sheffieldu). Velikost oka sítě použitá v modelu v programu SAFIR je 0,35 m, tak aby celkový počet konečných prvků byl 10, viz obrázky 5.19 až 5.22. V softwaru jsou vypočítány výsledky v podobě deformací – posun v uzlu 11 ve směru x (Sloup 1), posun v uzlu 11 ve směru x a posun v uzlu 21 ve směru z , Sloup 2. Pro výpočet v softwaru VULCAN jsou nastaveny konstantní zatěžovací kroky s max. tolerancí 0,001. Analýza provedená v programu SAFIR využívá jak statický, tak dynamický řešič. Statický výpočet Sloupu 1 (teplotní i mechanická část) počítá od času 60 s do 12000 s se zatěžovacím krokem 60 s. Dynamický výpočet Sloupu 1 od času 0,0001 s do 12000 s se zatěžovacím krokem 10 s. Výpočet Sloupu 2 má zatěžovací krok 12 s, rovněž do času 12000 s.



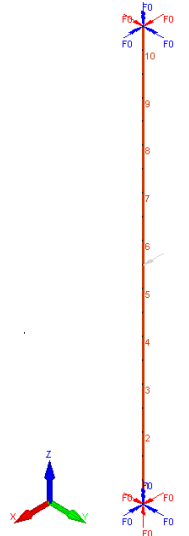
Obrázek 5.17: Teplotní model sloupu 1
v programu SAFIR



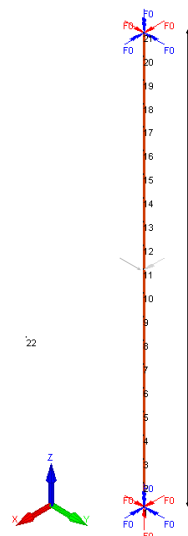
Obrázek 5.18: Teplotní model sloupu 2
v programu SAFIR



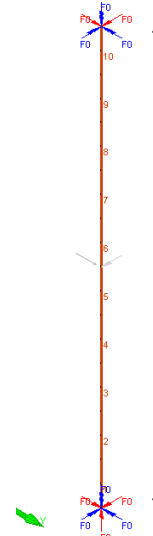
Obrázek 5.19:
Mechanický model
sloupu 1 v programu
SAFIR (zobrazeny uzly)



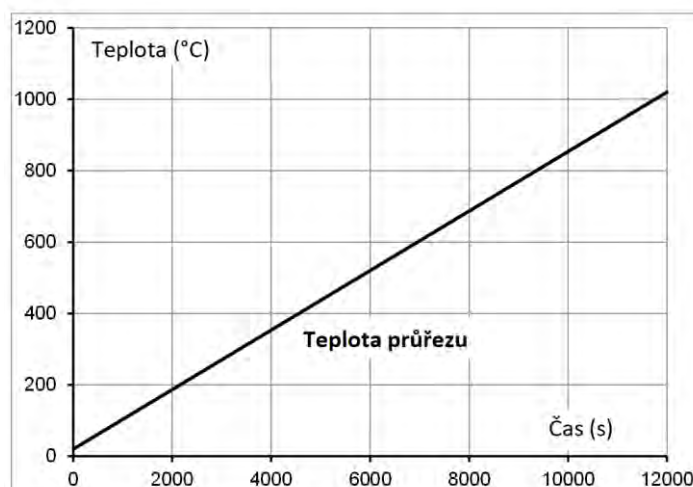
Obrázek 5.20:
Mechanický model
sloupu 1 v programu
SAFIR (zobrazeny
prvky)



Obrázek 5.21:
Mechanický model
sloupu 2 v programu
SAFIR (zobrazeny uzly)



Obrázek 5.22:
Mechanický model
sloupu 2 v programu
SAFIR (zobrazeny
prvky)



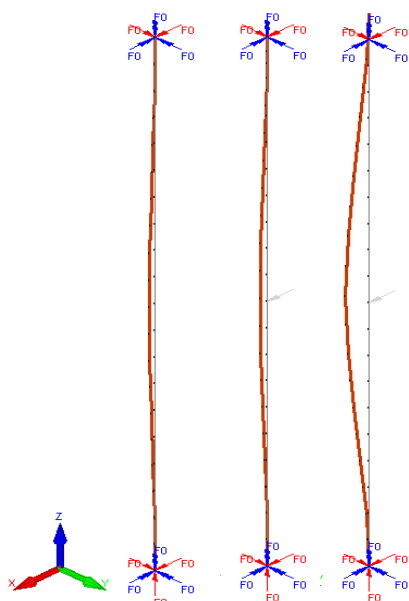
Obrázek 5.23: Teplota v průřezu

Tabulka 5.4 Zatěžovací stavy pro sloup 1 a sloup 2

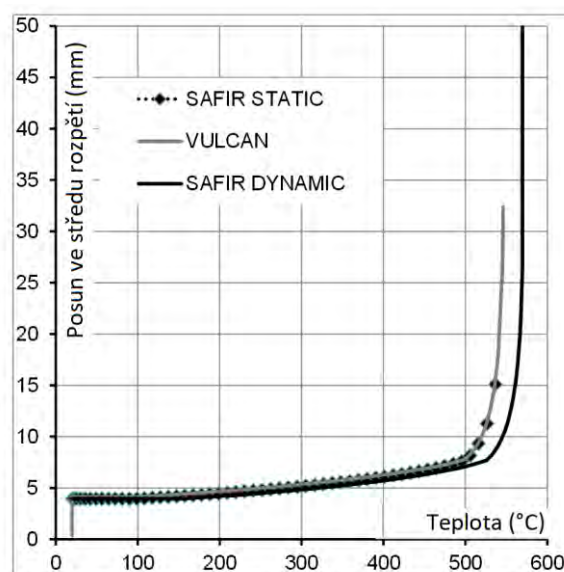
ZATÍŽENÍ			
Typ	Uzel (SAFIR)	Zatížení (N)	Směr působení
Bodové zatížení sloupu 1	21	-37800	z
Bodové zatížení sloupu 1	11	1436	x
Typ	Uzel (SAFIR)	Zatížení (N)	Směr působení
Bodové zatížení sloupu 2	21	-37800	z
Bodové zatížení sloupu 2	11	40163	x
Bodové zatížení sloupu 2	11	12852	y

Výsledky

Na obrázku 5.24 je znázorněn deformovaný tvar Sloupu 1 pro tři různé teploty při použití řešiče STATIC v programu SAFIR. Na obrázku 5.25 je vidět, že Sloup 1 ztratil stabilitu při dosažení teploty 537 °C. Je zde vidět téměř dokonalá shoda mezi výsledky analýzy v programu VULCAN a SAFIR (statický řešič). Dynamický řešič v programu SAFIR dává kritickou teplotu mírně vyšší, než je dosažená teplota při použití statického řešiče, 546 °C místo 537 °C, protože dynamický řešič může překonat některé numerické problémy konvergence, které mohou nastat při použití statického řešiče.

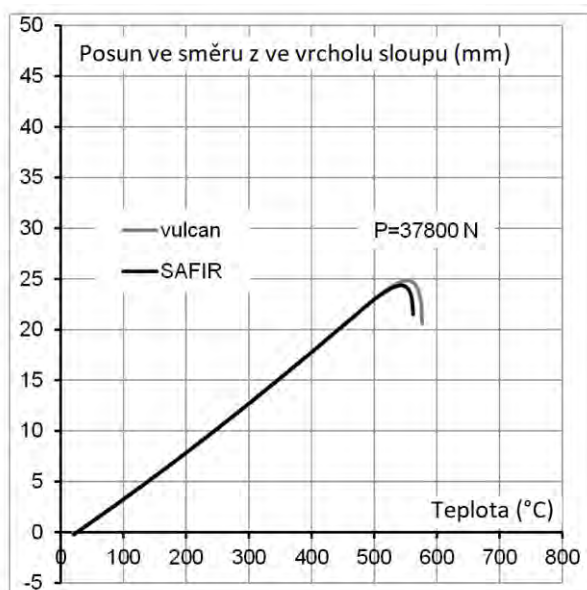


Obrázek 5.24: Deformovaný tvar Sloupu 1 pro tři různé teploty (řešič STATIC programu SAFIR)

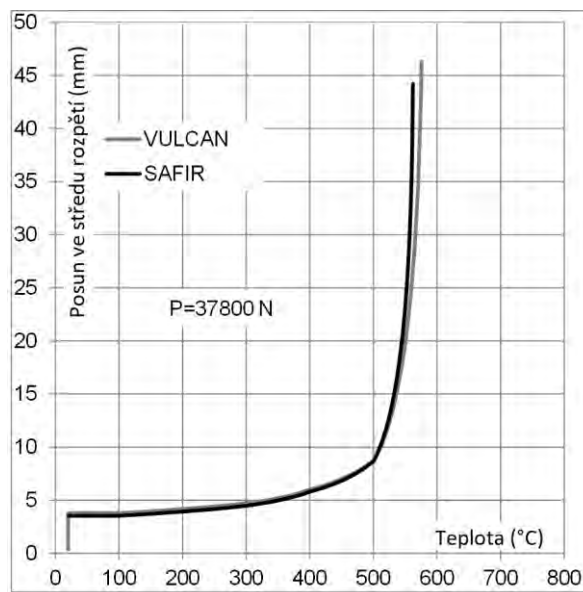


Obrázek 5.25: Posun ve středu rozpětí Sloupu 1 (VULCAN a SAFIR, statický a dynamický řešič)

Sloup 2 ztratil stabilitu, když dosáhl teploty kolem 560-570 °C v programu SAFIR, řešič STATIC. Shodných výsledků bylo dosaženo i v programu VULCAN, obrázek 5.26 a obrázek 5.27.



Obrázek 5.26: Svislý posun ve vrcholu Sloupu 1 (VULCAN a SAFIR, statický řešič)



Obrázek 5.27: Posun ve středu rozpětí Sloupu 2 (VULCAN a SAFIR, statický řešič)

Shrnutí

Příklad uvádí analýzu mechanického chování sady dvou ocelových sloupů vystavených statickému zatížení a rovnoměrnému lineárně se zvyšujícímu teplotnímu zatížení. Analýza je provedena v programech SAFIR, pomocí statického a dynamického řešiče, a VULCAN. Výsledky z obou softwarových nástrojů ukazují téměř dokonalou shodu mezi analýzou v programech VULCAN a SAFIR, statický řešič. Dynamický řešič programu SAFIR dává vypočítanou kritickou teplotu mírně vyšší než teplota dosažená při použití statického řešiče, protože dynamický řešič může překonat některé numerické problémy konvergence, které mohou nastat při výpočtu pomocí statického řešiče.

5.3.3 Rozvoj teplot v průřezu dřevěného prvku

Předmětem ověřovacího příkladu je stanovení průběhu teplot v průřezu dřevěného prvku z lepeného lamelového dřeva vystaveného účinkům normové teplotní křivky pomocí MKP softwaru. Geometrie prvku, materiálové vlastnosti a teplotní zatížení odpovídají požární zkoušce provedené v laboratoři PAVUS a.s. (Cábová, 2018). Pomocí této zkoušky je ověřena správnost modelu. V modelu je použit pokročilý materiálový model dřeva.

Numerický model

Software

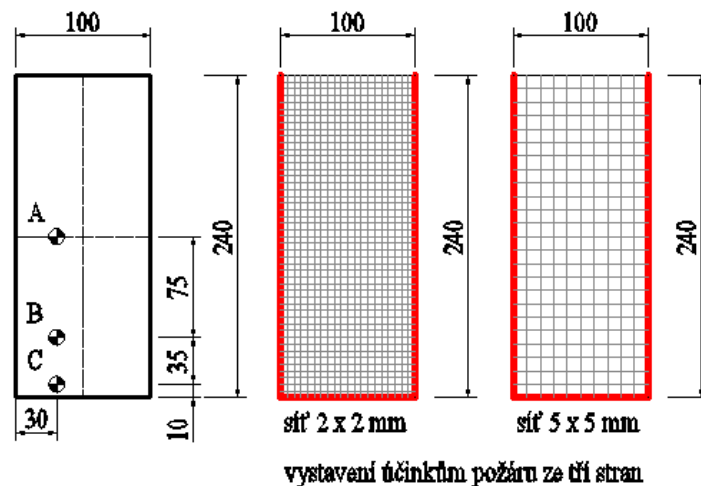
Výpočet je proveden pomocí softwaru Atena Science, verze V.513. Vstupní data jsou zadány pomocí preprocesoru GiD, verze 12.0.8., výsledky jsou zobrazeny v postprocesoru GiD, verze 12.0.8.

Výpočetní čas

Konstrukce je vystavená účinkům normové požární křivky po dobu 30 min. Časový krok výpočtu pro teplotní analýzu je zvolen 6 s, tedy čas výpočtu 1800 s a 300 výpočetních kroků.

Geometrie a výpočetní síť

Výpočetní model je dvourozměrný. Je modelován průřez o velikosti 100 mm x 240 mm, viz obrázek 5.28. Výpočet je proveden pro dvě velikosti sítě se čtvercovým elementem s hranou 5 x 5 mm a 2 x 2 mm.



Obrázek 5.28: Geometrie výpočetního modelu, výpočetní síť a monitorovací body teploty

Materiálový model

Ve výpočtu je pro smrkové lepené lamelové dřevo uvažován pokročilý materiálový model podle ČSN EN 1995-1-2, příloha B. Parametry při běžné teplotě jsou následující:

- | | | |
|----------------------------------|--|-------------------------|
| a) součinitel tepelné vodivosti: | $\lambda = 0,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ | (podle ČSN EN 1995-1-2) |
| b) měrná tepelná kapacita: | $c = 1,53 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ | (podle ČSN EN 1995-1-2) |
| c) počáteční teplota materiálu: | $\theta_{\text{init}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ | (podle ČSN EN 1995-1-2) |
| d) počáteční vlhkost materiálu: | $w_{\text{init}} = 12 \text{ } \%$ | |
| e) hustota | $\rho_k = 530 \text{ kg}/\text{m}^3$ | (dle experimentu) |

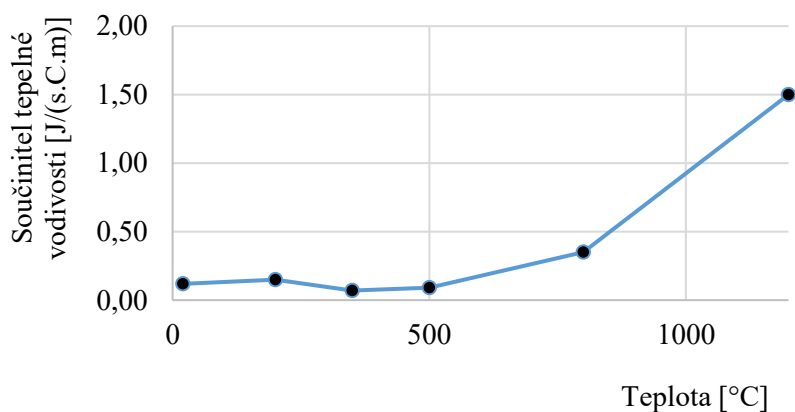
Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita jsou závislé na teplotě. Materiálový model pro teplotní analýzu je „CCTransportMaterial“.

Poznámka: Hodnota měrné tepelné kapacity je do softwaru zadávaná v jednotkách J/(m³·C), a proto platí:

$$c_{simulace} = c \cdot \rho_k = J/(m^3 \cdot C)$$

Modifikace tepelných materiálových vlastností jako funkce rostoucí teploty je definována v souladu s ČSN EN 1995-1-2, následovně:

Součinitel tepelné vodivosti

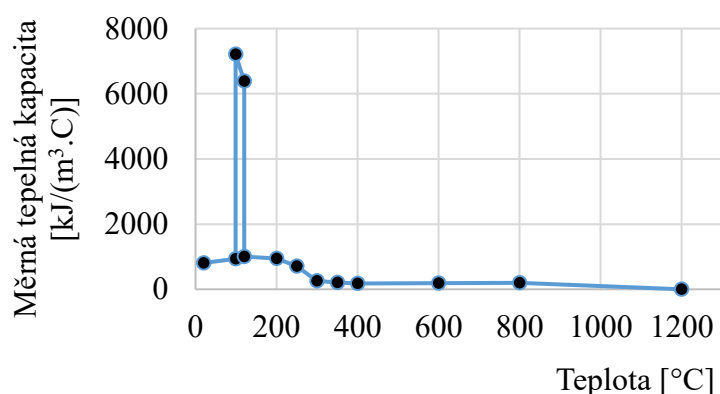


Obrázek 5.29: Součinitel tepelné vodivosti jako funkce rostoucí teploty

Tabulka 5.5 Součinitel tepelné vodivosti jako funkce rostoucí teploty

Teplota	Součinitel tepelné vodivosti	Součinitel tepelné vodivosti – numerická simulace
T [°C]	λ [W/(m·K)]	λ [J/(s·C·m)] pozn. W = J/s
20	0,12	0,12
200	0,15	0,15
350	0,07	0,07
500	0,09	0,09
800	0,35	0,35
1200	1,50	1,50

Měrná tepelná kapacita



Obrázek 5.30: Měrná tepelná kapacita jako funkce rostoucí teploty

Tabulka 5.6 Měrná tepelná kapacita jako funkce rostoucí teploty

Teplota	Měrná tepelná kapacita	Hustota	Vlhkost	Měrná tepelná kapacita - numerická simulace
T [°C]	c [kJ]/(kg·K)	ρ [kg/m ³]	w [%]	c [kJ]/(m ³ ·C)
20	1,53	530,00	12	810,9
99	1,77	530,00	12	938,1
99	13,60	530,00	12	7208,0
120	13,50	473,21	0	6388,4
120	2,12	473,21	0	1003,2
200	2,00	473,21	0	946,4
250	1,62	440,09	0	712,9
300	0,71	359,64	0	255,3
350	0,85	246,07	0	209,2
400	1,00	179,82	0	179,8
600	1,40	132,50	0	185,5
800	1,65	123,04	0	203,0
1200	1,65	0,00	0	0,0

Poznámka: Z uvedených tabulek je zřejmé, že v numerické simulaci je zohledněn úbytek hustoty a vlhkosti dřeva se zvyšující se teplotou – hustota materiálu je použita 530 kg/m³ podle experimentu.

Okrajové podmínky

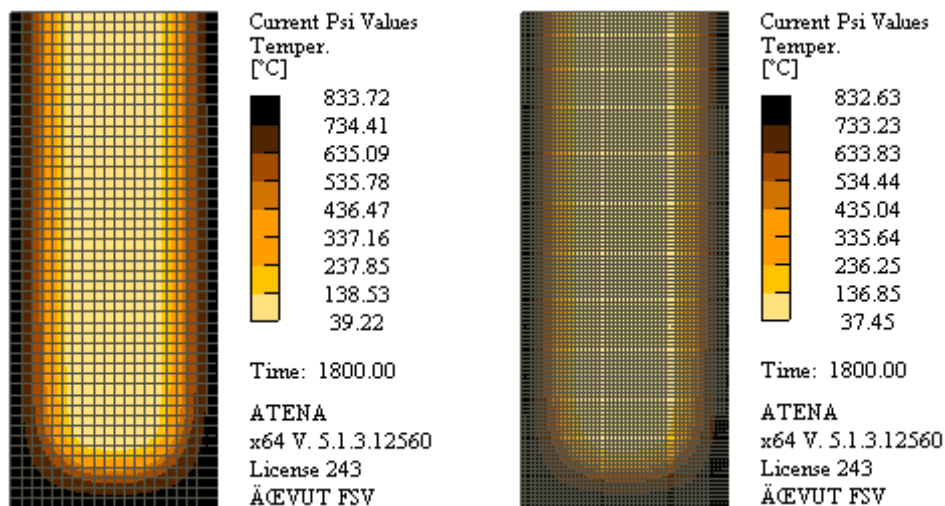
Teplotní zatížení je zadáno pomocí funkcí „Fire Boundary For Line“ jako normová teplotní křivka po dobu $\Delta t = 2700$ s. Zatížení je aplikováno na hranu elementu – červená linie na obrázku 5.28.

Měřicí body

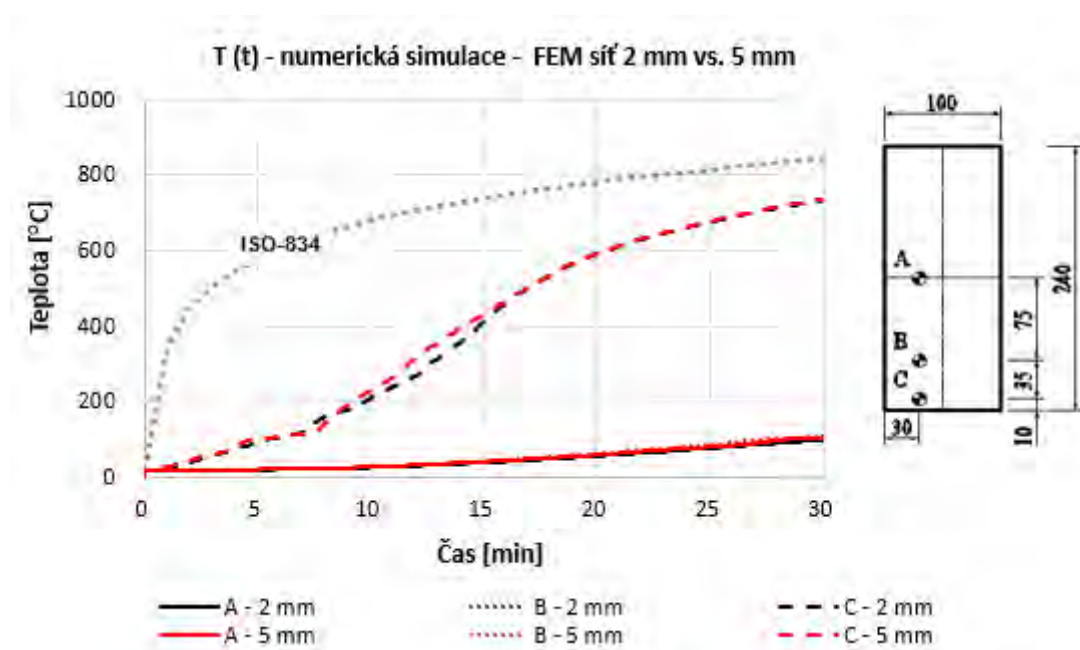
Teplota materiálu byla v modelu monitorována pomocí funkcí „Monitor for Point – Temperature“. Monitorovací body pro měření teploty pod ohřívaným povrchem jsou identické s experimentem a jejich poloha je zobrazená na obrázku 5.28, označení A, B, C.

Výsledky

Grafické zobrazení teplotních polí a teploty v monitorovacích bodech jsou uvedeny níže.



Obrázek 5.31 Teplotní pole – 5 mm síť (vlevo), 2 mm síť (vpravo)



Obrázek 5.32: Průběh teplot v monitorovacích bodech A, B, C v numerickém modelu se sítí konečných prvků s hranou 2 mm a 5 mm a jejich vzájemné porovnání

Shrnutí

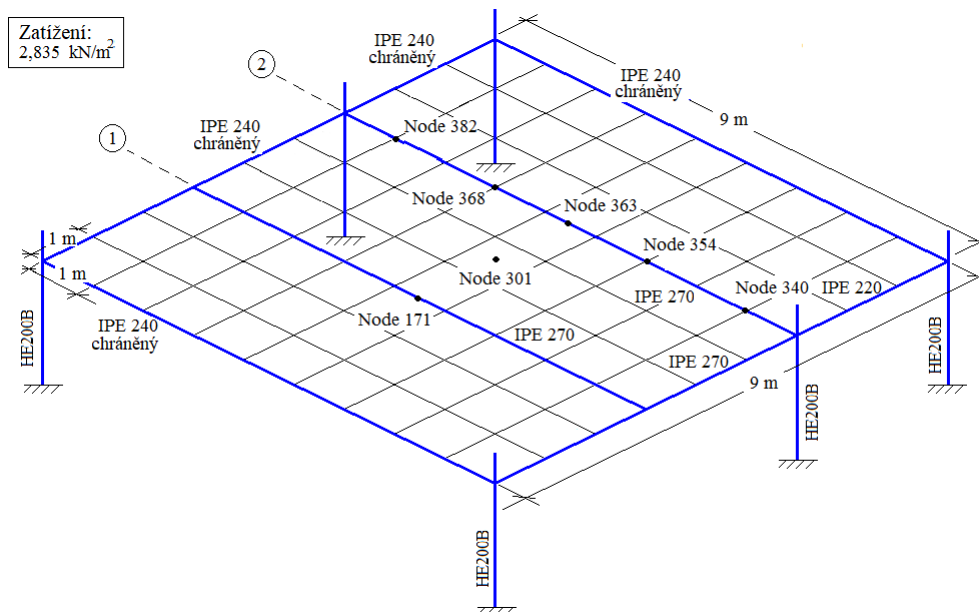
Příklad uvádí výpočet teplot v dřevěném elementu z lepeného lamelového dřeva vystaveného teplotním účinkům normové křivky (ISO-834) po dobu 30 minut. Pro teplotní analýzu je použit pokročilý materiálový model dřeva s ohledem na změnu tepelných materiálových charakteristik dřeva, a to součinitel tepelné vodivosti λ a měrné tepelné kapacity c .

5.3.4 Mechanické chování ocelobetonové stropní desky při požáru

Příklad uvádí vliv požáru na mechanické chování spřažené ocelobetonové stropní desky. Mechanické chování desky je řešeno v programu VULCAN. Výpočet je proveden pro dva různé případy tepelného zatížení. Konstrukce je zatížena křivkou přirozeného požáru vypočítanou pro uvažovaný požární úsek v softwaru FDS. Dále je uveden případ, kdy je konstrukce zatížena parametrickou teplotní křivkou rovněž vypočítanou pro shodný požární úsek. Výsledky obou případů jsou uvedeny z hlediska svislého posunu a osově síly v několika polohách desky.

Popis konstrukce

Ocelobetonová deska o půdorysných rozměrech 9,0 m x 9,0 m je tvořena trapézovým plechem a betonem třídy C 30/37, třemi chráněnými obvodovými nosníky profilu IPE 240, nechráněným nosníkem z profilu IPE 270 a IPE 220, rovněž tvořící obvod desky, a dvěma sekundárními nechráněnými ocelovými nosníky profilu IPE 270. Deska je podepřena 6 chráněnými ocelovými sloupy profilu HE200B. Ocelové prvky jsou třídy oceli S355. Betonová vrstva desky má tloušťkou 70 mm a je vyztužena dvěma vrstvami ocelové výztuže o ploše 196 mm²/m, která jsou umístěny 30 mm od horního povrchu desky. Částečná interakce mezi betonovou deskou a nosnými ocelovými nosníky je zajištěna spřahovacími trny o průměru 19 mm s maximální pevností ve smyku 450 N/mm² s počtem 2,11 ks/m. Údaje o stropní desce včetně geometrie, průřezů nosníků a mechanického zatížení jsou znázorněny na obrázku 3.33



Obrázek 3.33: Model ocelobetonové konstrukce

Numerický model

Software a parametry výpočtu

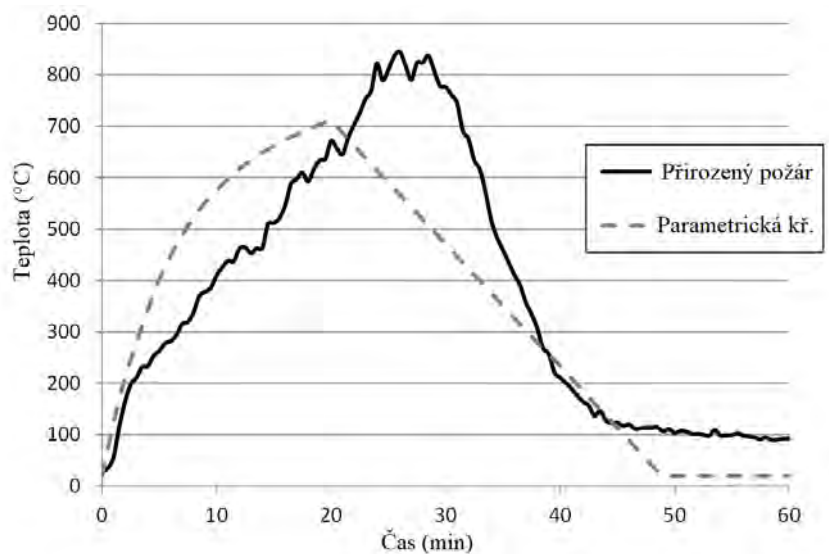
Výpočet byl proveden v programu VULCAN. Celkový čas výpočtu je 60 min.

Geometrie, materiály a výpočetní síť

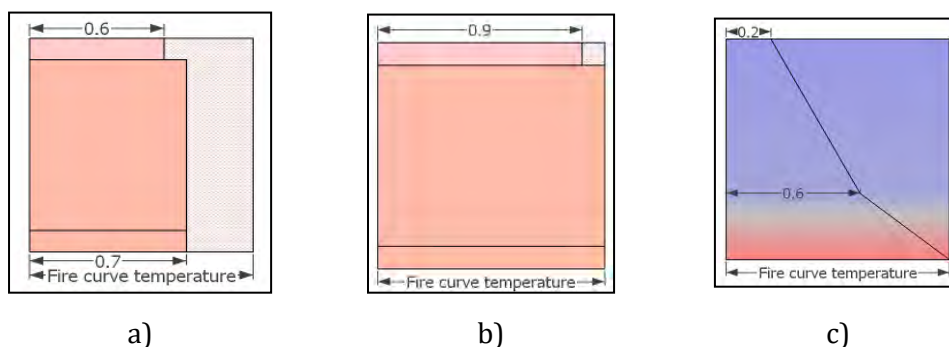
Geometrie modelu odpovídá konstrukce na obrázku 5.33. Mechanické vlastnosti materiálu ocelových nosníků (ocel třídy S355) jsou v modelu zavedeny podle ČSN EN 1993-1-1. Mez kluzu je 355 MPa, modul pružnosti 210 000 MPa a Poissonovo číslo 0,3. Železobetonová deska je z betonu C30/37. Výztuž ŽB desky je tvořena betonářskou výztuží průměru 5 mm se vzdáleností prutů 100 mm. Materiálové modely oceli, betonu a ocelové výztuže při zvýšených teplotách jsou zavedeny podle normy ČSN EN 1992-1-2 respektive ČSN EN 1993-1-2. Model je rozdělen na výpočetní síť o velikosti 1,0 m x 1,0 m.

Zatížení

Na stropní desku působí mechanické zatížení o velikosti 2,835 kN/m². Účinky požáru na konstrukci jsou modelovány pomocí parametrické teplotní křivky dle ČSN EN 1991-1-2 a pomocí křivky přirozeného požáru stanovené pomocí FDS pro zkoumaný požární úsek. Obě křivky teploty plynu jsou uvedeny na obrázku 5.34. V modelu není počítán přestup tepla z plynu do konstrukce. Teplota konstrukce je předepsána nerovnoměrně po výšce průřezu pomocí procentuálního podílu teploty plynu. Na obrázku 5.35 je znázorněno rozložení teploty po průřezu chráněného nosníku, nechráněného nosníku a betonové desky. Sloupy jsou zatíženy rovnoměrně po průřezu teplotou o velikosti 70% teploty plynu.



Obrázek 5.34: Teplotní zatížení ocelobetonové stropní desky



Obrázek 5.35: Rozložení teploty v průřezu: a) chráněný nosník; b) nechráněný nosník; c) betonová deska.

Okrajové podmínky

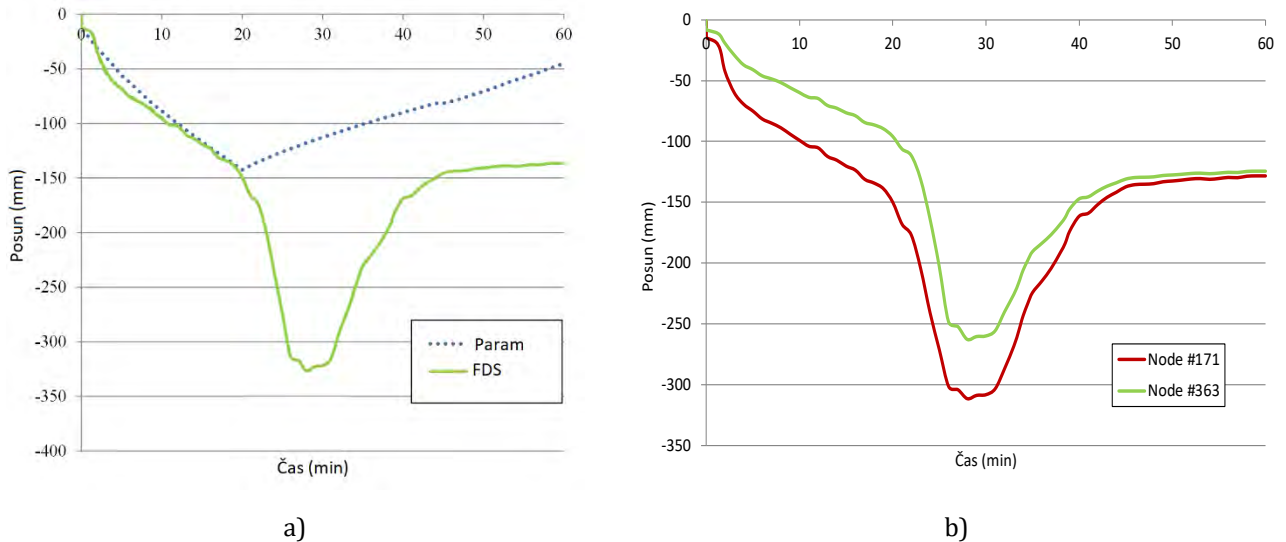
Stropní deska je uložena na sloupy. V místě styku desky a sloupů mají body zabráněný posun ve směru osy x , y a zabráněno pootočení kolem osy z . Sloupy jsou vetknuté – bodům v patě sloupů je zabráněno posunu i pootočení ve všech směrech.

Výstupy

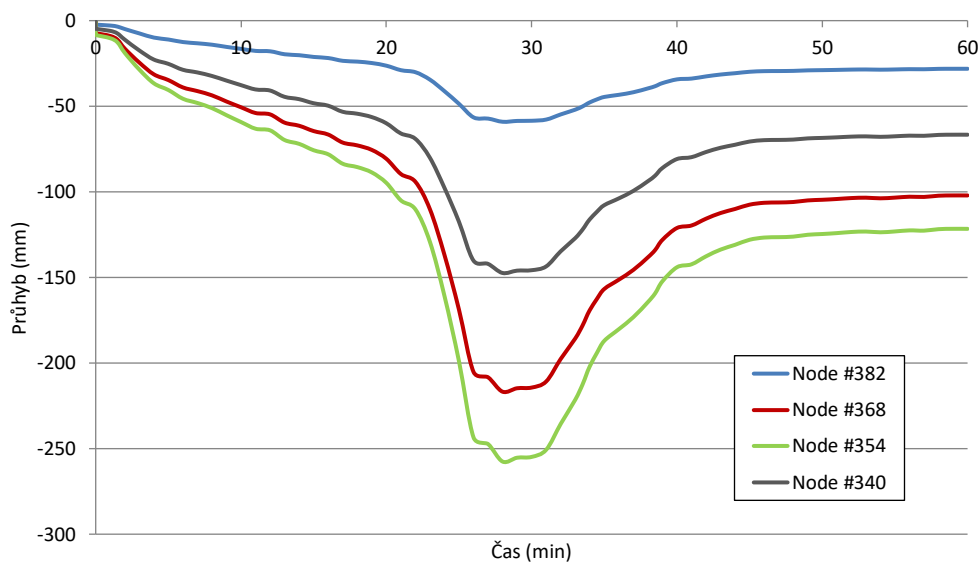
Výstupy modelu je svislý posun centrálního bodu ocelobetonové desky (bod 301), svislý posun vnitřních ocelových nosníků a osová síla vnitřních ocelových nosníků. Body, pro které jsou výsledky zobrazeny, jsou uvedeny na obrázku 3.33.

Výsledky

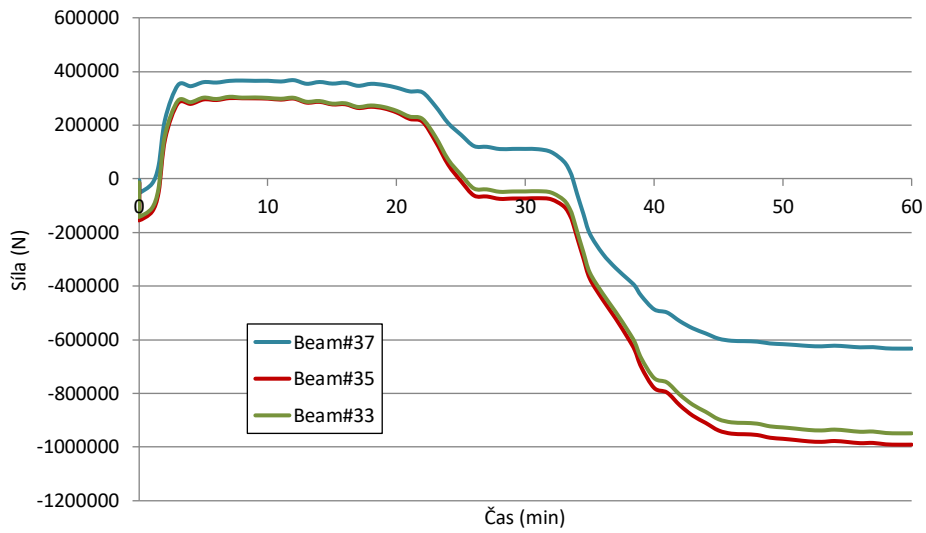
Výsledky jsou uvedeny na obrázcích 5.36 až 5.39. Na obrázku 5.36a je vidět deformace středního bodu desky (bod 301) při působení mechanického zatížení a zatížení teplotou ve dvou variantách. Obrázek 5.36b uvádí svislý posun středních bodů vnitřních nosníků (body 171 a 363) při působení přirozeného požáru. Obrázek 5.37 ilustruje průhyb nosníku č. 2 v několika bodech po jeho délce. Na obrázku 5.38 je vidět osová síla v nosníku č. 2. Obrázek 5.39 uvádí posun nosníku č. 2 v časech 30 min a 60 min.



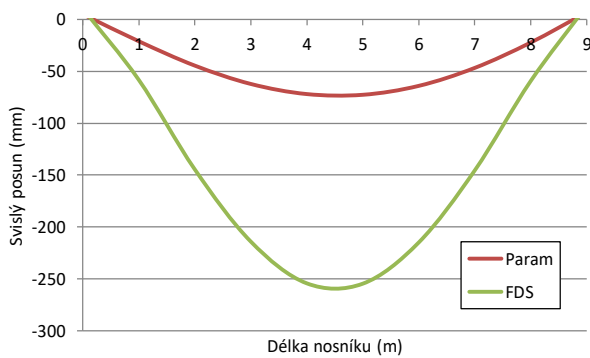
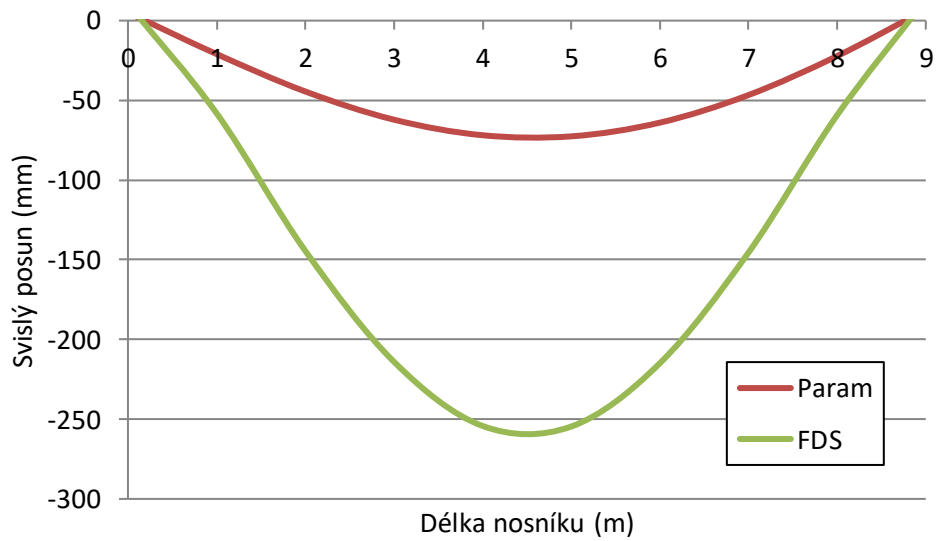
Obrázek 5.36: Porovnání posunutí způsobeného různými případy tepelného zatížení v čase: a) v centrálním bodě desky (bod 301); b) ve středu rozpětí nosníku 1 (bod 171) a nosníku 2 (bod 363)



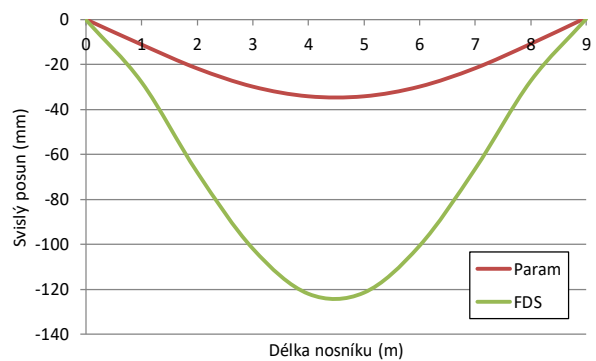
Obrázek 5.37: Průhyb nosníku č. 2



Obrázek 5.38: Osová síla v nosníku č. 2



a)



b)

Obrázek 5.39: Průhyb nosníku č. 2: a) v čase 30 min; b) v čase 60 min

Shrnutí

Příklad uvádí výpočet mechanického chování spřažené ocelobetonové stropní desky podepřené sloupy při požáru. Výpočet je proveden v softwaru VULCAN ve dvou variantách lišící se teplotním zatížením. Výsledkem jsou průhyby a osově síly jednotlivých bodů konstrukce.

5.3.5 Dřevobetonová stropní deska vystavená účinkům požáru

Předmětem příkladu je výpočet svislých deformací spřažené dřevo-betonové stropní desky vystavené účinkům normové teplotní křivky. Geometrie stropní desky je převzata z požární zkoušky (Blesák a kol., 2015) a vlastnosti materiálů z materiálových zkoušek a hodnot naměřených v průběhu experimentu. Správnost numerického modelu byla ověřena pomocí výsledků získaných z experimentu.

Numerický model

Software

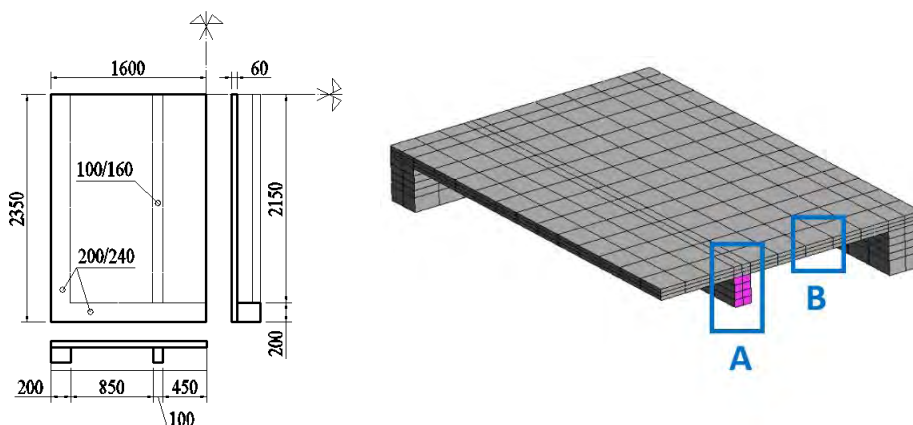
Výpočet je proveden pomocí softwaru Atena Science (FEM), verze V.513. Vstupní data jsou zadány pomocí preprocesoru GiD, verze 12.0.8., výsledky jsou zobrazeny v postprocesoru GiD, verze 12.0.8.

Výpočetní čas

Konstrukce je vystavena účinkům normové teplotní křivky po dobu 60 min. Časový krok výpočtu pro teplotní analýzu je zvolen 12 s, čas výpočtu 1800 s a 150 výpočetních kroků (všeobecně se pro teplotní analýzu doporučuje max. 6 s, případně teplotní gradient max. 1 °C/1 krok výpočtu, pro účely této simulace je uvedený časový krok postačující). Pro analýzu odezvy konstrukce na mechanické zatížení, je zvolen počet kroků výpočtu identický s teplotní analýzou, tedy 150 výpočetních kroků.

Geometrie a výpočetní síť

Rozměry modelu odpovídající rozměrům stropní desky z požární zkoušky (Blesák a kol., 2015), jsou uvedeny na obrázku 5.40 vlevo (rozměry v mm), model je dvouosově symetrický – modelována je pouze ¼ stropní desky.



Obrázek 5.40: Geometrie výpočetního modelu, vlevo, axonometrie výpočetního modelu, vpravo

Počet prvků výpočetní sítě pro vnitřní nosník, obrázek 5.40 vpravo – detail A, je na výšce průřezu 4 a na šířku průřezu 2 (všeobecně je doporučeno min. 6 elementů na výšce průřezu pro ohýbané prvky – v tomto případě je počet 4 vyhodnocen jako dostačující). Po celé své reálné délce je nosník rozdělen na 24 prvků (elementů). Rozměry elementů jsou 50 mm x 40 mm x 180 mm. Stejným způsobem je zhotovena síť konečných prvků pro prvky podpůrného rámu po obvodě stropní desky. Pro dřevěné nosníky a podpůrný rám jsou použity 3D SOLID elementy – hexaedry.

Pro betonovou desku jsou použity 3 vrstvy SHELL elementů (CCIsoShellBrick) po tloušťce, obrázek 5.40 vpravo – detail B, s rozměry 20 mm x 180 mm x 170 (150) mm. Pro každý SHELL element je uváženo 8 integračních bodů po tloušťce (ve svislém směru).

Spražení betonové desky s dřevěnými nosníky/rámem je simulováno funkcí INTERFACE, jejíž tuhost v prokluzu je dána lineární závislostí, průměrnou hodnotu v MN/m³ na základě experimentálního stanovení prokluzu použitého typu sprážen. Síť konečných prvků není v konstrukci lokálně zhušťována.

Materiály

Lepené lamelové dřevo

Modul pružnosti lepeného lamelového dřeva GL36h (pro nosníky a rám) je roven $E_{(25)} = 11,22$ GPa, Poissonovo číslo (součinitel příčné roztažnosti) $\nu = 0,0$. Změna průřezu vnitřního nosníku jako funkce času/zvyšující se teploty je dána zavedením efektivního modulu pružnosti, jehož hodnota klesá na $E_{(300)} = 0,05$ GPa při teplotě 300 °C (nulové hodnoty materiálových veličin se v numerické simulaci všeobecně nedoporučují). Dřevěný rám po obvodě desky je chráněn tepelnou izolací. Hodnota efektivního modulu pružnosti je dána vztahem:

$$E_{\text{eff}(t)} = \frac{E_{(25)} \cdot \frac{1}{12} \cdot (b - 2 \cdot \beta_0 \cdot t) \cdot (h - \beta_0 \cdot t)^3}{\frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3}$$

kde $E_{\text{eff}(t)}$ je efektivní Youngův modul pružnosti v čase, $E_{(25)}$ je Youngův modul pružnosti při běžné teplotě,

T je čas, β_0 je rychlost zuhelnatění pro lepené lamelové dřevo, podle ČSN EN 1995-1-2, b je šířka nosníku, h je výška nosníku.

Pro teplotní analýzu je použit součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,15 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, měrná tepelná kapacita $c = 0,1 \cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$. Součinitel tepelné roztažnosti je v čase/teplotě konstantní $\alpha = 0^\circ\text{C}^{-1}$. V softwaru zvolen je materiálový model pro rám

Elastic3D/prototype CC3DElastIsotropic

a pro vnitřní nosníky

Cementitious2Variable/prototype CC3NonLinCementitious2Variable.

Materiálový model pro teplotní analýzu je *CCTransportMaterial*.

Beton

Stropní deska je zhotovena z vláknobetonu (bez prutové výztuže, pevnostní třída betonu C45/55, obsah ocelových vláken typu HE 75/50 Arcelor 70 kg/m³, polypropylénová vlákna 1,5 kg/m³), jehož základní materiálové vlastnosti při běžné teplotě jsou následovné:

- Youngův modul pružnosti: $E = 48\,450 \text{ GPa}$
- Součinitel příčné roztažnosti: $\nu = 0,2$
- Pevnost v tahu: $f_t = 7,4 \text{ MPa}$
- Pevnost v tlaku: $f_c = -80,9 \text{ MPa}$
- Lomová energie: $G_f = 9\,000 \text{ N/m}$

Pro teplotní analýzu je použit součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 1,7 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a měrná tepelná kapacita $c = 4,5 \cdot 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$. Hodnoty vybraných materiálových vlastností vláknobetonu jako funkce teploty jsou uvedeny v tabulce 5.7 (jsou uvedeny násobitele hodnot při běžné teplotě, pro teplotní protažení je uvedena absolutní hodnota).

Tabulka 5.7 Materiálové vlastnosti vláknobetonu jako funkce času

Teplota [°C]	20	100	200	300	400	500	600	700	800
Youngův modul pružnosti E	1	0,594	0,409	0,304	0,188	0,1	0,045	0,03	0,015
Pevnost v tahu f_t	1	1	-	-	-	0,2	0,01	-	0,01
Pevnost v tlaku f_c	1	0,95	-	0,85	0,75	-	-	-	0,15
Pevnost betonu v drcení f_{c0}	1	0,95	-	0,85	0,75	-	-	-	0,15
Lomová energie G_f	1	-	1	1,3	2	-	-	-	2
Teplotní protažení ε_T ($\times 10^{-4}$)	0	7,43	18,04	31,41	48,92	71,95	101,88	140	140

Materiálový model je v softwaru zvolen následovně:

Concrete EC2/prototype CC3NonLinCementitious2WithTempDepProperties.

Materiálový model pro teplotní analýzu je „*CCTransportMaterial*“.

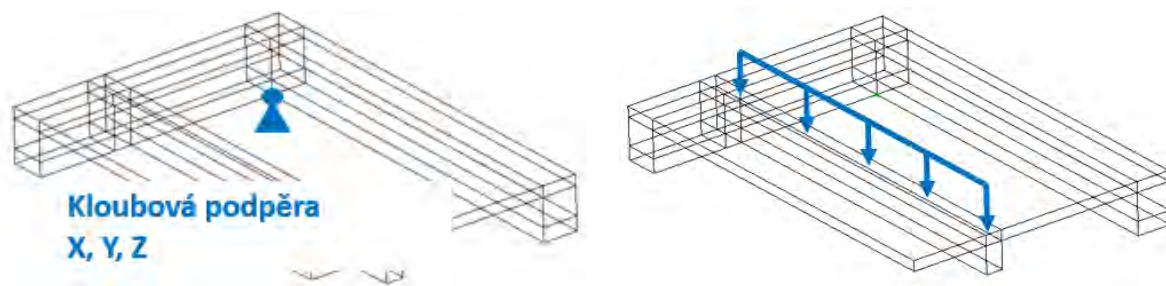
Spřažení

Spřažení je v konstrukci provedeno pomocí šroubů TCC 7,3 x 150 mm osazených pod uhem 45° ve vzájemné vzdálenosti 100 mm ve dvou rovnoběžných radách.

Okrajové podmínky

Podepření

Konstrukce je bodově podepřena ve třech směrech X, Y, Z, bez zabránění rotace, obrázek 5.41 vlevo.



Obrázek 5.41: Okrajové podmínky – podepření (vlevo), zatížení (vpravo)

Mechanické zatížení

Konstrukce je zatížena mechanickým zatížením hodnotou 2,4 kN/m v poloze nad vnitřním nosníkem, obrázek 5.41 vpravo. Zatížení je v softwaru zadáno navýšením objemové tíhy betonové desky o průřezu 60 x 100 mm v oblasti nad nosníkem.

Teplotní zatížení

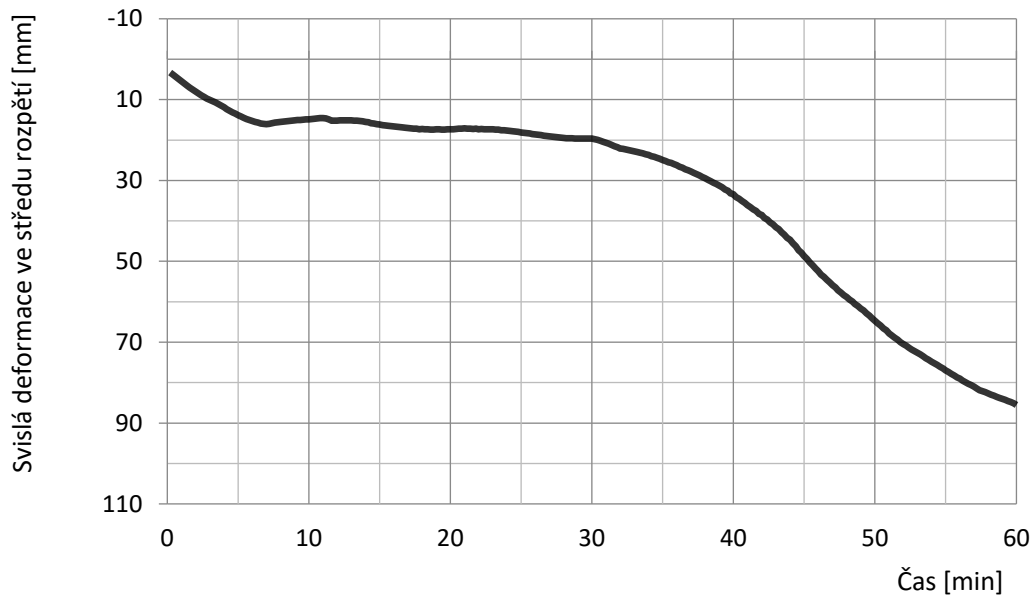
Konstrukce je zatížena teplotním zatížením pomocí funkcí „*Fire Boundary for Surface*“, normovou teplotní křivkou. Emisivita povrchu $\epsilon = 0,7$. Zatížení je aplikováno na spodní hranu betonové desky a ze tří stran zespodu na vnitřní dřevěný nosník (mimo kontakt dřevo-beton).

Měřící body

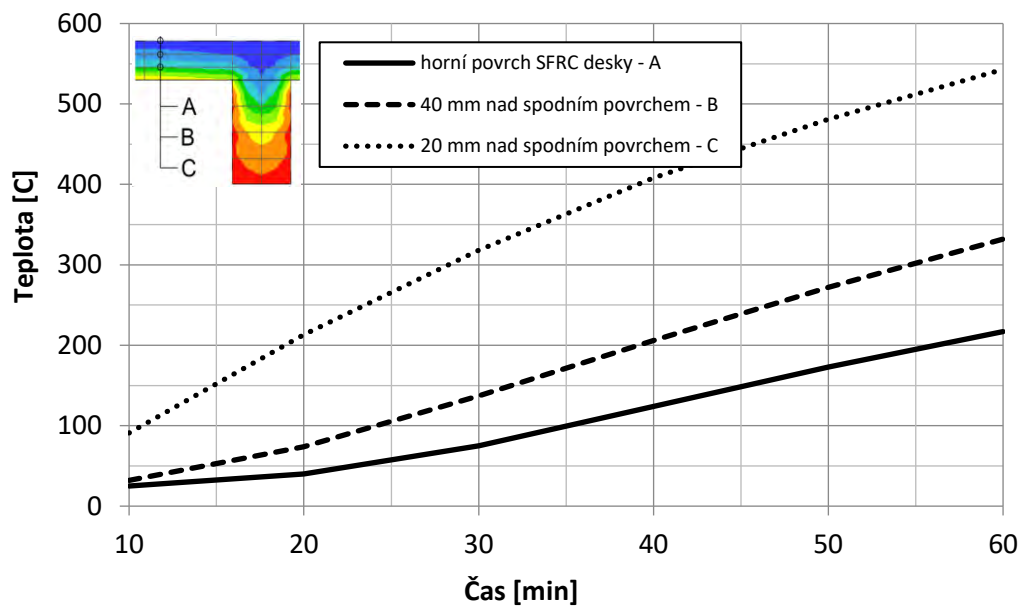
Teplota materiálů a svislé deformace byly v modelu monitorovány pomocí funkcí „*Monitor for Point – temperature*“ a „*Monitor for Point – Displacement*“. Teplota v betonové desce byla monitorována 20 mm a 40 mm nad spodním povrchem a na horním povrchu (nevystavenému účinkům požáru). Teplota ve vnitřním dřevěném nosníku byla monitorována ve svislé ose průřezu 40 mm nad spodním povrchem.

Výsledky

Průběh svislých deformací stropní desky ve středu její symetrie z numerické simulace a z experimentu jsou uvedeny v grafu na obrázku 5.42, průběh teplot v betonové desce je zobrazen v grafu na obrázku 5.43.



Obrázek 5.42: Průběh svislé deformace stropní desky z numerické simulace



Obrázek 5.43: Průběh teplot v betonové desce z numerické simulace

Shrnutí

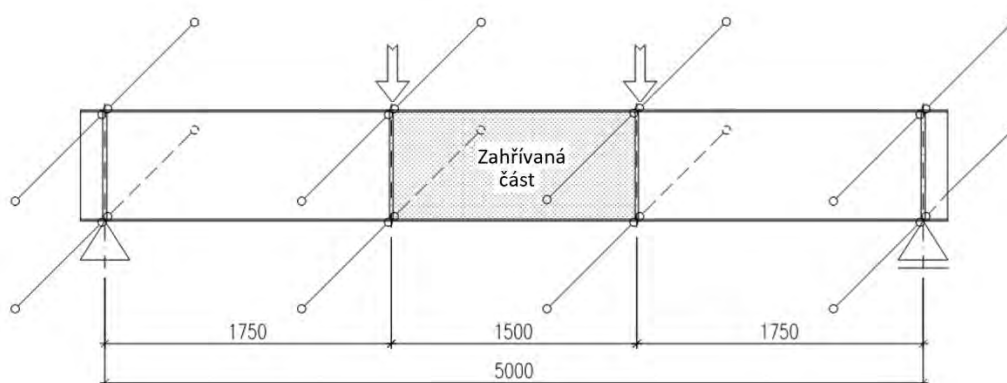
Příklad uvádí výpočet svislých deformací spřažené dřevo-betonové desky vystavené účinkům normového požáru po dobu 60 minut. Jsou definovány materiálové vlastnosti a okrajové podmínky pro nelineární analýzu tepelné a mechanické odezvy konstrukce. Vzhledem ke dvouose symetrickému problému, je modelována pouze jedna čtvrtina konstrukce. Jako zjednodušení je zuhelnatění dřeva nahrazeno zavedením efektivního modulu pružnosti (tedy bez redukce rozměrů průřezu nosníku). Materiálové parametry byly stanoveny na základě materiálových zkoušek při běžné teplotě a zvýšené teplotě. Parametry, které nebylo možné stanovit, příp. experimentálně ověřit, byly ponechány v základním nastavení softwaru. Díky validaci pomocí výsledků z požární zkoušky lze využít jako ověřovací příklad pro předpověď teploty v konstrukci a hodnot její svislé deformace.

5.3.6 Stabilita ocelového nosníku s průřezem 4. třídy při požáru

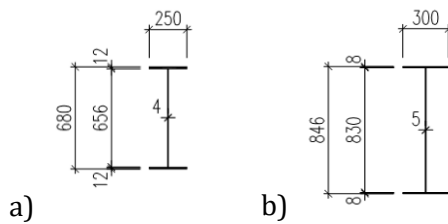
Příklad uvádí výpočet ohybové únosnosti ocelového nosníku otevřených I průřezů 4. třídy při zvýšené teplotě pomocí numerické simulace. Jsou simulovány čtyři případy se dvěma typy průřezů a dvěma různými teplotami. Vybrané nosníky a zvolené zatížení vycházejí ze skutečných testů prováděných v rámci projektu RFCS FIDESC4.

Popis konstrukce

Výpočet ohybové únosnosti je proveden na ocelovém nosníku délky 5 m, viz obrázek 5.44, o dvou různých otevřených I průřezích třídy 4, viz obrázek 5.45. Průřez A (IS 680/250/12/4) má stojinu třídy 4 a pásnice třídy 3, klasifikováno podle normy ČSN EN 1993-1-1:2005, viz obrázek 5.45a. Průřez B (IS 846/300/8/5) má stojinu i pásnice třídy 4, viz obrázek 5.45b. Nosník je prostě uložen.



Obrázek 5.44: Ocelový nosník



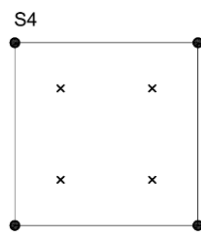
Obrázek 5.45: Průřezy nosníku: a) průřez A, b) průřez B

Nosník je symetricky zatížen dvěma osamělými silami. Ve střední části nosníku je tak vyvozen konstantní ohybový moment bez posouvací síly. Nosník je podélně držen, aby bylo zabráněno ztrátě příčné a torzní stability, viz obrázek 5.45. Jsou simulovány čtyři případy se dvěma typy průřezu a dvěma různými teplotami. Pro oba typy průřezů, obrázek 5.45, je teplota aplikována pouze na centrální část nosníku. Jsou použity teploty 450 °C a 650 °C. Model simuluje konstrukci v ustáleném teplotním stavu, ve kterém je teplota v čase konstantní. Mechanické zatížení se v čase zvyšuje.

Numerický model

Software a výpočetní síť

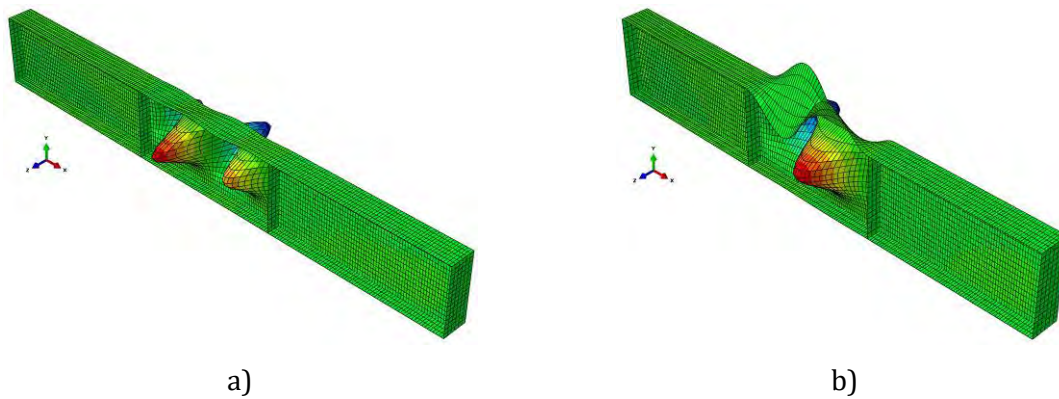
Model je sestaven v konečně prvkovém softwaru ABAQUS (ABAQUS, 2009). Pro modelování tenkostěnných prvků jsou použity skořepinové prvky, konkrétně prvek S4, viz obrázek 5.46. Skořepinový prvek S4 má čtyři uzly se šesti stupni volnosti (tři posunutí a tři natočení), lineární aproximaci a plnou integraci (4 integrační body na povrchu prvku). Může být použit při výpočtu velkých deformací a velkých natočení. Pro každý model nosníku je použito 200 uzlů ve směru jeho délky. Na stojinu je použito 16 prvků, zatímco na šířku pásnice je použito šesti prvků. Výpočetní síť je vidět na obrázku 5.46.



Obrázek 5.46: Skořepinový prvek S4

Geometrické imperfekce

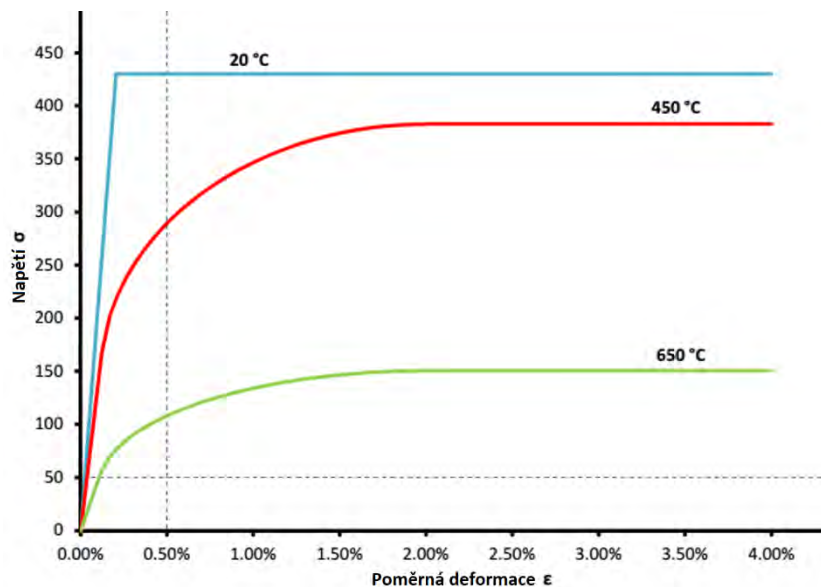
Lokální imperfekce jsou do výpočtu zavedeny prvním vlastním tvarem pružného vybočení, viz obrázek 5.47. Amplituda imperfekce je uvažována dle normy ČSN EN 1993-1-5:2006. Imperfekce pásnice byly 2x1/200násobkem délky přečnickující části pásnice a amplituda pro stojinu byla 1/200 výšky stojiny. Reziduální pnutí v průřezu není v modelu uvažováno.



Obrázek 5.47: Imperfekce zavedené v modulu: a) simulace 1 a 2, b) simulace 3 a 4

Materiálový model

Mechanické vlastnosti konstrukční oceli S355 jsou definovány následovně: mez kluzu $f_y = 355$ MPa, modul pružnosti $E = 210$ GPa, Poissonův součinitel $\nu = 0,3$. Mechanické vlastnosti při vysokých teplotách jsou definovány pomocí redukčních součinitelů závislých na teplotě podle ČSN EN 1993-1-2:2006. Materiálové chování při vysoké teplotě je definováno elasticko-plastickým nelineárním pracovním diagramem oceli, viz obrázek 5.48.



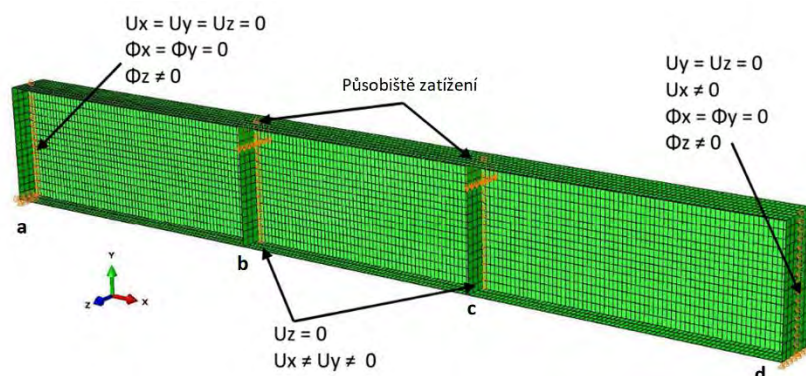
Obrázek 5.48: Pracovní diagram oceli S355 v závislosti na teplotě

Okrajové podmínky a mechanické zatížení

V modelu jsou okrajové podmínky definovány podle obrázku 5.44. Kloubová podpora je uvažována na levé straně modelu (bod "a") a válcová na pravé straně (bod "d"), viz obrázek 6. Na levé straně nosníku je zabráněno posunu ve směru os x , y , z a natočení kolem osy x . Natočení kolem osy z je možné. Na pravé straně jsou okrajové podmínky stejné, s výjimkou volného

vodorovného posunu ve směru osy x. Pro průřezy, kde bylo aplikováno zatížení (body "b", "c"), je bráno v úvahu podélné držení nosníku (ve směru osy z).

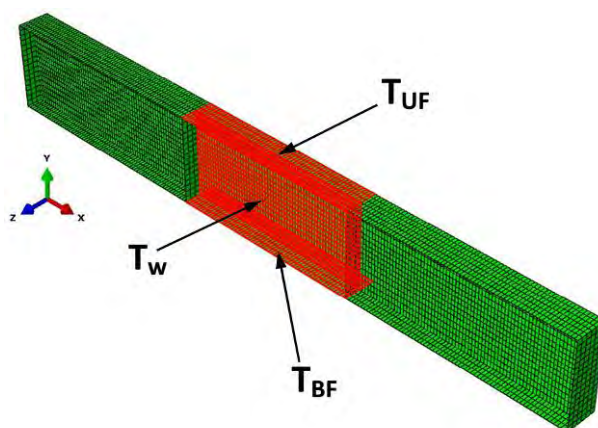
Mechanické zatížení je aplikováno pomocí dvojice osamělých sil definovaných pomocí ekvivalentně rostoucích posunů, aby mohly být shodně jako při experimentu zaznamenány i sestupné větve diagramu. Vertikální posuny simulující zatížení jsou aplikovány na horní pánsnici ve dvou bodech, viz obrázky 5.44 a 5.49. Přírůstky kroku zatížení jsou různé, aby se vyřešily potenciální numerické problémy.



Obrázek 5.49: Okrajové podmínky nosníku a mechanické zatížení

Teplotní zatížení

Každý nosník je modelován při konstantní teplotě. Krajiní části mezi podporou a působíštěm zatížení jsou uvažovány při pokojové teplotě, 20 °C, zatímco centrální část při zvýšené teplotě, viz obrázek 5.50. Tabulka 5.8 uvádí teplotní zatížení v jednotlivých simulacích. Teplotní zatížení je provedeno shodně jako při zkouškách, při kterých byla střední část ohřívána odporovými keramickými dečkami.



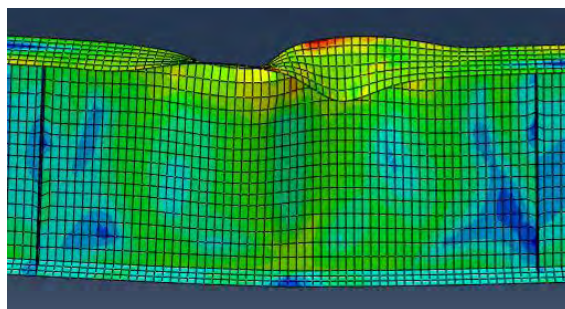
Obrázek 5.50: Rozložení teploty

Tabulka 5.8 Teplotní zatížení v jednotlivých simulacích

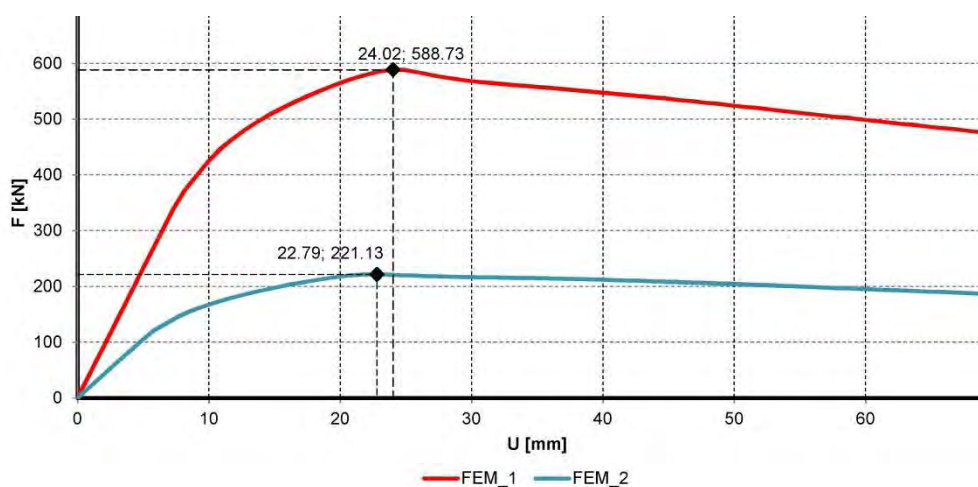
	A (IS 680/250/4/12)		B (IS 846/300/5/8)	
Simulace	1	2	3	4
Tepl. [°C]	450	650	450	650

Výsledky

Na obrázcích 5.51 a 5.52 jsou uvedeny výsledky simulace 1 a simulace 2 (průřez A). Je zde zobrazen deformovaný tvar střední vyhřívané části nosníku a graf závislosti zatížení na deformaci nosníku průřezu A.

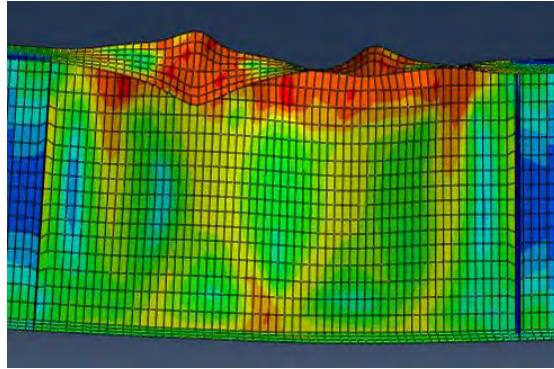


Obrázek 5.51: Deformace střední části nosníku (simulace 1 a 2)

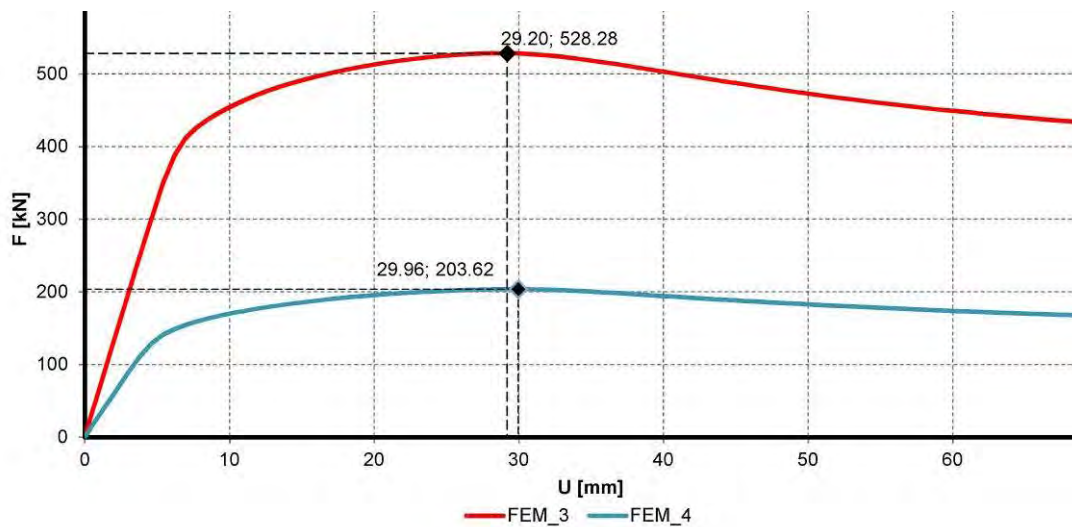


Obrázek 5.52: Graf závislosti zatížení na deformaci (simulace 1 a 2)

Obrázky 5.53 a 5.54 ukazují deformovaný tvar nosníku průřezu B a diagram závislosti zatížení na deformaci nosníku průřezu B získaných ze simulací 3 a 4.



Obrázek 5.53: Deformace střední části nosníku (simulace 3 a 4)



Obrázek 5.54: Graf závislosti zatížení na deformaci (simulace 3 a 4)

Maximální únosnost nosníku je uvedena v tabulce 5.9.

Tabulka 5.9: Únosnost nosníků

Simulace	Průřez	Max. únosnost [kN]
1	A1 (IS 680/250/4/12)	588,73
2	A2 (IS 680/250/4/12)	221,13
3	B1 (IS 846/300/5/8)	528,28
4	B2 (IS 846/300/5/8)	203,62

Příklad uvádí výpočet ohybové únosnosti ocelového nosníku otevřených průřezů 4 třídy bez vlivu příčné a torzní ztráty stability. Výpočet je předveden celkem na čtyřech simulacích lišících se typem průřezu a teplotním zatížením. Příklad ukazuje detaily modelu včetně okrajových podmínek a zavedení imperfekcí do modelu. Kromě maximální ohybové únosnosti nosníků jsou ve výsledcích uvedeny grafy závislosti zatížení na deformaci nosníku a tvary porušení. Model byl validován na experimentu, viz (Jandera et al., 2020).

6 Literatura

- ABAQUS, Analysis user's manual, Volumes I-IV, version 6.10., Providence, 2010.
- Barnett C. F. BFD curve: a new empirical model for fire compartment temperatures, *Fire Safety Journal*, 37(5), 2002, 437-463.
- Bayer K., Rejnö, T. Evacuation Alarm, Optimizing Through Full-scale Experiment. Lund University, 1999.
- Blesák L., Caldová E., Wald F., 2015. Unprotected timber-fibre reinforced concrete slab in fire. *Wood research*, 60 (4), 2015, 605-615.
- Bounagui A., Bénichou N., McCartney C., Kashef A. Optimizing the grid size used in CFD simulations to evaluate fire safety in houses, NRCC – 46760, Institute for research in construction, 2003.
- Budnick E. Automatic Sprinkler System Reliability. *Fire Protection Engineering*, 2001, 7-9.
- Buchanan A. H., Abu A. K. Structural Design for Fire Safety, druhé vydání, John Wiley & Sons, Chichester 2017.
- Buchanan A. H. Structural design for fire safety, John Wiley & Sons, Chichester 2003.
- Cábová K. a kol. Virtual test of fire-resistance of a timber beam, SIF, Ulster University, Ulster, 2018.
- Cábová K., Kučera J., Parametrické modely požáru pro EN 1991-1-2:2021, *Konstrukce*, 2018, 17 (3), 39-42.
- Cábová K., Zeman F., Wald F., Virtuální pec pro zkoušení požární odolnosti konstrukcí, *Konstrukce*, 2018, 17 (5), 35-39.
- Cepolina E. M., Phased evacuation: An optimisation model which takes into account the capacity drop phenomenon in pedestrian flows, *Fire Safety Journal*, 2009, 44, 532-544.
- Crocker J.P. a kol. The effect of sprinkler on fire induced doorway flows, New tools for performance based design, *Fire technology*, 2010, 347-362.
- Deibjerg T. a kol. Argos User's Guide. Copenhagen: Danish Institute of Fire and Security Technology, 2003.
- Drysdale D. The Flashover Phenomenon, *Fire Engineers Journal*, 1996, 23, 152-167.
- ECCS 75, Fire safety in open car parks, ECCS, Brussels, 1993.
- FEMA 2005, Final Reports from the NIST Investigation of the World Trade Center Disaster, FEMA, 2005, 2008, 2009, 2012, www.nist.gov.
- Filipi B. Nauka o materiálu, SPBI, Ostrava, 2003.
- Francis P., Badoo N., Hanus H., Thauvoye Ch., Cábová, K., Lišková, N., Sokol, Z., Wald, F. Návrh sloupu vystaveného lokálnímu požáru, Praha: CTU. Czech Technical University Publishing House, 2018.
- Franssen J. M. OZone V2, Université Liege, URL: www.ulg.ac.be/matstruc/download.html, Liege, 2004.
- Franssen J. M., SAFIR. A thermal/structural program modelling structures under fire, *Engineering Journal*, 2005, 42 (3), 143-158.
- Frantzisch H., Nilssonlsson D., Eriksson O. Evaluation and validation of evacuation programs. Lund University, 2007.
- Fruin J. J. Pedestrian Planning and Design, *Elevator World*, 1971.
- Galea E, a kol. Evacuation response behaviour of occupants in a large theatre during a live performance, *Fire and Materials*, 2017.
- Galea E, Blake S. Collection and analysis of human behaviour data appearing in the mass media relating to the evacuation of the World Trade Centre towers of 11 September 2001, 2004.
- Galea E, The UK WTC9/11 Evacuation study: an overview of the methodologies employed and some preliminary analysis. V 4th Pedestrian and Evacuation Dynamics Conference, 2008.
- Galea E. Approximating the evacuation of the World Trade Center North Tower using computer simulation, *Fire Protection Engineering*. 2008, 18 (2), 85-115.
- Gillie M., Author's Analysis of heated structures: Nature and modelling benchmarks, *Fire Safety Journal*, 2009, 44, 673-680.

- Grosshandler W. L., Bryner N. P., Madrzykowski D. Report of the technical investigation of the station nightclub fire, NIST, 2005.
- Heskestad G., Smith H. F. Investigation of a new sprinkler sensitivity approval test (the plunge test), Norwood, Factory Mutual Research Corporation, 1976.
- Hoogendoorn S. P., Daamen W., Pedestrian behaviour at bottlenecks. *Transportation Science*, 2005, 39, 147-159.
- Horová K., Jána T., Wald F. The effect of fire spread on steel-concrete floor, *Progress on Safety of Structures in Fire*. Shanghai: Tongji University Press, 2014, 737-744.
- Horová K. Modelling of fire spread in structural fire engineering, Ph.D. práce, ČVUT v Praze. 2015.
- Hosser D., Zehfuss A J. Fire Safety Design of Multi-Storey Buildings for Natural Fires. Technical University of Braunschweig, 2016.
- Huang Z., Burgess I. W. and Plank R. J. Three-dimensional modelling of two full-scale fire tests on a composite building, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 1999, 134 (3), 243-255.
- Hurley M. J., Rosenbaum E. R. Performance-based fire safety design, CRC Press. 2015.
- Hurley M. J. SFPE Handbook of fire protection engineering, Springer, New York, 2016.
- Husted B. P., Westerman D. ARGOS - Theory Manual. Danish Institute of Fire and Security Technology, Hvidovre, 2009.
- Hyatt N. Guidelines for process hazards analysis. Dyadem Press, Washington, 2003.
- Jandera M., Prachař M., Wald F., Lateral-torsional buckling of class 4 section uniform and web tapered beams at elevated temperature, *Thin-Walled Structures*, 2020, 146, v tisku.
- Jason A. Final Report on the Collapse of the World Trade Center Towers. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster, Occupant Behaviour. Egress and Emergency Communications, NIST, 2005.
- Kawagoe K. Fire behaviour in room, 27, Building Research Institute, Japan Ministry of Construction, Tokyo 1958.
- Krempaský J. Fyzika, Alfa, Bratislava, 1988.
- Kučera J., Parametrické modely požáru pro EN 1991-1-2:2021, diplomová práce, ČVUT v Praze, 2019.
- Kučera P. a kol. Metodický postup při odlišném způsobu splnění technických podmínek požární ochrany. SPBI, Ostrava, 2008.
- Kučera P. a kol. Požární inženýrství - Aktivní prvky požární ochrany, SPBI, Ostrava, 2013.
- Kučera P. a kol. Praktické poznatky ze zkoušek určených pro validaci modelů hašení sprinklerovou hlavici, *Advances in fire and safety engineering*, STU, Bratislava, 2017.
- Kučera P., Pokorný J. Metodika pro specifické posouzení vysoce rizikových podmínek požární bezpečnosti s využitím postupů požárního inženýrství. VŠB-TU Ostrava, FBI, Ostrava, 2014.
- Kuligowski E. D., Peacock R. D. Building Occupant Egress Data, Report of Test FR 4024, NIST, 2010.
- Kwaśniewski L. On practical problems with verification and validation of computational models, *Archives of Civil Engineering*, 55 (3), 2009, 323-346
- Kwaśniewski L., Bojanowski, C. Principles of verification and validation, *Journal of Structural Fire Engineering*, 6 (1), 2015, 29-40.
- Lee J. Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door opening. *Nuclear Engineering and Technology*, 2019, 410-423.
- Lönnermark A., Ingason H. Fire Spread in Large Industrial Premises and Warehouses, Brandforsk project 630-021, SP Swedish National Testing and Research Institute, 2005.
- Lopes A. M. G., Vaz G. C., Santiago A. Numerical simulation of wooden crib fire inside compartment, paper S2F, Techno-Press, Soul, 2004.

- Madryzkowski D., Vettori R. L. Sprinkler fire suppression algorithm for the gsa engineering fire assessment system. NIST, Gaithersburg, 1992.
- Marshall A. W. Modelling aspects of sprinkler spray dynamics in fires. 2004
- McGrattan K., Hostikka S., Floyd J. Fire Dynamics Simulator (Version 6), User Guide. NIST Special Publication 1019-6. Baltimore, NIST, 2016, No. 1019, 2019.
- McGratta K., a kol. Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Volume 2 – Verification, NIST Special Publication 1018-2. Baltimore, NIST 2019.
- Nilsson D., Johansson A., Social influence during the initial phase of a fire evacuation - analysis of evacuation experiments in a cinema theatre, *Fire Safety Journal*, 2009, 44 (1), 71-79.
- Novozhilov V. Computational fluid dynamics modeling of compartment fires, *Progress in energy and combustion Science*, 2001, 27, 611-666.
- Nystedt F. Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Building, Lund University, Lund, 2011.
- O Connor M. A, Martin D. M. Behaviour of a multi-storey steel framed building subjected to fire attack, *Journal of Constructional Steel Research*, 1998, 46 (1-3), 295.
- Oberkampf W. L., Trucano T. G. Design of and Comparison with Verification and Validation Benchmarks, 2002.
- Oberkampf W. L., Trucano T. G. Verification and validation benchmarks, *Nuclear Engineering and Design*, 2008, 238, 716-743.
- Pauls J. Vertical Evacuation in Large Buildings: Missed Opportunities for Research. *Disaster Management*, 1994, 6 (3), 128-132.
- Pček M., Bumba J., Kelnar L., Sluka V., Postupy a metodiky analýz a hodnocení rizik pro účely zákona o prevenci závažných havárií, VUBP, 2000.
- Peacock R. D. a kol. CFAST, Consolidated Fire and Smoke Transport, Version 7. Vol. 1, Technical Reference Guide. NIST, Gaithersburg, 2018.
- Peacock, R. D. a kol. A user's guide for FAST, Engineering tools for estimating fire growth and smoke transport, NIST, Gaithersburg, 2000.
- Pettersson O. The connection between the real fire exposure and the heating conditions according to standard fire-resistance tests with special application to steel structures, *CECM 3-73/73, ECCS*, Brusel, 1973.
- Pettersson O., Magnusson S. E., Thor A. J., *Fire Engineering Design of Steel structures*. 1976.
- Proulx G. High-Rise Evacuation: A Questionable Concept, v 2nd International Symposium on Human Behaviour in Fire. 2001.
- Purser D. A., Bensilum M. Quantification of behaviour for engineering design standards and escape time calculations, v *Human Behaviour in Fire*, 1998.
- Ranby A., Inha T., Myllymäki A. J. *Structural Steel Fire Design*. SBI 134, 2000.
- Rasbash D. The extinction of fire with plain water a review. V *IAFSS Symposiums Fire Safety Science*, Springer-Verlag, Berlin, 1986, 1145-1163.
- Reichel V. Navrhování požární bezpečnosti výrobních objektů, edice Zabraňujeme škodám, Česká státní pojišťovna, 17, Praha, 1987.
- RIMEA, Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungs-Analysen, 2009.
- Roache P. J. *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*, Computing in Science Engineering, Hermosa Publishers, 1998.
- Ronchi E., Nilsson D. Fire Evacuation in High-Rise Buildings: A Review of Human Behaviour and Modelling Research, v *Fire Science Reviews*, 2013, 2 (7).
- Ronchi E., Nilsson D., Kuligowski E. D., The process of verification and validation of building fire evacuation models, NIST, 2013.

- Rybář P. Sprinklerová hasicí zařízení, Praha, Výzbrojna požární ochrany, 1993.
- Särdqvist S. An engineering approach to fire fighting tactics, Lund University, Lund, 1996.
- Särdqvist S. Water and other extinguishing agents. Karlstad: NRS Tryckeri AB. 2002
- Seyfried A., Rupprecht T., Winkens A. Capacity estimation for emergency exits and bottlenecks, v INTERFLAM 2007, 2007.
- Sheppard D. Spray Characteristics of Fire Sprinklers. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2002.
- Shestopal V. O. Firewind: computer software for the fire engineering professional, NSW Fire Modelling & Computing, Wahroonga, 2003.
- Schick R. Spray technology reference guide: understanding drop size. Wheaton: Spray Analysis and Research Services . 2008
- Schleich J. B., Cajot L. G., Pierre M. Competitive steel buildings through natural fire safety concept, CEC 7210-SA, Brussel 1999.
- SIMULIA, Abaqus 6.11 Benchmarks Manual, © Dassault Systèmes, 2011.
- Smith D. B. Fire Safety Engineering, CIBSE Guide E, 2010.
- Sokol Z.; Wald F.; Kallerová, P. Bonnet, N. Column Behaviour during Localised Fire Test, SIF, NTU, Singapore, 2008, 256-263.
- Staffanson L., Selecting design fires, diplomová práce, Lund University, Lund, 2010.
- Stamatis D. H. Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution, ASQ Quality Press, Milwaukee, 2003.
- Studnička J., Holický M., Marková J. Ocelové konstrukce 2, Zatížení, ČVUT v Praze, 2011.
- Sze C. Response time index of sprinklers. International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes, 2009, 1-6.
- Šimonek O. Validace experimentálně naměřených parametrů sprinklerových hlavic zónovými modely požáru, bakalářská práce, VŠB-TUO Ostrava, 2018.
- Tsui A., Spearpoint M. J. Variability of sprinkler response time index and conduction factor using the plunge test, Building Services Engineering Research and Technology, 2010, 163-176.
- Vulcan User's Manual, Vulcan Solutions Ltd, Sheffield, UK.
- VULCAN, A Program for the three-dimensional analysis of steel, composite and concrete framed structures in fire, Sheffield 2004.
- Wade C. a kol. B-RISK 2016, User guide and technical manual. Porirua, BRANZ, 2016.
- Wade C. A., BRANZFIRE technical reference guide, Building Research Association, Association of New Zealand, Judgeford, 2002.
- Wade, C. et al. (2016). B-RISK 2016 User Guide and Technical Manual. Porirua: BRANZ.
- Wald F. a kol. Dílčí zpráva s výsledky literární rešerše pro řešení VP MV ČR č. VI20162019034, ČVUT Praha, 2017.
- Wald F., Burgess I., Kwasniewski L. Horová K. a kol. Benchmark studies, Verification of numerical models in fire engineering, Czech Technical University Publishing House <http://fire.fsv.cvut.cz/ifer>, Praha, 2014.
- Wald F., Burgess I., Kwasniewski L. Horová K. a kol. Benchmark studies, Experimental validation of numerical models in fire engineering, Czech Technical University Publishing House, <http://fire.fsv.cvut.cz/ifer>, Praha, 2014.
- Wang Y.C., Burgess I.W., Wald F., Gillie, M. Performance-Based Fire Engineering of Structures, CRC Press, 2012.

- Węgrzyński W., Sulik P. The philosophy of fire safety engineering in the shaping of civil engineering development bulletin of the polish academy of sciences Technical sciences, 64, 4, 2016, DOI: 10.1515/bpasts-2016-0081.
- Węgrzyński W., Tofilo P. Hand Calculations, zone models and CFD – areas of disagreement and limits of application in practical fire protection engineering, 11th SFPE, Warsaw, 2016.
- Weidmann U. Transporttechnik der Fussgänger. Institut für Verkehrsplanung, Transporttechnik, Strassen- und Eisenbahnbau, 1993.
- Yan Z. CFD fire simulation and its recent development, Transport phenomena in fires, kap. 10, 357-405, WIT Press, 2008.
- Yeoh G. H., Yuen, K. K. Computational fluid dynamics in fire engineering; Butterworth-Heinmann, 2009.
- Zehfuss J. Case studies of a new simplified natural fire model and safety concept for structural fire safety design. 2011.
- Zehfuss J. Hosser A. D. A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. Fire Safety Journal, 2007, 42(2), 115–126.

Normy

- AIAA, Guide for the Verification and Validation of Computational Fluid Dynamics Simulations, AIAA G-077-1998, New York, 2002.
- AICE Guidelines for hazard evaluation procedures, with worked examples, Center for Chemical Process Safety, American Institute of Chemical Engineers, New York, 1992.
- ASFP, Fire protection for structural steel in buildings, Association for Specialist Fire Protection, London 2002.
- ASME V&V 20-2009 Standard for verification and validation in CFD and heat transfer engineering guide for estimating material pyrolysis properties for fire modeling, WPI, 2012.
- ASTM E119-95a Standard methods of the fire tests of building construction and material, Designation, Philadelphia 1995.
- ČSN 73 0802 Požární bezpečnost staveb, Nevýrobní objekty. 2009.
- ČSN 73 0804 Požární bezpečnost staveb - Výrobní objekty, ČNI, Praha, 2010.
- ČSN EN 1990 Zásady navrhování konstrukcí, ČNI, 2015.
- ČSN EN 1991-1-1 Zatížení konstrukcí, Obecná zatížení, Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb, ČSNI, Praha 2004.
- ČSN EN 1991-1-2 Zatížení konstrukcí, Obecná zatížení, Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru, ČSNI, Praha 2004.
- ČSN EN 1991-1-3 Zatížení konstrukcí, Obecná zatížení, Zatížení sněhem, ČSNI, Praha 2004.
- ČSN EN 1991-1-4 Zatížení konstrukcí, Obecná zatížení, Zatížení větrem, ČSNI, Praha 2004.
- ČSN EN 1991-1-5 Zatížení konstrukcí, Obecná zatížení, Zatížení teplotou, ČSNI, Praha 2004.
- ČSN EN 1992-1-2 Navrhování betonových konstrukcí, Obecná pravidla, Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI Praha, 2006.
- ČSN EN 1993-1-2 Navrhování ocelových konstrukcí, Obecná pravidla, Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI Praha, 2007.

ČSN EN 1995-1-2 Navrhování dřevěných konstrukcí, Obecná pravidla, Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI 2006.

ČSN ISO 2394 Obecné zásady spolehlivosti konstrukcí, ČNI, Praha, 2016.

DIN EN 1991-1-2 DIN NA German National Annex to Eurocode 1, Actions on structures, General actions, Actions on structures exposed to fire, DIN, Berlin 2010.

DS EN 1991-1-2 DK NA Denisch National Annex to Eurocode 1, Actions on structures, General actions, Actions on structures exposed to fire, Copenhagen, 2014.

EU Regulation No 305/2011 of the European Parliament and Council, Harmonised conditions for the marketing of construction, 2011, URL: eur-lex.europa.eu.

ISO FDIS 16730 Fire safety engineering — Assessment, verification and validation of calculation methods, ISO, Geneva, 2008.

ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO, Geneva, 1993.

ISO TR 13387-8 Fire Engineering: Life Safety, Occupant Behaviour, Location and Condition. 1999.

ISO TR 15656 Fire resistance — Guidelines for evaluating the predictive capability of calculation models for structural fire behaviour , ISO, Geneva, 2003.

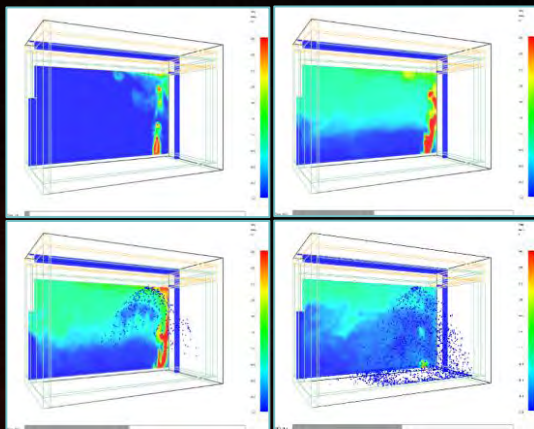
NAFEMS National Agency for Finite Element Methods, <http://www.nafems.org/>, 2013.

SFPE Engineering Guide to Performance-Based Fire Protection. 2. vydání, SFPE 2007.

SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5. vydání, SFPE 2016.

UKAS, The Expression of Uncertainty in Testing, United Kingdom Accreditation Service, 2000.

VdS 2815 Zusammenwirken von Wasserlöschanlagen und Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA), Merkblatt zum Brandschutz. Köln: VdS Schadenverhütung, 2018.



Ověřování modelů v požární bezpečnosti

Kamila Cábová, Lucie Hasalová, Tomáš Apeltauer, Petr Kučera, František Wald

Monografie shrnuje pokročilé modely pro požární návrh budov. Pro návrh požáru analytickými a zónovými modely a počítačovou dynamikou plynů jsou uvedeny vstupy, metodika řešení a výstupy. Jsou ukázány validace a verifikace, studie citlivosti a ověřovací příklady. Pro modelování hašení stabilními hasicími zařízeními je shrnuta problematika, ukázáno modelování kapek vody, možnosti simulace hasicích zařízení a jsou uvedeny ověřovací příklady. Pro návrh evakuace jsou ukázány možnosti řešení. Je zdůrazněno pravděpodobnostní modelování a jsou uvedeny základní verifikační příklady. Pro chování konstrukce za požáru jsou shrnuty obecné přístupy. Pro pokročilé modely při výpočtu na zahřáté konstrukci jsou ukázána úskalí řešení, požadavky na vstupy a výstupy, nutnost validace a verifikace modelů a důležitost verifikačních příkladů.

ISBN 978-80-01-06616-4, on line ISBN 978-80-01-06620-1

ISBN 978-80-01-06616-4



9 788001 066164