



# DYNAMIKA POŽIARU V HALOVOM OBJEKTE

## FIRE DYNAMICS IN LARGE-SPACE BUILDING

ROMANA ERDÉLYIOVÁ, BOHUŠ LEITNER

**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 the fire load 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 under the fire load. The prediction of the gas temperature in the fire compartment is crucial for the structure design. The paper is focused on the selection of 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. The problem is solved by using FDS (Fire Dynamics Simulator) software based on the CFD (Computational Fluid Dynamics) method*

**KEYWORDS:** *CFD. FDS. Fire scenarios. Heat propagation.*

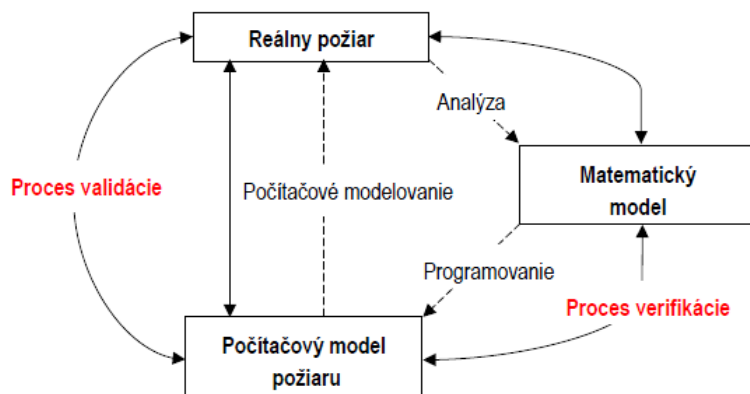
### ÚVOD

Odolnosť stavebných konštrukcií najvýznamnejšie ovplyvňuje materiál, ktorý bol využitý pri ich výstavbe. Materiál určuje nielen únosnosť konštrukcie, dovolené zaťaženie, konštrukčnú pevnosť, ale aj požiaru odolnosť. Konštrukčné systémy je možné rozdeliť na základe použitého materiálu na konštrukcie: drevené, betónové, železobetónové, ocelové a iné (Wald,2016). V stavebníctve dominujú zliatiny železa, najvýznamnejšou z nich je oceľ a železobetón. Ocelové konštrukcie sú typom konštrukcií s malou hmotnosťou, napriek tomu využiteľné na realizáciu veľkorozmerných stavieb, čo tieto konštrukcie dostalo do popredia v modernom stavebníctve. Ocelové konštrukcie predstavujú nemalé riziko v oblasti protipožiarnej bezpečnosti stavieb, nakoľko ich tepelná rozťažnosť má veľký vplyv na celkovú stabilitu stavby, nosnosť konštrukcie, čas evakuácie, vykonanie záchranných prác a bezpečnosť osôb v stavbe. Kľúčovým negatívnym faktorom pôsobenia požiaru na konštrukcie je tepelné zaťaženie. Na konštrukciu okrem tepelného zaťaženia pôsobí aj stále mechanické zaťaženie, na ktoré netreba zabudnúť (Belyer, 2003). Výsledkom tepelného zaťaženia je zmena mechanických a tepelných vlastností konštrukcie, zmena fyzikálnych vlastností, zohriatie konštrukcií na vysoké teploty a deformácie jednotlivých prvkov konštrukcií. Zmeny nastávajú predovšetkým na základe vysokej tepelnej vodivosti ocele a výrazne prejavujú pri dosiahnutí teploty 400 °C. Obyčajná konštrukčná oceľ stráca pri tepelnom zaťažení vyššom ako 300°C svoju tvrdosť a pevnosť (Kučera,2009). Pracovná teplota žiaruvzdornej ocele je od 300°C do 550°C. Ocele nad 550°C sú už vysokoteplotné ocele. Z fázového diagramu ocele vyplýva, že pri teplote približne 750°C sa mení ferit  $\alpha$  na austenit  $\gamma$ , pričom pri tejto fázovej zmene dochádza k strate pevnosti a k zvýšeniu tvárnosti (Wald, 2016). Pri teplote 800°C je už väčšina bežných konštrukčných ocelí nepoužiteľná.

### 1. SIMULÁCIA POŽIAROV

Pri matematickom modelovaní požiaru a straty stability konštrukcie je nevyhnutné riešenie fyzikálnych modelov prúdenia tekutiny, prestupu tepla, napäťovo–deformačnej analýzy poddajných telies a ďalších fyzikálnych javov, ktoré majú významný vplyv na presnosť riešenia problému (Wang,2013). Najpoužívanejším simulačným softvérom je Fire Dynamics Simulator (FDS). Softvér rieši štatisticky možné požiarne simulácie bez potreby uskutočnenia reálnych požiarnych experimentov. Nevyhnutné je zadanie správnych vstupných parametrov: geometria priestoru, jemnosť výpočtovej siete, použité materiály, odvetranie priestoru, kinetika horenia (Walton, 2016). Do modelu horenia v požiarom úseku vstupuje niekoľko parametrov: chemické zloženie splodín horenia, vlnová dĺžka, emisivita a iné. FDS model pracuje na základe výpočtu podielu, počtu radiačných paprskov a tepla uvoľneného radiáciou.

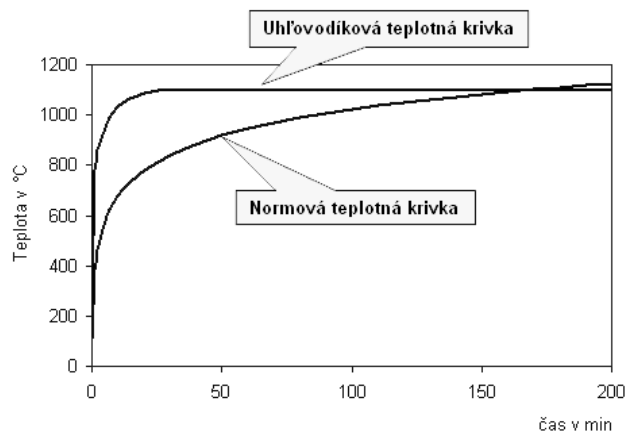
V prípade simulácie požiarov je nevyhnutné požiarne model validovať a verifikovať, aby bola zabezpečená jeho vedeckosť (Wald,2016). Validácia modelov bola zrealizovaná na základe experimentov uskutočnených odborníkmi z Berlína (hangár letiska), Peginu (športová hala) a z reálnych experimentov uskutočnených v Univerzitnom centre energeticky efektívnych budov ČVUT. Verifikácia modelu bola zrealizovaná v softvéri ANSYS Mechanical a ANSYS Fluent. Nesmieme zabudnúť ani na vykonanie analýzy citlivosti výpočtovej siete, ktorá bola uskutočnená pre sieť  $100^3\text{mm}$  (100 mm x 100 mm x 100 mm),  $250^3\text{mm}$  (250 mm x 250 mm x 250 mm) a  $500^3\text{mm}$  (500 mm x 500 mm). Podmienky aplikovateľnosti softvéru zobrazuje Obrázok 1.



Obrázok 1 Model aplikovateľnosti simulačného softvéru (Kadlic, 2018)

## 2. TEPLOTNÉ KRIVKY

V dynamike horenia rozoznávame štyri základné druhy nominálnych teplotných kriviek. Krivky určujú teplotu plynov v danom požiarne zaťaženom priestore. Základné druhy teplotných kriviek sú: Normová teplotná krivka, Teplotná krivka vonkajšieho požiaru, Krivka pomalého ohrevu, Uhľovodíková teplotná krivka (Kadlic,2019). Na Obrázku 2 sú znázornené normová a uhľovodíková teplotná krivka, používané pri modelovaní požiarneho zaťaženia konštrukcií. Spomínané krivky sú využívané v simuláciách opísaných v tomto príspevku. Krivky sú znázornené v závislosti na čase. V procese modelovania požiarov je dôležitým krokom výber vhodnej teplotnej krivky, nakoľko od nich je závislý priebeh požiaru a výsledky simulácií.



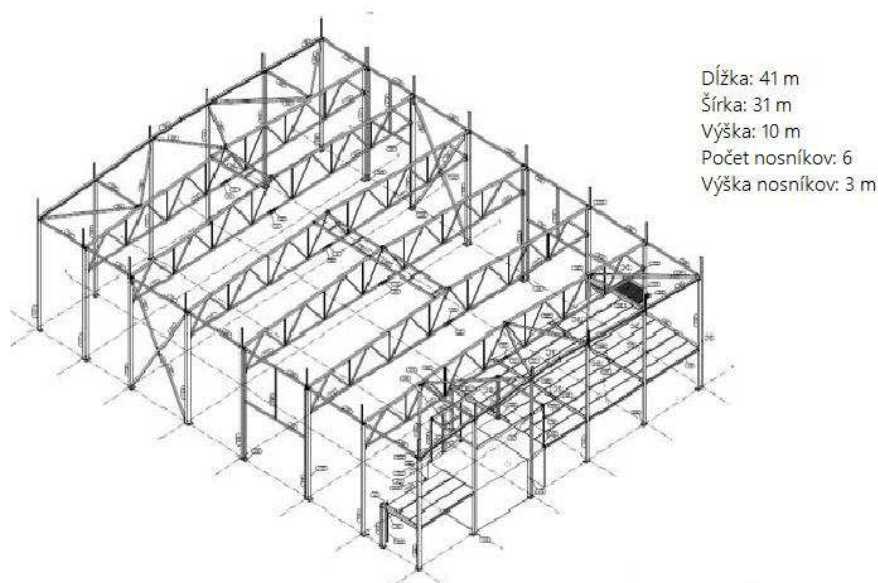
Obrázok 2 Teplotné krivky

## 3. NÁVRH POŽIARNÝCH SCENÁROV

Odolnosť konštrukčných prvkov a následne celú stabilitu stavby je možné predpovedať na základe ich teplotných zmien počas požiaru a znalostí z oblasti mechanických a fyzikálnych vlastností ocele a jej fázového diagramu. Uskutočnenie simulácií si vyžaduje výber vhodného simulačného nástroja a návrh požiarnych scenárov. Využitým softvérom bol Fire Dynamics Simulator (FDS).

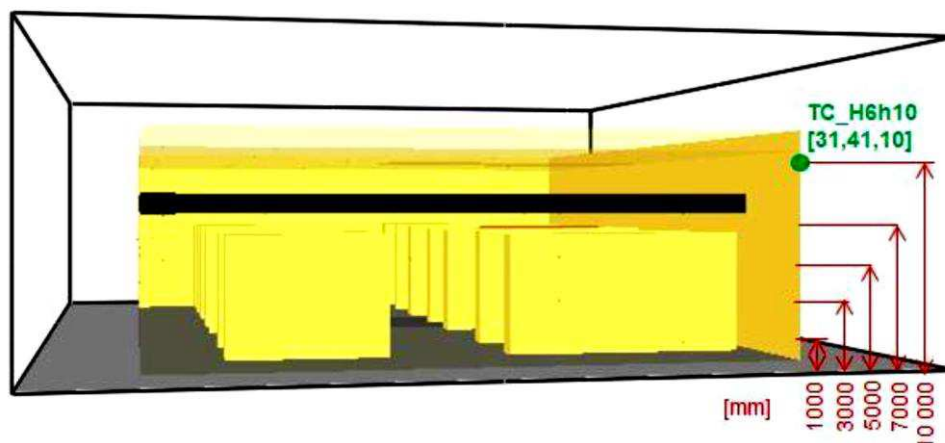
Pričom zostavenie požiarnych scenárov je jednou z najzložitejších úloh vyskytujúcich sa v požiarnom inžinierstve. Požiarne scenár chápeme ako súbor faktorov, podmienok, požiadaviek a poznatkov o konštrukčných, dispozičných a funkčných vlastnostiach skúmaného objektu. Požiarne scenár zahŕňa taktiež existujúce protipožiarne opatrenia, požiarne zaťaženie, zdroj požiaru a iné. Vďaka dôslednému zostaveniu požiarnych scenárov, môžeme pozorovať škody spôsobené požiarom v prípade rôznych faktorov prevádzky, účinnosť protipožiarne opatrení, čas evakuácie a čas bezpečného vykonania záchranných prác.

Skúmaný halový objekt bol vybraný na základe výskumu v rámci medzinárodného projektu Steel cladding systems for stabilization of steel buildings in fire (STABFI). Je navrhnutý tak, aby zobrazoval najpoužívanejší typ stavby v krajinách zapojených v projekte: Fínsko, Veľká Británia, Nemecko, Maďarsko a Česká republika. (STABFI, 2019) Skúmaný objekt zobrazuje Obrázok 3.



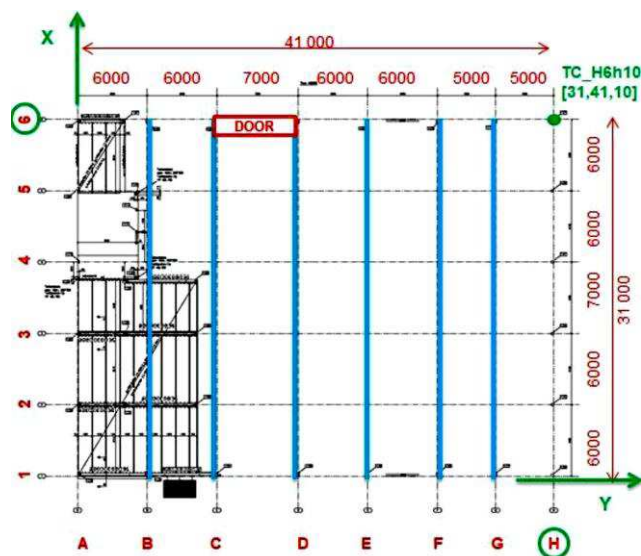
Obrázok 3 Geometria skúmaného objektu (STABFI, 2019)

Sledovaným parametrom požiarnych scenárov je rozloženie teploty plynov, ktoré bolo uskutočnené vďaka plášťovým termočlánkom (THERMOCOUPLE) inštalovaných v skúmanom objekte v niekoľkých pozíciách (Obrázok 4). Celkovo bolo simulovaných 153 senzorov s vlastnosťami materiálu Inconel 600, hustotou 8470kg/m<sup>3</sup> a mernou tepelnou kapacitou 0,444 kJ/(kg.K).



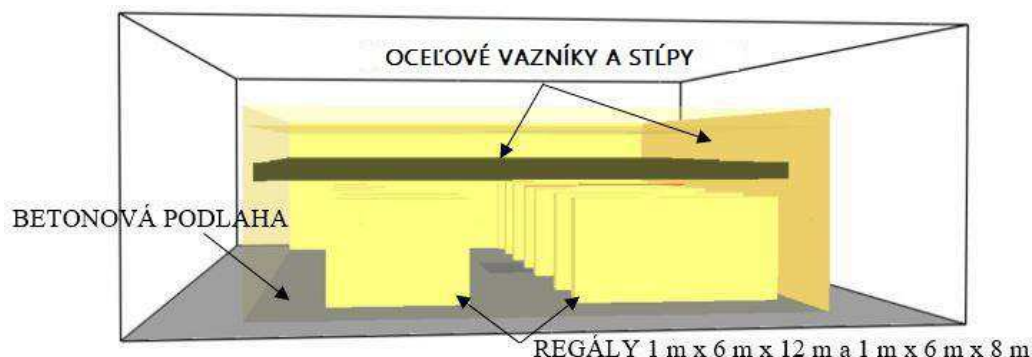
Obrázok 4 Umiestnenie termočlánkov vo výške

Jednotlivé termočlánky v zdrojovom kóde sú označené na základe ich umiestnenia. Napríklad označenie termočlánku H6h10 znamená, že sa nachádza v pôdorysnej časti H6 (podľa osí) vo výške 10 m nad podlahou.



Obrázok 5 Umiestnenie termočlánkov v priestore

V rámci výskumu požiarneho scenára je nevyhnutné správne definovať požiarne zaťaženie v priestore. Rozoznávame dva druhy požiarneho zaťaženia: stále a náhodné požiarne zaťaženie. Stále požiarne zaťaženie je tvorené materiálom konštrukcií, stien, podláh. Náhodná požiarne zaťaženie zase skladovaným materiálom, nábytkom atď. (Mózer, 2017)



Obrázok 6 Stále požiarne zaťaženie objektu

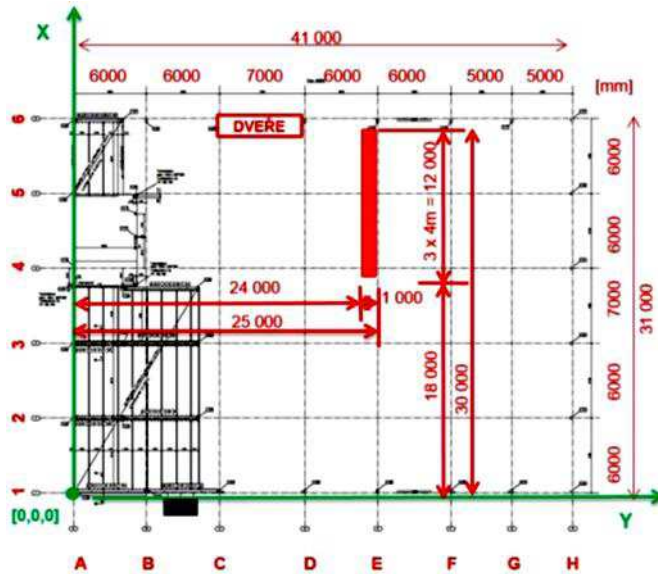
V rámci príspevku sú rozoberané dva požiarne scenáre, ktoré sa od seba líšia otvormi teda odvetraním priestoru. Na základe simulácie, tak môžeme pozorovať vplyv odvetrania na vývoj teploty a šírenie plynov počas požiaru v skúmanom objekte.

#### 4. POŽIARNÝ SCENÁR A

Zdrojom horenia sú drevené palety s polyethylentereftalátovými (PET) fľaškami, zabalenými v kartónových krabiciach (simulácia obalového materiálu). Palety sú kvôli prejazdu techniky (vysokozdvížneho vozíka) umiestnené dve a tri vedľa seba s geometriou 1 m x 4 m x 6 m. V prípade požiarneho scenára A uvažujeme o horení jednej palety, ostatné sú simulované ako nehorľavé, tvoriace prekážky prúdenia spodín horenia. Rýchlosť uvoľňovania tepla na jednotku plochy (HRRPUA) použitá v prípade simulácie vychádza z experimentálnej štúdie NFPA z roku 2002 (NFPA, 2002). Jednotlivé hodnoty rýchlosti uvoľňovania tepla na jednotku plochy zobrazuje Tabuľka 1. Umiestnenie zdroja požiaru zobrazuje Obrázok 7.

Tabuľka 1 Hodnoty HRRPUA

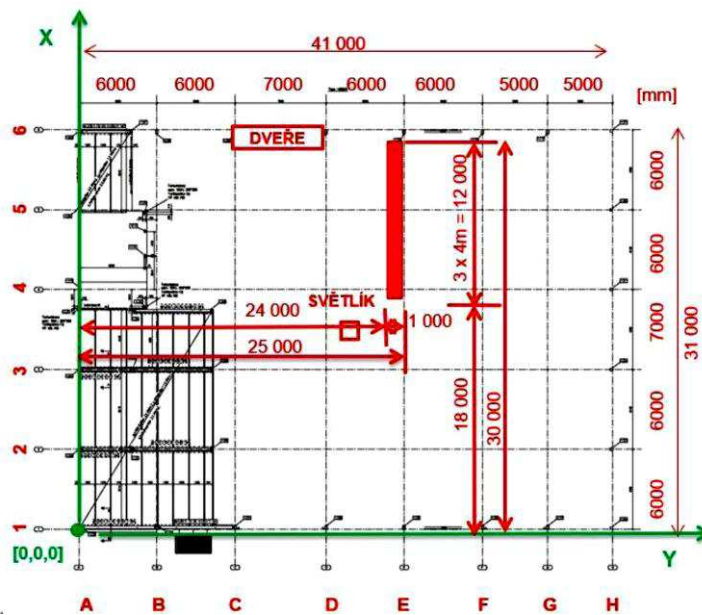
Čas [s]	100	200	300	400	500	600	700	800	900
HRR [MW]	8	11,5	11	9	7	4,5	3,5	2,5	2



Obrázok 7 Požiarny scenár A

## 5. POŽIARNÝ SCENÁR B

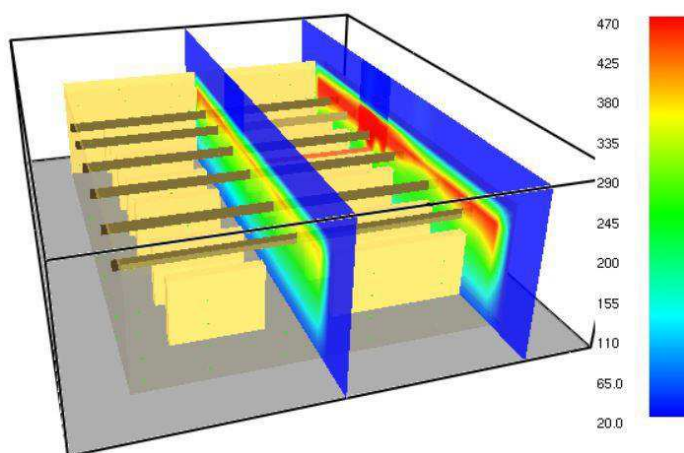
Požiarny scenár B je obdobný ako predchádzajúci požiarny scenár A, je však doplnený o strešný otvor vo forme svetlíka s rozmermi 1 m x 1 m. Zmenou ventilačných faktorov je možné pozorovať veľký vplyv odvetrania na rozvoj požiaru, vývoj spodín horenia a iné. Umiestnenie svetlíka zobrazuje Obrázok 8.



Obrázok 8 Požiarny scenár B

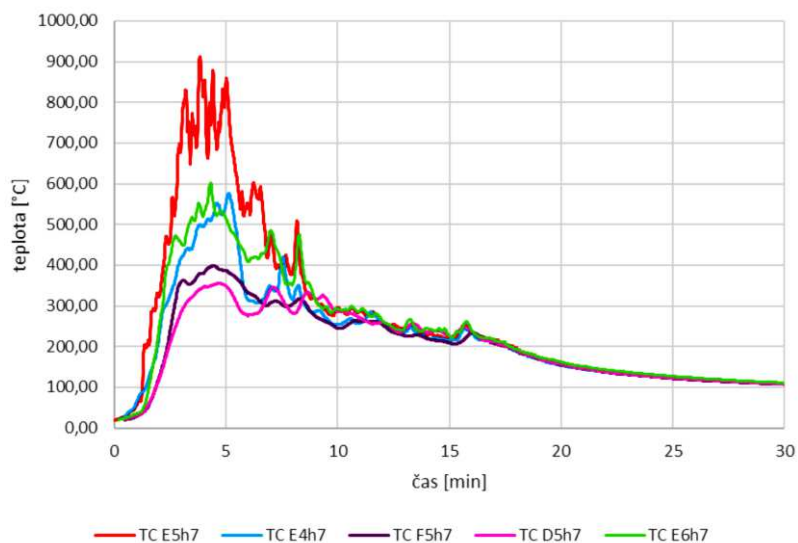
## 6. SIMULÁCIA POŽIARNÉHO SCENÁRA A

Za účelom zobrazenia účinkov lokálneho požiaru v skúmanom priestore boli využité ISO plochy v rôznych rezových rovinách. Rezová rovina na Obrázku 9 zobrazuje charakteristickú zmenu teploty na základe špecifickej výšky objektu.



Obrázok 9 Rezová rovina požiarneho scenára A v čase 250 s. požiaru

Maximálna teplota v skúmanom objekte bola nameraná približne 4 minúte horenia. Dosiahnuté teploty v rôznom čase horenia, v blízkosti zdroja horenia, zobrazuje Obrázok 10 a Tabuľka 2.

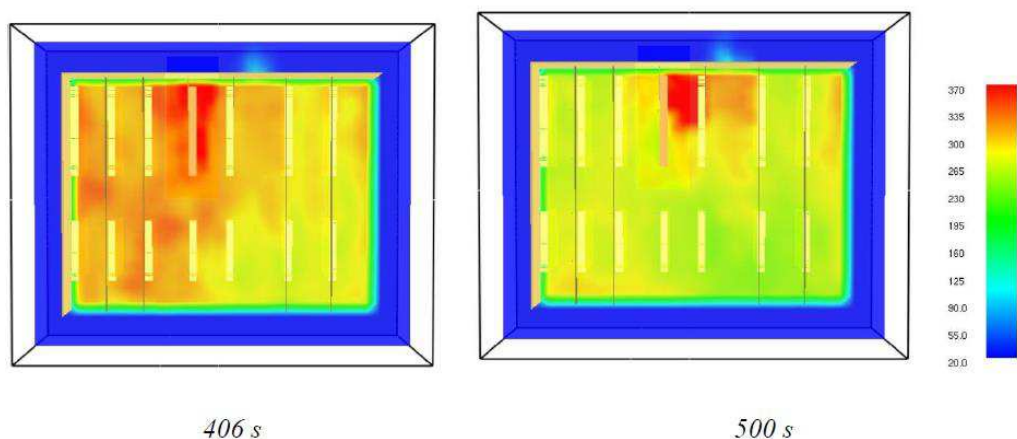


Obrázok 10 Teplota plynov v požiarom scenári A pri zdroji požiaru

Tabuľka 2 Teplota plynov v požiarom scenári A pri zdroji požiaru

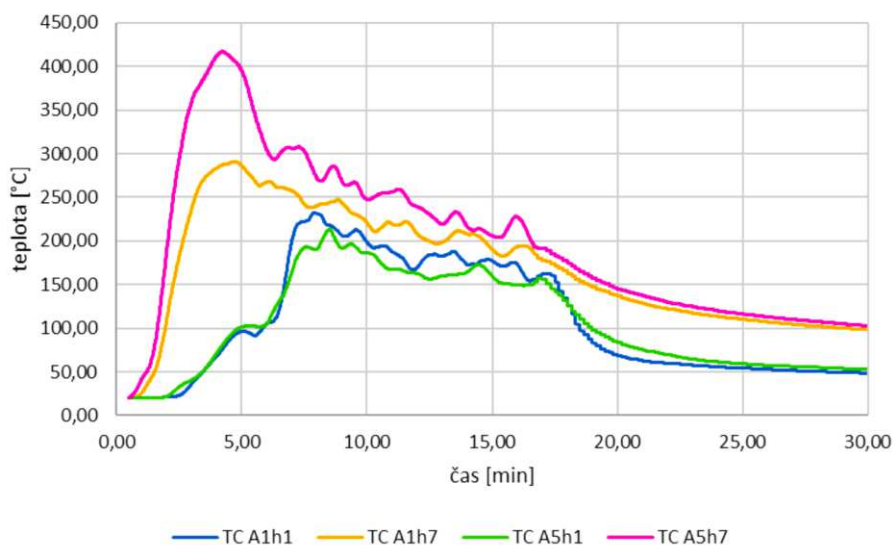
TČ	Umiestnenie	Najvyššia dosiahnutá teplota	Teplota v rôznych časoch trvania požiaru				
			5. min	10. min	15. min	20. min	25. min
E5h7	nad požiarom	937,0°C/4min	880,2°C	315,6°C	222,9°C	170,0°C	110,4°C
E4h7	v blízkosti požiaru	573,0°C/4min	580,7°C	270,0°C	220,3°C	170,0°C	110,4°C
F5h7	v blízkosti požiaru	399,0°C/4min	25,1 °C	33,4°C	33,7°C	170,0°C	110,4°C
D5h7	v blízkosti požiaru	332,0°C/4min	357,8°C	305,1°C	220,6°C	170,0°C	110,4°C
E6h7	stena objektu	601,0°C/4min	505,4°C	278,0°C	215,3°C	170,0°C	110,4°C

V blízkosti simulovaného otvoru dverí dosahovala teplota oveľa nižších hodnôt ako pri zdroji požiaru, kde boli namerané najväčšie hodnoty teploty plynov v priestore. Najnižšie namerané hodnoty dosahoval roh miestnosti umiestnený najďalej od zdroja požiaru. Rozloženie teplôt v požiarom úseku zobrazuje Obrázok 11.



Obrázok 11 Rozloženie teploty v požiarom scenári A

Obrázok 12 a Tabuľka 3 zobrazujú vývoj teploty v čase na termočlánkoch A1 vzdialených 25 m od zdroja požiaru a A5 vzdialených 15 m od zdroja požiaru.



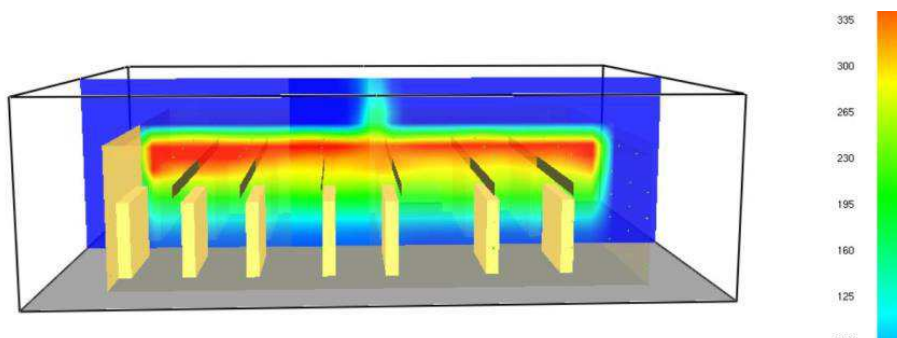
Obrázok 12 Teplota plynov v požiarom scenári A 15 m a 25 m od požiaru

Tabuľka 3 Teplota plynov v požiarom scenári A 15 m a 25 m od požiaru

TČ	Umiestnenie	Najvyššia dosiahnutá teplota	Teplota v rôznych časoch trvania požiaru					
			5. min	10. min	15. min	20. min	25. min	30. min
A1h1	roh objektu	248,0°C/8 min	98,3°C	201,0°C	175,8°C	54,9°C	51,4°C	48,2°C
A1h7	roh objektu	289,2°C/4 min	283,1°C	221,3°C	197,0°C	147,6°C	119,7°C	101,0°C
A5h1	stena	213,1°C/8 min	100,3°C	182,6°C	158,2°C	82,0°C	27,4°C	50,8 °C
A5h7	stena	421,0°C/ 4 min	399,1°C	247,7°C	211,0°C	149,2°C	120,8°C	100,2°C

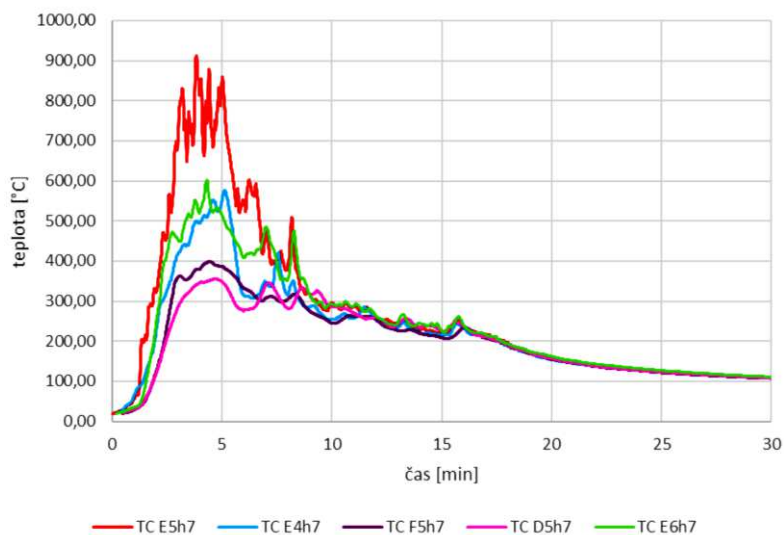
## 7. SIMULÁCIA POŽIARNÉHO SCENÁRA B

V požiarom scenári B došlo k doplneniu vetracieho otvoru v strešnej konštrukcii vo forme svetlíka. ISO plocha na Obrázku 13 zobrazuje odvod horúcich plynov horenia počas požiaru práve strešným svetlíkom.



Obrázok 13 Rezová rovina požiarneho scenára B v čase 250 s. požiaru

Maximálna teplota v skúmanom objekte bola nameraná približne 4 minúte horenia. Dosaiahnuté teploty v rôznom čase horenia, v blízkosti zdroja horenia, zobrazuje Obrázok 14 a Tabuľka 4.



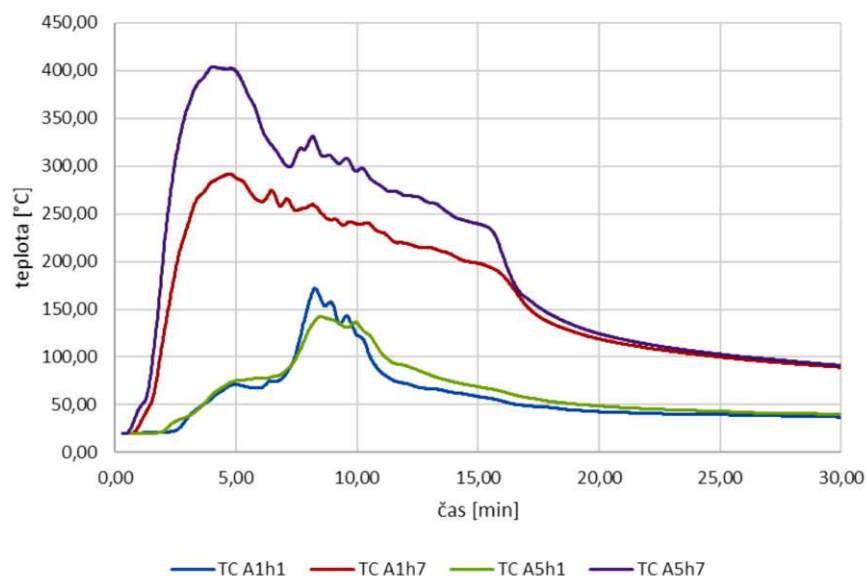
Obrázok 14 Teplota plynov v požiarom scenári B pri zdroji požiaru

Tabuľka 4 Teplota plynov v požiarom scenári B pri zdroji požiaru

TČ	Umiestnenie	Najvyššia dosiahnutá teplota	Teplota v rôznych časoch trvania požiaru				
			5. min	10. min	15. min	20. min	25. min
E5h7	nad požiarom	937,0°C/4min	880,2°C	315,6°C	222,9°C	170,0°C	110,4°C
E4h7	v blízkosti požiaru	573,0°C/4min	580,7°C	270,0°C	220,3°C	170,0°C	110,4°C
F5h7	v blízkosti požiaru	399,0°C/4min	25,1 °C	33,4°C	33,7°C	170,0°C	110,4°C
D5h7	v blízkosti požiaru	332,0°C/4min	357,8°C	305,1°C	220,6°C	170,0°C	110,4°C
E6h7	stena objektu	601,0°C/4min	505,4°C	278,0°C	215,3°C	170,0°C	110,4°C

Obrázok 15 a Tabuľka 5 zobrazuje vývoj teploty v čase na termočláňkoch A1 vzdialených 25 m od zdroja požiaru a A5 vzdialených 15 m od zdroja požiaru.





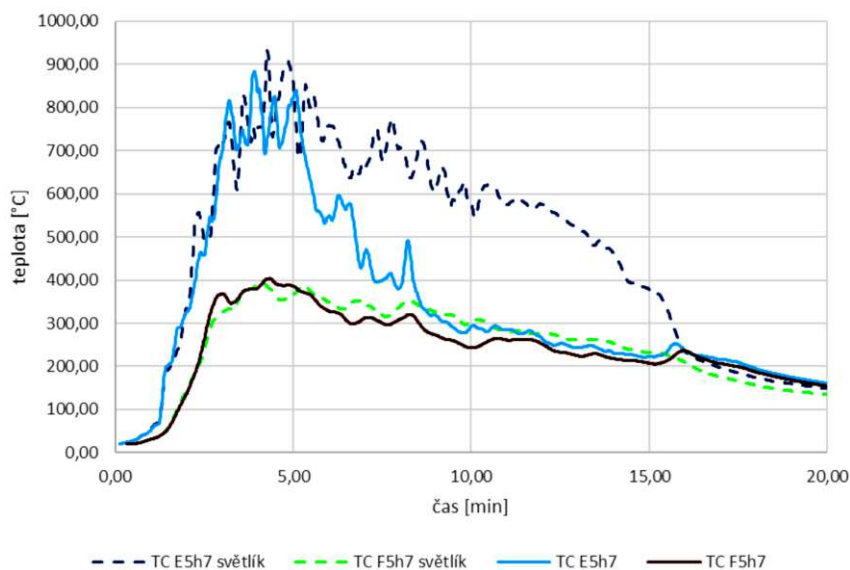
Obrázok 15 Teplota plynov v požiarom scenári B 15 m a 25 m od požiaru

Tabuľka 5 Teplota plynov v požiarom scenári B 15 m a 25 m od požiaru

TČ	Umiestnenie	Najvyššia dosiahnutá teplota	Teplota v rôznych časoch trvania požiaru				
			5. min	10. min	15. min	20. min	25. min
A1h1	roh 25 m od požiaru	147,0°C/8 min	61,2°C	131,5°C	59,2°C	48,7°C	47,9°C
A1h7	roh 25 m od požiaru	297,2°C/4 min	288,4°C	248,0°C	200,3°C	123,6°C	101,6°C
A5h1	stena 15m od požiaru	142,1°C/8 min	63,2 °C	122,6°C	66,8°C	51,0°C	47,7°C
A5h7	stena 15 m od požiaru	407,0°C/ 4min	405,1°C	298,7°C	246,4°C	124,2°C	101,8°C

## 8. KOMPARÁCIA POŽIARNÝCH SCENÁROV

Hlavným cieľom skúmanej problematiky a zostrojenia požiarom scenárov bolo pozorovanie vplyvu zmeny ventilačných podmienok na vývoj a prúdenie horúcich plynov v priestore. Nameraná teplota horúcich plynov bola s požiarom scenári B s pridaným svetlíkom o niečo väčšia ako v požiarom scenári A. Je to spôsobené najmä dostatočným prístupom kyslíka do objektu, dochádza k intenzívnejšiemu prúdeniu vzduchu, ktorý podporuje samotné horenie v objekte. Z protipožiarneho hľadiska sa v halových objektoch odporúča inštalácia dymových zábran, ktoré zabráňujú hromadeniu splodín horenia v priestore a tak dochádza k priebežnému odstraňovaniu tepla a dymu. Väčší prísun vzduchu predlžuje horenie v priestore. Môžeme to pozorovať v prípade požiarneho scenára B, so strešným svetlíkom, kedy vysoké teploty horúcich plynov sú namerané počas dlhšieho časového úseku. Pričom v simuláciu požiarneho scenára A, vysoké teploty začnú prudko klesať už v 5. minúte horenia. V niektorých časových úsekoch horenia je teplotný rozdiel medzi dvoma simuláciami až 400 °C, čo je možné pozorovať na Obrázku 16 a Tabuľke 6.



Obrázok 16 Komparácia požiarného scenára A a požiarného scenára B

## ZÁVER

Z uvedených možností vyplýva dôležitosť modelovania požiarov a tepelného namáhania stavebných konštrukcií, ktoré sa stáva neoddeliteľnou súčasťou navrhovania konštrukcií, posudzovania protipožiarnej bezpečnosti stavieb, ako aj v oblasti ochrany osôb a majetku. Využitie moderných prístupov a nástrojov v oblasti protipožiarnej ochrany môže dopomôcť k efektívnejšej prevencii a pripravenosti likvidácie požiarov stavieb.

## LITERATÚRA

- Belyer, C., (2003). Introduction to Fire Modeling. In: Fire protection handbook. 19. ed. ff. Quincy, Mass: National Fire Protection Association., ISBN 978-0-87765-474-2.
- Kadlic, M., (2018). Vplyv variability a neistoty vstupných parametrov na kvalitu výstupov požiarnych modelov. Dizertačná práca. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva.
- Kučera, P., (2009). Požárni inžinýrství: dynamika požáru. Sdružení požárního a bezpečnostního inžinýrství., ISBN 978 80-7385-074-6.
- Mózer, V., (2017). Požiarna bezpečnosť stavieb. Eurostav, spol. s r.o., ISBN 978-80-89228-50-8.
- NFPA (2002)., National fire protection association a society of fire protection engineers, ed., SFPE., 2002 handbook of fire protection engineering. 3rd ed. Quincy,
- Wald, F., Sokol, Z., (2016). Ocelové konstrukce. Praha: ČVUT. ISBN 9788001060322.
- Wang, Y., (2013) Performance-based fire engineering of structures. Boca Raton, Fla.: CRC Press/Spon Press., ISBN 978-0-203-86871-3.
- Walton, W., (2016). Zone Computer Fire Models for Enclosures. In: SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [online]. New York, NY: Springer New York, 2016 [cit. 2020-01-04], s. 1024–1033. ISBN 978-1-4939-2564-3. Dostupné na: 10.1007/978-1-4939-2565-0\_31

---

### Romana Erdélyiová, Ing.

Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Katedra technických vied a informatiky  
e-mail: romana.erdelyiova@fbi.uniza.sk

### Bohuš Leitner doc., Ing., PhD.

Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Katedra technických vied a informatiky  
e-mail: bohus.leitner@fbi.uniza.sk

---