

VPLYV VENTILÁCIE NA TEPLOTU OSTENIA CESTNÉHO TUNELA

EFFECT OF VENTILATION ON ROAD TUNNEL LINING TEMPERATURE

Bc. Ing. Stanislava Gašpercová, PhD.

Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, ul. 1. mája 32, 010 26
Žilina, Slovenská republika

Kontakt: stanislava.gaspercova@fbi.uniza.sk

Abstrakt

Ako je všeobecne známe pri požiari dym spoločne s teplom stúpa nahor a najvyššie teploty splodín horenia, ako aj konštrukcií stien a stropu sa dosahujú priamo nad požiarom. Tento príspevok si kladie za úlohu zistiť akými teplotami môže vplývať požiar bežného nákladného automobilu prípadne dvoch osobných automobilov na ostenie stropu tunela Šibenik. Nakoľko významný vplyv na veľkosť zadymenia a tým pádom aj na teplotu v tunelovej rúre má požiarne vetranie, boli pre potreby príspevku vytvorené dva požiarne scenáre a to jeden so zapnutou ventiláciou a druhý bez zapnutej ventilácie. Záver príspevku tvorí porovnanie týchto dvoch scenárov a vyvodenie záverov.

Kľúčové slová: cestný tunel, modelovanie požiarov, ostenie cestného tunela, požiar, požiarne vetranie

Abstract

As is generally known in the event of a fire, the smoke rises together with the heat and the highest temperatures of the combustion products as well as the wall and ceiling structures are reached directly above the fire. This paper aims to find out what temperatures can affect the fire of an ordinary truck or two cars on the lining of the tunnel ceiling. As fire ventilation has a significant effect on the amount of smoke and thus also on the temperature in the tunnel tube, two fire scenarios were created for the purposes of the paper, one with ventilation switched on and the other without ventilation switched on. The conclusion is to compare these two scenarios and draw conclusions.

Key words: road tunnel, fire modeling, road tunnel lining, fire, fire ventilation

Úvod

Vzhľadom na to, že tunely patria z hľadiska ochrany pred požiarmi medzi finančne nákladné a technicky náročné stavby, je poznanie ich správania sa pri požiari veľmi dôležité. V prípade

podzemných stavieb, medzi ktoré tunely patria, je zabezpečenie ochrany pred požiarimi ešte náročnejšie, pretože akákoľvek mimoriadna udalosť je komplikovaná práve charakterom podzemnej stavby. Z pohľadu ochrany pred požiarimi môžeme požiare v tuneloch vo všeobecnosti charakterizovať nasledovne:

- rýchly nárast teploty v okolí požiaru,
- extrémne rýchle zadymenie celej tunelovej rúry,
- obmedzené vetranie,
- sťažená evakuácia a prístup hasičskej techniky zatarasením prístupových ciest automobilmi,
- obmedzené rádiové spojenie medzi záchrannými zložkami.

Hlavný stavebný materiál používaný na stavbu tunelov je prostý betón a oceľobetón. Vplyv vysokej teploty na tieto konštrukcie môžeme popísať nasledovne. Pri zahriatí betónu na približne 100 °C sa začína odparovať voľná a čiastočne aj fyzikálne viazaná voda. Toto odparovanie síce prispieva k čiastočnému zvýšeniu jeho pevnosti, ale zároveň klesá hodnota modulu pružnosti. Pri teplotách betónu viac ako 200 °C sa začína prejavovať vplyv zvýšenej teploty, nakoľko sa pomaly znižuje pevnosť betónu. Pri teplotách 400 – 500 °C sa už uvoľňuje chemicky viazaná voda, pevnosť ako aj modul pružnosti sa znižujú a pri ďalšom raste teploty naďalej klesajú. Pri teplote požiarov v tuneli, ktoré môžu presiahnuť teplotu 1 000 °C sú tieto parametre (pevnosť a modul pružnosti) betónových a železobetónových konštrukcií na nízkej úrovni.

Ako veľmi účinný spôsob zníženia teploty splođín horenia v tuneli sa výborne osvedčuje požiarne vetranie. Čím rýchlejšie sa splođiny horenia z tunelovej rúry odvetrajú, tým menej zaťažujú okolité konštrukcie vysokými teplotami. Preto je správny návrh požiarneho vetrania veľmi dôležitá úloha, ktorá má významný vplyv nielen na teplotu konštrukcií ale aj na zlepšenie podmienok evakuácie, zníženie koncentrácie toxických splođín horenia a zvýšenie koncentrácie kyslíka.

1. Vetranie tunelov

Vetranie tunelov môžeme rozdeliť na:

- prirodzené,
- nútené.

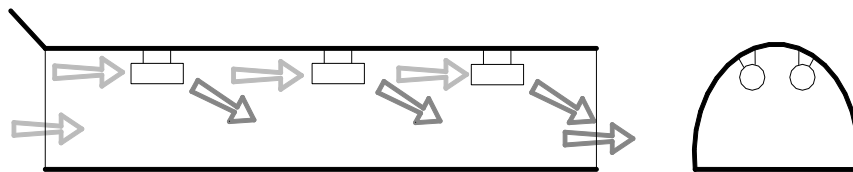
Prirodzené vetranie patrí medzi najjednoduchšie spôsoby vetrania a nevyžaduje žiadne prídavné technické zariadenia. Výmena vzduchu je založená na rozdieloch tlakov a teploty medzi portálmi. Významný vplyv na prirodzené vetranie má i smer prevládajúcich vetrov a celkový odpor tunela pre prechádzajúci vzduch. V prípade požiaru alebo nehody v tuneli môžu splođiny horenia unikáť cez vstupné portály smerom von [1].

Vlastnosti prirodzeného vetrania [2]:

- Obojsmerná premávka: tunelový vzduch sa v oblasti pri portáloch mení rýchlo, v centrálnej oblasti tunela sa môžu hromadiť škodliviny.
- Jednosmerná premávka: v smere jazdy vozidiel sa prejaví piestový efekt, takže prirodzené vetranie postačuje často i pri dlhých tuneloch (niekoľko sto metrov), zvlášť pri strednej hustote dopravy.

Nútené systémy vetrania rozdeľujeme na pozdĺžne, polopriečne a priečne. Usporiadanie ventilátorov, ako aj smer prúdenia vzduchu je pre každý typ vetrania zrejmé už podľa názvu. Najčastejšie sa v tuneloch vyskytuje pozdĺžne vetranie, ktoré bude aj ďalej popísané.

Pozdĺžne prúdenie vzduchu v tuneli je realizované prúdovými ventilátormi, vid' obr. 1. Pri tuneloch s jednosmernou premávkou je smer prúdenia vzduchu zabezpečený prostredníctvom ventilátorov a obvykle je zhodný so smerom premávky. Pri tuneloch s obojsmernou premávkou sa umiestňujú ventilátory medzi portály tunela tak, aby boli podporované prirodzené spôsoby vetrania vyplývajúce zo samotnej premávky, teplotných a meteorologických rozdielov [1, 2].



Obr. 1 Pozdĺžne vetranie [3]

Ventilátory, ktoré za bežnej prevádzky v tuneli slúžia na odvod výfukových plynov sa nazývajú aj zariadenia na odvod tepla a splodín horenia a používajú sa na požiarne vetranie. Medzi základné časti vetracieho systému patria [4]:

- dopravný priestor,
- vetracie kanály,
- vetracie komory,
- ventilátory,
- odsávacie klapky,
- meracie a riadiace zariadenia.

„Návrh vetrania ovplyvňuje množstvo faktorov ako je dĺžka tunela, kategória tunela, výber vhodného vetracieho systému, dopravné prognózy, rýchlosť vetra, drsnosť stien v tuneli, sklon tunela a pod.“ [3]

Ako už bolo spomínané vyššie, pri požiari musí zabezpečiť dve základné funkcie a to:

- odvod splodín horenia z miesta lokalizácie požiaru,
- vhodné podmienky pri úniku osôb.

Všetky mechanické časti vetrania, ako sú napríklad ventilátory, a ktoré môžu byť priamo vystavené dymu, musia zabezpečovať svoju funkciu po dobu minimálne 120 minút pri teplote najmenej 200 °C [4, 5].

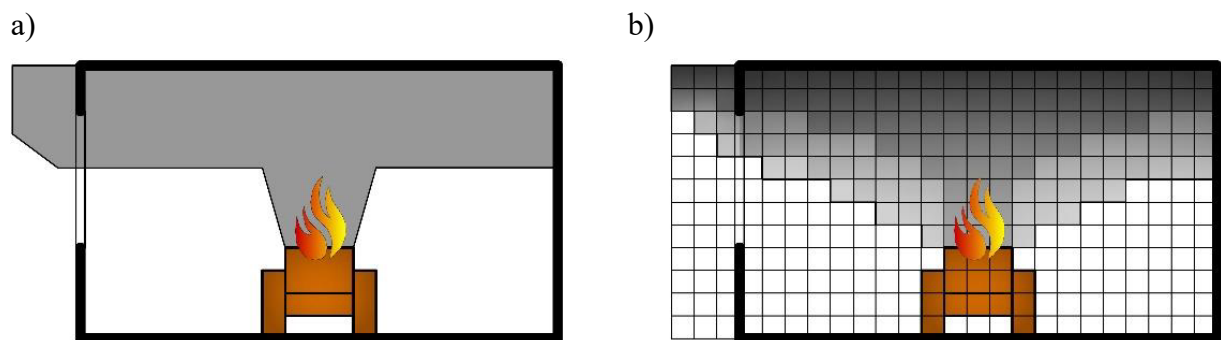
2. Definovanie vstupných údajov pre počítačové modelovanie požiarov v cestnom tuneli

Na simuláciu vplyvu zvýšenej teploty na konštrukciu stropu tunela Šibenik v prípade požiaru malých rozmerov, tzn. požiaru dvoch osobných automobilov alebo jedného nákladného automobilu, sme si zvolili matematický počítačový program FDS (Fire Dynamics Simulator), ktorý patrí medzi CFD modely. CFD modely (na Slovensku nazývané aj modely typu pole) pracujú na princípe výpočtovej dynamiky tekutín. Na rozdiel od zónových modelov, ktoré tiež

patria medzi matematické modely, CFD modely delia priestor na veľký počet malých výpočtových polí, a tým sú oproti zónovým modelom presnejšie. Príklad rozdelenia výpočtového priestoru na menšie výpočtové polia je na obr. 2. Na rozdiel od zónových modelov je v CFD modeloch tiež možné namodelovať požiar aj v priestoroch so zložitou geometriou a zapracovať aj rôzne fyzikálne javy, ako sú napr. [6, 7]:

- transport tepla a dymu prúdením a sálaním,
- prestup tepla medzi vzduchom a pevnými povrchmi,
- transport tepla vedením cez pevné povrchy,
- pyrolýzu pevnej ako aj kvapalnej fázy a horenie plynov a pár,
- šírenie požiaru v priestore,
- aktiváciu tepelných a dymových hlásičov požiaru,
- aktiváciu sprinklerového hasenia vodou alebo vodnou hmlou.

Pre čo najrelevantnejšie výstupy simulácie je potrebné čo najpresnejšie zadať geometriu priestoru ako aj všetky otvory či prekážky, ktoré by mohli ovplyvniť šírenie požiaru a dymu.



Obr. 2 Znárodnenie rozdielu v rozvoji požiaru pre: a) zónový model, b) CFD model [6]

Pre správne výsledky simulácie požiaru je potrebné definovať aj ďalšie vstupné informácie ako sú údaje o palive, druhu požiaru, výkone požiaru, rozvoji požiaru, dĺžke trvania simulácie, počiatkovej teplote prostredia a pod.

2.1 Druh použitého paliva

Nakoľko počítačový program FDS dokáže spracovať chemickú reakciu iba pri horení jedného druhu paliva, museli sme zvoliť len jedného reprezentanta. Rozhodli sme sa pre motorovú naftu, pretože sa jedná o bežné palivo a jeho dym je tmavý, ťažký a toxický. Plochu, z ktorej nafta odhorievala sme stanovili na 5 x 2 m čo sú približne rozmery jedného menšieho nákladného automobilu.

Základné charakteristické fyzikálno-chemické vlastnosti motorovej nafty, ktoré vstupujú do výpočtov sú [7]:

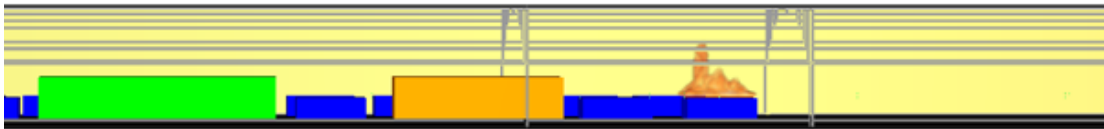
Spalné teplo:	40 000 kJ.kg ⁻¹
Podiel sadzí v spalinách:	0,1 kg sadzí na 1 kg spáleného paliva
Podiel oxidu uhličitého v spalinách:	0,03 kg CO na 1 kg spáleného paliva

2.2 Ventilačné zariadenia

Vetrание v tuneli bolo navrhnuté ako pozdĺžne s tromi sadami ventilátorov v každej tunelovej rúre. Ťah, prietok a rýchlosť prúdenia vzduchu sme simulovali na základe poskytnutých informácií o vetraní tunela Šibenik. Zapnutie ventilátorov sme nastavili na 600 s po začiatku simulácie/požiaru.

Pre porovnanie správania sa požiaru v tuneli sme požiar s rovnakými vlastnosťami a okrajovými podmienkami nechali pôsobiť so zapnutými ventilátormi ako aj bez zapnutia ventilácie. Keďže však stav absolútneho bezvetria je v exteriéri ojedinelý a v rámci tunelov v podstate nemožný, v oboch prípadoch (pri zapnutej ventilácii aj bez zapnutia ventilácie) sme nastavili rýchlosť prúdenia vzduchu na hodnotu $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Maximálny výkon požiaru, ktorý bol udržiavaný počas celej doby simulácie predstavoval hodnotu 6,25 MW, čo si môžeme predstaviť ako požiar dvoch osobných automobilov alebo jedného menšieho nákladného automobilu. Bol udržiavaný na maximálnej hodnote až do času 1 500 s, kedy začal lineárne klesať až na nulu. Vizualizácia požiaru je na obr. 3.



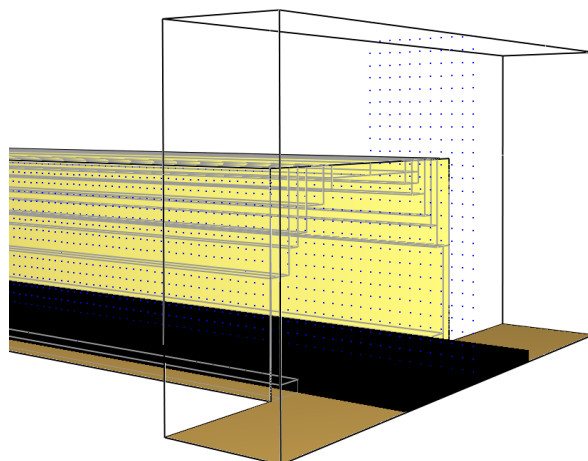
Obr. 3 Vizualizácia požiaru nákladného automobilu

Pre tento príspevok sme zvolili ultra-rýchly rozvoj požiaru, kedy maximálny výkon bude dosiahnutý za 85 s od začiatku požiaru. Tento rozvoj požiaru pre požiare v tuneli odporúča aj publikácia *Design fires in road tunnels* [8].

Výsledky simulácie sú znázornené pomocou grafov, ktoré zachytávajú merania na zvolených miestach tunela.

2.3 Geometria tunela

Šírkové usporiadanie tunela je predpísané kategóriou 2T-8,0 v zmysle [9], t. j. každá tunelová rúra má dva jazdné pruhy so šírkou 3,75 m, vodiace pružky $2 \times 0,25 \text{ m}$ a núdzové chodníky so šírkou 1,0 m po oboch stranách vozovky. Výška klenby od vozovky je 7,45 m. Základná výška priechodného prierezu je 4,8 m. Výška priechodného priestoru nad núdzovými chodníkmi je 2,2 m. Hrúbka sekundárnej klenby je 300 mm a použil sa na ňu betón triedy C 30/37–XC4, XD3, XF4. Obe tunelové rúry sú navzájom spojené jedným priečnym prepojením [10, 11].



Obr. 4 Znáznornenie geometrie tunela v programe FDS

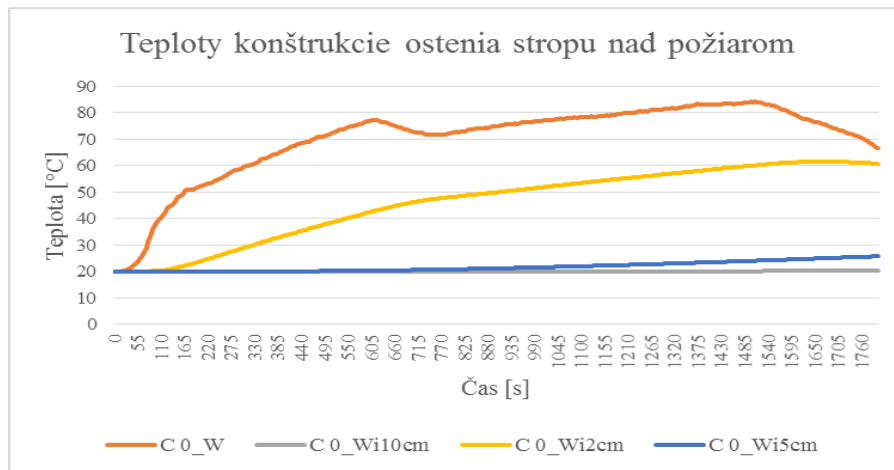
2.4 Požiarna ventilácia

V jednej tunelovej rúre sú navrhnuté tri sady prúdových ventilátorov. V ľavej tunelovej rúre je prvá skupina ventilátorov vo vzdialenosti 80 m od východného portálu, druhá skupina 250 m od západného portálu a tretia skupina 80 m od západného portálu. V pravej tunelovej rúre je prvá skupina ventilátorov vo vzdialenosti 80 m od západného portálu, druhá skupina 250 m od východného portálu a tretia skupina 80 m od východného portálu. Hlavný smer prúdenia je v smere dopravnej premávky, to znamená v ľavej tunelovej rúre od východného k západnému portálu a v pravej tunelovej rúre od západného k východnému portálu. Ventilátory sú navrhnuté s nasledovnými parametrami:

- reverzné s nominálnym ťahom 2100 N,
- priemer obežného kolesa 1250 mm,
- dĺžka 4970 mm,
- hmotnosť 1540 kg,
- výkon motora 54 kW,
- prietok $Q_{SV} = 25,6 \text{ m}^3/\text{s}$,
- tepelná odolnosť $250 \text{ }^\circ\text{C}/2 \text{ h}$ [12].

3. Výsledky simulácií pre návrhové požiarne scenáre

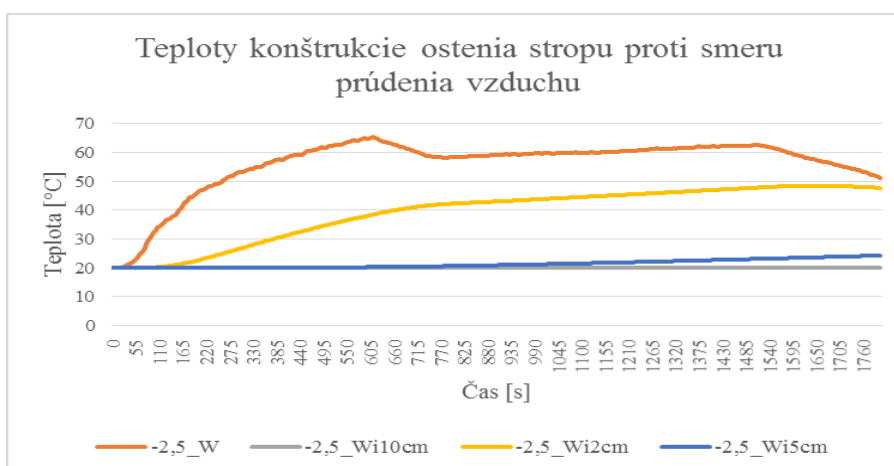
Výsledky simulácie sú znázornené pomocou grafov, ktoré zachytávajú merania na zvolených miestach tunela. Ako hlavnú veličinu charakterizujúcu požiar so zapnutou ventiláciou sme vybrali teplotu betónovej konštrukcie stropu ostenia na povrchu konštrukcie a v hĺbke 2, 5 a 10 cm, viď obr. 5.



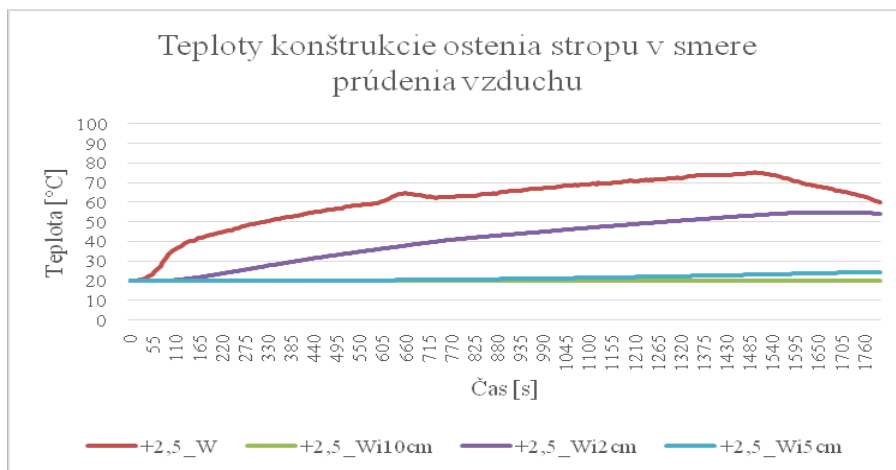
Obr. 5 Priebeh teplôt ostenia stropu nad požiarom (so zapnutou ventiláciou)
C 0_W – teplota na povrchu konštrukcie, *C 0_Wi10cm* – teplota v hĺbke 10 cm,
C 0_Wi5cm – teplota v hĺbke 5 cm, *C 0_Wi2cm* – teplota v hĺbke 2 cm

Pri porovnaní kriviek znázorňujúcich priebeh teplôt ostenia stropu nad požiarom sme zistili, že pri 6,25 MW požiaru sa teplota priamo nad požiarom pohybovala na povrchu konštrukcie na maximálnej úrovni 85 °C. Vnútri konštrukcie bola teplota oveľa nižšia a v hĺbke 10 cm bola teplota počas celého požiaru ustálená na 20 °C, čo zároveň predstavovalo aj počiatočnú teplotu prostredia a konštrukcií pred začiatkom požiaru.

Ďalšie obrázky 6 a 7 dokumentujú závislosť medzi teplotami ostenia a smerom prúdenia vzduchu v tuneli. Porovnávali sa teploty na rozhraní pásma horenia a tepelného účinku. Toto rozhranie oddeľuje priestor, v ktorom prebieha vlastné horenie od priestoru, kde dochádza k príprave horľavých materiálov na horenie. Je ohraničené povrchom plameňa a horiacej látky ale môže byť ohraničené stavebnými konštrukciami, stenami nádrže, alebo ako v našom prípade rozmermi horiaceho automobilu. V našom prípade je pásmo horenia v okruhu 2,5 m od centra požiaru.



Obr. 6 Priebeh teplôt ostenia stropu vo vzdialenosti 2,5 m od požiaru proti smeru prúdenia vzduchu (so zapnutou ventiláciou)
-2,5_W – teplota na povrchu konštrukcie, *-2,5_Wi10cm* – teplota v hĺbke 10 cm,
-2,5_Wi5cm – teplota v hĺbke 5 cm, *-2,5_Wi2cm* – teplota v hĺbke 2 cm

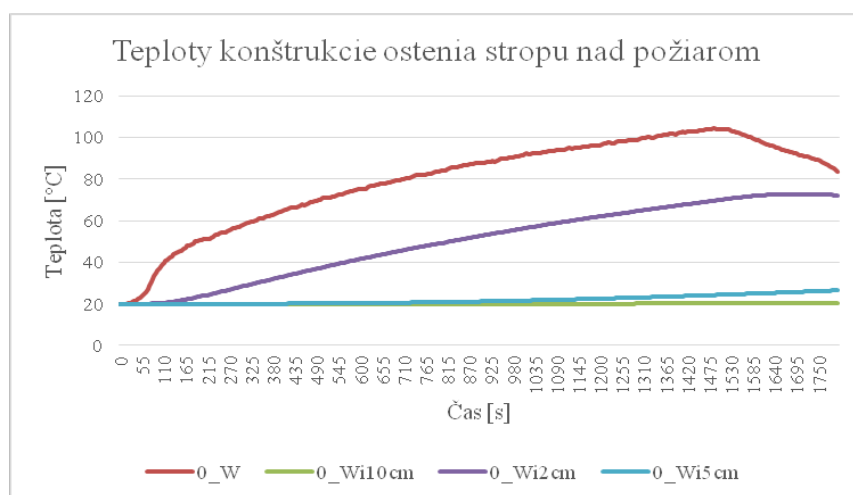


Obr. 7 Priebeh teplôt ostenia stropu vo vzdialenosti 2,5 m od požiaru v smere prúdenia vzduchu (so zapnutou ventiláciou)

+2,5_W – teplota na povrchu konštrukcie, +2,5_Wi10cm – teplota v hĺbke 10 cm, +2,5_Wi5cm – teplota v hĺbke 5 cm, +2,5_Wi2cm – teplota v hĺbke 2 cm

Pri porovnaní grafov vplyvu smeru prúdenia vzduchu na teplotu konštrukcie ostenia stropu v pásme horenia sme zistili, že v prípade oboch smerov prúdenia vzduchu teplota stropu až do času približne 600 s od začiatku požiaru stúpala rovnakou rýchlosťou. V čase 600 s boli zapnuté ventilátory a na obr. 6 môžeme vidieť, že od tohto času boli teplotné krivky rozdielne a teplota v konštrukcii nachádzajúcej sa proti smeru prúdenia vzduchu mala spomalenú rýchlosť nárastu teploty.

Keďže vetranie je tiež len systém, ktorý môže zlyhať, v ďalšej časti tejto podkapitoly sme sa venovali vplyvu požiaru na konštrukcie tunela pri novej poruche ventilačného systému. Na obr. 8 je znázornený priebeh teplôt konštrukcie ostenia stropu bez zapnutej ventilácie.



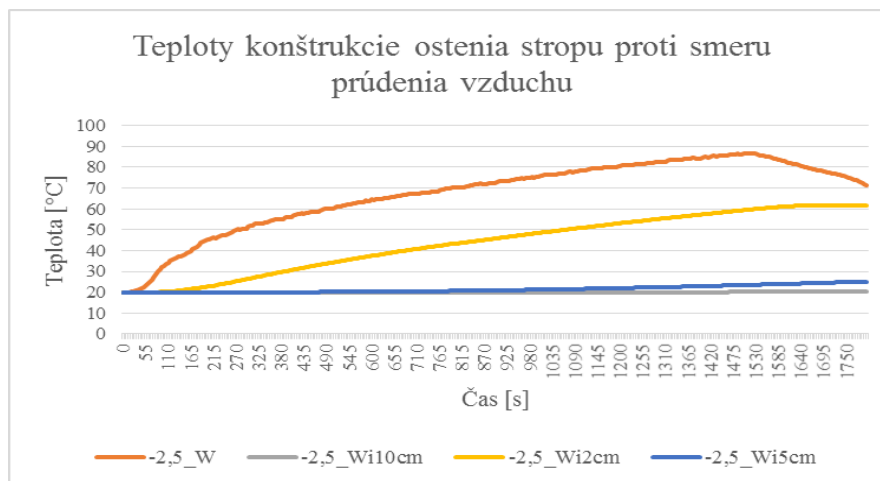
Obr. 8 Priebeh teplôt ostenia stropu nad požiarom (bez zapnutej ventilácie)

0_W – teplota na povrchu konštrukcie, 0_Wi10cm – teplota v hĺbke 10 cm, 0_Wi5cm – teplota v hĺbke 5 cm, 0_Wi2cm – teplota v hĺbke 2 cm

Pri porovnaní priebehu teplôt v konštrukcii ostenia stropu bez zapnutej ventilácie sme zistili, že maximálne teploty na povrchu konštrukcie boli dosiahnuté v čase 1500 s od začiatku simulácie a dosahovali hodnotu 105 °C. Pri hĺbke 2 cm od povrchu konštrukcie stropu

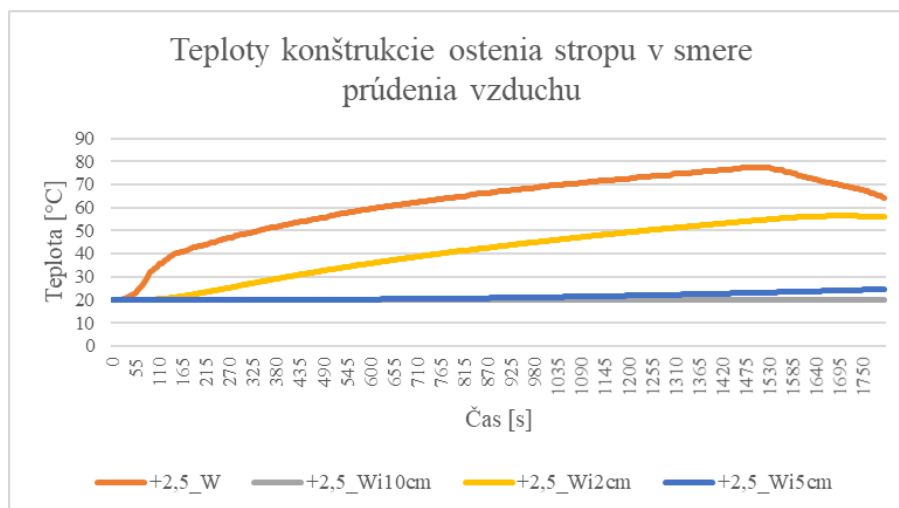
dosahovali teploty v termočlánkoch maximálne 75 °C. Pri hĺbke 10 cm bola teplota počas celej simulácie ustálená na 20 °C.

Porovnanie teplôt na rozhraní pásma horenia a tepelného účinku v smere a proti smeru prúdenia vzduchu pre požiarneho scenár bez zapnutej ventilácie je na obr. 9 a 10.



Obr. 9 Priebeh teplôt ostenia stropu vo vzdialenosti 2,5 m od požiaru proti smeru prúdenia vzduchu (bez zapnutej ventilácie)

-2,5_W – teplota na povrchu konštrukcie, -2,5_Wi10cm – teplota v hĺbke 10 cm, -2,5_Wi5cm – teplota v hĺbke 5 cm, -2,5_Wi2cm – teplota v hĺbke 2 cm



Obr. 10 Priebeh teplôt ostenia stropu vo vzdialenosti 2,5 m od požiaru v smere prúdenia vzduchu (bez zapnutej ventilácie)

+2,5_W – teplota na povrchu konštrukcie, +2,5_Wi10cm – teplota v hĺbke 10 cm, +2,5_Wi5cm – teplota v hĺbke 5 cm, +2,5_Wi2cm – teplota v hĺbke 2 cm

Pri porovnaní teplôt ostenia stropu v okruhu 2,5 m od centra požiaru je vidno vplyv aj malej rýchlosti prúdenia vzduchu v tuneli na úrovni 0,5 m.s⁻¹. Maximálna teplota na povrchu konštrukcie proti smeru prúdenia vzduchu sa pohybovala na úrovni 87 °C, maximálna teplota na opačnej strane pásma horenia bola už „len“ 77 °C. Z toho vyplýva, že rozdiel teplôt v pásme horenia t.j. vo vzájomnej vzdialenosti 5 m bol takmer 10 °C.

Záver

Pri porovnaní výsledkov simulácií priebehu teplôt v konštrukcii stropu, ktorý je z pohľadu vysokých teplôt namáhaný najviac zo všetkých stavebných konštrukcií tunela sme zistili, že pri nami navrhnutom požiari sa pohybovala teplota:

- pri požiarnom scenári so zapnutou ventiláciou do 85 °C,
- pri požiarnom scenári bez zapnutej ventilácie do 105 °C.

Pri sledovaní teplôt konštrukcie ostenia v smere prúdenia vzduchu a ventilácie a proti smeru prúdenia vzduchu a ventilácie boli všetky teploty nižšie ako namerané teploty konštrukcie ostenia stropu nad požiarom.

Teploty, ktoré dosahovali splodiny horenia na povrchu konštrukcie alebo v konštrukcii neboli také vysoké aby ovplyvnili funkčné vlastnosti ostenia. Z toho vyplýva, že požiar menšieho nákladného automobilu prípadne dvoch osobných automobilov nemá vplyv na požiarnu odolnosť konštrukcie ostenia tunela.

Pod'akovanie

Tento príspevok vznikol a jeho publikovanie podporil projekt APVV-17-0014. Smart tunel: telematická podpora pri mimoriadnych udalostiach v dopravnom tuneli.

Použitá literatúra

- [1] SCHLOSSER, F. a kol. 2012. *Technológia stavieb*. Žilina: EDIS, 2012. 658 s. ISBN 978-80-554-062-20.
- [2] JANDAČKA, J. 2008. *Vetranie tunela Sitina*. 2008. In: TZB [online]. 2008, [cit. 2020-05-20]. Dostupné na internete: <https://www.asb.sk/tzb/vetranie-a-klimatizacia/vetranie-tunela-sitina>
- [3] KOLEKTÍV AUTOROV. 2014. *Riadenie prevádzky tunelov. Prevádzka technologických zariadení*. Žilinská univerzita v Žiline. 2014.
- [4] TP 12/2011: *Vetranie cestných tunelov*. Bratislava: Ministerstvo dopravy, výstavby a regionálneho rozvoja SR. 2011. 18 s.
- [5] STN EN 13 501-4: 2018 : *Klasifikácia požiarnych charakteristík stavebných výrobkov a prvkov stavieb. Časť 4: Klasifikácia využívajúca údaje zo skúšok požiarnej odolnosti prvkov zariadení na odvod splodín horenia*.
- [6] WALD, F. a kol. 2017. *Modelování dynamiky požáru v budovách*. ČVUT Praha, 86 s. ISBN 978-80-01-05633-2
- [7] OSVALD, A. – MÓZER, V. – SVETLÍK, J. 2014. *Požiarne bezpečnosť cestných tunelov*. Žilina: EDIS, 2014. 140 s. ISBN 978-80-554-050-4
- [8] MAEVSKI, I. Y. 2011. Design fires in road tunnels. Washington D.C.: Transportation research board, 2011. p. 199. ISBN 978-0-309-14330-1.
- [9] STN 73 7507: 2008 : *Projektovanie cestných tunelov*.

- [10] BULEJKO, P. - ZELEŇÁK, M. – SVITOK, R. 2015. *Tunel Šibenik*. In: *Silnice a železnice* [online]. 2015, [cit. 2020-05-22]. Dostupné na internete: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/tunel-sibenik/>.
- [11] ZELEŇÁK, M. – SVITOK, R. 2014. *Tunel Šibenik*. In: *Inžinierske stavby* [online]. 2014, [cit. 2020-05-25]. Dostupné na internete: <https://www.asb.sk/inzinierske-stavby/tunely/tunel-sibenik>.
- [12] WITT&SOHN. 2018. *Ventilátory pre protipožiarne vetranie*. [online]. 2018, [cit. 2020-05-25]. Dostupné na internete: http://www.wittfan.de/files/Produkte/Banana%20Jet/sym_60_hz_banana_jet.pdf