

MODELOVÁNÍ POŽÁRU A ANALÝZA ELEKTROVOZIDEL PŘI NÁVRHU KONSTRUKCÍ

Tereza Bělohradská, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
Tereza.belohradska@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Tento článek vychází z diplomové práce a zabývá se požárním rizikem elektrovozidel (EV) při návrhu železobetonových konstrukcí. Hlavním cílem příspěvku je představit požární riziko elektrovozidel s ohledem na požární bezpečnost budov. Článek popisuje typy EV, zároveň je v článku představena definice požárního rizika baterií a celých EV i klasických spalovacích vozidel (ICEV). V závěru se teoretická část věnuje řešení požární bezpečnosti z hlediska elektromobility. Praktická část představuje vytvoření modelu požáru osobního vozidla v prostoru hromadné garáže. Pro simulaci je využit program Fire Dynamics Simulator (FDS), který je zástupcem dynamických modelů kapalin a plynů (CFD). Požár je simulován zjednodušenou metodou pomocí HRR křivek. Pro simulaci je vybrán požární scénář, který zjišťuje vliv požáru EV a ICEV.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektrovozidla; vozidla se spalovacím motorem; požár; požární odolnost konstrukcí; rychlost uvolňování tepla

ABSTRACT

This paper is based on a diploma thesis and deals with the fire risk of electric vehicles (EV) in the design of reinforced concrete structures. The main objective of the paper is to present the fire risk of electric vehicles with regard to the fire safety of buildings. The paper describes the types of different electric vehicles available today. Then a definition of the fire risk of batteries and entire electric and internal combustion vehicles (ICEV) is described. Finally, the theoretical part deals with fire safety solutions from the perspective of electric mobility. The practical part presents the creation of a model of a passenger vehicle fire in the area of a collective garage. The Fire Dynamics Simulator (FDS) program, which is a representative of Computational Fluid Dynamics Models (CFD) is used for the simulation. The fire is simulated by a simplified method using HRR curves. A fire scenario, which detects the effect of EV a ICEV fire, is selected.

KEYWORDS

electric vehicles; internal combustion engine vehicles; fire resistance; heat release rate

1. ÚVOD

Vzhledem k tomu, že je aktuálně v České republice dostupné pouze malé množství dat o řešení požární bezpečnosti staveb z hlediska elektromobility, se článek zabývá rizikem požárů elektrovozidel.

Změna v automobilovém průmyslu s sebou přináší i snahu o to, aby vozidla byla co nejlehčí a tím i spotřeba paliva byla nižší. Nová vozidla tak obsahují podstatně více plastů, než obsahovala dřívější stará vozidla. Plasty mohou při požáru uvolňovat jedovaté zplodiny hoření. Dnešní automobily jsou ve srovnání se staršími vozidly větší, co se týče rozměrů.

Přechod z klasických automobilů se spalovacími motory na elektrovozidla s sebou nese nové problémy. Elektrovozidla obecně představují větší riziko vzniku požáru, ať už při dobití, nehodě nebo jen při běžném používání, kdy může dojít k závadě na baterii, která může způsobit požár. Za poslední roky můžeme čím dál častěji narazit na problematiku hašení elektrovozidel. Zároveň jsou elektrovozidla specifická svým průběhem požáru, kdy i při zdánlivém uhašení může dojít k další iniciaci v baterii a dalšímu rozvoji požáru. Elektrovozidla přinášejí nové problémy a poznatky do požární bezpečnostního inženýrství. Výrazné zvyšování počtu elektrovozidel a povinnost zřizování dobíjecích stanic v hromadných garážích přináší větší požární riziko s důrazem na požární bezpečnost staveb a požární odolnost konstrukcí.

2. ELEKTROVOZIDLA

2.1. Typy elektrovozidel

Elektrovozidla lze rozdělit do dvou skupin – plný elektromobil a hybridní elektromobil. Plný elektromobil využívá pouze energii, která je uložena v akumulátorech. Hybridní elektromobil využívá spalovací motor i elektromotor, díky tomu má výhody plného elektromobilu a zároveň automobilu se spalovacím motorem. (Boehmer et al., 2020, Helena Berg, 2015)

2.2. Požární riziko elektrovozidel a baterií

Li-ion baterie samy o sobě nepředstavují riziko samovznícení, pokud jsou jejich provozní podmínky stabilní a výrazně se nemění. Jiná situace nastává v případech, že je vozidlo vystaveno

* Školitel: prof. Ing. Jaroslav Procházka, CSc.

proměnlivým a extrémním podmínkám způsobenými silnými elektrickými, tepelnými nebo mechanickými impulsy. Při vystavení baterie změnám se zvyšuje pravděpodobnost vzniku požáru. Baterie správně fungují při dovolených hodnotách teploty a napětí. Když jsou překročeny limity napětí nebo teploty baterie, může uvnitř baterie dojít ke spuštění určitých chemických reakcí. Článek baterie následně začne uvolňovat hořlavý plyn, který se může vznítit a začít hořet. (Dorzs et al., 2021, Bisschop et al., 2019, Wang et al., 2019)

Existují tři hlavní rizika, které mohou ohrozit bezpečnost vozidla: tepelné poškození, elektrické přetížení a mechanické poškození. (Dorzs et al., 2021)

Články Li-ion prokazují svůj nejlepší výkon a funkci při teplotách v rozmezí 20–30 °C. Vzhledem k celosvětovému rozšíření elektromobilů, které jsou vybaveny Li-ion bateriemi, není možné zaručit provoz v tomto teplotním rozsahu bez vhodných systémů, které pomáhají udržovat správné provozní teploty. Například ve státech Kalifornie nebo v Arizoně jsou v létě teploty vzduchu i nad 40 °C, zatímco v severních částech Norska nebo Švédska jsou teploty v zimním období hluboce pod -10 °C. Trvale vysoké teploty mohou vést k nežádoucím chemickým reakcím, při kterých se baterie začne přehřívat. Pokud není teplo správně odváděno, může dojít k tepelnému úniku a nekontrolovatelnému nárůstu teploty vedoucí ke vznícení článku. Pokud je okolní teplota článku naopak příliš nízká, výrazně se zvyšuje vnitřní odpor, což může opět vést k tepelnému úniku. (Dorzs et al., 2021)

Baterie EV jsou navrženy tak, aby přijímaly určité množství energie v určitém čase. Pokud jsou tyto limity překročeny v důsledku příliš rychlého nabíjení nebo přebíjení, výkon článku se může zhoršit nebo dokonce může celý článek selhat. Úroveň nabití je definována stavem nabití (state of charge – SOC). Ovšem plná kapacita baterie normálně přesahuje svou jmenovitou kapacitu. K přebíjení může docházet, když je napětí článku nesprávně detekováno řídicím systémem nabíjení, při poruše nabíječky nebo při použití nesprávné nabíječky. V důsledku toho se lithium usazuje na anodě, kde se rozrůstá až vzniknou dendrity, které při průniku separátorem způsobí vnitřní zkrat. Vysoká úroveň vybíjení může způsobit rozpouštění záporného proudového kolektoru, který se skládá z mědi. Jako výsledek se do elektrolytu uvolňují malé vodivé částice mědi, které zvyšují riziko vnitřního zkratu. K nadměrnému vybíjení dochází při vybíjení článků pod jejich minimální napětí. K externímu zkratu může dojít, když je baterie vystavena silné mechanické deformaci, nárazu, ponoření do vody nebo korozi. (Bisschop et al., 2019, Sun et al., 2020)

Většina článků baterie je relativně křehká bez ochranné konstrukce EV nebo bateriového obalu. Data ukazují, že drobné kolize jsou pro články neškodné, avšak v případě nehody při vysoké rychlosti se riziko vzniku požáru zvyšuje. Baterie se obvykle umísťují do vyztužených a tuhých oblastí vozidel s cílem eliminovat riziko proražení během nehody. I při umístění modulů do vyztužené bezpečné zóny není vyloučené pronikání úlomků dovnitř při bočních srážkách. Je důležité zmínit i fakt, že při rychlém zpomalení vozidla před a při nehodě vznikají velké síly a může dojít k externímu zkratu. (Bisschop et al., 2019, Sun et al., 2020)

3. MODELOVÁNÍ POŽÁRU V PROSTORU HROMADNÉ GARÁŽE

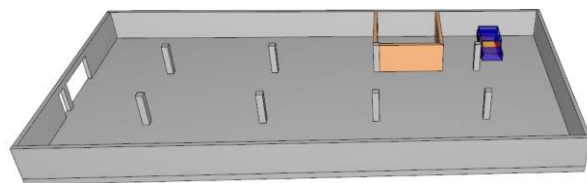
K modelování je využit numerický model typu pole Fire Dynamic Simulator (FDS) verze 6.7.9. a program PyroSim 2022.2.0803, který tvoří grafické uživatelské rozhraní.

Pro modelování požáru byl zvolen jednoduchý prostor hromadné garáže v prvním podzemním podlaží bytového domu, ze kterého je přímý výjezd na venkovní prostranství. Požár vozidla byl simulován pomocí zjednodušené metody – tedy pomocí rychlosti uvolňování tepla (HRR) získaného ze světové literatury (Lam et al., 2016).

3.1. Řešený prostor a model vozidla

Řešený prostor se nachází v 1.PP bytového domu, který má celkem 4 nadzemní podlaží a 1 podzemní podlaží. Součástí 1.PP jsou hromadné garáže, schodišťový prostor a úklidová místnost. Hromadné garáže tvoří téměř celý prostor 1.PP (viz Obrázek 1). Z prostoru hromadné garáže je přímý výjezd na volné prostranství. V hromadných garážích se nachází 24 parkovacích stání. Vstup do garáží je umožněn přes schodišťový prostor nebo dveřmi z volného prostranství. Do prostoru hromadných garáží je zakázán vjezd vozidlům na plynná paliva. V prostoru byly vymodelovány stěny, strop, podlaha, sloupy a otvory v obvodových stěnách. Nosné obvodové stěny jsou uvažovány z železobetonu, stejně tak i sloupy, strop a podlaha. Stěny schodišťového prostoru jsou uvažovány ze zdiva. V přední části garáží je uvažováno s otevřeností vjezdových vrat a vstupních dveří z důvodu dostatečného přístupu kyslíku, aby ve výpočtu nedocházelo k numerické nestabilitě, kdy je v prostoru nedostatek kyslíku.

Vzhledem k faktu, že v programu PyroSim a FDS lze modelovat jen pravoúhlou výpočetní síť, je modelování vozidla s ohledem na geometrii složité. Geometrie vozidla byla tak zjednodušena na pravoúhlé prvky. U vozidla byla vymodelována karoserie, která tvoří pevnou nehořlavou obálku a omezuje tak šíření a sálání požáru, čímž je přiblížen reálný požární scénář. U všech oken vozidla bylo simulováno jejich rozbití při dosažení teploty 300 °C. (Wald et al., 2017)



Obrázek 1: 3D model řešeného prostoru s umístěním vozidla

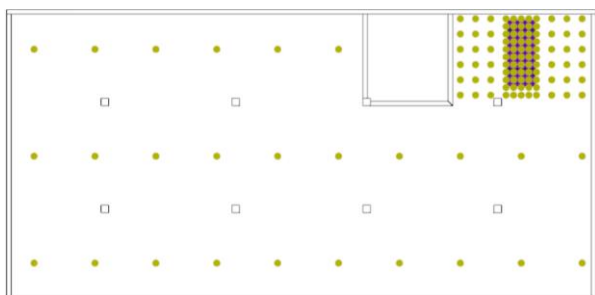
3.2. Vstupní a okrajové podmínky

Před samotným modelováním prostoru a vozidla byly do modelu vloženy následující počáteční podmínky. Teplota prostředí byla nastavena na 20 °C, relativní vlhkost byla nastavena na 40 % a tlak byl uvažován normální, tedy 1013,25 hPa. Iniciačním zdrojem byla zvolena vnitřní podlaha vozidla, která představovala hořák s proměnným výkonem o rozměrech 2,0 x 4,0. Výkon požáru by přepočtený na danou plochu. Pro modelování byl použit průběh požáru elektrovozidla (EV) se 100 % nabitím, elektrovozidla s 85 % nabitím (SOC) a spalovacího

vozidla (ICEV). V modelu byl uvažován idealizovaný požár bez hašení.

Jako chemická reakce hoření byla zvolena polyuretanová reakce se vzorcem $C_{6,3}H_{7,1}O_{2,1}N_1$ s kritickou teplotou plamene $1427\text{ }^\circ\text{C}$ a produkcí CO $0,2\text{ kg/kg}$. Podíl tvorby kouře je pro danou reakci $0,1\text{ kg/kg}$.

V prostoru byly měřeny teploty plynů a povrchové teploty pomocí termočlánků. Termočlánky pro měření teploty plynu byly umístěny ve výšce $2,0\text{ m}$ nad povrchem podlahy. Termočlánky pro měření povrchové teploty byly umístěny ve výšce $2,6\text{ m}$ nad povrchem podlahy. Dále byla v prostoru měřena viditelnost a koncentrace oxidu uhelnatého CO pomocí snímačů. Umístění termočlánků v prostoru bylo v rastru nad požárem ve vzdálenosti $0,5$ a $1,0\text{ m}$ a dále v prostoru garáže ve vzdálenosti $4,0\text{ m}$ (viz Obrázek 2).

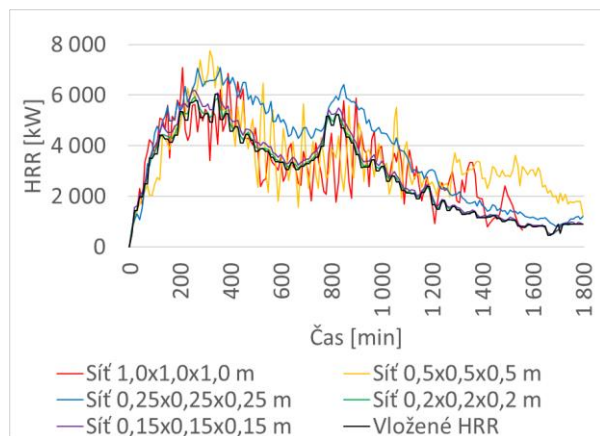


Obrázek 2: Rozmístění termočlánků a snímačů v modelu

3.3. Citlivostní analýza

Velikost výpočetní sítě byla zvolena v závislosti na citlivostní analýze, jejímž cílem bylo zjistit vliv velikosti výpočetní buňky na dosažené výsledky. Rozsah výpočetní sítě pokrývá celý prostor hromadné garáže.

Zkoušeno bylo 5 výpočetních sítí o rozměrech buňky $1,0; 0,5; 0,25; 0,2$ a $0,1\text{ m}$. U velkých výpočetních sítí docházelo k fluktuaci hodnot. Výsledky simulace u velikosti výpočetní sítě $0,2\text{ m}$ a $0,15\text{ m}$ byly téměř stejné a zároveň jsou výsledky ustálené a nedochází u jejich průběhů k fluktuaci jako tomu bylo u hrubších výpočetních sítí. U hrubších výpočetních sítí neodpovídalo vložené HRR výslednému HRR z modelu (viz Obrázek 3).

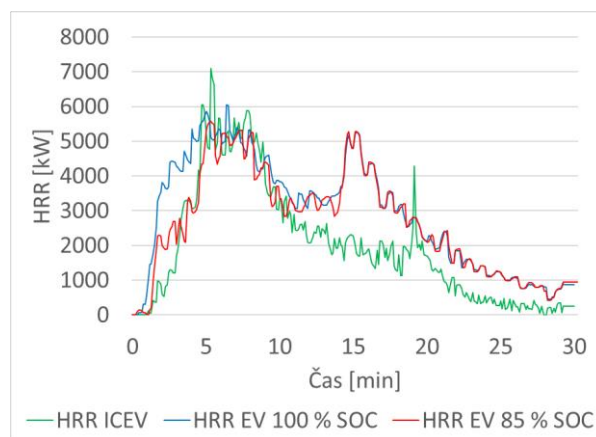


Obrázek 3: Porovnání vloženého HRR s výsledným HRR pro jednotlivé velikosti výpočetní sítě

Vzhledem k faktu, že jemnější výpočetní síť je mnohem náročnější na výpočetní čas, byla zvolena výpočetní síť s $260\ 736$ buňkami a s velikostí buňky $0,2 \times 0,2 \times 0,2\text{ m}$.

3.4. Řešený scénář

Návrh normy ČSN 73 0838 – Garáže uvažuje s navrhováním garáží pro vozidla se všemi druhy provozu, z toho důvodu je dalším scénářem pro modelování požáru zjišťován vliv druhu vozidla. Z hlediska dostupnosti dat získaných z velkorozměrových požárních zkoušek je uvažováno s požáry EV se 100% SOC, EV s 85% SOC a s požárem ICEV. Křivky požáru pro modelování jsou zobrazeny níže (viz Obrázek 4).



Obrázek 4: Vstupní křivky HRR (Lam et al., 2016)

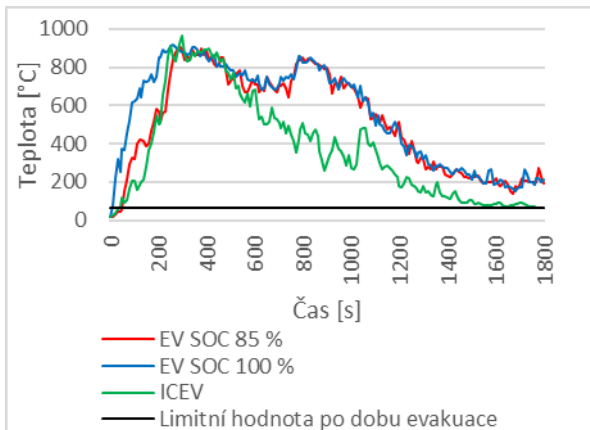
4. VÝSLEDKY

Na obrázcích níže jsou zobrazeny zobrazuje průběhy maximálních teplot plynu (viz Obrázek 5) všech čidel v prostoru hromadné garáže, průběhy maximálních teplot povrchu (viz Obrázek 6) všech čidel v prostoru hromadné garáže, průběhy minimálních viditelností (viz Obrázek 7) všech čidel v prostoru hromadné garáže a průběhy maximálních koncentrací CO (viz Obrázek 8) všech čidel v prostoru hromadné garáže.

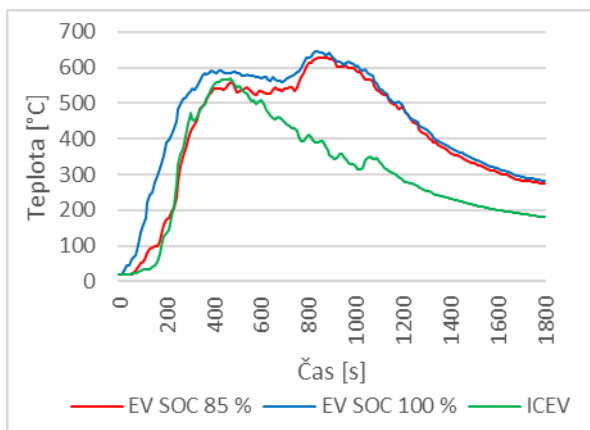
Na grafech teploty plynu, viditelnosti a koncentrace CO (viz Obrázek 5, Obrázek 7 a Obrázek 8) jsou zároveň zobrazeny limitní hodnoty pro bezpečnou evakuaci osob. Za limitní hodnoty se považují: (Kučera et al., 2010)

- snížení viditelnosti pod 10 m – měřeno ve výšce $2,0\text{ m}$ nad podlahou,
- překročení teploty nad $65\text{ }^\circ\text{C}$ – měřeno ve výšce $2,0\text{ m}$ nad podlahou,
- zvýšení koncentrace oxidu uhelnatého (CO) nad hodnotu 2000 ppm (parts per milion = část z milionu) – měřeno ve výšce $2,0\text{ m}$ nad podlahou.

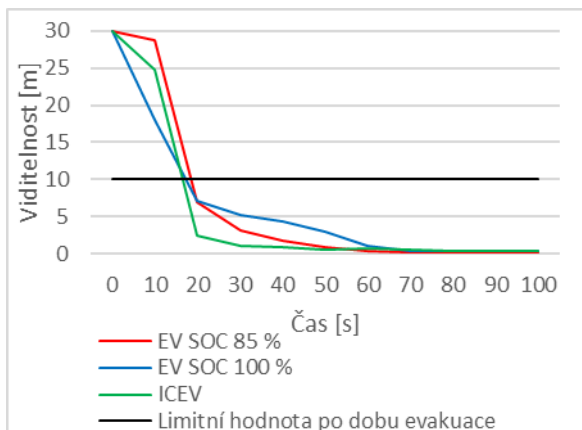
Viditelnost a koncentrace v prostoru hromadné garáže je zobrazena v prvních 100 sekundách simulace, neboť k překročení limitních hodnot pro evakuaci dochází již v prvních sekundách simulace. Předpokládaná doba evakuace z prostoru hromadné garáže je dle výpočtu ČSN 73 0804 $t_u = 0,88\text{ min} = 53\text{ s}$.



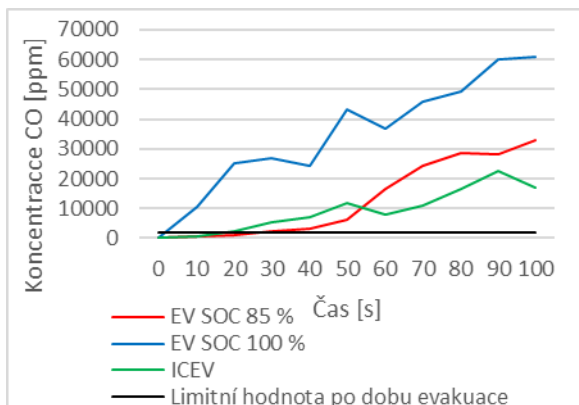
Obrázek 5: Porovnání maximálních teplot plynu



Obrázek 6: Porovnání maximálních teplot povrchu

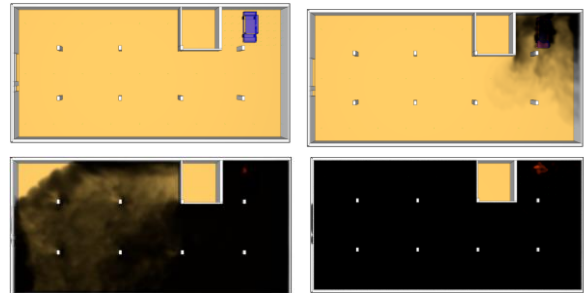


Obrázek 7: Porovnání minimálních viditelností

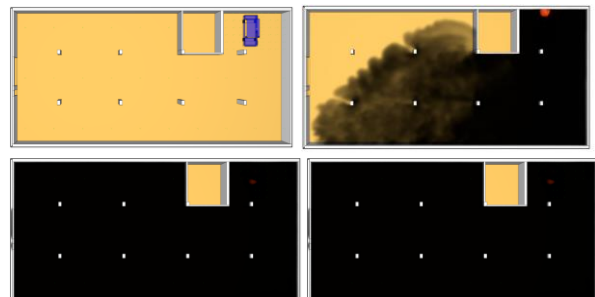


Obrázek 8: Porovnání maximálních koncentrací CO

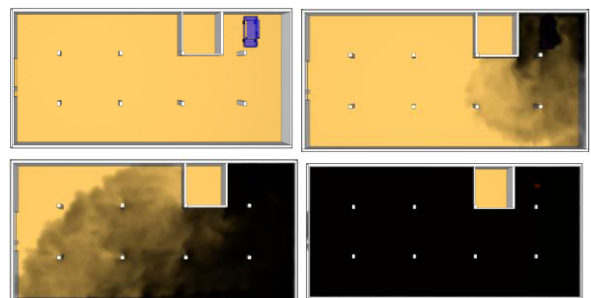
Na obrázcích níže jsou uvedeny vizualizace průběhu kouře pro jednotlivá vozidla (viz Obrázek 9, Obrázek 10 a Obrázek 11).



Obrázek 9: Vizualizace průběhu kouře pro EV s 85 % SOC v čase 0 s, 50 s, 100 s a 900 s



Obrázek 10: Vizualizace průběhu kouře pro EV s 100 % SOC v čase 0 s, 50 s, 100 s a 900 s



Obrázek 11: Vizualizace průběhu kouře pro ICEV v čase 0 s, 50 s, 100 s a 900 s

Z výše uvedených výsledků je patrné, že při požáru ICEV jsou maximální teploty plynů vyšší než při požáru EV s 100 % SOC, naopak maximální teploty plynů jsou při požáru EV s 85 % SOC nižší, což odpovídá tomu, že maximální HRR je u ICEV vyšší než u EV s 100 % SOC a nižší u EV s 85 % SOC. Teploty povrchu jsou při požáru ICEV a EV s 85 % SOC nižší než při požáru EV se 100 % SOC. U EV s 85 % SOC je to dáno nižším maximálním HRR. Při požáru EV se 100 % SOC je viditelnost nižší, než při požáru ICEV a EV s 85 % SOC. Naopak koncentrace, CO je při požáru EV se 100 % SOC je vyšší, než při požáru ICEV a EV s 85 % SOC. K zakouření celého prostoru hromadné garáže dochází u všech druhů vozidel již v prvních 100 sekundách simulace.

Elektrovozidla tedy na základě vstupů, které byly při modelování zvoleny, nepředstavují podstatně vyšší požární riziko než klasická vozidla se spalovacími motory, co se týče teplot plynu, konstrukcí, koncentrace CO a viditelnosti.

5. ZÁVĚR

Závěrem lze říci, že při zvolených vstupech v této práci EV nepředstavují z hlediska sledovaných výsledků a veličin vyšší riziko než ICEV. Zároveň lze konstatovat, že požár EV závisí na jeho SOC, jelikož při vyšším SOC je vyšší i maximální výkon požáru.

Ze simulace je patrné, že limitní hodnoty koncentrace CO pro bezpečnou evakuaci osob ve výšce 2,0 m nad podlahou jsou překročeny již v prvních sekundách simulace v prostoru hořícího vozidla. Stejně tak je i celý prostor hromadné garáže zakouřen již v prvních 100 sekundách simulace. Z toho důvodu by bylo v prostorách nutné instalovat např. zařízení odvodu kouře a tepla (ZOKT). Modelováním bylo zjištěno, že limitní hodnoty teploty pro bezpečnou evakuaci osob jsou též překročeny již v prvních 100 sekundách, což znamená, že evakuace dle standardního normového výpočtu nevyhovuje. Z toho důvodu by bylo vhodné řešit případnou instalaci požárně bezpečnostních zařízení.

PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl vytvořen v rámci finanční podpory Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS23/033/OHK1/1T/11.

References

- BOEHMER, H.; KLASSEN, M.; OLENICK, S. Modern Vehicle Hazards in Parking Structures and Vehicle Carriers. Fire Protection Research Foundation, FPRF-2020-07, Jul, 2020.
- BERG, Helena. Batteries for electric vehicles: materials and electrochemistry. Cambridge university press, 2015.
- DORSZ, Adam; LEWANDOWSKI, Mirosław. Analysis of fire hazards associated with the operation of electric vehicles in enclosed structures. *Energies*, 2022, 15.1: 11.
- SUN, Peiyi, et al. A review of battery fires in electric vehicles. *Fire technology*, 2020, 56: 1361-1410.
- BISSCHOP, Roeland, et al. Fire safety of lithium-ion batteries in road vehicles. 2019.
- WANG, Qingsong, et al. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2019, 73: 95-131.
- LAM, Cecilia, et al. Full-scale fire testing of electric and internal combustion engine vehicles. In: 4th International conference on fire in vehicle, Baltimore. 2016.
- ČSN 73 0804. Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty. únor 2010
- WALD, František, Marek POKORNÝ, Kamila CÁBOVÁ, Hana NAJMANOVÁ, Petr HEJTMÁNEK, Martin BENÝŠEK, Marta KUREJKOVÁ a Ivo SCHWARZ. Modelování dynamiky požáru v budovách. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-50633-2
- KUČERA, Petr a Lenka PEZDOVÁ. Základy matematického modelování požáru. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. ISBN 978-80-7385-095-1.

BĚLOHRADSKÁ, Tereza. Modelování požáru a analýza elektrovozidel při návrhu konstrukcí. Praha, 2023. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta stavební.