

Příjemce: Fakulta stavební ČVUT v Praze
Technický ústav požární ochrany
Vysoké učení technické v Brně
VŠB – TUO Fakulta bezpečnostního inženýrství

Poskytovatel: Česká republika - Ministerstvo vnitra

Projekt s názvem: **Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb**

s identifikačním kódem **VI20162019034**

Název předkládaného výsledku:

Modelování potlačení a hašení požáru pomocí sprinklerové ochrany

Typ výsledku dle UV č. 837/2017	Evidenční číslo (příjemce u organizace)	Rok vzniku
(N_{metC}) 4 Metodika schválená příslušným orgánem státní správy, do jehož kompetence daná problematika spadá		2019
ISBN-ISSN	Webový odkaz na výsledek	Č.j. + kdy a kde publikováno
		2019

Anotace výsledku:

Metodika představuje základy zabezpečení aktivními požárně bezpečnostními zařízeními. Následně se věnuje problematice matematického modelování kontroly, potlačení a uhašení požáru prostřednictvím sprinklerové ochrany. Metodika je vedena od popisu principu a teorie hašení, po představení dostupných matematických modelů. Metodika je prvním uceleným dokumentem tohoto charakteru v České republice, který detailněji stanoví zásady kontroly, potlačení a uhašení požáru pomocí sprinklerové ochrany a jeho matematickým modelováním (principy sprinklerové ochrany, strategie modelování procesu hašení a zejména pak práce s užitím vstupních dat).

Metodika má zřetelný přínos pro novodobou oblast požární ochrany a metodicky poukazuje nejen na specifika postupů při návrhu matematického modelu zpracovatelem, ale také instruuje o principech kontroly vstupů i výstupů předložených modelů formou check-listu pro posuzovatele.

Řešitelský tým:

doc. Ing. Petr Kučera, Ph.D.
Ing. Dana Chudová, Ph.D.
Ing. Adam Thomitzek
Ing. Lucie Hasalová, Ph.D.

MINISTERSTVO VNITRA

Generální ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky
Kloknerova 26, pošt. příhr. 69, 148 01 PRAHA 414

Podle § 7 odst. 5 a v návaznosti na § 7 odst. 2 až 4 zákona č. 239/2000 Sb.,
o integrovaném záchranném systému a změně některých zákonů ve znění
pozdějších předpisů a podle § 26 odst. 1 a § 24 odst. 1 zákona č. 133/1985
Sb., o požární ochraně ve znění pozdějších předpisů
je vydáno

OSVĚDČENÍ O CERTIFIKACI METODIKY

Číslo : CERO 4/2019

Název metodiky:

Modelování potlačení a hašení požáru pomocí sprinklerové ochrany

Dedikace

VI20162019034

Zpracovatel metodiky:

Petr Kučera

Dana Chudová

Adam Thomitzek

Lucie Hasalová

V Praze dne 17.9.2019



plk. Ing. Daniel Miklós, MPA
náměstek generálního ředitele HZS ČR
pro prevenci a civilní nouzovou připravenost



Modelování potlačení a hašení požáru pomocí sprinklerové ochrany

Název projektu: Výzkum a vývoj ověřených modelů požáru a evakuace osob a jejich praktická aplikace při posuzování požární bezpečnosti staveb (VI20162019034)

Poskytovatel: Ministerstvo vnitra České republiky

duben 2019

Obsah

1	Cíle a uplatnění metodiky	4
2	Struktura metodiky	4
3	Zabezpečení aktivními požárně bezpečnostními zařízeními	5
3.1	Koordinace požárně bezpečnostních zařízení	5
3.2	Interakce požárně bezpečnostních zařízení	6
4	Principy sprinklerové ochrany	8
4.1	Základní termíny hašení požárů sprinklerovou ochranou	8
4.2	Hasební efekt vody	8
4.3	Tepelná bilance při hašení vodou	9
5	Modely pro kontrolu, potlačení a uhašení požáru sprinklerovou ochranou	10
5.1	Základní dělení modelů	10
5.2	Zjednodušené modely	11
5.3	Expertní/pokročilé modely	11
5.4	Aplikace zjednodušených a expertních/pokročilých modelů	12
6	Doporučení pro zpracovatele modelování sprinklerové ochrany	13
6.1	Změna průběhu požáru při aktivaci sprinklerové ochrany	13
6.2	Rozvoj požáru před aktivací sprinklerové hlavice	14
6.3	Rozvoj požáru po aktivaci sprinklerové hlavice	15
6.3.1	Konstantní tepelný výkon po aktivaci sprinklerové hlavice	15
6.3.2	Pokles tepelného výkonu po aktivaci sprinklerové hlavice	15
6.3.3	Pokles tepelného výkonu po aktivaci sprinklerové hlavice následovaný sníženým konstantním výkonem požáru	16
6.3.4	Komplexní simulace procesu hašení	17
6.4	Strategie modelování procesu hašení	17
6.5	Vstupní parametry pro zjednodušené modely hašení	18
6.5.1	Otevírací teplota sprinklerové hlavice	18
6.5.2	RTI - index reakční doby (Response Time Index)	18
6.5.3	C-faktor	20
6.5.4	Intenzita dodávky vody	21
6.5.5	Vzdálenost od požáru	22
6.5.6	Vzdálenost mezi sprinklery	22

6.5.7	Pravděpodobnost kontroly nebo potlačení požáru	23
6.5.8	Spolehlivost sprinklerové ochrany	23
6.5.9	Součinitel ochlazení	23
6.5.10	Shrnutí vstupních parametrů.....	23
6.6	Vstupní parametry pro expertní/pokročilé modely hašení.....	24
6.6.1	Průtok vody	24
6.6.2	Parametr „offset“	25
6.6.3	Úhel rozstříku (tvar rozstříku).....	26
6.6.4	Velikost kapek	26
6.6.5	Počet kapek.....	28
6.6.6	Počáteční rychlost pohybu kapek.....	29
6.6.7	Koeficient zhášení.....	29
6.6.8	Propojení s modelem požáru	29
6.6.9	Shrnutí zadávání vstupních parametrů	30
6.7	Výstupní parametry modelů kontroly, potlačení a uhašení požáru	32
6.8	Zohlednění interakce při modelování hašení	33
6.9	Závěrečné shrnutí pro zpracovatele	34
7	Doporučení pro posuzovatele modelování sprinklerové ochrany.....	35
	Reference.....	36
	Seznam obrázků	38
	Seznam tabulek.....	38
	Přílohy	39
	A. Kontrolní seznam (check list) pro posuzovatele.....	39

1 Cíle a uplatnění metodiky

Při modelování kontroly, potlačení a uhašení požáru pomocí sprinklerové ochrany musí zpracovatelé projektové dokumentace dodržovat zásady pro jejich zpracování a tím přiměřeně zajistit jejich obsahovou a formální správnost. Základem modelování je správná volba vhodného modelu a jeho vstupních parametrů. Pro různé objekty a provozy je právě nezbytná správná volba modelu a počátečních parametrů. Znalost uvedených dat je nezbytná rovněž pro hodnotitele projektové dokumentace včetně návrhů systémů pro kontrolu, potlačení a uhašení požárů, kterými jsou příslušníci Ministerstva vnitra – generálního ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky a hasičských záchranných sborů krajů při posuzování správnosti návrhu těchto modelů.

Metodika představuje základy zabezpečení aktivními požárně bezpečnostními zařízeními. Následně se věnuje problematice matematického modelování kontroly, potlačení a uhašení požáru prostřednictvím sprinklerové ochrany. Metodika je vedena od popisu principu a teorie hašení, po představení dostupných matematických modelů.

Metodika nachází uplatnění při projektování požární bezpečnosti staveb a také při schvalování projektové dokumentace požární bezpečnosti staveb v rámci výkonu státního požárního dozoru.

Metodika je určena všem, kteří mají vazbu na dokumentaci požární bezpečnosti staveb:

- zpracovatelům projektové dokumentace požární bezpečnosti staveb,
- projektantům návazných oblastí, ať již jde o obory Pozemní stavby, Statika a dynamika staveb nebo Technická zařízení budov,
- posuzovatelům dokumentace, tedy příslušníkům Ministerstva vnitra – generálního ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky a hasičských záchranných sborů krajů, kteří posuzují dokumentaci staveb v rámci výkonu státního požárního dozoru a související podklady.

2 Struktura metodiky

Metodika je tematicky rozdělena do následujících kapitol:

- **Kapitola 3** seznamuje se způsoby zabezpečení aktivními požárně bezpečnostními zařízeními včetně jejich koordinace a interakce.
- **Kapitola 4** rozvádí základní principy sprinklerové ochrany pro účely simulace.
- **Kapitola 5** stručně popisuje základní rozdělení modelů pro sprinklerovou ochranu.
- **Kapitola 6 (pro zpracovatele)** předkládá postupy související zejména s vhodným sestavením strategie a návrhu vstupního souboru modelů hašení.
- **Kapitola 7 (pro posuzovatele)** informuje o principech kontroly vstupů i výstupů předložených modelů. Postup kontroly je v **příloze A** zpracován formou souboru otázek vedoucích k jasnému vymezení typu předkládaného modelu a úplnosti vstupních i výstupních údajů.

3 Zabezpečení aktivními požárně bezpečnostními zařízeními

Aktivní požárně bezpečnostní zařízení hrají významnou roli zejména v prvotní fázi požáru, po jeho iniciaci, ale před celkovým vzplanutím (flashoverem). Tato 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, P. et al, 2008).

3.1 Koordinace požárně bezpečnostních zařízení

Součástí projektového návrhu je rovněž koordinace požárně bezpečnostních zařízení. Rozsáhlé nebo rizikové stavby jsou charakteristické současnou instalací více druhů vyhrazených 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 součástí posouzení koordinace a interakce zařízení také zařízení pro detekci hořlavých plynů a par a automatická protivýbuchová zařízení. Součástí posouzení koordinace vyhrazených požárně bezpečnostních zařízení je také vazba na ostatní instalovaná požárně bezpečnostní zařízení.

3.2 Interakce požárně bezpečnostních zařízení

Interakcí požárně bezpečnostních zařízení se rozumí vzájemné ovlivnění působení (činnosti) zařízení, a to jak v pozitivním, tak 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 1.

Tabulka 1: Kombinace SHZ a ZOKT (Kučera, P. et al., 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 ESFR	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 uvedené v tabulce 1 nelze vnímat dogmaticky. V praxi se může vyskytnout řada situací, které budou vyžadovat odlišný způsob řešení.

Při společných návrzích sprinklerových hasicích zařízení a ZOKT je nutné respektovat určitá omezení vyplývající z konkrétně zvolené kombinace (viz tabulka 2). Popisovaná limitující doporučení jsou založena nejen na teoretických předpokladech, ale také na poznatcích z likvidací pojistných 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 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 tato 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 nutné 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.

4 Principy sprinklerové ochrany

4.1 Základní termíny hašení požárů sprinklerovou ochranou

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.

4.2 Hasební efekt 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 nutné dodat teplo odpovídající měrné tepelné kapacitě vody, tzn. přibližně $4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (musíme dodat 4180 J tepelné energie 1 kg vody, aby se ohřála o 1 K , resp. $1 \text{ }^\circ\text{C}$). Pro vypaření vody o hmotnosti 1 kg je následně nutné dodat asi $2,26 \text{ MJ}$ 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 tím odvádí další teplo.

Hasební voda je obvykle aplikována třemi rozdílnými cestami:

1. Voda je aplikována v drobných kapkách s průměrem menším než $1,0 \text{ mm}$ (Särdqvist, 1996) do plamenů, které jsou ochlazovány odváděním tepla na ohřev a odpaření vody. Když adiabatická teplota plamenů klesne pod cca 1600 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 pásmu spalování) postačuje odvést $30\text{--}35 \%$ uvolněného tepla (Rasbash, 1986). Tato 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.
2. 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 $2 - 3 \text{ mm}$ např. prostřednictvím plného vodního proudu nebo tříštěním vody na tříštiči sprinklerové hlavice za nízkého tlaku. Tyto kapky se nedokáží odpařit v plynné fázi plamenů a dopadají až na povrch hořlavé látky (Rasbash, 1986).

3. Dále je možné v rámci požární obrany vodu aplikovat na povrch hořlavé látky ještě před započítáním procesu hoření.

4.3 Tepelná bilance při hašení vodou

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

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

Při odpaření vody se spotřebuje:

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

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

$$Q_3 = (600 - 100) \cdot 0,00201 = 1,01 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (3)$$

Ve výpočtu uvažujeme, 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:

$$Q_w = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0,38 + 2,26 + 1,01 \doteq 3,6 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (4)$$

Pro uhašení difuzních plamenů postačuje odebrání 1/3 reakčního tepla. Pokud předpokládáme odpaření všech vodních kapek aplikovaných do místnosti, je možné chladicí kapacitu vody ztrojnásobit na 10,8 MJ·kg⁻¹. Model zhašení 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.

5 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 nutné 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. *Pro modelování účinnosti sprinklerové ochrany je metodika zaměřena na modely požáru užívané pro uzavřené prostory.*

5.1 Základní dělení modelů

Výchozí dělení matematických modelů požáru na *zjednodušené, deterministické a pravděpodobnostní* včetně jejich volby je řešeno v *Metodice ověřování modelování, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů*. 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.

- **expertní/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 plynných zplodin hoření uzavřeným prostorem nebo model rozstříku sprinklerových hlavíc vhodný pro účely této metodiky.

Expertní/pokročilé modely hašení komplexně posuzují účinnost sprinklerové ochrany.

Poznámka: CFD modely mohou být použity také jako zjednodušené modely pro stanovení základních návrhových parametrů sprinklerové ochrany.

5.2 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 6.

U těchto typů modelů obvykle dochází k předem definovanému snížení tepelného výkonu požáru. Tímto dochází ke snížení teplot plynů a teplot konstrukcí. Průběh zaznamenaných výstupních parametrů 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).

5.3 Expertní/pokročilé modely

Expertní/pokročilé modely poskytují z pohledu modelování hašení širší možnosti využití. Informují nejen o parametrech 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, více viz část 3.2).

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 či uhašení požáru.

Přehled vybraných programů, které využívají expertních/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.

5.4 Aplikace zjednodušených a expertních/pokročilých modelů

Při modelování procesů kontroly, potlačení a uhašení požáru je možné simulovat průběh fyzikálních a chemických veličin, interakce mezi vodními kapkami a prostředím požáru. V tomto případě užíváme pokročilých (expertních) 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 či menší měrou lišit od skutečnosti. Je možné konstatovat, že zejména problematiku uhašení požáru (zastavení pyrolýzy) současné modely nejsou schopny uspokojivě řešit. Simulace procesu uhašení tak je problémem, na který se bude nutné 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 je možné aplikovat jak pro zjednodušené, tak pro expertní modely. Jedná se o konzervativní postup pro většinu řešených úloh.

6 Doporučení pro zpracovatele modelování sprinklerové ochrany

Kapitola předkládá zpracovateli návrhu sprinklerové ochrany postupy vhodné pro sestavení strategie a vstupních i výstupních parametrů pro modely, které využívají modely hašení.

6.1 Změna průběhu požáru při aktivaci sprinklerové ochrany

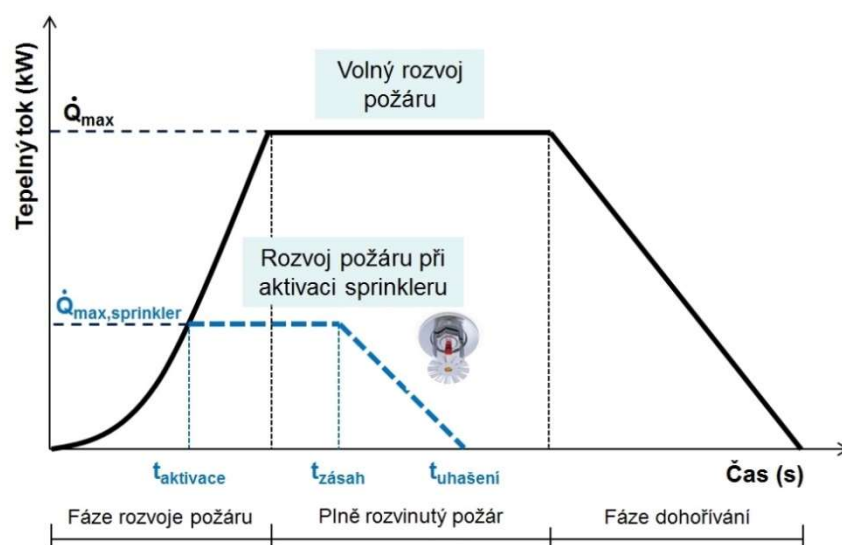
Při aktivaci sprinklerového zařízení (resp. sprinklerové hlavice) dochází v hořícím prostoru ke změně podmínek z hlediska rozvoje požáru, tj. podmínek pro uhašení požáru, potlačení nebo udržení požáru pod kontrolou s následným uhašením jinými prostředky (např. zásahem jednotek PO do úplného uhašení požáru).

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 hlavice 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 1.

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



Obr. 1: Popis průběhu požáru při uvedení sprinklerové ochrany do činnosti v porovnání s volným rozvojem

6.2 Rozvoj požáru před aktivací sprinklerové hlavice

Z výsledků reálných požárních zkoušek vyplývá, že je možné 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.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot t^2 \quad (5)$$

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):

$$\dot{Q} = \dot{Q}_0 \cdot \left(\frac{t}{t_g}\right)^2 \quad (6)$$

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 dle rychlosti rozvoje (pomalá, střední, rychlá a velmi rychlá). V následující tabulce 3 jsou uvedeny příklady požárních scénářů pro jednotlivé charakteristické rychlosti rozvoje požáru.

Tabulka 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

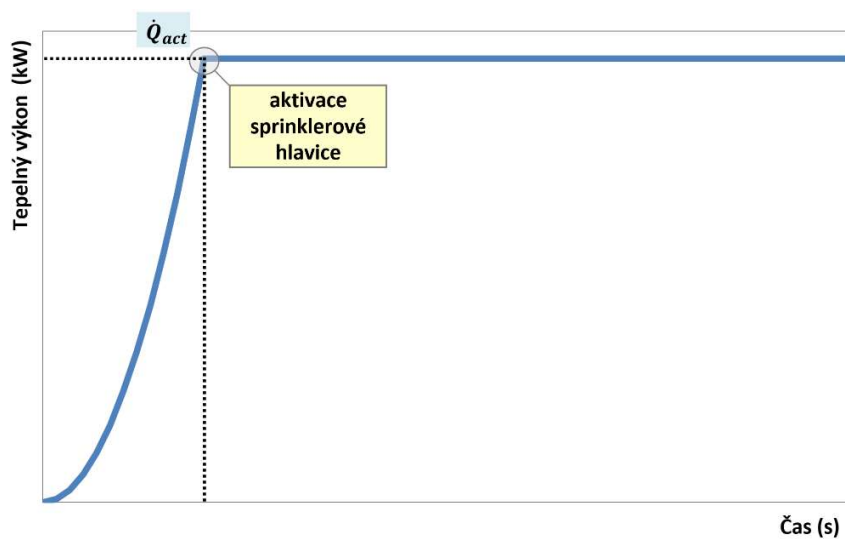
Poznámka: Pro označení rychlosti uvolňování tepla \dot{Q} (resp. tepelného výkonu) se může používat i zkratka HRR nebo RHR (zkratka heat release rate nebo rate of heat release).

6.3 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, je možné jej po aktivaci sprinklerové hlavice upravit. V tomto případě se nejedná o simulaci procesu hašení. Další možností je, že uvolňování tepla závisí na komplexním pyrolýzním modelu, v tomto případě je možné simulovat proces hašení. Dochází zde mimo jiné k ochlazování plynů a povrchů pomocí vodních kapek.

6.3.1 Konstantní tepelný výkon po aktivaci sprinklerové hlavice

. Nárůst tepelného výkonu probíhá dle definované křivky do okamžiku reakce sprinklerové hlavice. 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. Proto je v tomto případě vhodné taky použít tento přístup.



Obr. 2: Průběh požáru s konstantním tepelným výkonem po aktivaci sprinklerové hlavice

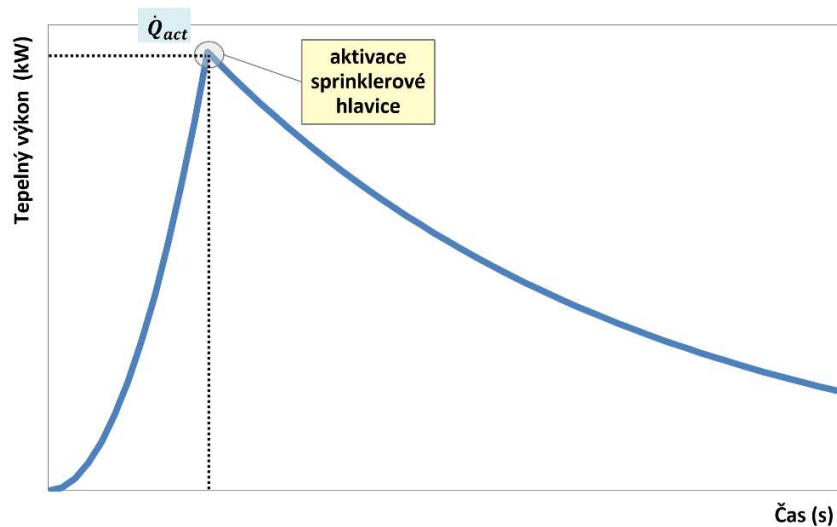
6.3.2 Pokles tepelného výkonu po aktivaci sprinklerové hlavice

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

$$\dot{Q}(\Delta t) = \dot{Q}_{act} \cdot e^{[-\Delta t / 3,0 (\dot{w}^n)^{-1,85}]} \quad (7)$$

- 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.

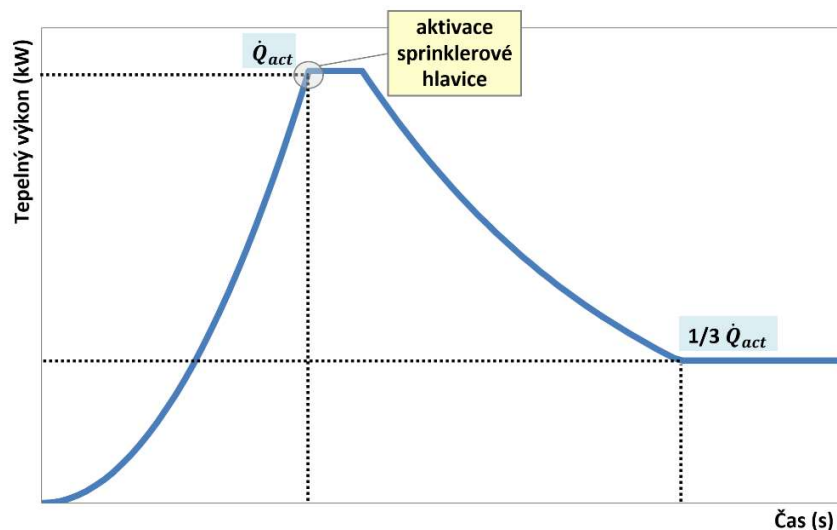


Obr. 3: Průběh požáru s klesajícím tepelným výkonem po aktivaci sprinklerové hlavice

6.3.3 Pokles tepelného výkonu po aktivaci sprinklerové hlavice následovaný sníženým konstantním výkonem požáru

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

- 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.



Obr. 4: Průběh požáru při sníženém konstantním tepelném výkonem po aktivaci sprinklerové hlavice

6.3.4 Komplexní simulace procesu hašení

V případě použití analytického nebo komplexního pyrolýzního modelu, viz metodika *Vstupní data do modelů požáru*, je proces hoření ovlivňován vstupem paliva do výpočetní oblasti. Toto 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.

6.4 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).

6.5 Vstupní parametry pro zjednodušené modely hašení

6.5.1 Otevírací teplota sprinklerové hlavice

Sprinklerové hlavice mají různé otevírací teploty podle prostředí, v jakém jsou instalovány. Tato 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 nutné použít sprinklerové hlavice s vyššími otevíracími teplotami.

Tabulka 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

6.5.2 RTI - index reakční doby (Response Time Index)

Pro stanovení citlivosti prvků snímajících teplotu se používá tzv. *index reakční doby neboli RTI (Response Time Index)*. Tento index zohledňuje samotný reakční čas a otevírací teplotu, zároveň bere v úvahu i teplotu prostředí či 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 tím snížení její reakční doby. Průměr baňky však není jediným parametrem ovlivňujícím RTI, významným faktorem ovlivňujícím RTI je i přestup tepla do těla hlavice i potrubí.

Haskestad a Smith (Heskestad, G. - Smith, H.F., 1976) popsali rychlost nárůstu teploty tepelné pojistky jako:

$$\frac{d(\Delta T_d)}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI} (T_g - T_d) \quad (8)$$

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

$$\frac{d(T_{dv})}{dt} = \frac{\sqrt{u}}{RTI_v} (T_g - T_{dv}) \quad (9)$$

$$\text{kde: } T_{dv} = \left(1 + \frac{C}{\sqrt{u}}\right) \cdot T_d \quad \text{a} \quad RTI_v = \left(\frac{RTI}{1 + \frac{C}{\sqrt{u}}}\right) \quad (10)$$

T_d	teplota teplotní pojistky (°C)
u	rychlost proudění plynů (m·s ⁻¹)
RTI	Response Time Index (m·s) ^{1/2}
T_g	teplota proudícího plynu (°C)
T_{dv}, RTI_v	virtuální hodnota
C	C-faktor (m·s ⁻¹) ^{1/2}

Rovnice (9) a (10) mají ve výsledku stejný tvar, přesto v rovnici (10) je využit pomyslný výraz označený indexem v pro teplotu tepelné pojistky a RTI, který zahrnuje účinky vodivosti paty sprinklerové hlavice. (Heskestad, G. - Smith, H.F., 1976).

Hodnota RTI bez zohlednění probíhajícího vedení tepla může být vyjádřena následovně (Kučera, P. et al, 2008):

$$RTI = \tau \cdot \sqrt{u} \quad (11)$$

$$\text{kde: } \tau = \frac{-t_r}{\ln\left(1 - \frac{\Delta T_{ea}}{T_g}\right)} \quad (12)$$

$$RTI = \frac{-t_r \cdot \sqrt{u}}{\ln\left(1 - \frac{\Delta T_{ea}}{T_g}\right)} \quad (13)$$

τ	časová konstanta (-)
u	rychlost proudění vzduchu (m·s ⁻¹)
t_r	doba aktivace (s)
ΔT_{ea}	rozdíl mezi otevírací teplotou a teplotou okolního prostředí (°C)
T_g	teplota proudícího plynu (°C)
C	C-faktor (m/s) ^{1/2}

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

$$RTI = \frac{-t_r \sqrt{u}}{a \cdot \ln\left(1 - \frac{\Delta T_{ea}}{T_g \cdot a}\right)} \quad (14)$$

kde: $a = \left(1 + \frac{C}{\sqrt{u}}\right)^{-1}$ (15)

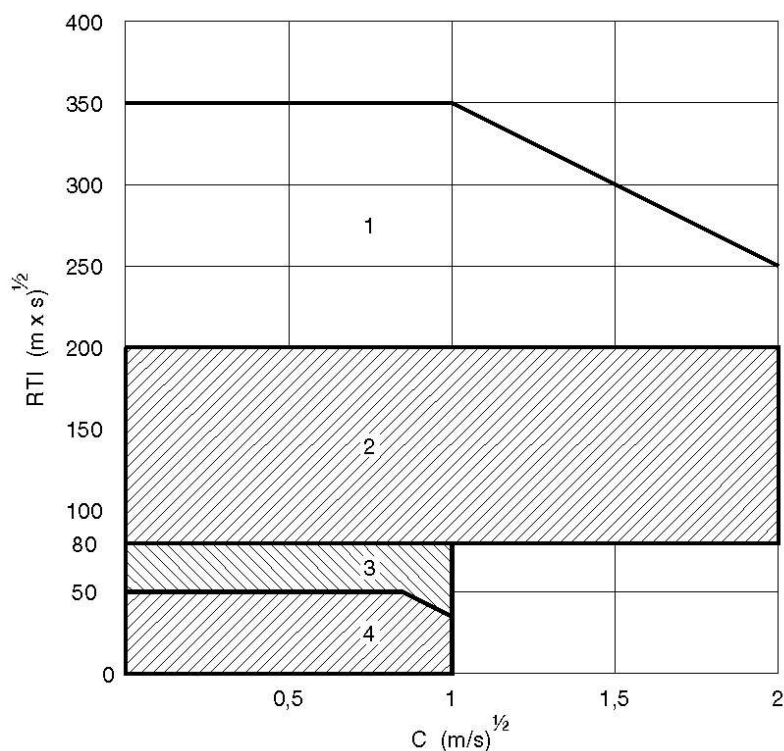
Tabulka 5 popisuje dělení sprinklerových hlavice do čtyř kategorií v závislosti na rozsahu RTI a průměru baňky.

Tabulka 5: Přehled základního rozdělení tepelné odezvy sprinklerových hlavice

Tepelná odezva		Průměr baňky (mm)	RTI (m·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

6.5.3 C-faktor

Parametr nazývaný *C-faktor* zohledňuje vedení tepla do patice sprinklerové hlavice. Nízké hodnoty C-faktoru představují nízký odvod tepla ze sprinklerové hlavice a vysoké znamenají silné ochlazování baňky. Pokud nejsou tepelné ztráty z baňky do připojení hlavice, C-faktor nabývá hodnoty 0 a model přechází na řešení pouze jednoho vstupního parametru.



Obr. 5: Vztah mezi C-faktorem a RTI pro různé typy sprinklerových hlavic dle tepelné odezvy: 1 – standardní B, 2 – standardní A, 3 – speciální, 4 – rychlá (Husted, B.P. - Westerman, D., 2009)

6.5.4 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, B.P. - Westerman, D., 2009).

Tabulka 6: Intenzita dodávky a typy sprinklerových hlavic 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

6.5.7 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.

6.5.8 Spolehlivost sprinklerové ochrany

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

6.5.9 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 ochlazení redukován. Podle experimentálních poznatků (Crocker, J.P. et al., 2010) dochází k omezení hmotnostního toku přes dveře o 16 %, což dává součinitel ochlazení 0,84.

6.5.10 Shrnutí vstupních parametrů

Přehled vstupních parametrů pro definici sprinklerových hlavice pro vybrané zónové modely ARGOS (Deibjerg, T. et al, 2003), B-RISK (Wade, C. et al, 2016), CFAST (Peacock, R.D. et al., 2018) jsou uvedeny v tabulce 9.

Tabulka 9: Porovnání vybraných zónových modelů z hlediska parametrů charakterizujících sprinklery

Vstupní parametr	Argos	B-RISK	CFAST
Otevírací teplota sprinkleru (°C)	Ano	Ano	Ano
RTI - index reakční doby (m·s) ^{1/2}	Ano	Ano	Ano
c-faktor (m·s ⁻¹) ^{1/2}	Ano	Ano	Ne
Intenzita dodávky vody (mm·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).

6.6 Vstupní parametry pro expertní/pokročilé modely hašení

Proces atomizace vodních kapek není plně pochopen a neumíme ho matematicky popsat. Musíme proto do simulace vložit už „hotové“ kapky. Vstupní parametry expertních modelů pro potlačení hoření musí popsat 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 může v jednotlivých výčetních modelech lišit, ale základní sada parametrů sprinklerové hlavice je u všech expertních modelů stejná.

6.6.1 Průtok vody

Průtok vody sprinklerovou hlavicí lze určit jako součin K-faktoru 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 (l·min⁻¹) se vyjádří takovou rovnicí, kdy záleží, v jakých jednotkách je udáván přetlak před hlavicí sprinkleru (Rybář, 1993):

$$Q = K \cdot \sqrt{p_t} \quad (16)$$

nebo

$$Q = K \cdot \sqrt{10 \cdot p} \quad (17)$$

kde p_t přetlak před hlavicí sprinkleru (bar)
 p přetlak před hlavicí sprinkleru (MPa)
 K K-faktor ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1/2}$) pro rovnici (16) nebo ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1/2}$) pro rovnici (17), který vyjadřuje odporový faktor průtoku hlavice sprinkleru; K-faktor se určí:

$$K = \mu \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (18)$$

kde μ výtokový součinitel (-)
 d průměr sprinklerové trysky (m)
 ρ hustota vody ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Tabulka 10 dává přehled průtoků vody sprinklerovými hlavicemi v závislosti na k-faktoru a doporučené třídě nebezpečí.

Tabulka 10: Přehled průtoků vody sprinklerovými hlavicemi v závislosti na k-faktoru a třídě nebezpečí

K-faktor	Doporučeno pro třídu nebezpečí	Nominální průměr trysky	Průtok ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$) 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

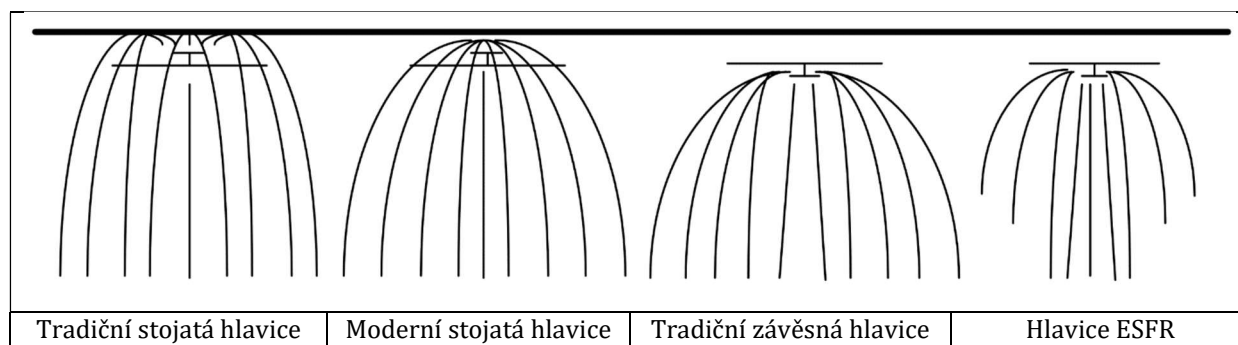
6.6.2 Parametr „offset“

Jedná se o vzdálenost, ve které se při rozstříku sprinklerové hlavice plně vytvoří proud kapek, přičemž významnou roli hraje právě úprava jeho deflektoru.

Parametr „offset“ vymezuje kouli, na jejíž povrch se při simulaci umístí začátek dráhy pohybu rozstříku kapiček. Například v programu FDS je tento parametr přednastaven na hodnotu 0,05 m (McGrattan, K. et al, 2019), avšak experimentální výzkum Shepparda vymezil parametr „offset“ na hodnotu 0,2 m pro různé typy sprinklerových hlavíc (Sheppard, 2002).

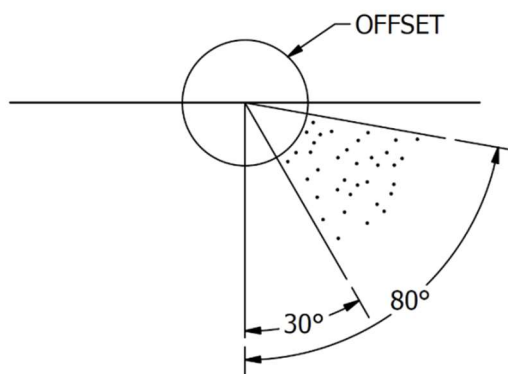
6.6.3 Úhel rozstříku (tvar rozstříku)

Základní tvary rozstříku sprinklerových hlavice jsou znázorněny na obrázku 7 a úzce souvisí s úhly rozstříku, které se dělí na *vnější* a *vnitřní*. Vnější úhel je úhlem vnějšího povrchu kužele rozstříkované vody od svislé osy sprinklerové hlavice. Vnitřní úhel rozstříku je úhlem rozhraní plochy, kde již není voda (např. při rozstříku ve tvaru dutého kužele) od osy svislé sprinklerové hlavice.



Obr. 7: Tvary rozstříku sprinklerových hlavice (Sheppard, 2002)

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



Obr. 8: Ukázka tvaru úhlů rozstříku sprinklerové hlavice (McGrattan, K. et al, 2019)

Parametr „offset“ (viz část 6.6.2) a úhel rozstříku, pod kterým jsou kapky do simulace vkládány, bezprostředně ovlivňuje, jaký tvar bude sprchový kužel mít a tedy plošné pokrytí vodou.

6.6.4 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 milimetru až jednotky milimetru). 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 softwarové implementace pak lze volit parametry 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 dle literatury (Särdqvist, S., 2002) je dána vzorcem:

$$P_v(d) = \frac{1,36 \cdot d^2}{d_v^2} \cdot e^{-0,693 \cdot d^2/d_v^2} \quad (19)$$

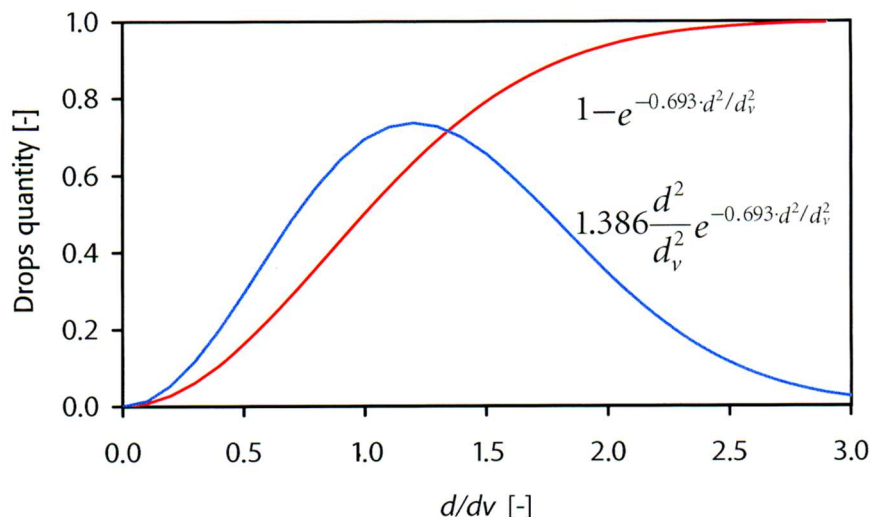
kde d_v střední objemový průměr (mm)
 d průměr určité kapky (mm)

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

$$V(d) = \int_0^d P_v(d) dd = 1 - e^{-0,693 \cdot d^2/d_v^2} \quad (20)$$

kde d_v přibližně závislé na kořenu (root) průměru trysky

Rosin-Rammlerova distribuční funkce udává pravděpodobnost, že kapky mají určitý průměr. Na obrázku 8 je zobrazena společně s kumulativní distribuční funkcí.



Obr. 9: 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 . Tato funkce využívá tvarový parametr θ , lokalizační parametr σ a parametr měřítka m . Případ, kdy $\theta = 0$ a $m = 1$ se nazývá *standardní log-normální distribuce* a je dána rovnicí (Schick, 2008):

$$f(\chi) = \frac{e^{-(\ln \chi)^2 / 2\sigma^2}}{\chi \sigma \sqrt{2\pi}} \quad \chi \geq 0; \sigma > 0 \quad (21)$$

Případ, kdy $\theta = 0$ se nazývá *2-parametrová log-normální distribuce*:

$$f(\chi) = \frac{e^{-(\ln((\chi-\theta)/m))^2 / (2\sigma^2)}}{(\chi-\theta)\sigma\sqrt{2\pi}} \quad \chi \geq 0; m; \sigma > 0 \quad (22)$$

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

6.6.5 Počet kapek

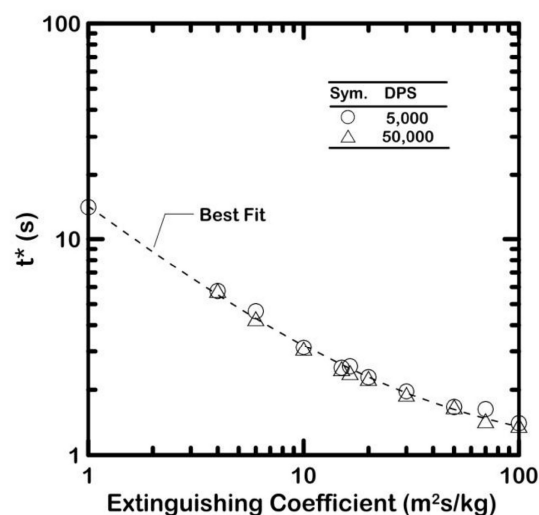
Z numerického hlediska není možné vytvořit v modelu počet kapek, který by odpovídal realitě (kolem 10^8). Celkové množství vody, které je sprinklerem distribuováno do domény, je proto rozděleno do uživatelem specifikovaného množství kapek, které reprezentují celý sprchový proud (obvykle v řádech 10^3). 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 parametr 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 expertního využití modelového nástroje. Počet kapek je třeba otestovat podobně jako velikost sítě hydrodynamického řešiče modelu požáru.

6.6.6 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.

6.6.7 Koeficient zhášení

Zhášecí koeficient je definován v programu FDS jako vlastnost povrchu. Je parametrem expertních 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 jen s opatrností. Hodnota činí $4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ dle manuálu FDS (McGrattan, K. et al, 2019). Vztah mezi dobou hašení (t^*) a koeficientem zhášení pro různá množství kapiček vody (DPS).



Obr. 10: Vztah mezi dobou hašení a koeficientem zhášení (Lee, 2019)

6.6.8 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, čili 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 (*Metodika ověřování modelování, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů*).

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

V kapitole 4 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 pyrolyzního modelu* (metodika *Vstupní data do modelů požáru*). 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 modelujeme 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 (viz část 6.4).

6.6.9 Shrnutí zadávání vstupních parametrů

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

Tento výčet parametrů není úplným výčtem vstupních parametrů, které softwarové nástroje modelující potlačení hoření nabízí. Je ale základním výčtem parametrů, které je nutné 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 expertní oblasti využití značnou nejistotu, proto je vhodné používat citlivostní analýzu výsledků nebo validaci modelu, je-li to možné (více *Metodika ověřování modelování, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů*).

Přehled vstupních parametrů pro definici sprinkleru modelu FDS (McGrattan, K. et al, 2019) včetně přednastavených (defaultních) hodnot jsou uvedeny v tabulce 11. Nutné je upozornit, že přednastavené hodnoty nemusí být hodnotami ověřenými.

Tabulka 11: Přednastavené vstupní parametry pro simulaci sprinklerové hlavice pro program FDS

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

6.7 Výstupní parametry modelů kontroly, potlačení a uhašení požáru

Výstupní parametry zjednodušených i pokročilých modelů hašení jsou obdobné jako výstupy modelů požáru dle Metodiky ověřování modelování, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů.

Základními výstupy z programů, které mohou být ovlivněny procesy kontroly, potlačení a uhašení požáru, jsou:

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

Dalšími parametry 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 kontroly, potlačení a uhašení 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, animace) s přesným popisem sledovaných veličin.

6.8 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 hlavic* – 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 hlavic 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 hlavic, čímž se sníží intenzita dodávky vody pod přijatelnou úroveň nebo se zvýší rozsah poškození vodou. Stejně následky může mít i umístění sprinklerových hlavic poblíž otvorů nuceného větrání.
2. *Vliv ZOKT na účinnost sprinklerových hlavic* – 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 hlavic, 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.

6.9 Závěrečné shrnutí pro zpracovatele

Za správnost řešení, výběr vhodného matematického modelu a interpretace vstupních údajů a výstupů nese vždy odpovědnost zpracovatel modelu. Pro volbu modelu neexistuje jednotný návod. U vysoce komplexních numerických modelů je mnoho hledisek, které výběr ovlivňují. Primárně je výběr řízen kompromisem mezi očekávaným výstupem a možnostmi modelu, dostupností vstupních dat a schopnostmi zpracovatele. Zpracovatel by měl vždy volit co nejjednodušší model, který dokáže popsat řešený problém. Z tohoto důvodu je nutné, aby byl jasně definován cíl výpočtu a kritéria přijatelnosti, podle kterých se bude rozhodovat, zda je navržené a posuzované řešení vhodné či ne.

V řešené oblasti, modelování kontroly, potlačení a uhašení sprinklerovou ochranou, by měla zpracovaná dokumentace obsahovat zdůvodnění výběru modelu, podrobný popis vstupních a výstupních dat.

Pro rychlou kontrolu správného postupu při modelování sprinklerové ochrany a ověření zpracované dokumentace slouží kontrolní seznam (tzv. check list) uvedený v příloze A.

7 Doporučení pro posuzovatele modelování sprinklerové ochrany

Posuzovatel by měl primárně ověřit, zda je výběr modelu řešení i samotné řešení problému bezchybné. K posouzení správnosti potřebuje kompletní, detailně zpracovanou dokumentaci, která je přehledně členěná. Kontrola správného postupu a relevantnost vstupů i výstupů předložených modelů hašení, popř. modelování interakce s dalšími požárně bezpečnostními zařízeními, bude prováděno formou kontrolního seznamu (check list).

Výběr postupu řešení a matematického modelu je nejdůležitějším bodem posudku. Výběr však nebývá jednoznačný a může být důvodem k diskuzi se zpracovatelem. Obecně platí, že výběr by měl být řízen kompromisem mezi očekávaným výstupem a možnostmi modelu, dostupností vstupních dat a schopnostmi zpracovatele. V případě pochybností může posuzovatel od zpracovatele vyžádat doplňující ověření výpočtů (verifikace, validace) nebo studii citlivosti.

Reference

- Budnick, E. (2001). Automatic Sprinkler System Reliability. *Fire Protection Engineering*, 7-9.
- Crocker, J.P. et al. (2010). The effect of sprinkler on fire induced doorway flows: New tools for performance based design. *Fire Technology*, 347-362.
- ČSN 73 0802. (2009). *Požární bezpečnost staveb - nevýrobní objekty*. Praha: ÚNMZ.
- ČSN EN 12845. (2018). *Stabilní hasicí zařízení - Sprinklerová zařízení - Navrhování, instalace a údržba*. Praha: ÚNMZ.
- ČSN EN 1991-1-2. (2004). *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha: Český normalizační institut.
- Deibjerg, T. et al. (2003). *Argos User's Guide*. Copenhagen: Danish Institute of Fire and Security Technology.
- Heskestad, G. - Smith, H.F. (1976). *Investigation of a new sprinkler sensitivity approval test (the plunge test)*. . Norwood: Factory Mutual Research Corporation.
- Husted, B.P. - Westerman, D. (2009). *ARGOS - Theory Manual*. Hvidovre: Danish Institute of Fire and Security Technology.
- Krempaský, J. (1988). *Fyzika (Učebnice pro vysok školy technické)*. Bratislava: Alfa Bratislava.
- Kučera, P. et al. (2008). *Metodický postup při odlišném způsobu splnění technických podmínek požární ochrany*. Ostrava: SPBI.
- Kučera, P. et al. (2013). *Požární inženýrství - Aktivní prvky požární ochrany (Edice SPBI Spektrum 84.)*. Ostrava: SPBI.
- Lee, J. (2019). Numerical analysis on the rapid fire suppression using a water mist nozzle in a fire compartment with a door opening. *Nuclear Engineering and Technology*, 410-423.
- Madryzkowski, D. - Vettori, R.L. (1992). *Sprinkler Fire Suppression Algorithm for the GSA Engineering Fire Assessment System*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- McGrattan, K. et al. (2019). *Fire Dynamics Simulator - User's Guide (NIST Special Publication 1019)*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- Nystedt, F. (2011). *Verifying Fire Safety Design in Sprinklered Buildings*. Lund: Department of Fire Safety Engineering and Systems Safety, Lund University.
- Peacock, R.D. et al. (2018). *CFAST - Consolidated Fire and Smoke Transport (version 7). Volume 1: Technical Reference Guide*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- Rasbash, D. (1986). The Extinction Of Fire With Plain Water: A Review. *IAFSS Symposiums - Fire Safety Science* (stránky 1145-1163). Berlin: Springer-Verlag.
- Reichel, V. (1987). *Navrhování požární bezpečnosti staveb (sv. 17, Knižnice zabraňujeme škodám)*. Praha: Česká státní pojišťovna.

- Rybář, P. (1993). *Sprinklerová hasicí zařízení*. Praha: Výzbrojna požární ochrany.
- Särdqvist, S. (1996). *An Engineering Approach to Fire Fighting Tactics*. Lund : Department of Fire Safety Engineering. Lund University.
- Särdqvist, S. (2002). *Water and other entinguishing agents*. Karlstad: NRS Tryckeri AB.
- Sheppard, D. (2002). *Spray Characteristics of Fire Sprinklers*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.
- Schick, R. (2008). *Spray Technology Reference Guide: Understanding Drop Size*. Wheaton: Spray Analysis and Research Services .
- Sze, C. (2009). Response Time Index of Sprinklers. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 1-6.
- Tsui, A. - Spearpoint, M.J. (2010). Variability of sprinkler response time index and conduction factor using the plunge test. *Building Services Engineering Research and Technology*, 163-176.
- VdS 2815. (2018). *Zusammenwirken von Wasserlöschanlagen und Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA) - Merkblatt zum Brandschutz*. Köln: VdS Schadenverhütung.
- Wade, C. et al. (2016). *B-RISK 2016 User Guide and Technical Manual*. Porirua: BRANZ.

Seznam obrázků

Obr. 1: Popis průběhu požáru při uvedení sprinklerové ochrany do činnosti v porovnání s volným rozvojem	13
Obr. 2: Průběh požáru s konstantním tepelným výkonem po aktivaci sprinklerové hlavice	15
Obr. 3: Průběh požáru s klesajícím tepelným výkonem po aktivaci sprinklerové hlavice	16
Obr. 4: Průběh požáru při sníženém konstantním tepelným výkonem po aktivaci sprinklerové hlavice	17
Obr. 5: Vztah mezi C-faktorem a RTI pro různé typy sprinklerových hlavice dle tepelné odezvy: 1 – standardní B, 2 – standardní A, 3 – speciální, 4 – rychlá (Husted, B.P. - Westerman, D., 2009)....	21
Obr. 6: Schéma doporučeného rozmístění stropních sprinklerů (ČSN EN 12845, 2018).....	22
Obr. 7: Tvary rozstříku sprinklerových hlavice (Sheppard, 2002).....	26
Obr. 7: Ukázka tvaru úhlů rozstříku sprinklerové hlavice (McGrattan, K. et al, 2019)	26
Obr. 8: Rosin-Rammlerova distribuce a kumulativní distribuční funkce (Sheppard, 2002).....	28
Obr. 9: Vztah mezi dobou hašení a koeficientem zhášení (Lee, 2019)	29

Seznam tabulek

Tabulka 1: Kombinace SHZ a ZOKT (Kučera, P. et al., 2013).....	6
Tabulka 2: Kombinační možnosti SHZ a ZOKT (VdS 2815, 2018)	7
Tabulka 3: Příklady požárních scénářů pro jednotlivé kategorie požárů	14
Tabulka 4: Jmenovité otevírací teploty sprinklerů (ČSN EN 12845, 2018).....	18
Tabulka 5: Přehled základního rozdělení tepelné odezvy sprinklerových hlavice.....	20
Tabulka 6: Intenzita dodávky a typy sprinklerových hlavice pro různé třídy nebezpečí (ČSN EN 12845, 2018).....	21
Tabulka 7: Maximální pokrytí a rozmístěných sprinklerů (vyjma stranových) (ČSN EN 12845, 2018).....	22
Tabulka 8: Odhad spolehlivosti sprinklerové ochrany (Budnick, 2001)	23
Tabulka 9: Porovnání vybraných zónových modelů z hlediska parametrů charakterizujících sprinklery	24
Tabulka 10: Přehled průtoků vody sprinklerovými hlavice v závislosti na k-faktoru a třídě nebezpečí.....	25
Tabulka 11: Přednastavené vstupní parametry pro simulaci sprinklerové hlavice pro program FDS	31

Přílohy

A. Kontrolní seznam (check list) pro posuzovatele

Je křivka tepelného výkonu upravena na základě předpokladu aktivace sprinklerů?

- A. Po aktivaci sprinklerů zůstává tepelný výkon konstantní → model předpokládá, že po spuštění sprinklerů dojde k lokalizaci požáru.
 - I. Jak byl stanoven čas, kdy dojde k aktivaci spinklerů?
- B. Po aktivaci sprinklerů tepelný výkon klesá → model předpokládá, že dochází k hašení požáru.
 - Snížení tepelného výkonu je zadáno přímo uživatelem v rámci křivky tepelného výkonu.
 - i. Je předpoklad, že vlivem sprinklerů dojde k hašení požáru pro daný materiál a scénář obhajitelný?
 - ii. Jak byla stanovena rychlost poklesu tepelného výkonu, zdůvodnění použitého postupu?
 - Rychlost poklesu tepelného výkonu je simulována softwarem na základě tzv. extinkčního koeficientu (lze chápat jako koeficient „zhášení“).
 - i. Je předpoklad, že vlivem sprinklerů dojde k hašení požáru pro daný materiál a scénář ospravedlnitelný?
 - ii. Doložte a vysvětlete, jak byla stanovena hodnota koeficientu zhášení. Jedná se o empirickou konstantu, nejedná se o fyzikální veličinu.

Jsou dostatečně definovány vstupní parametry sprinklerových hlavic u zjednodušených modelů hašení (zónové modely požáru aj.)?

- A. Technické parametry sprinklerové hlavice
 - I. Je vhodně definovaná aktivační teplota sprinklerové hlavice?
 - II. Je při přípravě scénářů zohledněn index reakční doby (RTI) sprinklerové hlavice, a je zohledněn vliv povoleného rozsahu indexu reakční doby na vypočtené hodnoty?
 - III. Je vhodně definován c-faktor sprinklerové hlavice?
 - IV. Je vhodně stanovena intenzita dodávky vody?
- B. Prostorové umístění sprinklerové hlavice
 - I. Je nedefinována vzdálenost sprinklerové hlavice od ohniska požáru?
 - II. Jsou určeny souřadnice sprinklerové hlavice v prostoru, popř. vzdálenost mezi sprinklerovými hlavicemi?

C. Další specifické parametry sprinklerové hlavice (nepovinné)

- I. Je nastavena hodnota spolehlivosti sprinklerové hlavice?
- II. Je vhodně zvolena pravděpodobnost uhašení nebo potlačení požáru po aktivaci sprinklerové hlavice?
- III. Je vhodně zohledněn vliv sprinklerové hlavice na okolní podmínky (např. proudění)?

Jsou dostatečně definovány vstupní parametry sprinklerových hlavíc u expertních modelů (CFD modely)?

A. Technické parametry sprinklerové hlavice

- I. Je vhodně definovaná aktivační teplota sprinklerové hlavice?
- II. Je při přípravě scénářů zohledněn index reakční doby (RTI) sprinklerové hlavice, a je zohledněn vliv povoleného rozsahu indexu reakční doby na vypočtené hodnoty?
- III. Je vhodně definován c-faktor sprinklerové hlavice?
- IV. Je vymezen K-faktor, popř. pracovní tlak a průtok sprinklerové hlavice s ohledem na konkrétní podmínky?

B. Specifické parametry sprinklerové hlavice pro expertní modely

- I. Jsou vhodně stanoveny parametry tvaru rozstříku pro model - parametr „offset“ a úhel rozstříku?
- II. Jsou posouzeny parametry rozstříkovaných kapek – velikost, počet a jejich vliv na nejistotu výpočtu?
- III. Jak je stanovena distribuce kapek v jejich proud?
- IV. Je stanovena počáteční rychlost pohybu kapek?
- V. Je uvažováno se zhášecím koeficientem, je použita defaultní hodnota?

C. Jiné parametry související s hašením

- I. Jak je definován proces hašení při pevně zadaném průběhu tepelného výkonu vstupujícího do výpočetní domény?
- II. Jsou vhodně nadefinovány vzdálenosti sprinklerových hlavíc v modelu a vychází z chráněné plochy jednou hlavicí?
- III. Je vhodně zohledněn vliv ochlazení sprinklerové hlavice vnějšími podmínkami (např. prouděním, aktivací požárně bezpečnostního zařízení)?