

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:

Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů

| Typ výsledku dle UV č. 837/2017 | Evidenční číslo (příjemce u organizace) | Rok vzniku |
|---|---|-------------------------------------|
| (N_{metC}) 2 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:

Cílem metodiky je podpořit zavedení pokročilých výpočetních postupů v hodnocení požární bezpečnosti staveb. Konkrétně zavést systém pro zpracování a posuzování aplikace pokročilých metod v dílčích oblastech požární bezpečnosti staveb. Byly stanoveny podmínky pro využití softwarových nástrojů v analýzách dílčích problémů požární bezpečnosti staveb a možnosti ověření jejich správné aplikace, relevantních vstupních a výstupních dat a spolehlivosti výsledků.

Metodika nachází uplatnění v oblastech posuzování požární bezpečnosti staveb, konkrétně ve všech jejích dílčích oblastech jako je modelování požáru, posuzování spolehlivosti konstrukce při požáru a evakuace osob. Některé z jejích částí jsou využitelné také v oblasti zjišťování příčin vzniku požáru a v oblasti plnění úkolů jednotek požární ochrany. Metodika je určena příslušníkům Ministerstva vnitra – generálního ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky a hasičských záchranných sborů krajů, kteří posuzují dokumentaci požární bezpečnosti staveb (v roli posuzovatelů) a projektantům autorizačních oborů Pozemní stavby, Požární bezpečnost staveb, Statika a dynamika staveb atp. a výrobcům materiálů požární ochrany a další odborníci a experti, kteří se podílejí na zpracování dokumentace požární bezpečnosti staveb a kteří mají k výkonu vybraných činností ve výstavbě oprávnění (v roli zpracovatelů).

Řešitelský tým:

prof. Ing. František Wald, CSc.
Ing. Kamila Cáblová, Ph.D.
Ing. Matyáš Kožich
doc. Mgr. Tomáš Apeltauer, 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 3/2019

Název metodiky:

**Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a
evakuace osob pomocí verifikačních příkladů**

Dedikace

VI20162019034

Zpracovatel metodiky:

Kamila Cábová

Matyáš Kožich

Tomáš Apeltauer

V Praze dne 17.9.2019



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



Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů

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

Obsah

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | Předmět metodiky | 4 |
| 2 | Struktura metodiky | 4 |
| 3 | Seznam zkratk | 4 |
| 4 | Zjednodušené vs. pokročilé metody | 5 |
| 5 | Verifikace, validace a kalibrace modelů | 6 |
| 6 | Oblasti řešení | 7 |
| 6.1 | Modelování požáru | 7 |
| 6.1.1 | Matematické modelování požáru | 7 |
| 6.1.2 | Identifikace softwarových nástrojů | 9 |
| 6.2 | Posouzení konstrukcí při požáru | 10 |
| 6.2.1 | Modely konstrukcí | 10 |
| 6.2.2 | Identifikace softwarových nástrojů | 11 |
| 6.3 | Evakuace osob | 11 |
| 6.3.1 | Modely evakuace | 11 |
| 6.3.2 | Nejistoty v evakuačních modelech | 13 |
| 6.3.3 | Identifikace softwarových nástrojů | 14 |
| 7 | Struktura a náležitosti projektové dokumentace | 14 |
| 7.1 | Modelování požáru | 16 |
| 7.1.1 | Volba modelu | 16 |
| 7.1.2 | Vstupní hodnoty | 16 |
| 7.1.2.1 | Vlastnosti materiálů | 18 |
| 7.1.2.2 | Geometrie a numerická síť | 18 |
| 7.1.2.3 | Ventilační podmínky | 19 |
| 7.1.2.4 | Zdroj hoření | 19 |
| 7.1.2.5 | Aktivní prvky požární bezpečnosti | 19 |
| 7.1.3 | Záznam a prezentace výsledků | 20 |
| 7.2 | Modelování konstrukcí | 20 |
| 7.2.1 | Volba modelu | 20 |
| 7.2.2 | Vstupní hodnoty | 21 |
| 7.2.2.1 | Geometrický model a numerická síť | 22 |
| 7.2.2.2 | Materiálový model | 23 |

| | | |
|---------|---|----|
| 7.2.2.3 | Zatížení | 23 |
| 7.2.2.4 | Imperfekce | 23 |
| 7.2.2.5 | Typy analýz | 23 |
| 7.2.3 | Záznam a prezentace výsledků | 24 |
| 7.3 | Modelování evakuace | 24 |
| 7.3.1 | Kritéria pro výběr modelu | 24 |
| 7.3.2 | Doba pro evakuaci osob | 25 |
| 7.3.3 | Účinky požáru | 26 |
| 7.3.3.1 | Hustota kouře | 27 |
| 7.3.3.2 | Toxické zplodiny | 27 |
| 7.3.3.3 | Vysoká teplota | 28 |
| 7.3.3.4 | Výpočet účinků dráždivých a dusivých plynů a vysoké teploty | 28 |
| 7.3.4 | Vstupní hodnoty | 29 |
| 7.3.4.1 | Charakteristika osob | 29 |
| 7.3.4.2 | Věkové složení | 30 |
| 7.3.4.3 | Reakční doba | 30 |
| 7.3.4.4 | Rychlost pohybu | 30 |
| 7.3.4.5 | Rozměry osob a efektivní šířka úseků evakuační trasy | 32 |
| 7.3.5 | Záznam a prezentace výsledků | 33 |
| 7.3.5.1 | Statistické zpracování výsledků | 33 |
| 7.3.5.2 | Zpracování výsledků | 34 |
| 8 | Závěrečné shrnutí | 35 |
| 8.1 | Pro zpracovatele | 35 |
| 8.2 | Pro posuzovatele | 35 |
| | Reference | 36 |
| | Seznam obrázků | 36 |
| | Seznam tabulek | 37 |
| | Přílohy | 38 |

1 Předmět metodiky

Cílem metodiky je podpořit zavedení pokročilých výpočetních postupů v hodnocení požární bezpečnosti staveb. Konkrétně zavést systém pro zpracování a posuzování aplikace pokročilých metod v dílčích oblastech požární bezpečnosti staveb. V rámci tohoto systému jsou stanoveny podmínky pro využití softwarových nástrojů v analýzách dílčích problémů požární bezpečnosti staveb a možnosti ověření jejich správné aplikace, relevantních vstupních a výstupních dat a spolehlivosti výsledků.

Metodika nachází uplatnění v oblastech posuzování požární bezpečnosti staveb, konkrétně ve všech jejích dílčích oblastech jako je modelování požáru, posuzování spolehlivosti konstrukce při požáru a evakuace osob. Některé z jejích částí jsou využitelné také v oblasti zjišťování příčin vzniku požáru a v oblasti plnění úkolů jednotek požární ochrany.

Metodika je určena příslušníkům Ministerstva vnitra - generálního ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky a hasičských záchranných sborů krajů, kteří posuzují dokumentaci požární bezpečnosti staveb (v roli posuzovatelů) a projektantům autorizačních oborů Pozemní stavby, Požární bezpečnost staveb, Statika a dynamika staveb, atp. a výrobcům materiálů požární ochrany a další odborníci a experti, kteří se podílejí na zpracování dokumentace požární bezpečnosti staveb a kteří mají k výkonu vybraných činností ve výstavbě oprávnění (v roli zpracovatelů).

2 Struktura metodiky

Metodika sestává ze základní části a z příloh. *Základní část* obsahuje teoretické podklady pokročilých výpočetních metod požární bezpečnosti staveb a vymezení platnosti používání jednotlivých softwarových nástrojů, tzv. „identifikace modelů“ (charakteristika softwarů, vhodná aplikace, omezení). Poskytuje podklady a postupy ke zpracování a ověření správného řešení problematiky modelování požáru, posuzování požární odolnosti konstrukcí a evakuace osob (výběr vhodného softwaru, volba vstupních dat, okrajové podmínky, způsob výpočtu, velikost výpočetní sítě) jak pro zpracovatele, tak ke kontrole posuzovatelem.

V přílohové části jsou ověřené příklady, kterých budou moci využít obě skupiny uživatelů, jak pro ověření, tak pro kontrolu správnosti řešení, vstupních dat a relevantních výsledků. Posuzovatel může ověřovací příklady využít i jako kontrolu schopností zpracovatele. Přílohová část je doplněna tzv. „check-listy“ sloužící k rychlé kontrole správného postupu a relevantnosti vstupů a výstupů.

3 Seznam zkratk

CFD modely typu pole, dynamické modely kapalin a plynů (z angl. Computational Fluid Dynamics)

| | |
|-------|---|
| MKP | metoda konečných prvků |
| V a V | verifikace a validace |
| ASET | doba dostupná pro evakuaci (z angl. Available Safe Egress Time) |
| RSET | doba potřebná pro evakuaci (z angl. Required Safe Egress Time) |
| HRR | rychlost uvolňování tepla (z angl. Heat Release Rate) |
| TTCH | tepelně technické charakteristiky materiálů |

4 Zjednodušené vs. pokročilé metody

V dílčích oblastech požární bezpečnosti staveb lze použít zjednodušené a pokročilé metody posuzování.

Zjednodušené postupy (empirické výrazy) využívají jednoduché výpočty pomocí matematických rovnic, které lze řešit ručně nebo např. v tabulkových procesorech, a přímé hodnocení pomocí tabulkových hodnot. Tyto postupy jsou často uvedeny v normách.

V oblasti modelování požáru se jedná např. o nominální teplotní křivky, a jednoduché modely přirozeného požáru jako jsou parametrické teplotní křivky a modely lokálního požáru.

V oblasti posuzování konstrukcí lze zahrnout výpočet přestupu tepla do konstrukce pomocí přírůstkové metody, hodnocení požární odolnosti konstrukce pomocí kritické teploty a pomocí únosnosti se zohledněním redukce materiálových vlastností a redukce mechanického zatížení či hodnocení pomocí tabulek.

V oblasti evakuace pak posouzení evakuační doby dle jednoduchých empirických vztahů.

Pokročilé postupy zahrnují deterministické modely, které jsou založeny na fyzikální a chemické podstatě řešeného děje či principech teoretické mechaniky. Matematické řešení dějů popsaných formou parciálních diferenciálních rovnic vyžaduje využití specializovaných softwarových nástrojů.

V oblasti modelování požáru se jedná o zónové modely a dynamické modely kapalin a plynů (modely typu pole).

V oblasti posuzování konstrukcí o modelování přestupu tepla do konstrukce a modelování chování konstrukce metodou konečných prvků. Tento postup si vyžaduje zavedení pokročilých materiálových modelů.

V oblasti evakuace osob se jedná o behaviorální agentní modely, které popisují každou osobu jako samostatnou entitu (agenta). Chování skupiny osob je pak určeno vzájemnými interakcemi jednotlivých agentů mezi sebou. V některých situacích je žádoucí aplikovat agentní modely s behaviorálními vlastnostmi, které jsou schopny reprodukovat psychologické a sociologické aspekty evakuačního procesu.

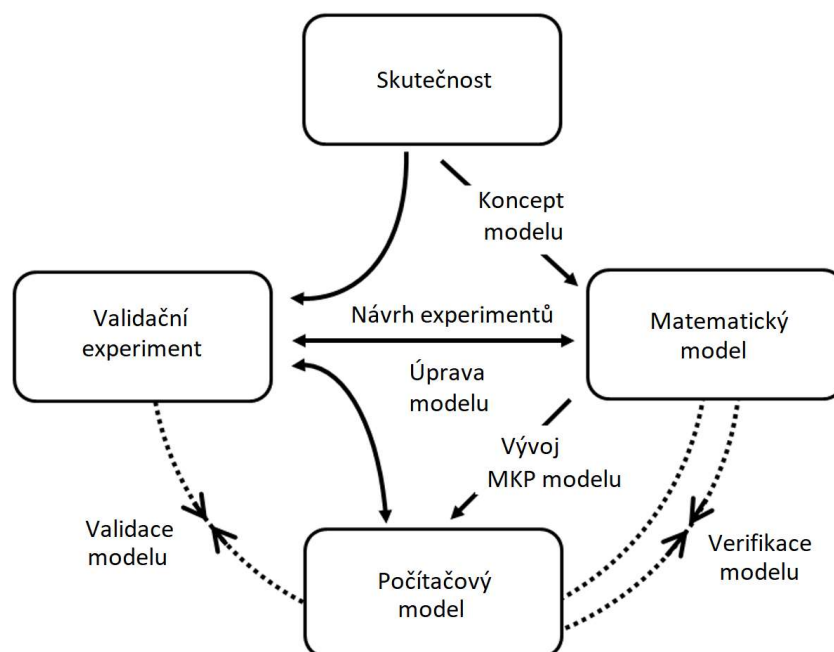
V současné době neexistuje v českém legislativním prostředí žádný dokument, který by doporučoval, jak v dílčích oblastech požární bezpečnosti staveb postupovat. Zpracovatel dokumentace je zodpovědný za volbu vhodného postupu, správné aplikace a správnosti výsledků. Posuzovatel pak hodnotí přijatelnost této volby, aplikace na daný problém, způsob řešení a výsledky.

5 Verifikace, validace a kalibrace modelů

Základem bezchybných a spolehlivých výsledků při hodnocení požární bezpečnosti staveb pokročilými modely je správné použití principů validace a verifikace (ASME, 2012). V oblasti evakuačních modelů se využívá rovněž kalibrace.

Verifikace využívá srovnání výpočetních řešení s vysoce přesnými (analytickými nebo numerickými) referenčními řešeními a mezi sebou. Procesem verifikace má být poskytnut důkaz, že matematické modely jsou správně implementovány a že numerické řešení je správné vzhledem k matematickému modelu. Verifikace leží na straně vývojářů softwarových nástrojů.

V rámci verifikace se využívají tzv. *ověřovací/verifikační příklady* (benchmark cases). Ověřovací příklad je zpravidla jednoduchý, detailně popsáný, obsahuje vstupy i výstupy příkladu, umožňuje opakovatelnost se shodnými výsledky. Proces ověřování by měl obsahovat *studii citlivosti* volby sítě, která prokáže asymptotickou konvergenci výsledků.



Obr. 1 Proces verifikace a validace (Kwasniewski, 2009)

Validace porovnává numerická řešení s údaji fyzicky naměřenými v kontrolovaných podmínkách (experimentálními daty). Vymezuje tak aplikační oblast. Proces validace je kontrola, která odhalí možné chyby a odhaduje přesnost simulace. Validace může být rozdělena do tří kroků: detekce významných nesrovnalostí modelu, odstranění a snížení odstranitelných a nevyhnutelných chyb, vyhodnocení nejistot výsledků.

Proces verifikace a validace je znázorněn na obr. 1.

Kalibrace se provádí pouze u modelů evakuace. Jednotlivé parametry modelu se kalibrují tak, aby se jeho chování shodovalo s reálným chováním předlohy modelu. Vzhledem ke stochastické povaze modelu pohybu osob je přípustné provádět jeho kalibraci pouze úpravou jeho parametrů, které nejsou známy či změřeny.

6 Oblasti řešení

6.1 Modelování požáru

6.1.1 Matematické modelování požáru

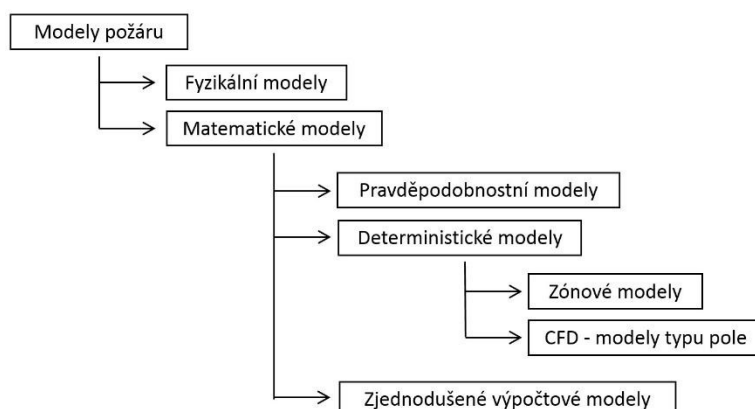
Matematické modely požáru lze chápat jako zjednodušené či zpřesněné matematické popisy návrhového požáru sloužící zejména pro předpověď teplotního pole během požáru. Jsou děleny na:

- pravděpodobnostní modely
 - síťové,
 - statistické,
 - simulační,
- deterministické modely
 - zónové (např. CFAST, ARGOS, OZONE),
 - modely typu pole (např. Fire Dynamics Simulator, SmartFire).

Pro úplnost lze doplnit zjednodušenými výpočtovými modely, do kterých se řadí:

- tabulkové procesory,
- triviální programy.

Schéma dělení modelů požáru včetně fyzikálních modelů je uvedeno na obr. 2.



Obr. 2 Schématické rozdělení modelů požáru (Wald, 2017)

Pravděpodobnostní modely přímo nepopisují konkrétní fyzikální ani chemické děje, ale rozvoj požáru definují řadou „náhodných pokusů“ uživatele, pro které je charakteristická nedostatečná znalost počátečních podmínek. Rozhodování je často založené na dostupných statistických datech a inženýrském úsudku. Při opakování náhodných pokusů a při zachování okrajových podmínek pak uživatel mnohdy získá rozdílné výsledky (Kučera, Pezdová, 2010).

Deterministické modely vycházejí z počátečních podmínek a jejich výsledek lze jednoznačně určit. Jsou řešeny matematickými rovnicemi, které popisují vykonané fyzikální a chemické děje. Deterministické modely řeší konkrétní podmínky rozvoje požáru, tzv. požární scénář. Deterministické matematické modely predikující rozvoj požáru se dělí na dvě základní následující podskupiny, a to *zónové modely* a *modely CFD* označované českým ekvivalentem jako modely typu pole (Wald, 2017a).

Zónové modely rozdělují daný prostor do jedné nebo dvou homogenních zón, které mají v daném časovém kroku rovnoměrnou teplotu, hustotu a koncentraci plynů. V počáteční fázi požáru (tj. před flashover efektem) model předpokládá vznik dvou zón v místnosti, tj. dvouzónový model. Dolní „studená“ zóna se ochlazuje přívodem vzduchu z exteriéru přes otvory a horní „horká“ zóna (kouřová vrstva) se postupně nahřívá vzestupným proudem zplodin od požáru prostřednictvím požárního kužele (tzv. fire plume). Jednozónový model vyjadřuje stav hořícího prostoru jako jednu homogenní zónu po dosažení flashover efektu, tj. po dosažení předem definovaných přechodových kritérií, která tomuto stavu odpovídají. Výhodou zónových modelů je zejména jednoduchost jejich řešení a s tím spojená nenáročnost na hardware a čas potřebný k výpočtům. Na rozdíl od CFD modelů zónové modely neumožňují sledovat dynamiku požáru (zanedbávají rovnice zachování hybnosti). Zónové modely nejsou způsobilé k výpočtům v prostorech s jedním převládajícím rozměrem – např. šachty, chodby, tunely.

CFD modely (tzv. modely typu pole, dynamické modely kapalin a plynů) jsou postavené na algoritmech počítačové dynamiky tekutin (Computational Fluid Dynamics). V CFD modelech je oblast řešeného prostoru rozdělena do velkého, avšak konečného počtu trojrozměrných kontrolních objemů (buněk) ve kterých jsou řešeny rovnice zachování hmoty, energie a hybnosti. CFD modely umožňují získat prostorově a časově detailní informace. Přesnost získaných

informací z modelu se odvíjí od zvoleného počtu kontrolních objemů. Je možné rozlišovat obecné CFD modely a požární CFD modely, které jsou doplněny o specifické submodely. Výhodou CFD modelů je zejména schopnost řešit sofistikovanější případy, při kterých již zjednodušení zónových modelů nelze aplikovat. Lze simulovat celou řadu jevů, jako například teplotní, rychlostní či tlaková pole, pohyb kouře a další jevy. Nevýhodou CFD modelů je uživatelská náročnost, obtížná dostupnost vstupních dat, zejména materiálových a požárních charakteristik, které mohou výstupní data zatížit výraznou chybou. Výsledky počítačových simulací v podobě grafů, barevných kontur, vektorových polí či videozáznamů mohou působit velice sofistikovaným dojmem, ale zároveň je nezbytné mít stále na zřeteli, že výsledky mohou být v případě neodborné či nedbalé aplikace zatíženy výraznou chybou (pohybující se i vysoko nad hranicí 100 %) ve srovnání s realitou. Dalšími nevýhodami jsou časová náročnost výpočtů (v řádu hodin až dnů) a požadavky na hardware (Wald, 2017a).

6.1.2 Identifikace softwarových nástrojů

Na trhu je v současné době velké množství komerčního i volně dostupného softwaru. Každý má svou specifickou oblast využití, a velice důležitý se tak stává správný výběr. Před aplikací softwaru na řešený problém musí uživatel 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 deterministických matematických modelů, které jsou vhodné k modelování požáru, je uveden v tab. 1. Výběr softwarových nástrojů je proveden na základě četnosti používání, jejich aktuálnosti, vývoji a technické podpory. Nejedná se o úplný výčet nástrojů (Wald, 2017b).

Tab. 1 Výčet vhodných softwarových nástrojů k modelování požáru

| Zónové modely, aktivně podporované | |
|------------------------------------|---|
| Název | Stručný popis, odkaz |
| ARGOS | Zónový model umí počítat pohyb kouře a tepla až v 10-ti propojených místnostech, https://brandogsikring.dk/en/argos/ |
| B-RISK | Zónový model s pravděpodobnostní funkcí Monte Carlo k předpovědi pož. prostředí v uzavřeném prostoru. Nahradil BRANZFIRE model, https://www.branz.co.nz/cms_display.php?sn=75&st=1&pg=20770 |
| CFAST | Dvouzónový pož. model umožňující předpovědět prostředí při požáru v budově o více místnostech. Počítá dobu distribuce kouře a plyných produktů, https://pages.nist.gov/cfast/index.html |
| OZone | Dvouzónový, jednozónový či kombinovaný pož. model umožňující předpovědět teplotu plynu při požáru v budově, http://sections.arcelormittal.com/download-center/design-software/fire-calculations.html |

| Modely pole, aktivně podporované | |
|---|--|
| Název | Stručný popis, odkaz |
| ANSYS FLUENT | Obecný CFD model s širokou aplikací, https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent |
| FDS | Požární CFD model, simuluje proudění plynů s nízkou rychlostí a přenos kouře a tepla při požáru, https://pages.nist.gov/fds-smv/downloads.html |
| PHOENICS/FLAIR | Požární CFD model, simuluje rozvoj požáru a rozptyl kouře a polutantů za přechodných podmínek nebo ustáleného stavu, http://www.cham.co.uk/Flair.php |
| SMART FIRE | Požární CFD model s automatickým generováním sítě a interaktivním grafickým interfacem. Simulace požáru, kouře, tepelného sálání a toxicity uvnitř celého objektu (budov, letiště, obchodů, a železničního prostředí), https://fseg.gre.ac.uk/smartfire/ |

6.2 Posouzení konstrukcí při požáru

6.2.1 Modely konstrukcí

Přestup a rozvoj tepla v konstrukci a mechanickou analýzu je možné stanovit podle typu konstrukčního prvku pomocí tabulek, přírůstkových a diskretních metod. Ověření požární odolnosti konstrukce za vysokých teplot může vycházet z výpočtu konstrukce za běžné teploty nebo využít pokročilé přesnější metody a vycházet z globální analýzy za zvýšených teplot. Model konstrukčního systému pro globální analýzu se vytváří tak, aby co nejlépe vystihoval očekávané chování studovaného systému.

Ověření 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.

Pokročilé metody modelování konstrukcí jsou založeny na metodě konečných prvků (MKP). Touto metodou je v oblasti posuzování konstrukcí při požáru modelován přestup tepla do konstrukce a modelováno mechanické chování konstrukce. V závislosti na simulovaném scénáři lze uvažovat tři typy analýz: konstrukční, teplotní nebo sdruženou analýzu konstrukčně-teplotní.

V inženýrské praxi se obvykle berou v úvahu dva scénáře zatížení. Jeden scénář uvažuje zvyšující se mechanické zatížení při konstantní teplotě. Ve druhém scénáři je konstrukce analyzována za stálého mechanického zatížení, ale při zvyšující se teplotě. V dalším možném scénáři, např. po experimentu nebo skutečném požáru, se mění jak teplota, tak zatížení. Zatížení může být závislé na teplotě v důsledku tepelného prodloužení.

Pokročilý postup řešení si vyžaduje zavedení pokročilých vstupních dat a metod. Při působení požáru musí být zohledněny vlastnosti 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. V závislosti na uvažovaném scénáři zatížení 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 1990.

6.2.2 Identifikace softwarových nástrojů

Je možné si vybrat mezi komerčními softwarovými nástroji pro všeobecné účely a specializovanými nástroji zaměřenými na výzkum. V obou případech je většina dnešních počítačových programů věnovaných konstrukční analýze založena na metodě konečných prvků (MKP). Každý má svou specifickou oblast využití, a velice důležitý se tak stává správný výběr.

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. 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 tab. 2. Výběr softwarových nástrojů je proveden na základě četnosti používání, jejich aktuálnosti, vývoji a technické podpory. Nejedná se o úplný výčet nástrojů (Wald, 2017b).

6.3 Evakuace osob

6.3.1 Modely evakuace

Uživatel pokročilých nástrojů v oblasti požární bezpečnosti má v současnosti na výběr hned několik alternativních nástrojů a technik. V závislosti na typu analyzované stavby, dostupném času a rozpočtu, si může uživatel zvolit *empirický přístup*, *ruční výpočty* nebo *numerické modely* a jejich simulace.

Tab. 2 Výčet vhodných softwarových nástrojů k modelování konstrukcí vystavených požáru

| Modely konstrukcí vystavené požáru, aktivně podporované | |
|---|---|
| Název | Stručný popis, odkaz |
| ANSYS Mechanical | Obecný nelineární multifyzikální software nabízející analýzu konstrukcí a termodynamickou analýzu, a mnoho dalších. Analýzy mohou být prováděny samostatně nebo v jedné komplexní analýze. Poskytuje kompletní sadu chování prvků, materiálové modely a řešení rovnic pro širokou škálu mechanických konstrukčních problémů, tepelnou analýzu a sdružené fyzikální ukoly zahrnující termo-strukturální a termoelektrickou analýzu, https://www.ansys.com/ |
| Abaqus | Obecný software pro analýzu konečných prvků. Poskytuje funkce vícefázového modelování, jako jsou sdružené modely akusticko-strukturální, piezoelektrické a strukturální vlastnosti pórů. Má rozsáhlou řadu materiálových modelů, https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/ |
| SAFIR | Program modeluje chování stavebních objektů vystavených požáru. Konstrukce může být vytvořena 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 |
| Vulcan | Konečně prvkový program, který je schopen modelovat globální 3D chování kompozitních budov z ocelových rámců 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. Software Vulcan byl vyvinut speciálně pro analýzu výkonu budovy při požáru. Odlišuje se od tradičních komerčních balíčků FEA v jeho jednoduchosti a rychlosti použití, http://www.vulcan-solutions.com/ |
| ATENA | Software pro analýzu konstrukcí konečnými prvky, vyvinutý přednostně pro simulaci chování betonových a železobetonových konstrukcí včetně praskání, drcení a vyztužování betonu, https://www.cervenka.cz/products/atena/ |

Empirický přístup představuje porovnání analyzovaného objektu a informací dostupných o jiných, srovnatelných objektech. Z těchto dat lze následně odvozovat předpoklady o reálném chování posuzovaného objektu, výsledkem může být odhad celkového evakuačního času, ale nikoliv už podrobnější informace o chování jeho dílčích prvků, např. evakuačních časech jednotlivých podlaží. Z toho důvodu se od popsaného přístupu v současnosti upouští, protože nevyhovuje moderním požadavkům praxe.

Ruční výpočty jsou využitelné pro výpočet evakuačního času na úrovni dílčích prvků, jsme tak schopni získat lepší představu o vlastnostech jednotlivých částí celého objektu, které dohromady skládají celou evakuační trasu. Technika vychází z nezbytného předpokladu, že se osoby pohybují společně v podobě proudění, které splňuje obecné makroskopické předpoklady. Proudění osob je v průběhu evakuace na základě tohoto přístupu ovlivněno kapacitou dílčích prvků, jejich typem (např. zda se jedná o schody nebo koridory) a průměrnými fyzickými parametry osob ve skupině. Tato technika je pro výpočet doby evakuace využívána dodnes. Důvody spočívají zejména v obecné dostupnosti této techniky, časovým a finančním omezením v řešených projektech a v neposlední řadě v nedostupnosti kvalitních dat pro lepší techniku. Je třeba zdůraznit, že ruční

výpočty nejsou obecně nesprávné. Obsahují ale nevyhnutelná zjednodušení reálných vlastností evakuovaných osob, mezi které patří individuální doba reakce na vzniklé nebezpečí, preference únikových tras a východů v průběhu evakuačního procesu, statistické rozložení rychlostí a fyzických rozměrů osob apod. Tato zjednodušení nejsou v některých případech na stranu bezpečnou, a to recipročně vede k nutnosti aplikovat bezpečnostní rezervy v návrhu objektu. Není přitom možné jednoznačně ověřit, zda je tato rezerva adekvátní, a neznamena zbytečnou komplikaci a zvýšení nákladů.

Pokročilé modely evakuace reprezentují různorodou skupinu metod a nástrojů, které zasahují od oblasti makroskopických modelů po agentní behaviorální modely, reprezentující evakuované osoby na úrovni jednotlivců a jejich individualit. Přestože jsou tyto modely v zásadě velmi rozdílné, mají jedno společné – jejich výsledky zcela závisí na kvalitě vstupních údajů a okrajových podmínek modelu. Při výběru samotného modelu by uživatel zohlednit posuzované scénáře, které bývají reakcí na legislativní kontext a současně poskytují náhled na reálnou situaci v analyzovaném objektu. V ideálním případě pak bude zvolený model zahrnovat veškeré relevantní aspekty posuzované situace: chování evakuovaných osob, podmínky v analyzovaném objektu, reakci konstrukčních prvků na oheň apod. To ale nikdy nenastane. Žádný dnešní model není schopen poskytnout úplný a dokonalý obraz o všech existujících vstupních údajích a výstupních hodnotách popisujících libovolný ze zvolených scénářů, a rovněž není schopen reprodukovat všechny behaviorální a fyziologické parametry všech osob v objektu. Obecná definice modelu jej charakterizuje jako účelovou reprezentaci reálného děje nebo některé jeho části, nevyhnutelně se tedy jedná o zjednodušení reality.

Uživatel modelu tedy musí znát tyto „mezery“ existující mezi realitou posuzovaného scénáře a aplikovaným modelem. Na základě uvedených rozdílů pak musí jednoznačně identifikovat, co je model schopen reprezentovat a co musí jako uživatel modelu učinit, aby negativní dopad těchto rozdílů minimalizoval.

6.3.2 Nejistoty v evakuačních modelech

Evakuační modely reprezentující lidské chování v sobě nevyhnutelně zahrnují určitý stupeň nejistoty ve vstupních parametrech a produkovaných výsledcích. Pro řízení těchto nejistot musí mít uživatel modelu informace o jejich zdrojích. Rozlišujeme následující typy nejistot:

- empirická nejistota je spojena s přesností sběru a měření reálných dat,
- parametrická nejistota se vyskytuje v aplikovaných hodnotách parametrů použitého modelu, v některých případech je tato nejistota výsledkem empirické nejistoty,
- nejistota modelu je spojena s aproximacemi, předpoklady a zkrácením v rámci použitého modelu,
- behaviorální nejistota zahrnuje aspekty reálného lidského chování, které vědomě nebo nevědomě nejsou v modelu řešeny.

Nejistota modelu může být dále rozdělena na epistemickou (strukturální) nejistotu a aleatorní (náhodnou) nejistotu. Strukturální nejistota se týká validity modelů. Čím přesněji modely reprezentují realitu, tím je menší. Náhodná nejistota reprezentuje nepředvídatelnost přírodního

jevu. I kdyby byly modely perfektní, variabilita těchto jevů omezuje jejich prediktivní schopnosti v reálném prostředí.

Jako příklad hypoteticky lze předpokládat, že je možné dokonale modelovat sociální faktory v průběhu evakuačního procesu, strukturální nejistota je tedy nulová. Ve skutečnosti bude model schopen tyto faktory přesně reprodukovat pouze za předpokladu, že je uživatel schopen dokonale popsat psychologické parametry všech osob v evakuované skupině včetně jejich okamžitého rozpoložení, tedy významný zdroj náhodné nejistoty.

Nejistoty v evakuačních modelech je možné řídit pomocí několika základních strategií, které lze kombinovat:

- využitím přesnějších vstupních dat,
- citlivostní analýzou,
- použitím robustnějšího, lépe validovaného modelu,
- aplikací bezpečnostní rezervy při analýze výsledků.

6.3.3 Identifikace softwarových nástrojů

Základní výčet evakuačních modelů, které jsou vhodné k modelování v oblasti požární bezpečnosti, je uveden v tab. 3. Výčet je proveden na základě jejich rozšířenosti v reálných aplikacích a s ohledem na klíčové parametry, jakými jsou validace nebo způsob reprezentace prostoru nebo chování. Nejedná se nicméně o úplný výčet nástrojů.

Tab. 3 Příklady softwarových nástrojů k modelování evakuace osob

| Evakuační modely, aktivně podporované | | | | | |
|---------------------------------------|---------------|-------|---------|---------|---|
| Název | Validace | Model | Prostor | Chování | Výrobce, odkaz |
| Building EXODUS | EF, L, OM, 3S | B | JD | S | University of Greenwich, UK, https://fseg.gre.ac.uk/exodus/exodus_products.html#building |
| Pathfinder | N, EE, L, OM | CB | S | D | Thunderhead Engineering, USA, https://www.thunderheadeng.com/pathfinder/ |
| FDS+Evac | EE, L, OM | CB | S | S | VTT + NIST, https://pages.nist.gov/fds-smv/ |
| MassMotion | C, EE, L, OM | B | S | AI, S | Oasys software, ARUP, https://www.oasys-software.com/products/pedestrian-simulation/massmotion/ |

Vysvětlivky:

Validace: N = normové dokumenty, EE = evakuační experimenty, L = literatura, OM = ostatní modely,

3S = validace třetí stranou.

Model: B = behaviorální model, CB = částečně behaviorální model

Prostor: JD = jemná diskretní síť, S = spojitá reprezentace

Chování: S = stochastické, D = deterministické, AI = umělá inteligence

7 Struktura a náležitosti projektové dokumentace

Výsledkem požárního posouzení je zpráva řešení požární bezpečnosti. Rozsah a obsah zprávy řešení požární bezpečnosti závisí na charakteru posuzované problematiky (analýza teplotního pole, únosnost konstrukce, evakuace osob). Zpravidla obsahuje následující údaje:

- 1) důvody a rozsah posouzení,
- 2) vymezené cíle požární bezpečnosti a kritéria přijatelnosti,
- 3) předepsané a předpokládané návrhové parametry, zejm.
 - charakteristika budovy (stavební/konstrukční řešení, technické vybavení),
 - charakteristika uživatelů,
 - požárně bezpečnostní řešení, včetně vybavení požárně bezpečnostními zařízeními,
 - strategie řízení požární bezpečnosti,
- 4) definice návrhových požárních scénářů (podrobněji v Metodice využití pokročilých modelů požáru a evakuace v požárně bezpečnostním řešení staveb),
- 5) použité postupy a metody řešení (údaje o použitém softwaru),
- 6) popis modelů (požáru, konstrukce, evakuace) a jejich vlastností,
- 7) výsledky hodnocených jevů (číselně i graficky),
- 8) posouzení výsledků s kritérii přijatelnosti,
- 9) závěrečné zhodnocení s podrobným stanovením
 - požadavků na zajištění požární bezpečnosti,
 - omezení při provozování objektu nebo zařízení,
- 10) použité podklady a dokumentace výsledků řešení, zejm.
 - předpisy a odborná literatura,
 - výpočty, odborné posudky, výsledky analýzy citlivosti a výsledky řešení.

Dokument má mít takové uspořádání, aby umožňoval snadnou a přehlednou orientaci. Vstupy do výpočtu musí být srozumitelné a jejich podklady se musí jasně dokladovat. Výpočet musí obsahovat všechny údaje pro provedení kontrolního přepočtu. Z důvodu přehlednosti je vhodné, aby byla zpráva rozdělena na hlavní části a přílohy. Hlavní části obsahují nejvýznamnější zjištěné poznatky v oblasti modelování požáru, posouzení konstrukce či evakuace osob. Přílohy obsahují podrobný popis provedených výpočtů, dílčí výsledky, související informace, atd. Řešení je zpravidla doplněno částí grafickou. U posuzování konstrukce se ověřují všechny rozhodující stavy konstrukce, které ovlivňují únosnost a stabilitu se seřazením od podporovaných prvků k podporujícím.

Dokument musí jasně prokazovat, že jsou sledované požadavky (mechanická únosnost a bezpečnost konstrukce při požáru, bezpečná evakuace, atd.) splněny po celou dobu plánované životnosti konstrukce.

7.1 Modelování požáru

7.1.1 Volba modelu

Pro modelování požáru existuje množství různých metod a přístupů s různým stupněm komplexnosti (viz obr. 2). Dle potřeb modelovaného požárního scénáře uživatel vybere vhodnou metodu (ověří, zda lze konkrétní model použít) a ve zpracovávané dokumentaci popíše, jakou metodu/postup zvolil (důvody, výhody, omezení, aj.).

K dispozici je několik typů požárních modelů uvedených na obr. 2. Obecně platí, že zónové modely jsou sofistikovanější než algebraické korelace a výpočetní dynamika tekutin je sofistikovanější než modely zónové. Zvýšení sofistikovanosti však vždy nevede k lepšímu výsledku. V mnoha případech postačí jednoduchý model, neboť nebudou k dispozici dostačující vstupní údaje pro použití sofistikovanějšího modelu. Pro danou aplikaci může být k dispozici jeden, více nebo žádný model požáru.

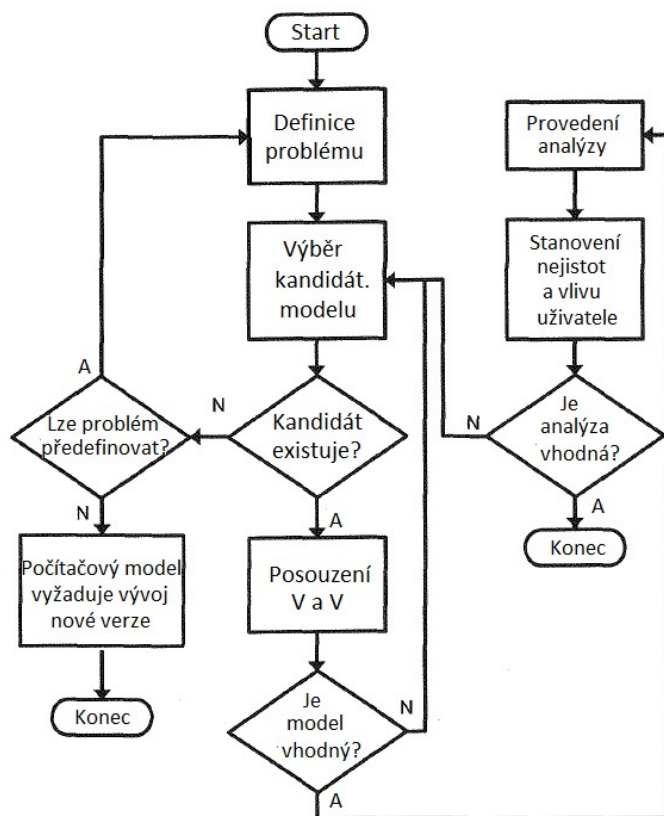
K určení vhodného modelu požáru je vhodné použít pětistupňový proces (obr. 3). Před provedením analýzy pomocí modelu se použijí první tři kroky a poslední dva kroky se objeví po provedení analýzy.

Některé z těchto kroků mohou vyžadovat opakování. Pokud je po nějakém kroku kandidátský model určen jako nevhodný, může být k vyhodnocení vybrán jiný model. Pokud pro danou aplikaci neexistují žádné vhodné kandidátské modely, pak existují tři možnosti: (1) přehodnotit aplikaci, aby se zjistilo, zda může být problém řešen, aby bylo možné použít existující model; (2) vyvíjet a ověřovat upravenou verzi stávajícího modelu; a (3) použít alternativní metodu, která nepoužívá modelování požáru (požární zkouška).

7.1.2 Vstupní hodnoty

Relevantnost a úplnost vstupních dat udává přesnost získaných výsledků (výstupů) z požárních simulací. Je možné rozlišovat vstupní hodnoty materiálové (vlastnosti materiálů) a vstupní hodnoty modelové (výpočetní síť, model turbulence, radiace, atd.). Hodnoty potřebné pro výpočet se mohou lišit dle vybraného modelu požáru. Pro méně sofistikovanější modely obecně postačí méně vstupních dat než pro komplexní modely typu CFD.

Pro stanovení průběhu požáru je nutné zvolit návrhové scénáře požáru, které budou modelovány. Je nutné stanovit několik scénářů, které pokrývají veškeré možné případy požáru. Problematice požárních scénářů je věnována Metodika využití pokročilých modelů požáru a evakuace v požárně bezpečnostním řešení staveb. Požární scénář zahrnuje konkrétní podmínky řešeného prostoru. Tyto podmínky musí být detailně popsány dle úrovně modelu/softwarevého nástroje, který je na řešení aplikován.



Obr. 3 Proces výběru vhodného modelu požáru (Hofmeister, Hill, Jensen, 2011)

Vstupní údaje by měly zahrnovat informace o:

- nastavení výpočtu:
 - velikost výpočetního kroku
 - čas výpočtu,
- geometrii a numerické síti:
 - rozměry budovy/požárního úseku,
 - velikost výpočetní oblasti,
 - numerická síť (velikost buňky sítě),
- vlastnosti materiálů:
 - stavební materiály úseku a jejich tloušťky,
 - vlastnosti materiálů - tepelně technické vlastnosti (TTCH) ohraničujících konstrukcí jako např. tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, hustota, a další vlastnosti při hoření,
 - definice kinetiky hoření (reakce hoření)
 - ostatní hořlavé předměty - druh, geometrie a povrchová úprava hořlavých předmětů, jejich fyzikální a chemické vlastnosti a jejich rozmístění, rychlost uvolňování tepla, rychlost úbytku hmotnosti, případně požární zatížení aj.,
- ventilační podmínky:

- rozměry a pozice horizontálních a vertikálních otvorů jako jsou okna a dveře, popř. odvětrání,
- specifikace nucené ventilace,
- zdroj hoření:
 - vlastnosti požáru/zdroje hoření – druh, velikost, tvar a umístění vůči požárnímu úseku, skladba, způsob jeho vznícení/vzplanutí, velikost požárního zatížení jako např. hustota požárního zatížení nebo rychlost uvolňování tepla, apod.,
- aktivní prvky požární bezpečnosti:
 - samočinné hašení (druh, dostupnost dodávky hasiva a intenzita hašení),
 - detekce (typ detektorů, rozmístění, citlivost a rychlost reakce hlásiče na požár),
 - odvod kouře (způsob a intenzita odvodu zplodin hoření) aj.,
- okrajové podmínky jako např. počáteční teplota, vlhkost či proudění plynu v úseku,
- nastavení výpočetních modelů (model turbulence, radiační model – **doporučuje se pouze u zkušených uživatelů**),
- charakteristika požadovaných výstupů (pozice, velikost, množství, atd.),
- a další nutné vstupy požadované konkrétním softwarovým nástrojem.

Softwarové nástroje pokrývají různé oblasti problematiky modelování požáru a mohou mít rovněž určité omezení okrajových podmínek (jejich druh i velikost). Před aplikací softwaru na konkrétní řešení musí uživatel ověřit možnosti a limity okrajových podmínek použitého softwarového nástroje. Uživatel si může rovněž ověřit, jaké jsou nejistoty řešení dané problematiky vybraným softwarem. Informace o nejistotách řešení by měly být uvedeny v dokumentaci nástrojů.

Stručný popis spolu s doporučením k vybraným vstupním parametrům je popsán níže.

7.1.2.1 Vlastnosti materiálů

Mezi nejdůležitější a pro uživatele obvykle i obtížně dostupná vstupní data patří zejména *požárně technické charakteristiky* (PTCH) materiálů definující předpokládané chování materiálu (např. výhřevnost, teplota vzplanutí nebo rychlost uvolňování tepla). Při požadavku přesných výstupů je možné zadat vlastnosti materiálů v závislosti na jejich teplotě. Neméně důležitým vstupem pro požární simulaci je *definice hoření*, což je jednou z nejnáročnějších a nejcitlivějších úloh a často se nelze obejít bez určité míry zjednodušení. PTCH vybraných materiálů a problematika hoření jsou komentovány v metodice Vstupní data do modelů požáru.

7.1.2.2 Geometrie a numerická síť

Všechny objekty v modelovém prostoru musí odpovídat výpočetní síti. Obecně platí, že všechny geometrické charakteristiky modelového prostoru musí být zachyceny buňkou sítě. Objekty, které jsou menší než buňka sítě, musí být buď aproximovány, nebo zanedbány. To obvykle vede k zjednodušení modelu. Před zanedbáním konkrétního objektu je však třeba pečlivě zvážit, zda

objekt může ovlivnit chování požáru (např. tepelný tok, proudění, aj.) v modelovaném úseku. Úroveň detailů geometrie je provázána s velikostí buňky sítě. Často musí být proveden kompromis mezi velikostí sítě a zjednodušením geometrie objektu. Velikost buňky výpočetní sítě je jednou z proměnných, které **ovlivňují přesnost výsledků**. Při použití příliš hrubé sítě může dojít k zanedbání určitých detailů v proudění či teplotním poli. V uživatelských příručkách softwarových nástrojů jsou uvedena doporučení pro výběr velikosti buněk sítě. Při rozhodování o velikosti buňky sítě je třeba vzít v úvahu rozměry celé výpočetní oblasti a dobu potřebnou pro výpočet.

7.1.2.3 Ventilační podmínky

Vývoj horkých plynů a jejich teplota je ovlivněna ventilačními podmínkami. Popis otvorů umožňujících přirozené proudění plynů nebo nucené větrání je proto klíčovým vstupem při modelování. K nalezení nejnepríznivějšího požárního scénáře se doporučuje simulovat několik případů s různými ventilačními podmínkami - různé velikosti otvorů, různé umístění (ve stěnách, ve střeše) a jejich kombinace (přirozené s nuceným, větrání s aktivními prvky požární ochrany, apod.).

7.1.2.4 Zdroj hoření

Důležitým vstupem pro požární simulaci metodou CFD je *definice hoření*, což je jednou z nejnáročnějších a nejcitlivějších úloh a často se nelze obejít bez určité míry zjednodušení. Při výběru způsobu popisu hoření (lze postupovat od jednoduchého použití hořáku s předepsanou hodnotou (nebo funkcí hodnoty v čase) rychlosti uvolňování tepla na jednotku plochy (HRRPUA), přes popis paliva, které hoří v závislosti na teplotě vznícení, až po definici paliva, které hoří podle chemických reakcí popisujících proces pyrolýzy) je nutné ověřit, zda je konkrétní softwarový nástroj pro daný způsob popisu hoření validován. Doporučení k výběru definice kinetiky hoření jsou uvedena v metodice Vstupní data do modelů požáru.

7.1.2.5 Aktivní prvky požární bezpečnosti

Výpočty s různým stupněm součinnosti aktivních prvků požární ochrany jsou jednou z nejsložitějších disciplín. Při modelování aktivních prvků požární ochrany obecně nebývá dosaženo dobré shody s experimentálními daty. I zde platí, že je nutné ověřit, zda je konkrétní softwarový nástroj pro daný způsob účel validován. Problematiku modelování samočinného hašení pomocí sprinklerů je možné najít v metodice Modelování potlačení a hašení požáru pomocí sprinklerové ochrany.

7.1.3 Záznam a prezentace výsledků

Výsledky modelování účinků požáru musí být zaznamenány tak, aby byly snadno kontrolovatelné. Ke snadné kontrole je nutné provést záznam přehledně. Za přehledné zpracování se považuje numerické (např. v podobě tabulek) a grafické vyjádření výsledku (v grafu jako funkce času, vizualizací s barevnou škálou výsledků, pomocí isoploch či vektorů, atd.) s přesným popisem polohy, kde bylo sledované veličiny dosaženo.

Softwarové nástroje nabízejí výpočet velkého množství výstupních hodnot. U některých z nich ale nemusí být dostatečně ověřena jejich přesnost. Informace o validovaných výstupech jsou vždy uvedeny v dokumentaci konkrétního softwarového nástroje.

Základními výstupy z pokročilých modelů požáru 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. do celkového vzplanutí – flashoveru),
- aktivace požárně bezpečnostních zařízení (sprinklerů a detektorů),

Dále lze u pokročilých modelů určit:

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

7.2 Modelování konstrukcí

7.2.1 Volba modelu

Pro modelování chování konstrukcí při požáru existují různé metody a přístupy s odlišným stupněm sofistikovanosti, viz kap. 6.2.1. Dle potřeb modelované konstrukce uživatel vybere vhodnou metodu (ověří, zda lze konkrétní model použít) a ve zpracovávané dokumentaci popíše, jakou metodu/postup zvolil (důvody, výhody, omezení, aj.).

Výpočet může být proveden: ručně, pomocí výpočetního programu nebo kombinací obou metod. Při využití výpočtového programu, je zpracovatel povinen prověřit jeho vhodnost pro daný případ. Zvláště je třeba prověřit vhodnost volené globální analýzy, tj. statického modelu. V závislosti na očekávaném chování konstrukce by měla volba programu zohledňovat typ analýzy – lineární či nelineární, možnost vlastního zadání materiálového modelu, vložení imperfekcí konstrukce, atd.

Dle 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.

7.2.2 Vstupní hodnoty

Vstupní data MKP analýzy by měla obsahovat detailní popis geometrie, veškeré předpoklady modelu, vybraný typ analýzy a všechny kroky modelování. Zpravidla by měly být obsaženy tyto údaje:

- jméno a verzi vybraného programu MKP,
- nastavení výpočtu (velikost zatěžovacího kroku),
- geometrický model a numerickou síť (geometrie, typ prvku, výpočetní síť, excentricity atd.),
- materiálový model:
 - mechanické vlastnosti (lineární nebo nelineární, vlastnosti),
 - tepelně technické vlastnosti (konstantní, proměnné s teplotou),
- podepření (okrajové podmínky, předepsané posunutí),
- zatížení (mechanické zatížení s jejich kombinacemi, teplotní zatížení),
- imperfekce (geometrické, zbytková napětí),
- typ analýzy,
- kritéria selhání,
- okrajové podmínky jako např. počáteční teplota, vlhkost,
- charakteristika požadovaných výstupů (teplota konstrukce, vnitřní síly, rozložení napětí, posunutí, deformované tvary, mezní zatížení, vlastní čísla, vlastní tvary, atd.),
- kritéria mezního stavu, která mají být kontrolována (základy statické kontroly).
- a další nutné vstupy požadované konkrétním softwarovým nástrojem.

V případě, že požární návrh vychází z ověření za běžné teploty, popíše se dimenze průřezů a porovná se namáhání a únosnost prvků, tzv. jednotkové posudky. Tuto část lze řešit i odkazy na statický výpočet. Odkazy musí být podrobné a adresné a statický výpočet za běžné teploty musí být k požární zprávě přiložen.

Úplnost vstupních dat udává přesnost získaných výsledků (výstupů) z MKP modelů. Hodnoty potřebné pro výpočet se mohou lišit dle vybraného modelu požáru.

Softwarové nástroje pokrývají různé oblasti problematiky modelování konstrukcí a mohou mít rovněž určité omezení okrajových podmínek (jejich druh i velikost). Před aplikací softwaru na konkrétní řešení musí uživatel ověřit možnosti a limity okrajových podmínek použitého softwarového nástroje.

Stručný popis spolu s doporučením k vybraným vstupním parametrům je popsán níže.

7.2.2.1 Geometrický model a numerická síť

Zvolený model by měl reprezentovat chování zkoumané konstrukce s přesností odpovídající požadavkům zjištěné odezvy systému. Výběr modelu (prutový, deskový, desko-stěnový nebo objemové prvky) a velikost a jemnost sítě ovlivňují přesnost výsledků. Modelování může být provedeno pro celou konstrukci nebo část konstrukce. Pokud je použit model části konstrukce, okrajové podmínky by měly odpovídat vnitřním silám a podepření vycházející z celé konstrukce. Je možné provést diskretizaci modelu - zjednodušení globálního systému na numerický model s konečným počtem stupňů volnosti. Zvláštní pozornost je třeba věnovat výběru typu prvku a sítě modelu. Volba MKP modelu a vybraných typů prvků (prutový, deskový, desko-stěnový nebo objemové prvky) by se měla vztahovat na kritéria mezního stavu, která mají být kontrolována, a matematický model pro přibližné chování konstrukce s odpovídající přesností. Zvolený prvek (lineární, kvadratický nebo vyšší) by měl souviset se zvolenou hustotou sítě a metodou řešení, aby se zajistilo, že výsledky splňují požadavky kladené na 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), zvolenou metodu analýzy (lineární nebo nelineární) a materiálové vlastnosti (lineární nebo nelineární).

Přechody prvků sítě, od jemného okraje do hrubšího oka, by měly být postupné a hladké. Hustota výpočetní sítě by měla úzce souviset s vyšetřovaným režimem kolapsu a s příslušnými kritérii mezního stavu. Síť i volba typu prvku by měly umožňovat přesné modelování geometrie imperfekcí a možnost, že vzpěr může být lokální. V místech s vysokými koncentracemi napětí nebo na místě, kde se očekává porušení konstrukce, se doporučuje zjemnění sítě, aby byla zaručena požadovaná přesnost. Přesnost zvolené sítě (hustota, typy vybraných prvků) by měla být prokázána konvergenčními studiemi.

7.2.2.2 Materiálový model

Mechanické chování materiálů je popsáno vztahem mezi napětím a relativním protažením. V případě požáru by měly být mechanické vlastnosti materiálů převzaty z příslušných norem ČSN EN 199X-1-2 nebo z materiálových zkoušek za zvýšené teploty. V závislosti na typu analýzy a jejich 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.

7.2.2.3 Zatížení

V dokumentu je nezbytné uvést veškerá zatížení, která mohou v průběhu životnosti na konstrukci působit. Popíše se zatěžovací stavy včetně součinitelů zatížení a volené kombinace zatížení. Zvláštní pozornost se věnuje mimořádným kombinacím zatížení konstrukce vystavené požáru. Zde se popíše zvolené součinitele kombinace a dílčí součinitele za požáru. Pro tepelné zatížení konstrukce/její části/prvku se popíše teplotní pole/křivka rozvoje teploty plynu či adiabatická teplota povrchu, která je pro výpočet použita. Uvede se rovněž linie či plochy, na které teplota působí.

7.2.2.4 Imperfekce

Imperfekce v MKP modelu by měly zohledňovat účinky geometrických odchylek od dokonalého tvaru, zbytkových napětí a nedokonalostí v okrajových podmínkách (např. podepření). Doporučují se: a) geometrické imperfekce, úpravou dokonalého tvaru konstrukce a dodatečných zbytkových napětí v důsledku výroby, b) ekvivalentní geometrické imperfekce úpravou dokonalého tvaru konstrukce - tyto imperfekce mají pokrýt vliv jak geometrických imperfekcí, tak zbytkových napětí a mají větší velikost než pouze geometrické imperfekce. Do modelu se mohou zavést pomocí: a) změřeného tvaru imperfekce konstrukčního prvku (pouze pro geometrické imperfekce), b) tvaru imperfekcí založeného na ekvivalentních geometrických imperfekcích, nebo modifikací dokonalého tvaru předdefinovaným posunem (povoleno pro geometrické i ekvivalentní geometrické imperfekce), c) tvaru imperfekce založeného na analýze lineárního vzpěru odpovídající vlastního tvaru spojenému s očekávaným režimem porušení (povoleno pro geometrické i ekvivalentní geometrické imperfekce).

7.2.2.5 Typy analýz

V MKP modelech lze využít lineární či nelineární analýzy. Nelinearity vyplývají z více zdrojů: a) velkých posunů anebo z velkých napětí (geometrická nelinearita), b) z nelineárního vztahu mezi napětím a deformací (materiálová nelinearita), c) změnou kontaktu (kontaktní nelinearita). Lineární analýza může být použita, pokud není v modelu nutné zahrnout žádnou z výše uvedených

nelinearit. U lineární analýzy platí princip superpozice. U nelineární je naopak nutné provést analýzu pro každý zatěžovací stav či kombinaci zvlášť.

7.2.3 Záznam a prezentace výsledků

Výsledky analýzy chování konstrukce při požáru musí být zaznamenány tak, aby je bylo možné kontrolovat, případně opakovat třetí osobou. Ke snadné kontrole je nutné provést záznam přehledně. Za přehledné zpracování se považuje numerické (např. v podobě tabulek) a grafické vyjádření výsledků (v grafu, vizualizaci přetvořené konstrukce, vykreslením vnitřních sil a napětí, atd.).

Softwarové nástroje nabízejí výpočet velkého množství výstupních hodnot. Ve zprávě by měly být zaznamenány takové výsledky, které nejlépe vypovídají o chování konstrukce.

Základními výstupy z pokročilých modelů konstrukce při požáru jsou:

- teplota posuzovaného prvku/konstrukce,
- kritická teplota,
- požární odolnost,
- vnitřní síly,
- rozložení napětí,
- posunutí,
- deformované tvary,
- mezní zatížení,
- vlastní čísla a vlastní tvary,

Dále je vhodné u pokročilých modelů doložit:

- výsledky validační či verifikační studie,
- studii citlivosti:
 - vliv vybraných vstupních dat
 - vliv velikosti výpočetní sítě.

7.3 Modelování evakuace

7.3.1 Kritéria pro výběr modelu

Pokud se uživatel připravuje zvolit pokročilý model evakuace, měl by si během této fáze rozhodování položit několik základních skupin otázek.

- *Na jakou otázku má model evakuace odpovědět? Jaké faktory jsou pro tuto odpověď zásadní? Jaké informace jsou nezbytné pro popis scénáře a konfiguraci modelu?* Přestože by v ideálním případě měl uživatel pracovat s již hotovým řešením objektu, nejčastěji bude model aplikován v průběhu jeho navrhování. V takovém případě bude nezbytné odvozovat alespoň některá potřebná vstupní data z již existujících objektů a situací.

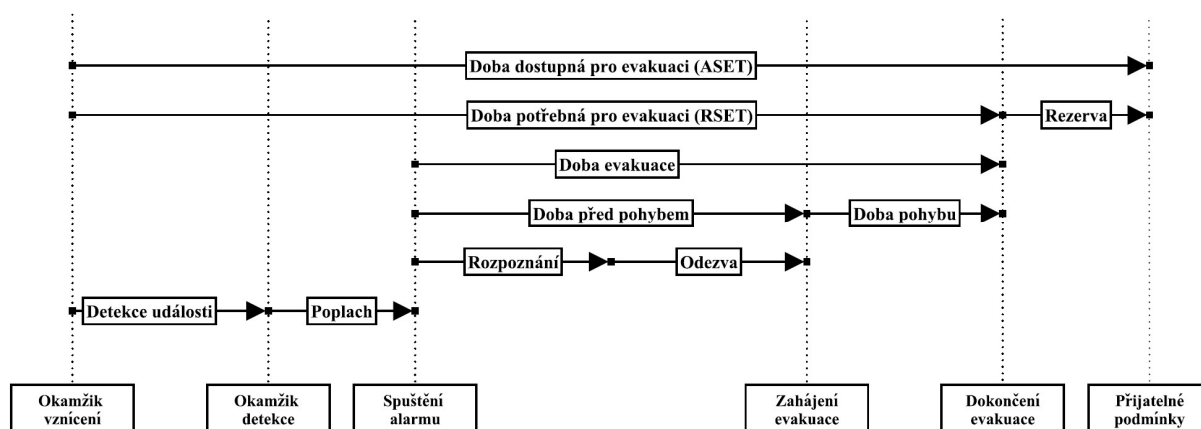
Některé modely potom nevyhnutelně trpí částečným nedostatkem vstupních informací, což jejich využitelnost redukuje.

- *Jaké výstupy modelu evakuace naplní cíle projektu?* Pro zodpovězení této otázky je klíčové zapojit základní zainteresované strany (stakeholdery) do přípravy modelu, alespoň v podobě pravidelných konzultací.
- *Jaký je záměr řešeného projektu?* Záměr projektu ovlivňuje rozsah modelu, formát jeho výstupů a způsob předání výsledků zadavateli. Pokročilé modely evakuace mohou mít řadu aplikací, mezi které patří například následující:
 - Doba potřebná pro evakuaci (RSET). Jde o nejběžnější aplikaci modelu, často vyžaduje paralelní stanovení doby dostupné pro evakuaci (ASET), kterou obvykle stanovujeme prostřednictvím modelu požáru.
 - Maximální bezpečná obsazenost objektu nebo jeho části, zejména v situacích zahrnujících přemístění osob uvnitř objektu do požárem nezasážených částí.
 - Ověření dostupnosti evakuačních tras, jejich kapacity, počtu únikových východů a jejich rozmístění v objektu.
 - Ověření normativních postupů. Zejména v případě komplexních projektů je vhodné vybrané kritické části projektu ověřit alternativním postupem.
 - Ověření nákladů a přínosů změn v projektu. Pokročilé modely jsou v tomto případě schopny předem stanovit přijatelný poměr mezi investicí do zvýšení bezpečnosti objektu a reálným přínosem této investice.
 - Forenzní metody. Vyšetřování tragických požárů spojených s vyšším počtem obětí na životech (např. The Station nightclub fire v roce 2003 v USA) často zahrnují modely evakuace a požáru jako klíčovou techniku.
 - Výzkumné úkoly. Existující nástroje v těchto případech slouží především jako podpurná technika pro ověření některých předpokladů.
 - Demonstrace evakuačního procesu jako součást výcviku.

7.3.2 Doba pro evakuaci osob

Jednoduchý postup bezpečnostního posouzení objektu srovnává dobu dostupnou pro evakuaci (Available Safe Egress Time - ASET) a dobu potřebnou pro evakuaci (Required Safe Egress Time - RSET). Pokud platí, že doba dostupná pro evakuaci je delší než doba potřebná ($ASET > RSET$), včetně určité bezpečnostní rezervy, lze pomocí tohoto přístupu považovat návrh za bezpečný (obr. 4).

V současné době nicméně není možné přebírat koncept ASET/RSET v jeho původní, striktně deterministické a zjednodušené podobě. Důvodem je zejména statistická, či přímo stochastická povaha klíčových parametrů vstupujících do tohoto konceptu. Jednotlivé klíčové časové intervaly (rozpoznání, odezva, pohyb apod.) nejsou identické napříč obyvateli objektu a nejsou identické ani v případě opakování stejné situace u stejné osoby. Vždy se jedná o náhodnou veličinu s příslušným statistickým rozdělením, a takto je třeba nakládat také s výsledky, které tyto vstupní hodnoty produkují.



Obr. 4 Doba pro evakuaci osob a její složky

7.3.3 Účinky požáru

Působení požáru na evakuované osoby se rozděluje následujícím způsobem:

- psychologické vlivy,
- fyziologické vlivy,
- kombinované vlivy.

Psychologické vlivy jsou zaměřeny na to, zda se budou evakuované osoby cítit natolik ohroženy, aby se snažily o odchod, a následně zda jim v tom nebudou podmínky na evakuační trase bránit (opět z psychologického pohledu). Typickým příkladem může být spatření kouře, které vyvolá samovolnou evakuaci, nicméně plameny na evakuační trase ji reálně znemožní nebo výrazně omezí. Konkrétní poznatky o psychologických účincích požáru ukazují jako typické negativní projekty snahu o návrat na původní místo v zakouřeném prostředí nebo prostředí se sníženou viditelností.

V případě *fyziologických vlivů* je třeba stanovit, zda jsou osoby fyzicky schopny uniknout. Jsou zde zahrnuty vlivy, které únik mohou zpomalit nebo ztížit, jako je působení hustého nebo dráždivého kouře. Je nutné se zaměřit také na stanovení okamžiku, kdy osoby pravděpodobně ztratí své schopnosti, takže nemohou uniknout bez cizí pomoci (např. ztráta vědomí v důsledku otravy oxidem uhelnatým). Důležitou součástí hodnocení je posouzení dlouhodobých nepříznivých důsledků působení a podmínek, za nichž se působení stane pravděpodobně následně smrtelným. Mezi základní fyziologické vlivy patří zejména tyto:

- snížená viditelnost, poruchy vidění,
- bolest dýchacích cest, dušnost,
- bolest na kůži.

V řadě případů má působení zplodin požáru na osoby *kombinovaný vliv*, tedy přímé fyziologické účinky, a současně je omezuje také po psychologické stránce. Příkladem může být pocit dechové nedostatečnosti při vdechnutí toxických plynů, které zejména v případě starších osob a osob se srdečními chorobami způsobuje zmatek a ztrátu vědomí.

7.3.3.1 Hustota kouře

V případě hustoty kouře se stanovují přijatelné meze na základě negativního vlivu zakouřeného prostoru na rychlost pohybu a na schopnost osob nalézt cestu. Rovněž se posuzuje, 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 m^{-1} se empiricky rychlost chůze zmenšuje z původní hodnoty cca $1,2 \text{ ms}^{-1}$ bez působení kouře na hodnotu 0.3 ms^{-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.

7.3.3.2 Toxické zplodiny

Mezi klíčové toxické produkty hoření řadíme 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

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 tab. 4.

Tab. 4 Dopady působení oxidu uhelnatého (CO)

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

Kyanovodík

Kyanovodík (HCN) je bezbarvá, velmi těkavá kapalina s intenzivním pachem hořkých mandlí. 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 minutách (tab. 5).

Tab. 5 Dopady působení kyanovodíku (HCN)

| HCN [ppm] | | Dopady a doba expozice | Zdroj |
|-----------|----------|------------------------|-----------------------------------|
| <80 | 1 hodiny | Mírná hyperventilace | Purser (1984) |
| 100 | 30 minut | Ztráta vědomí | Purser (1984), Kimmerle (1974) |
| 200 | 2 minuty | Ztráta vědomí | Purser (1984), Kimmerle (1974) |

| | | | |
|------|----------|----------------------|-----------------|
| 300+ | Sekundy | Smrt | Kimmerle (1974) |
| 1000 | Okamžitě | Ztráta vědomí a smrt | Purser (1984) |

Oxid uhličitý

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.

7.3.3.3 Vysoká teplota

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.

Působení vysoké teploty rozlišujeme do následujících kategorií:

- Radiace. Je nutné se zaměřit na vlivy bolesti a popálení pokožky, snesitelné meze působení jsou uvedeny v tab. 6.
- 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.

Tab. 6 Dopady působení vysoké teploty

| Teplota [°C] | Působení | Doba expozice | Dopady |
|--------------|--------------------|---------------|--------------------------------|
| 60 | Vedení (např. kov) | Sekundy | Popáleniny |
| 100 | Konvekce | 30 minut | Přehřátí |
| 120 | Konvekce | 5 minut | Popálení kůže a dýchacích cest |
| 185 | Konvekce | 1 minuta | 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 párou je kritická hodnota popálení dýchacího ústrojí již 60 °C, k tomuto nasycení může dojít už při prostém hašení požáru vodou.

7.3.3.4 Výpočet účinků dráždivých a dusivých plynů a vysoké teploty

Účinek látek dráždivých smysly či dýchací cesty spočívá od mírného podráždění až po silnou bolest. Tyto účinky je možno hodnotit pomocí stanovení prahové koncentrace, při jejímž překročení je setrvání osoby na místě nepříjemné. Postup je následující:

Koncentrace každé dráždivé látky se vyjadřuje jako poměrná část přijatelné úrovně koncentrace (FEC) pro každou dráždivou látku.

- Celková hodnota FEC pro vlivy způsobené všemi přítomnými dráždivými látkami se získá součtem jednotlivých FEC.
- Součet při každém časovém přírůstku se následně porovná s celkovou hodnotu FEC rovnou 1,0.
- Je-li celková hodnota FEC menší než 1,0, pokládá se dráždivý účinek na vystavené osoby za přijatelný a pravděpodobně nebude mít význačný nepříznivý dopad na schopnost úniku.
- Je-li celková hodnota FEC větší než 1,0, pokládá se účinek a síla podráždění u vystavených osob za nepříznivě ovlivňující jejich bezpečný únik.

Analogicky se postupuje při výpočtu působení dusivých plynů a teploty. V případě aplikace pokročilých modelů požáru a evakuace osob je nezbytné, aby měly tyto nástroje implementovaný příslušný algoritmus pro výpočet limitních dávek pro unikající osoby. Tento algoritmus je možné ověřit verifikačním testem.

7.3.4 Vstupní hodnoty

Vstupní hodnoty modelu jsou ve své konkrétní podobě odvozeny od použitého nástroje. Obecně lze vstupy do modelu, které musí uživatel definovat před začátkem analýzy, charakterizovat takto:

- použitý softwarový nástroj a jeho konkrétní verze,
- geometrický model objektu,
- typ sítě, v případě diskrétní sítě také její rozlišení,
- počet osob a jejich rozmístění v objektu,
- reakční doba na pokyn k evakuaci,
- aktivita osob v průběhu evakuace,
- fyzické a kognitivní schopnosti, případně jejich omezení,
- sociální faktory,
- specifické role vybraných osob (např. ostraha nebo asistence),
- limity úrovně přijatelnosti působení vysoké teploty, dráždivých nebo dusivých plynů.
- další nutné vstupy odvozené od použitého nástroje.

7.3.4.1 Charakteristika osob

Charakteristika osob ovlivňuje jejich reakci na vznik požáru a rovněž následnou evakuaci z budovy. Obecně platí, že pouze některé charakteristiky osob jsou pro evakuační proces kritické a z této skupiny jsou pouze některé konkrétně reprezentovány v pokročilých modelech. V následujícím přehledu se zaměříme právě na ty charakteristiky, pro které existují statistická data a současně jsou běžně zahrnuty do modelů evakuace jako součást vstupních parametrů.

7.3.4.2 Věkové složení

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 nemáme k dispozici konkrétní údaje o věkovém složení a současně je možné jej v modelu definovat, aplikujeme 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 volíme při dodržení předchozích parametrů minimální věk osoby 10 let a maximální věk 85 let.

Doporučení vychází ze standardizovaného postupu dle německé směrnice Richtlinie für Mikroskopische Evakuierungs Analysen (RIMEA).

7.3.4.3 Reakční doba

Aktuálně používané modely evakuace nepracují s dobou před pohybem ve výše popsané struktuře, ale celý tento interval definují jako reakční dobu nebo zpoždění. Jde vždy o časový interval mezi začátkem simulace a samotným zahájením evakuace jednotlivých osob.

- V případě modelování okamžité evakuace stanovíme reakční dobu konstantní pro všechny osoby takovým způsobem, aby odpovídala bezprostřední reakci na vyhlášení pokynu k evakuaci. Jestliže v modelu zahrnujeme také rozvoj požáru, bude tato doba odpovídat okamžiku spuštění alarmu.
- V případě modelování plynulé evakuace volíme statistické rozložení reakční doby. Vzhledem k tomu, že doba před evakuací je kritickým faktorem, který ovlivňuje získanou hodnotu RSET, je vhodné se opřít o konkrétní empirická data. Jako vhodný zdroj lze doporučit publikaci A Pre-Evacuation Database for Use in Egress Simulations (2019). V případě, že empirická data nemáme k dispozici, volíme přednostně lognormální statistické rozdělení, které odpovídá reálnému chování, případně rovnoměrné rozdělení, které doporučuje směrnice RIMEA. Maximální hodnoty reakční doby jsou v případě těchto rozdělení jednotky minut.
- V případě postupné evakuace volíme statistické rozložení reakční doby pro jednotlivé skupiny samostatně. Jako příklad lze uvést základní školu, která zahrnuje jednotlivé třídy, evakuované postupně v konkrétním pořadí na základě provedeného požárního cvičení.

7.3.4.4 Rychlost pohybu

Rychlost pohybu osoby je podobně jako zjednodušená reakční doba kritickým parametrem, který má na výsledky modelu zásadní vliv. Můžeme aplikovat normované hodnoty dle ČSN 730802, které jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Rychlost pohybu evakuovaných osob dle ČSN 730802

| Úsek evakuační trasy | Rychlost [ms ⁻¹] |
|----------------------|------------------------------|
| Rovný úsek | 0,583 |
| Schody dolů | 0,500 |
| Schody nahoru | 0,417 |

Obecně nicméně platí, že rychlost pohybu je závislá nejenom na typu konkrétního úseku evakuační trasy, ale také na lokální hustotě osob. Jako vhodný zdroj pro jednoduché výpočty lze využít příručku SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (2008).

V případě lokální hustoty osob nepřesahující hodnotu 0,55 osob.m⁻² se evakuované osoby pohybují svojí maximální rychlostí. Tuto hodnotu můžeme vypočítat na základě vztahu

$$v = 0,85 k,$$

kde v je rychlost osoby a k je rychlostní konstanta odpovídající konkrétnímu úseku evakuační trasy. Konkrétní hodnoty pro tyto rychlostní konstanty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 8 Rychlost pohybu evakuovaných osob dle ČSN 730802

| Úsek evakuační trasy | | k [ms ⁻²] |
|----------------------|---------------------|-----------------------|
| Rovný úsek | | 1,40 |
| Výška schodu [mm] | Hloubka schodu [mm] | |
| 190 | 254 | 1,00 |
| 272 | 279 | 1,08 |
| 165 | 305 | 1,16 |
| 165 | 330 | 1,23 |

Při překročení lokální hustoty osob 0,55 osob.m⁻² maximální rychlost evakuovaných osob klesá. Výše uvedený vzorec je v takovém případě modifikován do nové podoby

$$v = k - akD,$$

kde a je konstantní hodnota 0,266 m².osoba⁻¹ a D je hustota osob vyjádřená jako osob.m⁻².

Uvedené hodnoty reprezentují jednotlivce bez omezení pohybu. V případě jejich fyzického handicapu lze použít následující hodnoty, tab. 9 odpovídá pohybu po rovinném úseku.

Tab. 9 Rychlost pohybu osob po rovině s fyzickým omezením

| Omezení | Střední h. [ms ⁻¹] | Směr. odch. [ms ⁻¹] | Rozsah [ms ⁻¹] |
|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Elektrický vozík | 0,89 | - | 0,85-0,93 |
| Kolečkové křeslo | 0,69 | 0,35 | 0,13-1,35 |
| Kolečkové křeslo s asistentem | 1,30 | 0,34 | 0,84-1,98 |
| Berle | 0,94 | 0,30 | 0,63-1,35 |
| Hůlka | 0,81 | 0,38 | 0,26-1,60 |
| Chodítka | 0,57 | 0,29 | 1,10-1,02 |

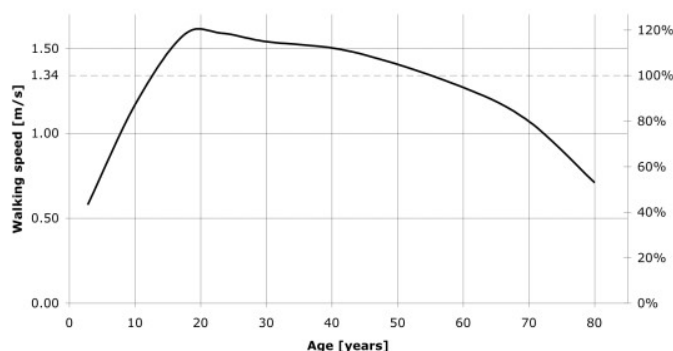
| | | | |
|--------------|------|------|-----------|
| Bez dopomoci | 0,95 | 0,32 | 0,24-1,68 |
|--------------|------|------|-----------|

V případě pohybu osob po schodišti jsou vybrané hodnoty následující (tab. 10).

Tab. 10 Rychlost pohybu osob po schodišti s fyzickým omezením

| Omezení | Střední h. [ms^{-1}] | Směr. odch. [ms^{-1}] | Rozsah [ms^{-1}] |
|----------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Schody nahoru | | | |
| Berle | 0,22 | - | 0,13-0,31 |
| Hůlka | 0,35 | 0,11 | 0,18-0,49 |
| Chodítko | 0,35 | 0,11 | 0,18-0,49 |
| Bez dopomoci | 0,43 | 0,13 | 0,14-0,62 |
| Schody dolů | | | |
| Berle | 0,22 | - | - |
| Hůlka | 0,32 | 0,12 | 0,11-0,49 |
| Chodítko | 0,16 | - | - |
| Bez dopomoci | 0,36 | 0,14 | 0,13-0,70 |

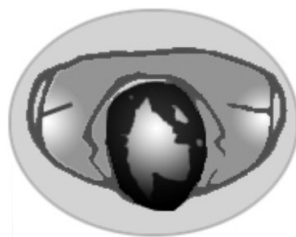
Pro statistické rozložení rychlosti lze rovněž efektivně aplikovat zdroj Parameters of pedestrians, pedestrian traffic and walking facilities (2006). Dokument definuje orientační rozdělení rychlosti dle věku a určuje střední rychlost pohybu pro muže a ženy $1,41 \text{ ms}^{-1}$, resp. $1,27 \text{ ms}^{-1}$ (obr. 5).



Obr. 5 Statistické rozdělení rychlosti chůze v závislosti na věku

7.3.4.5 Rozměry osob a efektivní šířka úseků evakuační trasy

Jednotlivec je z hlediska minimálního prostoru, který zaujímá, a interakcí s okolními osobami, popisován tzv. osobní elipsou. Koncept byl poprvé uvedený do praxe Johnem J. Fruinem. Prostor je definován jako eliptická čára znázorňující 95% percentil půdorysných rozměrů oblečeného dospělého muže s určitým přidaným prostorem, který odráží snahu jednotlivce vyhybat se přímému dotyku s okolními osobami. Včetně tohoto přidaného prostoru má základní elipsa těla rozměry 61 cm v delší ose a 46 cm v kratší ose, plocha této elipsy je $0,22 \text{ m}^2$. Čistě půdorysné rozměry lidského těla, tedy elipsa (obr. 6) těsně obepínající tělo bez přidaného prostoru, má v případě Evropanů rozměry 45 cm, resp. 25 cm.



Obr. 6 Zobrazení osobní elipsy jako minimálního prostoru, který jednatlivec zaujímá

Kromě tendence osob dodržovat určitý odstup od svých sousedů musíme při jejich pohybu zohlednit také dynamiku 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. Hovoříme tak o efektivní šířce úseku (tab. 11).

Tab. 11 Efektivní šířka úseků evakuační trasy

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

7.3.5 Záznam a prezentace výsledků

7.3.5.1 Statistické zpracování výsledků

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, stochastikou povahu pak 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 pracujeme nikoliv 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 následující tabulka.

Tab. 12 Výpočet intervalu spolehlivosti v případě Gaussova rozdělení

| Interval spolehlivosti | Násobitel směr. odch. |
|------------------------|-----------------------|
| 68,2 % | 1 |
| 80 % | 1,28 |
| 90 % | 1,65 |
| 95 % | 1,96 |
| 95,4 % | 2 |
| 98 % | 2,33 |
| 99 % | 2,58 |
| 99,7 % | 3 |

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

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

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.

7.3.5.2 Zpracování výsledků

Zpráva, která využívá modely evakuace, by měla obsahovat následující informace:

- modelovaná úloha:
 - modelovaný prostor, popis prostoru, jeho využití, navigační a jiné prvky, existující východy, protipožární ochrana apod.,
 - popis předmětu analýzy a vymezení oblasti řešení,
 - co je předmětem řešení modelu, případně co naopak předmětem už není.
- použitý nástroj a model:
 - název, výrobce a verze,
 - použitý model,
 - vstupní data, jejich zdroj a způsob zpracování,
 - verifikace modelu, dokládáme proces nebo zdroj již provedené verifikace,

- parametrické nastavení modelu,
- validace modelu, dokládáme proces nebo zdroj již provedené validace modelu,
- posuzovaný scénář:
 - předpoklady, okrajové podmínky,
 - počet simulací modelu,
 - aplikovaná zjednodušení včetně posouzení dopadů,
 - míra nejistoty jednotlivých vstupních hodnot a způsob jejího ošetření,
- výsledky (grafické znázornění),
 - celkový evakuační čas, statistické parametry výsledků,
 - zobrazení průběhu evakuace v určitých časových krocích,
 - specifické události v průběhu simulace modelu (fronty, extrémní hustota apod.)

8 Závěrečné shrnutí

8.1 Pro zpracovatele

Při použití pokročilých metod modelování zpracovatel musí zajistit správnost vybraného řešení a zpracovat dokumentaci tak, aby byla kompletní, přehledná a snadno kontrolovatelná.

Se správností řešení souvisí výběr vhodného 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.

Ve všech řešených oblastech, modelování požáru, modelování chování konstrukcí při požáru a modelování evakuace osob by měla zpracovaná dokumentace obsahovat zdůvodnění výběru modelu, podrobný popis vstupních a výstupních dat. Náležitosti jednotlivých částí jsou uvedeny dále v metodice.

Pro rychlou kontrolu správného postupu při modelování pokročilými metodami a kontrolu kompletně zpracované dokumentace slouží tzv. check-list.

8.2 Pro posuzovatele

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. Posuzovatel může ke kontrole využít check-list.

Výběr postupu řešení či numerického modelu je nejdůležitějším bodem posudku. Výběr však nebývá jednoznačný a může být důvodem k diskusi 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

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.

ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru, ČNI 2004.

ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí, ČNI 2004.

ČSN 730802 Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty, ČNI 2009.

Hofmeister, C. E., Hill, S.M. a Jensen, R. (2011). *Guidelines for substantiating a fire model for a given application*, Engineering Guide, SFPE G.06, Issue 54.

Kimmerle, G. (1974). *Aspects and Methodology for the Evaluation of Toxicological Parameters during Fire Exposure*, Journal of Combustion Toxicology, vol. 1, p. 4.

Kučera, P. a Pezdová Z. (2010). *Základy matematického modelování požáru*. Ostrava: SPBI.

Kwasniewski, L. (2009). *On practical problems with verification and validation of computational models*, Archives of Civil Engineering, vol. LV, no. 3, pp. 323-346.

Purser, D. A., Grimshaw, P. a Berrill, K. R. (1984). *Intoxication by Cyanide in Fires: A Study in Monkeys using Polyacrylonitrile*, Archives of Environmental Health, vol. 39, no. 6, pp. 394-400, November/December.

Roache, P.J. (1998). *Verification and validation in computational science and engineering*, Hermosa Publishers Albuquerque, NM

Wald, F. a kol. (2017a). *Modelování dynamiky požáru v budovách*, České vysoké učení technické v Praze.

Wald, F. a kol. (2017b). *Dílčí zpráva s výsledky literární rešerše pro řešení VP MV ČR č. VI20162019034*, ČVUT Praha, 68 s.

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obr. 1 Proces verifikace a validace (Kwasniewski, 2009)..... | 6 |
| Obr. 2 Schématické rozdělení modelů požáru (Wald, 2017) | 8 |
| Obr. 3 Proces výběru vhodného modelu požáru (Hofmeister, Hill, Jensen, 2011) | 17 |
| Obr. 4 Doba pro evakuaci osob a její složky | 26 |
| Obr. 5 Statistické rozdělení rychlosti chůze v závislosti na věku..... | 32 |
| Obr. 6 Zobrazení osobní elipsy jako minimálního prostoru, který jednatel zaujímá..... | 33 |

Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1 Výčet vhodných softwarových nástrojů k modelování požáru | 9 |
| Tab. 2 Výčet vhodných softwarových nástrojů k modelování konstrukcí vystavených požáru | 12 |
| Tab. 3 Příklady softwarových nástrojů k modelování evakuace osob | 14 |
| Tab. 4 Dopady působení oxidu uhelnatého (CO) | 27 |
| Tab. 5 Dopady působení kyanovodíku (HCN) | 27 |
| Tab. 6 Dopady působení vysoké teploty | 28 |
| Tab. 7 Rychlost pohybu evakuovaných osob dle ČSN 730802 | 31 |
| Tab. 8 Rychlost pohybu evakuovaných osob dle ČSN 730802 | 31 |
| Tab. 9 Rychlost pohybu osob po rovině s fyzickým omezením | 31 |
| Tab. 10 Rychlost pohybu osob po schodišti s fyzickým omezením | 32 |
| Tab. 11 Efektivní šířka úseků evakuační trasy | 33 |
| Tab. 12 Výpočet intervalu spolehlivosti v případě Gaussova rozdělení | 34 |

Přílohy

A. Ověřovací příklady modelů požáru

A.1 VÝPOČET PODSTROPNÍ TEPLoty V POŽÁRNÍM ÚSEKU METODOU CFD

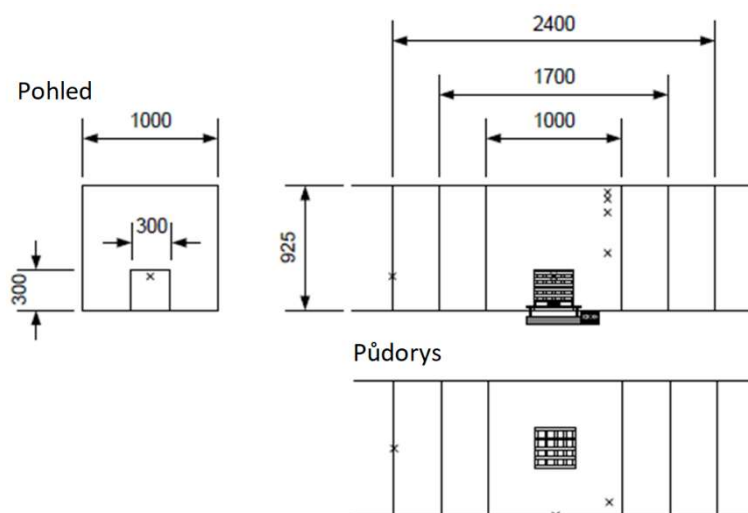
Abstrakt

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

1 POPIS POŽÁRNÍ ZKOUŠKY

Požární zkouška v malém úseku o rozměrech 1,00 m×1,00 m×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×0,30 m. Požární zatížení tvoří dřevěná hranice umístěná na půdorysné ploše 0,30 m×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 obr. 1. 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.



Obr. 1 Uspořádání požární zkoušky (Lonnermark a Ingason, 2005)

2 NUMERICKÝ MODEL

2.1 Software

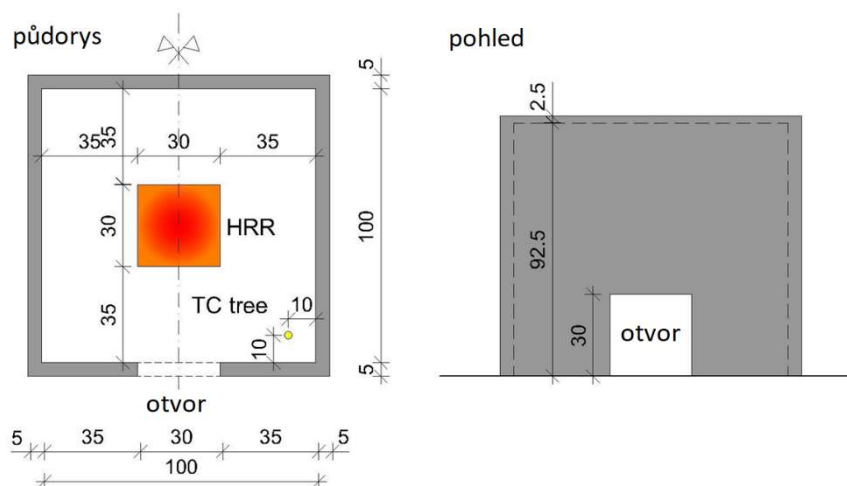
Výpočet je proveden pomocí softwaru Fire Dynamics Simulator (FDS), verze 6.5.2. Výsledky jsou zobrazeny v postprocesoru Smokeview, verze 6.3.12.

2.2 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.

2.3 Výpočetní oblast a síť

Rozměry modelu odpovídající rozměrům úseku z požární zkoušky jsou uvedeny na obr. 2 (rozměry v cm). Na obr. 3 je vizualizace modelu celého požárního úseku.



Obr. 2 Geometrie modelu

K výpočtu jsou použity čtyři sítě o rozměrech 0,35 m×1,60 m×1,20 m, viz obr. 3. Každá ze sítí je rozdělena na buňky o rozměrech 0,03 m×0,03 m×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.

2.4 Materiály

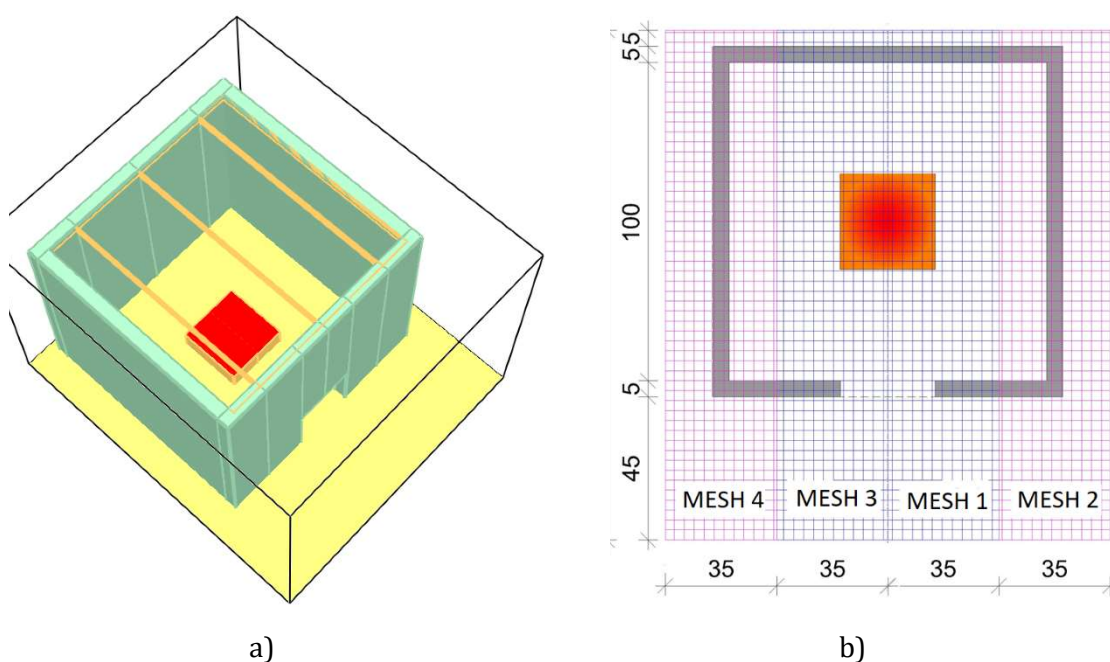
Materiál ohraničujících konstrukcí je zvolen s ohledem na typ požární zkoušky a fakt, že se jedná o snadno přemístitelné příčky. V modelu je použit sádrokarton s tepelně technickými vlastnostmi uvedenými v tab. 1.

Tab. 1 Tepelně technické vlastnosti sádkokartonu

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

2.5 Okrajové podmínky

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



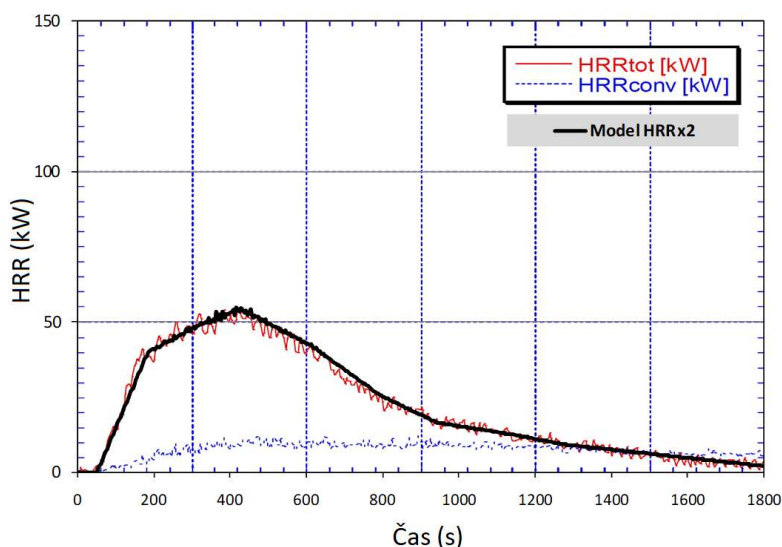
Obr. 3 a) Vizualizace modelu s výpočetními sítěmi pro symetrickou polovinu; b) Výpočetní síť modelu (rozměry v cm)

2.6 Geometrie pevných těles

Stěny a strop požárního úseku jsou ze sádkokartonu, jehož vlastnosti jsou definovány v tab. 1. Tloušťka ohraničujících konstrukcí je v modelu zvolena 0,05 m. Větrací otvor o velikosti 0,3 m×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×0,3 m×0,1 m. Těleso má vlastnosti povrchu typu INERT, tzn. nereagující s okolním prostředím. Na tomto tělese je umístěn zdroj hoření.

2.7 Zdroj a reakce hoření

Hoření dřevěné hranice není v modelu simulováno. Zdroj požáru je nahrazen plochou s definovanou závislostí HRR na čase. Na obr. 4 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 $0,30\text{ m} \times 0,30\text{ m}^2$, na které se nachází zdroj požáru. Hodnota HRRPUA použitá v modelu je rovna $604,44\text{ kW/m}^2$. 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 tab. 2.



Obr. 4 Náhrada rychlosti uvolňování tepla požáru dřevěné hranice zjednodušenou křivkou

Tab. 2 Závislost HRRPUA na čase

| Heat Release Rate per Unit Area = 604,44 kW | |
|---|-----------|
| 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 |

Jako reakce hoření, kterou je nutné ve vstupním kódu definovat, je z důvodu zachování jednoduchosti využít propan. 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., pouze specifikace `&REAC FUEL='PROPANE'`. Ve skutečnosti je látkou vstupující do reakce hořené dřevo. Definice tohoto reaktantu je složitější a je doporučeno pouze pro zkušené uživatele.

2.8 Měřící zařízení

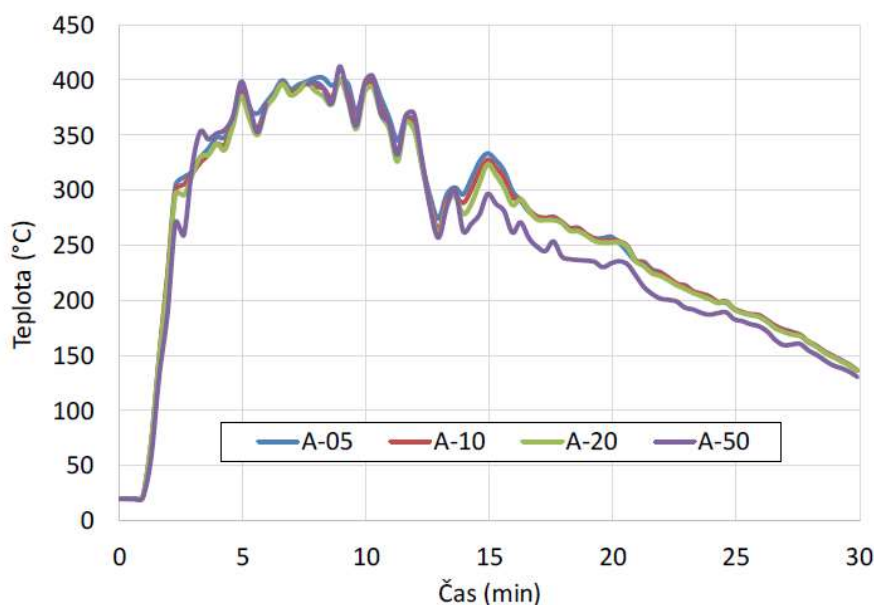
Teplota plynu je v modelu řešena pomocí příkazu `TEMPERATURE`. Body pro výpočet teploty jsou umístěné 5 cm, 10 cm, 20 cm a 50 cm pod stropem.

2.8 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 je součástí přílohy 1.

3 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 obr. 5.



Obr. 5 Vypočítané teploty plynu v daných výškách pod stropní konstrukcí

4 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 je ověřená dostatečná shoda modelu s reálnou zkouškou. Příklad lze využít jako ověřovací příklad pro jednoduchou předpověď teploty plynu při požáru.

LITERATURA

McGrattan, K., Hostikka, S. and Floyd, J. 2016. *Fire Dynamics Simulator (Version 6), User Guide*. NIST Special Publication 1019-6. Baltimore: NIST, 2016.

Lönnermark A., Ingason H., 2005. *Fire Spread in Large Industrial Premises and Warehouses*, Brandforsk project 630-021, SP Swedish National Testing and Research Institute, 2005.

Wald, F. a kol. (2014) *Benchmark studies, Experimental validation of numerical models in fire engineering*, Praha: CTU Publishing House, ISBN 978-80-01-05443-7.

ZDROJOVÝ KÓD

```
&HEAD CHID='benchmark_enclosure', TITLE='benchmark_enclosure'/
&TIME T_END=1800.0, DT=0.1/
&DUMP RENDER_FILE='benchmark_enclosure.ge1', COLUMN_DUMP_LIMIT=.FALSE., NFRAMES=450/
&MESH ID='MESH01', IJK=12,60,45, XB=0.5,0.85,-0.5,1.1,0.0,1.2/
&MESH ID='MESH02', IJK=12,60,45, XB=0.85,1.2,-0.5,1.1,0.0,1.2/
&MESH ID='MESH01', IJK=12,60,45, XB=0.15,0.5,-0.5,1.1,0.0,1.2/
&MESH ID='MESH02', IJK=12,60,45, XB=-0.2,0.15,-0.5,1.1,0.0,1.2/
&DEVC ID='A-05', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.9,0.1,0.875, ORIENTATION=-1.0,1.0,0.0/
&DEVC ID='A-10', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.9,0.1,0.825, ORIENTATION=-1.0,1.0,0.0/
&DEVC ID='A-20', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.9,0.1,0.725, ORIENTATION=-1.0,1.0,0.0/
&DEVC ID='A-50', QUANTITY='TEMPERATURE', XYZ=0.9,0.1,0.45, ORIENTATION=-1.0,1.0,0.0/
&MATL ID='GYPSUM PLASTER',
  FYI='Quintiere, Fire Behavior - NIST NRC Validation',
  SPECIFIC_HEAT=0.84,
  CONDUCTIVITY=0.48,
  DENSITY=1440.0/
&SURF ID='gypsum_plaster',
  RGB=146,202,166,
  MATL_ID(1,1)='GYPSUM PLASTER',
  MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
  THICKNESS(1)=0.05/
&REAC FUEL='PROPANE'/
&SURF ID='burner-604',
  COLOR='RED',
  HRRPUA=604.44, SPEC_ID='PROPANE',
  RAMP_Q='burner-604_RAMP_Q'/
&RAMP ID='burner-604_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='burner-604_RAMP_Q', T=48.0, F=0.0/
&RAMP ID='burner-604_RAMP_Q', T=181.0, F=0.736/
&RAMP ID='burner-604_RAMP_Q', T=314.0, F=0.906/
&RAMP ID='burner-604_RAMP_Q', T=419.0, F=1.0/
&RAMP ID='burner-604_RAMP_Q', T=610.0, F=0.774/
&RAMP ID='burner-604_RAMP_Q', T=790.0, F=0.472/
&RAMP ID='burner-604_RAMP_Q', T=943.0, F=0.302/
&RAMP ID='burner-604_RAMP_Q', T=1105.0, F=0.245/
&RAMP ID='burner-604_RAMP_Q', T=1276.0, F=0.17/
&RAMP ID='burner-604_RAMP_Q', T=1800.0, F=0.038/
&RAMP ID='burner-604_RAMP_Q', T=1860.0, F=0.0/
&OBST XB=-0.05,0.0,0.0,1.0,0.0,0.95, SURF_ID='gypsum_plaster'/ WALL1
&OBST XB=1.0,1.05,0.0,1.0,0.0,0.95, SURF_ID='gypsum_plaster'/ WALL1[1]
```

&OBST XB=-0.05,1.05,-0.05,0.0,0.0,0.95, SURF_ID='gypsum_plaster'/ Obstruction
&OBST XB=-0.05,1.05,1.0,1.05,0.0,0.95, SURF_ID='gypsum_plaster'/ Obstruction[1]
&OBST XB=0.35,0.65,0.35,0.65,0.0,0.1, SURF_ID='INERT'/ Obstruction
&OBST XB=0.85,0.995833,-0.00666667,0.993333,0.92,0.946667, COLOR='INVISIBLE', SURF_ID='gypsum_plaster'/ Slab
&OBST XB=0.5,0.85,-0.00666667,0.993333,0.92,0.946667, COLOR='INVISIBLE', SURF_ID='gypsum_plaster'/ Slab
&HOLE XB=0.35,0.65,-0.05,0.0,0.0,0.3/ Hole
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.5,0.85,-0.5,-0.5,0.0,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Min Y for MESH01
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.5,0.85,1.1,1.1,0.0,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max Y for MESH01
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.5,0.85,-0.5,1.1,1.2,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max Z for MESH01
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.85,0.85,-0.5,1.1,0.0,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Min X for MESH02
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=1.2,1.2,-0.5,1.1,0.0,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max X for MESH02
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.85,1.2,-0.5,-0.5,0.0,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Min Y for MESH02
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.85,1.2,1.1,1.1,0.0,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max Y for MESH02
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.85,1.2,-0.5,1.1,1.2,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max Z for MESH02
&VENT SURF_ID='burner-604', XB=0.35,0.65,0.35,0.65,0.105,0.105/ Burner
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.15,0.5,-0.5,-0.5,0.0,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Min Y for MESH03
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.15,0.5,1.1,1.1,0.0,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Min Y for MESH03
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-0.2,0.15,-0.5,1.1,1.2,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max Z for MESH04
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.15,0.5,-0.5,1.1,1.2,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max Z for MESH03
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=0.15,0.15,-0.5,1.1,0.0,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Min X for MESH04
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-0.2,-0.2,-0.5,1.1,0.0,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max X for MESH04
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-0.2,0.15,-0.5,-0.5,0.0,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Min Y for MESH04
&VENT SURF_ID='OPEN', XB=-0.2,0.15,1.1,1.1,0.0,1.2, COLOR='INVISIBLE'/ Vent Max Y for MESH04
&TAIL /

A.2 VÝPOČET ÚČINKŮ POŽÁRU NA STŘEŠNÍ KONSTRUKCI PRŮMYSLOVÉ BUDOVY ZÓNOVÝM MODELEM

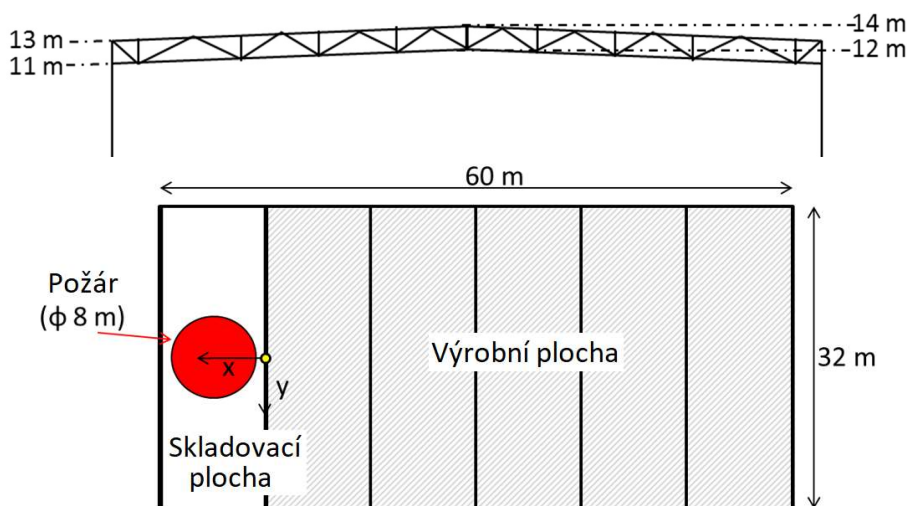
Abstrakt

Předmětem ověřovacího příkladu je výpočet teploty v blízkosti vazníků průmyslové budovy pomocí zónového modelu OZone verze 3.0.4/2018. V budově 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.

1 POPIS BUDOVY A POŽÁRNÍ SCÉNÁŘ

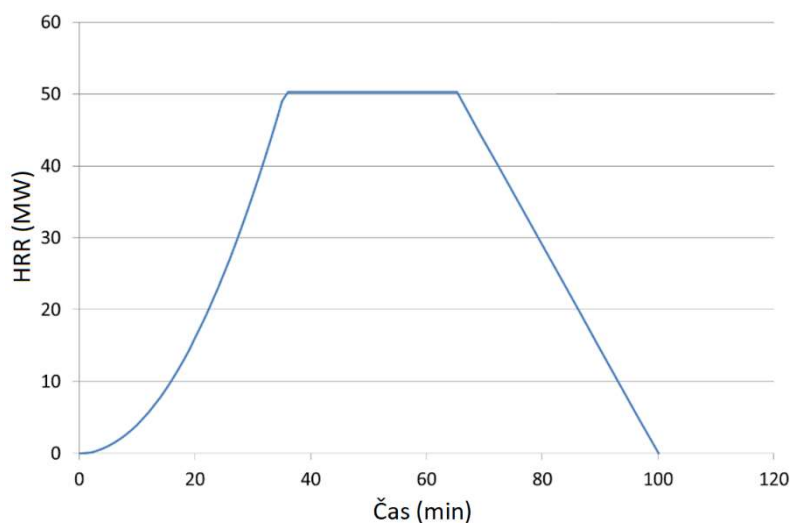
Skladovací hala na obr. 6 je 60 m dlouhá a 32 m široká s vrcholem ve výšce 14 m. Vazníky s pasy průřezu HEA 220 a diagonálami L60×60×6 jsou umístěny v osových vzdálenostech 10 m. Dolní pásnice vazníku je ve výšce 12 m. Hala slouží pro výrobu. Na konci budovy je malá skladovací plocha, ve které se předpokládá lokální požár. Je uvažováno s požárem 10 t celulózoového 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 obr. 7 je uvažována podle přílohy E v EN 1991-1-2. Předpokládá se, že

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



Obr. 6 Průmyslová budova – Řez a Půdorys

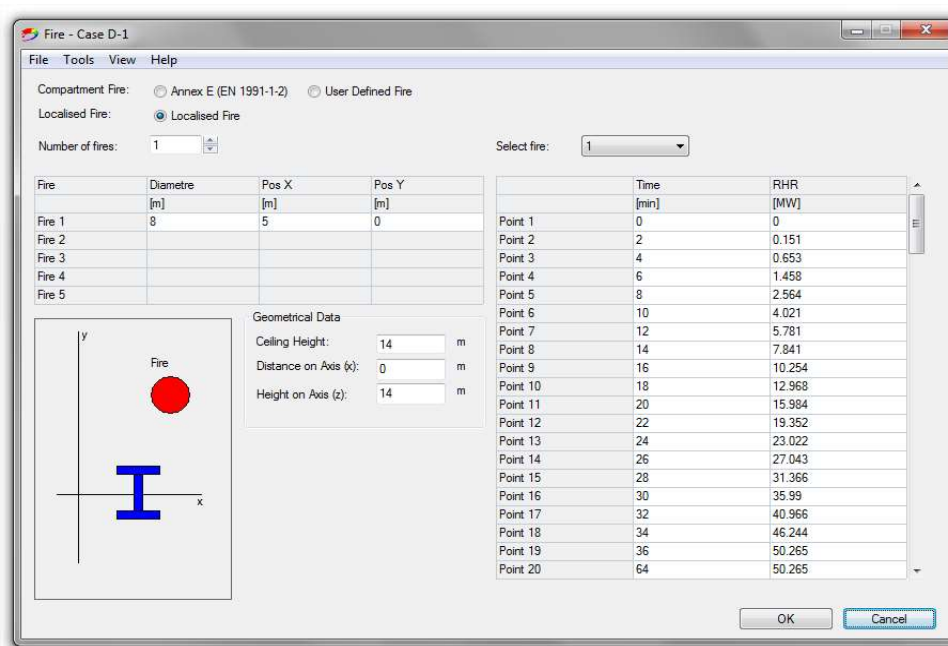
Metodika ověřování modelování požáru, spolehlivosti konstrukcí a evakuace osob pomocí verifikačních příkladů



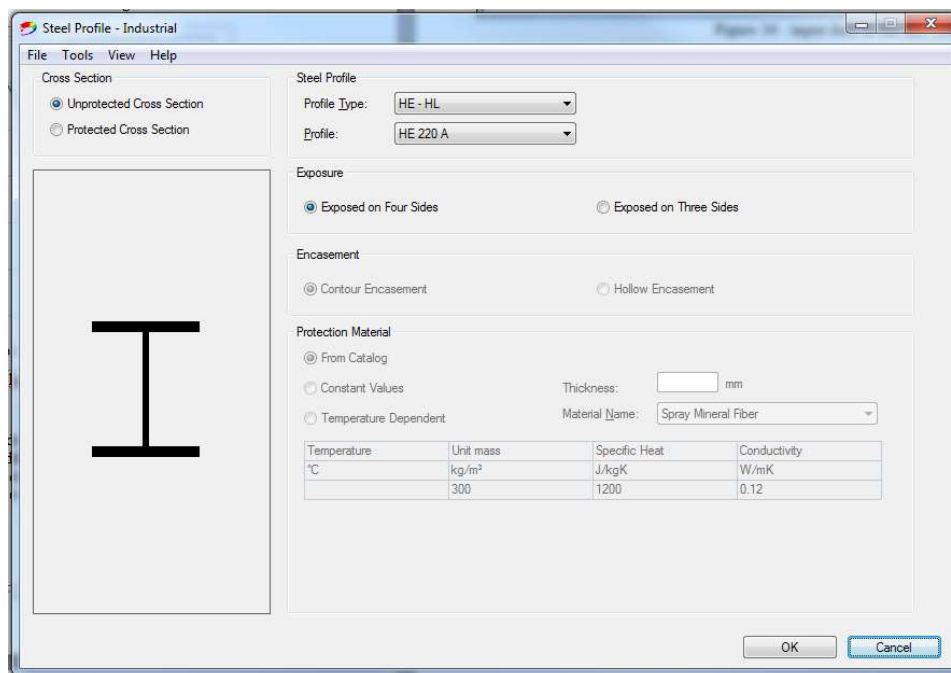
Obr. 7 Křivka HRR pro lokální požár v hale

2 VSTUPNÍ DATA DO PROGRAMU OZONE

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



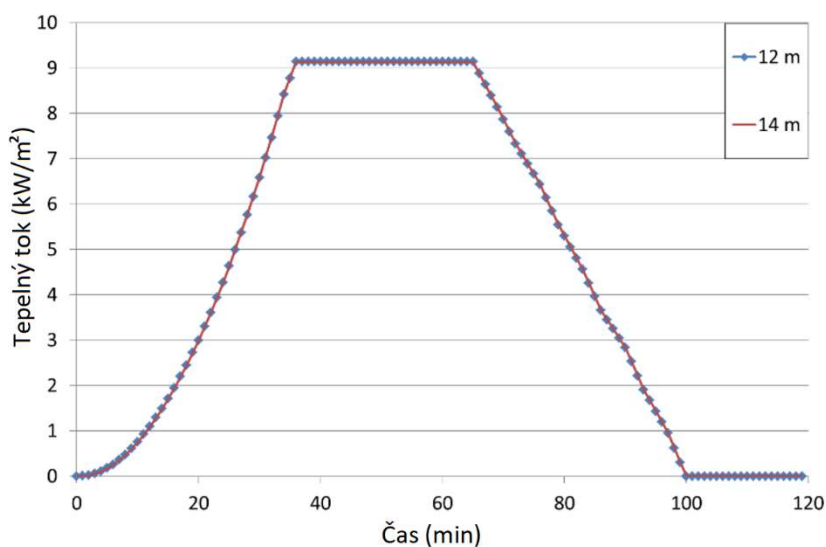
Obr. 8 Vstupní data specifikující požární scénář



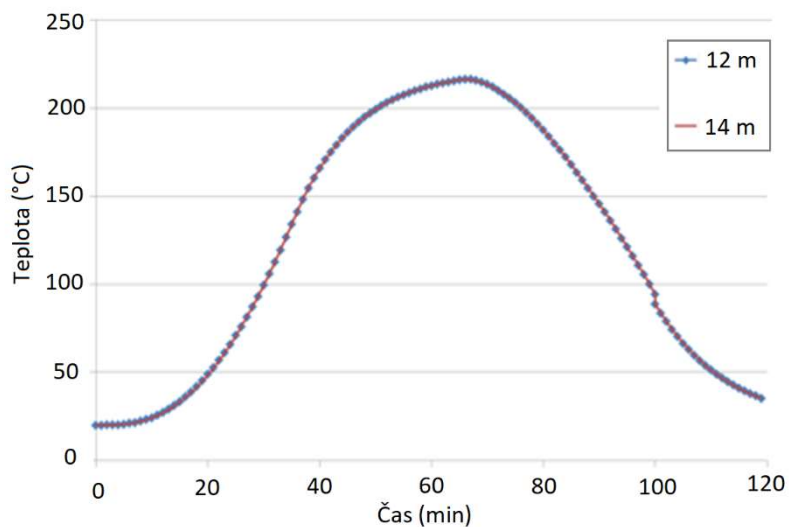
Obr. 9 Vstupní data specifikující analyzovaný prvek

3 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 je přes 9 kW/m² (obr. 10). Teplota dolního pasu vazníku dosáhne 210°C (obr. 11).



Obr. 10 Přijatý radiální tepelný tok spodním a horním pasem vazníku



Obr. 11 Teplota spodního a horního pasu vazníku

4 SHRNU TÍ

Příklad uvádí výpočet tepelného toku dopadající na prvky vazníku a jeho teplotu v zónovém modelu. Vstupní hodnoty zvoleného požárního scénáře se opírají o normu ČSN EN 1991-1-2.

LITERATURA

Francis, P. a kol. (2018) *Návrh sloupu vystaveného lokálnímu požáru*, Praha: Czech Technical University Publishing House. ISBN 978-80-01-06475-7.

ČSN EN 1991-1-2 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru, ČNI 2004.

B. Ověřovací příklady modelů konstrukcí

B.1 CHOVÁNÍ OCELOVÉHO NOSNÍKU PŘI POŽÁRU

Abstrakt

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.

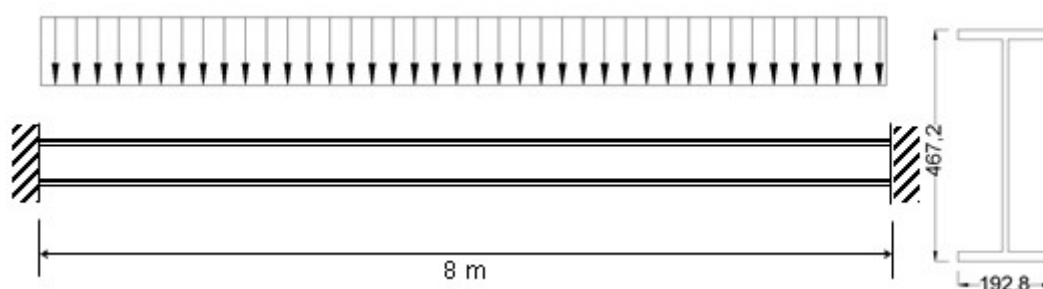
1 POPIS KONSTRUKCE

Ocelový nosník průřezu UB 457×191×98, 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 (tab. 3). Délka nosníku (L) a mechanické zatížení (q) se u těchto variant nemění, viz obr. 12, 13, 14.

Tab. 3 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 |



Obr. 12 BMS_1 Vetknutý ocelový nosník



Obr. 13 BMS_2 Kloubově uložený ocelový nosník



Obr. 14 BMS_3 Prostě uložený ocelový nosník

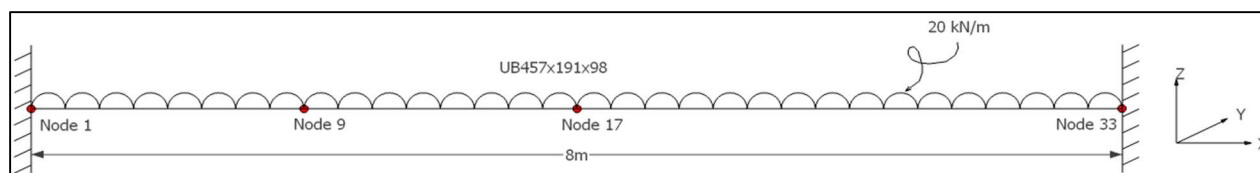
2 NUMERICKÝ MODEL

2.1 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 10 krocích. Tolerance vypočtené hodnoty v následujícím časovém kroku je 0,001.

2.2 Geometrie a materiály

Nosník o délce 8 m je vytvořen z 32 elementů typu Beam. Okrajové body elementů jsou vzdáleny 0,25 m, viz obr. 15. Nosníku je přiřazen průřez o rozměrech odpovídající průřezu UB 457×191×98. 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 tab. 4.



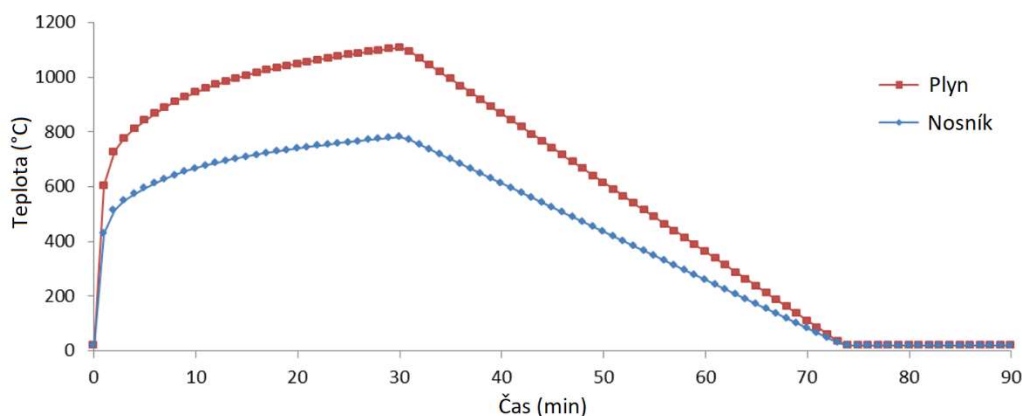
Obr. 15 Model nosníku s vetknutými koncovými body

Tab. 4 Detaily provedených analýz ocelových nosníků v programu VULCAN

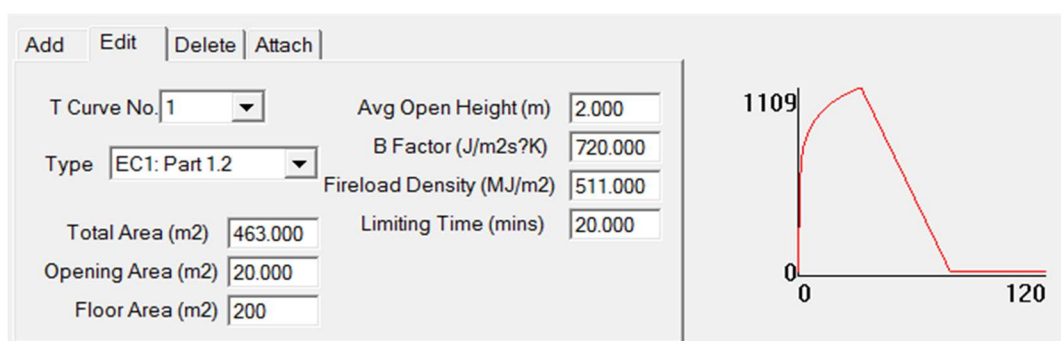
| Název | Mechanické vlastnosti materiálu | Mechanické zatížení [kN/m] | Zatížení teplotou | Teplotní vlastnosti materiálu | Tečení | Okrajové podmínky |
|--------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------|-------------------|
| BMS_1 | EC 3 | 20 | Normová teplotní křivka | EC 3 | NE | Vetknutý |
| BMS_2 | EC 3 | 20 | Normová teplotní křivka | EC 3 | NE | Kloubově uložený |
| BMS_3 | EC 3 | 20 | Normová teplotní křivka | EC 3 | NE | Prostě podepřený |
| BMS_8A | EC 3 | 20 | Parametrická teplotní křivka A | EC 3 | NE | Kloubově uložený |
| BMS_8B | EC 3 | 20 | Parametrická teplotní křivka B | EC 3 | NE | Kloubově uložený |

2.3 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). 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 obr. 16 a 18. Způsob zadání teplotních křivek v softwaru je vidět na obr. 17 a 19.



Obr. 16 Teplota plynu a nosníku (Parametrická teplotní křivka A)



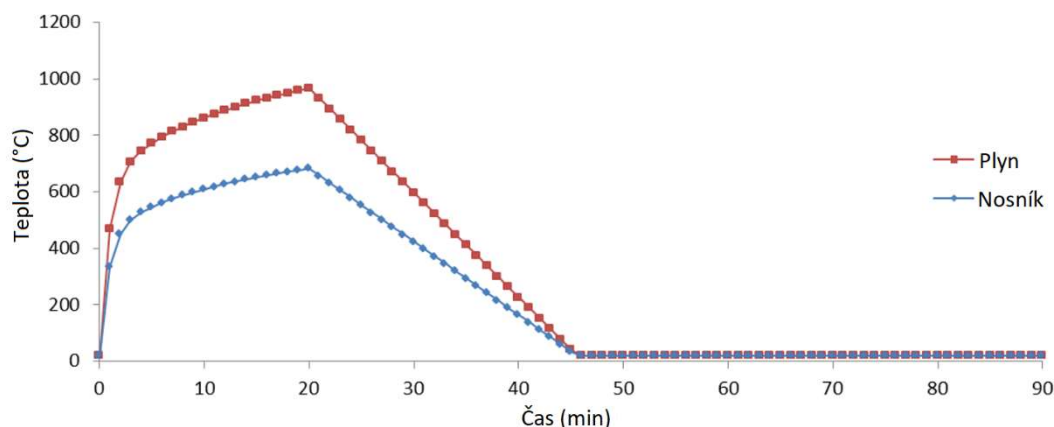
Obr. 17 Zadání parametrické teplotní křivky A v softwaru

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 obr. 20a je znázorněna závislost teploty plynu na čase a teploty částí ocelového průřezu při aplikaci normové teplotní křivky. Na obr. 20b je znázorněno rozložení teploty po průřezu.

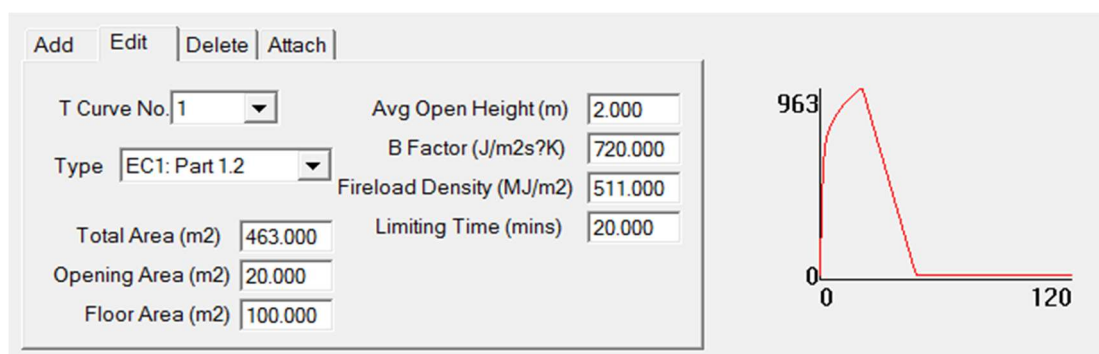
2.4 Okrajové podmínky

Nosník je modelován v několika variantách, které se liší způsobem uložení, viz tab. 3 a tab. 4. Vetknuté koncové body mají zabráněno posunu i pootočení ve všech směrech. Vnitřní body mají

zabráněno posunu v ose Y (z roviny nosníku) a pootočení ve 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.



Obr. 18 Teplota plynu a nosníku (Parametrická teplotní křivka B)



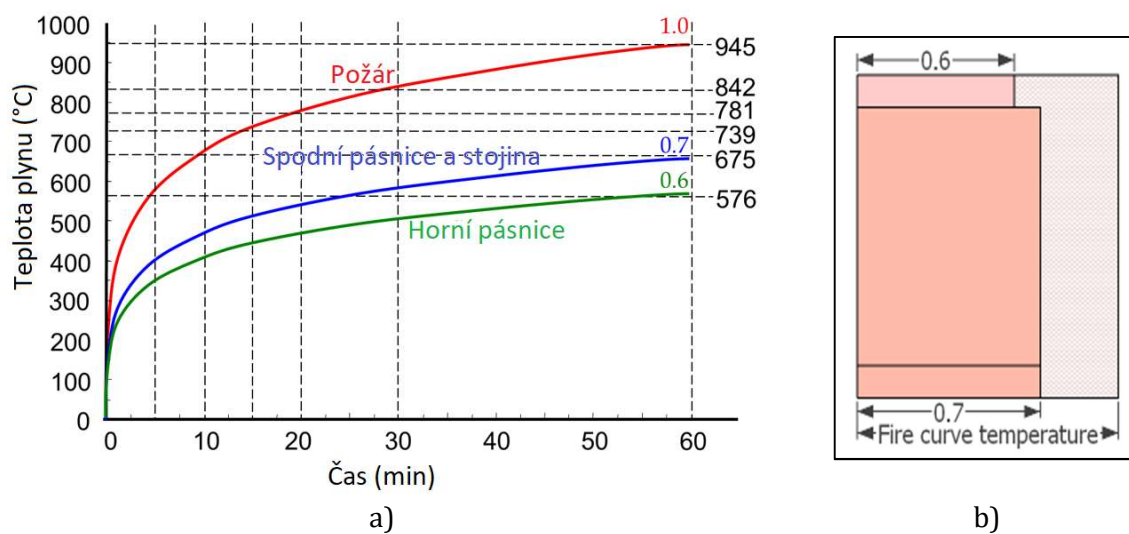
Obr. 19 Zadání parametrická teplotní křivky A v softwaru

2.5 Výstupy

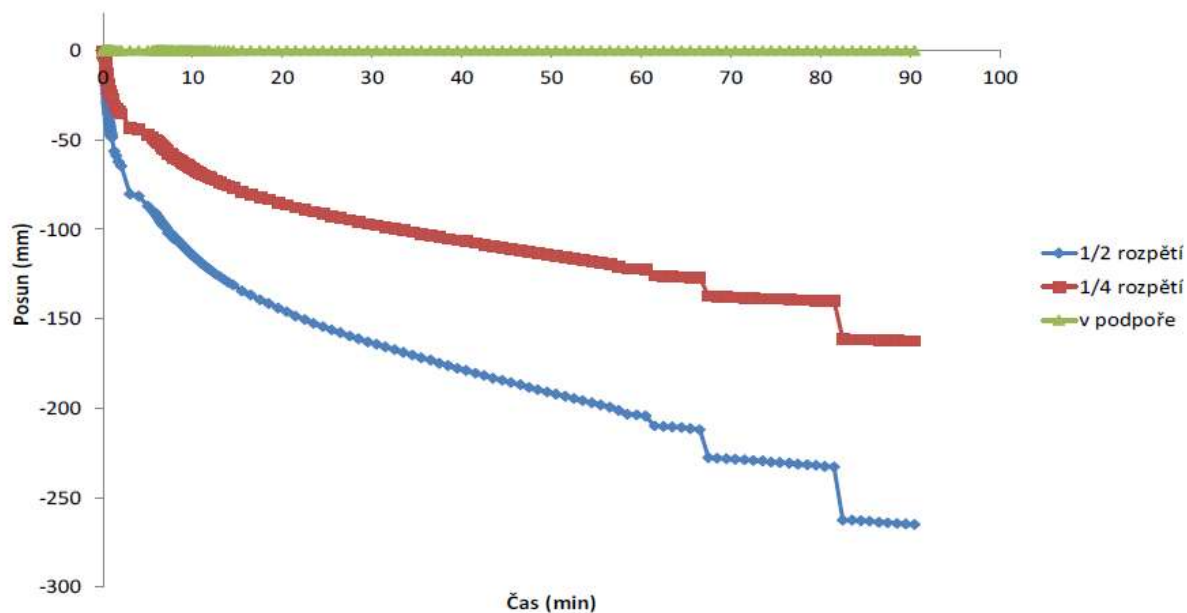
Výsledkem výpočtů je svislý průhyb (ve směru osy Z) v polovině rozpětí nosníku (bod 17), průhyb (ve směru osy Z) ve čtvrtině rozpětí nosníku (bod 9) a osová síla ve středu rozpětí nosníku (ve směru osy X).

3 VÝSLEDKY

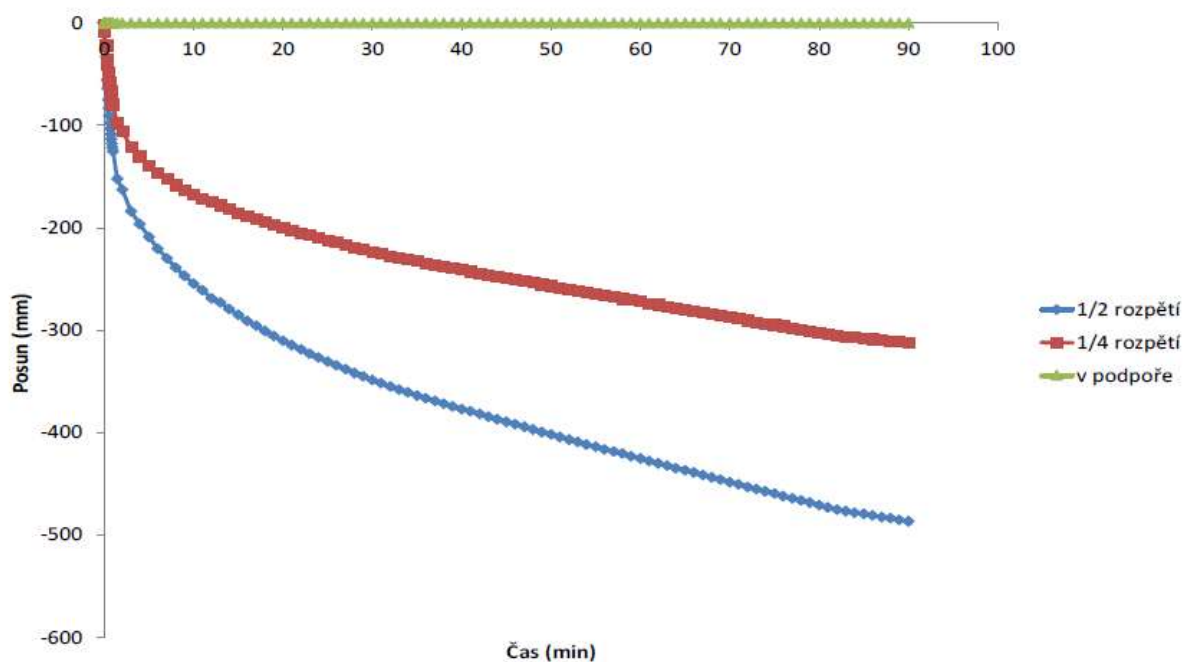
Průhyby nosníků BMS_1, BMS_2 a BMS_3 v polovině rozpětí a ve čtvrtině rozpětí nosníku jsou uvedeny na obr. 21–23. Svislý průhyb koncového bodu je uveden pro kontrolu – ve všech případech je koncový bod nosníku svisle podepře – průhyb by proto měl být roven 0. Průhyby nosníků BMS_8A a BMS_8B v polovině rozpětí a ve čtvrtině rozpětí nosníku jsou uvedeny na obr. 24 – 25.



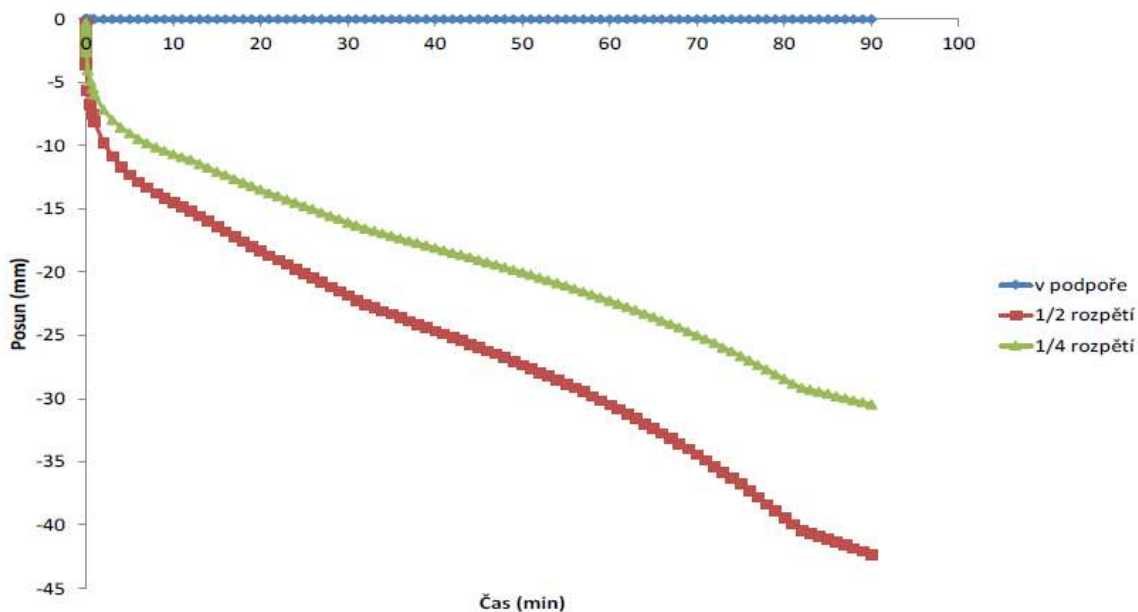
Obr. 20 a) Závislost teploty plynu a částí nosníku na čase; b) Rozložení teploty po průřezu



Obr. 21 BMS_1 Vodorovný posun v podpoře, 1/4 L a 1/2 L

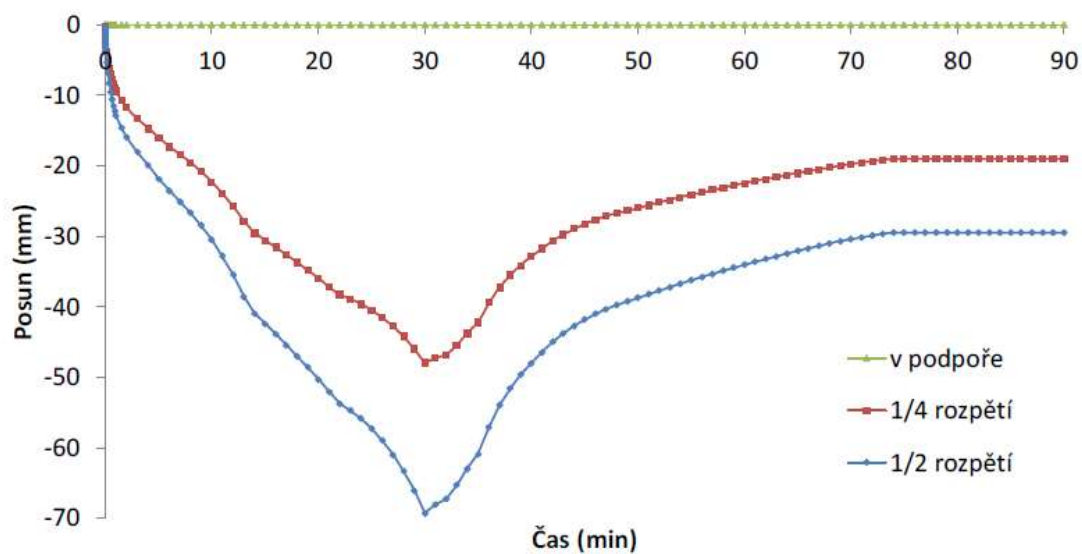


Obr. 22 BMS_2 Vodorovný posun v podpoře, $\frac{1}{4} L$ a $\frac{1}{2} L$

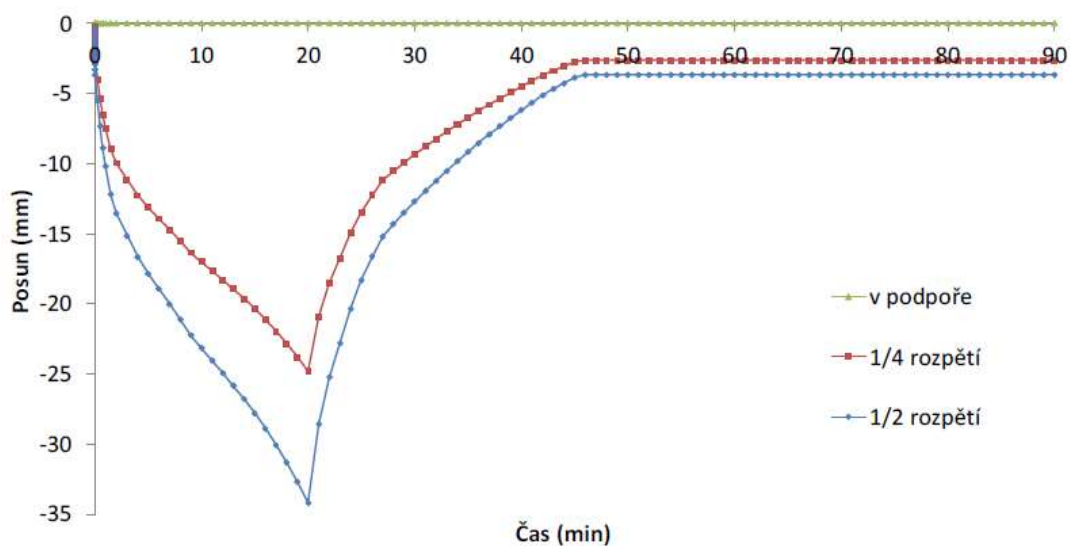


Obr. 23 BMS_3 Vodorovný posun v podpoře, $\frac{1}{4} L$ a $\frac{1}{2} L$

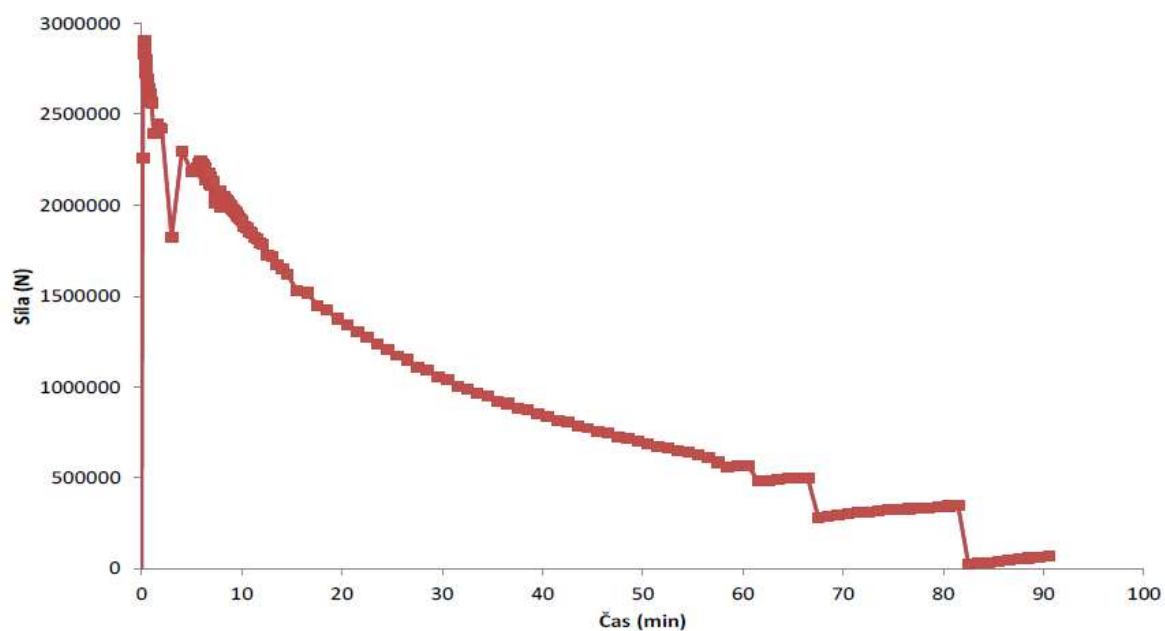
Na obr. 26 a 27 jsou uvedeny vypočítané osové síly. V grafech jsou vidět lokální výkyvy hodnot, které jsou způsobeny nastavením hodnoty tolerance výpočtu. Změnou nastavení tolerance se obvykle tento jev vyřeší.



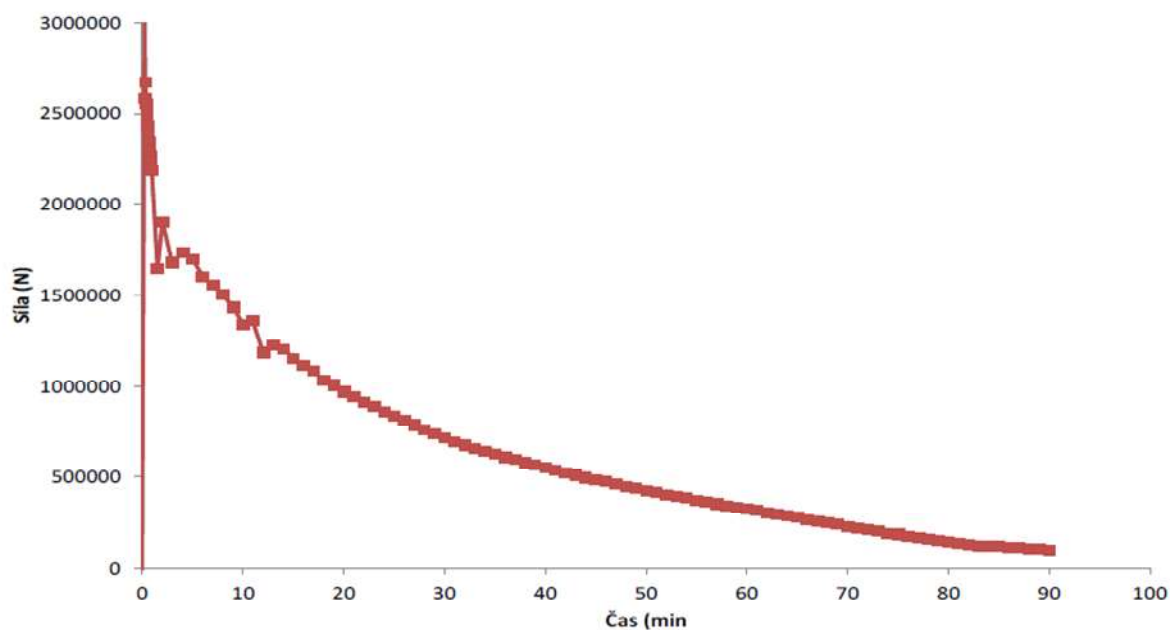
Obr. 24 BMS_8A Vodorovný posun v podpoře, $\frac{1}{4} L$ a $\frac{1}{2} L$



Obr. 25 BMS_8B Vodorovný posun v podpoře, $\frac{1}{4} L$ a $\frac{1}{2} L$



Obr. 26 BMS_1 Průběh osově síly uprostřed rozpětí nosníku



Obr. 27 BMS_2 Průběh osově síly uprostřed rozpětí nosníku

4 SHRNU TÍ

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.

LITERATURA

ČSN EN 1993-1-2 (Eurokód 3): Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI Praha, 2007.

ČSN EN 1991-1-2 (Eurokód 1): Zatížení konstrukcí – Část 1-2: Obecná zatížení – Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru, ČNI Praha, 2004.

Huang, 1999: Huang Z., Burgess I. W. and Plank R. J., Three-dimensional modelling of two full-scale fire tests on a composite building, in: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings 134*, 1999, Vol.3, pp. 243-255.

Wald, F. a kol. (2014) *Benchmark studies, Verification of numerical models in fire engineering*, Praha: CTU Publishing House, ISBN 978-80-01-05442-0.

B.2 ROZVOJ TEPLOT V PRŮŘEZU DŘEVĚNÉHO PRVKU VYSTAVENÉHO ÚČINKŮM NORMOVÉ TEPLOTNÍ KŘIVKY

Abstrakt

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.

1 NUMERICKÝ MODEL

1.1 Software

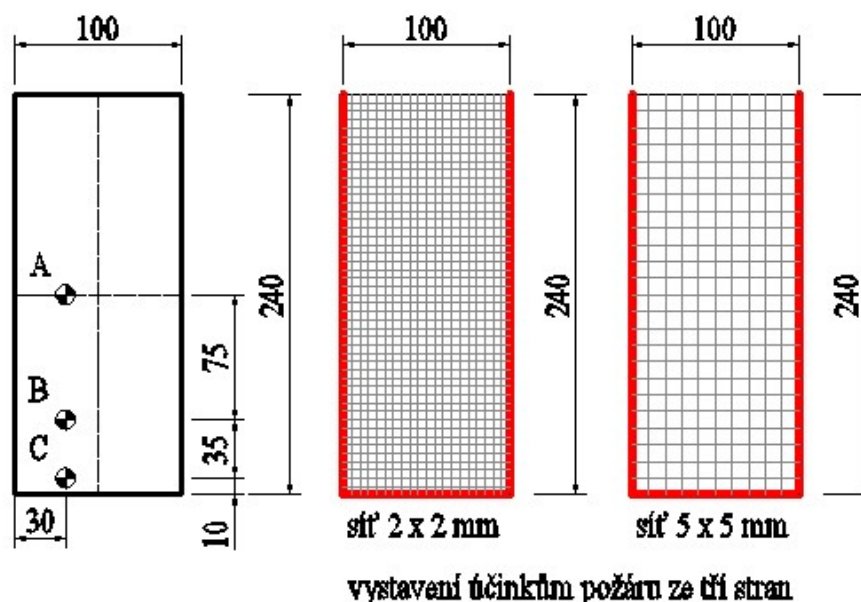
Výpočet je proveden pomocí softwaru Atena Science, verze V.513. Vstupní data jsou zadány pomocí preprocesoru GiD, verze 12.0.8., výsledky jsou zobrazeny v postprocesoru GiD, verze 12.0.8.

1.2 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.

1.3 Geometrie a výpočetní síť

Výpočetní model je dvourozměrný. Je modelován průřez o velikosti 100 mm×240 mm (obr. 28). Výpočet je proveden pro dvě velikosti sítě se čtvercovým elementem s hranou 5×5 mm a 2×2 mm.



Obr. 28 Geometrie výpočetního modelu, výpočetní síť a monitorovací body teploty

1.4 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: $\lambda = 0,12 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (dle ČSN EN 1995-1-2)
- b) měrná tepelná kapacita: $c = 1,53 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ (dle ČSN EN 1995-1-2)
- c) počáteční teplota materiálu: $T_{\text{init}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ (dle ČSN EN 1995-1-2)
- d) počáteční vlhkost materiálu: $w_{\text{init}} = 12 \%$
- e) hustota $\rho_k = 530 \text{ kg}/\text{m}^3$ (dle experimentu)

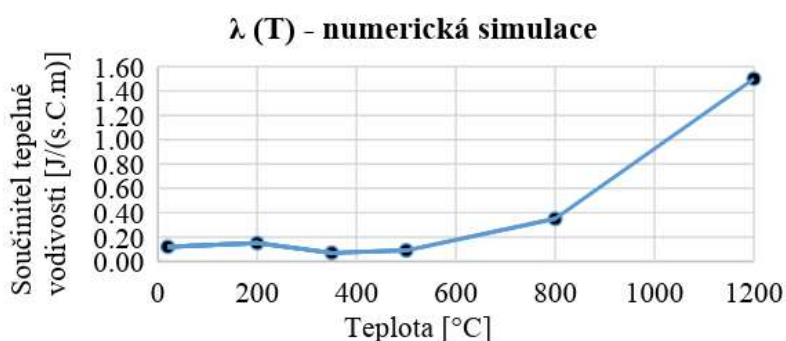
Součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita jsou závislé na teplotě. Materiálový model pro teplotní analýzu je „CCTransportMaterial“.

Poznámka: Hodnota objemové tepelné kapacity je do softwaru zadávaná v jednotkách $\text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{C})$, a proto platí:

$$c_{\text{simulace}} = c \cdot \rho_k = \text{J}/(\text{m}^3\cdot\text{C})$$

Modifikace tepelných materiálových vlastností jako funkce rostoucí teploty je definována v souladu s ČSN EN 1995-1-2, následovně:

Součinitel tepelné vodivosti:



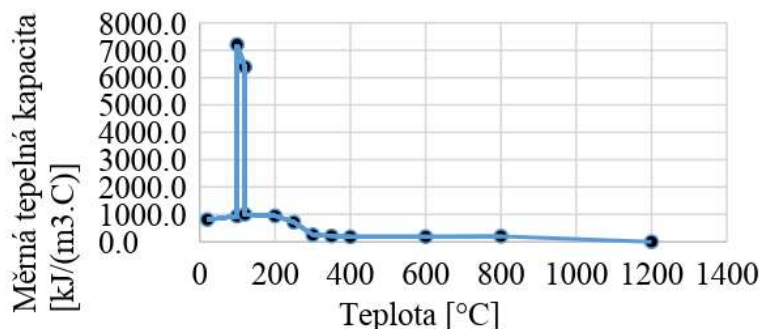
Obr. 29 Součinitel tepelné vodivosti jako funkce rostoucí teploty

Tab. 5 Součinitel tepelné vodivosti jako funkce rostoucí teploty

| Teplota | Součinitel tepelné vodivosti | Součinitel tepelné vodivosti - numerická simulace |
|---------|------------------------------|---|
| T [°C] | λ [W/(m·K)] | λ [W/(m·K)] pozn. $W = \text{J}/s$ |
| 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 |

Objemová tepelná kapacita:

$c(T, \rho, w)$ - numerická simulace



Obr. 30 Objemová tepelná kapacita jako funkce rostoucí teploty

Tab. 6 Měrná tepelná kapacita jako funkce rostoucí teploty

| Teplota | Měrná tepelná kapacita | Hustota | Vlhkost | Objemová 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 uvedené tabulky 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.

1.5 Okrajové podmínky

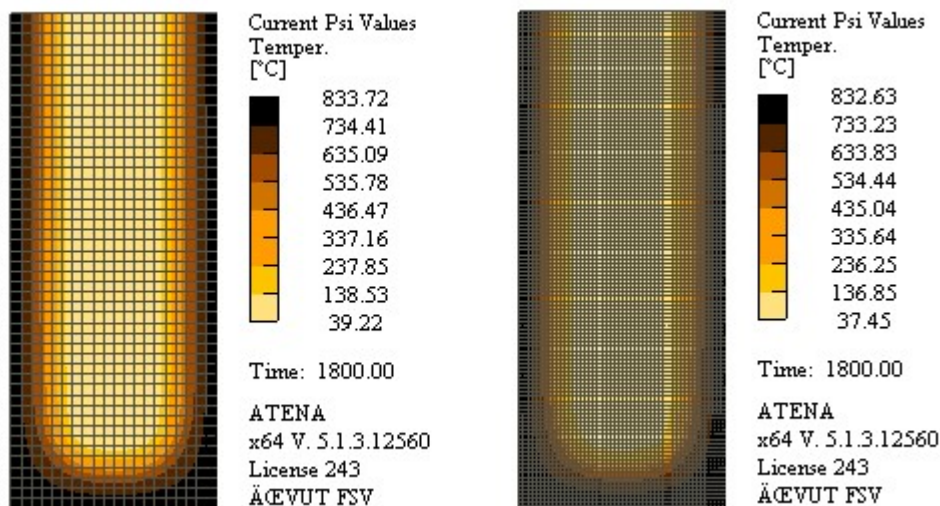
Teplotní zatížení je zadáno pomocí funkcí „Fire Boundary For Line“ jako normová teplotní křivka po dobu $\Delta t = 2700$ s. Zatížení je aplikováno na hranu elementu – červená linie na obr. 28.

1.6 Měřící body

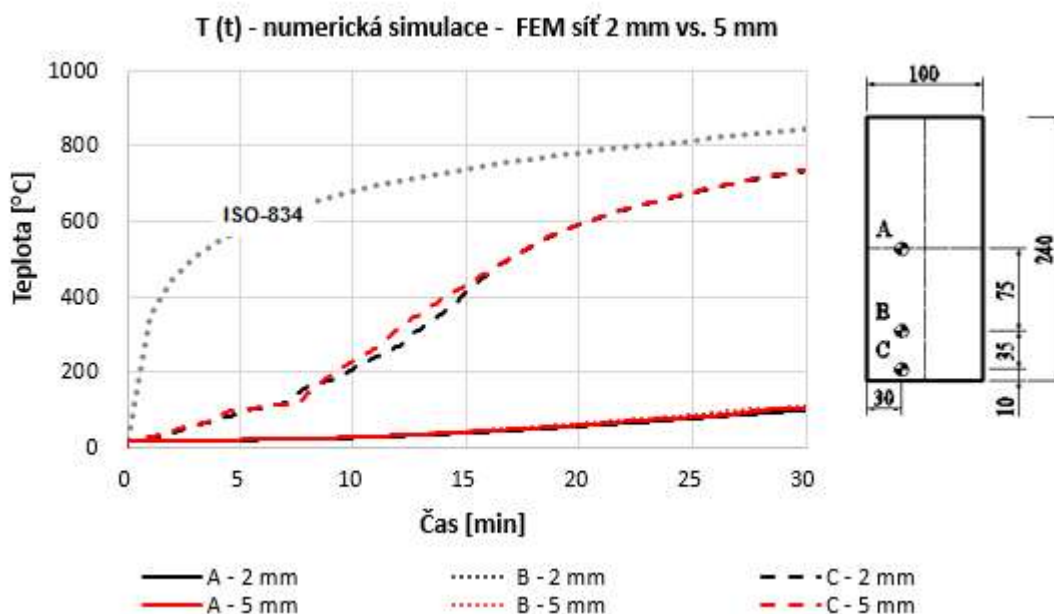
Teplota materiálu byla v modelu monitorována pomocí funkcí „Monitor for Point - Temperature“. Monitorovací body pro měření teploty pod ohřivaným povrchem jsou identické s experimentem a jejich poloha je zobrazená na obr. 28, označení A, B, C.

2 VÝSLEDKY

Grafické zobrazení teplotních polí a teploty v monitorovacích bodech jsou uvedeny níže.



Obr. 31 Teplotní pole – 5 mm síť (vlevo), 2 mm síť (vpravo)



Obr. 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

3 SHRNU TÍ

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 .

LITERATURA

Cábová K. a kol. (2018) *Virtual test of fire-resistance of a timber beam*, Conference Proceedings of the 10th International Conference on Structures in Fire 2018. Ulster: Ulster University.

ČSN EN 1995-1-2, Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI 2006.

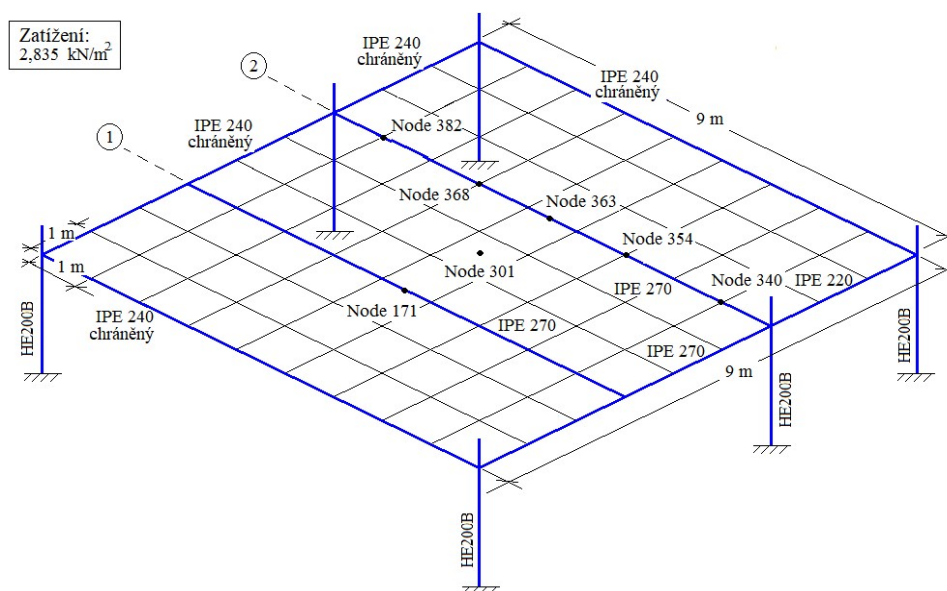
B.3 MECHANICKÉ CHOVÁNÍ OCELOBETONOVÉ STROPNÍ DESKY PŘI POŽÁRU

Abstrakt

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.

1 POPIS KONSTRUKCE

Ocelobetonová deska o půdorysných rozměrech 9,0 m×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 obr. 33.



Obr. 33 Model ocelobetonové konstrukce

2 NUMERICKÝ MODEL

2.1 Software a parametry výpočtu

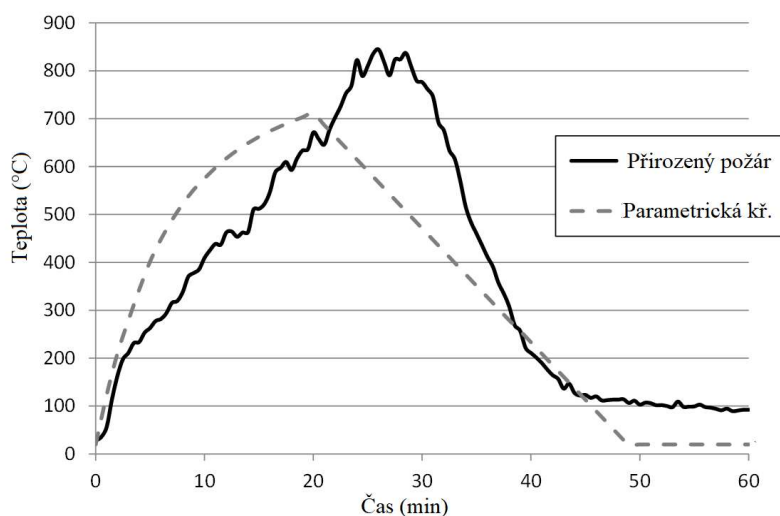
Výpočet byl proveden v programu VULCAN. Celkový čas výpočtu je 60 min.

2.2 Geometrie, materiály a výpočetní síť

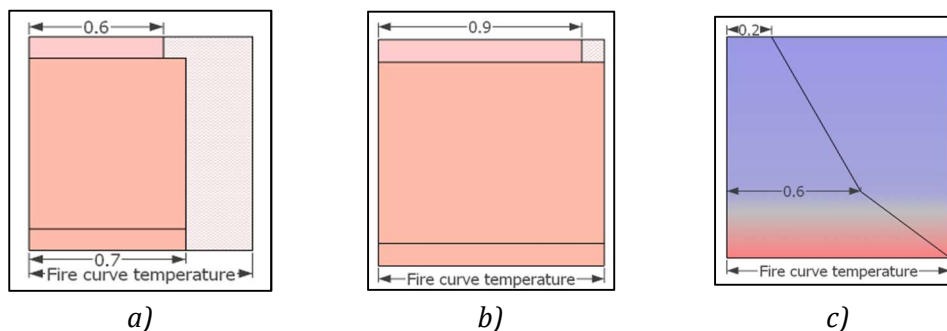
Geometrie modelu odpovídá konstrukce na obr. 33. Mechanické vlastnosti materiálu ocelových nosníků (ocel třídy S355) jsou v modelu zavedeny podle ČSN EN 1993-1-1. Mez kluzu je 355 MPa, modul pružnosti 210 000 MPa a Poissonovo číslo 0,3. Železobetonová deska je z betonu C30/37. Výztuž ŽB desky je tvořena 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×1,0 m.

2.3 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 obr. 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 obr. 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.



Obr. 34 Teplotní zatížení ocelobetonové stropní desky



Obr. 35 Rozložení teploty v průřezu: a) chráněný nosník; b) nechráněný nosník; c) betonová deska.

2.4 Okrajové podmínky

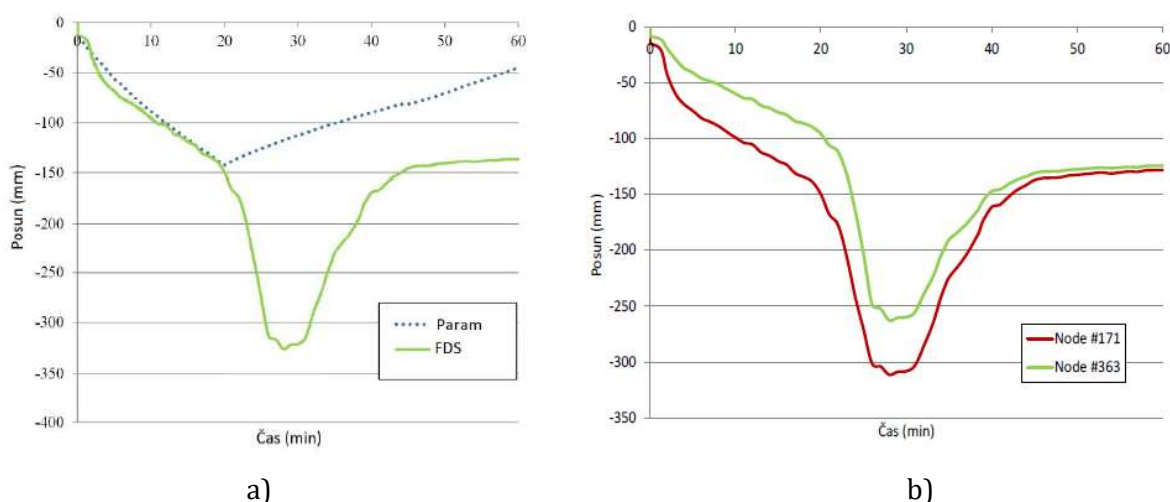
Stropní deska je uložena na sloupy. V místě styku desky a sloupů mají body zabráněný posun ve směru osy x, y a zabráněno pootočení kolem osy z. Sloupy jsou vetknuté – bodům v patě sloupů je zabráněno posunu i pootočení ve všech směrech.

2.5 Výstupy

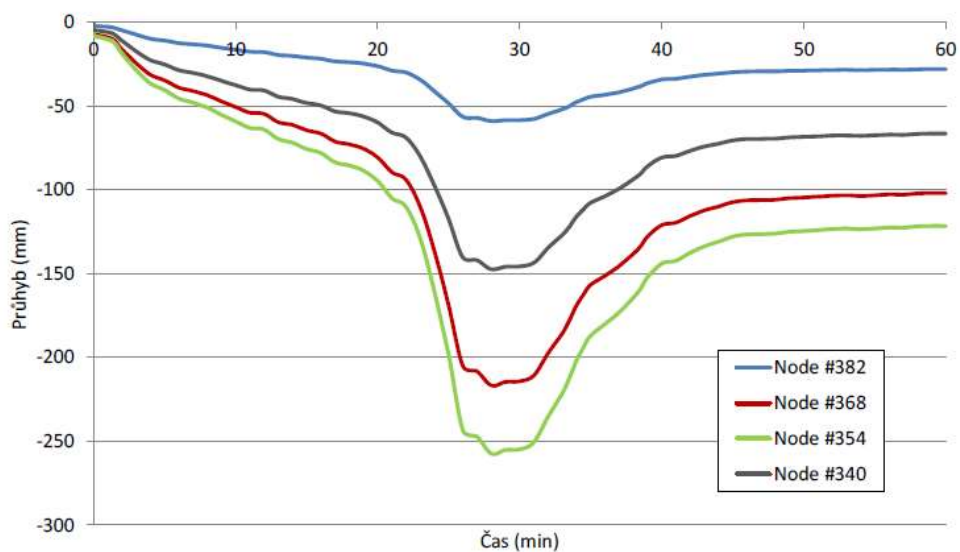
Výstupy modelu je svislý posun centrálního bodu ocelobetonové desky (bod 301), svislý posun vnitřních ocelových nosníků a osová síla vnitřních ocelových nosníků. Body, pro které jsou výsledky zobrazeny, jsou uvedeny na obr. 33.

3 VÝSLEDKY

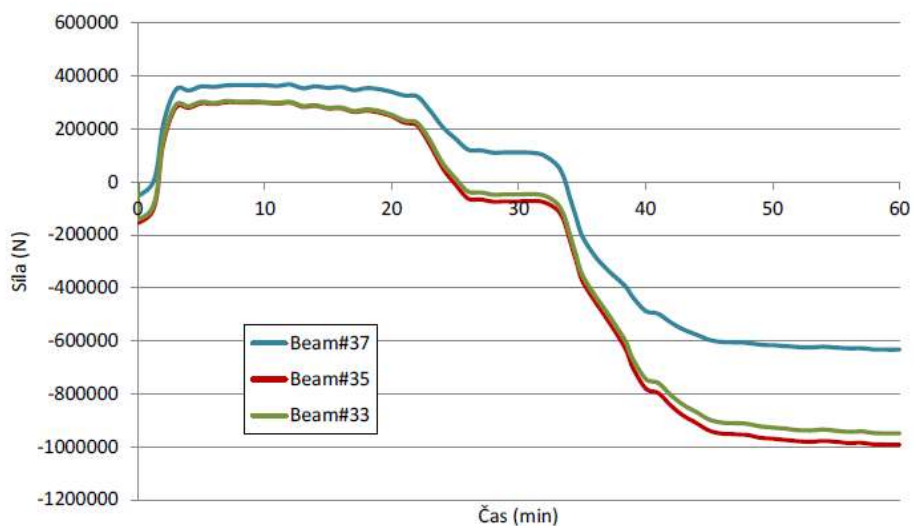
Výsledky jsou uvedeny na obr. 36 – obr. 39. Na obr. 36a je vidět deformace středního bodu desky (bod 301) při působení mechanického zatížení a zatížení teplotou ve dvou variantách. Obr. 36b uvádí svislý posun středních bodů vnitřních nosníků (body 171 a 363) při působení přirozeného požáru. Obr. 37 ilustruje průhyb nosníku č. 2 v několika bodech po jeho délce. Na obr. 38 je vidět osová síla v nosníku č. 2. Obr. 39 uvádí posun nosníku č. 2 v časech 30 min a 60 min.



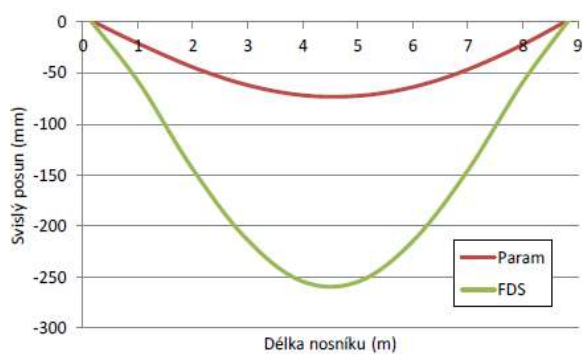
Obr. 36 Porovnání posunutí způsobeného různými případy tepelného zatížení v čase: a) v centrálním bodě desky (bod 301); b) ve středu rozpětí nosníku 1 (bod 171) a nosníku 2 (bod 363).



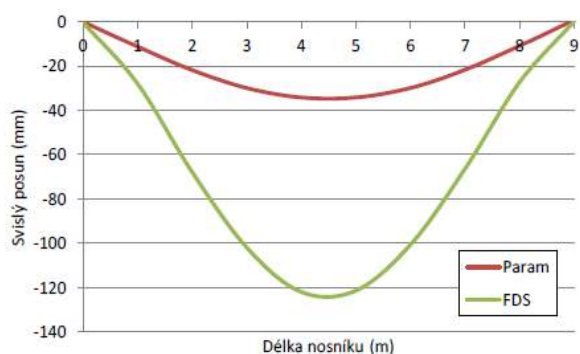
Obr. 37 Průhyb nosníku č. 2



Obr. 38 Osová síla v nosníku č. 2



a)



b)

Obr. 39 Průhyb nosníku č. 2: a) v čase 30 min; b) v čase 60 min

4 SHRNU TÍ

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.

LITERATURA

ČSN EN 1992-1-2 (Eurokód 2): Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI Praha, 2006.

ČSN EN 1993-1-1 (Eurokód 3): Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby, ČNI Praha, 2006.

ČSN EN 1993-1-2 (Eurokód 3): Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky požáru, ČNI Praha, 2007.

Horová, K., Jána, T. a Wald, F. (2014) *The effect of fire spread on steel-concrete floor*, Progress on Safety of Structures in Fire. Shanghai: Tongji University Press, pp. 737-744. ISBN 978-7-5608-5494-6.

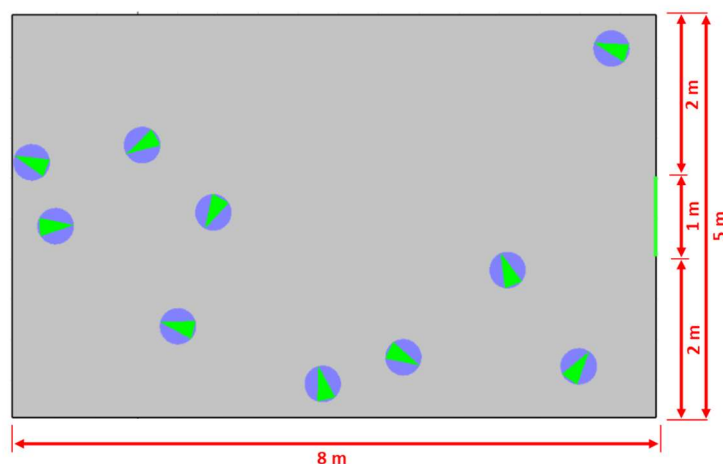
C. Ověřovací příklady modelů evakuace

C.1 STATISTICKÉ ROZDĚLENÍ DOBY PŘED POHYBEM

APLIKOVANÁ GEOMETRIE

Obdélníková místnost. Optimální rozměry: šířka $w = 5$ m, délka $l = 8$ m. Východ o šířce $d = 1$ m.

SCHÉMA



ZÁKLADNÍ SCÉNÁŘ

V místnosti je náhodně rozmístěno 10 osob. Osobám je přiřazena doba před pohybem na základě statistického rozdělení, které je v nástroji k dispozici. Test opakujeme pro všechna statistická rozdělení, která jsou v nástroji k dispozici. Pohyb osob byl vypočten v programu Pathfinder 2018.

ROZŠÍŘENÝ SCÉNÁŘ

Test opakujeme pro každé statistické rozdělení nejméně 10krát. Rozměry místnosti zvětšíme a úměrně tomu také počet osob v místnosti.

OČEKÁVANÝ VÝSLEDEK

Jednotlivé modelované osoby zahájí evakuaci v čase, který odpovídá intervalu statistického rozdělení, a rozložení těchto hodnot v rámci intervalu odpovídá očekávanému statistickému rozdělení.

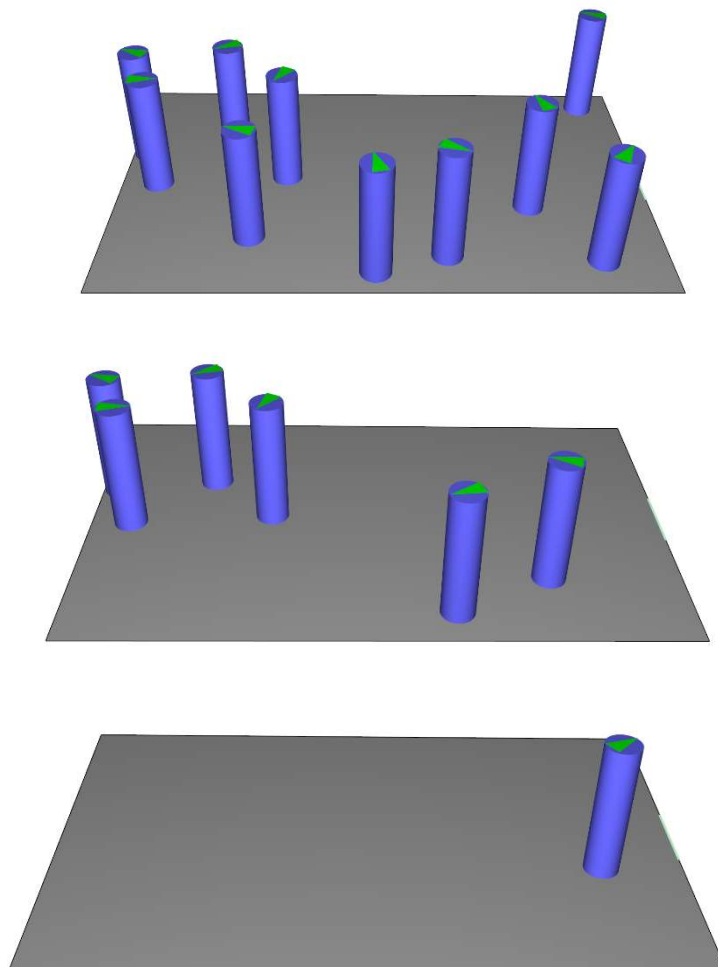
VERIFIKAČNÍ METODA

Kvantitativní verifikace. Uživatel porovnává rozdíl mezi získanou a očekávanou výslednou hodnotou testu. V případě srovnání očekávaného a získaného statistického rozdělení musí uživatel předem definovat akceptační kritéria pro evaluaci rozdílů těchto rozdělení.

DOPORUČENÍ

Pro spolehlivou verifikaci je třeba test realizovat opakovaně. Vhodný počet opakování může záviset na aktuálně testovaném rozdělení a počtu osob v místnosti. Např. pro rovnoměrné rozdělení bude nižší, než pro rozdělení lognormální. V případě větší testované místnosti a skupiny osob naopak může optimální počet opakování klesnout.

PŘÍKLAD PRŮBĚHU TESTU



LITERATURA

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships*, MSC/Circ.1238. 2007.

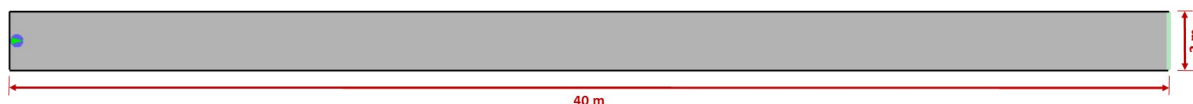
GWYNNE, S.M.V., KULIGOWSKI, E.D., SPEARPOINT, M. More thoughts on defaults. *The Fifth International Symposium on Human Behaviour in Fire*, Interscience Communications, Cambridge, UK, pp. 9–23.

C.2 RYCHLOST POHYBU PO ROVINĚ

APLIKOVANÁ GEOMETRIE

Koridor o poměru stran 1:20, optimální rozměry: šířka $w = 2$ m, délka $l = 40$ m.

SCHÉMA



ZÁKLADNÍ SCÉNÁŘ

Osoba má pevně stanovenou rychlost $v = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 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 $v = 0,583 \text{ ms}^{-1}$, doba před pohybem je nulová. Ostatní parametry scénáře jsou shodné se základní variantou.

OČEKÁVANÝ VÝSLEDEK

Osoba projde celý koridorem v čase $t = l/v$. V případě koridoru o délce 40 m a základního scénáře je tento čas $t = 40 \text{ s}$, v případě stejného koridoru a rozšířeného scénáře je tento čas $t = 68,61 \text{ s}$.

VERIFIKAČNÍ METODA

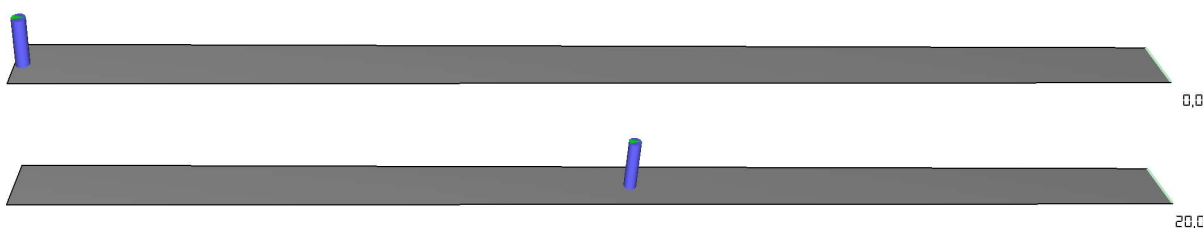
Kvantitativní verifikace. Uživatel porovnává rozdíl mezi získanou a očekávanou výslednou hodnotou testu.

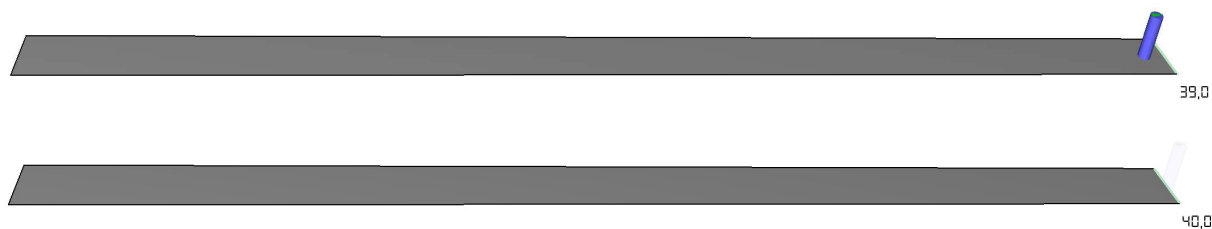
DOPORUČENÍ

Dynamické charakteristiky pohybu osoby mají dopad na získanou hodnotu textu, typickým příkladem je akcelerace osoby, která bývá specifikována přímo jako zrychlení, nebo jako časový interval, po kterém osoba dosáhne maximální rychlosti.

Výsledky testu mohou být závislé na aplikované reprezentaci prostoru. V případě diskrétní reprezentace (sítě) má na výsledek vliv orientace koridoru v prostoru, je proto 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





LITERATURA

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships*, MSC/Circ.1238. 2007.

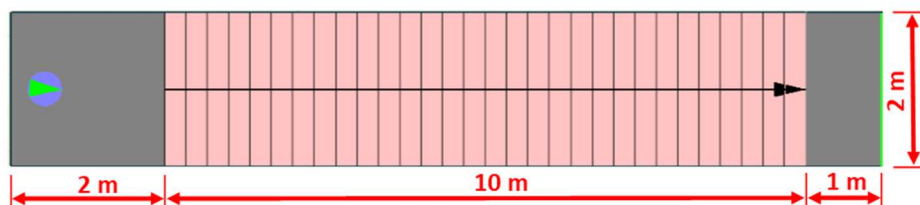
RONCHI, E., NILSSON, D., ZECHLIN, O., KLEIN, W., MAYER, H. *Employing validation and verification tests as an integral part of evacuation model development*. 13th International Conference and Exhibition on Fire Science and Engineering, Interscience Communications, Royal Holloway College, University of London, UK, pp. 979–990. 2013.

C.3 RYCHLOST POHYBU NA SCHODECH

APLIKOVANÁ GEOMETRIE

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

SCHÉMA



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

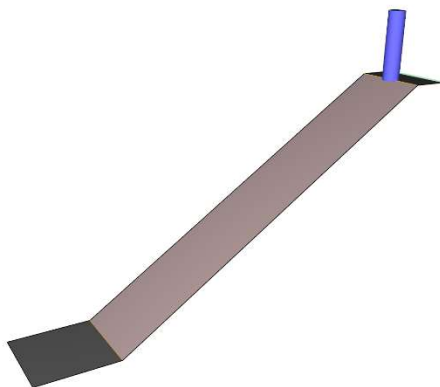
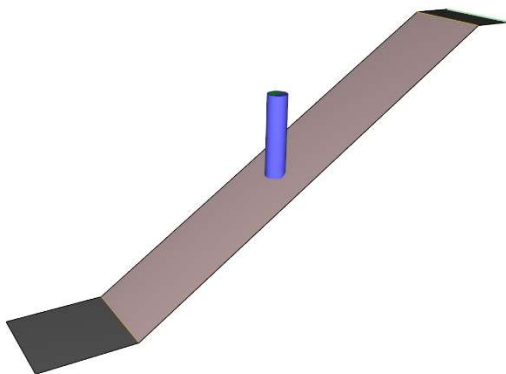
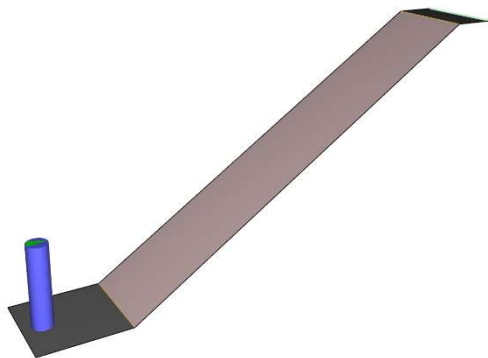
Kvantitativní verifikace. Uživatel porovnává rozdíl mezi získanou a očekávanou výslednou hodnotou testu.

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 reprezentace (sítě) má na výsledek vliv orientace koridoru v prostoru, je proto 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



LITERATURA

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships*, MSC/Circ.1238. 2007.

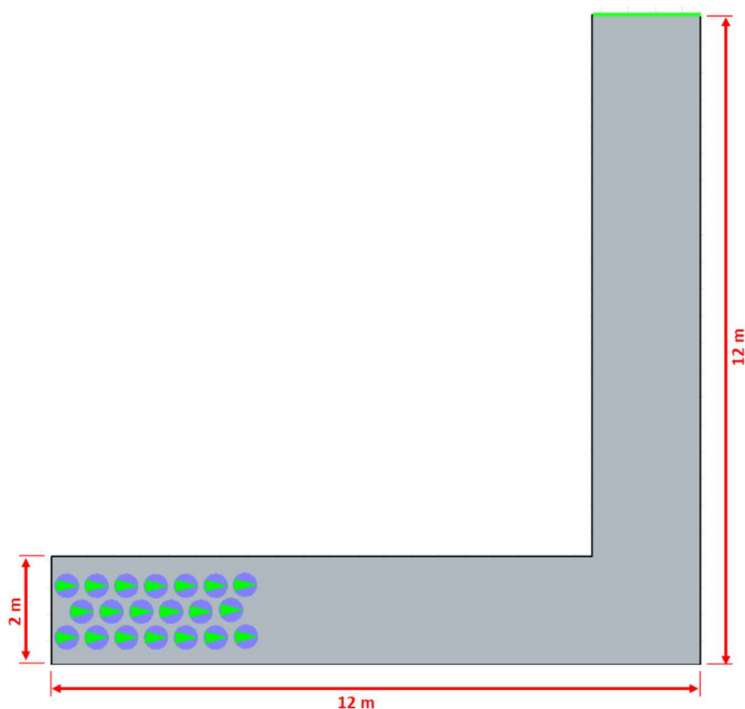
Ronchi, E., Norén, J., Delin, M., Kuklane, K., Halder, A., Arias, S., Fridolf, K. *Ascending evacuation in long stairways: Physical exertion, walking speed and behaviour*. Lund University. 2015.

C.4 POHYB OSOB V PRAVOÚHLÉM KORIDORU, KOREKTNÍ REPREZENTACE HRANIC GEOMETRIE

APLIKOVANÁ GEOMETRIE

Koridor dle nákresu. Optimální rozměry: šířka $w = 2$ m, délka obou ramen $l = 10$ m. Východ o šířce $d = 2$ m.

SCHÉMA



ZÁKLADNÍ SCÉNÁŘ

Na počátku koridoru je rozmístěna skupina 20 osob na prostoru o délce 4 m a šířce 2 m. Osoby mají pevně stanovenou rychlost (typicky $v = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), doba před pohybem je nulová. Ostatní parametry jsou ponechány v základním nastavení daném výrobcem.

ROZŠÍŘENÝ SCÉNÁŘ

Není stanoven.

OČEKÁVANÝ VÝSLEDEK

Jednotlivé modelované osoby projdou koridorem a východem bez překročení hranice koridoru.

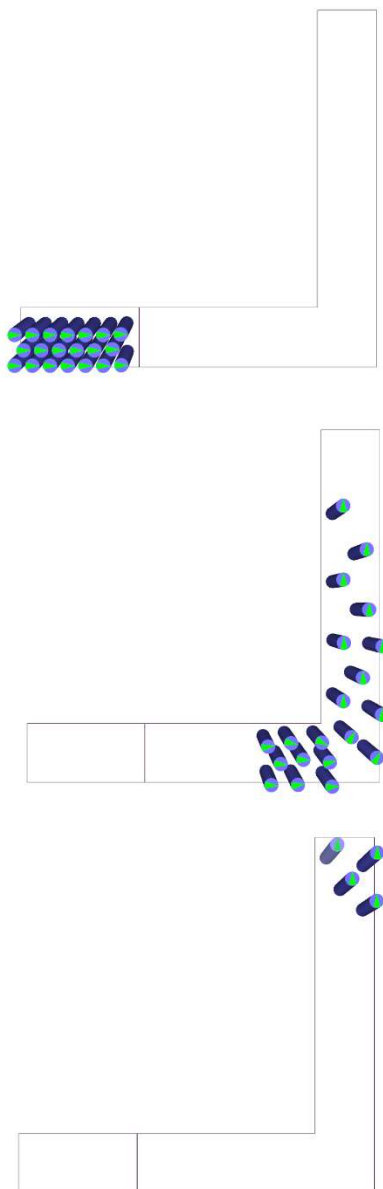
VERIFIKAČNÍ METODA

Kvalitativní verifikace. Uživatel kontroluje trajektorie jednotlivých osob, optimálně s využitím nástroje poskytovaného přímo aplikací.

DOPORUČENÍ

Test slouží pro verifikaci schopnosti modelu realizovat pohyb osob kolem rohu koridoru. Nepředpokládá nicméně žádné konkrétní chování těchto osob ani vzájemnou interakci.

PŘÍKLAD PRŮBĚHU TESTU



LITERATURA

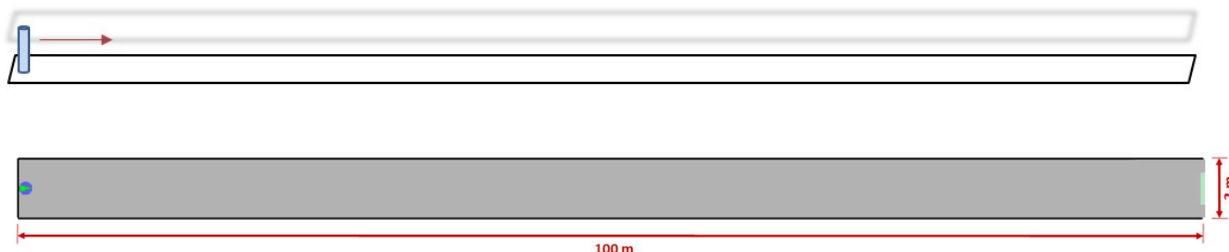
INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships*, MSC/Circ.1238. 2007.

C.5 VLIV OMEZENÉ VIDITELNOSTI NA RYCHLOST POHYBU

APLIKOVANÁ GEOMETRIE

Koridor s optimálními rozměry: šířka $w = 2$ m, délka $l = 40$ m. Na konci koridoru je umístěn východ o šířce $d = 1$ m.

SCHÉMA



ZÁKLADNÍ SCÉNÁŘ

Osoba má stanovenou rychlost volného pohybu na hodnotu $v = 1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Extinkční koeficient je nastaven na konstantní hodnotu $1,0 \text{ m}^{-1}$. V modelu nepoužíváme žádné zdroje světla.

ROZŠÍŘENÝ SCÉNÁŘ

Není stanoven.

OČEKÁVANÝ VÝSLEDEK

Osoba dosáhne konce koridoru ve stejnou dobu, která je určena rovněž manuálním výpočtem dle provedené studie v seznamu literatury (Korhonen a Hostikka, 2009).

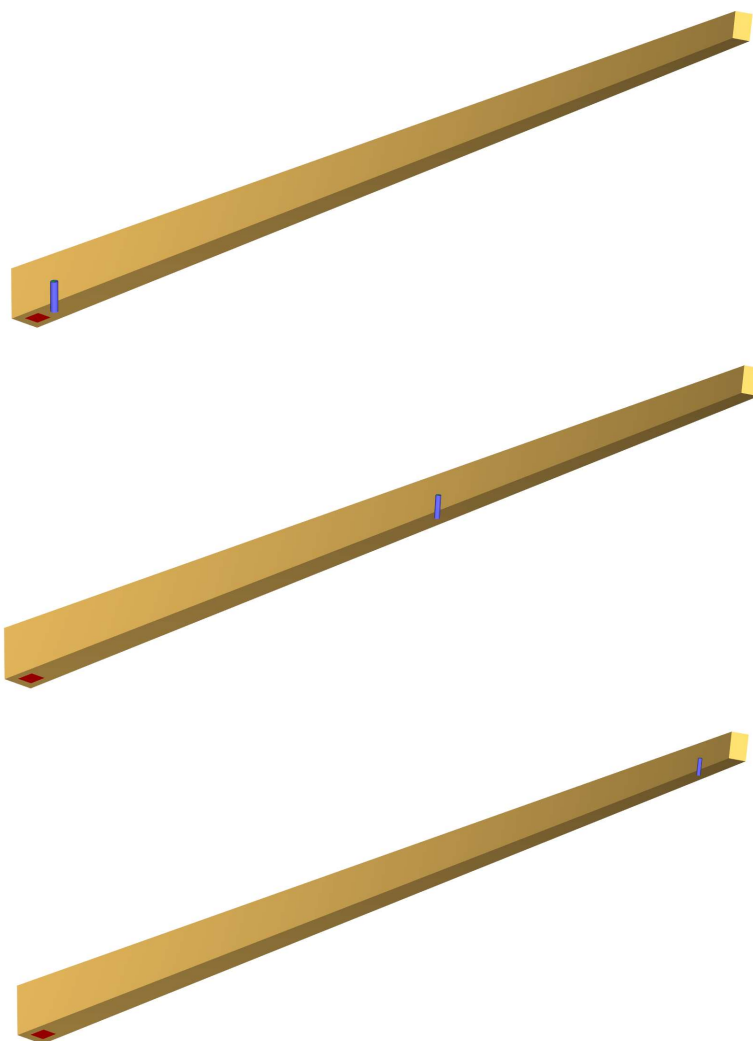
VERIFIKAČNÍ METODA

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

DOPORUČENÍ

Test by měl být realizován pro různé rychlosti pohybu, např. $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $0,75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a různé extinkční koeficienty, např. 10 m^{-1} , $7,5 \text{ m}^{-1}$, $3,0 \text{ m}^{-1}$ a $0,5 \text{ m}^{-1}$. Tyto hodnoty pokrývají obvyklé vstupy aplikované v dostupné literatuře. Pro tento test je nezbytné, aby uživatel modelu přesně znal typ korelace aplikované v rámci použitého modelu a dopředu spočítal očekávanou hodnotu redukované rychlosti pohybu. Test dále nepředpokládá fyziologický dráždivý vliv kouře na dýchací cesty, což má také za následek snížení rychlosti pohybu osob. Některé modely rovněž nemusí obsahovat submodel reprezentující tento efekt, uživatel pak korelaci mezi viditelností a sníženou rychlostí aplikuje přímo úpravou hodnoty této rychlosti. V každém případě je třeba podrobně popsat tato omezení existující v použitém modelu.

PŘÍKLAD PRŮBĚHU TESTU



LITERATURA

KORHONEN, T.; HOSTIKKA, S.: *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac Technical Reference and User's Guide (Working paper No. 119)*. Technická zpráva, VTT Technical Research Center of Finland, 2009.

FRANTZICH, H.; NILSSON, D.: *Evacuation in Dense Smoke: Behaviour and Movement: Technical Report 3126*. Technická zpráva, Lund University, 2003.

JIN, T.: *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, kapitola Visibility and Human Behavior in Fire Smoke. National Fire Protection Association, 2008, s. 242-253.

RONCHI, E.; GWYNNE, S. M. V.; PURSER, D. A.; aj.: Representation of the Impact of Smoke on Agent Walking Speeds in Evacuation Models. *Fire Technology*, ročník 49, č. 2, 2013: s. 411-431.

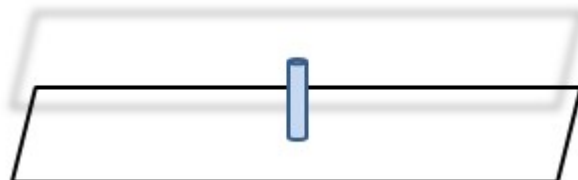
KULIGOWSKI, E. D., PEACOCK, R. D., HOSKINS, B.L. (2010). *A Review of Building Evacuation Models*, 2nd Edition, NIST Technical Note 1680.

C.6 FYZIOLOGICKÝ VLIV KOUŘE A TOXICKÝCH ZPLODIN

APLIKOVANÁ GEOMETRIE

Místnost o rozměrech 10 m a 10 m a výšce 3 m.

SCHÉMA



ZÁKLADNÍ SCÉNÁŘ

Model je zaměřen na test implementace konceptu FED (Fractional Effective Dose). Osoba je umístěna do středu místnosti s extrémně vysokou reakční dobou, která zamezí jejímu pohybu po celou dobu testu, a je vystavena negativnímu vlivu toxických látek dostupných v modelu (např. HCN, CO, HC1 atd.) a teploty, v případě možnosti také radiace atd.

ROZŠÍŘENÝ SCÉNÁŘ

Není stanoven.

OČEKÁVANÝ VÝSLEDEK

Hodnota FED = 1 je u testované osoby dosažena ve stejnou dobu v modelu i ručním výpočtem. Test by měl být opakován pro všechny produkty hoření a modely působení teploty dostupné v nástroji.

VERIFIKAČNÍ METODA

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

DOPORUČENÍ

Pro tento test je nezbytné, aby uživatel modelu přesně znal druh submodelů pro toxicitu a působení teploty, které jsou obsažené v nástroji.

LITERATURA

NENNO, P. J. D. (editor): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, kapitola Toxicity Assessment of Combustion Products. National Fire Protection Association, 2002.

PURSER, D. A.: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, kapitola Assessment of Hazards to Occupants from Smoke, Toxic Gases and Heat. National Fire Protection Association, 2008, s. 2096-2193.

KORHONEN, T.; HOSTIKKA, S.: *Fire Dynamics Simulator with Evacuation: FDS+Evac Technical Reference and User's Guide (Working paper No. 119)*. Technická zpráva, VTT Technical Research Center of Finland, 2009.

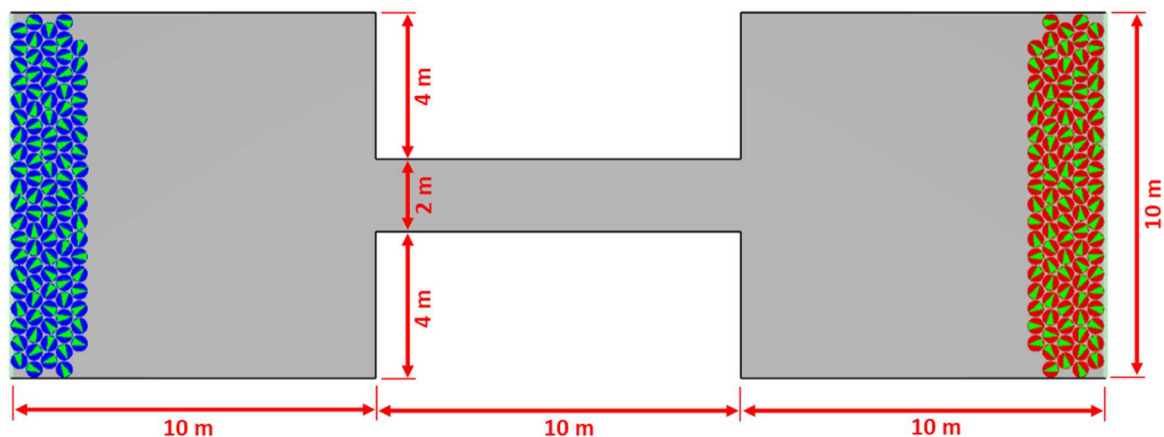
KULIGOWSKI, E. D., PEACOCK, R. D., HOSKINS, B.L. (2010). *A Review of Building Evacuation Models*, 2nd Edition, NIST Technical Note 1680.

C.7 PROTISMĚRNÉ PROUDĚNÍ POHYBU OSOB

APLIKOVANÁ GEOMETRIE

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

SCHÉMA



ZÁKLADNÍ SCÉNÁŘ

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

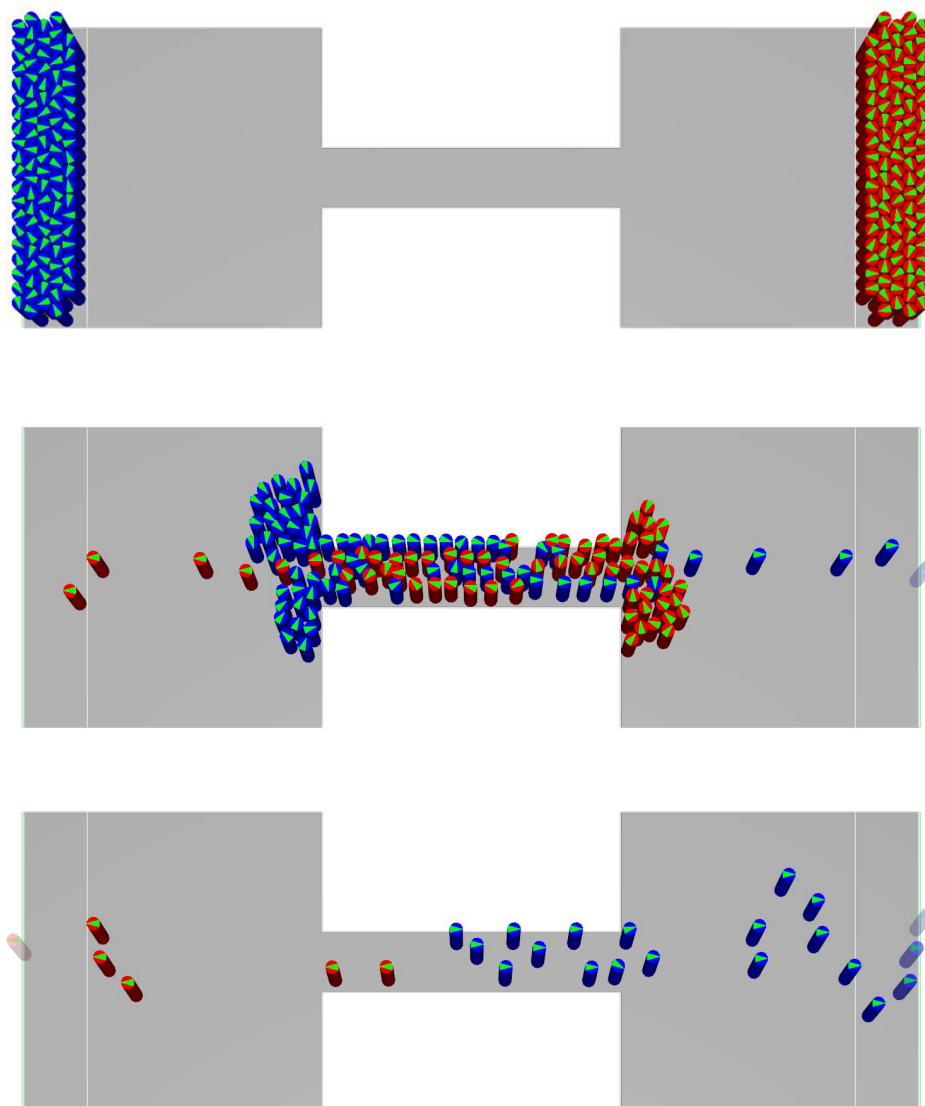
VERIFIKAČNÍ METODA

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

DOPORUČENÍ

Dosažení Výsledky vyžadují pečlivý kvalitativní rozbor a komentář.

PŘÍKLAD PRŮBĚHU TESTU



LITERATURA

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *Guidelines for Evacuation Analyses for New and Existing Passenger Ships*, MSC/Circ.1238. 2007.

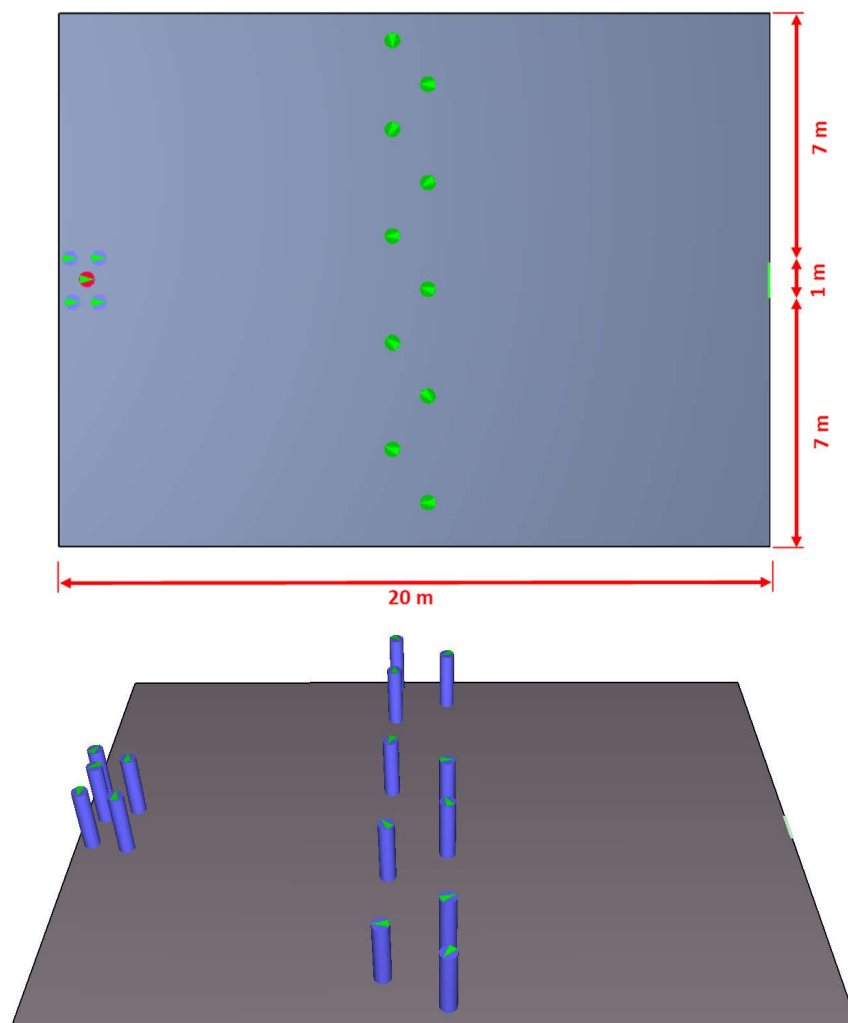
LORD, J.; MEACHAM, B.; MOORE, A.; aj.: *Guide for Evaluating the Predictive Capabilities of Computer Egress Models*. Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2005.

C.8 SKUPINOVÉ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ CHOVÁNÍ OSOB

APLIKOVANÁ GEOMETRIE

Místnost o rozměrech 15 m a 20 m s východem o šířce 1 m.

SCHÉMA



ZÁKLADNÍ SCÉNÁŘ

V místnosti je 5 osob v rámci jedné skupiny, 4 osoby s okamžitou reakční dobou a volnou rychlostí pohybu $1,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a pátá osoba s redukovanou rychlostí pohybu na hodnotu $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. V centrální části místnosti je další skupina 10 osob s výrazně redukovanou rychlostí $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Osoby v první skupině jsou směrem k východu místnosti.

ROZŠÍŘENÝ SCÉNÁŘ

Není stanoven.

OČEKÁVANÝ VÝSLEDEK

Osoby v první skupině dosáhnou východu společně, respektive se jejich okamžik průchodu exitem nebude lišit o více než 10 s.

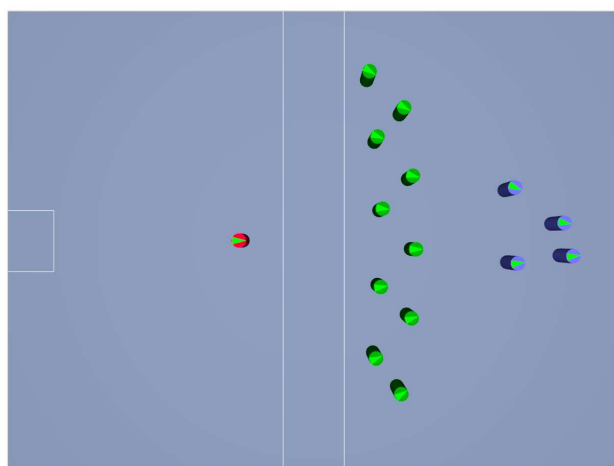
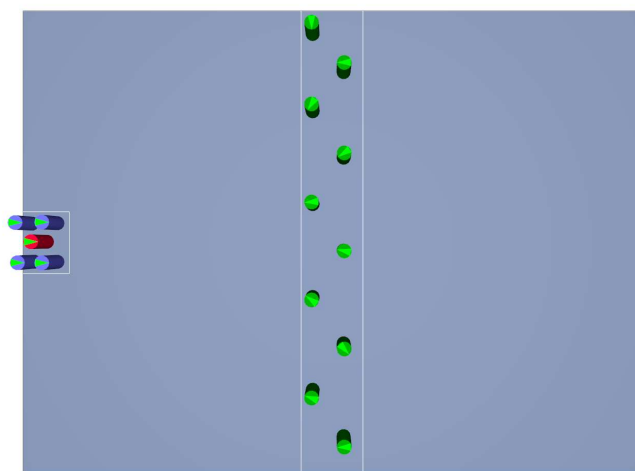
VERIFIKAČNÍ METODA

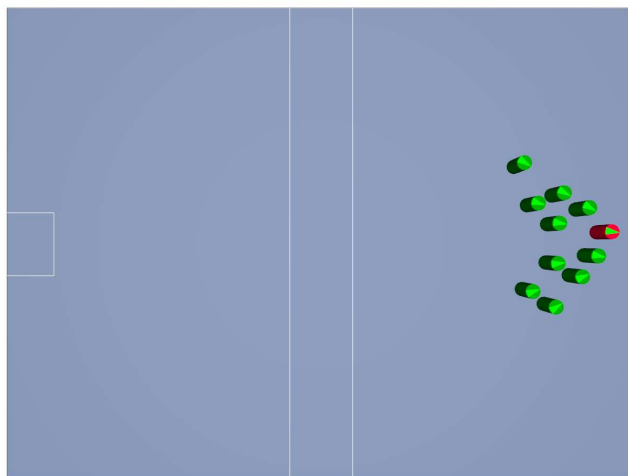
Kvantitativní verifikace. Uživatel porovnává rozdíl mezi získanou a očekávanou výslednou hodnotou testu.

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





LITERATURA

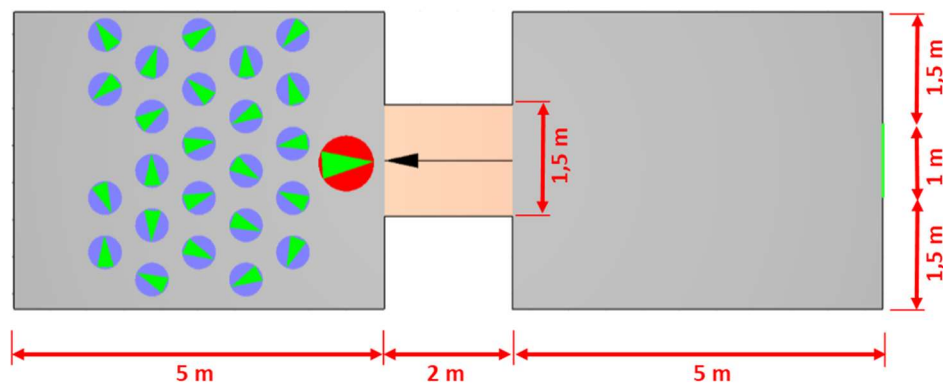
KULIGOWSKI, E. D., PEACOCK, R. D., HOSKINS, B.L. (2010). *A Review of Building Evacuation Models*, 2nd Edition, NIST Technical Note 1680.

C.9 OSOBY S OMEZENOU POHYBLIVOSTÍ

APLIKOVANÁ GEOMETRIE

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

SCHÉMA



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.

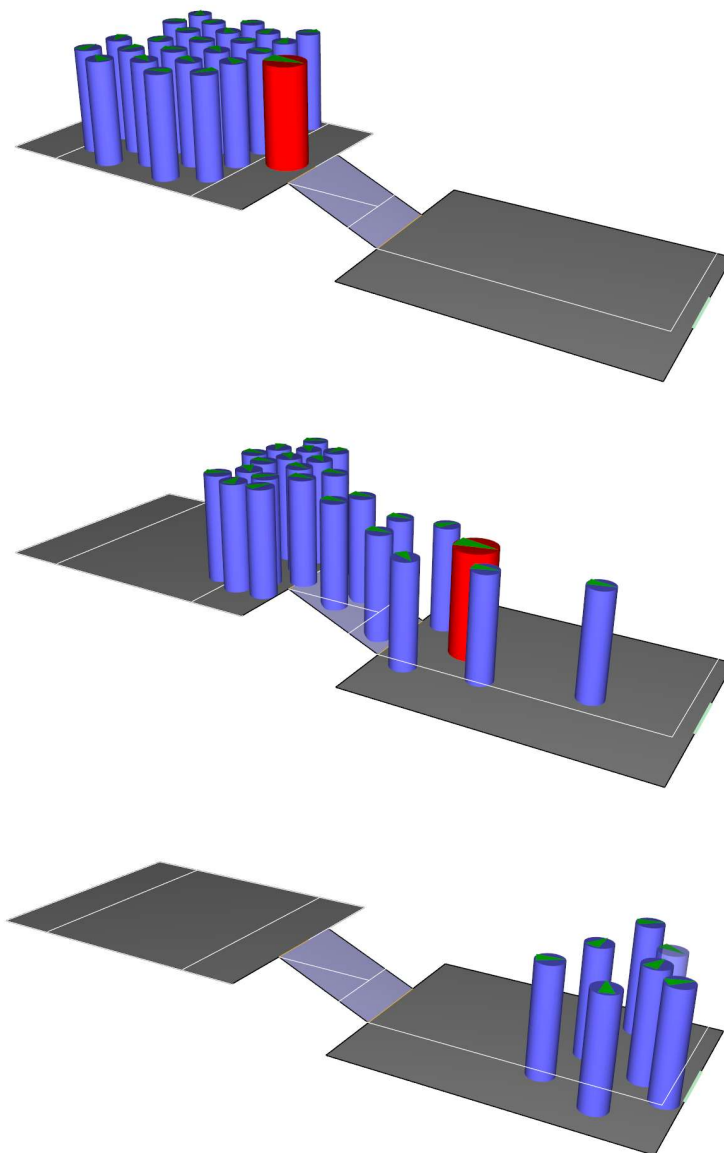
VERIFIKAČNÍ METODA

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



LITERATURA

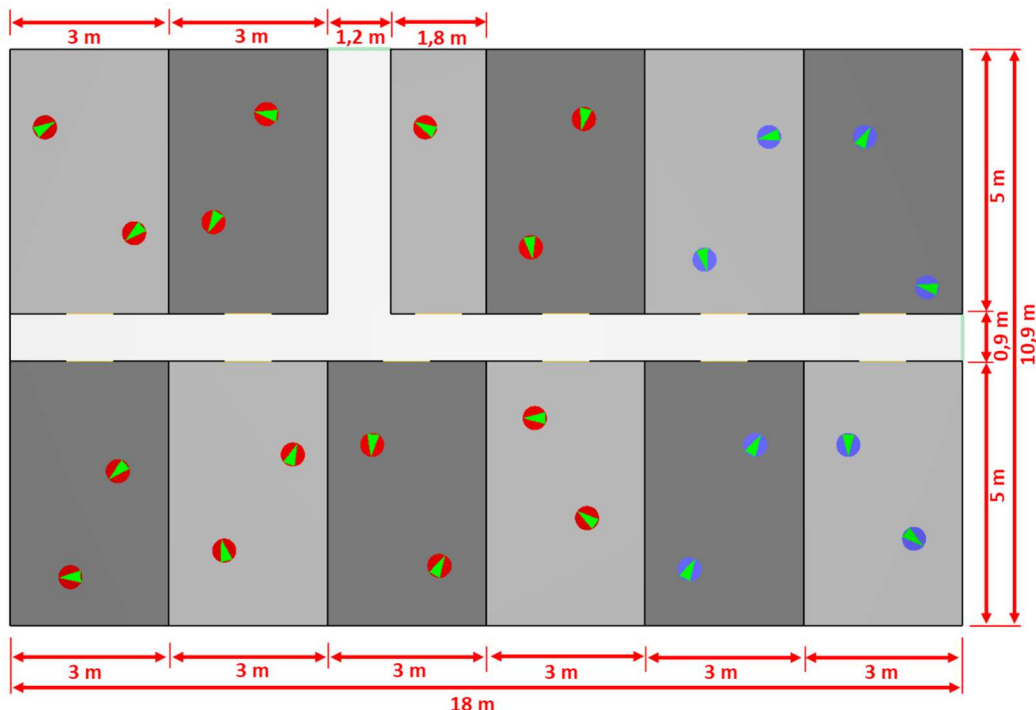
KULIGOWSKI, E. D., PEACOCK, R. D., HOSKINS, B.L. (2010). *A Review of Building Evacuation Models*, 2nd Edition, NIST Technical Note 1680.

C.10 PEVNÉ PŘÍRAZENÍ KONKRÉTNÍHO 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.

SCHÉMA



ZÁKLADNÍ SCÉNÁŘ

V místnostech jsou rozmístěny osoby dle schématu s okamžitou reakční dobou a rychlostí pohybu dle 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.

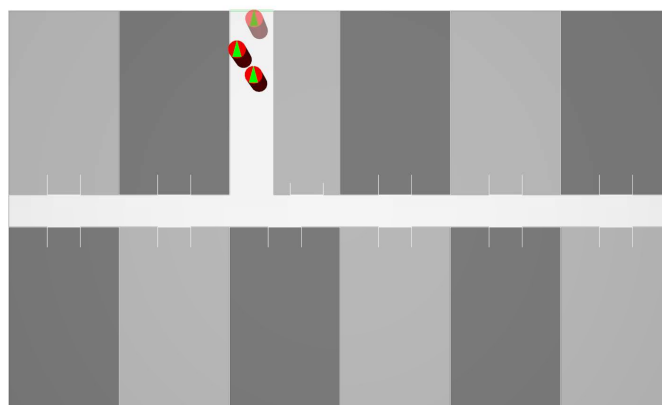
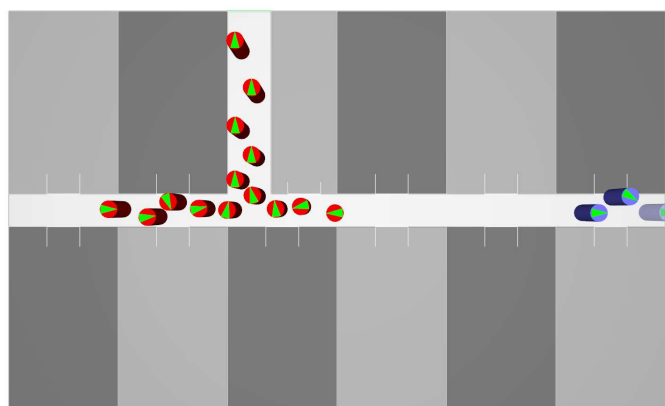
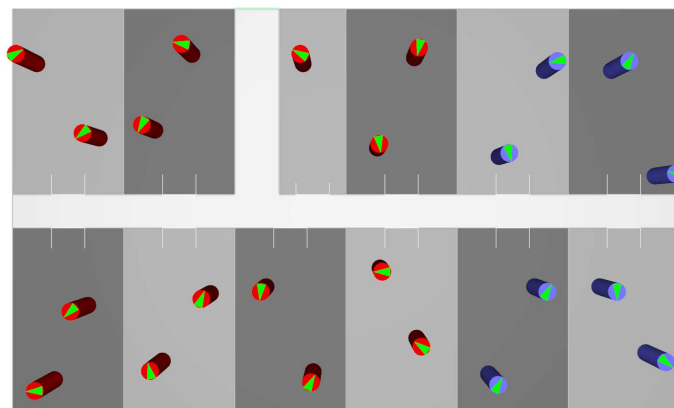
VERIFIKAČNÍ METODA

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



LITERATURA

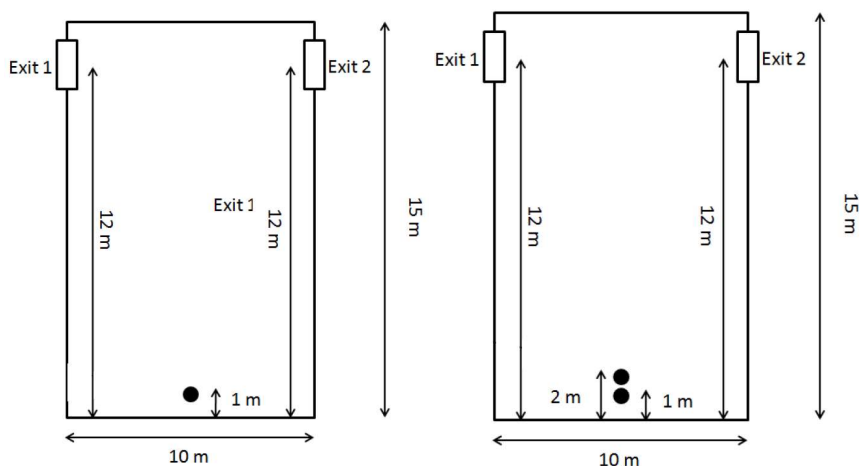
LORD, J.; MEACHAM, B.; MOORE, A.; *Guide for Evaluating the Predictive Capabilities of Computer Egress Models*. Technická zpráva, National Institute of Standards and Technology, 2005.

C.11 SOCIÁLNÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VOLBU VÝCHODU

APLIKOVANÁ GEOMETRIE

Místnost o rozměrech 10 m a 15 m. Dva východy o šířce 1 m jsou dostupné na delších stranách místnosti.

SCHÉMA



ZÁKLADNÍ SCÉNÁŘ

- Scénář 1: Osoba s rychlostí pohybu $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a okamžitou reakční dobou, která nemá pevně stanoven preferovaný únikový východ. Opakovaným spuštěním testu dosáhneme stabilního rozložení volby únikového východu s odchylkou nepřesahující 1 % pro další spuštění simulace.
- Scénář 2: Identický test. Přidáme druhou osobu se stejnými parametry umístěnou 2 m před stěnou první osobu, která má pevně přiřazen únikový druhý východ. Opakovaným spuštěním testu dosáhneme stabilního rozložení volby únikového východu s odchylkou nepřesahující 1 % pro další spuštění simulace.

ROZŠÍŘENÝ SCÉNÁŘ

Není stanoven.

OČEKÁVANÝ VÝSLEDEK

Ve scénáři č. 2 došlo k vyššímu využití východu č. 2. Test ověřuje pravděpodobnostní schopnosti modelu.

VERIFIKAČNÍ METODA

Kvalitativní verifikace. Uživatel zjišťuje, zda je model vykazuje vyšší využití východu č. 2 v případě druhého scénáře.

DOPORUČENÍ

Test je možné realizovat pouze v případě, kdy použitý model neaplikuje výrazně jednodušší (deterministickou) volbu únikového východu, která sociální vliv nezahrnuje. Jestliže je model založen výhradně na deterministické metodě volby únikových východů, uživatel musí tuto skutečnost okomentovat a odpovídajícím způsobem zohlednit.

LITERATURA

DEUTSCH, M., GERARD, H.B. A study of normative and informational social influences upon individual judgment. *The Journal of Abnormal and Social Psychology* 51, 629–636. 1955.

LATANÉ, B., DARLEY, J.M. *The unresponsive bystander: why doesn't he help?* Appleton-Century Crofts, New York. 1970.

NILSSON, D.AND JOHANSSON, A. Social influence during the initial phase of a fire evacuation—Analysis of evacuation experiments in a cinema theatre. *Fire Safety Journal* 44, 71–79. 2009.

HEWSTONE, M. AND MARTIN, R. Social Influence, in: *Introduction to Social Psychology*. Blackwell Publishing, London, UK. 2008.

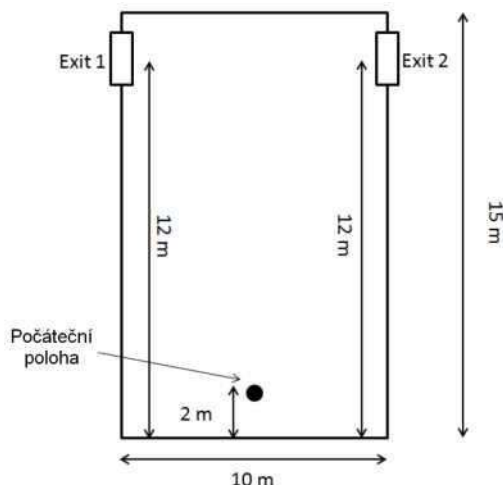
KINATEDER, M. *Social Influence in Emergency Situations—Studies in Virtual Reality*. Phd Dissertation. 2013.

C.12 SOCIÁLNÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VOLBU VÝCHODU

APLIKOVANÁ GEOMETRIE

Místnost o rozměrech 10 m a 15 m. Dva východy o šířce 1 m jsou dostupné na delších stranách místnosti.

SCHÉMA



ZÁKLADNÍ SCÉNÁŘ

- Scénář 1: Osoba s rychlostí pohybu $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a okamžitou reakční dobou, která není obeznámena s žádným z únikových východů. Opakovaným spuštěním testu dosáhneme stabilního rozložení volby únikového východu s odchylkou nepřesahující 1% pro další spuštění simulace.
- Scénář 2: Identický test, osoba je obeznámena s únikovým východem č. 2. Opakovaným spuštěním testu dosáhneme stabilního rozložení volby únikového východu s odchylkou nepřesahující 1 % pro další spuštění simulace.

ROZŠÍŘENÝ SCÉNÁŘ

Není stanoven.

OČEKÁVANÝ VÝSLEDEK

Ve scénáři č. 2 došlo k vyššímu využití východu č. 2. Test ověřuje pravděpodobnostní schopnosti modelu.

VERIFIKAČNÍ METODA

Kvalitativní verifikace. Uživatel zjišťuje, zda je model vykazuje vyšší využití východu č. 2 v případě druhého scénáře.

DOPORUČENÍ

Test je možné realizovat pouze v případě, kdy použitý model neaplikuje výrazně jednodušší (deterministickou) volbu únikového východu, kdy uživatel přímo definuje procentuální vytížení únikových východů. Jestliže je model založen výhradně na deterministické metodě volby únikových východů, uživatel musí tuto skutečnost okomentovat a odpovídajícím způsobem zohlednit.

LITERATURA

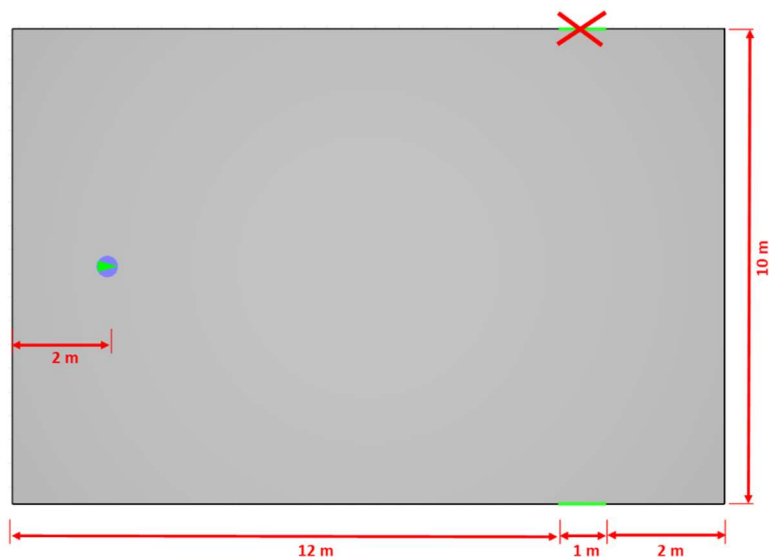
SIME, J.D. Movement toward the Familiar: Person and Place Affiliation in a Fire Entrapment Setting. *Environment and Behavior* 17, 697–724. 1985.

C.13 DYNAMICKÁ VOLBA ÚNIKOVÉHO VÝCHODU NA ZÁKLADĚ JEHO OKAMŽITÉ DOSTUPNOSTI

APLIKOVANÁ GEOMETRIE

Místnost o rozměrech 10 m a 15 m. Dva východy o šířce 1 m jsou dostupné na delších stranách místnosti.

SCHÉMA



ZÁKLADNÍ SCÉNÁŘ

Osoba s rychlostí pohybu $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a okamžitou reakční dobou je umístěna do místnosti. Po 1 s od zahájení evakuace je uzavřen únikový východ č. 1.

ROZŠÍŘENÝ SCÉNÁŘ

Není stanoven.

OČEKÁVANÝ VÝSLEDEK

Ve scénáři č. 2 došlo k vyššímu využití východu č. 2. Test ověřuje pravděpodobnostní schopnosti modelu.

VERIFIKAČNÍ METODA

Kvalitativní verifikace. Uživatel zjišťuje, zda dochází k využití konkrétního východu.

DOPORUČENÍ

Test je možné realizovat v případě, kdy použitý model obsahuje komponentu pro dynamickou volbu únikových východů a jejich dostupnost.

PŘÍKLAD PRŮBĚHU TESTU



LITERATURA

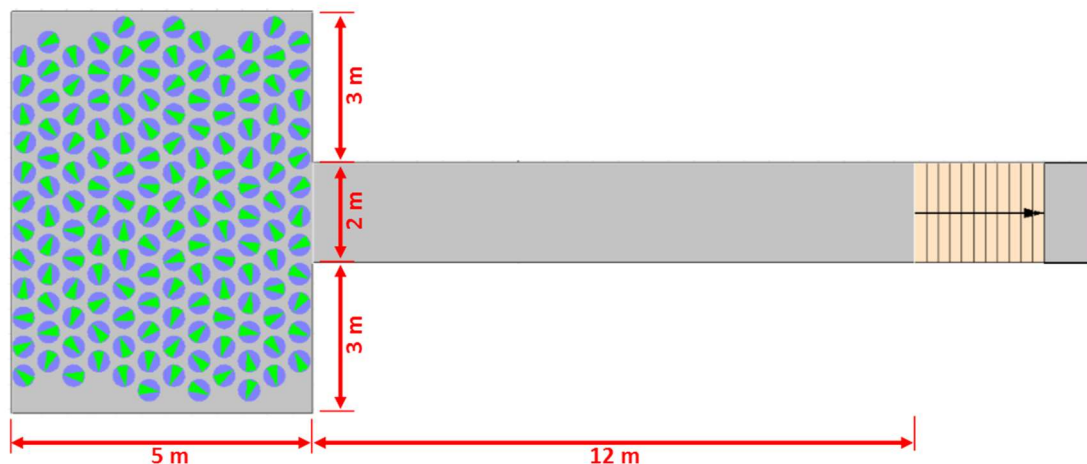
SIME, J. D. *Movement toward the Familiar: Person and Place Affiliation in a Fire Entrapment Setting.* Environment and Behavior 17, 697–724. 1985.

C.14 VZNIK KONGESCÍ

APLIKOVANÁ GEOMETRIE

Místnost se schodištěm směrem dolů.

SCHÉMA



ZÁKLADNÍ SCÉNÁŘ

V místnosti je 100 osob s hustotou $2,5 \text{ osob} \cdot \text{m}^{-2}$, jejichž charakteristiky odpovídají typu objektu. Osoby mají okamžitou reakční dobu. Rychlosti pohybu jsou rozloženy statisticky.

ROZŠÍŘENÝ SCÉNÁŘ

Není stanoven.

OČEKÁVANÝ VÝSLEDEK

Vznik kongesce u východu z místnosti a na počátku schodiště.

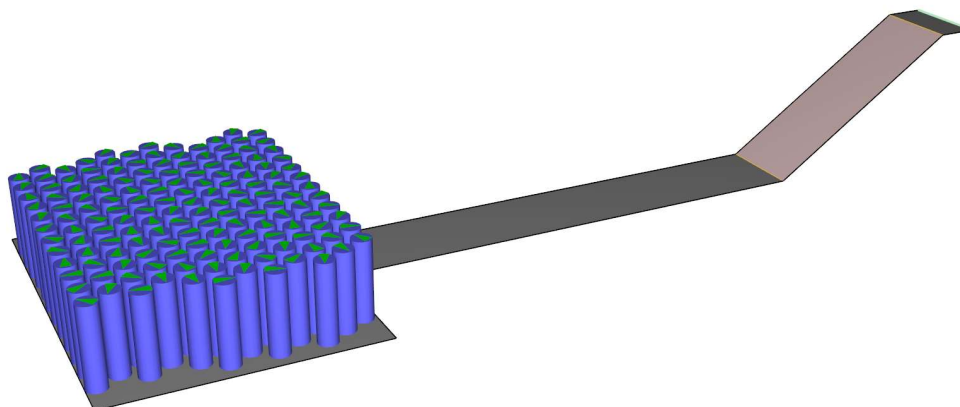
VERIFIKAČNÍ METODA

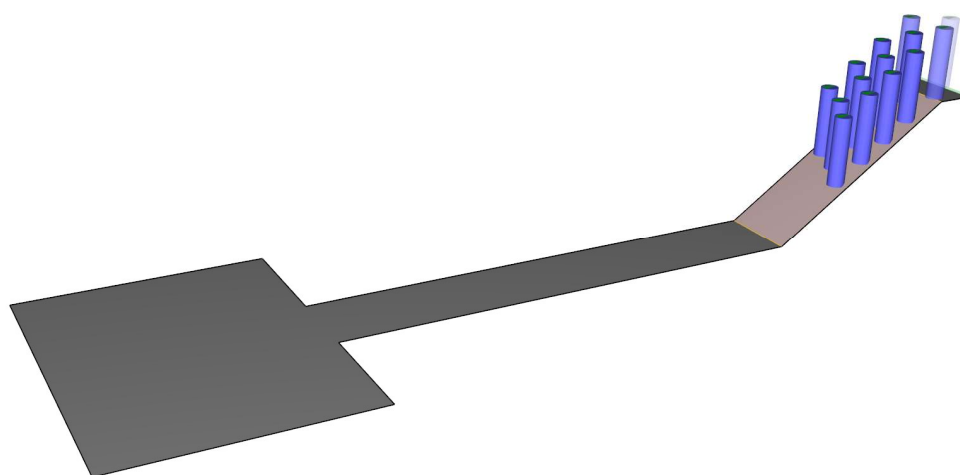
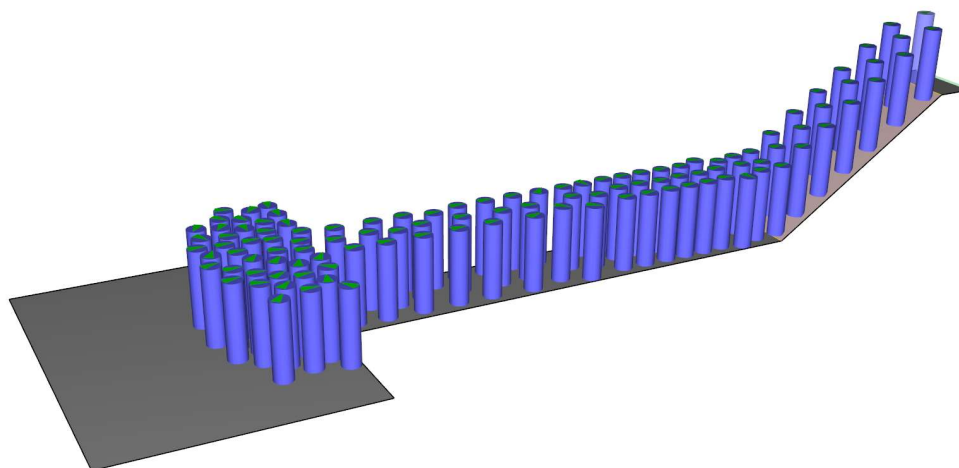
Kvalitativní verifikace. Uživatel zjišťuje, zda dochází ke vzniku kongesce v očekávaném místě.

DOPORUČENÍ

Test je vhodné provádět s využitím vizualizačního nástroje dostupného v modelu.

PŘÍKLAD PRŮBĚHU TESTU





LITERATURA

GALEA, E.R., DEERE, S., BROWN, R., FILIPPIDIS, L. An Evacuation Validation Data Set for Large Passenger Ships. Presented at the Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012 Conference, ETH, Zurich. 2012.

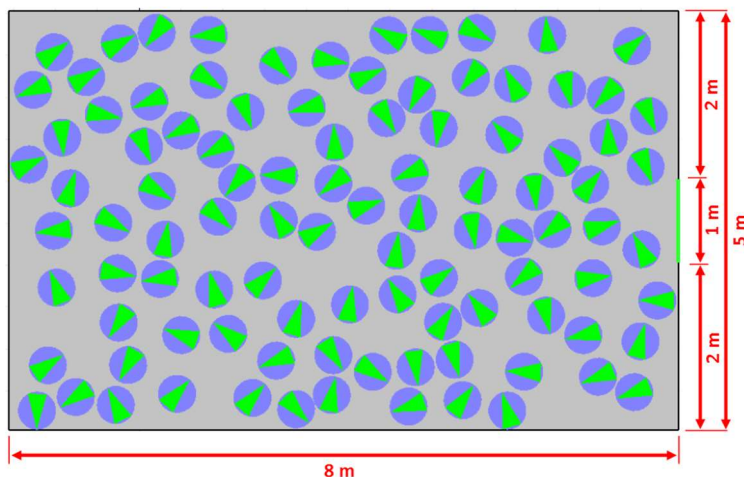
LORD, J., MEACHAM, B., MOORE, A., FAHY, R., PROULX, G. Guide for evaluating the predictive capabilities of computer egress models NIST GCR 06-886. 2005.

C.15 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



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.

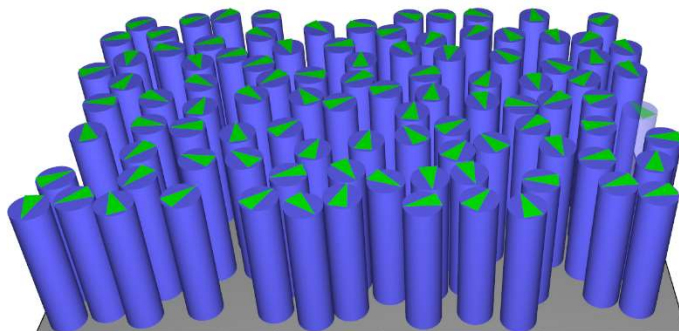
VERIFIKAČNÍ METODA

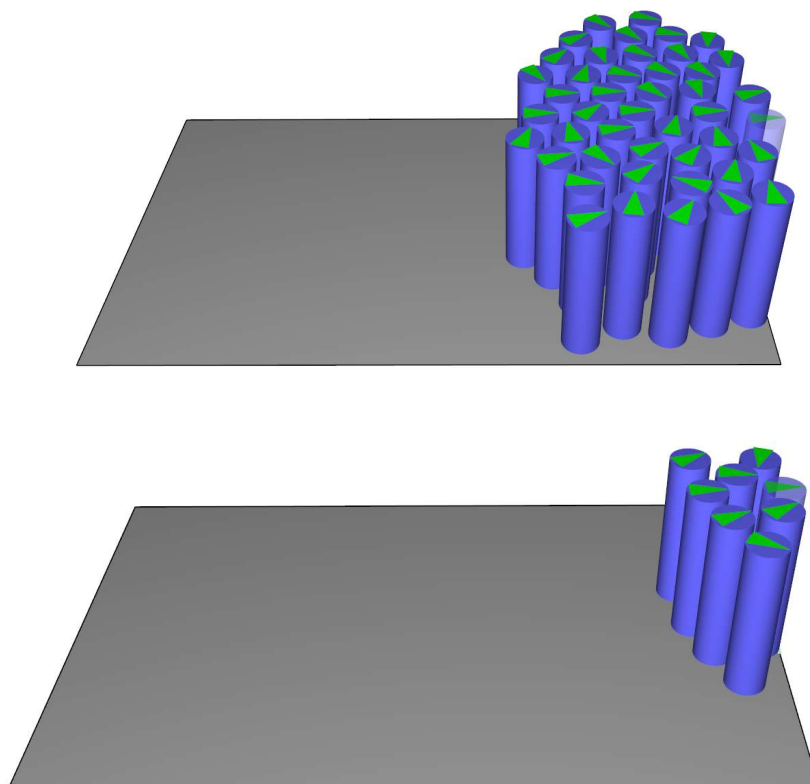
Kvantitativní verifikace. Uživatel porovnává očekávanou a stanovenou maximální hodnotu.

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





LITERATURA

GALEA, E.R., DEERE, S., BROWN, R., FILIPPIDIS, L. An Evacuation Validation Data Set for Large Passenger Ships. Presented at the Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012 Conference, ETH, Zurich. 2012.

LORD, J., MEACHAM, B., MOORE, A., FAHY, R., PROULX, G. Guide for evaluating the predictive capabilities of computer egress models NIST GCR 06-886. 2005.

D. Check-list

Následující seznam slouží ke kontrole správného postupu při modelování požáru, chování konstrukcí a evakuace osob pokročilými metodami. Seznam pokrývá kontrolu vstupních dat výpočtu a kontrolu kvality záznamu výpočtu. Jednotlivé body seznamu nelze plošně aplikovat na všechny druhy softwarů.

MODELY POŽÁRU

Zvolená metoda a výběr nástroje:

- Jaká je zvolená metoda výpočtu a proč je vybrán konkrétní softwarový nástroj?
- Je definován vybraný softwarový nástroj včetně čísla verze softwaru?
- Je vybraný model požáru dostatečný vzhledem k úrovni ostatních částí posouzení?
- Lze softwarový nástroj aplikovat na danou oblast řešení/je na danou oblast validován?
- Jaké jsou okrajové podmínky použitého softwaru?
- Jaké jsou nejistoty řešení daného softwaru?

Numerický model:

- Výpočetní oblast a geometrie:
 - Odpovídá výpočetní oblast řešenému objektu?
 - Je výpočetní oblast rozšířena v místě ventilačních otvorů?
 - Je namodelována geometrie úseku včetně vnitřních objektů, které mohou mít na chování požáru vliv?
 - Jsou namodelovány ventilační otvory? Jsou vhodně zvoleny vlastnosti otvorů?
 - Jsou zadány veškeré materiály a tloušťky konstrukcí?
 - Jsou vloženy vlastnosti materiálů v podobě dostupných TTCH?
- Výpočetní síť:
 - Obsahuje model výpočetní síť? Je velikost buňky výpočetní sítě vhodně zvolena?
 - Navazují na sebe sousedící či překrývající se výpočetní sítě?
 - Odpovídají veškeré objekty modelu velikosti buňky sítě?
 - Byla provedena citlivostní studie na velikost výpočetní sítě?
- Požár:
 - Obsahuje model zdroj hoření?
 - Je vhodně zvolena definice zdroje hoření? (viz metodika Vstupní data do modelů požáru)
- Reakce:
 - Je zadána reakce hoření?
 - Je reakce vhodně zvolena? (viz metodika Vstupní data do modelů požáru)
- Další:
 - Jsou v modelu zadány veškeré aktivní prvky požární bezpečnosti?
 - Jsou definovány počáteční podmínky?

Výsledky a vyhodnocení:

- Jsou zadány všechny potřebné výstupy včetně jejich pozice a vlastností?
- Je zvolen celkový čas a časový krok výpočtu?
- Jsou zaznamenány veškeré vstupní hodnoty včetně jejich zdrojů ve zprávě?
- 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?

MODELY POSOUZENÍ POŽÁRNÍ ODOLNOSTI KONSTRUKCÍ

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?

Numerický model:

- Předpoklady 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?

MODELÝ EVAKUACE

Zvolená metoda a výběr nástroje:

- Je definován vybraný softwarový nástroj včetně čísla verze softwaru?
- Je použití konkrétního modelu evakuace odůvodněno?
- Lze zvolený nástroj aplikovat na danou úlohu, je pro tuto úlohu verifikován a validován?
- Jaké jsou okrajové podmínky použitého nástroje a jeho nejistoty?

Numerický model:

- Je modelována kompletní geometrie objektu včetně všech prvků, které mohou ovlivňovat evakuované osoby?
- Jsou popsána empirická nebo tabelovaná vstupní data?
- Obsahuje model diskrétní síť? Pokud ano, jaká je velikost buňky a je tato velikost odůvodněna? Odpovídají v takovém případě objekty modelu velikosti buňky sítě?
- Byla provedena citlivostní studie na velikost výpočetní sítě?
- Je zvolen celkový čas a časový krok výpočtu?
- Jsou v modelu zadány veškeré navigační prvky?

Výsledky a vyhodnocení:

- Jsou zadány všechny potřebné výstupy?
- Jsou výsledky výpočtu zpracovány přehledně numericky i vizuálně?
- Byl proveden dostatečný počet simulačních procesů (min. 10 nebo podle výpočtu)?
- Jsou výsledky výpočtu relevantní? Je zhodnocena jejich přesnost?
- Je uvedena veškerá použitá literatura?