

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra ocelových a dřevěných konstrukcí



MODELOVÁNÍ POŽÁRU V HALOVÝCH OBJEKTECH

MODELING OF FIRE IN HALL BUILDINGS

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

Bc. Kristýna Janatová

Vedoucí práce: Ing. Kamila Cábová, Ph.D.

Praha 2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: JANATOVÁ Jméno: KRISTÝNA Osobní číslo: 423066

Zadávající katedra: KATEDRA OCELOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

Studijní program: STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: INTEGRÁLNÍ BEZPEČNOST STAVEB

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Modelování požáru v halových objektech

Název diplomové práce anglicky: Modelling of fire in hall buildings

Pokyny pro vypracování:

1. Shrnutí problematiky
2. Výběr vhodných požárních scénářů
3. Numerické modelování teploty plynu v halovém objektu
4. Závěrečné doporučení

Seznam doporučené literatury:

KARLSSON, Björn a James G. QUINTIERE. Enclosure fire dynamics. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000.

Environmental and energy engineering series. ISBN 978-0-8493-1300-4.

KUČERA, Petr. Požární inženýrství: dynamika požáru. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009. ISBN 978-80-7385-074-6.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Kamila Cábová, Ph.D., od 1. 12. 2018 prof. Ing. František Wald, CSc.

Datum zadání diplomové práce: 1.10.2018

Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2019

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

8.10.2018

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Modelování požáru v halových objektech* jsem vypracovala samostatně pod odborným vedením Ing. Kamily Cábové, Ph.D. Veškeré podklady, ze kterých bylo čerpáno, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne 7. ledna 2019

.....

Bc. Kristýna Janatová

Poděkování

Chtěla bych poděkovat své vedoucí diplomové práce Ing. Kamile Cábové, Ph.D., za odborné vedení, poskytnuté podklady a cenné rady při zpracování této diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala své rodině a přátelům za podporu během celého studia.

Obsah

Abstrakt	VI
Abstract	VI
Seznam použitých symbolů a zkratk	VII
1 Úvod	9
2 Současný stav poznání	11
2.1 Zjednodušené modely požáru	11
2.1.1 Nominální teplotní křivky	11
2.1.2 Parametrické teplotní křivky	13
2.2 Zdokonalené modely požáru	15
2.2.1 Zónové modely	15
2.2.2 Lokální požár	16
2.2.3 CFD modelování	16
2.2.4 Problematika aplikovatelnosti požárních modelů	20
2.3 Případové studie	21
2.3.1 Aplikace požárního inženýrství v hangáru v Berlíně	21
2.3.2 Olympijské hry v Pekingu 2008	24
3 Numerické modely v FDS	27
3.1 Geometrie numerického modelu	27
3.2 Materiály	31
3.3 Výpočetní síť	32
3.4 Požární scénář	34
3.4.1 Požární scénář 1	35
3.4.2 Požární scénář 2a	37
3.4.3 Požární scénář 2b	39
3.4.4 Požární scénář 2c	40
3.4.5 Požární scénář 3	41
4 Výsledky numerického modelu	44
4.1.1 Požární scénář 1	44
4.1.2 Požární scénář 2a	47
4.1.3 Požární scénář 2b	51
4.1.4 Požární scénář 2c	58
4.1.5 Požární scénář 3	64
5 Analýza citlivosti sítě	72
6 Závěr	75
Seznam obrázků	78
Seznam tabulek	80
Seznam grafů	81
Literatura	82
Příloha 1 - FDS model I.	84
Příloha 2 - FDS model II.	96

Příloha 3 - FDS model III.....	109
Příloha 4 - FDS model IV.....	121
Příloha 5 - FDS model V.....	134

Abstrakt

Vývoj požáru ve velkoprostorové požárním úseku se výrazně liší od vývoje požáru v malém prostoru. U velkoprostorových objektů se při navrhování konstrukcí za požáru často postupuje pomocí tzv. performance-based přístupu. Pokročilých metod lze využít ve všech částech návrhu – v předpovědi průběhu teploty v prostoru a čase, ve výpočtu přestupu tepla do konstrukce a při posouzení mechanického chování konstrukce nebo její části při požáru. Předpověď teploty plynu v požárním úseku je pro návrh konstrukce klíčová. Diplomová práce se zabývá hlavními otázkami výběru požárních scénářů ve velkoprostorovém požárním úseku. Cílem je poskytnout podklady pro navrhování konstrukcí při požáru pomocí performance-based přístupu. Součástí práce je případová studie halového objektu řešená pomocí softwaru FDS (Fire Dynamics Simulator) založeného na principu dynamického proudění tekutin. Studie zdůrazňuje důležitost uvažování několika požárních scénářů při navrhování konstrukcí za požáru včetně šíření požáru.

Klíčová slova

Dynamika požáru; numerický model; halový objekt; teplotní pole; okrajové podmínky; FDS

Abstract

The development of a fire in a large-space fire section differs significantly from the development in a small fire section. In large-space objects, designing structures under a fire often proceeds through a performance-based approach. Advanced methods can be used in all parts of the design - in predicting the scatter of temperature field, in calculating the heat transfer to the structure and in assessing the mechanical behavior of the structure or its part in a fire. The prediction of the gas temperature in the fire compartment is crucial for the structure design. The thesis deals with the main issues of selecting different fire scenarios in the large-space building. The aim is to provide background for structural design in a fire using a performance-based design. A part of the thesis is a case study of a hall object solved by using FDS (Fire Dynamics Simulator) software based on the CFD (Computational Fluid Dynamics) method. The study highlights the importance of considering several fire scenarios when designing buildings in a fire including fire spread.

Keywords

Fire dynamics; numerical model; hall object; temperature field; boundary conditions; FDS

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

A	Plocha	m^2
c	Měrná tepelná kapacita	$J/(kg \cdot K)$
c_p	Měrná tepelná kapacita vzduchu za konstantního tlaku	$J/(kg \cdot K)$
Q	Celkové množství uvolněného tepla	W
q_L	Množství tepla odvedeného kouřem z prostoru	W
q_W	Množství tepla spotřebovaného pro ohřev konstrukcí	W
q_R	Množství tepla odvedeného sáláním z hořícího prostoru	W
q_B	Množství tepla spotřebovaného na ohřev prostoru	W
t	Čas	min
D^*	Charakteristický průměr požár	m
g	Gravitační zrychlení	m/s^2
T_∞	Teplota okolního vzduchu	K

Řecké symboly

λ	Součinitel tepelné vodivosti	$W/(m \cdot K)$
ρ	Objemová hmotnost	kg/m^3
ρ_∞	Hustota okolní vzduchu za konstantního tlaku	kg/m^3
θ_g	Teplota plynu v požárním úseku	$^\circ C$
δx	Velikost kontrolního objemu	mm

Zkratky

CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)
SMV	Smokeview (software)
PO	Požární odolnost

HRR	Uvolněné teplo	
HRRPUA	Maximální výkon jednoho hořáku v modelu	kW/m ²
TC	Termočlánek	
HZS	Hasičský záchranný sbor	
LES	Large Eddy Simulation	
DNS	Direct Numerical Simulation	

1 Úvod

Ocelové konstrukce jsou v dnešní době velmi oblíbené a vynikají celou řadou pozitivních vlastností. V projektové praxi se často setkáváme se stavbami, které z určitých důvodů není možné, někdy ani smysluplné, posuzovat podle českého technického standardu. Při výstavbě rozsáhlých objektů se čím dál častěji využívá ocelových konstrukcí, což má velký dopad na koncepci požárně bezpečnostního řešení. Zpravidla se jedná o atypické stavby velkého rozsahu jako jsou letiště, stadiony, vlaková nádraží, výrobní objekty nebo výstaviště. Kolaps takového objektu může způsobit značné ekonomické ztráty a v neposlední řadě ztráty na lidských životech.

Základním ukazatelem ve vztahu ke stavebním konstrukcím je požární odolnost konstrukce. Požární odolnost představuje dobu v minutách, po kterou je stavební konstrukce schopna odolávat účinkům požáru podle normou definovaných kritérií. U velkých objektů nejčastěji dochází k lokálnímu požáru, kdy je rozložení teploty v požárním úseku nerovnoměrné a značně se liší od teploty prostorového požáru v malém uzavřeném prostoru. Při požáru ve velkém prostoru lze na základě návrhového modelu požáru zjistit rozložení teplot a určit přestup tepla do konstrukce. Zprvu je tepelné namáhání prvku způsobeno konvekcí a radiací horkých plynů. Vzestup teploty vede k dodatečnému tepelnému namáhání a poklesu pevnosti a tuhosti prvku, které může vést až ke kolapsu konstrukce.

V současné době se pro návrh využívá nespočet metod, které jsou pro rozsáhlé nebo jinak specifické stavby vhodnější než tradiční normy. Tyto změny jsou motivovány potřebou flexibilnějších způsobů navrhování budov a nutností umožnit méně nákladná řešení, aniž by došlo ke snížení úrovně bezpečnosti. Rozsah použití metod odlišného postupu je rámcově vymezen v ČSN 73 0802. K simulování požáru v uzavřeném prostoru se používají matematické a také fyzikální modely. Fyzikální modely představují experimentální zkoušky, které se provádí na uměle vytvořených objektech většinou ve zmenšeném měřítku. Zkoušky v plném měřítku tzv. full-scale jsou velmi časově i finančně nákladné. Požární zkoušky tak mají za úkol napodobit reálné požární situace, mohou ale způsobovat řadu nepřesností při popisování skutečného požáru. Získané výsledky z fyzikálních modelů slouží hlavně k validaci matematických modelů.

Obecně se pro modelování požáru používají tyto základní metody [1]:

- **Normová teplotní křivka ISO 834** vyjadřující závislost teploty v požárním úseku na době požáru. Vhodná především pro vnitřní požár v malém prostoru.
- **Parametrické modely požáru** založené na základě rovnice tepelné rovnováhy. Uvažují i fázi chladnutí.
- **Zónové modely**, které jsou přesnější při počáteční fázi požáru, kde je požární úsek rozdělen na dvě kouřové zóny.
- **Dynamická analýza plynu**, která může celkem přesně předpovědět zvýšenou teplotu vzduchu ve velkém prostoru. Jedná se o spolehlivou analýzu, která zachycuje celý proces chování konstrukce při zvýšené teplotě.

Celkové zhodnocení a výsledek modelování závisí na možnostech matematického modelu, na implementaci modelu v jednotlivých fázích. Důležité je očekávání a předpoklady uživatele a správně nadefinování vstupních parametrů, které jsou klíčové pro dnešní vyspělé výpočetní nástroje (např. CFD a evakuace).

Diplomová práce se zabývá výběrem vhodných požárních scénářů v halovém objektu. Cílem práce je informovat o důležitosti vytvoření individuálního modelu a znalosti všech okrajových podmínek v řešeném objektu.

2 Současný stav poznání

Stanovení rozvoje požáru v požárním úseku vyžaduje znalost mnoha parametrů. Nejdůležitější je stanovení návrhového požárního scénáře, který nejlépe vystihuje chování v hořícím prostoru za mimořádně situace. Základním parametrem je požární zatížení, které závisí na typu provozu v budově. V rámci posuzování staveb z hlediska požární bezpečnosti rozeznáváme obecně dva základní přístupy:

- **Preskriptivní:** vyžaduje splnění závazných požadavků dle platných nařízení. Většinou se posuzuje celá stavba.
- **Inženýrský:** využívá se v případech, kdy je potřeba využít jiné řešení než je preskriptivní přístup. Nevyžaduje se řešení celé stavby.

Pro experimentální a teoretické posuzování požární odolnosti stavebních konstrukcí byly pro namáhání požárem vypracovány modely, které stanovují teplotní pole v požárním úseku. Rozlišují se zjednodušené a zdokonalené modely požáru. Zjednodušené modely požáru jsou založeny na fyzikálních parametrech s omezenou platností použití. Pro požár v celém požárním úseku lze uvažovat rovnoměrné rozdělení teploty v daném čase. Při lokálních požárech (např. hořící automobil v tunelu) je rozdělení teplot nerovnoměrné [2].

2.1 Zjednodušené modely požáru

2.1.1 Nominální teplotní křivky

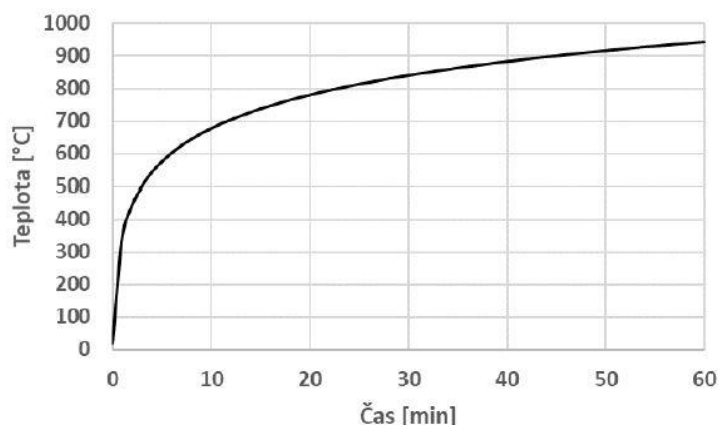
Nominální normová teplotní křivka je nejznámější a nejpoužívanější metoda pro předpověď teploty plynu v požárním úseku. Předpokládá se, že teplota v prostoru je rozložena rovnoměrně. Křivka vyjadřuje závislost teploty v požárním úseku pouze na čase, jak znázorňuje obr.1.

Normová teplotní křivka (označována jako ISO 834) je v [3] dána vztahem:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2.1.1)$$

kde θ_g teplota plynu v požárním úseku [°C]

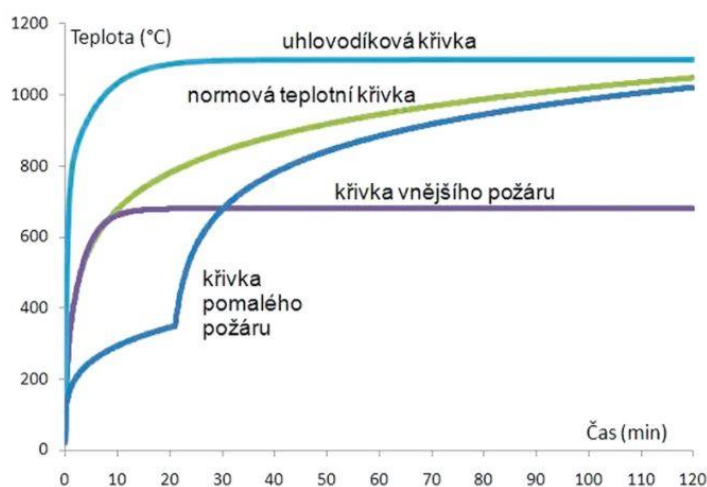
t čas [min]



Obr. 1 Normová teplotní křivka [4].

Tento vztah mezi teplotou a časem byl původně odvozen ze série měření počátkem 20. století a bylo prokázáno, že podobnost s reálnými požáry je velmi omezená. Křivka nezahrnuje vliv požárního zatížení, fázi chladnutí a ani okrajové podmínky při hoření (vlastnosti povrchů, hustotu kouře, ventilace). Proto se označuje jako nominální teplotní křivka. Obvykle je toto řešení velmi konzervativní a pro některé požární situace a konstrukce může být normová křivka na straně nebezpečné. [5]

Mezi nominální teplotní křivky se dále řadí křivka vnějšího požáru, kterou se namáhají obvodové stěny a uhlovodíková teplotní křivka, která umožňuje simulaci prudkých požárů s rychlým nárůstem intenzity. Křivky na obrázku 2 ukazují velké rozdíly mezi jednotlivými nominálními křivkami.



Obr. 2 Normová teplotní křivka [6].

2.1.2 Parametrické teplotní křivky

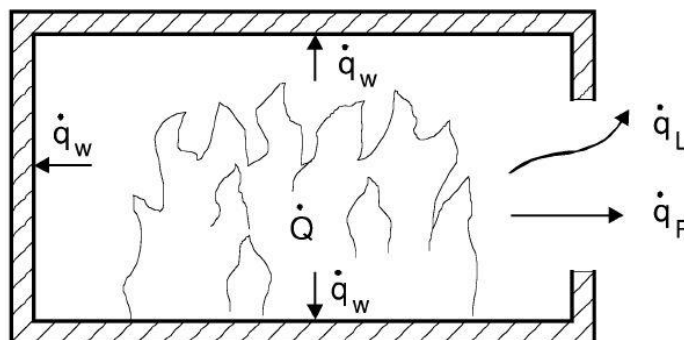
Vědci ve Švédsku v 70 letech [7] popsali metodu pro předpověď teploty plynu v požárním úseku, která vychází z rovnováhy tepla v požárním úseku. Předpokládá se, že palivo plně vyhoří uvnitř požárního úseku, teplota plynu bude rovnoměrná a prostup tepla ohraničujícími konstrukcemi je rovnoměrný v čase i prostoru.

Tepelnou bilanci lze tak vyjádřit ve tvaru:

$$Q = q_L + q_W + q_R + q_B \quad (2.1.2)$$

kde	Q	teplo uvolněné při hoření	[W]
	q_L	ztráta tepla sáláním a odvodem plynu otvory	[W]
	q_W	ztráta tepla v ohraničujících konstrukcích	[W]
	q_R	ztráta tepla sáláním ohraničujících konstrukcí	[W]
	q_B	teplo akumulované v plynu v požárním úseku	[W]

Petterssonova metoda zobrazená na obr. 3, tvoří základ parametrického modelu požáru popsaného v Eurokódu 1 [3]. Řešení rovnice se obvykle zobrazuje graficky pro různá požární zatížení a ventilační podmínky. Tato metoda je v některých literaturách nazývána jako “přirozený požár”.



Obr. 3 Energetická rovnováha pro plně rozvinutý požár v místnosti [8].

Parametrické modely využívají fyzikálních parametrů a analytického popisu hoření v požárním úseku uvedených v [3] přílohy A a F a předpokládají rovnoměrné rozložení teploty v celém požárním úseku. V příloze A [3] je popsána metoda stanovení křivky pro fázi hoření

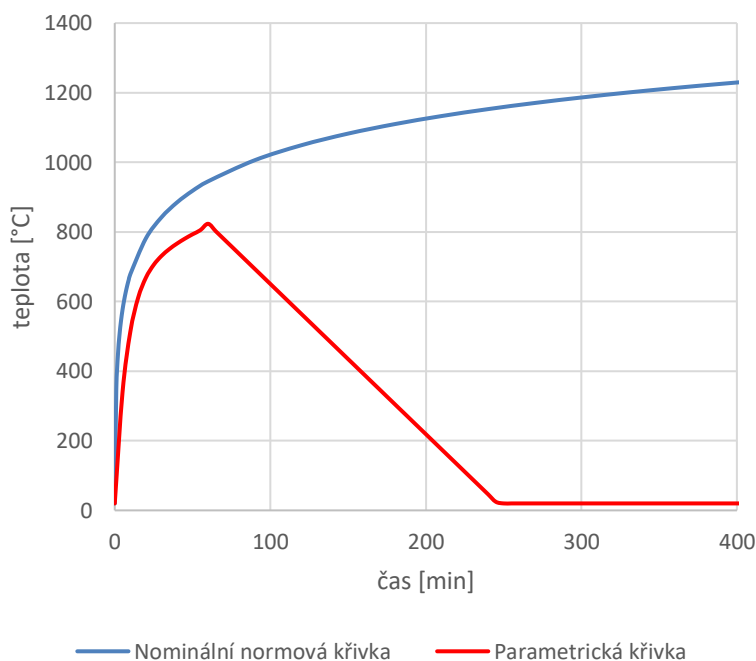
i fázi chladnutí, na rozdíl od normové teplotní křivky, kde fáze chladnutí není uvažována. Podle vztahu uvedené v [3] lze předpovědět teplotu plynů v požárním úseku ve fázi hoření vztahem:

$$\theta_g = 20 + 1325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (2.1.3)$$

kde θ_g teplota plynu v požárním úseku [°C]

t^* náhradní čas zohledňující vliv otvorů a kvality povrchů [hod]

Křivka zohledňuje parametry, které mají hlavní vliv na průběh teploty plynu: požární zatížení (čím vyšší požární zatížení, tím delší doba hoření), ventilace, tvar a rozměr požárního úseku a požáru (velké otvory vedou ke kratší době hoření, ale dosahuje se vyšší teploty) a povrchy požárních úseků (stěny, které absorbují energii, snižují teplotu hoření). Požární úsek lze popsat parametry odvětrání, tvaru a kvality povrchů [2]. Na grafu 1 je vyobrazeno srovnání normové teplotní křivky a parametrické teplotní křivky pro stejný požární úsek. Z grafu níže je patrné, že parametrická křivka je mnohem přesnější. Normová křivka naproti tomu nabízí mnohem konzervativnější řešení.

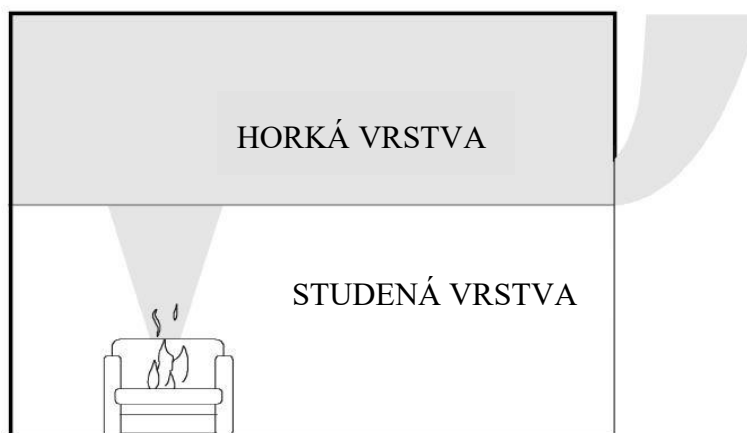


Graf 1 Porovnání ISO 834 a parametrické teplotní křivky.

2.2 Zdokonalené modely požáru

2.2.1 Zónové modely

Zónové modely rozdělují řešený prostor na homogenní vrstvy (neboli zóny), kde každá vrstva má shodnou hustotu, teplotu a koncentraci plynů. Nejčastěji je prostředí požáru simulováno pomocí dvou zón – horní horká vrstva kouře a dolní, relativně studená vrstva. Na obr. 4 je možné pozorovat vzestupný proud zplodin hoření, který se shromažďuje pod stropem místnosti. Tento proud spalin vytváří horkou horní vrstvu a rozděljuje místnost na dva kontrolní objemy. Při dosažení podmínek celkového vzplanutí (tj. flashover efekt) je pak požár modelován pomocí jedné zóny (Petterssonův model). Důležitou informací je změna tloušťky vrstev v čase. Znalost tloušťky spodní vrstvy, která je chladnější a neobsahuje škodlivé látky vzniklé při hoření, je nezbytná pro stanovení možnosti úniku osob z požárního úseku v případě požáru [4].

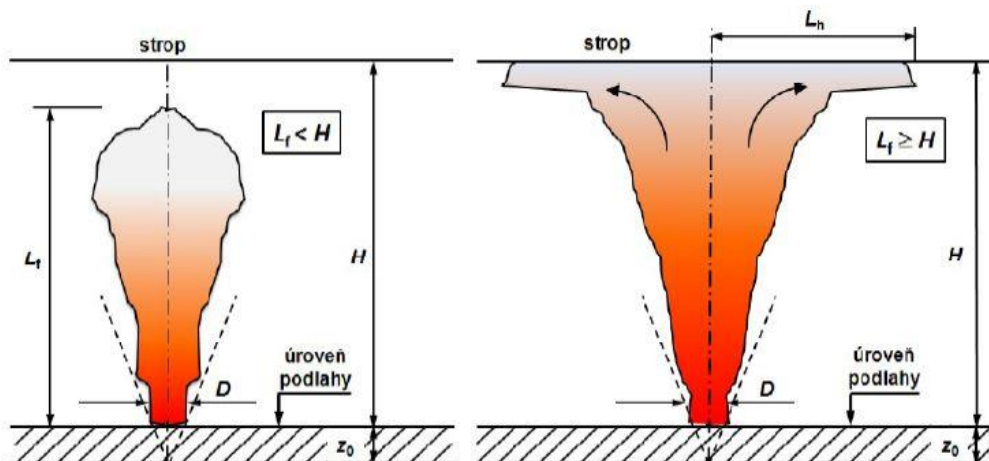


Obr. 4 Dvou zónový model požáru [8].

Fyzikální veličiny jako jsou vlastnosti stěn a otvory nejsou soustředěny do jednoho parametru jako je tomu u parametrických modelů požáru. Naopak každý otvor může být prezentován jednotlivě a každá zeď může mít definované vlastní tepelné technické vlastnosti. Vývoj teploty není předepisován předem určenou rovnicí, ale je výsledkem časové integrace diferenciálních rovnic založených na základě zachování hmoty a energie v jednotlivých zónách. Použití takových modelů tedy vyžaduje využití numerického počítačového softwaru [9].

2.2.2 Lokální požár

Lokální požár reprezentuje situaci, kdy je flashover efekt nepravděpodobný a je předpokládáno nerovnoměrné teplotní pole v prostoru. Z hlediska rozvoje a šíření plamene rozlišujeme případy, kdy plamen nezasahuje strop (Heskestad model), a když plamen strop zasahuje (Hasemi model), viz obr. 5.



Obr. 5 Plameny při požáru v uzavřeném prostoru [10].

Metodikou výpočtu podle [3] je teplotní nárůst osy Fire Plume¹ a tepelný tok dopadající na povrch konstrukce nebo přímo tepelný tok dopadající na povrch konstrukce. Výpočetní metoda je založena na předpokladu, že do rozvíjejícího se sloupce kouřových plynů dochází k přísávání okolního vzduchu. V reálných situacích, při požárech v uzavřených prostorech, dochází ve většině případů ke vzniku vrstvy kouře pod stropní konstrukcí a tím je ovlivněna osová teplota. Výsledné hodnoty osy Fire Plume bez nebo se zohledněním horké vrstvy plynů se mohou zásadně lišit a výsledku výpočtu podle [3] mohou být velmi poddimenzované [4].

2.2.3 CFD modelování

Díky implementaci metod tzv. performance-based přístupu, neboli požárního inženýrství, do systému řešení a prokazování požární bezpečnosti staveb je možné zejména u atypických případů staveb velkého rozsahu postupovat odlišným způsobem, než který je stanoven v návaznosti na právní předpisy v české technické normě. Při odlišném postupu se může užít přesnějších výpočtových metod analyzujících podrobněji podmínky posuzovaného objektu po

¹ Požár je doprovázen vznikem a rozvojem sloupce kouřových plynů. Tento jev se obecně označuje jako Fire Plume.

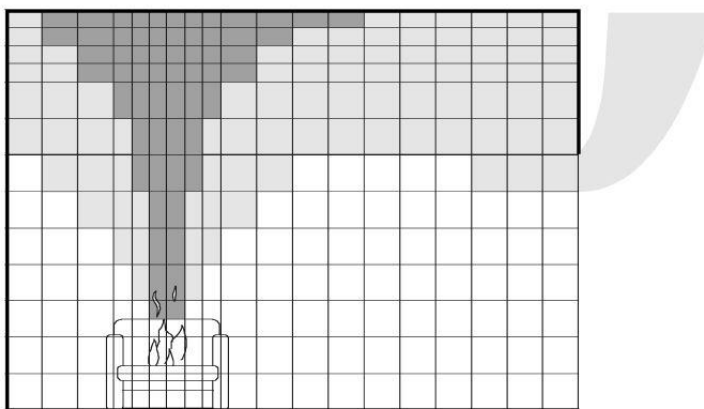
vzniku požáru, zejména intenzitu požáru, jeho šíření a šíření zplodin hoření, podmínky evakuace a zásahu s ohledem na užívání a provoz objektu [4].

Modely CFD (Computational Fluid Dynamics) implementují principy dynamického proudění tekutin. V případě požáru tekutinu reprezentuje dynamicky proudící směs vzduchu, kouře a plyných zplodin hoření, jejichž pohyb je iniciován tepelným účinkem požáru [11].

Požární model CFD pracuje na podobném principu jako zónové modely, a to na rozdělení výpočetní oblasti do zón neboli kontrolních objemů, jak je znázorněno na obrázku 6 níže. V CFD modelech je oblast rozdělena do velkého počtu 3D kontrolních objemů (buněk) vytvářejících výpočtovou síť. Pro každou buňku jsou pak řešeny stavové rovnice, rovnice zachování energie, hmoty a rovnice zachování hybnosti. Jedná se o řešení pomocí Navier-Stokesových rovnic. CFD umožňuje simulovat celou řadu reálných scénářů a teoreticky může simulovat kteroukoliv fyzikální podmínku. Samotný model sám o sobě neřeší proces hoření, tento jev je obsažen v samostatném submodelu požáru, který doplňuje základní model CFD.

Základní rozdělení modelu CFD [11]:

- Preprocesor (např. Pyrosim), definuje geometrii řešeného prostoru, velikost výpočetní sítě a okrajové podmínky jako jsou materiály jednotlivých konstrukcí.
- Řešič (např. FDS), kde dochází k řešení rovnic.
- Postprocesor (např. Smokeview), umožňuje grafické zobrazení vstupních a výstupních dat.



Obr. 6 Základní princip CFD modelu [8].

K simulaci požáru v budovách se nejčastěji používá software FDS (Fire Dynamics Simulator), vyvinutý odborným týmem organizace NIST (National Institute of Standards and

Technology) ve spolupráci s technickým výzkumným institutem VTT ve Finsku a dalšími partnery. První verze byla zveřejněna v roce 2000, dnes je dostupná už šestá verze programu (FDS 6). Software je zaměřen na řešení požárních situací, které mohou nastat v praxi bez nutnosti provedení experimentů. Velkou výhodou tohoto programu je jeho nekomerční bezplatná dostupnost. Mezi vstupní parametry patří informace o geometrii prostoru, výpočetní síti, materiálových vlastnostech a kinetice hoření. FDS je řešič, který čte vstupní parametry z textového souboru, řeší matematické algoritmy a následně zapisuje výstupní data specifikovaná uživatelem. Počítá teploty, tlak, rychlost, hustotu a chemické složení uvnitř jednotlivé výpočetní buňky. A navíc umožňuje sledovat teplotu povrchu, tepelný tok, teplotu plynu, viditelnost a další parametry.

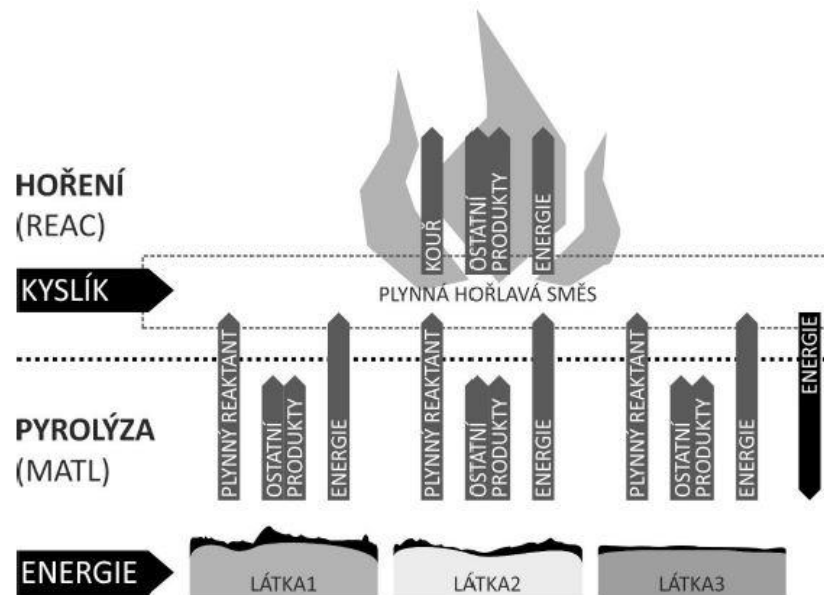
V požárním inženýrství existuje několik adaptací CFD modelu. Každá z nich využívá odlišný přístup k vývoji submodelů, které popisují děje hoření.

- Submodel turbulentního proudění
- Submodel sdílení tepla
- Submodel procesu hoření

Hydrodynamický model (turbulence) charakterizuje turbulentní proudění tekutiny pomocí vírů o různé velikosti a umožňuje tak modelování ve dvou základních technik. Jedná se o přímou numerickou simulaci DNS (Direct Numerical Simulation) nebo simulaci velkých vírů LES (Large Eddy Simulation). Simulace LES řeší rovnice pro střední rychlosti, ale i pro složitější turbulentní víry. Doplnuje tak nedostatky jiných metod. Ve výpočtech zohledňuje víry, které mají svou velikostí největší význam z hlediska přesnosti řešených rovnic a zanedbává jemné vírové struktury. Metoda DNS řeší rovnice proudění bez jakýkoliv modifikací či zjednodušení a vyžaduje jemnou výpočetní síť o velikosti buněk okolo 1 mm. Simulace je využitelná velmi omezeně pro svou numerickou a hlavně časovou náročnost. Program FDS tak využívá defaultně nastavenou metodiku LES.

Proces radiace je založený na řešení složitých diferenciálních rovnic. Záření (radiace) představuje přenos elektromagnetické energie ve formě vln s příčným kmitáním vzhledem ke směru jejich šíření prostorem. Do modelu vstupuje více navzájem závislých parametrů, například chemické složení zplodin hoření, radiační vlastnosti (např. pohltivost, emisivita), vlnová délka aj. FDS počítá podle zadaného radiačního podílu mezi počtem radiačních paprsků a uvolněným teplem radiací [12].

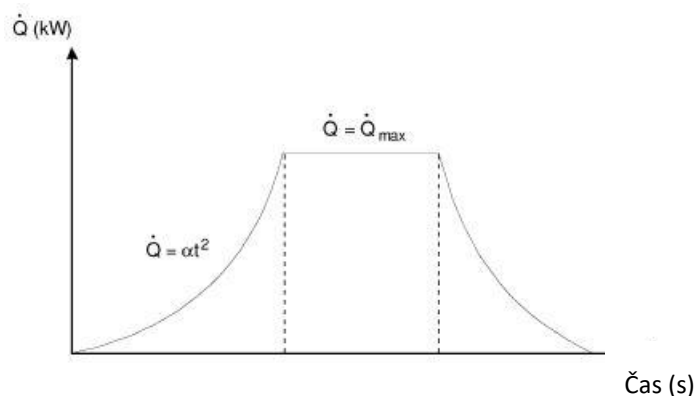
Během modelování procesu hoření je nutné rozeznávat dvě různé fáze: pyrolýzu (zdroj plynu), který následně vstoupí do reakce, a samotné hoření plynné části. Pyrolýza představuje tepelný rozklad povrchu paliva za vysokých teplot, během kterého dochází k přechodu paliva na plynnou fázi, viz obr.7. Hoření je reakce plynů z paliva s kyslíkem. FDS dokáže počítat pouze s jednou reakcí v simulaci, tzn. hoření jen jedné plynné látky. Lze zvolit reakci z vlastní databáze FDS nebo definovat novou reakci pomocí jejího chemického složení, které je vyjádřeno počty atomů uhlíku, vodíku, kyslíku a dusíku.



Obr. 7 Schématické zobrazení procesu pyrolýzy a procesu hoření [11].

Jednodušší popis hoření lze zadat definovaným tepelným výkonem zdroje požáru na určitou plochu. Zápis HRRPUA (kW/m^2) vytvoří hořící plochu na povrchu hořáku, na které bude probíhat reakce. Výkon hořáku může být jak konstantní, tak proměnlivý v čase. Software FDS vypočítá množství paliva, které musí být dodáno pro zajištění požadovaného uvolněného tepla. Hodnoty rychlosti uvolněného tepla většinou vychází z experimentálních zkoušek, hodnoty HRR jsou měřeny v kalorimetrech. Tímto způsobem je možné získat hodnoty jednotlivých materiálů (dřevěný obklad, izolant) i celých sestav (obytný pokoj, automobil). Obecně se dosahuje velmi dobré shody mezi výsledky FDS a experimentálními daty v případech, kdy je použit hořák (HRRPUA = Heat Release Rate Per Unit Area). Maximální rychlost uvolněného tepla a jeho vývoj v čase by měl vycházet z analýzy všech možných požárních scénářů v požárním úseku. Jedním z možných způsobů, jak stanovit rychlost uvolňování tepla HRR, je požární experiment. Tato metoda je však značně neekonomická, proto je vhodnější použít údaje z již provedených testů. Nejjednodušší předpověď rychlosti uvolňování tepla je založena na idealizované křivce,

zahrnující fázi hoření, fázi ustáleného stavu a fázi chlazení. Takový zjednodušený model může být použit jako první odhad při výpočtu vlivu požáru. Zjednodušená HRR křivka může být považována za t-kvadratický požár, který je zobrazený na obr. 8.



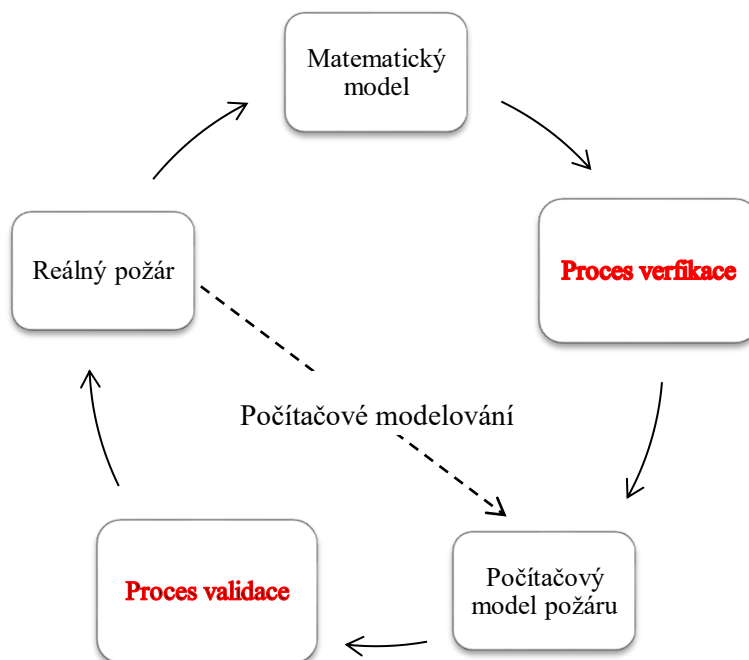
Obr. 8 Průběh t-kvadratického požáru [8].

2.2.4 Problematika aplikovatelnosti požárních modelů

Počítačové programy využívající zónové a CFD modely (modely typu pole) mají v praxi omezenou použitelnost, kterou je třeba brát v úvahu [11]. Limitujícími faktory jsou verifikace a validace požárního modelu. Jedná se o postupy, které standardně slouží k hodnocení vědecké metody, hypotézy, teorie či modelu.

V procesu verifikace se ověřuje základní předpoklad programu, a to správnost a přesnost implementovaných matematických rovnic. Velké množství výpočtů se řídí algoritmy, které nemusí být přesné a může tím docházet k chybám. Proto je verifikace složitý proces “vyladování”.

Dalším limitujícím faktorem je validace. Jejím úkolem je porovnávání výsledků požárního modelu s údaji získanými během reálných požárních zkoušek. Validací se určuje míra shody mezi počítačovou predikcí a fyzikálním modelem a tím umožňuje upravit model do podoby, kdy jsou výsledky akceptovatelné. Celý proces je ale finančně a časově náročný, dnes existuje velká databáze validačních studií pro požární programy. Např. software FDS disponuje mnoha vlastními validačními a verifikačními příklady. Schéma na obr. 10 graficky znázorňuje proces verifikace a validace [12].



Obr. 9 Schéma procesu počítačového modelování požáru.

Nutno podotknout, že v případě validace i verifikace se jedná o důležité postupy, které neposkytují pouze základní informaci, hodnocení modelu, metody či hypotézy, ale jsou i základem k dalšímu vývoji a zdokonalování programu, čímž zvyšují i jeho užitnou hodnotu.

2.3 Případové studie

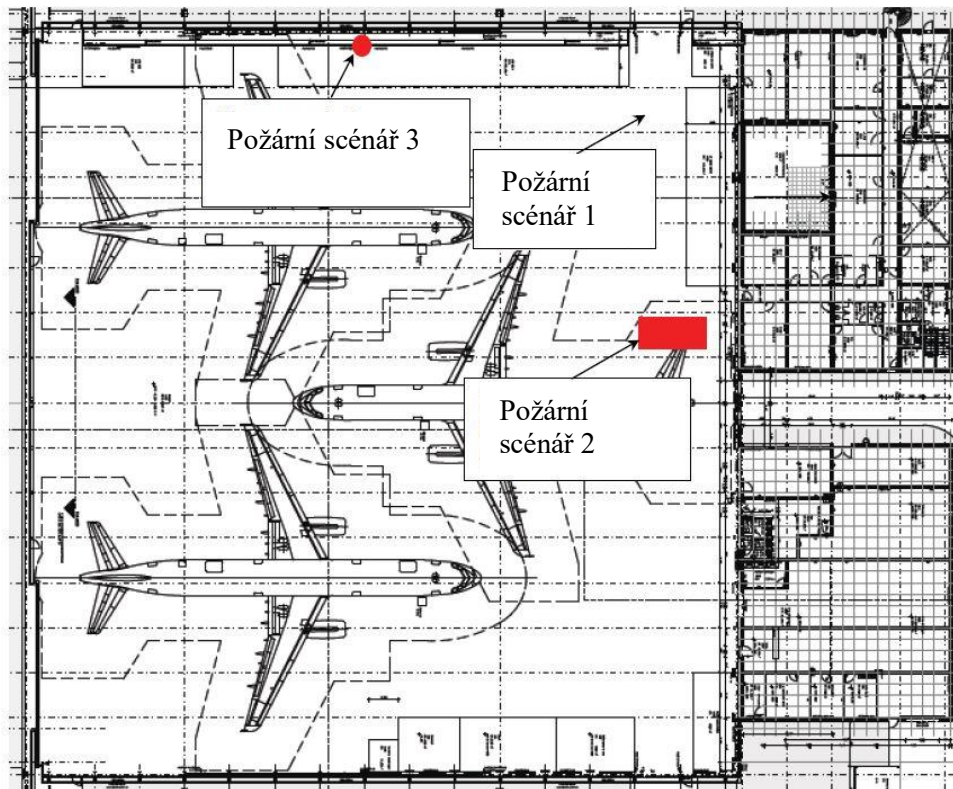
2.3.1 Aplikace požárního inženýrství v hangáru v Berlíně

V nově vybudovaných prostorách berlínského letiště byla inženýry zkoumána možnost neaplikování požárního nátěru na nosnou ocelovou konstrukci v jednom z hangárů pro linkovou údržbu. Hangár o vnějších rozměrech 83,4 m x 77,6 m a vnitřní výškou 18,1 m byl navržen na základě německých směrnic pro průmyslové stavby. První cíl, který je potřeba splnit, je zajištění dostatečné únosnosti ocelové konstrukce v případě požáru. Pro objekty s rozlohou větší než 1600 m² je mimo jiné nutné zajistit možnost úspěšného hašení požáru. V Německu je těchto cílů dosaženo v případě, že výška kouřové vrstvy neklesne pod 2,5 m nad úroveň podlahy. V případě hangáru, je ale tento požadavek přísnější. Pro účinné hašení požáru musí být alespoň rozpoznatelný trup zaparkovaného letadla a musí být mimo kouřovou vrstvu, tzn., že musí být zajištěno, aby vrstva kouře neklesla pod horní okraj nejvyššího letadla v hangáru. Například Boeing 747 dosahuje výšky v horní části kabiny 10 m, minimální výška kouřové vrstvy je tedy

10 m. Dalším kritériem, které nesmí být překročeno je optická hustota kouře jejíž hodnota nesmí překročit hodnotu $0,15 \text{ m}^{-1}$.

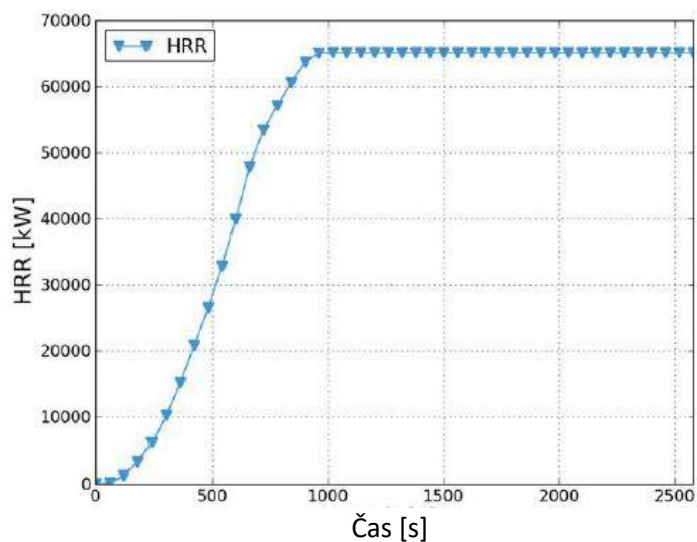
Nejpravděpodobnější zdroj požáru je Boeing 747. Celkem byly uvažovány 3 požární scénáře, jak je vyobrazeno na obr. 10.

- První scénář demonstruje požár letadla (hoří kabina a části křídel letadla). Aby byla ověřena únosnost bylo nutné umístit zdroj požáru co nejbližší k nosné konstrukci střechy. Navíc, lze tímto požárním scénářem ověřit výšku kouřové vrstvy pro úspěšný zásah hasičů.
- Další požární scénář je požár na horní palubě letadla (bez účasti křídel).
- Poslední je lokální požár technického zařízení v blízkosti nosného sloupu. Kvůli rozpětí křídel letadel a stanovené bezpečnostnímu odstupu mezi letadly nebude zdroj hoření v prvních dvou scénářích v blízkosti nosných sloupů. Nelze vyloučit varianta, že by hořelo pouze letadlo, v hangáru se vyskytuje mimo jiné i různé technické vybavení a dočasně je zde skladováno zboží, které letadla převáží.

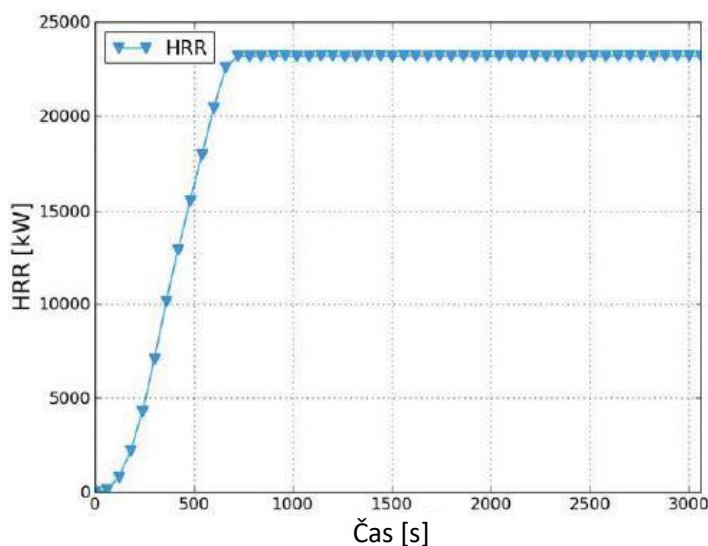


Obr. 10 Půdorys hangáru s vyznačenými zdroji požáru [13].

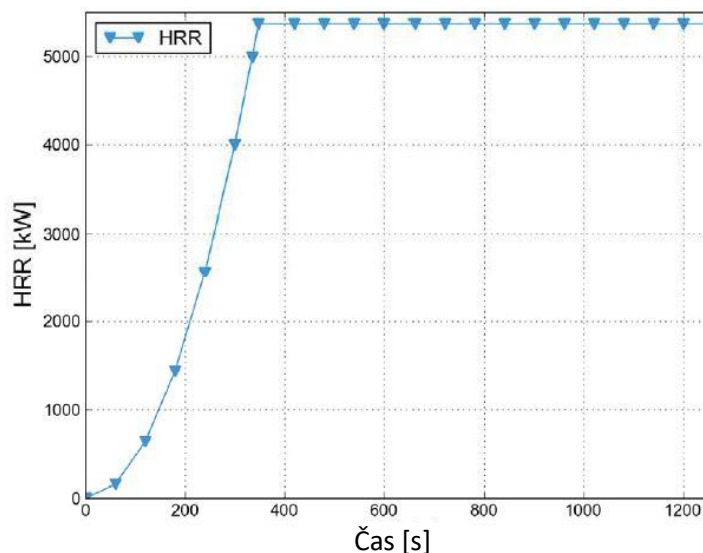
Projektanti při modelování vycházeli z předpokladu, že po vyčerpání požárního zatížení požár nezhasne, ale zůstane při maximální rychlosti uvolněného tepla. Proto není důležité množství požárního zatížení, ale samotné chování požáru. Ve všech požární scénářích nebylo uvažováno použití žádného požárně bezpečnostního zařízení. Hodnoty HRR jsou uvažovány konzervativně jako t-kvadratický požár podle německého eurokódu DIN EN 1991-1-2. Na obr. 11, 12 a 13 jsou vyobrazeny křivky HRR pro jednotlivé požární scénáře.



Obr. 11 Křivka HRR pro 1 požární scénář (požár letadla) [13].



Obr. 12 Křivka HRR pro 2 požární scénář (požár na horní palubě letadla) [13].



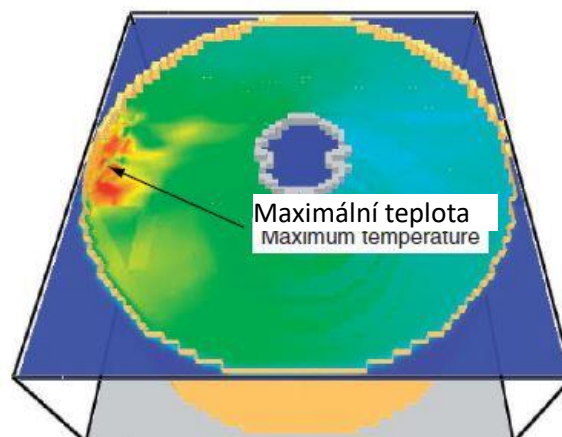
Obr. 13 Křivka HRR pro 3 požární scénář (lokální požár) [13].

Popsaná případová studie byla základem simulací s cílem odvodit časové a prostorové rozložení teploty v hangáru a sloužila jako vstup do návrhů požární bezpečnosti Eurokódu 3 části 1-2. [13]

2.3.2 Olympijské hry v Pekingu 2008

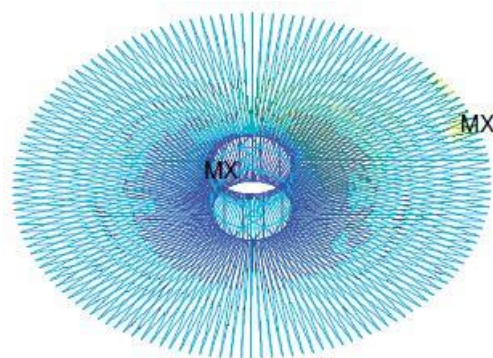
Jako jedna z případových studií požárního inženýrství byla i tělocvična pro Letní Olympijské hry v Pekingu v roce 2008. Kruhová tělocvična velkého rozpětí pokrývá 12 000 m² a je celkové výšky 36,5 m. Střešní konstrukce je tvořena radiálně prutými předpjatými táhly, které jsou po obvodě kotveny do betonových vazníků a sloupů.

Studie je zaměřena pouze na chování ocelových částí za požáru, vzhledem k horším vlastnostem oceli za zvýšené teploty než je tomu u betonových konstrukcí. Zdroj požáru je proto umístěn v nejvyšším bodě auditoria, kde je ocelová konstrukce nejvíce namáhána. Maximální požární zatížení je stanoveno na 8MW a vychází z požárních experimentů pohovek a polyamidových židlí na tribuně. V modelu nejsou zohledněny žádné požárně bezpečnostní zařízení. Křivka rychlosti uvolněného tepla vychází z t-kvadratického požáru. Nejvyšší teploty 298,58 °C bylo dosaženo v 1134 sekundě. Obrázek 14 reprezentuje nerovnoměrné teplotní pole v tělocvičně při nejvyšší dosažené teplotě.

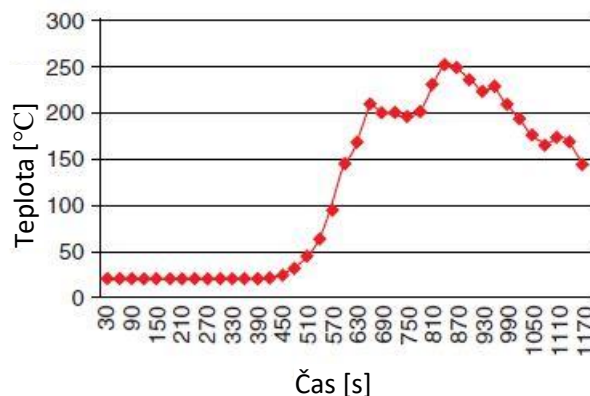


Obr. 14 Rozložení teplot v objektu v 1134 sekundě [14].

Cílem celé simulace bylo zhodnocení potřeby protipožární ochrany pro nosné části konstrukce a bere v úvahu i časové požadavky na bezpečnou evakuaci osob. Proto bylo důležité znát skutečné tepelné účinky na konstrukce a na základě výsledků z FDS modelu byla provedena analýza přestupu tepla v programu ANSYS. Tento program pracuje na základě metody konečných prvků a umožňuje tak vypočítat rozložení teplotního pole v ocelové konstrukci. Obrázky 15 a 16 srovnává dvě simulace přenosu tepla ocelové střešní konstrukce vystavené různým teplotním podmínkám. Simulace vyobrazená na obr. 15 je založena na reálných podmínkách v tělocvičně, zatímco simulace na obr. 16 je podle normové teplotní křivky. Při srovnání obou teplotních polí lze pozorovat, že teplota v objektu je všude stejná při návrhu podle normové teplotní křivky obr. 16 (a), kde tepelné prostředí zůstává neměnné i přesto, že teplota plynu je závislá na čase. Změna tepelného toku na konstrukci se změnou polohy v prostoru je znatelná na obr. 15 (a). Rozložení teplot v konstrukci je nerovnoměrné, modul pružnosti a mez kluzu klesají v různých rychlostech a vedou tak ke snížení únosnosti. Dochází také ke ztrátě předpětí v táhlech.

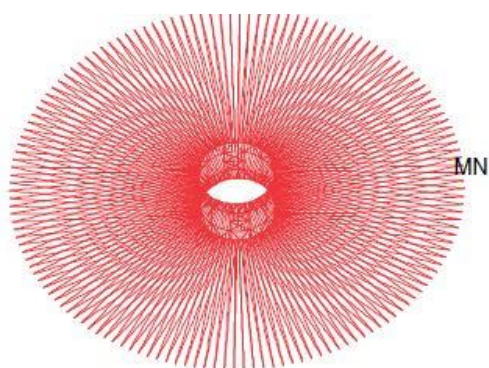


(a)

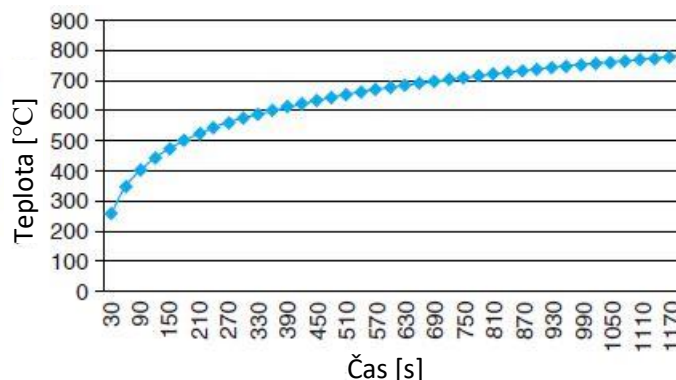


(b)

Obr. 15 Reálný požár: (a) rozložení teplotního pole; (b) teplotní křivka pro reálný požár [14].



(a)



(b)

Obr. 16 Normový požár: (a) teplotní pole; (b) normová teplotní křivka ISO [14].

Výsledky analýzy ukázaly, že průhyby a ztráta předpětí byly mnohem menší při působení reálného požáru a nedošlo ke kolapsu konstrukce, jako tomu bylo v případě normové teplotní křivky. Simulace také poskytly informaci, že prvky vzdálené od zdroje požáru jsou významně namáhány díky distribuci napětí a nerovnoměrnému teplotnímu poli. Předpoklad, že prvky, které jsou mimo zónu tepelného účinku požáru, nejsou ohroženy, je nesprávný a tyto prvky by měly být brány v úvahu při analýze. Studie tak poukazuje na skutečnost, že detailnější analýza celého objektu umožňuje realističtější a racionálnější řešení požární bezpečnosti než je tomu při řešení podle standardní křivky ISO, která nabízí značně konzervativní řešení. V některých případech, ale nemusí být normativní řešení dostatečně bezpečné [14].

3 Numerické modely v FDS

Numerický model haly vychází z původní verze numerického modelu od Ing. Nikoly Liškové vytvořeného pro experimentální studii v rámci projektu RFCS STABFI [15]. Model haly je vytvořen v softwaru FDS verze 6.6.0. Jako vizualizační program je použit postprocessor Smokeview verze 6.6.3. Vizualizačnímu programu Smokeview umožňuje nejen přehrávat průběh simulace, ale dovoluje také zobrazovat sledované části modelu, jako jsou plameny, kouř, nebo teplotní a rychlostní pole [11]. Díky SMV je možné vykreslit barevné ISO plochy v různých půdorysných a řezových rovinách. Obecné charakteristice softwaru FDS je věnována samostatná kapitola 2.2.3.

V halových objektech je důležité, aby při požáru nebyla narušena stabilita nosné konstrukce haly po požadované dobu a aby všechny osoby mohly včas prostor opustit. Navíc musí být zajištěna funkčnost důležitých technologických zařízení a zamezení šíření požáru na okolní objekty. Šíření požáru v hale zabraňují nejen požárně dělící konstrukce, ale i řada požárně bezpečnostní zařízení. V normě [16] upravující požární bezpečnost skladů jsou stanoveny základní podmínky pro instalaci těchto zařízení. Velké halové objekty musejí být vybaveny elektrickou požární signalizací, v některých případech i samočinným hasicím zařízením a zařízením pro odvod tepla a plynných zplodin hoření. Tato zařízení se instalují v závislosti na posouzení mezní velikosti požárních úseků. V případě modelované haly není uvažováno žádné požárně bezpečnostní zařízení, aby bylo dosaženo nejvíce nepříznivých podmínek.

3.1 Geometrie numerického modelu

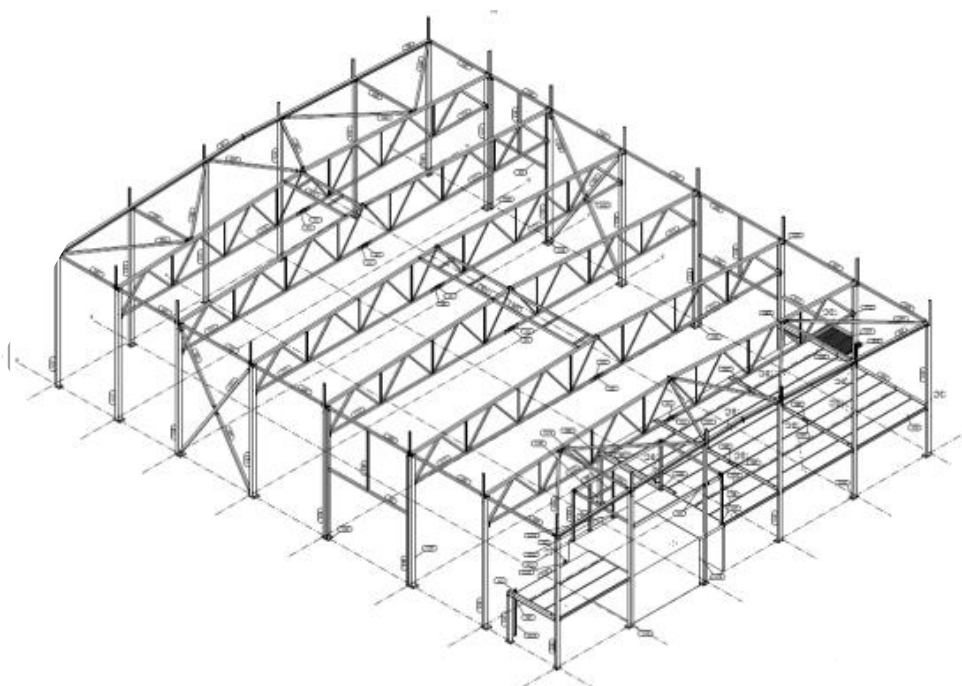
V rámci případové studie je vytvořeno více návrhových požárních scénářů. Pro každý experiment je vytvořen samostatný zdrojový kód, protože modelování v softwaru FDS neumožňuje vytvořit více případů v rámci jedné simulace. Jednotlivé modely se od sebe velmi neliší, jsou pouze přidány nebo odebrány zdroje hoření a upraveny ventilační podmínky. Rozměry haly vychází z původního projektu RFCS STABFI, tento typ konstrukcí se velmi často používá pro výrobní i nevýrobní typy objektů jako jsou supermarkety, dílny nebo sportovní haly.

Základní geometrie modelu je určena ze zvolené výpočetní sítě 46,0 m x 36,0 m x 15,0 m a odpovídá tak velikosti konstrukce pro simulaci plus 5 m odsazení ve směru všech os. Odsazení umožňuje sledovat vyměňené procesy s okolním prostředím. V modelu je nastavena hrubší síť

s velikostí kontrolního objemu 1000^3 mm. V místě zdroje požáru je výpočetní síť zjemněna. Snížením počtu kontrolních objemů by způsobilo nárůst potřebné doby na výpočet.

Obrázek 17 znázorňuje schéma halového objektu. Celkové rozměry jsou:

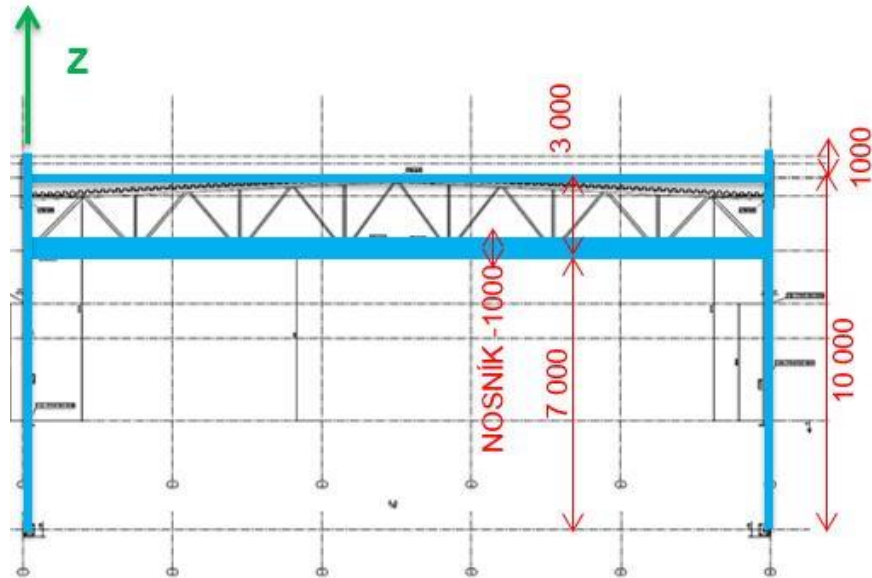
- Délka: 41 m
- Šířka: 31 m
- Výška: 10 m
- Počet nosníků: 6
- Výška nosníků: 3 m



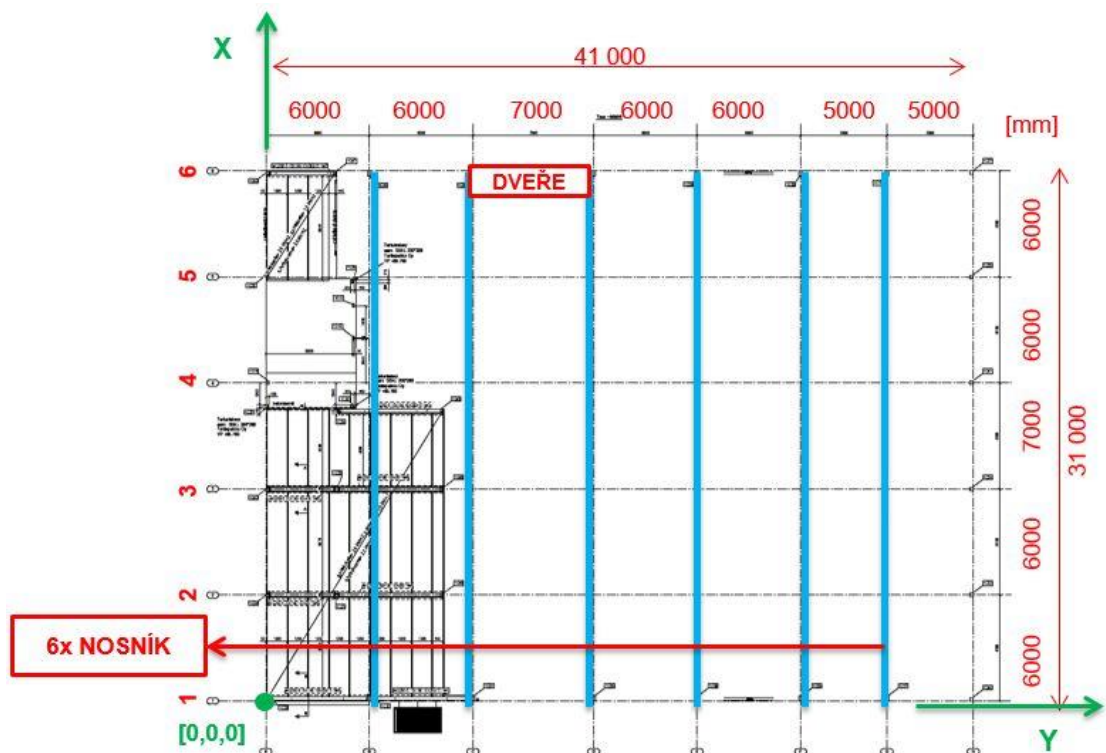
Obr. 17 Schématický pohled na halu Ruukki Express [15].

FDS model je oproti realitě trochu zjednodušen, protože čím je model detailnější tím je výpočet časově náročnější. Původní příhradový vazník by bylo velmi složité v softwaru modelovat, proto je namodelována jen spodní pásnice o celkové výšce 1 m. Jednotlivé nosníky tak v modelu simulují tenké překážky pro proudění horkých plynů. Rozpon ocelových nosníků je 6 m a 7 m. Ze svislých konstrukcí nebyly modelovány ani jednotlivé sloupky. Pro sledování vlivu teploty na svislé konstrukce jsou v blízkosti původních sloupů umístěny termočlánky. Okenní otvory ve stěnách byly pro účely případové studie zanedbány. Obecně otvory v požárních stěnách a v požárních stropích musí být požárně uzavíratelné podle normy ČSN 73 0802.

Požární uzávěry musí být v případě požáru uzavřeny a nebo musí mít uzavírací mechanismus (samoavírač). Pro účely simulace je ale uvažován vždy jeden otevřený otvor, a to dveře o rozměrech 5 m x 3 m umístěné v dlouhé stěně ve vzdálenosti 12 m od kraje. Obrázky 18 a 19 ukazují idealizaci průřezu. Mezi nosníky a střešou tak vzniká 2 m vysoká mezera. Rozměry všech prvků jsou v souladu s vybranou velikostí výpočetní sítě.



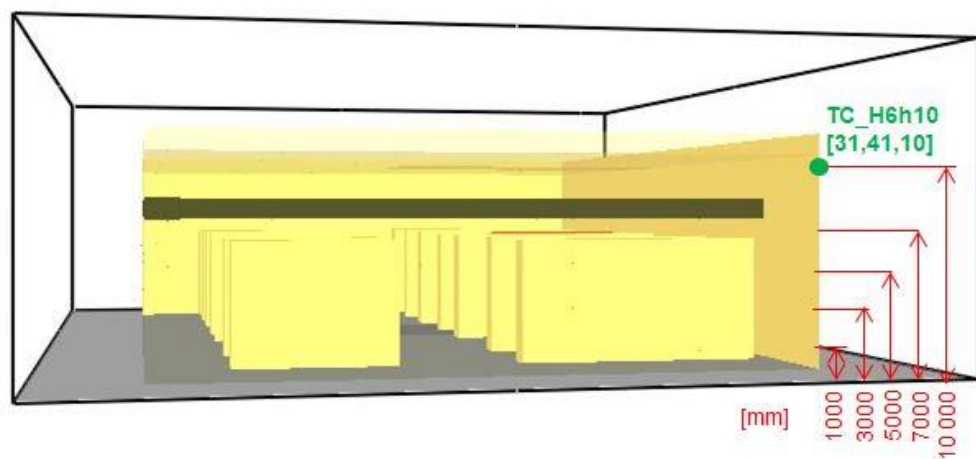
Obr. 18 Idealizovaný řez haly pro FDS model.



Obr. 19 Idealizovaný půdorys pro FDS model.

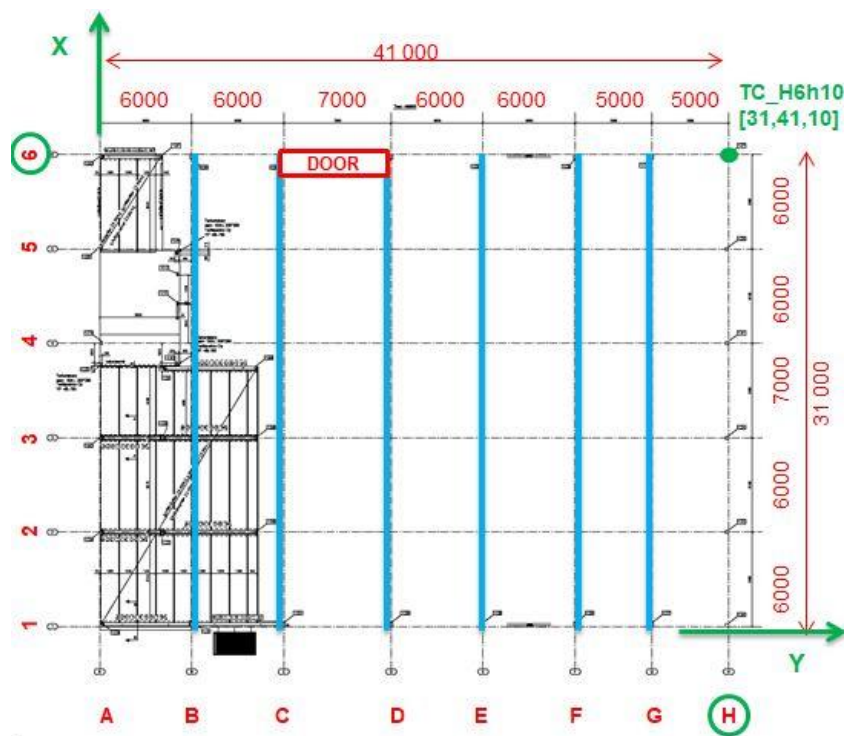
Kromě zdroje požáru jsou v hale umístěny i dvě řady palet. Základní geometrie palet je 1 m x 4 x 6 m, v jedné řadě jsou umístěny dvě vedle sebe a ve druhé řadě tři vedle sebe. Jednotlivé palety jsou od sebe v řadě vzdáleny 5 m. Celkem 7 regálů v každé řadě slouží v prostoru jako překážky pro proudění horkých plynů. V normě upravující požární bezpečnost skladů lze stanovit mezní skladovací výška podle tab. 1 [16]. Skladovací výška závisí na skupině provozu skladu. V tomto případě jsou všechny regály modelované do výšky 6 m, mezi regály a spodní hranou nosníků tak vzniká mezera 1 m.

Jedním ze sledovaných parametrů bude rozložení teplotního pole pod ocelovými vazníky. Měření teploty plynu v numerickém modelu je v softwaru FDS možné několika způsoby. Může se měřit teplota na konstrukci s vlivem přestupu tepla nebo teplota v prostoru. V simulaci je sledována pouze teplota plynu pomocí plášťových termočlánků (THERMOCOUPLE), které jsou v hale instalovány hned v několika polohách, aby bylo možné sledovat průběh teploty ve více výškových a řezových rovinách. Senzory mají nastavený stejný průměr 2 mm a vlastnosti materiálu Inconel 600, jako je hustota 8470 kg/m^3 a měrná tepelná kapacita $0,444 \text{ kJ/(kg.K)}$. Termočlánků je v prostoru celkem 153 a jsou na každé ose umístěny ve výškách 1 m, 3 m, 5 m, 7 m a 10 m od podlahy, viz obrázek 20.



Obr. 20 Umístění termočlánků po výšce.

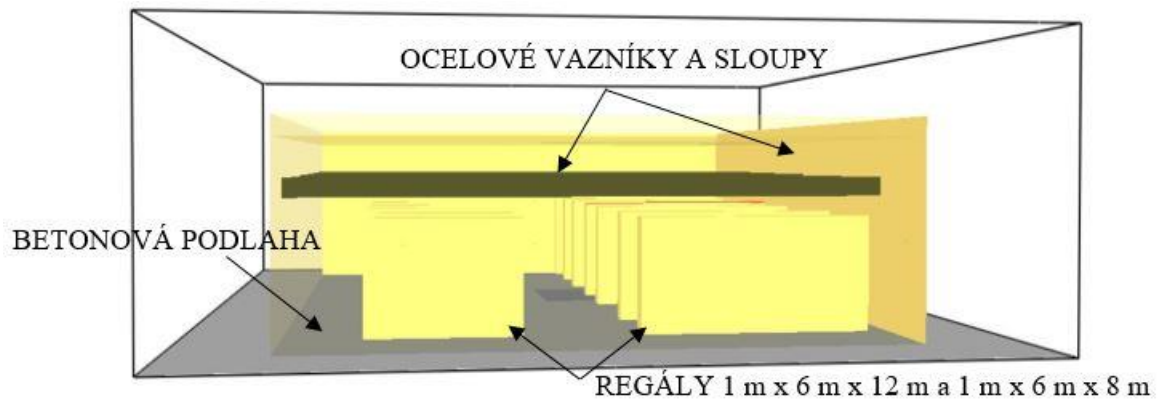
Jednotlivé senzory na měření teploty jsou ve zdrojovém kódu označeny např. TC_H6h10, popis termočlánků odpovídá písmenům a číslům podle názvu os znázorněných na obr. 21, H6 popisuje půdorysnou polohu termočlánku, h10 značí výšku senzoru nad podlahou, TC označuje, že se jedná o termočlánek (THERMOCOUPLE).



Obr. 21 Umístění termočlánků v půdorysu.

3.2 Materiály

Specifikace materiálů patří mezi citlivé vstupní parametry, které mohou významně ovlivnit průběh simulace. Při modelování konstrukcí je nutné definovat použité materiály zadáním tepelně a požárně-technických vlastností. Software FDS je schopen modelovat velikosti jednotlivých konstrukcí podle nastavené jemnosti výpočetní sítě a velikost kontrolních objemů. Vybraná síť s velikostí kontrolního objemu 1000^3 mm umožňuje fyzicky modelovat konstrukce pouze v tomto modulu. Aby bylo možné počítat detailněji i při hrubé výpočetní síti, lze definovat “virtuální“ tloušťku, která se promítne pouze ve výpočtu prostupu tepla a mohou být tedy zadány skutečné tloušťky konstrukcí [11]. Na obr. 22 je grafické zobrazení geometrie numerického modelu v softwarovém nástroji SMV.



Obr. 22 FDS model haly ve Smokeview.

Nosné konstrukce stěn, střechy a nosníků jsou v numerickém modelu jako ocelové, podlaha je betonová. Vzhledem k tomu, že na řešený objekt nebyla provedena žádná experimentální studie, jsou údaje všech materiálů převzaty z literatury. V tabulce 1 jsou uvedeny použité materiály a jejich tepelně technické vlastnosti při teplotě 20 °C.

tab. 1 Tepelně technické vlastnosti použitých materiálů.

OCEL			BETON		
<i>Součinitel tepelné vodivosti λ</i>	45,8	[W/m.K]	<i>Součinitel tepelné vodivosti λ</i>	1,74	[W/m.K]
<i>Měrná tepelná kapacita c</i>	1,02	[kJ/kg.K]	<i>Měrná tepelná kapacita c</i>	0,46	[kJ/kg.K]
<i>Objemová hmotnost ρ</i>	7800	[kg/m ³]	<i>Objemová hmotnost ρ</i>	2500	[kg/m ³]
<i>Poznámka: Tepelné vlastnosti jsou převzaty z ČSN EN 1992-1-2 a ČSN EN 1993-1-2</i>					

3.3 Výpočetní síť

Rozměry rastru výpočetní sítě patří mezi jeden z nejdůležitějších parametrů, které je třeba brát v úvahu při sestavování numerického modelu. Během simulace vychází software FDS ze zákonů zachování hmoty, hybnosti a energie, a to na úrovni zvolených kontrolních objemů. Program FDS je založen na aproximacích druhého řádu časových derivací podle Navier-Stokesových rovnic a z tohoto důvodu může vzniknout chyba jako důsledek parciálních derivací, úměrná druhé mocnině časového kroku nebo velikosti kontrolní buňky. Zmenšením velikosti kontrolního objemu na polovinu se velikost možné chyby teoreticky sníží na čtvrtinu, ale potřebný výpočetní čas vzroste přibližně 16x. Při volbě jemnosti výpočetní sítě je tedy velmi důležité odhadnout, do jaké míry dokáže přesnost výsledků vyvážit náklady spojené s dobou na výpočet [11].

Jemnost výpočetní sítě lze stanovit na základě poměru charakteristického průměru požáru D^* a velikosti výpočetní buňky δx . Čím menší je průměr požáru, tím menší by měla být velikost výpočetní buňky, aby bylo dostatečně vyřešit dynamiku proudění tekutin. Dnes lze velmi jednoduše využít online kalkulačtor na webových stránkách <https://www.utfireresearch.com/fds-mesh>, kde po zadání geometrie celé výpočetní oblasti a tepelného výkonu požáru jsou navrženy různé velikosti výpočetní sítě pro hrubou, střední a jemnou síť ($D^*/\delta x = 4; 10; 16$). Zjištění požadované jemnosti sítě je určeno na základě rovnice:

$$\frac{D^*}{\delta x} = \frac{\left(\frac{Q}{\rho_{\infty} \cdot c_p \cdot T_{\infty} \cdot \sqrt{g}}\right)^{2/5}}{\delta x} \quad (3.3.4)$$

kde	D^*	charakteristický průměr požáru	[m]
	Q	rychlost uvolněného tepla	[kW]
	ρ_{∞}	hustota okolního vzduchu	[kg/m ³]
	c_p	měrná tepelná kapacita vzduchu	[kJ/kg/K]
	T_{∞}	teplota okolního vzduchu	[K]
	g	gravitační zrychlení	[m/s ²]
	δx	velikost kontrolní objemu, tj. délka strany krychle	[m]

V modelovaném požárním úseku musí velikosti výpočetní sítě odpovídat numerického modelu. Tento fakt obvykle vede ke značnému zjednodušení původního objektu. Například v této případové studii došlo k zjednodušení příhradového vazníku a zanedbání svislých nosných konstrukcí. Provedení jakékoliv modifikace by však mělo být pečlivě promyšleno. Jak už bylo uvedeno, zjednodušení geometrie úzce souvisí s velikostí výpočetních buněk. Zmenšením velikosti jednoho kontrolního objemu na polovinu, ale mnohonásobně vzroste potřebný výpočetní čas. Proto by měl být proveden kompromis mezi velikostí buněk a geometrií objektu. Při volbě jemnosti výpočetní sítě je tedy velmi důležité odhadnout, do jaké míry dokáže přesnost výsledků vyvážit náklady spojené s dobou na výpočet.

V diplomové práci byla počátku modelování zvolena hrubší síť 1000³ mm, aby bylo jednodušší ověřit správnost modelu. Vzhledem k velikosti modelované haly se použila jemnější síť pouze v okolí zdroje požáru. Porovnávány byly sítě o velikosti kontrolních objemů 500³ mm, 250³ mm a 100³ mm. V kapitole 5 této práce jsou popsány výsledky analýzy citlivosti sítě.

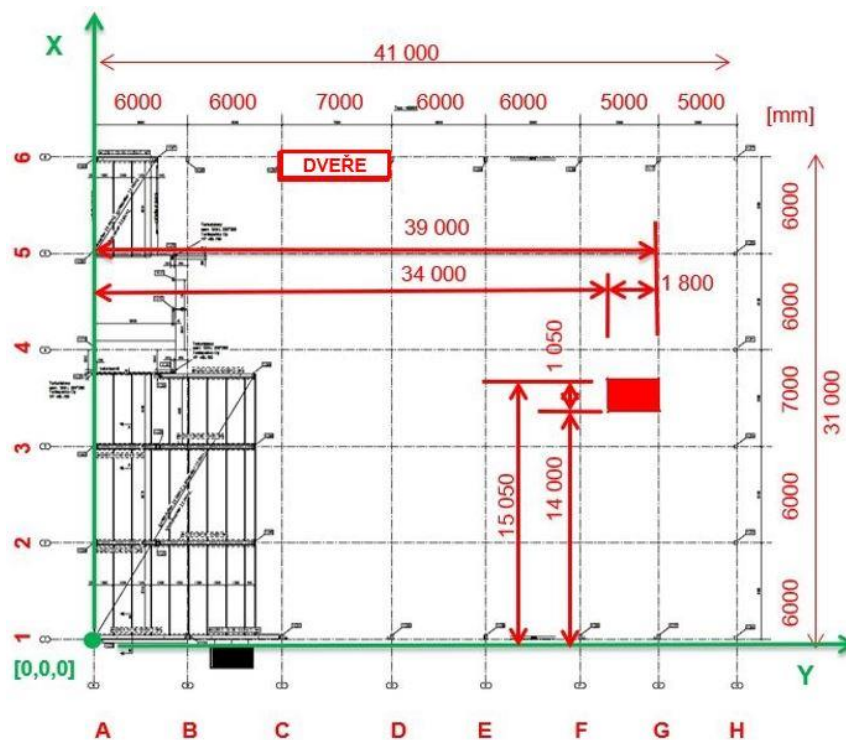
3.4 Požární scénář

Požární scénář je popis průběhu konkrétního požáru v daném čase a prostoru. Obecně jej lze definovat jako popis časového průběhu požáru, který je ovlivněn mnoha faktory, jako je prostředí, požárně bezpečnostní zařízení, chování osob apod. Požární scénář představuje oblast potencionální požární hrozby. V diplomové práci byl zvolen požární scénář tak, aby pokryl všechny reálné případy vzniku požáru v jednopodlažní halové budově. Pro numerickou analýzu v rámci této práce bylo vybráno několik variant rozvoje požáru a současně s dostatečně velkou pravděpodobností vzniku požáru, odvíjejících se od přesného účelu a využití daného objektu. V projektové praxi je možné stanovit nekonečný počet možných požárních scénářů, ale analyzovat všechny možné varianty je neúčelné a často také nereálné. Aby bylo možné definovat požární scénář pro konkrétní prostor musí být určeno požární zatížení a předpokládaný vývoj požáru. Haly tohoto typu se nejčastěji používají pro sportovní účely, kde je malé požární zatížení. Objekt však může být použit pro jiné účely, jako jsou výstavní účely a prodejní plochy jako např. supermarkety nebo pro skladování. V takovém případě může množství požárního zatížení značně vzrůst a počet osob může být v takovém prostoru v řádech stovek nebo dokonce tisíců. Nejúčinnější způsob určení návrhového požárního scénáře je postup stanovující klasifikaci rizika, který zohledňuje jak následky, tak i pravděpodobnosti požáru. Ve výzkumných studiích je uvedeno, že k plně rozvinutému požáru ve velkých prostorách dochází jen zřídka. Požár zůstává spíše lokalizován nebo má tendenci šířit se. Vše závisí na rozložení požárního zatížení.

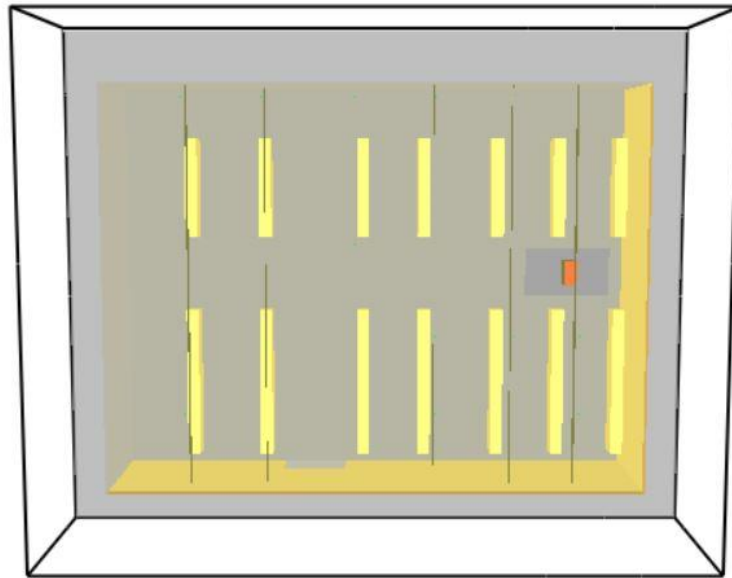
Podle normy [16] je hala uvažována jako jeden požární úsek podle čl. 4.1 pol. d). Vliv na vývoj horkých plynů a jejich teploty má i umístění zdroje požáru, rozložení hořlavých látek a ventilační podmínky, které jsou v řešeném požárním úseku. Otvory umožňují proudění plynů ať už přirozené nebo nucené a jsou klíčovým vstupem při modelování. Typ objektu a jeho vnitřní uspořádání jsou důležité parametry, které velmi výrazně ovlivňují rozhodnutí o druhu ventilace (horizontální x vertikální). Víceúčelová hala je v tomto případě uvažována jako skladová, jednotlivé regály jsou uvažovány jako nehořlavé a simulují tak překážky pro proudění horkých plynů. Umístění jednotlivých regálů a poloha požárního zatížení jsou převzaty z původního modelu od Ing. Nikoly Liškové, kde byl v případové studii zkoumán vliv umístění požárního zatížení na teplotu plynu pod vazníkem [15]. V diplomové práci jsou v požárních scénářích převzaty nejméně příznivé podmínky polohy požáru. Zvláštní pozornost je věnována teplotám plynů, které se nacházejí v blízkosti spodní hrany vazníku, který je přímo nad zdrojem požáru. Výpočetní čas je v každém modelu 3600 s. Počáteční teplota vzduchu je 20 °C.

3.4.1 Požární scénář 1

V každém skladu nebo výrobní hale zpravidla bývá manipulační technika, která zefektivňuje práci v těchto objektech. První požární scénář tak simuluje požár vysokozdvizného vozíku, který je určený pro manipulaci se zbožím ve skladové hale. Vozík o rozměrech 1,8 x 1,05 m a výšce 1,95 m je umístěn uprostřed kratší stěny požárního úseku. Vozík je umístěn v jedné třetině skladové haly, 34 m v delším směru a 14 m od kraje ve směru druhém, viz obr. 23 a 24. V blízkosti požárního zatížení je výpočtová síť zjemněna na velikost jedné buňky o rozměrech 250 mm x 250 mm x 250 mm pro přesnější výsledky. V numerickém modelu jsou také umístěny 2 řady regálů, které jsou uvažovány jako nehořlavé a mají tak simulovat překážky pro proudění horkých plynů v prostoru. Pro účely simulace je uvažován jeden ventilační otvor. A to otevřené dveře o rozměrech 5 m x 3 m umístěné v dlouhé stěně ve vzdálenosti 12 m od kraje.



Obr. 23 Půdorys s okótovaným umístěním zdroje požáru vysokozdvizného vozíku.



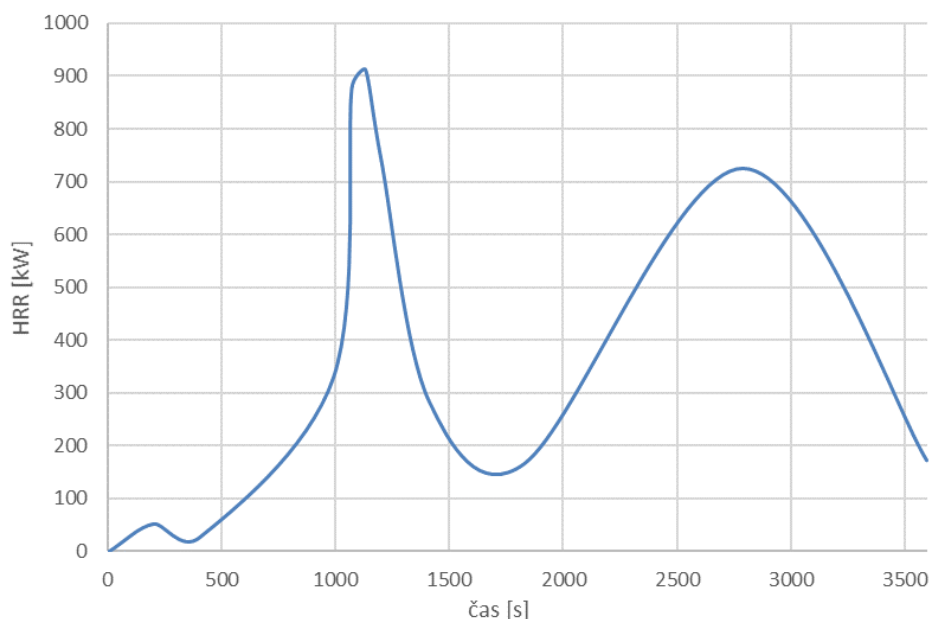
Obr. 24 Půdorys s vysokozdvížným vozíkem ve Smokeview.

Proces hoření vychází z experimentálních zkoušek, kde je definovaný tepelný výkon zdroje požáru na určitou plochu (HRRPUA). Nevýhodou takového modelu s předdefinovanou funkcí uvolněného tepla je, že ho nelze použít k předpovědi vývoje požáru, protože rychlost vývoje je předepsána. Samotný proces hoření vysokozdvížného vozíku má definovanou funkci rychlosti uvolňování tepla na jednotku plochy (HRRPUA). V programu FDS je možné definovat pouze jednu hořlavou plynnou látku, která vstupuje do reakce hoření. V tomto případě byl použit propan, jehož vlastnosti má FDS k dispozici v databázi. Výkon hořáku je určen podle vztahu:

$$HRRPUA = \frac{Q_{\phi,max}}{S} \quad (3.4.5)$$

kde	$Q_{\phi,max}$	maximální průměrný výkon z experimentu	[kW]
	S	plocha hořáku v modelu	[m ²]
	HRRPUA	maximální výkon hořáku v modelu	[kW/m ²]

Pro modelování hořícího vysokozdvizného vozíku byl využit požární experiment provedený ve Francii [7]. Rychlost uvolněného tepla je znázorněna na grafu 2. Maximální uvolněné teplo dosahovalo hodnoty téměř 1,1 MW až po 40 minutách požáru.

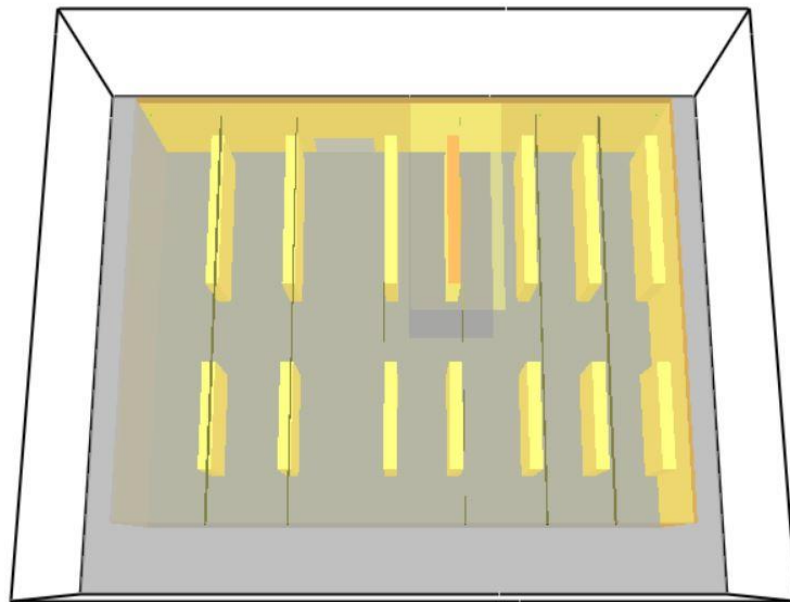


Graf 2 Křivka HRR vysokozdvizného vozíku [7].

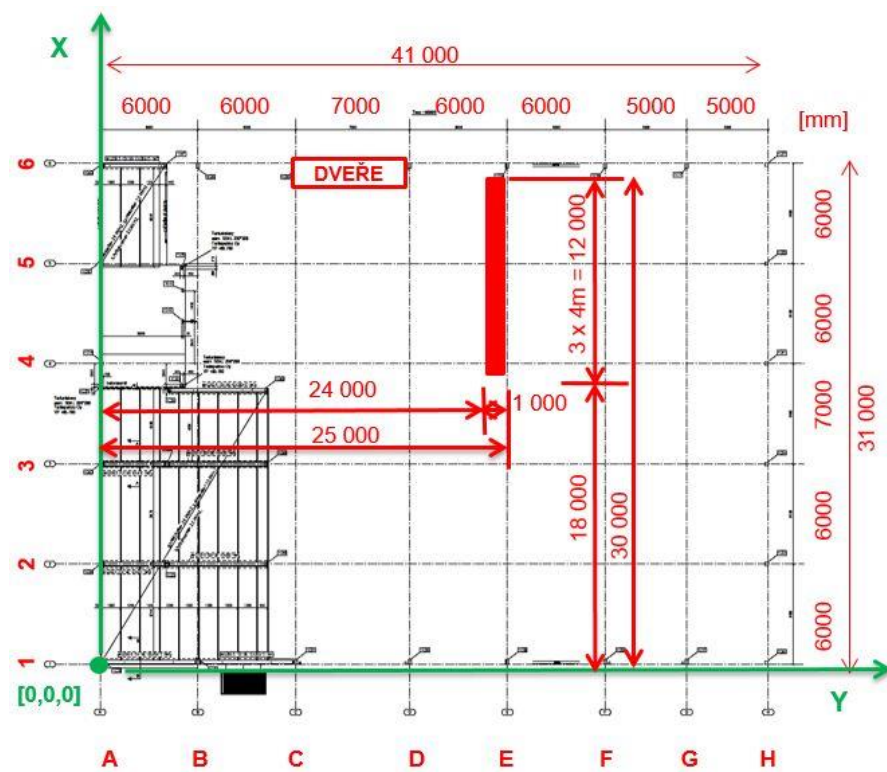
3.4.2 Požární scénář 2a

Pro další simulaci jsou použity jako zdroj hoření dřevěné palety s polyethyltereftalátovými (PET) lahvemi v kartonových krabicích, které mohou simulovat i obalový materiál. Dřevěné palety jsou rozmístěny za sebou ve dvou řadách, rozestupy mezi paletami jsou v takové vzdálenosti, aby mezi nimi mohl projet vysokozdvizný vozík. Vozík je popsán v kapitole 3.4.1. Základní geometrie palet je 1 m x 4 x 6 m, v jedné řadě jsou umístěny dvě vedle sebe a ve druhé řadě jsou tři vedle sebe. Obrázky 25 a 26 znázorňují polohu požárního zatížení vyznačeného červenou barvou na horním povrchu jednoho regálu. V tomto požárním scénáři se předpokládá hoření pouze jedné palety, ostatní jsou uvažovány jako nehořlavé a slouží jako překážky pro proudění horkých plynů v objektu. Šíření požáru na jiné palety je simulováno v požárním scénáři 3, který je popsán v kapitole 3.4.5 této diplomové práce.

Požární zatížení se nachází uprostřed haly 25 m od kraje ve směru delší stěny a 12 m ve směru kratší stěny. Ventilační podmínky jsou stejné jako v předchozím případě. Otevřené jsou pouze dveře v dlouhé stěně o rozměrech 5 m x 3 m. V místě hořících palet je opět zjmeněna výpočetní síť na 250 mm x 250 mm x 250 mm, jinak 1000 mm x 1000 mm x 1000 mm.

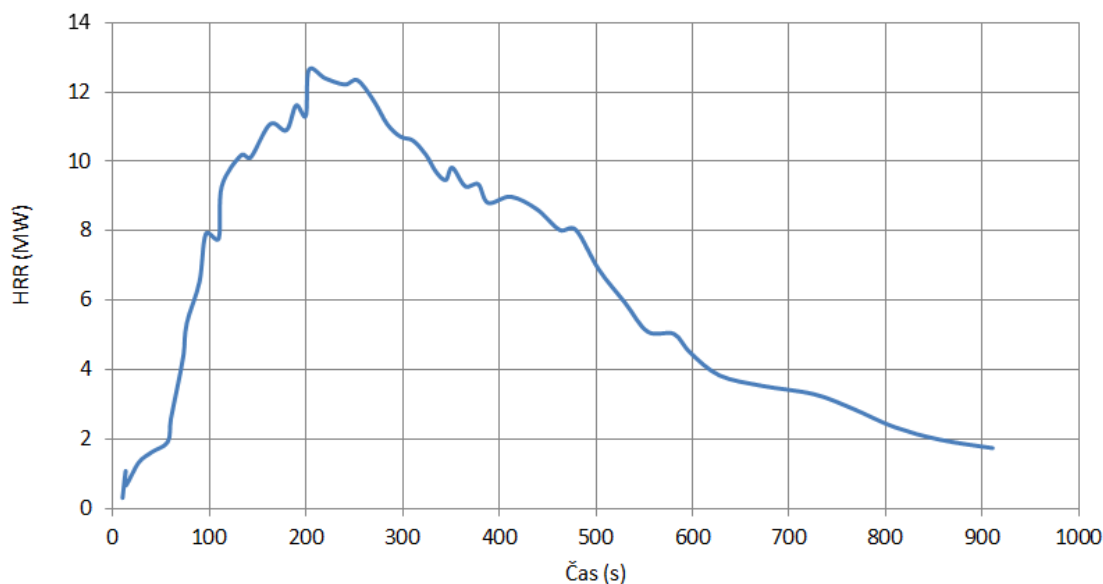


Obr. 25 Půdorys s umístěním zdroje požáru ve Smokeview.



Obr. 26 Půdorys s okótovaným umístěním zdroje požáru palet.

Zdroj požáru je simulován, stejně jako v předchozím případě, s definovanou funkcí rychlosti uvolňování tepla na jednotku plochy (HRRPUA). Rychlost uvolněného tepla palet je znázorněna v grafu 3, maximální uvolněné teplo dosahuje necelých 13 MW během 200 s. Křivka HRR vychází z experimentální studie z roku 2002 [17].

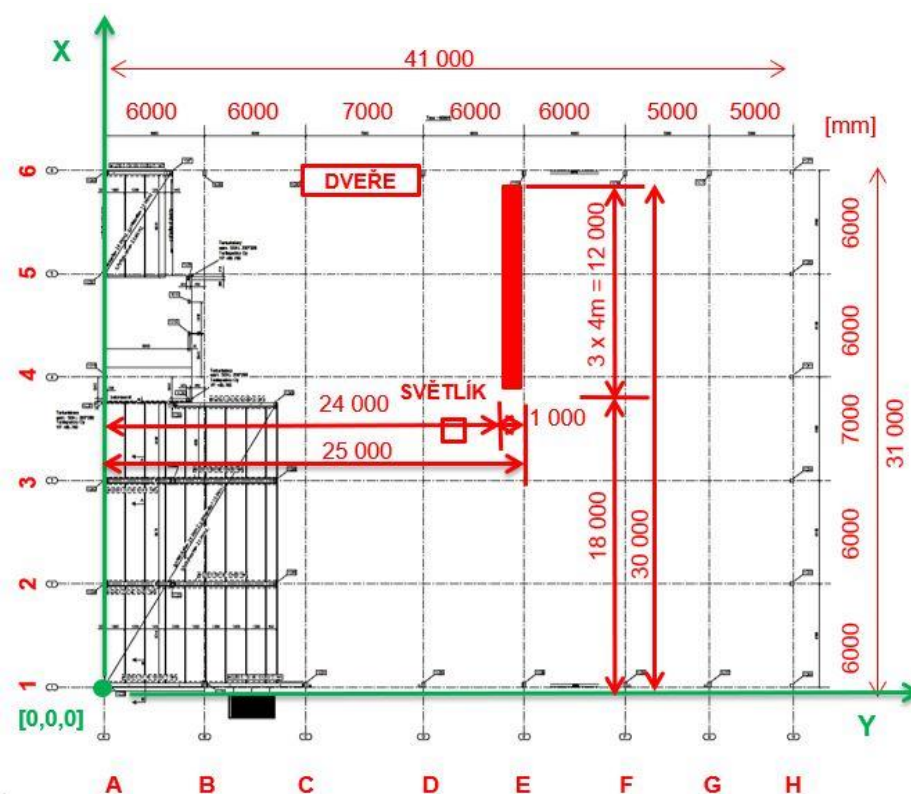


Graf 3 Křivka HRR palet s PET lahvemi [17].

3.4.3 Požární scénář 2b

Vývoj a teplota horkých plynů je také ovlivněna ventilačními podmínkami v prostoru. Pokud je hořící prostor správně ventilován, snižuje se tak možnost vzniku flashover efektu, dochází k snadnějšímu odstranění zplodin hoření z míst, kde se nachází osoby a zlepšuje se viditelnost pro zásah HZS. Pro srovnání vlivu ventilace na teplotu plynů v požárním úseku jsou u požárního scénáře s PET lahvemi upraveny otvory v halovém objektu. Numerický model je shodný s modelem popsáným v kapitole 3.4.2. Cílem této simulace je zjistit, jaký vliv bude mít změna ventilačních podmínek na vývoj teploty plynu v požárním úseku.

Celá kompozice rozmístění palet a poloha zdroje požáru je stejná jako v předchozím případě u požárního scénáře 2a. Hořlavá je pouze jedna paleta, kde je sálavá plocha umístěna na horním povrchu regálu. Kromě otevřených dveří v dlouhé stěně je v tomto požárním scénáři namodelován i střešní světlík. Světlík o rozměrech 1 m x 1 m je umístěný uprostřed haly, vzdálený 20 m od stěny haly ve vodorovném směru a 15 m od stěny ve směru svislém, viz obr. 27. V místě zdroje požáru je opět zjemněna výpočetní síť na 250^3 mm, mimo zdroj požáru je velikost jedné buňky 1000^3 mm.



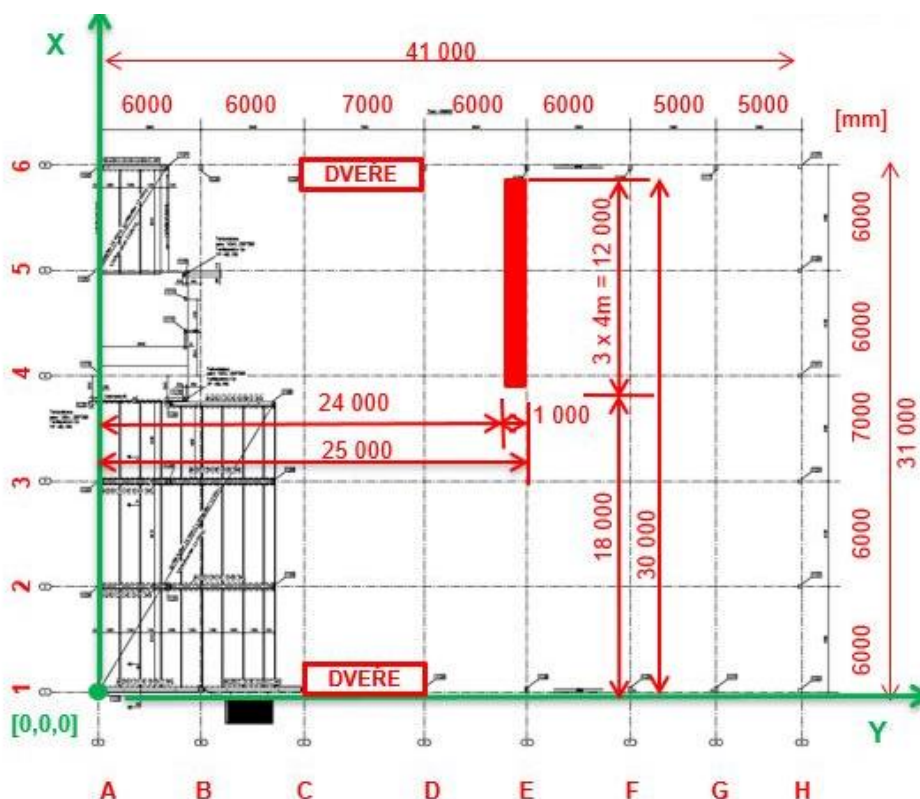
Obr. 27 Půdorys se střešním světlíkem.

3.4.4 Požární scénář 2c

Při požárech v uzavřených prostorách ovlivňuje výměnu plynů členitost objektu a přítomnost a rozmístění ventilačních otvorů. V další simulaci jsou opět upraveny ventilační podmínky původního modelu z kapitoly 3.4.2. V halovém objektu jsou namodelovány 2 otevřené dveře v obou dlouhých stěnách. Oba otvory disponují rozměry 5 m x 3 m a jsou umístěné přímo naproti sobě ve vzdálenosti 12 m od kraje.

Jako zdroj hoření jsou stále použity regály s PET lahvemi umístěné u jedné dlouhé stěny uprostřed haly. Požární zatížení se nachází uprostřed haly 25 m od kraje ve směru delší stěny a 12 m ve směru kratší stěny, viz níže obr. 28. Palety jsou simulovány s definovanou funkcí rychlosti uvolňování tepla na jednotku plochy (HRRPUA). Křivka HRR je znázorněna na grafu 3 v kap. 3.4.2. V numerickém modelu jsou opět umístěny 2 řady regálů, které jsou uvažovány jako nehořlavé.

Výpočtová síť je v okolí požárního zatížení zjemněna na velikost jedné buňky 250 mm x 250 mm. Cílem celé simulace opět je zjistit, jakým způsobem bude změna ventilace ovlivňovat vývoj teploty plynu a rozložení teplotního pole pod ocelovým vazníkem.

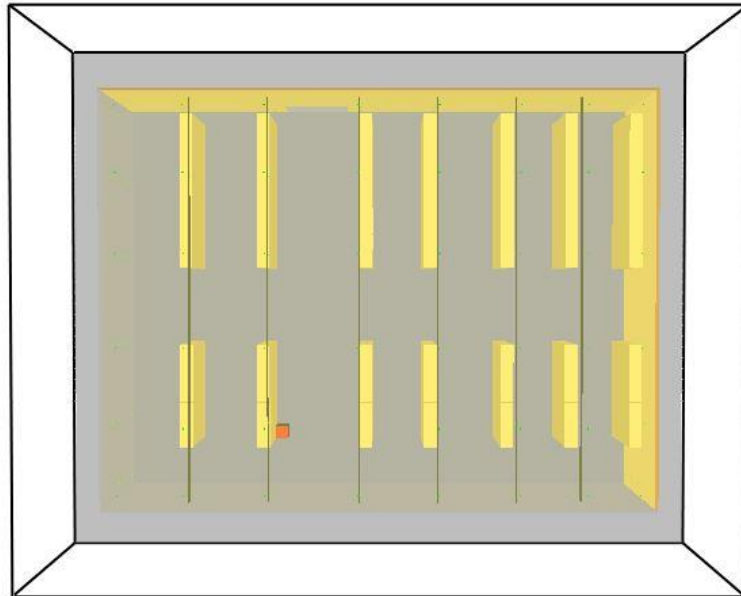


Obr. 28 Okótovaný půdorys s dveřmi.

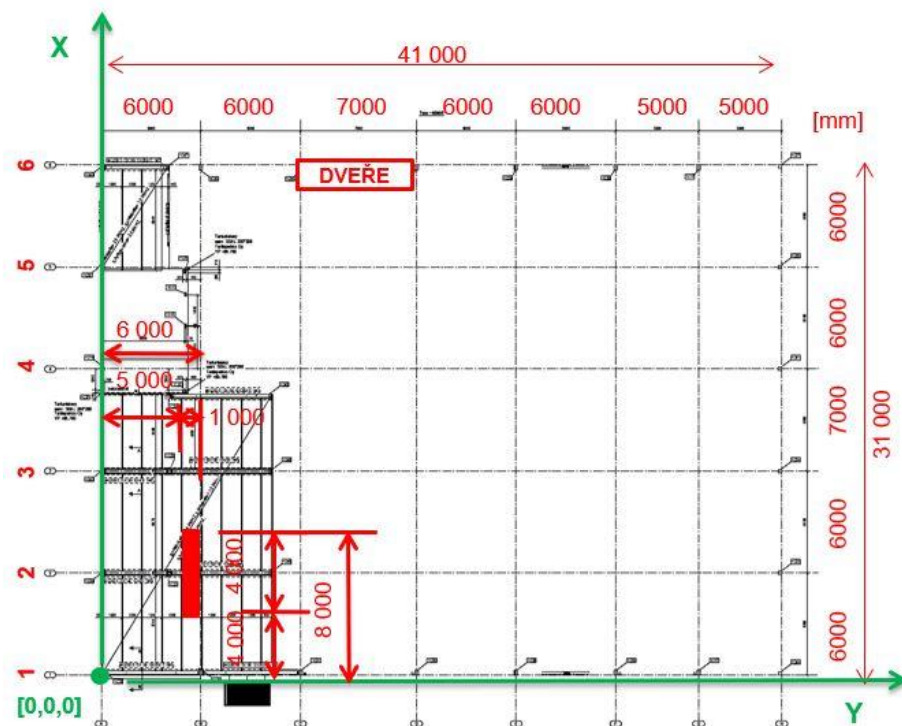
3.4.5 Požární scénář 3

V tomto numerickém modelu je cílem simulovat šíření požáru v halovém objektu. Rychlost a směr šíření požáru je ovlivněno množstvím požárního zatížení, chemickými a fyzikálními vlastnostmi hořlavých látek a jejich požárně technickými charakteristikami. Množství hořlavé látky a její rozmístění určuje intenzitu hoření a rovněž určuje směry šíření požáru. Požární zatížení opět představují palety s PET lahvemi v kartonových krabicích, které byly použity v požárním scénáři v kapitole 3.4.2. V simulaci jsou všechny palety, oproti předešlým případům, uvažovány jako hořlavé. Základní geometrie palet je 1 m x 4 x 6 m, v jedné řadě jsou umístěny dvě vedle sebe a ve druhé řadě tři vedle sebe. Palety jsou od sebe v každé řadě vzdáleny 5 m. Celková podlahová plocha prostoru je 1271 m². Na této ploše je v numerickém modelu umístěno celkem 35 hořlavých regálů.

Iniciace je způsobena hořákem, který simuluje hoření petroleje (kerosinu) na ploše 1 m², a který zapálí nejbližší paletu. Obrázky 29 a 30 zobrazují půdorysný pohled na řešený prostor s umístěním bodového zdroje požáru, který je umístěný v blízkosti druhé řady palet u dlouhé stěny.



Obr. 29 Půdorys haly pro šíření požáru ve SMV.



Obr. 30 Půdorys haly s okótovanou paletou u zdroje hoření.

Jak už bylo zmíněno, zdroj požáru simuluje vznícení hořlavé kapaliny, v tomto případě technického petroleje o ploše 1 m². Petrolej se velmi často používá k čištění strojních částí, jeho páry jsou snadno zápalné a směs se vzduchem nebo s jinou oxidující látkou je výbušná. Petrolej tak může být použit pro údržbu právě vysokozdvizného vozíku, který bývá v každé skladové hale. Samotný vozík byl popsán v prvním požárním scénáři v kapitole 3.4.1 této diplomové práce. Energie hořáku se uvolňuje v souladu s předepsanou ramp funkcí, která je závislá na čase a pevně nadefinovaná ve zdrojovém kódu. V níže uvedené tabulce 2 je průběh výkonu hořáku, během prvních 300 s výpočtu se uvolní až 900 kW/m².

tab. 2 Průběh výkonu iniciačního hořáku zadaného v FDS [18].

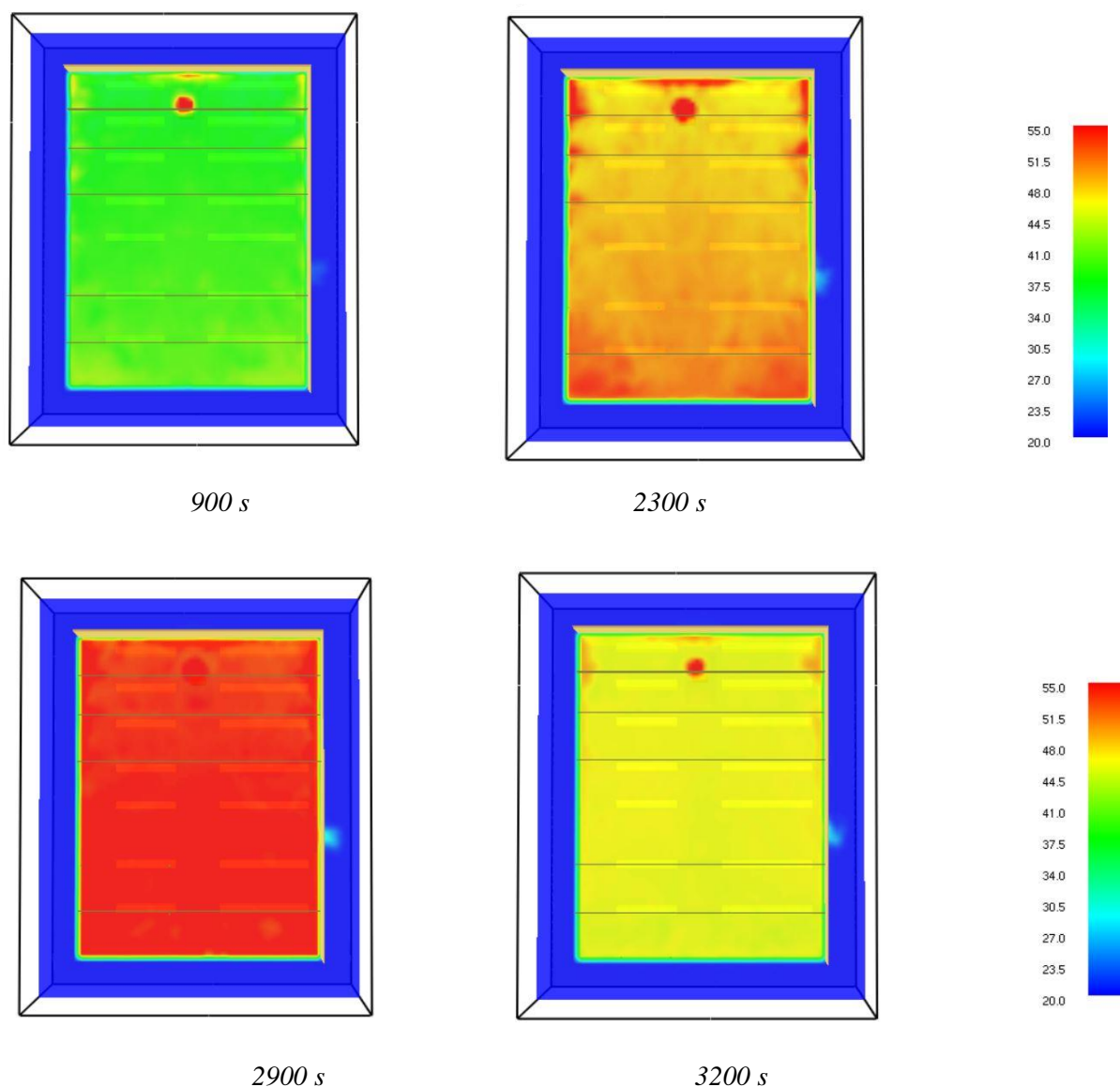
<i>Čas [s]</i>	<i>Frakce</i>
0	0,0
100	1,0
300	1,0
600	0,0

Pro simulaci šíření požáru je každému regálu s PET lahvemi přiřazena teplota vznícení. V tomto případě je zvolena teplota 320 °C na základě hodnoty z experimentální studie [19]. Po dosažení této hodnoty dojde v prostoru k uvolnění energie z požárního zatížení podle funkce rychlosti uvolněného tepla na jednotku plochu (HRRPUA). Rychlost uvolněného tepla pro každou paletu odpovídá křivce z grafu 3, který je popsán v kapitole 3.4.1 [17]. Je experimentálně ověřeno, že teplo uvolněné při hoření je úměrné množství spotřebovaného kyslíku. Snížením hladiny kyslíku se snižuje i HRR a dochází ke zpomalení spalování, dokud se úplně nezastaví. Pokud je úroveň kyslíku dostatečná bude hoření stále pokračovat podle HRR křivky. Přisun vzduchu je zabezpečen jedním otvorem, který simuluje otevřené dveře o rozměrech 5 m x 3 m. Z časových důvodů má výpočetní síť v celém požárním úseku rozměry 500 m x 500 m x 500 m.

4 Výsledky numerického modelu

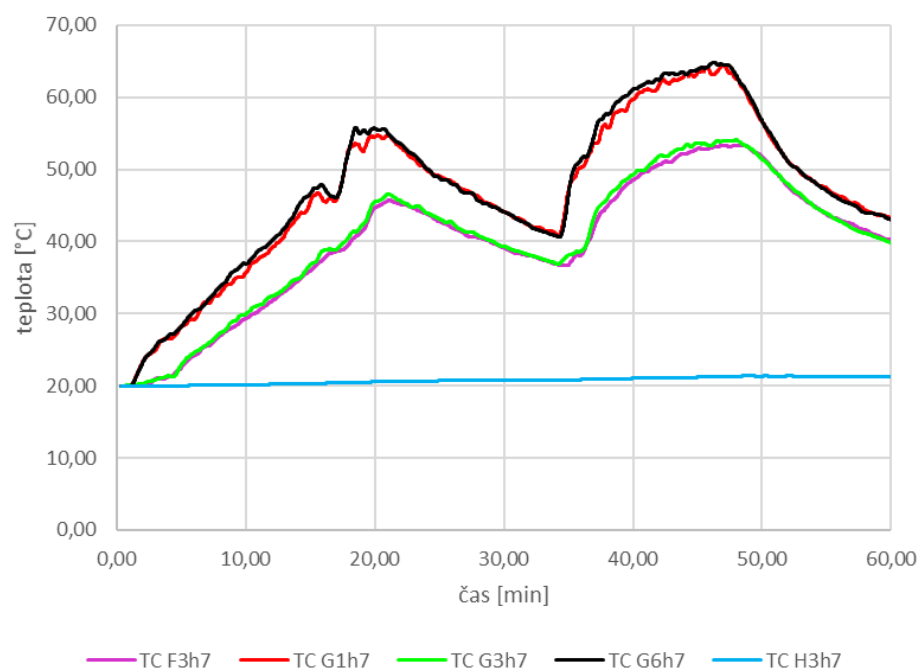
4.1.1 Požární scénář 1

První vytvořený FDS model simuluje požár vysokozdvizného vozíku, který je popsán v kapitole 3.4.1. V simulaci byla využita HRR křivka z požárního experimentu, který byl provedený ve Francii, kde se maximální uvolněné teplo pohybuje okolo 1 MW [7]. Na obr. 31 níže jsou vyobrazeny ISO plochy v softwaru Smokeview ve výšce 7 m nad podlahou, tedy v úrovni ocelových vazníků v různých časech. Z obrázků je patrný lokální účinek požáru a nerovnoměrné rozložení teplotního pole během požáru, jak se předpokládalo.



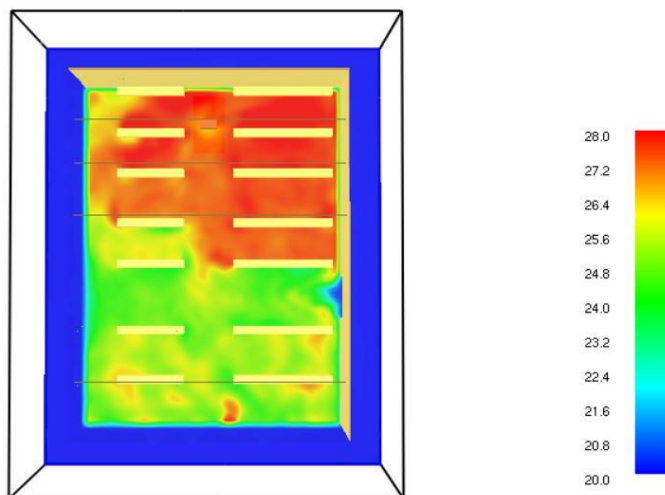
Obr. 31 Rozložení teplotního pole ve výšce 7 m nad podlahou.

Sledovaným parametrem v jednotlivých modelech je teplota plynu v hale po vzníkem. Výkon požárního zatížení není tak vydatný a vzhledem k velkému prostoru, kde je požár umístěn lze předpokládat nízké teploty plynu v prostoru. Průběh křivek teploty plynu na termočláncích v požárním úseku odpovídá křivce uvolněného tepla na grafu 2 v kapitole 3.4.1. Kolem 20 minut teploty vystoupají téměř k 60 °C, mezi 30 a 40 minutou klesnou na hodnotu 41 °C a poté opět vystoupají. Vlivem toku horkých plynů jsou nejvyšší hodnoty teploty plynu naměřeny na senzoru, který je umístěn až u stěny halového objektu. Kde hodnoty dosáhly až 64,9 °C v 46 minutě na termočlánci G6h7 (popis termočlánců odpovídá písmenům a číslům znázorněným na obr. 21 – G6 znamená vodorovnou polohu, h7 značí výšku termočlánci nad podlahou). Naopak nad zdrojem požáru byla teplota 54,2 °C, na termočlánci G3h7, to je o více jak deset stupňů méně než je maximální teplota v požárním úseku. U střechy ve výšce 10 m nad podlahou se teplota pohybovala pouze kolem 23 °C.



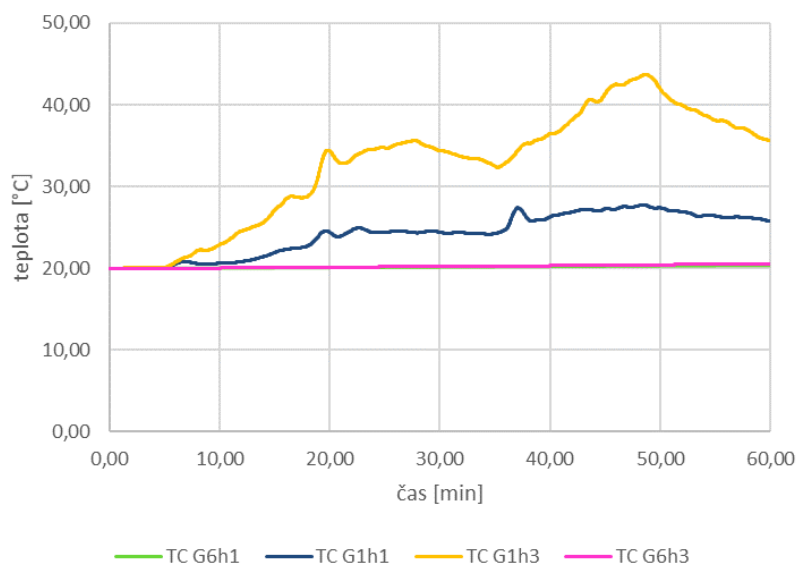
Graf 4 Teplota plynu při požáru vozíku na úrovni spodní hrany vazníku.

Na obr. 32 je vykreslena ISO plocha v 48 minutě ve výšce 1 m nad podlahou. Z obrázku je pozorovatelný vliv ventilačního otvoru, který je umístěn v dlouhé stěně objektu. Nejen ventilační podmínky, ale i rozmístění nehořlavých regálů a poloha zdroje požáru mělo znatelný účinek na proudění horkých plynů v objektu. Na ISO ploše je zřetelné, jak je jeden roh haly viditelně ochlazován otevřenými dveřmi. Z toho důvodu je protilehlý roh o poznání teplejší a nejvyšší teplota je tak naměřena na termočlánci blíže stěny než nad samotným zdrojem hoření.



Obr. 32 Proudění teplých plynů v 2900 s 1 m nad podlahou.

Asi do teploty 350 °C mechanické vlastnosti oceli klesají, ale ještě neohrožují bezpečnost objektů. Nejvyšší teploty na sloupech objektu se pohybují pouze okolo 40 °C, tyto hodnoty byly naměřeny až v 48 minutě simulace, jak ukazuje graf 5. Z grafu vyplývá, že teplota je podél výšky sloupů nerovnoměrná a je ovlivněna umístěním zdroje požáru. Hodnoty na termočlátku G6 jsou výrazně nižší také díky ventilačnímu otvoru, který se nachází na stejné straně haly. Křivka grafu 5 naznačuje průběh teplot ve výšce 1 m a 3 m nad podlahou na ose G a dvou protilehlých sloupech G1 a G6.

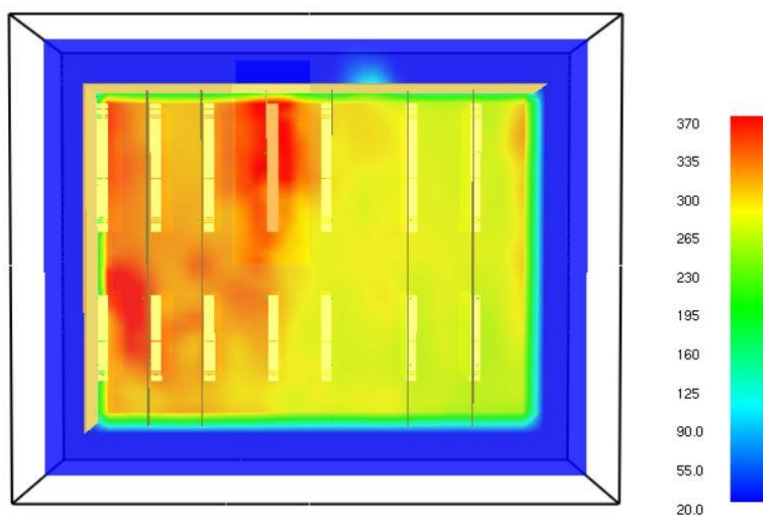


Graf 5 Naměřená teplota plynu ve výšce 1 m a 3 m nad podlahou.

Podle získaných teplot na termočláncích, lze usoudit, že teplota nebude mít výrazný vliv na ocelové konstrukce. Kritická teplota oceli je obvykle uvažována 450 °C.

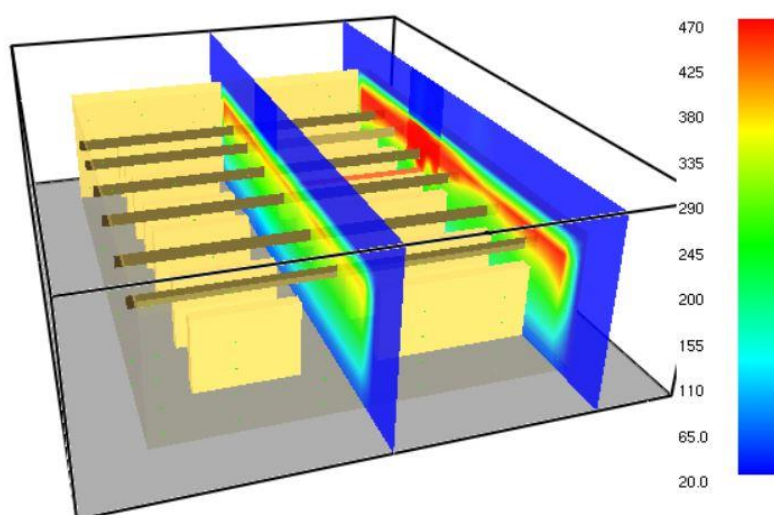
4.1.2 Požární scénář 2a

Obecně se požáry v uzavřených prostorech vyznačují silným zakouřením a vysokou teplotou. Jedním ze sledovaných parametrů v numerickém modelu bylo rozložení teplotního pole pod vazníkem. Z obr. 33 je patrné, že rozložení teplot je nerovnoměrné a během simulace dochází k lokálním účinkům od požárního zatížení. Na obrázku je barevně vyobrazena ISO plocha ve výšce regálů, tedy 7 m nad podlahou.



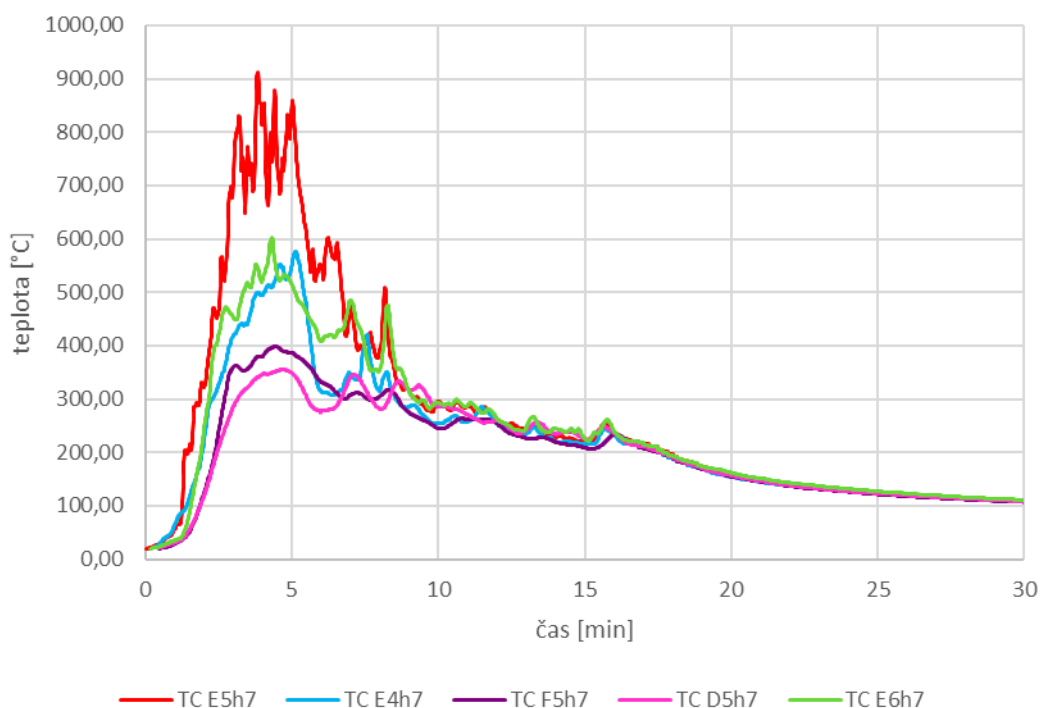
Obr. 33 ISO plocha 1 m pod vazníkem z 420 s simulace.

Pro lepší pozorování lokálních účinků požáru jsou na obrázku 34 zobrazeny ISO plochy v různých řezových rovinách. Z obrázku je také vidět, že se výrazně mění teplota po výšce haly.



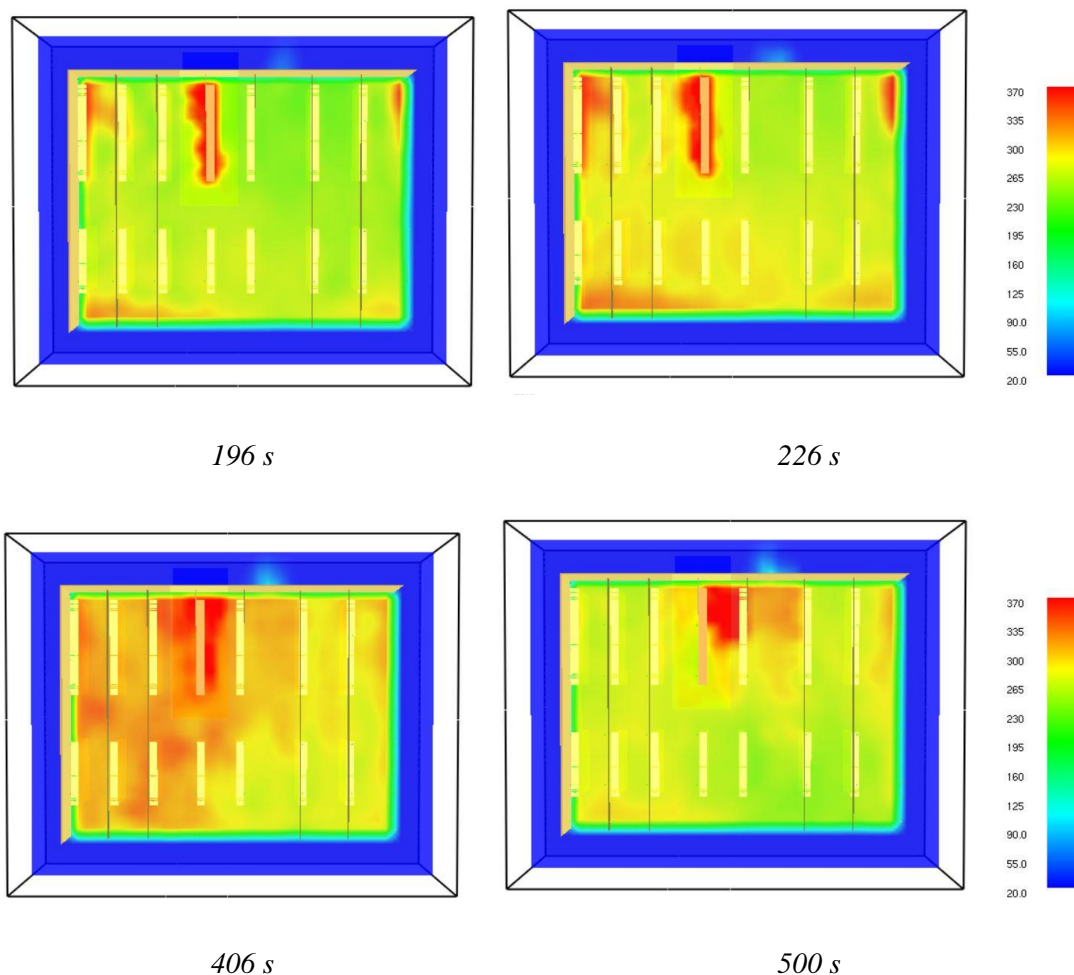
Obr. 34 ISO plocha v rovině X v 250 s.

Maximální teploty bylo dosaženo v necelé 4 min, na termočláncích umístěných nad požárním zatížením, viz graf 6. Nejvyšší teplota na spodní hraně vazníku je měřena přímo nad zdrojem požáru na termočlánci E5h7. Nejvyšší dosažená teplota je 937 °C. Na stejném nosníku ve vzdálenosti 6 m od středu požárního zatížení v poloze E4h7 byla maximální naměřená teplota 596 °C. Pro větší přehlednost je časová osa na grafu 6 pouze do 30 minut. Po této době teplota plynu v prostoru pomalu klesala až na 60 °C, kdy byla simulace ukončena.



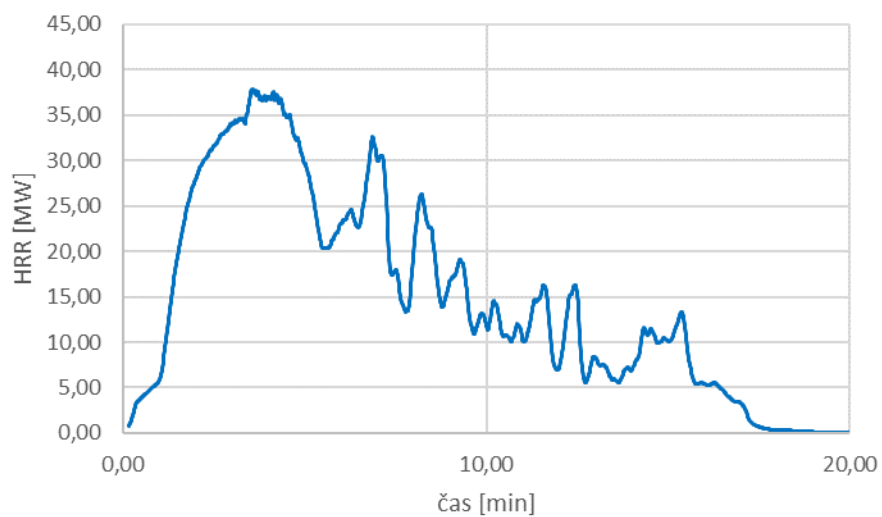
Graf 6 Teplota plynu nad požárním zatížením na úrovni spodní hrany vazníku.

U sousedních vazníků, na termočlánci F5h7, dosáhne teplota 420 °C. Na druhé straně ve vzdálenosti 6 m od středu požáru byla na termočlánci D5h7 naměřena teplota 360 °C. Při porovnávání teplot na sousedních vaznicích na termočláncích F5h7 a D5h7 je vidět nepatrný vliv dveřního otvoru. Jednotlivé snímky na obr. 35 ukazují vývoj teploty ve výšce 7 m nad podlahou (3 m pod střešou) ve čtyřech různých časech. V úrovni horního pásu příhradového vazníku se nejvyšší teploty pohybují kolem 80 °C. Ze simulace je patrné, jak poloha zdroje požáru a umístění dveří ovlivňují tok horkých plynů v požárním úseku. V blízkosti otvoru jsou teploty výrazně nižší než u zdroje požáru. Vyšších teplot je také dosaženo v rohu haly, který je nejbližší zdroji požáru a zároveň nejvzdálenější od otvoru. Naopak nejnižší teplota je měřitelná v rohu, který je nejvzdálenější od zdroje požáru.



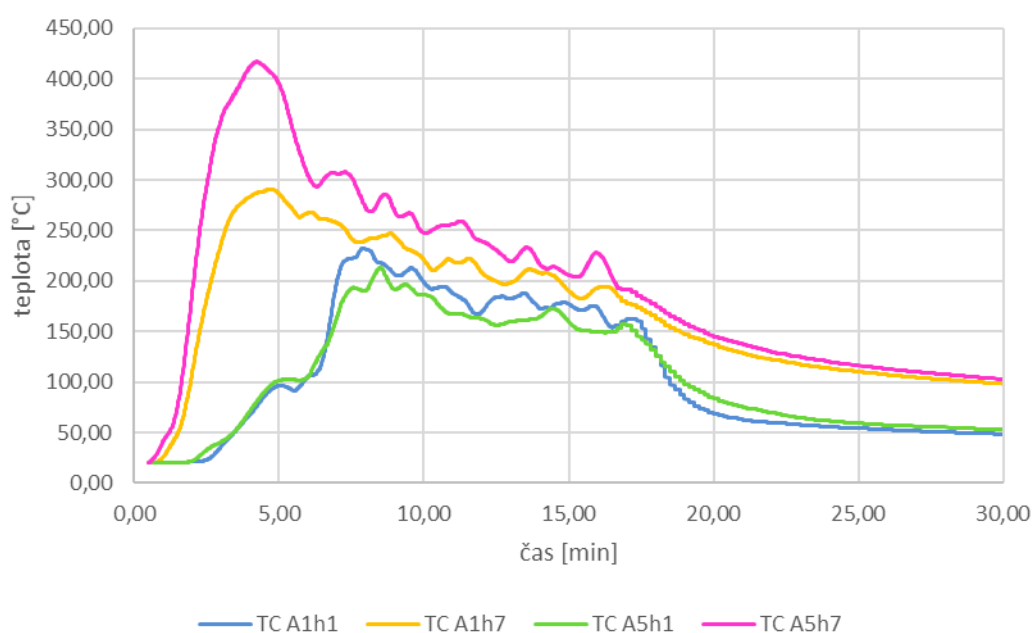
Obr. 35 Rozložení teplotního pole v úrovni zdroje požáru.

Naměřeným teplotám na snímačích odpovídá i maximální uvolněné teplo, které dosahuje hodnoty necelých 40 MW během 216 s, jak je zobrazeno na grafu 7.



Graf 7 Maximální hodnoty HRR při požáru palet s PET lahvemi.

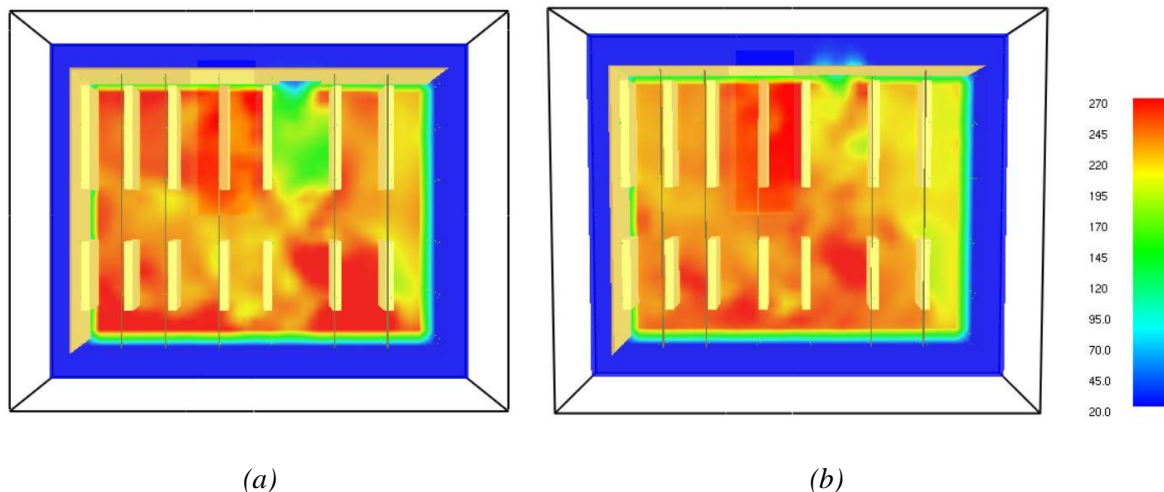
Nejvyšší teplota plynu v blízkosti sloupu je na senzoru E6, který je nejbližší stěny u zdroje požáru. Maximální teploty v tomto sloupu je dosažena v 4 min ve výšce 7 m nad podlahou, naměřená teplota na termočlátku je 651 °C. Graf 8 ukazuje vývoj teploty na sloupech A1 a A5 umístěné na kratší stěně haly, A1 je rohový sloup vzdálený 25 m od zdroje požáru a sloup A5 je stěnové sloupy umístěný 15 m od zdroje požáru. Z grafu je zřejmé, že teplota podél výšky sloupů je ovlivněna umístěním zdroje požáru a také umístěním otvoru. Křivky na grafu naznačují průběh teplot po výšce sloupů – 1 m a 7 m nad podlahou. Maximální teploty u obou sloupů bylo dosaženo mezi 4 min a 5 min. Rozdíl mezi teplotami ve výšce 7 m nad podlahou je 188 °C. Vyšší hodnoty jsou naměřeny u stěnového sloupu A5, který je blíže zdroji požáru.



Graf 8 Naměřená teplota na sloupech A1 a A5 ve výšce 1 m a 7 m nad podlahou.

Ve výšce 1 m nad podlahou se objevuje trochu jiný jev, kdy u sloupu A5 je teplota o něco nižší než u sloupu A1. Tato situace ukazuje vliv otvorů a vliv umístění překážek v hale (nehořlavé regály). Na sloup A1 mají dveře menší efekt, protože sloup je přibližně 38 m od otvoru. Vzhledem k velikost otvoru, jsou tyto rozdíly zanedbatelné. Maximální rozdíl ve výšce 1 m nad podlahou je 63 °C.

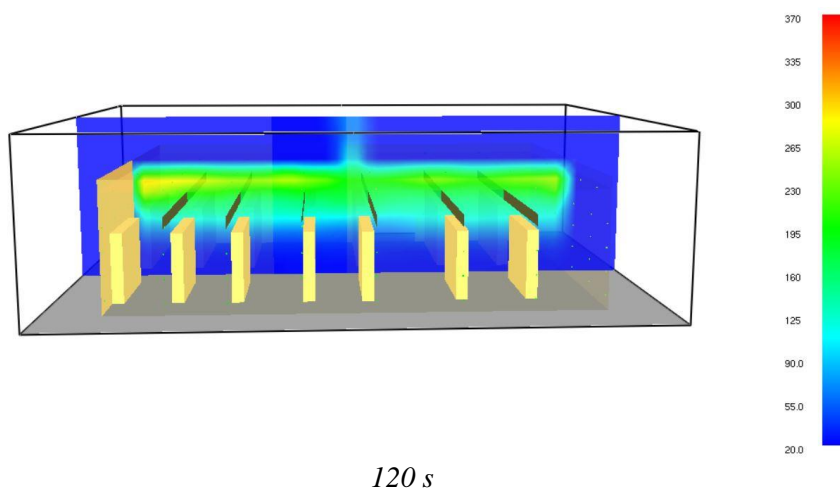
Na půdorysu znázorněném na obrázku 36 je viditelný průtok studeného vzduchu, který prochází otvorem z vnější strany budovy. Zobrazený pohled je ve výšce 1 m nad podlahou, ve výšce 2 m nad podlahou má proudění vzduchu opačný směr a horké plyny opouštějí chodbu.

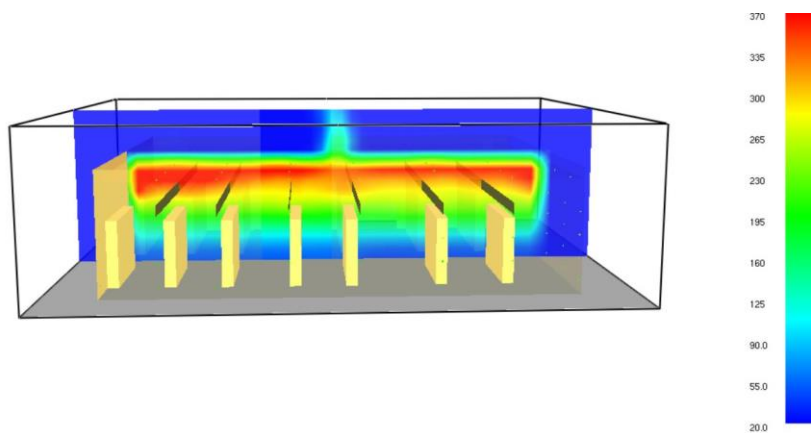


Obr. 36 Prodění teplých plynů v 525 s: (a) 1 m nad podlahou; (b) 2 m nad podlahou

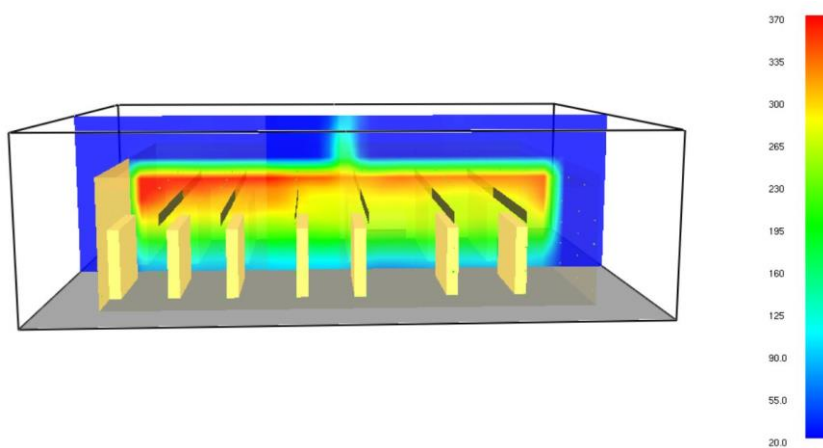
4.1.3 Požární scénář 2b

V případě dalšího modelu jsou upraveny okrajové podmínky numerického modelu, který je popsán v kapitole 3.4.2. Kromě dveřního otvoru v dlouhé stěně je navíc namodelován střešní světlík uprostřed haly. Obecně je výměna plynu během požáru v uzavřených prostorech velmi složitá a je ovlivněna několika faktory. Velmi zásadní jsou vstupní data, nejdůležitější je geometrie daného objektu, zejména: výška, počet a rozmístění otvorů apod. Dalším faktorem, který ovlivňuje proudění plynů je rychlost a směr větru, v numerickém modelu, ale nebyly tyto vlivy řešeny. Obrázek 37 vyobrazuje ISO plochu v řezové rovině X uprostřed haly v různých časech, kde je vidět nerovnoměrné rozložení teplotního pole v řešeném prostoru. Z obrázku je také viditelný odvod horkých plynů ven střešním světlíkem a poloha neutrální roviny, teplota se také výrazně liší po výšce haly.

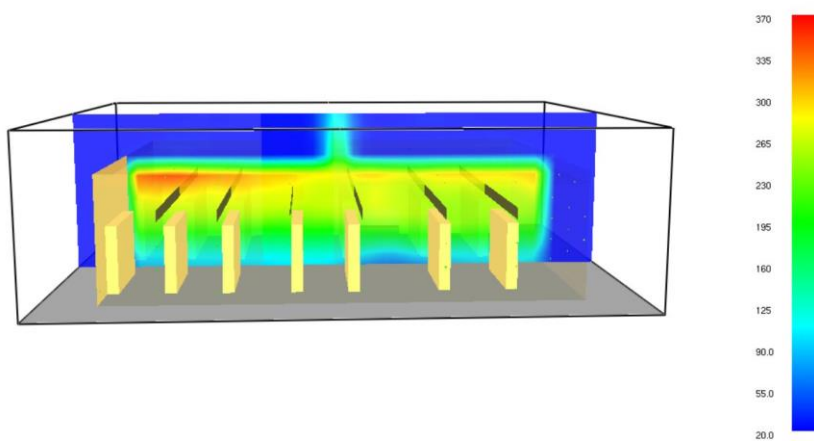




250 s



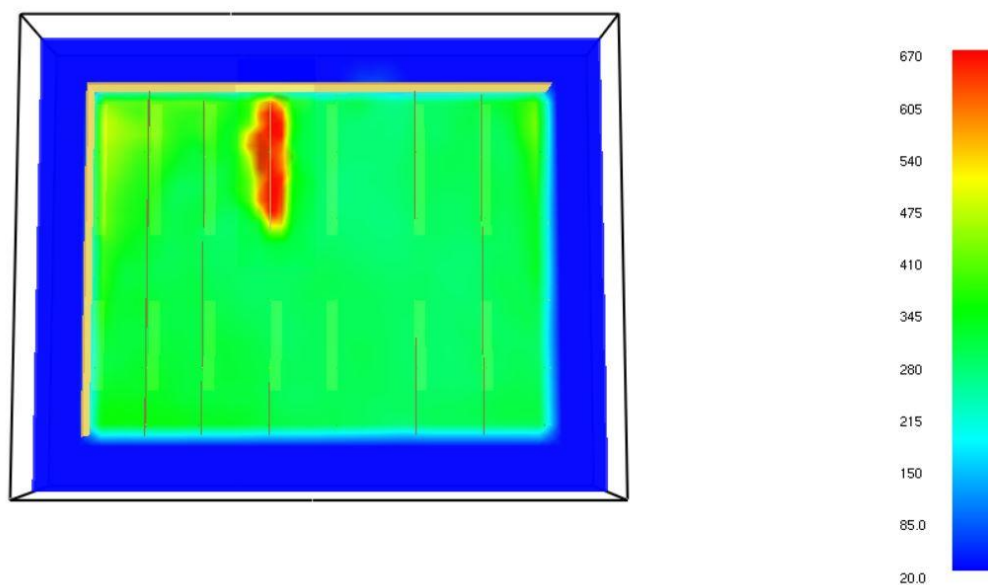
470 s



570 s

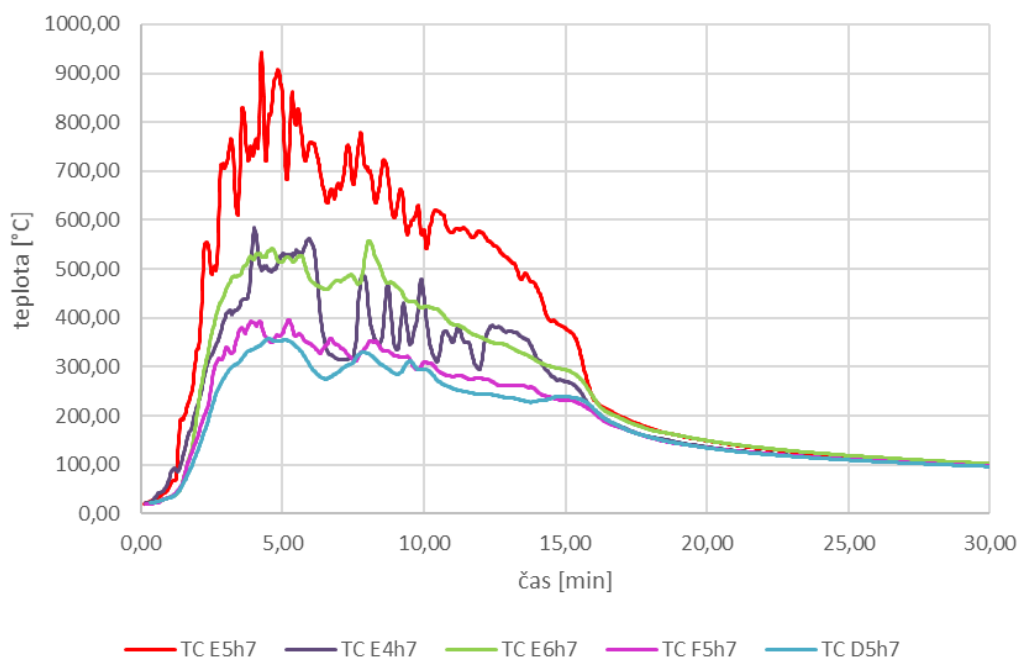
Obr. 37 ISO plochy uprostřed haly v různých časech

Na obr. 38 níže je vyobrazena ISO plocha v rovině Z ve výšce hořícího regálu. Tedy 1 m pod vazníkem. Z obrázku je evidentní lokální účinek požáru, horké plyny jsou ve výšce 7 m nad podlahou nejvíce koncentrované nad zdrojem požáru. V této úrovni nebyla tak velká distribuce teplých plynů do prostoru, díky přítomnému střešnímu světlíku. Horké zplodiny proudí nejkratší cestou k otvorům ve střeše a nehromadí se v objektu. Na vývoj teploty v prostoru mají také dopad překážky v podobě nehořlavých regálů.



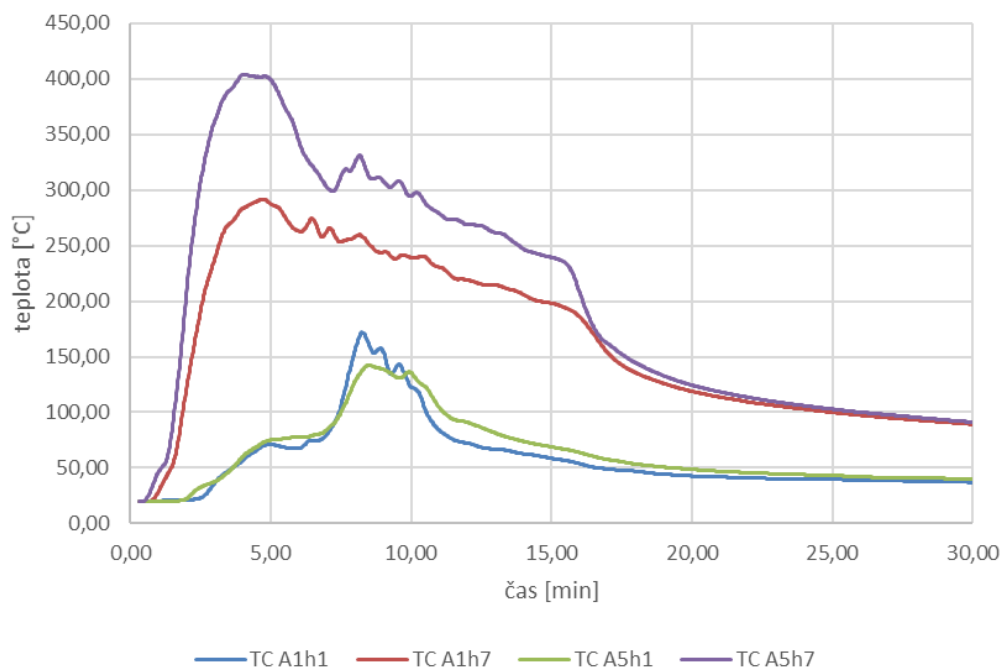
Obr. 38 ISO plochy 1 m pod vazníkem v čase 240 s.

Maximální teploty plynu bylo dosaženo na termočláncích umístěných přímo nad požárním zatížením na spodní hraně vazníku, tedy ve výšce 7 m nad podlahou. Teplota dosahovala hodnoty až 975 °C. Této hodnoty je dosaženo už po 4 minutě simulace na termočlánci E5h7, viz graf 9. Na stejném nosníku ve vzdálenosti 6 m od požárního zatížení v poloze E4h7 byla maximální naměřená teplota 626 °C. Na druhé straně vazníku v blízkosti stěny, na termočlánci E6h7, je nejvyšší teplota plynu 611 °C. Rozdíl teplot mezi jednotlivými senzory na stejném nosníku je necelých 350 °C. Naměřené teploty jsou výrazně nižší s rostoucí vzdáleností od zdroje požáru. U sousedních vazníků vzdálených 6 m od středu požáru na každou stranu byly teploty na termočlánci D5h7 365 °C a na termočlánci F5h7 407 °C. Senzor D5h7 je umístěný v blízkosti ventilačních otvorů, teplota plynu je tak ovlivněna prouděním chladnějšího vzduchu od otvoru. Na horní hraně nosníku v blízkosti střechy byla naměřena teplota na termočlánci E5h10 102 °C. Pro lepší přehlednost je časová osa na grafu 9 zobrazena pouze do 30 minut. Teplota plynu od 20 minut v požárním úseku chladla přibližně lineárně a po 30 minutě klesla pod 100 °C.



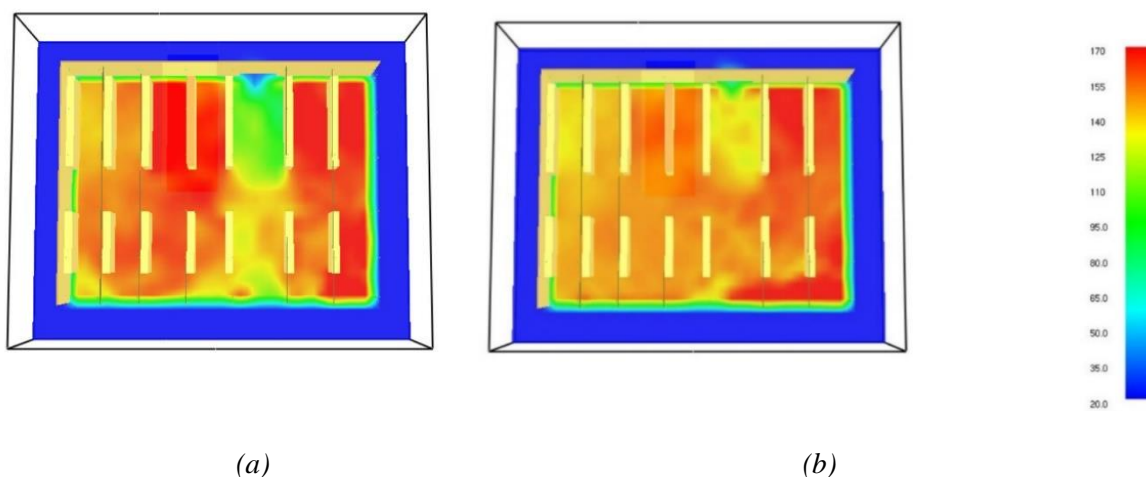
Graf 9 Teplota plynu v úrovni vazníku ve výšce 7 m nad podlahou.

U svislých nosných konstrukcí, je nejvyšší teplota zpozorována u sloupu E6, který je nejbližší samotnému zdroji požáru. Ve výšce 7 m nad podlahou bylo dosaženo teploty 611 °C. Následující graf 10 naznačuje teploty po výšce sloupů A1 a A5 umístěných na kratší stěně haly ve výškách 1 m a 7 m nad podlahou. Průběh teplot je u obou sloupů velmi rozdílný. Na stěnovém sloupu A5 maximální teplota dosáhla hodnoty 407 °C kolem 4 minuty simulace. Z grafu je možné pozorovat, že teplota je ovlivněna umístěním zdroje požáru. Sloup A5, který se nachází 15 m od požárního zatížení je mnohem teplejší než rohový sloup A1 vzdálený 25 m od zdroje požáru. Ve výšce 1 m nad podlahou je jako u požárního scénáře 2a popsáno v kapitole 3.4.2, zřetelně teplejší rohový sloup A1. V tomto případě se jedná o vliv ventilačních otvorů, kdy sloup A5 je ochlazován studeným vzduchem od dveří. Maximální teplotní rozdíl mezi těmito sloupy ve výšce 1 m nad podlahou je 36 °C. Na druhé straně objektu na sloupech v ose H byla maximální teplota na stěnovém sloupu H5 40 °C až po 20 minutě. Teplota je dána i vzdáleností od požárního zatížení. Horké plyny se navíc kumulují mezi regály a část odchází z prostoru ven střešním světlíkem.



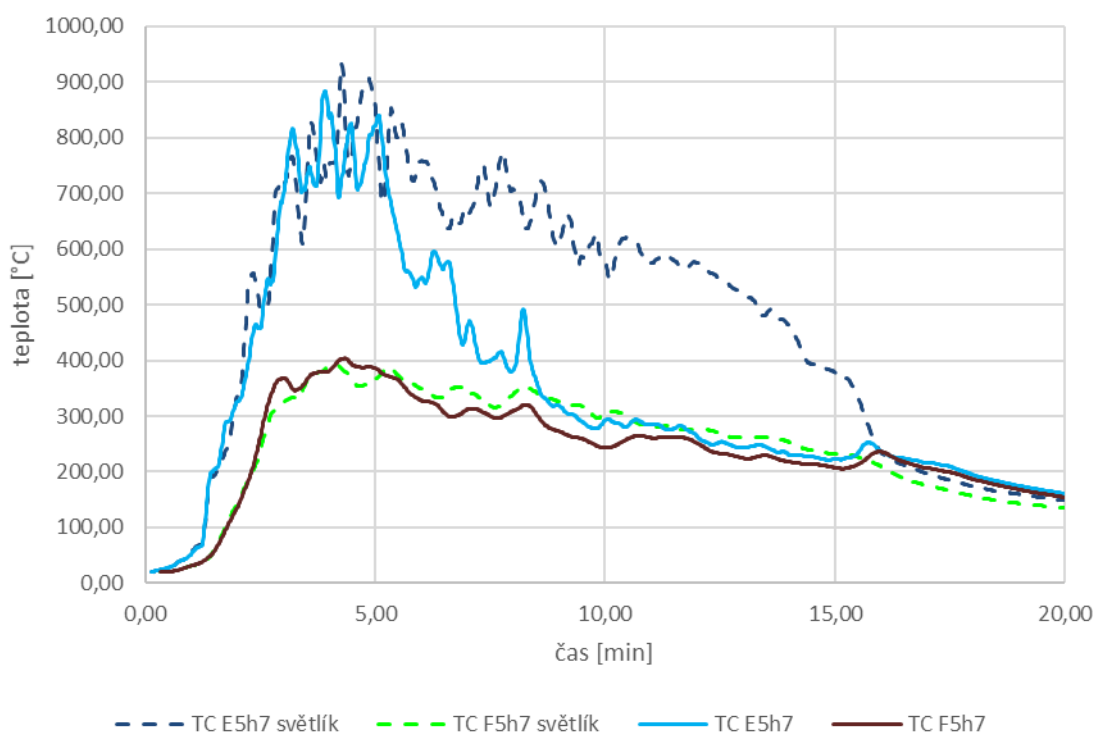
Graf 10 Teplota na sloupech A1 a A5 ve výšce 1 m a 7 m nad podlahou.

V objektu s více otvory v různých výškách obecně platí, že spodními otvory se nasává do prostoru čistý vzduch a horními otvory se dostává kouř z prostoru ven. Tento jev velmi dobře pozorovatelný na obr. 39, kde je vyobrazen půdorys ve výšce 1 m a 2 m nad podlahou. Ventilační otvor je vysoký 3 m, na obr. 39 (a) je viditelný průtok chladného vzduchu dovnitř do objektu. Ve výšce 2 m nad podlahou na obr. 39 (b) proudí vzduch obráceně a horké plyny odcházejí z požárního úseku.



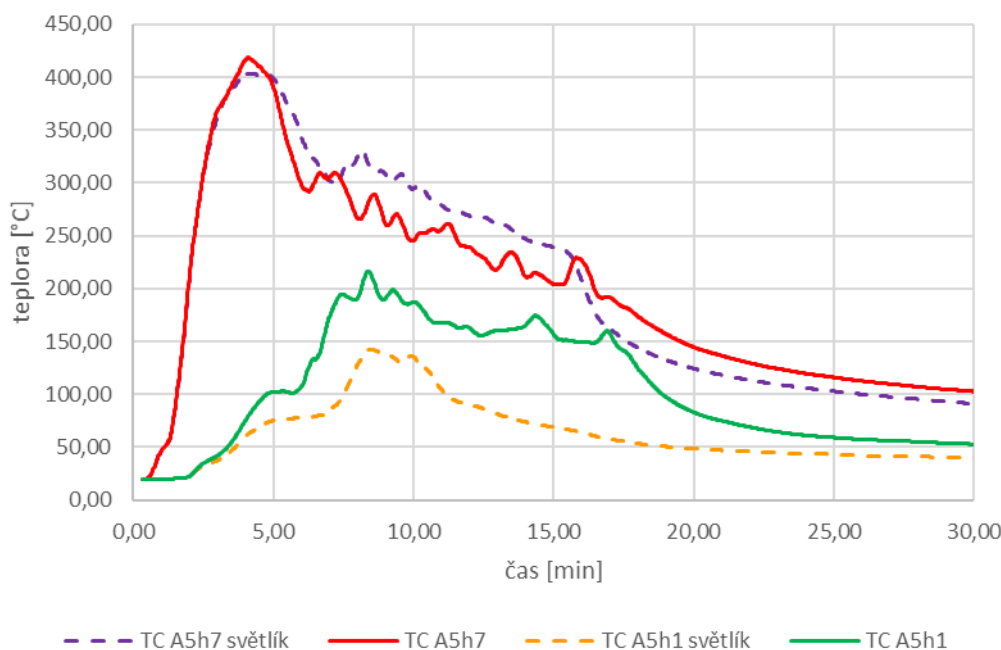
Obr. 39 Teplotní pole v čase 520 s: (a) 1 m nad podlahou; (b) 2 m nad podlahou

Cílem simulace bylo zjistit, jaký dopad bude mít změna ventilačních podmínek u požárního scénáře na vývoj teploty plynu v halovém objektu. Níže uvedené grafy 11 a 12 porovnávají naměřené hodnoty teploty plynu z numerických modelů 2a a 2b pod vazníkem a na sloupech. První scénář má umístěné dveře o rozměrech 5 m x 3 m v dlouhé stěně haly a je na grafu znázorněn plnou čarou. Čárkovaně je v grafech naznačen požární scénář, jedná se o případ, kdy je k dveřnímu otvoru namodelován navíc střešní světlík o celkových rozměrech 1 m x 1 m. Teplota plynu byla v druhé simulaci se střešním světlíkem o něco vyšší než v numerickém modelu bez světlíku. V důsledku dostatečného přísunu kyslíku dochází k intenzivnějšímu proudění vzduchu a nový kyslík v objektu podporuje další hoření. Z toho důvodu také hasiči doporučují v halových objektech instalaci kouřových zábran. Ty znemožňují jakoukoliv akumulaci zplodin a aby průběžně odstraňují teplo a kouř, který se vytváří v ohnisku požáru. Hodnota teploty plynu na termočláncích E5h7 se lišila o 38 °C. Průběhy teplot na senzoru E5h7, které popisuje křivka v grafu X se nejvíce liší mezi 5 a 15 minutou simulace. Větší přísun vzduchu má v tomto případě vliv na délku hoření. U simulace se střešním světlíkem jsou vyšší hodnoty teploty plynu měřené pod delší časový úsek. Zatímco u požárního scénáře bez střešního světlíku hodnoty po 5 minutě mnohem rychleji klesají. V některých časech je teplotní rozdíl téměř 400 °C.



Graf 11 Srovnání teplot plynu pod vazníkem.

Na grafu 12 jsou srovnány teploty po výšce stěnového sloupu A5. Ve výšce 7 m nad podlahou jsou křivky v obou případech podobné, rozdíly teplot jsou kolem 50 °C. Naopak větší difference v naměřených hodnotách jsou pozorovatelné ve výšce 1 m nad podlahou. Průběh obou křivek je už od 3 minuty simulace velmi rozdílný. V případě numerického modelu se střešním světlíkem nedosahuje teplota plynu ani 150 °C. Po 10 minutě lineárně klesá až pod 50 °C. Zatímco v druhém případě simulace dosahují teploty hodnot kolem 200 °C. Až do 17 minuty se teploty plynu drží nad 150 °C a poté rychleji klesají.

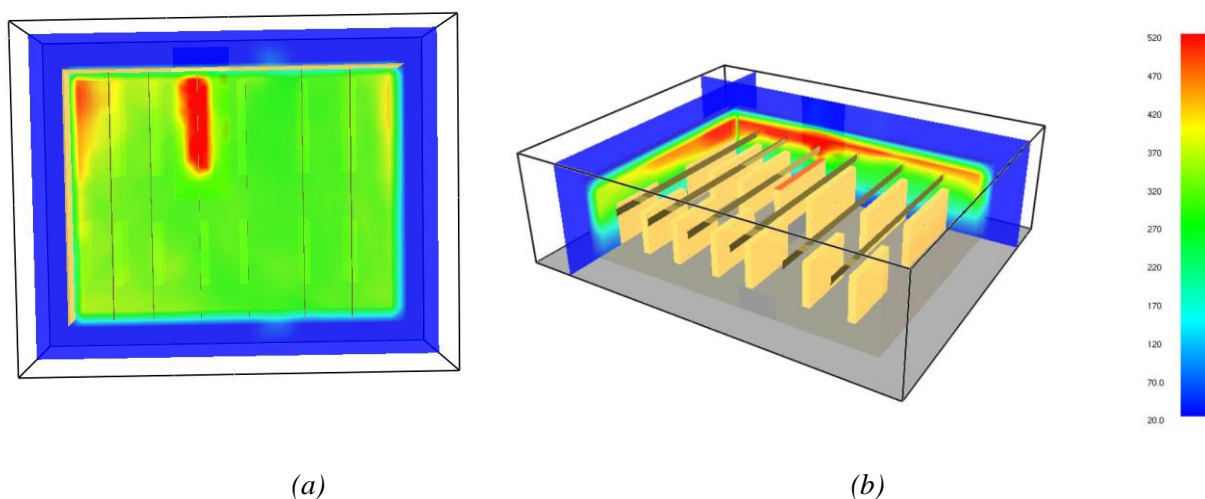


Graf 12 Srovnání teplot plynu na sloupech.

V důsledku dostatečného přísunu kyslíku dochází k proudění vzduchu směrem k otevřeným otvorům. Naopak při úplném zavření otvorů dochází k výměně plynů pouze infiltrací, tedy pronikáním štěrbinami a netěsnostmi v objektu. Z obou grafů je patrné, že změna ventilačních podmínek neměla tak velký vliv na maximální teploty plynu v prostoru, jako na průběh požáru. Častým jevem je, že při požáru ve zcela uzavřeném prostoru dojde k samouhašení požáru zplodinami hoření. V případě numerického modelu se střešním světlíkem bylo dosaženo o něco vyšších teplot a samotný proces hoření byl intenzivnější. Teploty byly také vyšší po delší časový úsek.

4.1.4 Požární scénář 2c

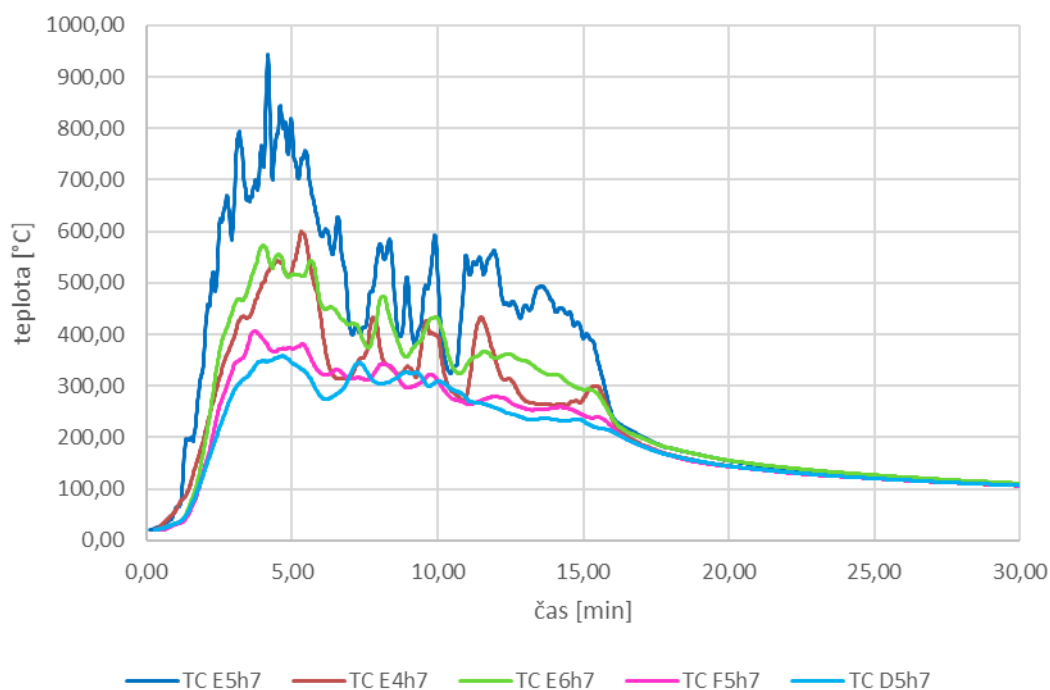
Při porovnání požárních scénářů 2a a 2b byly zaznamenány nepatrné rozdíly v průběhu požáru i mezi naměřenými nejvyššími teplotami. Z toho důvodu jsou v dalším numerickém modelu opět ventilační podmínky upraveny. Cílem simulace je zjistit, jaký vliv má změna ventilačních podmínek na vývoj teploty plynu v halovém objektu. V původním modelu v kapitole 3.4.2, je v dlouhé stěně umístěn jeden dveřní otvor o rozměrech 3 m x 5 m. V tomto případě je namodelován stejný otvor, ale na protilehlou dlouhou stěnu. Jako v případech popsanych výše lze předpokládat, že rozložení teplotního pole v řešeném požárním úseku bude nerovnoměrné. Tento fakt potvrzuje obrázek níže. Na obr. 40 (a) je ISO plocha vyobrazena v úrovni požárního zatížení 1 m pod vazníkem. Na obr. 40 (b) ukazují dvě řezové roviny na krátké a dlouhé stěně halového objektu.



Obr. 40 FDS simulace v čase 260 s: (a) 7 m nad podlahou; (b) $X = 30$ m a $Y = 40$ m.

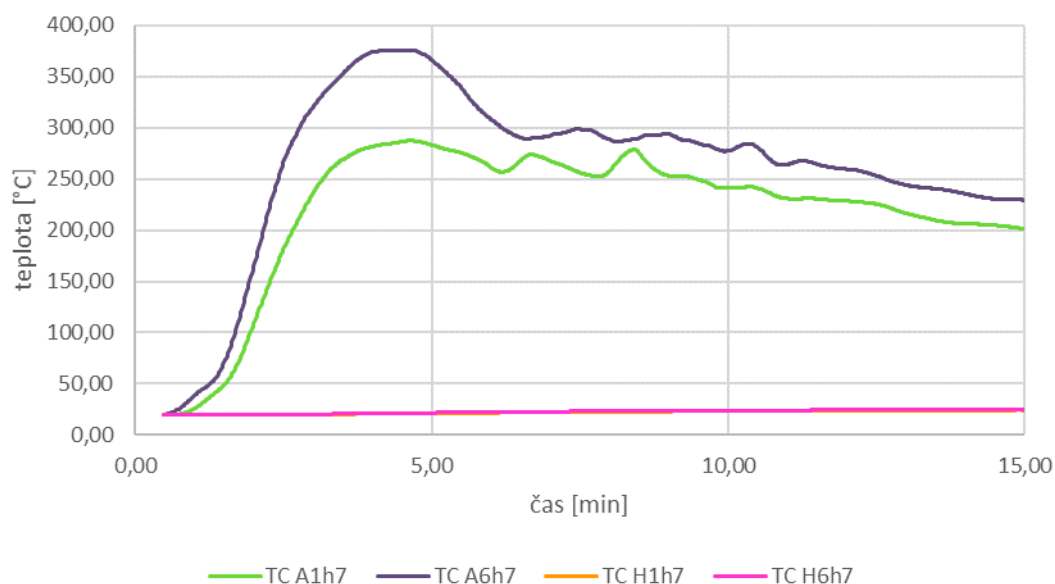
Při požáru se uvolňuje velké množství tepelné energie a teplota plynu požáru tak dosahuje vysokých hodnot. V numerickém modelu byly maximální teploty plynu naměřeny na termočláncích umístěných přímo nad zdrojem požáru na spodní hraně vazníku. Teplota dosahovala hodnoty až 980 °C ve 4 minutě simulace na termočlánek E5h7, viz graf 13. Na stejném vazníku ve vzdálenosti 6 m na každou stranu od požárního zatížení na senzorech E4h7 a E6h7 byla nejvyšší naměřená teplota 632 °C a 648 °C. Rozdíly mezi krajními termočlánci nejsou nijak výrazné, ale i tak, lze pozorovat vliv umístění požárního zatížení a ventilace na rozložení teploty v požárním úseku. Termočlánek E6h7, který je blíže u stěny je o 16 °C teplejší než sensor umístěný v prostoru. Díky lokaci zdroje požáru je nosník E ze všech nejvíce zatížený po své délce teplotními rozdíly. Ty jsou téměř 350 °C. U sousedních vazníků, vzdálených 6 m od

středu požáru na každou stranu, bylo naměřeno na termočlátku D5h7 363 °C a na termočlátku F5h7 425 °C. Vzhledem k ventilačním podmínkám je senzor D5h7 ovlivněn prouděním chladnějšího vzduchu. Teplota plynu v objektu výrazně klesala s rostoucí vzdáleností od zdroje požáru. U střechy ve výšce 10 m nad podlahou byla nejvyšší teplota 90 °C na senzoru E5h10 až po 6 minutě simulace. Pro přehlednost je časová osa na grafu zobrazena pouze do 30 minut.



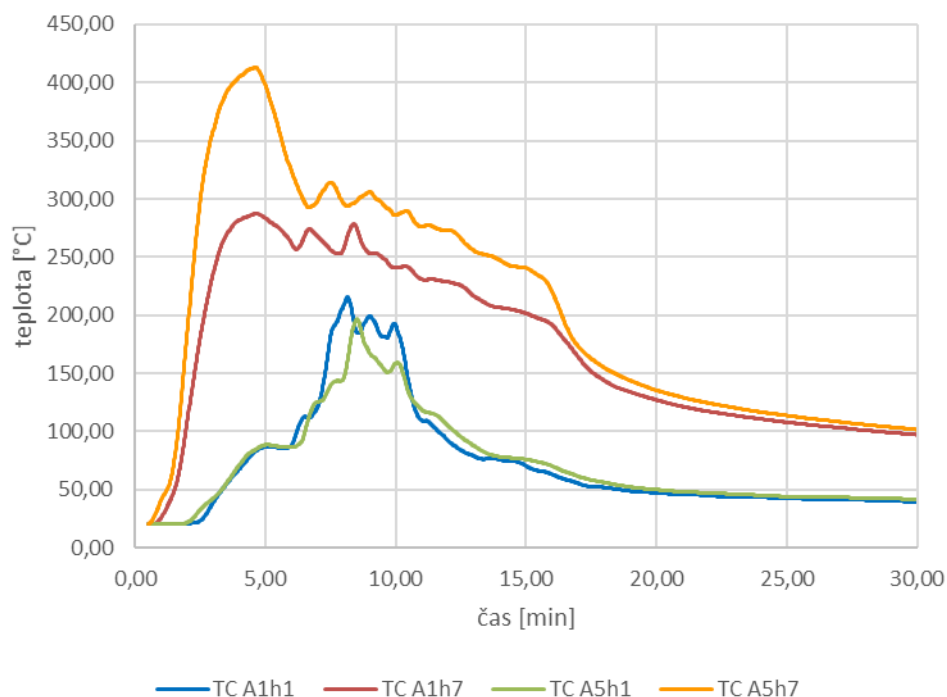
Graf 13 Teplota plynu při požáru s 2 otvory na úrovni spodní hrany vazníku.

Jako v předchozích modelech se jedná o lokální požár, v objektu nedošlo k prostorovému vzplanutí. Proudění horkých plynů je ale mnohem intenzivnější a je ovlivněno velikostí a umístěním ventilačních otvorů. Křivky na grafu 14 vykreslují teplotu v rozích objektu ve výšce 7 m nad podlahou na termočláncích A1, A6, H1 a H7. Distribuce horkých plynů je v prostoru nerovnoměrná. Jelikož dveře nejsou umístěny ve středu haly, ale 12 m od kraje je část prostoru ochlazována prouděním studeného vzduchu od otvorů. Na termočláncích H1 a H7, které jsou nejvíce vzdálené ventilačním otvorům, teplota nepřesáhne hodnotu 25 °C. A naopak opačná část haly, která je blíže dveřím je viditelně teplejší. V této části dochází, vlivem proudění horkých plynů, k větší kumulaci teplých plynů v rohu objektu. Teplota na termočlátku A6h7 dosahuje hodnoty 380 °C.



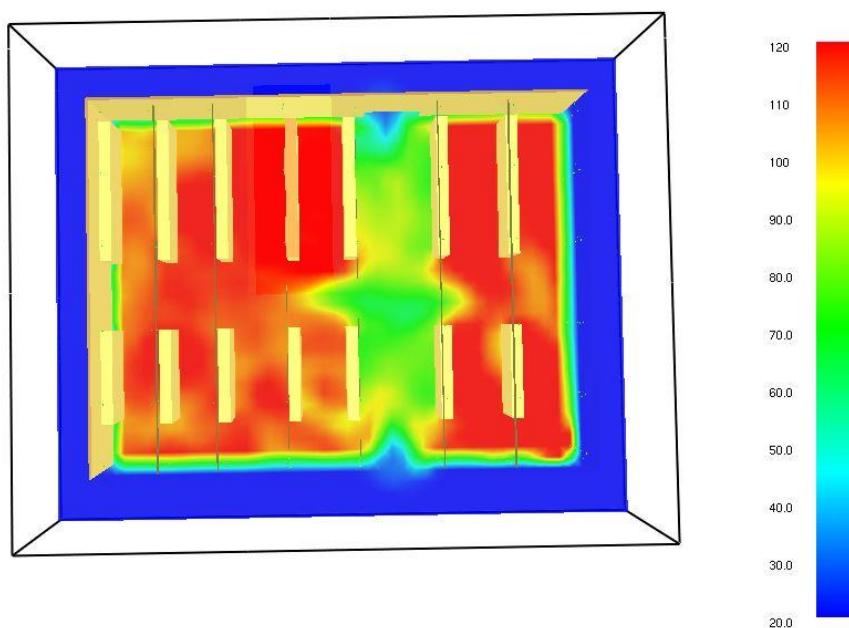
Graf 14 Teploty plynu v rozích požárního úseku.

Graf 15 popisuje vývoj teploty plynu u svislých nosních konstrukcí A1 a A5 ve výškách 1 m a 7 m nad podlahou. Kdy A1 je rohový sloup a A5 je stěnový sloup umístěný v kratší stěně halového objektu. Nejvyšší teplota byla naměřena na termočlátku A5h7 a dosahovala hodnoty 415 °C kolem 4,5 minuty. Na sloupu A1 byla v této výšce nejvyšší teplota 290 °C. Ve výšce 1 m nad podlahou je naopak více zatížen teplotou rohový sloup A1. Sloup je ochlazován prouděním chladnějšího vzduchu, který je nasáván otvorem a nejvyšší teplota se pohybuje okolo 240 °C. Teplota plynu je ovlivněna vzdáleností od požárního zatížení, horké plyny se navíc kumulují mezi nehořlavými regály. Tento jev lze pozorovat i u předchozích numerických modelů.



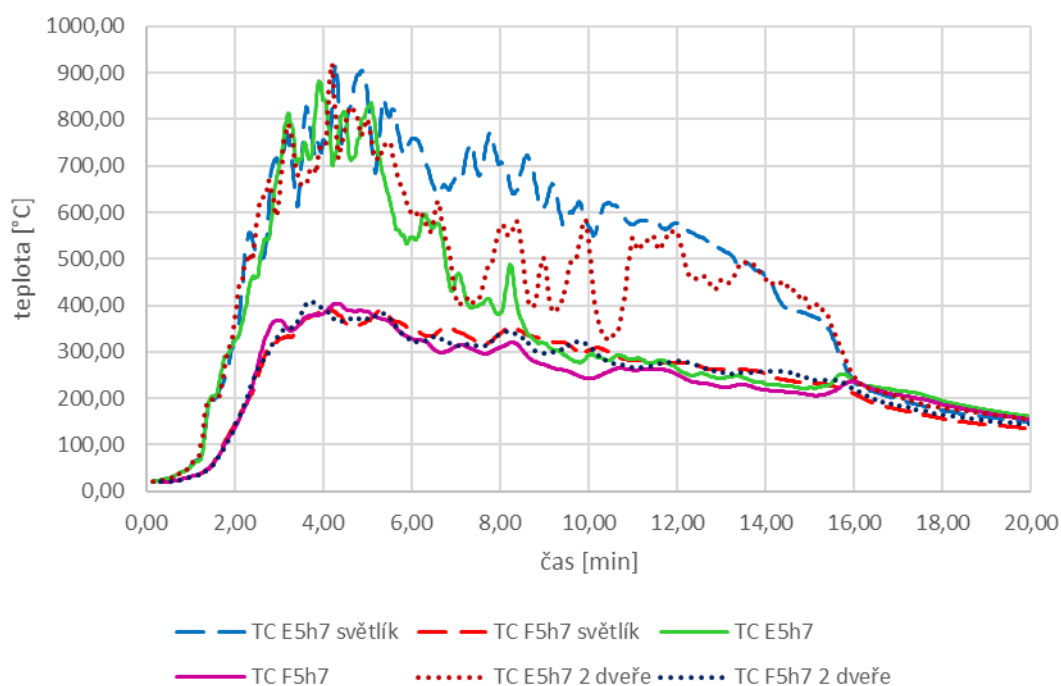
Graf 15 Teploty plynu po výšce sloupu A1 a A5.

Na obr. 41 je vykreslena ISO plocha ve výšce 1 m nad podlahou v necelé 7 minutě. Na obrázku je znatelný vliv proudění chladného vzduchu dveřními otvory umístěných v dlouhých stěnách haly. Na rozložení teplot v požární úseku mají účinek nejen ventilační podmínky, ale i celková kompozice umístění nehořlavých regálů. Na ISO ploše je pozorovatelné, jak je část objektu v ose A o poznání teplejší. V této části dochází k větší akumulaci horkých plynů.



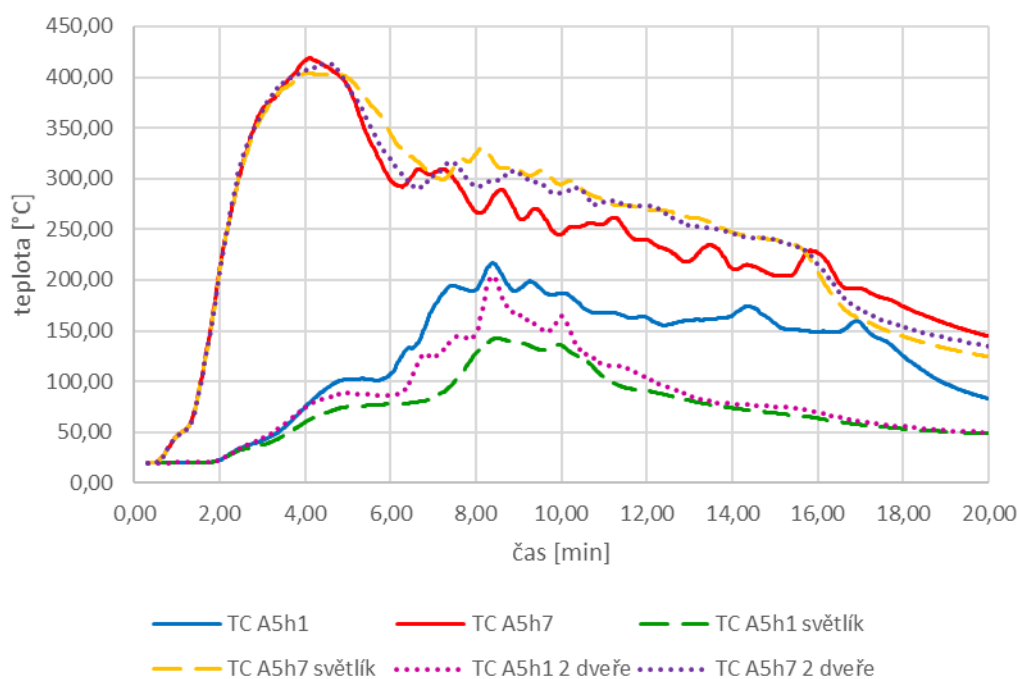
Obr. 41 Teplotní pole v čase 400 s ve výšce 1 m nad podlahou.

Níže uvedené grafy 16 a 17 srovnávají hodnoty teploty plynu z numerických modelů pod vazníkem a na sloupech. Celkem 3 numerické modely liší se v rozměrech a umístění ventilačních otvorů. První scénář má umístěné dveře o rozměrech 5 m x 3 m v dlouhé stěně haly a je na grafu znázorněn plnou čarou. Další požární scénář je v grafu naznačen čárkovaně a jedná se o případ, kdy je k dveřnímu otvoru namodelován navíc střešní světlík o celkových rozměrech 1 m x 1 m. Poslední model simuluje požár s dvěma otvory umístěnými naproti sobě v dlouhých stěnách o rozměrech 5 m x 3 m. V grafu je tento model popsán tečkovanou křivkou. Při porovnání teploty plynu pod vazníkem jsou největší rozdíly na termočlánci E5h7, který je umístěn přímo nad zdrojem požárního zatížení. Díky dostatečnému přísunu kyslíku dojde k intenzivnějšímu proudění vzduchu v prostoru. Nejvyšší teploty 980 °C bylo dosaženo v případě s dvěma protilehlými otvory. Maximální hodnoty teploty plynu na termočláncích E5h7 se liší nejvíce o 43 °C. Nejnižších teplot bylo dosaženo u požárního scénáře 2a s jedním otvorem v dlouhé stěně objektu. Z grafu 16 je patrné, že v případech s bohatší ventilací je proces hoření delší. Hodnoty teploty plynu jsou až do 16 minuty o poznání vyšší než v simulaci s jedním otvorem. V některých časech je rozdíl teplot až 300 °C. Naopak u termočlánci F5h7 jsou difference o poznání menší řádově do 100 °C.



Graf 16 Porovnání teploty pod vazníkem z modelů 2a, 2b a 2c ve výšce 7 m nad podlahou.

Co se týče svislých nosných konstrukcí jsou na grafu 17 porovnány teploty po výšce sloupu A5 ve výškách 1 m a 7 m nad podlahou. V počáteční fázi požáru jsou křivky téměř totožné, rozdíly v jejich průběhu jsou pozorovatelné po 4 minutě simulace. Maximální teploty byly zaznamenány v případě s jedním dveřním otvorem, po 5 minutě simulace ale teplota výrazněji klesala a byla o naopak nejnižší. Ve výšce 7 m nad podlahou jsou teplotní křivky podobné, rozdíly teplot jsou kolem 50 °C. Největší difference v průběhu teplot jsou ve výšce 1 m nad podlahou. Díky menšímu přístupu vzduchu neodchází horké zplodiny z prostoru tak rychle, proto jsou teploty vyšší u požárního scénáře s jedním otvorem až do 17 minuty. Nejmenší teploty jsou zaznamenány v případě numerického modelu se střešním světlíkem, kdy nedosahuje teplota plynu ani 150 °C a po 10 minutě lineárně klesá až pod 50 °C.

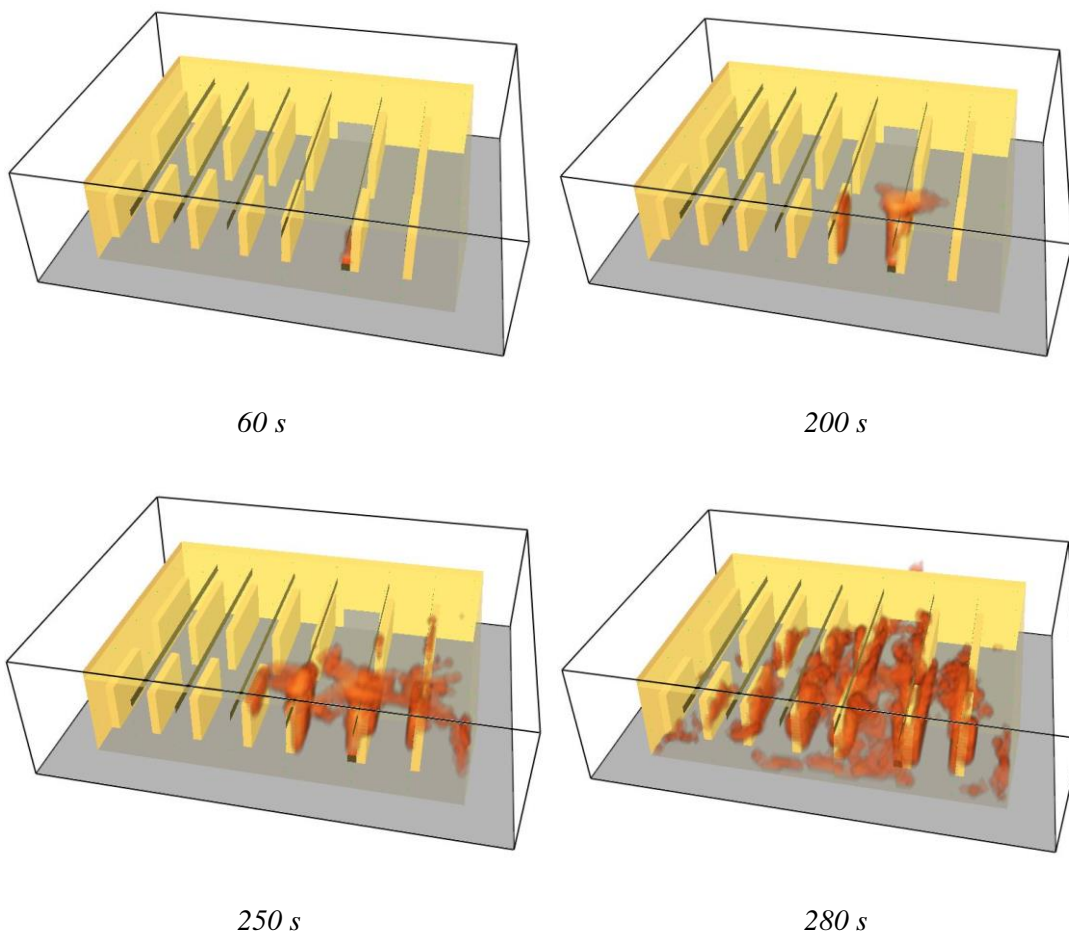


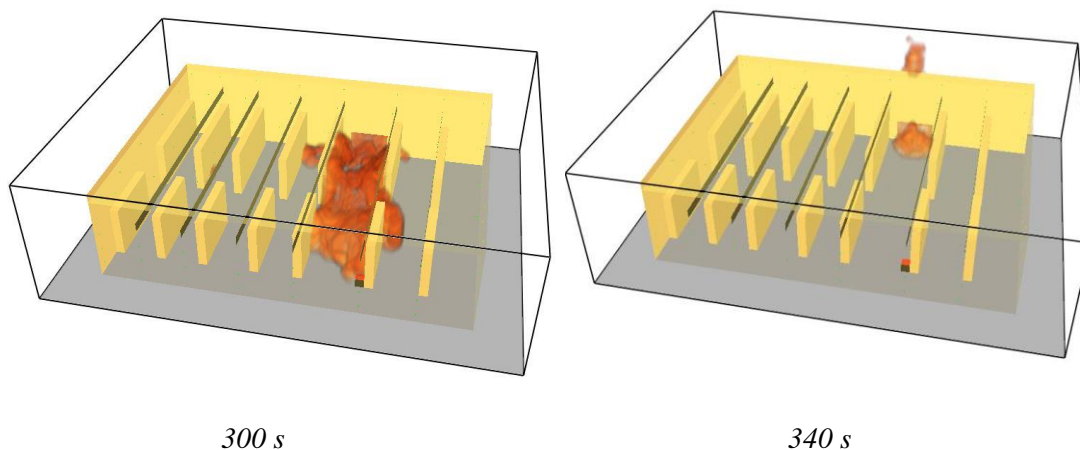
Graf 17 Porovnání teploty na sloupech z modelů 2a, 2b a 2c.

Obecně má na vývoj teploty horkých plynů v objektech do jisté míry vliv ventilace. Při porovnání obou grafů lze usoudit, že změna ventilačních podmínek nemá závratný účinek na maximální teploty plynu, tak jako na průběh požáru v požárním úseku. Plyny v požárním úseku se pohybují na základě rozdílu tlaků, který vzniká spotřebováváním kyslíku a ohřevem zplodin hoření. Platí, že čím je větší rozdíl teplot plynů, tím vyšší je tlakový rozdíl a plyny v prostoru se pohybují intenzivněji. V projekční praxi je velmi důležité hořící prostor správně ventilovat. Snižuje se tak možnost vzniku flashover efektu, dochází k snadnějšímu odstranění zplodin hoření a zlepšuje se viditelnost pro zásah HZS.

4.1.5 Požární scénář 3

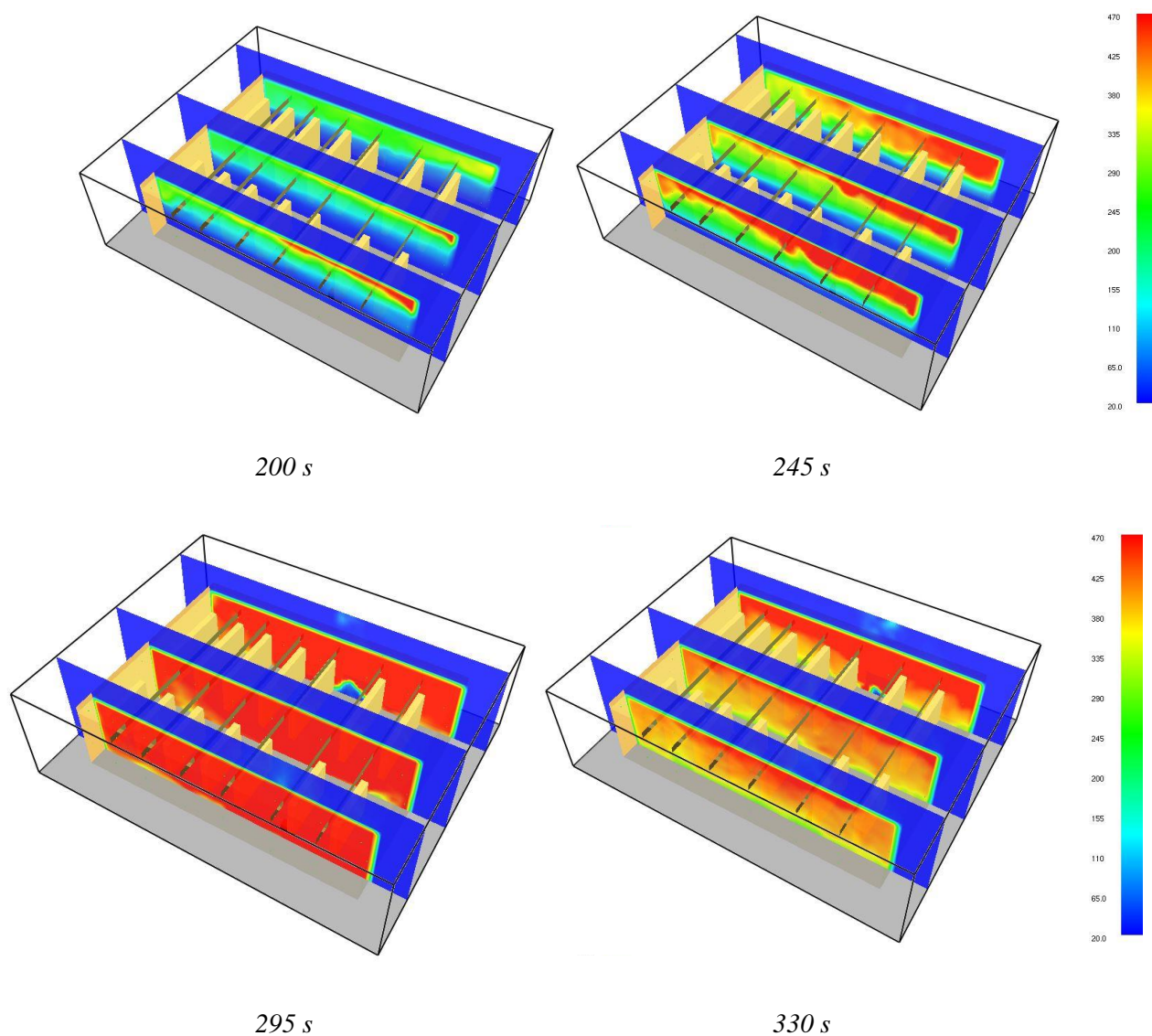
V tomto požárním scénáři je simulované šíření požáru. Při hoření vznikají spaliny, které jsou vysoce dráždivé a i jedovaté. Kouřové plyny obsahují drobné částice, které snižují viditelnost v požárním úseku. Chování požáru je v tomto případě velmi nepředvídatelné. Šíření požáru je závislé hlavně na množství okolního hořlavého materiálu. Požár vzniká v jednom ohnisku, ze kterého se dále šíří do okolí. Nejdříve je rychlost hoření způsobena hlavně iniciátorem hoření, tedy hořlavou kapalinou, která uvolňuje teplo až po počátečních 300 s. V první fázi požár pohlcuje pouze regály v blízkosti hořáku. Z vizualizace z postprocesoru SMV zobrazeném na obr. 42 je zřejmé, jak zpočátku požár setrvává pouze lokálně a postupně se plamen rozšiřuje po povrchu hořlavých regálů, které jsou v prostoru. Se stále se rozvíjejícím požárem narůstá sálavé teplo, které ovlivňuje i vzdálenější objekty.





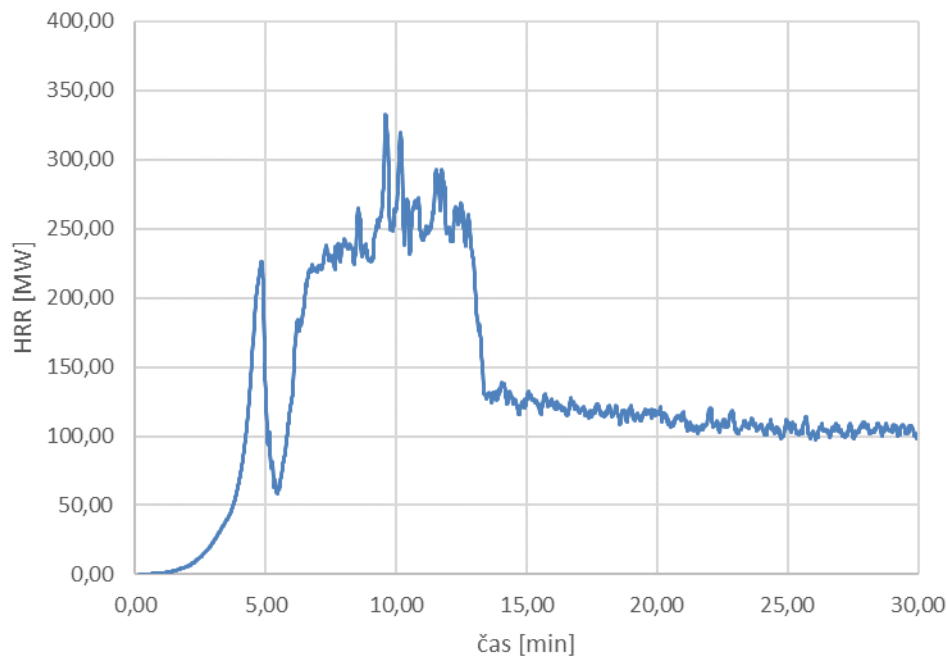
Obr. 42 Vizualizace numerického modelu ve Smokeview v různých časech.

V tomto požárním úseku se uvažují otevřené pouze jedny dveře o rozměru 5 m x 3 m umístěné v dlouhé stěně 12 m od kraje haly. Ventilací otvor je velmi malý a nestačí tak ochlazovat celý prostor. Teplé plyny a spaliny tak stoupají ke stropu a hromadí se mezi ocelovými vazníky, jak je vidět na obr. 43. Dále je zde patrné dosažení flashover efektu. Vlivem tepelného sálání zahřátých stěn a proudění horkých plynů dojde k zapálení všech hořlavých látek v celém prostoru. Z vizualizace je viditelné prošlehávání plamenů z otvoru. Po dosažení flashover efektu téměř došlo k vyhoření veškerého požárního zatížení a teplota plynu v prostoru začala pomalu klesat. Na obr. 43 jsou zobrazeny ISO plochy v různých řezových rovinách. Z obrázku lze pozorovat, jak se neutrální rovina posouvá směrem k podlaze. V určité fázi požáru dosáhne horní horká vrstva plynů úrovně podlahy. V rámci této vrstvy je teplota přibližně rovnoměrně rozložena. Tento stav lze označit za okamžik prostorového vzplanutí.



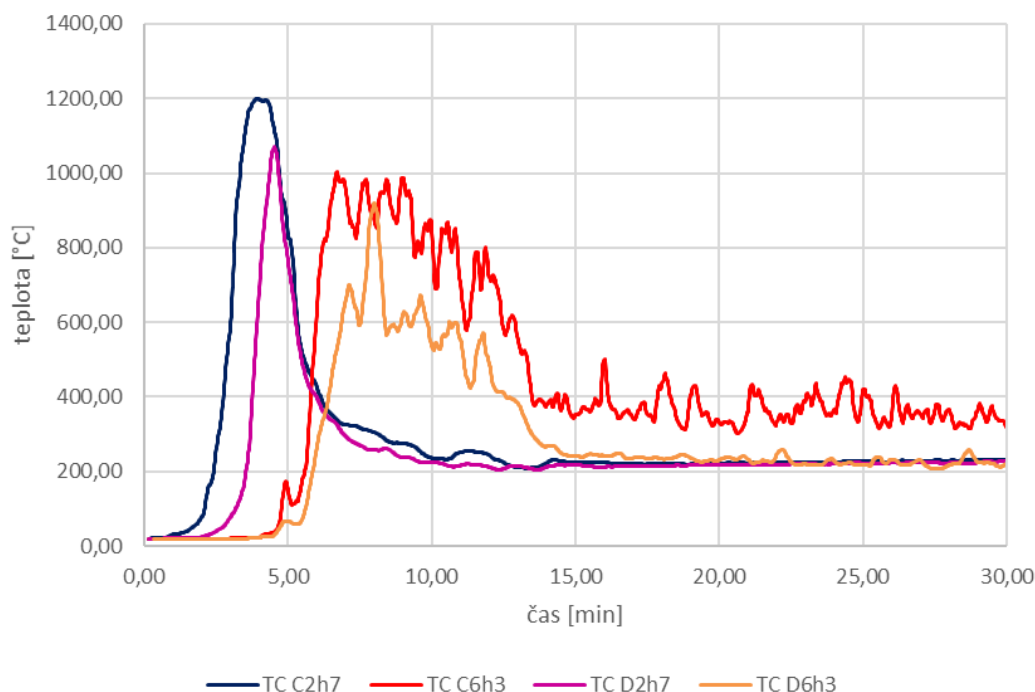
Obr. 43 Teplotní pole v rovinách $x = 3\text{ m}$, 15 m a 30 m v různých časech

Při hoření dochází k uvolnění velkého množství tepla, které je dále sdíleno s okolím. Teplota v požárním úseku velmi rychle stoupá díky zplodinám hoření. Požární zatížení je poměrně velké a dřevěné palety obsahují plasty a papírové krabice. S dalším rozvojem požáru tak roste i jeho výkon. Maximální uvolněné teplo dosahuje téměř hodnoty 350 MW během 10 minut, viz graf 18. Ve fázi útlumu oheň uhasíná převážně kvůli nedostatku paliva.



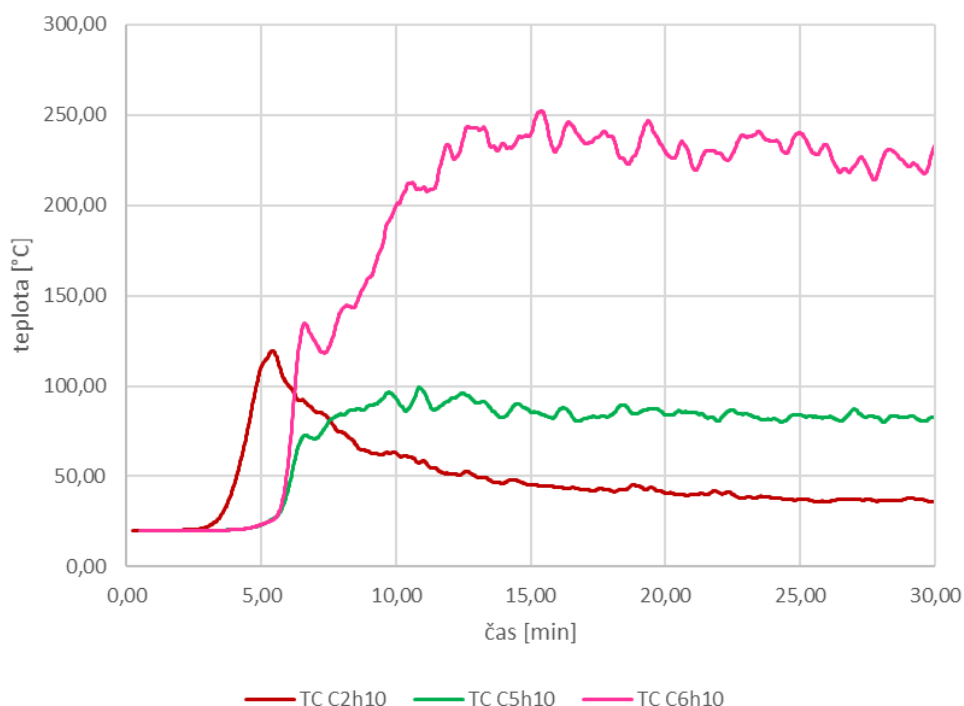
Graf 18 Maximální uvolněné teplo během šíření požáru.

Níže uvedený graf 19 zobrazuje rozložení teplot v několika polohách, jedná se o místa, kde byly naměřeny nejvyšší teploty. K největší nárůstu teplot dochází už v počáteční fázi po 3 minutě simulace v okolí zdroje požáru, kde je dosažena maximální hodnota teploty plynu 1208 °C na termočlánek C2h7. Na sousedním snímači jsou hodnoty teplot ve stejném čase až o 640 °C nižší, při vzdálenosti termočláneků 6 m. Významné teplotní odchylky pozorované v počáteční fázi požáru u různých termočláneků ve stejném čase výpočtu potvrzují postupné šíření požáru z jedné palety na druhou. V grafu 19 je tento jev nejvíce pozorovatelný na termočláncích C2h7 a D2h7. Teplotní pole je tak velmi nerovnoměrné a vznikají velké teplotní rozdíly na jednotlivých senzorech ve stejný čas. U čidlech umístěných blíže k ventilačnímu otvoru, byly zaznamenány menší teploty plynu, díky proudění chladného vzduchu, který přichází zvenku otvorem. Největší teplotní výkyvy jsou pozorované na termočláncích C6 a D6 ve výšce 3 m nad podlahou, které jsou umístěné až na druhé straně haly u ventilačního otvoru. Velké rozdíly jsou pozorované mezi 5 a 17 minutou simulace, tedy po celkovém vzplanutí. Během požáru teplota velmi výrazně osciluje vlivem turbulentního proudění horkých plynů, kdy dochází k neustálému pohybu plynů a par. Po vyhoření požárního zatížení se tyto rozdíly postupně zmenšovaly.



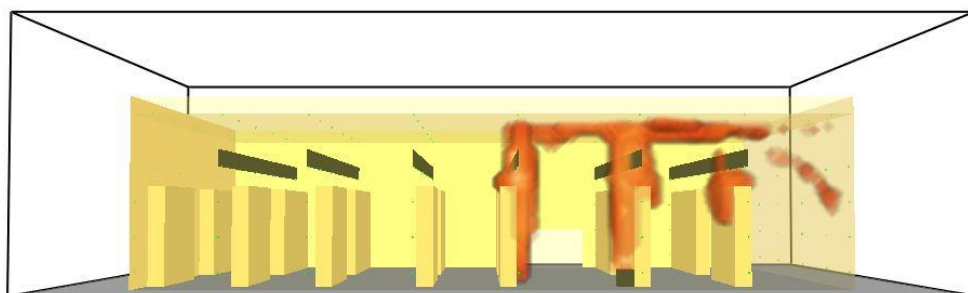
Graf 19 Naměřená teplota na termočláncích při šíření požáru ve výšce 7 m a 3 m.

Na rozdíl od malých obytných místností je v halovém prostoru dostatek vzduchu, který podporuje hoření. Plameny a horké plyny stoupají vzhůru a strhávají okolní vzduch. Požár funguje jako čerpadlo, které nasává okolní vzduch. Plyny, které jsou horké, mají nižší hustotu a tak mají tendenci stoupat směrem vzhůru. Vlivem vyšší teploty roste i tlak. U střechy ve výšce 10 m nad podlahou nejvyšší teplota dosahovala hodnoty 262 °C viz graf 20. Tato teplota byla na senzoru C6h10 umístěného u stěny v blízkosti ventilačního otvoru. Této teploty bylo dosaženo až po 15 minutě požáru. Naopak na sousedním termočláncu C5h10 teplota dosahovala sotva 100 °C. Na termočláncu C2h10, který je umístěný nad zdrojem požáru, teplota velmi rychle stoupla na 128 °C v prvních 5 minutách simulace a poté rychle klesla. Z průběhu jednotlivých křivek je patrné, šíření požáru na okolní objekty. Po dosažení flashover efektu se plyny hromadily v blízkosti dlouhé stěny s otvorem. Křivky na grafu níže jsou zobrazeny pouze do 30 minut simulace pro lepší přehlednost. Až do 60 minuty, kdy byl výpočet ukončen, se teplota na termočláncu C6h10 pohybovala stále kolem 200 °C.



Graf 20 Teplota plynu při šíření požáru ve výšce 10 m nad podlahou.

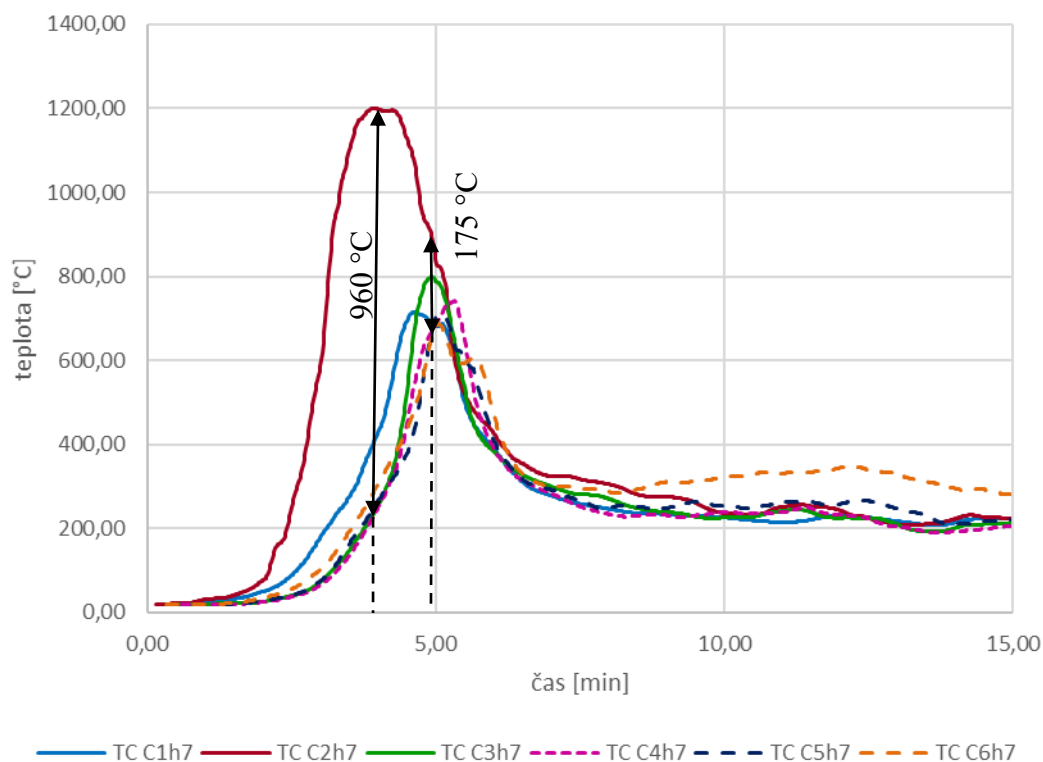
Na obr. 44 je ve softwaru SMV hala vyobrazena v čase 230 s, tedy v době, kdy bylo dosaženo nejvyšších hodnot. V momentě kdy plameny dosáhly stropu, požár se začal rozšiřovat velmi rychle do stran. Lze předpokládat, že nejvyšší teplota, která byla naměřená na senzoru je v tomto případě teplota plamene. Z obrázku je také viditelné šíření požáru na okolní regály.



Obr. 44 Řez halou ve SMV v čase 230 s.

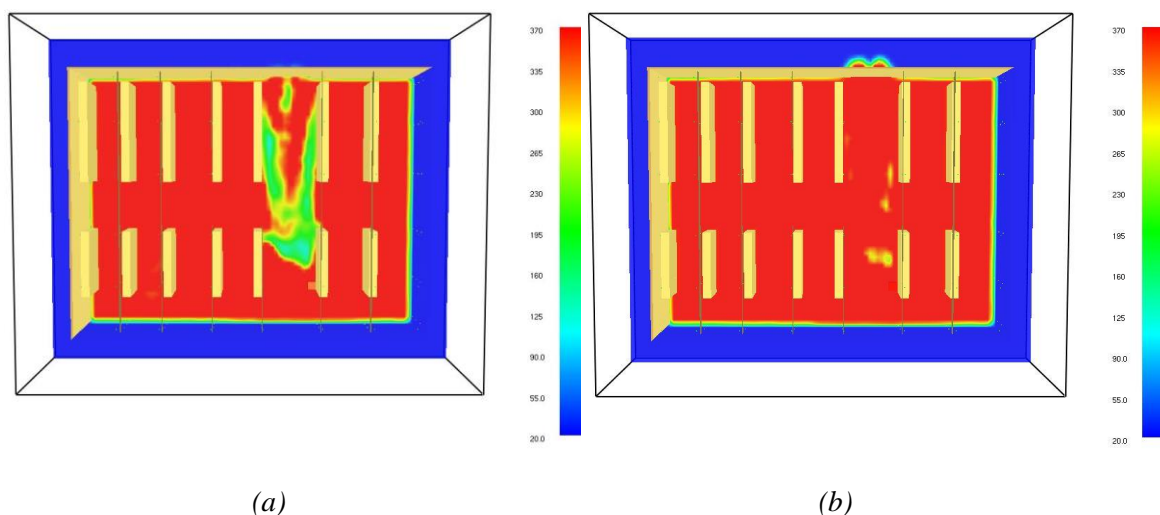
Během simulace došlo k flashover efektu a plamen šlehal na čidlo, které zaznamenávalo teplotu. Teplota konstrukce bude ve skutečnosti nižší, plamen nemá šanci nosník prohřát za krátkou dobu na tak vysokou teplotu. Tak vysoké teplotě je ocelový nosník vystaven pouze bodově a rozložení teploty podél nosníku je tak nerovnoměrné. Na grafu 21 jsou vykresleny křivky teploty po délce ocelového nosníku C. V prvotní fázi požáru teplota velmi rychle vystoupá na termočlánek C2h7, který je umístěn nad zdrojem požáru a během několik vteřin

opět rychle klesá. S rostoucí vzdáleností od zdroje požáru se naměřené teploty logicky snižují. Teplotní odchylka znázorněná na grafu níže je už v průběhu prvních 4 minut 960 °C. Kolem 5 minuty je už rozptýl rovný 175 °C. Lze usoudit, že teplota je ovlivněna především přímým kontaktem s plameny.



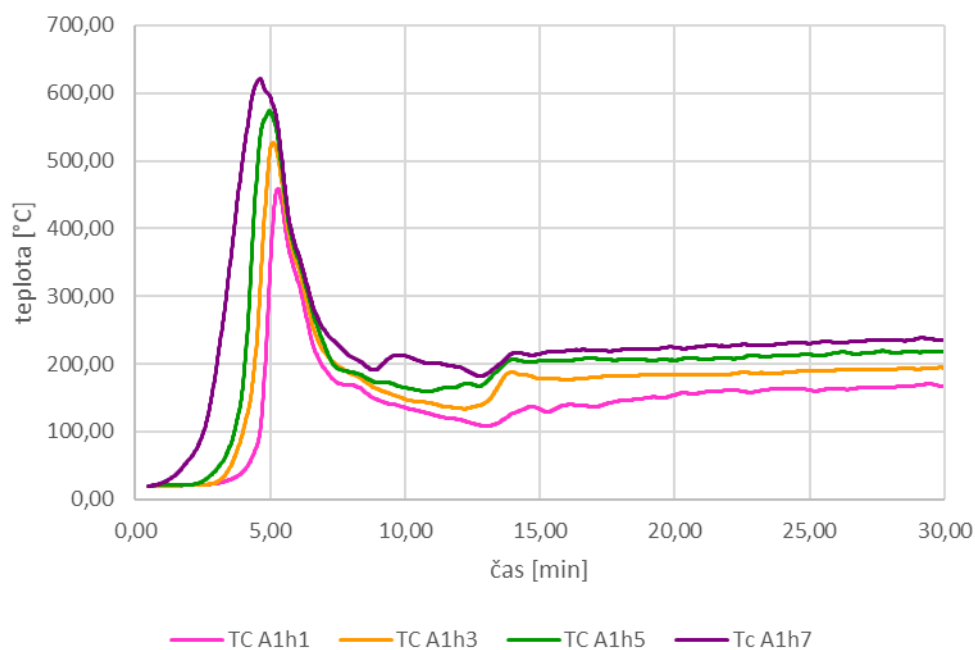
Graf 21 Nerovnoměrná teplota po délce nosníku C.

Výměna plynu s okolím probíhá pouze skrze dveřní otvor. Ve spodní části otvoru je nasáván vzduch do prostoru hoření a v horní části dveří horký plyn proudí směrem ven. Na půdorysu znázorněném na obrázku 45 je viditelný průtok horkého vzduchu, který odchází ventilačním otvorem ven z prostoru, dochází k prošlehávání plamene otvorem. Řezová rovina je ve výšce 1 m a 2 m nad podlahou. Obecně jsou teploty výrazně vyšší u zdroje požáru a naopak v blízkosti otvoru jsou nižší. Vyšších teplot je také dosažena v rohu haly, který je nejbližší zdroji požáru, díky proudění horkých plynů a menšímu přístupu vzduchu.



Obr. 45 Prodění teplých plynů v 300s: (a) 1 m nad podlahou; (b) 2 m nad podlahou

U svislých nosných konstrukcí byla nejvyšší teplota naměřena na sloupu A1 ve výšce 7 m nad podlahou. Sloup se nachází ve vzdálenosti 5 m od zdroje požáru. Maximální teplota plynu dosahovala hodnoty 639 °C v 4,3 minutě. Graf 22 popisuje teploty podél výšky sloupu A1. Naměřené hodnoty se postupně s klesající výškou sloupu směrem k podlaze snižují. Teplotu plynu v blízkosti konstrukčních prvků, v tomto případě nosníků, sloupů, střechy a stěn lze považovat za stejnou pro všechny prvky. Vzhledem ke skutečnosti, že v požárním úseku nastal flashover efekt, měly by být všechny konstrukční prvky navrženy na nejvyšší dosaženou teplotu.



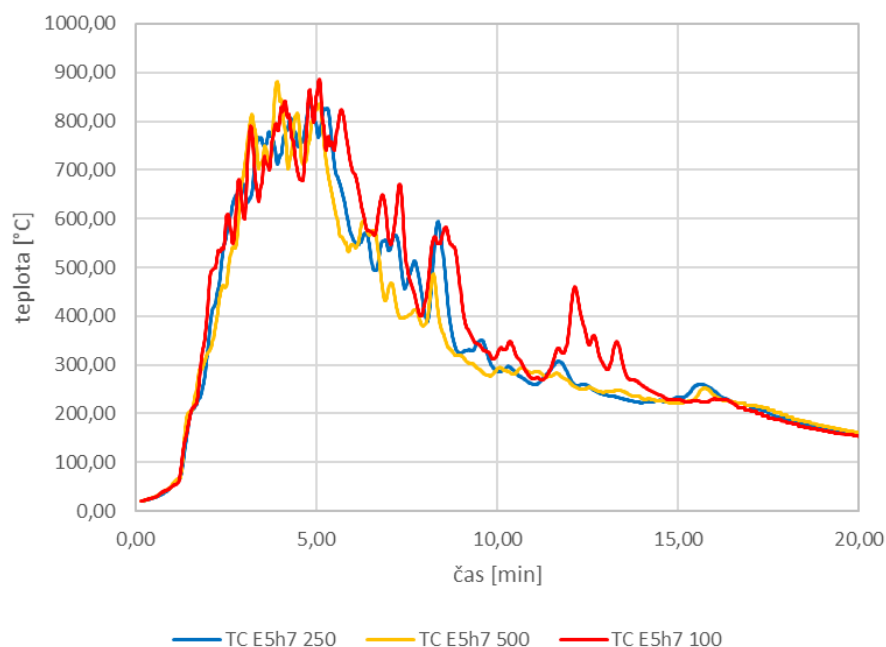
Graf 22 Naměřená teplota na sloupu A1 ve výšce 1 m, 3 m, 5 m a 7 m nad podlahou.

V neposlední řadě je potřeba zmínit, že tento požární scénář není tak reálný. V případě skladovací haly, kde jsou skladovány vysoce hořlavé materiály, jsou vždy přítomny prvky aktivní požární ochrany v podobě sprinklerů, elektrické požární signalizace, zařízení odvodu kouře a tepla apod. Pro numerický model bylo ale cílem simulovat ten nejhorší možný případ, kdy žádné z těchto zařízení nefungují.

5 Analýza citlivosti sítě

Rozměry rastru výpočetní sítě patří mezi jeden z nejdůležitějších parametrů, které je třeba brát v úvahu při sestavování numerického modelu. Během simulace vychází software FDS ze zákonů zachování hmoty, hybnosti a energie, a to na úrovni zvolených kontrolních objemů. Program FDS je založen na aproximacích druhého řádu časových derivací podle Navier-Stokesových rovnic a z tohoto důvodu může vzniknout chyba jako důsledek parciálních derivací, úměrná druhé mocnině časového kroku nebo velikosti kontrolní buňky. Zmenšením velikosti kontrolního objemu na polovinu se velikost možné chyby teoreticky sníží na čtvrtinu, ale potřebný výpočetní čas vzroste přibližně 16x. Při volbě jemnosti výpočetní sítě je tedy velmi důležité odhadnout, do jaké míry dokáže přesnost výsledků vyvážit náklady spojené s dobou na výpočet [11].

Cílem studie citlivosti numerického modelu je ověřit vliv velikosti výpočtové sítě na přesnost výsledků. Vzhledem k velké složitosti a dlouhé době potřebné k řešení je studie citlivosti provedená pouze u dvou požárních scénářů. Výpočetní síť numerického modelu je podrobněji popsána v kapitole 3.3. Na počátku modelování byla zvolena hrubší síť 1000^3 mm, aby bylo jednodušší ověřit správnost modelu. S klesající velikostí jednotlivých buněk roste čas potřebný pro výpočet. U požárního scénáře 2a z kapitoly 3.4.1 byla vzhledem k velikost modelované haly použita jemnější síť pouze v okolí zdroje požáru. Porovnávány byly sítě o velikosti kontrolních objemů 500^3 mm, 250^3 mm a 1003^3 mm. Na grafu 23 jsou srovnány výsledné hodnoty plynu ze všech numerických modelů požárního scénáře 2a. Teploty uvedené v grafu jsou měřené termočláncích E5 a D5 ve výšce 7 m nad. Z grafu také je lehce pozorovatelné, jak z každých zjemněním sítě je dosaženo vyšších hodnot. Křivka sítě 250^3 mm je téměř proložena mezi hrubší a jemnější sítí.



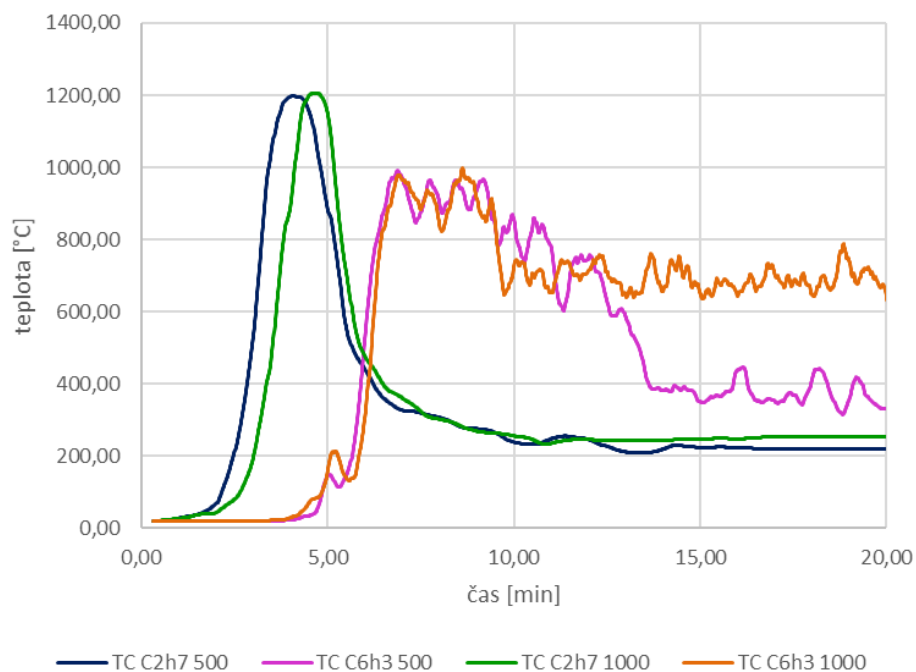
Graf 23 Srovnání sítě 100³ mm, 250³ mm a 500³ mm u termočlánku E5h7.

V tabulce 3 jsou porovnány teploty ze všech výpočetních sítí v 3 a 7 minutě simulace. Rozdíly teplot z modelů jsou v 3 minutě až 200 °C, což je už poměrně vysoký rozdíl. Naopak s narůstajícím časem se, až na výjimky, rozdíly zmenšují a v 7 minutě jsou pouze kolem 50 °C. Pro účely diplomové práce bylo zvolena síť 250³ mm. Další zjemnění sítě by způsobilo zbytečné navýšení výpočetního času, který byl už v tomto případě v řádech týdnů.

tab. 3 Srovnání teplot v čase 180 s a 420 s.

180 s		420 s	
Síť [mm]	Teplota [°C]	Síť [mm]	Teplota [°C]
100 ³	641	100 ³	540
250 ³	572	250 ³	519
500 ³	775	500 ³	481

Analýza citlivosti sítě byla provedena i u modelu z kapitoly 3.4.5. Z časových důvodů byly provedeny pouze dvě simulace o velikosti kontrolních objemů 500³ mm a 1000³ mm. Na grafu 24 jsou porovnávány křivky z obou modelů na termočláncích C2h7 a C6h3. Jedná se o senzory, kde byly naměřeny nejvyšší teploty plynu. V tomto případě je rozdíl mezi hodnotami mnohem viditelnější, rozdílný je i průběh křivek hlavně u TC C6h3 po 10 minutě simulace. Model s jemnější sítí má už v počáteční fázi výrazně větší odchylky od modelu s hrubší sítí.



Graf 24 Srovnání sítě pro šíření požáru 500³ mm a 1000³ mm.

Tabulky 4 a 5 porovnávají naměřené hodnoty z obou modelů s jemnější a hrubší sítí v různém čase. Do 10 minuty simulace se teploty liší maximálně o 170 °C. Zjemněným výpočetní sítě tedy došlo k zpřesnění modelu, nejvýraznější změny jsou evidentní u termočlánku C6h3 po 10 minutě, kde je rozdíl teplot až 350 °C. Lze usoudit, že zjemnění sítě v tomto modelu mělo velký význam a další zmenšení výpočetních buněk lze jen doporučit.

tab. 4 Srovnání teplot v čase 240 s u TC C2h7.

240 s	
Sít' [mm]	Teplota [°C]
500 ³	1198
1000 ³	1031

tab. 5 Srovnání teplot v čase 480 s u TC C6h3.

480 s	
Sít' [mm]	Teplota [°C]
500 ³	909
1000 ³	844

6 Závěr

Numerické modely se v poslední době staly vysoce účinným nástrojem při návrhu požární bezpečnostního řešení. Umožňují odhadnout vývoj požáru a kouře v požárním úseku, včetně teploty a rychlosti plynu. Pro simulaci vývoje požáru je v dnešní době velmi oblíbená metoda CFD (Computational Fluid Dynamics) neboli matematicko-fyzikální numerické řešení proudění tekutin. Pro výpočet rozložení teplotní pole v řešené halové budově byl výpočet proveden pomocí softwaru FDS verze 6.6.0.

U velkých objektů dochází nejčastěji k lokálním účinkům požáru, kdy je rozložení teploty v požárním úseku nerovnoměrné. Požáry v uzavřených prostorech se zpravidla vyznačují silným zakouřením a vysokou teplotou. Ačkoliv je ocel nehořlavým stavebním materiálem, její chování při požáru lze považovat za velmi nebezpečné. Při zahřátí na vyšší teplotu dochází k nárůstu deformace ocelových prvků. Jakmile se prohřejí na teplotu nad 400 °C, ztrácí svou pevnost. Nebezpečí deformace a zřícení je zvláště výrazné u nosných ocelových prvků stropních konstrukcí. Požární odolnost ocelových konstrukcí je dosažena v okamžiku, kdy teplota konstrukce dosáhne kritické hodnoty. Kritická teplota oceli je obvykle uvažována cca 450 °C.

Pro účely diplomové práce byla provedena analýza několika vybraných požárních scénářů v halovém objektu. V projektové praxi je možné stanovit nekonečný počet možných požárních scénářů, ale analyzovat všechny možné varianty je neúčelně a často také nereálné. Z toho důvodu jsou jednotlivé požární scénáře zvoleny tak, aby pokryly nejvíce nepříznivé reálné případy vzniku požáru. Teplotní analýza požárních scénářů zahrnuje vliv ventilačních podmínek na teplotu plynu a proudění horkých plynů v požárním úseku. Teplota plynu je sledována v blízkosti nosných konstrukcí, převážně v blízkosti sloupů a spodní hrany příhradového vazníku. První požární scénář simuluje hoření vysokozdvížného vozíku. Další požární scénáře se zabývají lokálním požárem dřevěných palet s PET lahvemi v kartonových krabicích. Poslední scénář popisuje šíření požáru mezi paletami, které jsou zapáleny v důsledku požáru hořlavé kapaliny.

V případě požárního scénáře simulující vysokozdvížný vozík byly naměřeny velmi nízké teploty plynu v blízkosti ocelového vazníku. Nejvyšší hodnoty teploty plynu byly naměřeny na senzoru, který je umístěn až u stěny halového objektu. Teplota dosahovala pouze hodnot 60 °C kolem 20 minuty simulace. Vzhledem k nízkým teplotám u tohoto požárního scénáře, lze usoudit, že teploty nebudou mít výrazný vliv ani na ocelové nosné konstrukce. V numerických

modelech požáru dřevěných palet s PET lahvemi bylo provedeno více simulací, kde se měnily ventilační podmínky v požárním úseku. První scénář má umístěné dveře o rozměrech 5 m x 3 m v dlouhé stěně haly. V další požární scénář je k dveřnímu otvoru namodelován navíc střešní světlík o celkových rozměrech 1 m x 1 m. Poslední model simuluje požár s dvěma otvory umístěnými naproti sobě v dlouhých stěnách o rozměrech 5 m x 3 m. Výsledky z jednotlivých simulací ukazují, že vyšší teploty plynu je dosaženo v modelu, kde je zajištěn větší přístup vzduchu ventilačními otvory. V důsledku dostatečného přísunu kyslíku dochází k intenzivnějšímu proudění vzduchu a nový kyslík v objektu podporuje další hoření. Na spodní hraně vazníku byla v tomto případě naměřena nejvyšší teplota 980 °C přímo nad zdrojem požáru. S rostoucí vzdáleností od zdroje požáru se teplota snižovala. Nižších teplot je dosaženo v případě s jedním otvorem v dlouhé stěně objektu. V jednotlivých numerických modelech se maximální naměřená teplota plynu lišila o necelých 50 °C. Změna ventilačních podmínek měla velký vliv na průběh požáru po dosažení nejvyšších hodnot, kde už byly rozdíly mezi teplotami až 300 °C. U svislých nosných konstrukcí byly naopak naměřeny nejvyšší teploty v numerickém modelu s jedním dveřním otvorem. Teplota plynu po výšce sloupů byla nejvíce ovlivněna pozicí požárního zatížení. Nejvyšší teploty jsou zaznamenány na sloupu E6, který je umístěn nejbližší požárnímu zatížení v dlouhé stěně objektu. Naopak na stěnovém sloupu A5 umístěném v krátké stěně objektu byla dosažena nejvyšší teplota 415 °C. Podobná teplota byla vypočítána i na rohovém sloupu A6. Zatímco na protilehlém rohovém sloupu A1 dosáhla nejvyšší teplota 289 °C.

V numerickém modelu simulující šíření požáru byla nejvyšší teplota plynu pod vazníkem. Při hoření došlo k uvolnění velkého množství tepla, které bylo dále sdíleno s okolím. Zpočátku požár setrval pouze lokálně a postupně se plamen rozšiřoval po povrchu hořlavých regálů, které jsou umístěné v prostoru. Nejvyšší teplota dosáhla hodnoty 1208 °C už po 3 minutě simulace nad zdrojem požáru. V momentě kdy plameny dosáhly stropu, požár se začal rozšiřovat velmi rychle do stran až došlo k flashover efektu, tedy celkovému vzplanutí. Tento požární scénář simulovat případ, kdy nefungují žádné aktivní požárně bezpečnostní zařízení. Požární scénář není tak úplně reálný. Ve skladovacích halách tohoto typu je flashover efekt velmi nepravděpodobný, protože zde bývají přítomny prvky aktivní požární ochrany v podobě sprinklerů, elektrické požární signalizace, zařízení odvodu kouře a tepla apod. Ve všech případech, kde lze celkové vzplanutí očekávat, by bylo efektivnější použít zónový model požáru.

V numerických modelech naměřeny poměrně vysoké hodnoty teploty plynu v halovém objektu. Teplota nad 400 °C, při které se snižuje mez kluzu oceli, byla měřitelná ještě ve vzdálenosti 6 m od zdroje požáru. Proto je velice důležité znát využití objektu a podle toho model přizpůsobit a vytvořit tak individuální požární scénář pro konkrétní halový objekt. Přesnost numerického modelu značně závisí na přesnosti zadaných vstupních dat, proto je důležité, co nejvíce znát řešený prostor a mít k dispozici všechny potřebné údaje. Model je tak velmi individuální. Jiný průběh má požár ve skladové hale a jiný v hale pro sportovní účely. Je třeba věnovat pozornost geometrii objektu, vlastnostem použitých materiálů, ventilačním podmínkám a poloze požárního zatížení. Pro nalezení nejzávažnějšího požárního scénáře je doporučeno simulovat několik případů s různými vstupními daty a jejich kombinací. Vždy je nutné přistupovat zvlášť ke každé problematice řešeného objektu.

Seznam obrázků

Obr. 1 Normová teplotní křivka [4].	12
Obr. 2 Normová teplotní křivka [6].	12
Obr. 3 Energetická rovnováha pro plně rozvinutý požár v místnosti [8].	13
Obr. 4 Dvou zónový model požáru [8].	15
Obr. 5 Plameny při požáru v uzavřeném prostoru [10].	16
Obr. 6 Základní princip CFD modelu [8].	17
Obr. 7 Schématické zobrazení procesu pyrolýzy a procesu hoření [11].	19
Obr. 8 Průběh t-kvadratického požáru [8].	20
Obr. 9 Schéma procesu počítačového modelování požáru.	21
Obr. 10 Půdorys hangáru s vyznačenými zdroji požáru [13].	22
Obr. 11 Křivka HRR pro 1 požární scénář (požár letadla) [13].	23
Obr. 12 Křivka HRR pro 2 požární scénář (požár na horní palubě letadla) [13].	23
Obr. 13 Křivka HRR pro 3 požární scénář (lokální požár) [13].	24
Obr. 14 Rozložení teplot v objektu v 1134 sekundě [14].	25
Obr. 15 Reálný požár:(a) rozložení teplotního pole; (b) teplotní křivka pro reálný požár [14].	26
Obr. 16 Normový požár:(a) teplotní pole; (b) normová teplotní křivka ISO [14].	26
Obr. 17 Schématický pohled na halu Ruukki Express [15].	28
Obr. 18 Idealizovaný řez haly pro FDS model.	29
Obr. 19 Idealizovaný půdorys pro FDS model.	29
Obr. 20 Umístění termočlánků po výšce.	30
Obr. 21 Umístění termočlánků v půdorysu.	31
Obr. 22 FDS model haly ve Smokeview.	32
Obr. 23 Půdorys s okótovaným umístěním zdroje požáru vysokozdvížného vozíku.	35
Obr. 24 Půdorys s vysokozdvížným vozíkem ve Smokeview.	36
Obr. 25 Půdorys s umístěním zdroje požáru ve Smokeview.	38
Obr. 26 Půdorys s okótovaným umístěním zdroje požáru palet.	38
Obr. 27 Půdorys se střešním světlíkem.	40
Obr. 28 Okótovaný půdorys s dveřmi.	41
Obr. 29 Půdorys haly pro šíření požáru ve SMV.	42
Obr. 30 Půdorys haly s okótovanou paletou u zdroje hoření.	42

Obr. 31 Rozložení teplotního pole ve výšce 7 m nad podlahou.....	44
Obr. 32 Proudění teplých plynů v 2900 s 1 m nad podlahou.....	46
Obr. 33 ISO plocha 1 m pod vazníkem z 420 s simulace.....	47
Obr. 34 ISO plocha v rovině X v 250 s.....	47
Obr. 35 Rozložení teplotního pole v úrovni zdroje požáru.....	49
Obr. 36 Prodění teplých plynů v 525 s: (a) 1 m nad podlahou; (b) 2 m nad podlahou.....	51
Obr. 37 ISO plochy uprostřed haly v různých časech.....	52
Obr. 38 ISO plochy 1 m pod vazníkem v čase 240 s.....	53
Obr. 39 Teplotní pole v čase 520 s: (a) 1 m nad podlahou; (b) 2 m nad podlahou.....	55
Obr. 40 FDS simulace v čase 260 s: (a) 7 m nad podlahou; (b) X = 30 m a Y = 40 m.....	58
Obr. 41 Teplotní pole v čase 400 s ve výšce 1 m nad podlahou.....	61
Obr. 42 Vizualizace numerického modelu ve Smokeview v různých časech.....	65
Obr. 43 Teplotní pole v rovinách x = 3 m, 15 m a 30 m v různých časech.....	66
Obr. 44 Řez halou ve SMV v čase 230 s.....	69
Obr. 45 Prodění teplých plynů v 300s: (a) 1 m nad podlahou; (b) 2 m nad podlahou.....	71

Seznam tabulek

tab. 1 Tepelně technické vlastnosti použitých materiálů.	32
tab. 2 Průběh výkonu iniciačního hořáku zadaného v FDS [18].....	43
tab. 3 Srovnání teplot v čase 180 s a 420 s.....	73
tab. 4 Srovnání teplot v čase 240 s u TC C2h7.....	74
tab. 5 Srovnání teplot v čase 480 s u TC C6h3.....	74

Seznam grafů

Graf 1 Porovnání ISO 834 a parametrické teplotní křivky.	14
Graf 2 Křivka HRR vysokozdvížného vozíku [7].....	37
Graf 3 Křivka HRR palet s PET lahvemi [17].	39
Graf 4 Teplota plynu při požáru vozíku na úrovni spodní hrany vazníku.	45
Graf 5 Naměřená teplota plynu ve výšce 1 m a 3 m nad podlahou.	46
Graf 6 Teplota plynu nad požárním zatížením na úrovni spodní hrany vazníku.	48
Graf 7 Maximální hodnoty HRR při požáru palet s PET lahvemi.	49
Graf 8 Naměřená teplota na sloupech A1 a A5 ve výšce 1 m a 7 m nad podlahou.	50
Graf 9 Teplota plynu v úrovni vazníku ve výšce 7 m nad podlahou.	54
Graf 10 Teplota na sloupech A1 a A5 ve výšce 1 m a 7 m nad podlahou.	55
Graf 11 Srovnání teplot plynu pod vazníkem.	56
Graf 12 Srovnání teplot plynu na sloupech.....	57
Graf 13 Teplota plynu při požáru s 2 otvory na úrovni spodní hrany vazníku.	59
Graf 14 Teploty plynu v rozích požárního úseku.....	60
Graf 15 Teploty plynu po výšce sloupu A1 a A5.....	61
Graf 16 Porovnání teploty pod vazníkem z modelů 2a, 2b a 2c ve výšce 7 m nad podlahou..	62
Graf 17 Porovnání teploty na sloupech z modelů 2a, 2b a 2c.....	63
Graf 18 Maximální uvolněné teplo během šíření požáru.....	67
Graf 19 Naměřená teplota na termočláncích při šíření požáru ve výšce 7 m a 3 m.....	68
Graf 20 Teplota plynu při šíření požáru ve výšce 10 m nad podlahou.	69
Graf 21 Nerovnoměrná teplota po délce nosníku C.....	70
Graf 22 Naměřená teplota na sloupu A1 ve výšce 1 m, 3 m, 5 m a 7 m nad podlahou.	71
Graf 23 Srovnání sítě 100 ³ mm, 250 ³ mm a 500 ³ mm u termočláncu E5h7.	73
Graf 24 Srovnání sítě pro šíření požáru 500 ³ mm a 1000 ³ mm.	74

Literatura

- [1] SHENG-GANG, Fan, Shu GAN-PING, She GUANG-JUN a Richard J.Y. LIEW. *Computational Method and Numerical Simulation of Temperature Field for Large-space Steel Structures in Fire* [online]. B.m.: The Hong Kong Institute of Steel Construction. 2014 [vid. 2018-03-10]. Dostupné z: doi:10.18057/IJASC.2014.10.2.
- [2] WALD, František. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 978-80-01-03157-5.
- [3] *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [4] KUČERA, Petr. *Požární inženýrství: dynamika požáru*. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2009. ISBN 978-80-7385-074-6.
- [5] WANG, Yong C. a Ian W. BURGESS, ed. *Performance-based fire engineering of structures*. Boca Raton, Fla.: CRC Press/Spon Press, 2013. ISBN 978-0-203-86871-3.
- [6] *Stanovení teplotního zatížení stavebních konstrukcí při požáru* [online]. [vid. 2018-05-20]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/stanoveni-teplotniho-zatizeni-stavebnich-konstrukci-pri-pozaru/>
- [7] AUDOUIN, Laurent a Mickael COUTIN. Experimental characterization of a forklift fire. In: *24th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 24) - 15th International Post-Conference Seminar on "FIRE SAFETY IN NUCLEAR POWER PLANTS AND INSTALLATIONS*. 2017.
- [8] KARLSSON, Björn a James G. QUINTIERE. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000. Environmental and energy engineering series. ISBN 978-0-8493-1300-4.
- [9] FRANSSEN, Jean-Marc, Raul ZAHARIA a Venkatesh KODUR. *Designing steel structures for fire safety*. Boca Raton: CRC Press/Balkema, 2009. ISBN 978-0-415-54828-1.
- [10] KUČERA, Petr, Tomáš PAVLÍK, Jiří POKORNÝ a Pavel SENOVSKÝ. FIRESAFE - Dynamika požáru. In: *Conference: XXIV. ročník mezinárodní konference Požární ochrana 2015*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava: Fakulta bezpečnostního inženýrství, Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, ve spolupráci s Českou asociací hasičských důstojníků, 2015. ISBN 978-80-7385-163-7.
- [11] WALD, František, Marek POKORNÝ, Kamila HOROVÁ, Petr HEJTMÁNEK, Hana NAJMANOVÁ, Martin BENÝŠEK, Marta KUREJKOVÁ, Ivo SCHWARZ, ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE a STAVEBNÍ FAKULTA. *Modelování dynamiky požáru v budovách*. 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.
- [12] KADLÍČEK, Matej. *Vplyv variability a neistoty vstupných parametrov na kvalitu výstupov požiarneho modelov*. Dizertační práce. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, 2018.

-
- [13] WALD, František. *COST TU0904: integrated fire engineering and response : case studies*. Prague: Czech Technical University, 2012. ISBN 978-80-01-05004-0.
- [14] SHI, Jianyong, Wenzhong SHI a Aizhu REN. An Integrated Model for the Fire Safety Analysis of Large Space Buildings. *Advances in Structural Engineering* [online]. 2011, **14**(5), 763–775. ISSN 1369-4332, 2048-4011. Dostupné z: doi:10.1260/1369-4332.14.5.763
- [15] WALD, František, Kamila CÁBOVÁ a Nikola LIŠKOVÁ. *Deliverable No D 1.2: Recommendation for FDS and Ozone simulations*. B.m.: Czech Technical University, Prague. 2018
- [16] ČSN 73 0845. *Požární bezpečnost staveb - Sklady*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [17] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION a SOCIETY OF FIRE PROTECTION ENGINEERS, ed. *SFPE handbook of fire protection engineering*. 3rd ed. Quincy, Mass. : Bethesda, Md: National Fire Protection Association ; Society of Fire Protection Engineers, 2002. ISBN 978-0-87765-451-3.
- [18] HOROVÁ, Kamila. *Modelování šíření požáru při navrhování konstrukcí*. Disertační práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze - Fakulta stavební, 2015.