

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra betonových a zděných konstrukcí



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Integrovaná bezpečnost staveb

**Modelování požáru a analýza elektrovozidel při
návrhu konstrukcí**

Modelling of fire and analysis of electric vehicles for
construction design

Vypracovala:

Bc. Tereza Bělohradská

Vedoucí práce:

Ing. Martin Benýšek, Ph.D.

2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Bělohradská Jméno: Tereza Osobní číslo: 477001
Zadávací katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí
Studijní program: N36IQ - Integrovaná bezpečnost staveb
Studijní obor/specializace: N36IQ - Integrovaná bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Modelování požáru a analýza elektrovozidel při návrhu konstrukcí
Název diplomové práce anglicky: Modelling of fire and analysis of electric vehicles for construction design
Pokyny pro vypracování:
Rešerše literatury
Model požáru
Výpočty
Vyhodnocení
Závěr
Seznam doporučené literatury:
BERG, Helena. Batteries for electric vehicles: materials and electrochemistry [online]. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. Book, Whole. ISBN 1316090973.
WATANABE, NORIMICHI, ET AL. Comparison of fire behaviours of an electric-battery-powered behicle and gasoline-powered vehicle in a real-scale fire test. In: Proceedings from 2nd International Conference on Fires in Vehicles-FIVE. 2012, s. 195–206.
ČSN EN 1992-1-2
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Martin Benýšek, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce: 29.09.2022 Termín odevzdání DP v IS KOS: 09.01.2023
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“.

.....
Datum převzetí zadání

.....
Podpis studenta(ky)



Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....

Bc. Tereza Bělohradská



Poděkování

Ráda bych tímto poděkovala zejména mému vedoucímu Ing. Martinu Benýškovi, Ph. D., a to nejen za cenné rady a připomínky, ale i za vstřícnost a podporu během tvorby této práce.

Zároveň bych ráda poděkovala svým blízkým za důvěru, kterou ve mě během celého studia na vysoké škole vkládali.



Obsah

Abstrakt.....	10
Abstract.....	11
Seznam použitých symbolů a zkratk.....	12
1 Úvod.....	14
1.1 Motivace.....	14
1.2 Cíle práce.....	15
2 Elektrovozidla.....	16
2.1 Historie elektrovozidel.....	16
2.1.1 Množství elektrovozidel.....	17
2.2 Typy elektrovozidel.....	18
2.2.1 Plný elektromobil (BEV).....	18
2.2.2 Hybridní elektromobil.....	19
2.3 Baterie.....	20
2.3.1 Charakteristiky baterie.....	20
2.3.2 Princip baterie.....	22
2.3.3 Konstrukce baterie.....	23
2.3.4 Typy baterií.....	24
2.4 Nabíjení.....	26
2.4.1 Režimy nabíjení.....	26
2.4.2 Typy konektorů.....	29
3 Požární riziko elektrovozidel a baterií.....	31
3.1 Tepelné poškození.....	32
3.2 Elektrické přetížení.....	32
3.3 Mechanické poškození.....	33
4 Průběh a charakter požáru baterií a vozidla.....	34
4.1 Chování Li-ion baterií při požáru.....	34
4.1.1 Uvolňování tepla z baterie.....	34
4.1.2 Energie uvolněná z baterie při požáru.....	35
4.1.3 Hořlavé plyny.....	37
4.1.4 Vliv stavu nabití na průběh požáru.....	38
4.1.5 Šíření požáru.....	39
4.2 Velkorozměrové požární zkoušky.....	40
4.2.1 Velkorozměrová požární zkouška vozidel z roku 2012.....	40
4.2.2 Velkorozměrová požární zkouška vozidel Nissan a Honda z roku 2012.....	43
4.2.3 Velkorozměrová požární zkouška EV a ICEV z roku 2015.....	47
4.2.4 Porovnání výsledků z výše uvedených studií.....	50
4.2.5 Porovnání křivek požáru vozidel s rychlostmi rozvoje požáru.....	50



5	Problematika hašení požárů elektrovozidel.....	53
5.1	Hašení EV, PHEV a HEV.....	54
5.2	Ochlazování.....	55
5.2.1	Ochlazování vodním proudem.....	55
5.2.2	Ochlazování ponořením do vody.....	56
5.2.3	Použití CO ₂ , systému COBRA a manipulačních vozíků.....	57
6	Požární bezpečnost hromadných garáží.....	59
6.1	Legislativní požadavky.....	59
6.2	Opatření z hlediska elektromobility.....	60
6.3	Řešení požární bezpečnosti hromadných garáží v různých státech.....	62
7	Posuzování požární odolnosti konstrukcí.....	63
7.1	Metody posuzování požární odolnosti konstrukcí.....	63
8	Modelování požáru v řešeném prostoru.....	65
8.1	Řešený prostor.....	66
8.2	Požárně bezpečnostní řešení daného prostoru.....	66
8.2.1	Požární úseky, požární riziko a stupeň požární bezpečnosti.....	67
8.2.2	Požární odolnost stavebních konstrukcí.....	68
8.2.3	Koncepce evakuace osob z řešeného prostoru.....	68
8.3	Použitý výpočtový model.....	69
8.4	Model řešeného prostoru a model vozidla.....	70
8.4.1	Model vozidla.....	70
8.4.2	Model prostoru.....	71
8.5	Vstupní a okrajové podmínky pro modelování požáru.....	72
8.6	Citlivostní analýza.....	74
8.7	Popis modelových situací.....	80
8.7.1	Scénář č. 1: Vliv výkonu požáru na teploty v prostoru hromadné garáže.....	80
8.7.2	Scénář č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru.....	80
8.7.3	Scénář č. 3: Vliv vstupní křivky požáru (EV, ICEV).....	82
8.8	Výsledky modelových situací.....	83
8.8.1	Scénář č. 1: Vliv výkonu požáru na teploty v prostoru hromadné garáže.....	83
8.8.2	Scénář č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru.....	88
8.8.3	Scénář č. 3: Vliv vstupní křivky požáru (EV, ICEV).....	93
8.9	Vizualizace průběhu požáru z programu Pyrosim a Smokeview.....	97
8.9.1	Scénář č. 1: Vliv výkonu požáru na teploty v prostoru hromadné garáže.....	98
8.9.2	Scénář č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru.....	100
8.9.3	Scénář č. 3: Vliv vstupní křivky požáru (EV, ICEV).....	102
9	Posouzení požární odolnosti konstrukce.....	105
9.1	Řešená konstrukce.....	105



9.2 Posouzení únosnosti konstrukce.....	106
10 Závěr.....	109
Literatura	112
Použitý software.....	116
Seznam obrázků.....	117
Seznam tabulek.....	121
Přílohy.....	122



Abstrakt

Diplomová práce se zabývá požárním rizikem elektrovozidel při návrhu železobetonových konstrukcí. Hlavním cílem práce je představit požární riziko elektrovozidel s ohledem na požární bezpečnost budov. Práce obsahuje dvě dílčí části – teoretickou a praktickou část. Na začátku teoretické části je popsán vývoj elektrovozidel a jejich zvětšující se množství ve světě, ale i v České republice. Dále práce popisuje typy různých elektrovozidel, které jsou v dnešní době dostupné a jejich hlavní komponenty, kterými jsou především baterie. Následuje stručný popis nabíjení a definice požárního rizika baterií a celých elektrovozidel. 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 FDS, který je zástupcem CFD modelů. Požár je simulován zjednodušenou metodou pomocí HRR křivek z teoretické části. Pro simulaci jsou vybrány různé požární scénáře. Hlavním cílem simulací je zjištění vlivu požáru elektrovozidel na požární bezpečnost budov.

Klíčová slova

Elektrovozidla; typy elektrovozidel; vozidla se spalovacím motorem; typy baterií elektrovozidel; požár elektrovozidla; požární odolnost konstrukcí; rychlost uvolňování tepla



Abstract

The thesis deals with the fire risk of electric vehicles in the design of reinforced concrete structures. The main objective of the thesis is to present the fire risk of electric vehicles with regard to the fire safety of buildings. The thesis contains two parts – theoretical and practical part. At the beginning of the theoretical part, the development of electric vehicles and their increasing number in the world and in the Czech Republic is described. Then the thesis describes the types of different electric vehicles available today and their main components, which are mainly batteries. This is followed by a brief description of charging and a definition of the fire risk of batteries and entire electric vehicles. 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 FDS program, which is a representative of CFD models, is used for the simulation. The fire is simulated by a simplified method using HRR curves from the theoretical part. Different fire scenarios are selected for the simulation. The main objective of the simulations is to determine the effect of electric vehicle fire on the fire safety of buildings.

Keywords

Electric vehicles; types of electric vehicles; internal combustion engine vehicles; types of batteries; fire of electric vehicle; fire resistance; heat release rate



Seznam použitých symbolů a zkratk

Zkratky

<i>AC</i>	Střídavý proud (Alternating current)
<i>BEV</i>	Plný elektromobil (Battery electric vehicle)
<i>CCS</i>	Kombinovaný nabíjecí systém (Combined Charging System)
<i>CSBS</i>	Technika kalorimetrie v měděném válci
<i>DC</i>	Stejnoseměrný proud (Direct current)
<i>DOD</i>	Stav vybití (Depth of Discharge)
<i>EPS</i>	Elektrická požární signalizace
<i>EV</i>	Elektrické vozidlo (Electric vehicle)
<i>FDS</i>	Simulátor dynamiky požáru (Fire dynamics simulator)
<i>FTIR</i>	Infračervená spektrometrie (Fourier transform infrared spectroscopy)
<i>HEV</i>	Hybridní vozidlo (Hybrid electric vehicle)
<i>HRR</i>	Rychlost uvolňování tepla (Heat release rate)
<i>HRR_{max}</i>	Maximální rychlost uvolňování tepla
<i>HZS</i>	Hasičský záchranný sbor (ČR)
<i>ICEV</i>	Konvenční vozidlo – spalovací (Internal combustion engine vehicle)
<i>LCO</i>	Typ Li-ion baterie – Lithium-kobaltová baterie
<i>LFP</i>	Typ Li-ion baterie – Lithium-železo-fosfátová baterie
<i>Li-ion</i>	Lithium-iontová baterie
<i>Li-pol</i>	Lithium-polymerová baterie
<i>LMO</i>	Typ Li-ion baterie – Lithium-iontová baterie s oxidem manganu
<i>MPO</i>	Ministerstvo průmyslu a obchodu
<i>MŽP</i>	Ministerstvo životního prostředí
<i>NCA</i>	Typ Li-ion baterie – Baterie s katodou lithium nikl kobalt oxidem hlinitým
<i>NCM</i>	Typ Li-ion baterie – Baterie s katodou lithium nikl kobalt oxid manganatého



<i>NIST</i>	Národní institut pro standardy a technologie
<i>PHEV</i>	Plug-in hybridní vozidlo (Plug-in hybrid electric vehicle)
<i>PTCH</i>	Požárně technické charakteristiky
<i>RHR_f</i>	Maximální rychlost uvolňování tepla
<i>RCT</i>	Požární zkouška v rohu místnosti (Room corner test)
<i>SHZ</i> (<i>SSHZ</i>)	Stabilní hasicí zařízení (Samočinné stabilní hasicí zařízení)
<i>SMV</i>	Program pro zobrazení výsledků k programu FDS (Smokeview)
<i>SOC</i>	Stupeň nabití baterie (State of charge)
<i>THR</i>	Celkové uvolněné teplo (Total heat release)
<i>ZOKT</i>	Zařízení odvodu kouře a tepla

Nomenklatura

<i>A</i>	Ampér (jednotka elektrického proudu)
<i>Ah</i>	Ampérhodina (jednotka elektrického náboje)
<i>J</i>	Joule (jednotka energie – tepla)
<i>kg</i>	Kilogram (jednotka hmotnosti)
<i>kWh</i>	Kilowatthodina (jednotka energie)
<i>Pa</i>	Pascal (jednotka tlaku)
<i>V</i>	Volt (jednotka elektrického napětí)
<i>W</i>	Watt (jednotka výkonu)
<i>c</i>	Měrná tepelná kapacita; [kJ/(kg·K)]
<i>λ</i>	Součinitel tepelné vodivosti; [W/(m·K)]
<i>ρ</i>	Objemová hmotnost; [kg/m ³]



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 diplomová práce zabývá rizikem požárů elektrovozidel. Diplomová práce navazuje na seminární práci řešenou v letním semestru, ve které byla zpracována základní rešerše týkající se požárního rizika elektrovozidel, s ním souvisejících problémů a základní model požáru elektrovozidla. Práce je rozdělena do dvou hlavních částí – teoretické a praktické části.

První část diplomové práce obsahuje přehledný souhrn aktuálních informací a poznatků jak z české, tak zahraniční literatury týkajících se požárů a požární bezpečnosti z hlediska elektromobility. V úvodu jsou popsány základní typy elektrovozidel, charakteristiky a funkce baterie a jejího nabíjení. Následuje kapitola zmiňující požární rizika elektrovozidel a baterií. Dále je popsáno chování baterií při požáru, velkorozměrové požární zkoušky elektrovozidel a problematika jejich hašení. V závěru se teoretická část věnuje požární bezpečnosti hromadných garáží (i z hlediska elektromobility) a souvisejícímu posuzování požární odolnosti konstrukcí.

Ve druhé části diplomové práce byly získané informace a poznatky uplatněny při modelování požáru v řešeném prostoru. V této části je podrobně popsán řešený model prostoru a elektrovozidla, následně i jednotlivé modelové situace, které vychází z teoretické části. Výstupem této části jsou výsledky zobrazené na grafech a vizualizacích a doporučení, která z těchto výsledků vyplývají.

1.1 Motivace

Hlavní motivací pro výběr tohoto tématu byla absence normy pro návrh požární bezpečnosti staveb z hlediska elektromobility. Zvyšující se požadavky celé společnosti, jednotlivých států či Evropské unie na životní prostředí vedou k podstatným změnám v automobilovém průmyslu. V rámci Evropské komise se mluví o nulové emisi oxidu uhličitého CO₂, proto jsou klasické automobily se spalovacími motory v posledních letech nahrazovány automobily s čistě elektrickým pohonem (emise musí být spjaty s výrobou elektrické energie). Ten představují bateriové vozy, mezi které se řadí plně bateriové automobily, plug-in hybridy nebo plně hybridy. Počty elektrovozidel se každým rokem zvyšují. Změna automobilového průmyslu je podpořena i výrazně rychlejším vývojem technologií baterií používaných v automobilech.



Změna v automobilovém průmyslu s sebou přináší i snahu o to, aby vozidla byla co nejlhčí 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 dobíjení, 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 požárně 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.

1.2 Cíle práce

Hlavním cílem práce je posoudit vliv požárů elektrovozidel na požární bezpečnost staveb. Pro naplnění hlavního cíle práce byly stanoveny následující dílčí cíle:

1. definice elektrovozidel, jejich baterií a rizik vzniku požáru;
2. průběh hoření elektrovozidel a jejich hašení;
3. zjištění vlivu jednotlivých požárních scénářů – různé výkony požáru elektrovozidla, šíření požáru mezi vozidly a požár různých druhů vozidel.



2 Elektrovozidla

Elektrovozidla se od konvenčních vozidel liší především absencí palivové nádrže, místo ní jsou ve voze umístěny velkoformátové vysokonapěťové lithium-iontové baterie. Spalovací motor je zároveň nahrazen elektromotorem. [1] Pod pojmem elektrovozidla si lze představit plný elektromobil (BEV) nebo hybridní elektromobil (HEV a PHEV).

2.1 Historie elektrovozidel

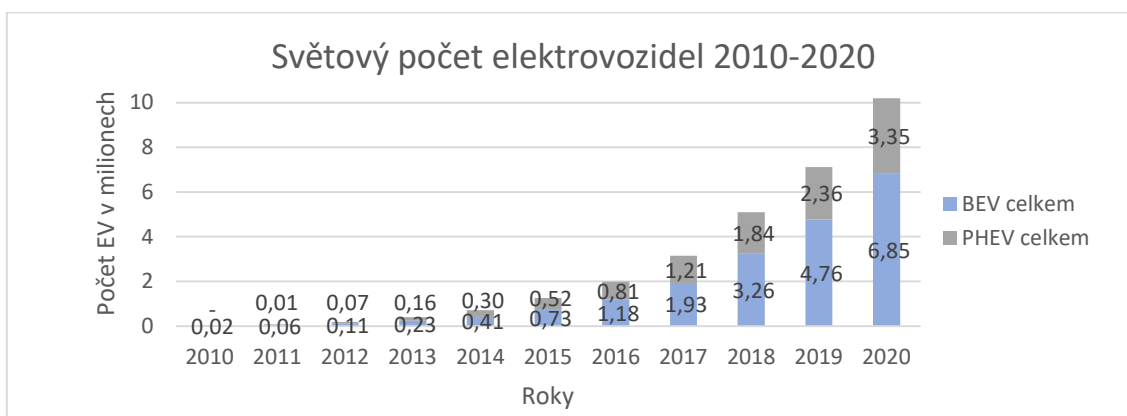
Historie elektrovozidel je úzce spojena s historií baterií, která jsou pro elektrovozidla používána. Pro vývoj elektrovozidel jsou důležitá jména vědců, jejichž jména jsou spojena s fyzikálně-chemickými vynálezy, těmi jsou Alessandro Volta, Luigi Galvani nebo Michael Faraday. [2]

První lehká elektrovozidla se objevila v USA, Spojeném Království nebo v Nizozemí v polovině čtyřicátých let 19. století. První elektrovozidla měla spíše podobu kočárů bez koní. Podstatný vliv na elektromobilitu měl vynález Gastona Planté, který přišel s objevem olověné baterie, již bylo možné dobíjet. Na počátku 80. let 19. století se objevovala další elektrovozidla s olověnými bateriemi. Ve srovnání s prvními elektrovozidly, první automobil se spalovacím motorem předvedl Karl Benz až v roce 1885. Koncem 19. století byla překonána rychlost 100 km/h v elektrovozidle, což představovalo velký zlom. V roce 1901 přišel Thomas Edison s nikl-železnou baterií, která byla schopna uchovat o 40 % více energie než olověná baterie. Největší rozmach elektromobility byl v letech 1880 až 1900. V počátcích 20. století byla elektrovozidla v USA dominantní oproti vozidlům se spalovacími motory. Největší změna přišla s vynálezem elektrického startéru Thomase Forda. V roce 1909 byl na trh uveden Ford model T (vozidlo se spalovacím motorem), který se na trhu stal dominantním a elektrovozidla byla vytlačena z trhu. [2] Na českém území je elektromobilita spojena se jménem Františka Křížíka, který už v roce 1895 postavil první elektrovozidlo poháněné stejnosměrným elektromotorem. [3] Během druhé světové války se opět začala používat elektrovozidla, jelikož byla nouze o pohonné hmoty. Větší vývoj elektromobilů začal v šedesátých letech 20. století. Vzestup elektromobilů byl v letech 1970 a 1980 způsoben energetickou krizí, avšak stále nebyly tolik používány z důvodu větší pořizovací ceny. [2] Od počátku 21. století prodej elektrovozidel roste. Největší vliv na elektromobilitu má automobilka Tesla. S elektromobily postupně přichází i automobilka Škoda. [4]

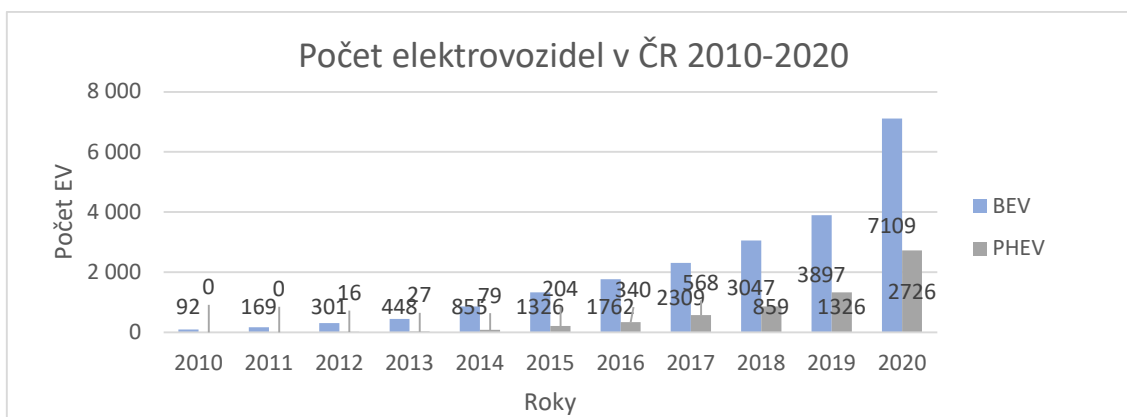


2.1.1 Množství elektrovozidel

Globálně se počty elektromobilů od roku 2010 zvyšují. Dle EV Outlook 2021 databáze [5] bylo v roce 2020 celosvětově dostupných cca 370 modelů elektromobilů, což činí oproti roku 2019 nárůst o 40 %. Průměrný dojezd elektromobilů v roce 2020 byl 350 kilometrů. Na grafu (viz Obr. 2-1) je znázorněn počet BEV a PHEV ve světě v průběhu let 2010 až 2020. Dle grafu (viz Obr. 2-1) bylo v roce 2020 na světových silnicích celkem přes 10 milionů elektromobilů. [5] Ve srovnání se světem a Evropou není počet elektrovozidel v České republice tak vysoký, spíše je ČR v počtu elektrovozidel oproti okolním Evropským státům pozadu. K 1.1.2022 bylo v České republice celkem 10 024 plných elektrovozidel. [6] Graf (viz Obr. 2-2) znázorňuje vývoj počtu elektrovozidel v ČR v letech 2010–2020. V České republice proběhly v letech 2020 dotační programy Ministerstva životního prostředí (MŽP) a Ministerstva průmyslu a obchodu (MPO). Podpora nebyla zavedena pro soukromé osoby. Podpora od MŽP se týkala samosprávy, příspěvkových organizací, výzkumných institucí a veřejných vysokých škol. Program od MPO byl vypsán pro malé a střední mimopražské podniky. [4]



Obr. 2-1: Světový počet elektrovozidel 2010–2020 – upraveno z [5]



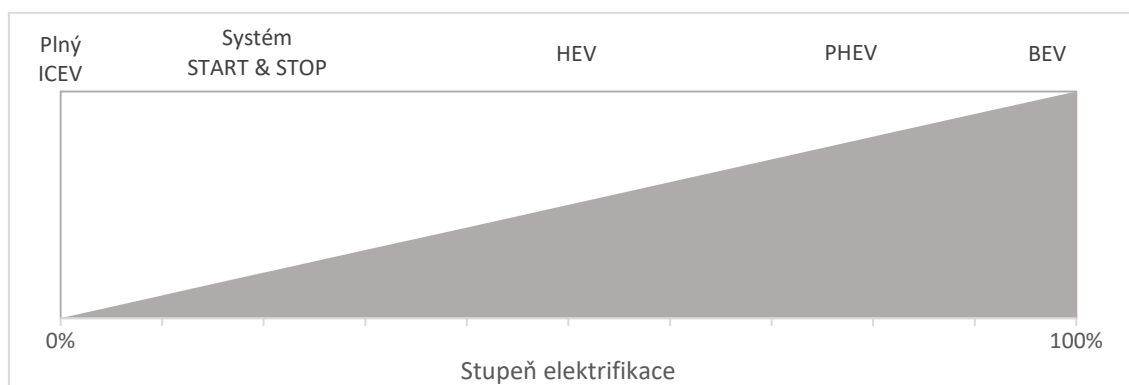
Obr. 2-2: Počet elektrovozidel v ČR – upraveno z [7]



2.2 Typy elektrovozidel

Elektrovozidla mohou mít různé stupně elektrifikace, to znamená, jak velká část energie pochází z elektřiny a jak velká část pochází z vnitřního spalování motoru (viz Obr. 2-3). Pokud je elektrifikace vozidla nižší než 100 % je nutné využívat i spalovací motor. Baterie je jediným zdrojem energie pouze tehdy, je-li vozidlo plně elektrifikované, tedy elektrifikace je 100 %. Stupeň elektrifikace je kompromisem mezi složitostí instalace, výkonem a cenou. [8]

Elektrovozidla v dnešní době 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. [1]



Obr. 2-3: Stupeň elektrifikace pro různé typy vozidel – upraveno z [8]

2.2.1 Plný elektromobil (BEV)

Plně elektrické vozidlo je nejjednodušším typem všech elektrických vozidel, jelikož využívá pouze jediný zdroj energie – baterii, která pohání elektromotor nebo trakční motor. Baterie a systém elektrického pohonu musí být schopny samostatně splnit požadavky na provoz vozidla. Elektromotor musí být schopen akcelarovat a pohánět vozidlo. Dojezdová vzdálenost přímo souvisí s počtem a kapacitou akumulátorů. Na dojezdovou vzdálenost mají však vliv podmínky použití, agresivní řízení a další energeticky náročná zařízení zvyšující spotřebu energie, na základě toho se snižuje dojezdová vzdálenost. Baterie elektrovozidla funguje jako palivová nádrž běžného vozidla, dá se dobít a dokud není baterie prázdná, vozidlo je schopné jet. Nevýhodou BEV je doba nabíjení, která je v porovnání s dobou tankování klasických vozidel se spalovacími motory mnohem delší. [8] Motory elektromobilu využívají rekuperaci, která představuje přeměnu kinetické energie při brždění zpět na využitelnou energii. [9]



2.2.2 Hybridní elektromobil

2.2.2.1 Plný hybrid (HEV)

Plně hybridní vozidlo je vozidlo se dvěma nebo více typy pohonu, z nichž alespoň jeden pohon je elektrický. Kinetická energie při brždění se regeneruje a ukládá do baterie, což představuje důležitou vlastnost z hlediska energetické účinnosti. Klíčovým faktorem HEV jsou interakce mezi různými zdroji energie. Baterie HEV může být nabíjena pouze rekuperací brzděné energie nebo využitím spalovacího motoru, tedy bez externího nabíjení. Existuje široká škála konfigurací HEV s různými stupni elektrifikace od mikro HEV po mírný a silný HEV. U mikro HEV, obvykle nazývaném „Start-stop“, se ICEV automaticky vypne, kdykoliv je vozidlo ve volnoběhu během dojezdu, brždění nebo zastavení a poté se rychle restartuje. Při nečinnosti spalovacího motoru baterie dodává energii jiným systémům (klimatizace, rádio). Hybridní vozidla s větší kapacitou baterie než mikro HEV lze kategorizovat jako mírná nebo silná HEV. U mírného HEV poskytuje baterie energii provozu ICEV a využívá rekuperační brždění, avšak není možný žádný čistě elektrický pohon. [8]

Extra výkon, který je poskytovaný elektromotorem, může umožnit menší spalovací motor. Baterie může napájet pomocné příslušenství a snížit volnoběh motoru. Tyto vlastnosti vedou k menší spotřebě paliva při stejném výkonu jako u vozidla, které je vybaveno pouze spalovacím motorem. [10]

2.2.2.2 Plug-in hybrid (PHEV)

Plug-in hybridní elektromobil kombinuje výhody obou elektromobilů BEV a HEV. Klíčovými vlastnostmi je možnost nabíjet baterii externě, delší plně elektrický dojezd než u HEV a celkově delší dojezd než u BEV. PHEV má často tři provozní režimy: čistý režim spalovacího motoru, čistý elektrický režim a hybridní elektrický režim. Využívání těchto režimů závisí na kapacitě a stavu baterie. Z toho důvodu musí být PHEV schopen poskytnout plný akcelerační výkon využívající výhradně elektrickou energii, a tak je kapacita baterie ve srovnání s HEV větší. Výkon baterie je z hlediska energie menší než u BEV. Baterii je možné nabíjet externě pomocí elektřiny ze sítě, rekuperací z brzděné energie nebo pomocí spalovacího motoru. [8]

PHEV obvykle běží na elektrický pohon, dokud není baterie téměř vybitá, poté se vozidlo automaticky přepne na spalovací motor. [11]



2.3 Baterie

Základním prvkem pro všechny typy elektrovozidel je dobíjecí baterie, která slouží k opakovanému dobíjení a ukládání energie. Její fungování je založeno na elektrochemickém principu. Baterie je nejdůležitější a zároveň nejdražší část elektromobilu, její cena tvoří zhruba 25–50 % ceny vozidla v závislosti na použité technologii. Z toho důvodu jsou elektromobily méně rozšířené než automobily se spalovacím motorem. Energie uložená v trakční baterii představuje největší riziko z hlediska provozu elektromobilu. U sériově vyráběných osobních vozů je dnes nejpoužívanější lithium-iontová baterie, hlavně díky své vysoké akumulaci energie, vysoké energetické hustotě, účinnosti a dlouhé životnosti. [12]

2.3.1 Charakteristiky baterie

Baterie jsou navrhovány s danými parametry, nejdůležitějším z nich je kapacita. Dalšími parametry je například stav nabití, energetická hustota, specifická energie, specifický výkon, nabíjecí cykly, vnitřní odpor, účinnost a v neposlední řadě životnost. [13] Dále je nutné při návrhu baterie elektrovozidla splnit kritéria na mechanickou stabilitu, teplotu, životnost baterie a napěťové charakteristiky. [8] Kapacita baterie představuje maximální množství energie, které je možné z baterie za určitých specifikovaných podmínek dostat. Kapacitu lze vyjádřit v ampérhodinách (Ah) nebo ve watthodinách (Wh), přičemž pro elektromobily se hodnoty udávají právě ve watthodinách. [13] Kapacita baterie se liší v závislosti na typu osobního elektromobilu. Největší kapacitu baterie mají BEV, což se promítá do většího nebezpečí požáru, který vyplývá z jeho provozu. Baterie BEV mají v průměru kapacitu 82 kWh, HEV 1,4 kWh a PHEV 13,8 kWh (viz Tab. 2-1). [12]

Tab. 2-1: Příklad kapacity Li-Ion baterií u různých typů elektrovozidel – převzato z [12]

Typ elektrovozidla	Minimální kapacita Li-Ion baterie [kWh]	Průměrná kapacita Li-Ion baterie [kWh]	Maximální kapacita Li-Ion baterie [kWh]
HEV	0,90 ¹⁾	1,40 ²⁾	1,60 ³⁾
PHEV	8,90 ⁴⁾	13,80 ⁵⁾	42,20 ⁶⁾
BEV	32,6 ⁷⁾	82,00 ⁸⁾	200,00 ⁹⁾

¹⁾ Toyota Yaris Hybrid, ²⁾ Ford Fusion Hybrid, ³⁾ Lexus NX 300 h, ⁴⁾ KIA Niro PHEV, ⁵⁾ Mitsubishi Outlander PHEV, ⁶⁾ BMW i3 REx, ⁷⁾ Mini Cooper SE, ⁸⁾ Volkswagen ID.4 Pro, ⁹⁾ GMC Hummer EV Pickup (odhad)



Stav nabití (SOC) určuje, jak moc je baterie nabitá, tedy úroveň baterie s ohledem na její procentní kapacitu. Energetická hustota baterie uvádí energii, kterou je baterie schopna dodat na jednotku objemu (Wh/L). Specifická energie je energie, kterou je baterie schopna poskytnout na jednotku hmotnosti (Wh/kg). Specifický výkon představuje výkon, který může baterie dodat na jednotku hmotnosti, přičemž je udávána ve wattech (W/kg). Nabíjecí cyklus je dokončen, když je veškerá energie baterie spotřebována nebo naopak je baterie nabitá na 100 %. Dále je důležitá účinnost vyjádřená jako procento energie, kterou je baterie schopna dodat. [13]

Dalším aspektem, který je při návrhu baterie zvážit, je životnost baterie, která je určena počtem nabíjecích cyklů, které je baterie schopna vydržet. Cílem je získat baterii, která vydrží co nejvíce nabíjecích cyklů. [13] Konec životnosti baterií nastává v momentě, kdy není možné baterii nabít na více než 80 % její původní kapacity. Tab. 2-2 ukazuje počet cyklů, které lze očekávat od typické Li-ionbaterie v závislosti na stavu vybití (DOD), která je opakem stavu nabití (SOC), když SOC stoupá DOD klesá. 100 % DOD značí úplné vybití a nabití baterie. [14]

Tab. 2-2: Počet nabíjecích a vybíjecích cyklů v závislosti na stavu vybití [14]

Stav vybití (DOD)	Vybíjecí/nabíjecí cykly
100 %	300 – 600
80 %	400 – 900
60 %	600 – 900
40 %	1000 – 3000
20 %	2000 – 9000
10 %	6 000 – 15 000

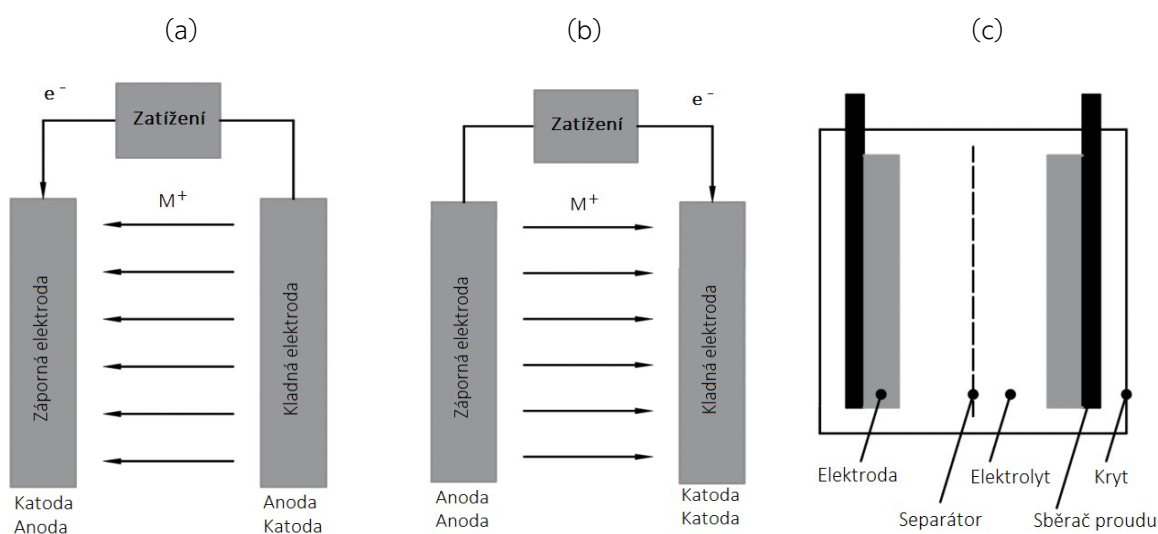
Součásti baterie nejsou stoprocentně dokonalými vodiči, což znamená, že kladou určitý odpor při přenosu energie. Během procesu nabíjení se část energie uvolňuje ve formě tepla (tepelné ztráty). Vyrobené teplo za jednotku času se rovná ztrátě energie vnitřním odporem. Vnitřní odpor bude mít větší vliv při vysokém výkonu nabíjení. Při rychlém nabíjení se tedy ztratí více energie ve srovnání s pomalým nabíjením. [13] Což má vliv na zvolený typ nabíjení. Během rychlonabíjení vzniká během počáteční doby nabíjení dodatečný proud, který zvyšuje namáhání baterie a zároveň se tak zvyšuje její teplota. Cílem je udržet běžnou pracovní teplotu baterie během nabíjení a vyhnout se pokovení elektrod. Proto se doporučuje používat rychlonabíječky jen když je to nutné. [14]



2.3.2 Princip baterie

Baterie představuje galvanický elektrochemický článek, který přeměňuje chemickou energii na elektrickou při vybíjení, a naopak při nabíjení. Elektrochemické články lze rozdělit na elektrolytické a galvanické. V elektrolytickém článku se elektrická energie přeměňuje na chemickou energii – nabíjení baterie (viz Obr. 2-4 a) a v galvanickém článku se chemická energie přeměňuje na elektrickou energii – vybíjení baterie (viz Obr. 2-4 b). Základní konstrukce elektrického článku se skládá z kladné a záporné elektrody, které jsou umístěné ve vodivém elektrolytu (viz Obr. 2-4 c). Elektrody jsou odděleny separátorem, který brání přímému kontaktu elektrod a zároveň brání vzniku zkratu. Chemické reakce probíhající během nabíjecích a vybíjecích procesů jsou založeny na elektrochemických oxidačních a redukčních reakcích, nazývaných jako redoxní reakce. Při těchto reakcích se elektrony přenášejí přes vnější obvod z jedné elektrody na další a zároveň se ionty přenášejí uvnitř článku prostřednictvím elektrolytu pro udržení rovnováhy náboje. [8]

Kladná elektroda, která se nazývá katoda, bývá složena z několika sloučenin, nejčastěji je složena lithiem. Záporná elektroda, která se nazývá anoda, je tvořena uhlíkovým materiálem, nejčastěji grafitem. [4] V baterii dochází ke dvěma procesům: vybíjení a nabíjení. Při vybíjení v baterii dochází k tomu, že se z jedné elektrody (anoda) uvolňují elektrony, které putují směrem ke druhé elektrodě (katoda). Při dobíjení dochází k elektrolýze a ke změně funkce elektrod. [15]



Obr. 2-4: (a) schéma elektrolytického článku (nabíjení), (b) schéma galvanického článku (vybíjení), (c) základní konstrukce elektrochemického článku – převzato a upraveno z [8]

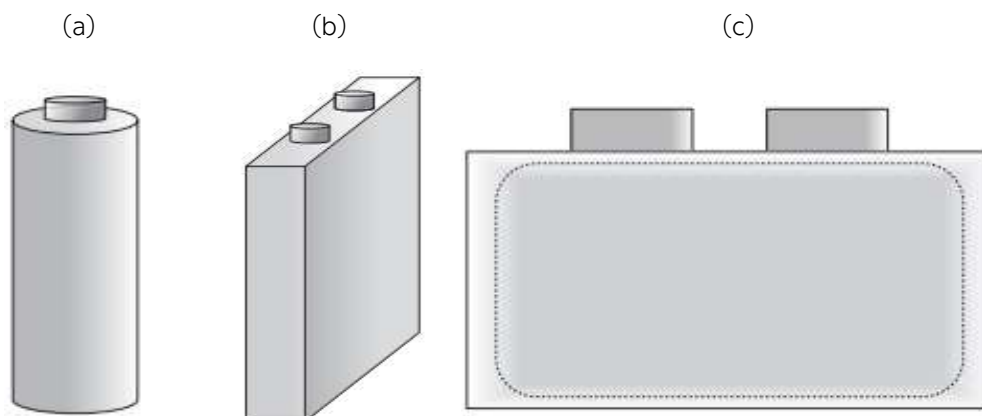


2.3.3 Konstrukce baterie

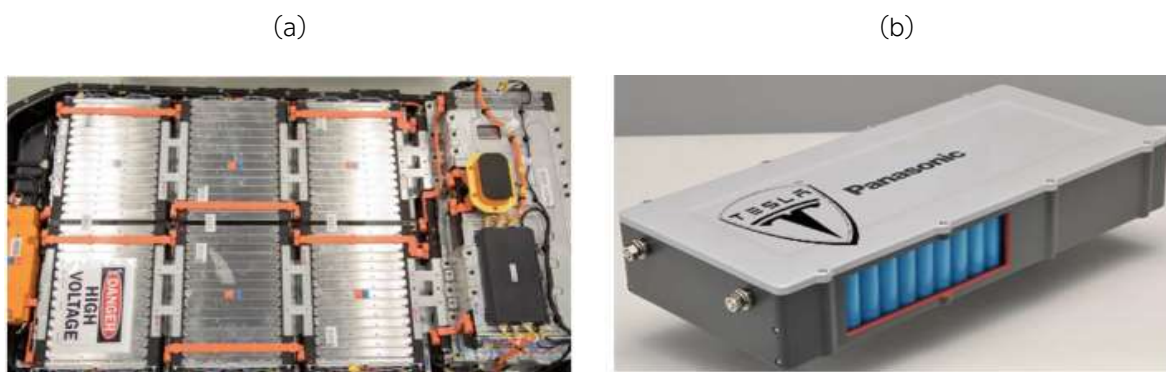
Baterie se skládají z velkého počtu menších bateriových článků. Tyto články jsou pak zapojeny sériově nebo paralelně, aby bylo dosaženo požadované napětí a proud. Velikosti bateriových článků jsou různorodé, od malých spotřebitelských článků až po velmi velké články pro průmyslové záložní systémy. Článek baterie se skládá z několika dalších částí, které jsou uloženy do pouzdra, jehož materiál je obvykle na bázi hliníku, plastů nebo jejich směsí. [16]

Formát a velikost bateriových článků vhodných pro použití v elektrovozidlech se mohou lišit v závislosti na použití, podmínkách použití i výrobci. Geometrické formáty článků baterií pro elektrovozidla lze seskupit do tří skupin: válcové, prizmatické a pouzdrové (viz Obr. 2-5). Formáty článků se liší výkonnostními charakteristikami a omezením z hlediska baterie a vozidla. Články baterií jsou pak spojovány do větších modulů, které tvoří celou baterii [8] (viz Obr. 2-6). V případě potřeby mohou být vyměněny jednotlivé moduly a v případě požáru toto uspořádání pomáhá snížit rychlost jeho rozšíření. [4]

Válcové články jsou navinuté a jejich průměr je dán kapacitou – tlustší články mají větší kapacitu a naopak. Pro tyto články se využívá hliníkový plášť. Svorky článků se nacházejí v horní a spodní části jednotlivých válců. Jednoduchá výroba válcových článků je jednou z hlavních výhod tohoto formátu. Prizmatické články jsou vyráběny dvěma způsoby – vinutím nebo skládáním. Pouzdro těchto článků je vyrobeno z hliníku nebo vyztužených plastů. Pouzdrové články jsou v základním provedení hranolové nebo ploché zapouzdřené v měkkém obalu, který je z hliníku laminovaného polymerem. [8] Typickým zástupcem pro válcové články je Tesla, její model Tesla S obsahuje 7104 válcových článků. Naopak prizmatické články ve svých elektrovozidlech využívá Škoda Auto. [15]



Obr. 2-5: Geometrické formáty článků baterií: (a) válcové, (b) prizmatické, (c) pouzdrové [8]



Obr. 2-6: Moduly baterie: (a) Nissan LEAF, (b) Tesla [16]

2.3.4 Typy baterií

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.1, první akumulátory používané v elektrovozidlech byly olověné akumulátory. Ty se dnes využívají jen ve vozidlech se spalovacími motory pro startování. Jejich nevýhodou je však vysoká hmotnost a nízká energetická hustota. V 90. letech 20. století se používaly Nikl-Metal hybridové baterie (NiMH), kterým předcházely Nikl-Kadmiové baterie (NiCd), ty však obsahovaly technologii, kterou je nyní zakázáno používat z důvodu obsahu těžkých kovů kadmia. Nikl-Metal hybridové baterie dominovaly spíše na trhu s mobilními telefony, v automobilové průmyslu je později nahradily lithiové baterie s vyšší energetickou hustotou, avšak Nikl-Metal hybridové baterie se stále využívají v hybridních elektrických vozech. Existují různé druhy lithiových baterií v závislosti na výběru materiálů jednotlivých částí. [8]

Pokud se použije kovové lithium (často tenká metalická folie) jako materiál anody, vzniká Lithium-kovová, popřípadě Lithium-kovová polymerová baterie, zatímco při použití konverzních materiálů (na bázi uhlíku, slitiny a oxidy) vzniká Lithium-iontová baterie, která v závislosti na použitém elektrolytu může být jen Lithium-iontová nebo Lithium-iontová polymerová baterie. [8] Základními typy lithiových baterií jsou: [15]

- Li-ion baterie – anoda – LiC_6 nebo C, elektrolyt – LiPF_6 , separátor – PE/PP;
- Li-pol baterie – anoda – LiC_6 nebo C, katoda – LiCoO_2 , elektrolyt – separátor – pevný polymer PMMA nebo PAN, polymerní obal baterie;
- Lithium-železo-fosfátové baterie LFP – anoda Li nebo LiC_6 , katoda LiFePO_4 , elektrolyt – LiPF_6 , separátor – PE/PP;
- Lithium-titanové baterie LTO – anoda $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, katoda LiMn_2O_4 nebo LiFePO_4 , elektrolyt – LiPF_6 , separátor – PE/PP.



2.3.4.1 Li-ion baterie

Nejpoužívanějšími bateriemi jsou Li-ion baterie, které mají vysokou kapacitu, účinnost a životnost. V roce 2019 ocenila Nobelova komise cenou za chemii vědkyně Johna B. Goodenough, M. Stanleyho a Akira Yoshino, kteří začali pracovat na Li-Ion bateriích a přispěli tak k jejich masovému používání. [12] Hlavní složky Li-Ion baterií jsou stejné jako u všech ostatních baterií: katoda, elektrolyt, separátor a anoda. Anoda uchovává ionty lithia během nabíjení a v průběhu vybíjení se ionty přesouvají ke katodě. Ionty lithia jsou tak vyměňovány mezi katodou a anodou. [8]

Konvenční katody obsahují oxidy přechodných kovů jako je: [8]

- LCO – Oxid kobaltnatý lithný (LiCoO_2);
- LMO – Oxid manganatý lithný (LiMn_2O_4);
- NCA – Lithium nikl kobalt oxid hlinitý (LiNiCoAlO_2);
- NCM – Lithium nikl kobalt oxid manganatý (LiNiCoMnO_2).

Katody LCO, NCA a NCM mají vrstvenou strukturu s vysokou specifickou energií a vysokým napětím, avšak kobalt je toxický a tepelně nestabilní. Katoda NCM obsahuje méně kobaltu a je levnější. Zvýšení obsahu niklu a lithia může zvýšit kapacitu katodového materiálu, ale zároveň vede k tepelné nestabilitě. [8] Automobilový průmysl v posledních letech používá Li-Ion baterie s katodou NMC (např. Volkswagen, Toyota, Audi, Porsche, Fiat, Nissan, BMW) a baterie s katodou NCA (např. Tesla). [12]

Konvenční anoda je vyrobena z grafitu nebo $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$. Prostor baterie je naplněn kapalným elektrolytem. Běžně používané elektrolyty se skládají z organických rozpouštědel, např. ethylenkarbonát (EC), diethalkarbonát (DEC), propylenkarbonát (PC), ethylmethylkarbonát (EMC) a dimethylkarbonát (DMC) a soli rozpuštěné v rozpouštědlech jako je hexafluorfosforečnan lithný (LiPF_6), monohydrát hexafluorarsenátu lithného (LiAsF_6), chloristan lithný (LiClO_4) a tetrafluorboritan lithný (LiBF_4). K oddělení katody a anody se využívá separátor, aby se zabránilo vnitřnímu zkratu. Separátor není elektrochemicky aktivní materiál. Separátor hraje důležitou roli v transportu iontů a ovlivňuje rychlost výkonu článků. Konvenční komerční separátory baterií jsou membrány vyrobené z polyetyleny (PE) nebo polypropylenu (PP). Obvykle mají tloušťku menší než 25 μm a asi 40 % pórovitost. [8], [12]



2.4 Nabíjení

Při zvyšujícím se počtu elektrovozidel hrají důležitou roli i nabíjecí stanice, které mají pro EV stejný význam, jako čerpací stanice pro automobily se spalovacím motorem. Velký rozdíl však spočívá v době tankování a nabíjení. Zatímco tankování trvá pár minut, proces nabíjení může trvat až několik hodin. [4], [17]

Se změnovou vyhláškou č. 266/2021 Sb, kterou se mění vyhláška č. 268/2009 Sb. o technických požadavcích na stavby přichází i nutnost vybavit nové stavby a změny dokončených staveb, vyjma staveb pro bydlení dobíjecími stanicemi pro elektrická vozidla pro každé páté parkovací stání. S tím souvisí i vyšší požární riziko v hromadných garážích. Zvyšující se počet elektromobilů a zároveň i zvyšující počet výrobců vede k tomu, že existuje různé provedení kabelů a konektorů pro připojení nabíjení vozidla. Elektrotechnická komise stanovila dvě základní normy, které definují základní standardy pro nabíjení elektrovozidel. Jsou zde definovány režimy nabíjení, provedení přívodního kabelu nebo provedení konektorů pro připojení. [4], [17]

Elektrovozidla je možné dobít jak z konvenční elektrické zásuvky nebo pomocí nabíjecích technologií. Můžeme rozlišovat dva typy nabíjení – nabíjení normální rychlostí a rychlé nabíjení. Při nabíjení normální rychlostí (3 kW až 7 kW) je nabíječka umístěna přímo ve voze od výrobce, kabel je tak připraven k připojení do elektrické sítě jednofázové 230 V AC nebo třífázové 400 V AC. Rychlé nabíjení (22 kW až 43 kW) využívá dle normy dvě řešení. Prvním řešením je připojení střídavé napájecí sítě k palubní nabíječce, která je namontována ve vozidle. Palubní nabíječka je navržena pro nabíjení od 3 kW do 43 kW při připojení do jednofázové elektrické sítě 230 V nebo trojfázové sítě 400 V. Druhým řešením je použití externí nabíječky pro přívod jednosměrného proudu. Externí nabíječka převádí střídavé napětí na stejnosměrné a nabíjí elektrovozidlo při 50 kW. Pro krátkodobé nabíjení je možné použít speciální nabíjecí zařízení s vysokým výkonem. [4], [17]

2.4.1 Režimy nabíjení

Jak již bylo zmíněno výše, pro nabíjení elektrovozidel existují různé režimy nabíjení, konkrétně čtyři. U všech režimů nabíjení musí být požadován proudový chránič. [17]

Režim 1 využívá připojení elektrického vozidla na střídavou napájecí síť (rozvodnou síť) s použitím normálních zásuvek do 16 A a do 250 V u jednofázového střídavého proudu nebo do 480 V u trojfázového střídavého proudu na straně napájení a s použitím



silových vodičů ochranného uzemnění. Obvod musí být jištěn proti zkratu, přetížení a v obvodu musí být zapojený proudový chránič. [17] Tento režim je snadno realizovatelný, lze ho využít kdekoliv, kde je možný přístup k elektrické síti. Zároveň s sebou nese i případná rizika, jako je oteplení kabelu po delší době nabíjení na maximální výkon. [4] V tomto režimu se vozidlo nabíjí z domovní zásuvky. Mezi vozidlem a nabíjecím místem není zajištěna komunikace, tudíž je nutné instalovat proudový chránič. (viz Obr. 2-7 a) [18]

Režim 2 využívá připojení elektrického vozidla na střídavou napájecí síť (rozvodnou síť) do 32 A a do 250 V u jednofázového střídavého proudu nebo do 480 V u trojfázového střídavého proudu s použitím normalizovaných jednofázových nebo trojfázových zásuvek a silových vodičů a vodičů ochranného uzemnění spolu s funkcí řídicího vodiče a systémem ochrany osob před úrazem elektrickým proudem pomocí proudových chráničů zapojených mezi elektrické vozidlo a vidlici nebo jako součást řídicí kabelové skříňky. Řídicí kabelová skříňka musí být umístěna ve vzdálenosti do 0,3 m od vidlice nebo napájecího zařízení, nebo musí být ve vidlici. [17] V podstatě je principem režim 2 stejný jako režim 1 a byl navržen pro země, kde není režim 1 povolen. U režimu 2 je navíc kabel vybaven ochranou, která obsahuje bezpečnostní zařízení chránící před chybovým proudem, komunikuje s vozidlem a řídí tak proces nabíjení. (viz Obr. 2-7 b) [18], [4]

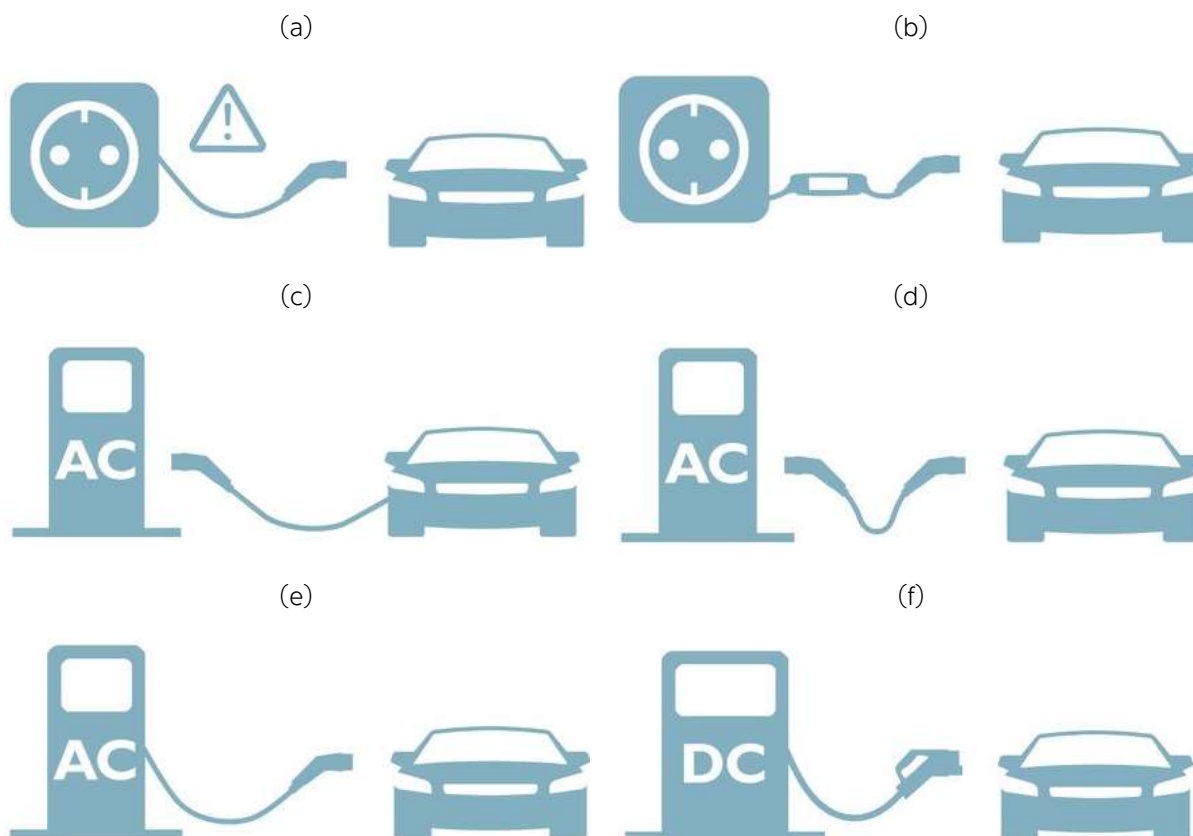
Režim 3 spočívá v připojení nabíječky elektrického vozidla na střídavou síť přes příslušné napájecí zařízení, kde funkce řídicího vodiče zahrnuje i datové spojení s řídicím zařízením napájecího zařízení, které je trvale připojeno na střídavou napájecí síť. [17] Vozidlo je v tomto režimu nabíjeno u nabíjecí stanice nebo domácí nabíječky, ve kterých je již instalován proudový chránič. Je zde zajištěna komunikace mezi vozidlem a nabíjecí stanicí. Je možné nabíjet vozidlo z jednofázové střídavé sítě až do 250 V nebo z třífázové střídavé sítě až do 480 V s maximálním nabíjecím proudem 63 A. Tento režim je rozdělen do tří typů připojení: (viz Obr. 2-7 c, d, e) [18]

- typ připojení „A“ – připojení elektrického vozidla na střídavou napájecí síť s použitím napájecího kabelu s vidlicí, trvale připojeného k elektrickému vozidlu, v současné praxi se téměř nevyskytuje [17], [18];
- typ připojení „B“ – připojení elektrického vozidla na střídavou napájecí síť s použitím odnímatelné kabelové sestavy s vozidlovou nástrčkou a střídavého napájecího zařízení, využívá se ve veřejných nabíjecích stanicích [17], [18];



- typ připojení „C” – připojení elektrického vozidla na střídavou napájecí síť s použitím napájecího kabelu s vozidlovou nástrčkou, trvale připojeného k napájecímu zařízení, velmi často se využívá v soukromém sektoru [17], [18].

V režimu 4 je elektrovozidlo připojeno na střídavou napájecí síť s použitím externí nabíječky, kde funkce řídicího vodiče zahrnuje i datové spojení s napájecím zařízením trvale připojeným ke střídavému napájení. [17] Nabíječka obsahuje ochrany, řízený AC/DC měnič, komunikační jednotku a nabíjecí kabel. Režim 4 jako jediný popisuje nabíjení u rychlonabíjecích stanic. Zde platí zvýšené bezpečnostní požadavky, jelikož se u tohoto režimu vyskytují mimořádně vysoké proudy až 500 A. Z toho důvodu je vždy kabel pevně připevněn k nabíjecí stanici. Zásuvné spojení je k dispozici pouze na straně vozidla ve formě nabíjecího konektoru automobilu. K rozdělení režimu 4 na typy připojení „A”, „B” a „C” jako u režimu 3 nedochází. Zároveň je nutné monitorovat teplotu výkonových kontaktů v nabíjecím konektoru a další doplňkové ochranné funkce v nabíjecí stanici, jako je např. kontrola izolace. (viz Obr. 2-7 f) [18]

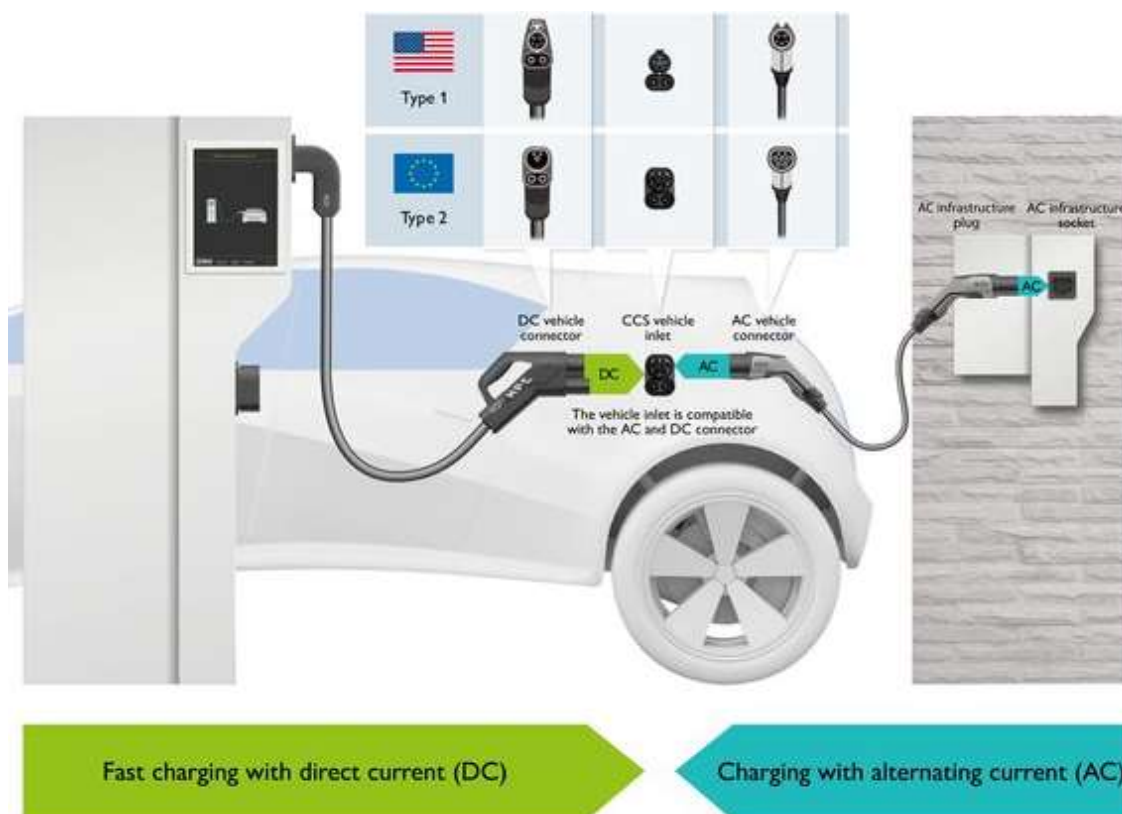


Obr. 2-7: (a) režim nabíjení 1; (b) režim nabíjení 2, (c) režim nabíjení 3 – typ připojení „A”, (d) režim nabíjení 3 – typ připojení „B”, (e) režim nabíjení 3 – typ připojení „C”, (f) režim nabíjení 4 – převzato z [18]



2.4.2 Typy konektorů

Pro nabíjení střídavým i stejnosměrným proudem existuje několik druhů konektorů. Různé konektory dodávají elektřinu v závislosti na podporovaném standardu a představují určité výhody. Výhody konektorů jsou následující: nesou mechanické nebo elektronické blokování, umožňují komunikaci s vozidlem, jsou uzavřenými rozvody, nedodávají elektřinu, dokud není deaktivován blokovací systém, některé konektory jsou schopny dodávat energii z trojfázové sítě. AC konektory jsou navrženy pro zapojení do jednofázové rozvodné sítě s 120 nebo 240 V a skládají se z pěti „kolíků“ – AC kolíky a dva kolíky pro napájení vozidla (fázový a neutrální), uzemnění, detekce blízkosti, která zabrání pohybu vozidla a pilot control, který umožňuje komunikaci s vozidlem. Druhým typem konektorů jsou konektory navržené pro rychlé nabíjení, což zkracuje dobu nabíjení a vozidlo je možné nabít až na 80 % SOC za 20 minut. Tento konektor se nazývá kombinovaný nabíjecí systém (CCS) (viz Obr. 2-8), tedy systém, který umožňuje jak pomalé nabíjení střídavým proudem ale i rychlé nabíjení stejnosměrným proudem. Vzhled konektorů je velmi podobný, ale konektory pro rychlé nabíjení mají další kolíky navíc pro nabíjení stejnosměrným proudem. [13], [18] Obr. 2-9 ukazuje typy používaných konektorů CCS v závislosti na nabíjecím režimu a oblasti použití.



Obr. 2-8: Schéma CCS – převzato z [18]

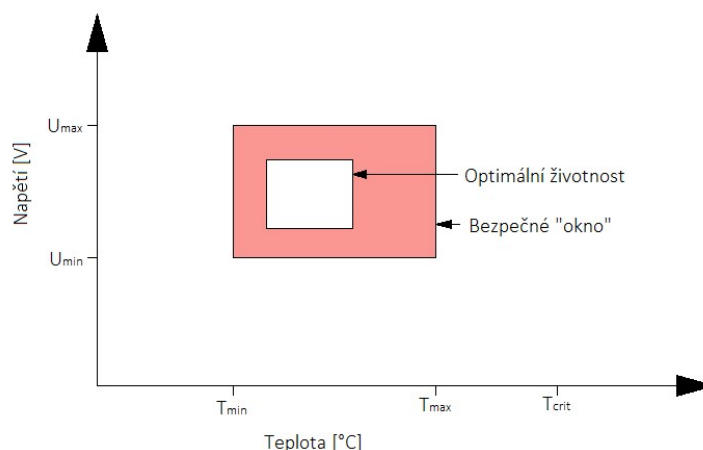


Obr. 2-9: Porovnání typů konektorů CCS v závislosti na nabíjecím režimu a oblasti použití –
převzato z [18]



3 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 případě, že je vozidlo vystaveno proměnlivým a extrémním podmínkám způsobenými silnými elektrickými, tepelnými nebo mechanickými impulsy. Při vystavení baterie různým změnám se zvyšuje pravděpodobnost vzniku požáru. [12] Požární riziko vychází z jednotlivých bateriových článků, které tvoří celou baterii. Obr. 3-1 znázorňuje bezpečné provozní „okno“, které představuje dovolené hodnoty teploty a napětí, při kterých jsou baterie schopné fungovat. Jakmile jsou překročeny limity napětí nebo teploty baterie, může uvnitř baterie dojít ke spuštění určitých chemických reakcí, které mohou vést ke zkratu nebo nárůstu vnitřní teploty. Článek baterie následně začne uvolňovat hořlavý plyn, který se může vznítit a začít hořet nebo způsobit explozi. [19]



Obr. 3-1: Ilustrace bezpečného „okna“ provozu baterie – upraveno z [19]

Existují tři hlavní rizika, které mohou ohrozit bezpečnost vozidla: [12]

- Tepelné poškození;
- Elektrické přetížení;
- Mechanické poškození.

Tepelný únik, který následně vede k iniciaci Li-ion baterie lze rozdělit do tří fází. První fáze začíná zvýšením teploty Li-ion baterie, která může být způsobena překročením jmenovitého napětí článku (přebíjení), vystavení baterie příliš vysokým teplotám, externím zkratem způsobeným vadnou elektroinstalací nebo vnitřním zkratem způsobeným vadou baterie, mechanickým poškozením, vznikem lithiových dendrit při přebíjení baterie nebo vadným separátorem. První fáze končí v momentě, kdy je



překročen normální rozsah provozní teploty. Během druhé fáze dochází ke zvýšení vnitřní teploty článku a následně k exotermickým reakcím uvnitř baterie. Příkladem exotermické reakce je rozklad elektrolytu, ke kterému dochází zhruba při 90 °C, doprovázeným uvolňováním hořlavých plynů kyslíku, další rozklad elektrolytu a zvýšení teploty způsobující reakci kovového lithia v anodě s organickým rozpouštědlem obsaženým v elektrolytu, při němž se uvolňují hořlavé plyny a teplota se dále zvyšuje. Při 130 °C se taví PE/PP separátor, což vede ke zkratu mezi katodou a anodou. Teplota nad 180 °C způsobí rozklad katodového materiálu, uvolňování kyslíku a způsobí další nárůst teploty. Ve třetí fázi se spaluje organický elektrolyt, který je vysoce těkavý a hořlavý. Pokud není možné zastavit nárůst teploty, dochází k tepelnému úniku a následně požáru článku. [12]

3.1 Tepelné poškození

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. [12] Klima a teplota v různých částech světa ovlivňuje fakt, jak bude fungovat tepelný systém chlazení/ohřívání baterie. V některých oblastech může být vyžadováno chlazení baterie a v jiných naopak vytápění. Extrémně vysoké nebo nízké teploty zkracují životnost baterie. [16] 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. [12]

3.2 Elektrické přetížení

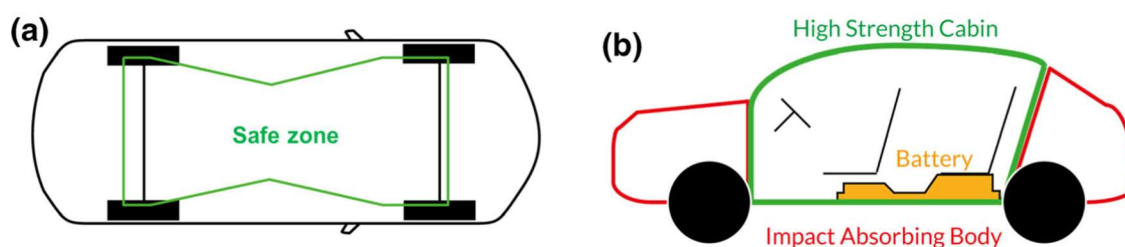
Snaha o rychlé nabíjení a vybíjení v kombinaci s vysokým výkonem má negativní vliv na riziko požáru EV. Elektrické přetížení může nastat následujícími způsoby: rychlým nabíjením, rychlým vybíjením a externí zkratem. Elektrické přetížení je obvykle doprovázeno Joulovým teplem a vnitřními chemickými reakcemi. [16]



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 (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 vybití 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 vybití dochází při vybití článků pod jejich minimální napětí. K externímu zkratu může dojít, když je baterie vystavena silné mechanické deformaci, nárazu, ponoření do vody nebo korozi. [19]

3.3 Mechanické poškození

Většina článků baterie je relativně křehká bez ochranné konstrukce EV nebo bateriového obalu. [16] Mechanická deformace může také způsobit vnitřní zkrat a mít za následek požár, proto je třeba zabránit velkým deformacím baterie. [19] Data ukazují, že drobné kolize jsou pro články neškodné, avšak v případě nehody při vysoké rychlosti se riziko vzniku požáru zvyšuje. [12] Baterie se obvykle umísťují do vyztužených a tuhých oblastí vozidel (viz Obr. 3-2) s cílem eliminovat riziko proražení během nehody. [16]



Obr. 3-2: Umístění baterie: (a) umístění v bezpečné zóně, (b) umístění baterie Nissan LEAF [16]

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. [19] U BEV se trakční baterie umísťují nejčastěji pod podlahu nebo v centrálním tunelu vozidla, u PHEV a HEV se trakční baterie umísťují vzhledem k menší velikosti baterie pod zadní sedačky, za zadní sedačky, v zavazadlovém prostoru, případně pod jeho podlahu. [15]



4 Průběh a charakter požáru baterií a vozidla

Důležitým faktorem pro požár elektrovozidla je jeho průběh a porovnání s běžnými konvenčními vozidly, které se dnes běžně používají a v automobilovém průmyslu stále převládají. Průběh požáru může být definován různými požárně technickými charakteristikami (PTCH), které rozdělujeme na požární a nepožární.

Mezi nepožární PTCH patří hustota, měrná tepelná kapacita nebo součinitel tepelné vodivosti. Součin těchto nepožárních PTCH se nazývá tepelná setrvačnost, která představuje fázový posun teplot a schopnost prvku uchovávat tepelnou energii důležitou pro teplotu vzplanutí. Mezi požární PTCH patří teplota vznícení a vzplanutí, spalné teplo, výhřevnost, rychlost uvolňování tepla (HRR), celkové uvolněné teplo (THR) a maximální uvolněné teplo (HRR_{max}). Dalšími požárními PTCH může být i toxicita různých toxických látek nebo optická hustota kouře. V případě požáru v uzavřených garážích dochází k poměrně rychlému zakouření celého prostoru v závislosti na malé světlé výšce, kterou garáže povětšinou mají.

4.1 Chování Li-ion baterií při požáru

Pro popis požáru elektrovozidla je důležité prvně zmínit, jak se chová jeho hlavní část – Li-ion baterie. Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, pokud jsou Li-ion baterie vystaveny extrémním podmínkám (tj. elektrické, tepelné, mechanické namáhání nebo jejich kombinace), může dojít k rozvoji požáru.

Požární chování Li-ion baterií bylo zkoumáno několika skupinami a různými přístroji např. požární kalorimetr, kónický kalorimetr, zařízení na šíření ohně a ISO 9705 RCT. Uvedené přístroje byly použity ke studiu chování Li-ion baterií a k měření PTCH, jako je např. HRR. HRR je určeno na základě principu spotřeby kyslíku. [20] Výsledky těchto měření jsou uvedeny v kapitolách níže.

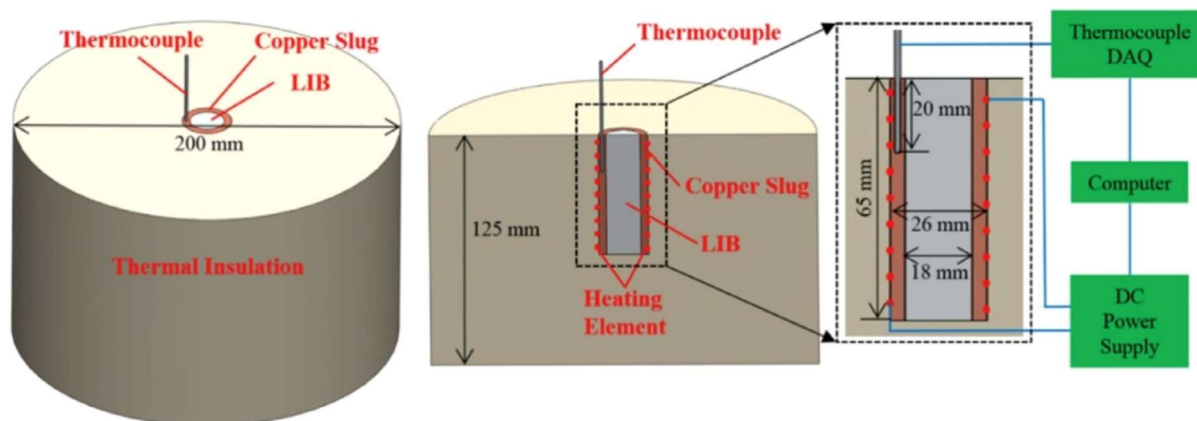
4.1.1 Uvolňování tepla z baterie

Při vystavení baterie extrémním podmínkám se začne uvolňovat teplo díky kombinaci chemické reakce a zkratu v baterii, zároveň jsou z baterie uvolňovány horké aerosoly a hořlavé plyny. Pokud se tyto hořlavé plyny vznítí na vzduchu, dojde k plamennému hoření. Lze tedy říct, že riziko tepelného úniku z Li-ion baterie se skládá z tepla, které je generováno baterií, a tepla, které vzniká při plamenném hoření. Teplo uvolňované



v průběhu požáru se skládá ze tří částí: teplo uvolněné z elektrické energie zkratu, uvolňování tepla z chemických reakcí a teplo uvolněné spalováním hořlavých plynů. [20]

Pro zjištění a porovnání tepla uvolněného z vnitřku baterie a tepla uvolněného při plamenném hoření je ve studii [20] zmíněna technika kalorimetrie v měděném válci (CSBS) v kombinaci s kyslíkovou kalorimetrií (viz Obr. 4-1). Pro studii byly použity baterie s různými úrovněmi nabití (SOC – 0 %, 25 %, 50 % nebo 100 %) a s různým složením katod. Při analýze byl hlavní předpoklad, že teplota uvnitř baterie je prostorově konstantní. Při tepelném úniku z baterie byly plyny a aerosoly shromážděny a následně zapáleny žhavým drátem za účelem měření spotřeby kyslíku a rychlosti uvolňování tepla. Ve studii byly použity prizmatické články s kapacitou 1880 mAh, jako výsledek bylo zjištěno, že článek uvolňuje 33 kJ energie a 113 kJ vzniká v důsledku spalování plynů z baterie. Ze studie vychází, že teplo uvolněné spalováním hořlavých plynů je větší než teplo uvolněné z chemických reakcí uvnitř baterie. [20]



Obr. 4-1: Schéma kalorimetrie v kyslíkovém válci (CSBS) [20]

4.1.2 Energie uvolněná z baterie při požáru

Jelikož baterie obsahují mnoho různých hořlavých složek, její spalné teplo závisí na chemickém složení, balení, kapacitě baterie a stavu nabití. Například bylo zjištěno, že spalné teplo 2,9 Ah pouzdřové baterie je cca 4 MJ/kg, zatímco u válcové baterie typu 18650 je spalné teplo cca 2 MJ/kg. V porovnání se spalným teplem benzínu, které je cca 47 MJ/kg, je spalné teplo baterií řádově menší. Nicméně kvůli malé hustotě energie baterie jsou hmotnosti baterií pro elektrovozidla minimálně o jeden řád větší než pro ICEV. [16]



Na základě dat z komerčních baterií lze říci, že poměr energie (E_B v Wh) k hmotnosti (M_B v g) je $E_B = 0,14 M_B$, pro benzín platí poměr $E_B = 12,8 M_B$. Ve srovnání s elektrickou energií uloženou v baterii je energie uvolněná při jejím hoření (včetně tepelného úniku uvnitř baterie a plamene udržovaného hořlavými plyny unikajícími z baterie) mnohem vyšší, požár baterie může uvolnit až 5 – 10 krát více energie v závislosti na stavu nabití baterie. Za předpokladu, že spalné teplo je sedminásobek jeho uložené energie, lze konstatovat, že pro baterii o kapacitě 90 kWh je celkové uvolněné teplo při požáru cca 2,3 GJ. Za to při požáru benzínové nádrže je celkové uvolněné teplo cca 1 GJ. Tedy u baterie je uvolněné teplo asi dvakrát větší. Ovšem ve srovnání s celkovým uvolněným teplem je rychlost uvolňování tepla (HRR) při požáru lepším ukazatelem nebezpečí požáru. [16]

HRR neboli výkon požáru je nejdůležitější parametr, který charakterizuje požár. HRR je vyjádřeno jako (viz Rovnice 4-1):

Rovnice 4-1: Rychlost uvolňování tepla [16]

$$HRR [MW] = m \cdot \Delta H_e = A_f \cdot m'' \cdot \eta \cdot \Delta H_c$$

Kde m je rychlost hoření [kg/s], kterou lze měřit rychlostí ztráty hmoty během experimentu, ΔH_e je efektivní výhřevnost [MJ/kg], A_f je podlahová nebo povrchová plocha paliva [m²], která představuje podlahu EV, m'' je hmotnostní rychlost odhořívání [kg/(m²s)], η je součinitel efektivního spalování [-] a ΔH_c je celková výhřevnost [MJ/kg] pro baterii v závislosti na stupni nabití. [16]

HRR požáru výrazně závisí na druhu baterie a rozsahu požáru, například spálení 7,9 Wh válcové baterie (s hmotností cca 42 g) může vzniknout HRR s maximální hodnotou (PHHR) 2 kW a při spálení 11 Wh pouzdrové baterie (s hmotností cca 95 g) může vzniknout PHHR 20 kW. I přesto, že energie a velikosti baterií jsou srovnatelné, PHHR může být až desetinásobné. Avšak při spálení 16 000 Wh EV baterie, která má cca 103krát větší výkon než samostatné články, dojde k PHHR pouze 300 kW. Nelze tedy předpokládat, že HRR baterie se 100 články bude 100krát více než HRR jednoho článku, jelikož je nepravděpodobné, že všechny dostupné bateriové články se zapalují a hoří současně. [16]

Při požáru baterie její HRR, celkové uvolněné teplo a uvolnění toxických plynů nesouvisí pouze s chemickou energií uloženou v bateriích, ale i se stupněm nabití baterie, velikosti balení baterie, uspořádáním článků, přístupem kyslíku a podmínkami chlazení. [16]

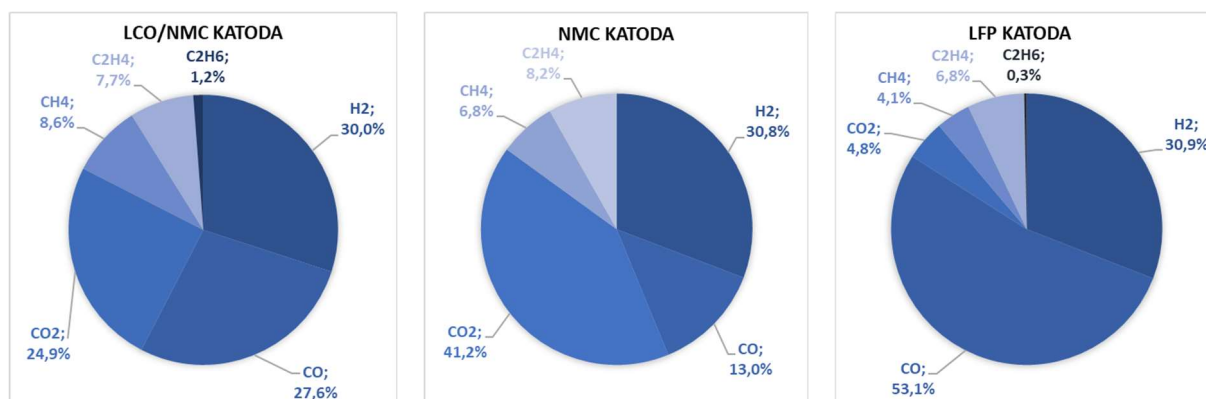


4.1.3 Hořlavé plyny

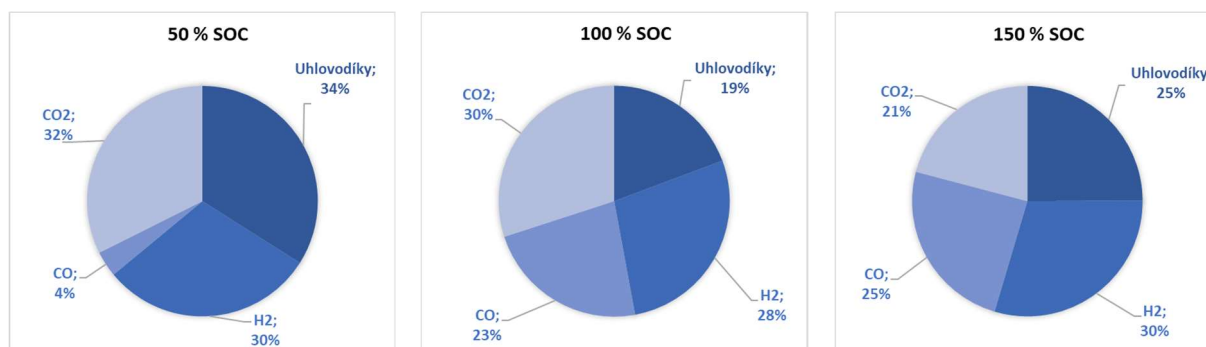
Chemické reakce uvnitř baterie uvolňují velké množství plynů a tlak uvnitř baterie strmě roste, čímž dochází bobtnání baterie, nebo se v lepším případě k otevření pojistných ventilů, které tlak uvolní. [20]

Za účelem měření tlaku byly dle studie [20] prováděny dvě metody měření. První metoda měření byla provedena pomocí adiabatického kalorimetru řízeného pomocí počítače a druhá pomocí plynotěsného válce, který byl vystaven vnějšímu zahřívání, v obou metodách byly využity válcové články baterií. V případě adiabatického kalorimetru byl článek vložen do testovacího válce z nerezové oceli o objemu 88 ml a byl měřen tlak při vytváření adiabatických podmínek ve válci. Maximální tlak plně nabitě baterie vyšplhal až na $1,08 \times 10^7$ Pa. V druhém případě byl článek baterie vložen do plynotěsného válce, který byl zahříván a byl následně změřen tlak pomocí tlakového potrubí napojeného na tlakový senzor. Maximální tlak byl $1,25 \times 10^6$ Pa. Výsledky naznačují, že tlak článku rychle narůstá a může tak dojít k prasknutí obalu článku. [20]

Při požáru se z baterie uvolňují hořlavé plyny jako oxid uhličitý (CO_2), oxid uhelnatý (CO), vodík (H_2) a uhlovodíky, mezi které patří methan (CH_4), ethylen (C_2H_4) a ethan (C_2H_6). Oxid uhelnatý je hořlavý a vysoce toxický plyn, který vzniká redukcí CO_2 vloženým lithiem na anodě. Vodík se uvolňuje reakcí mezi lithiem a anodami. Methan je velmi důležitý uhlovodík uvolňovaný v průběhu tepelného úniku. V přítomnosti vodíku může methan vznikat redukcí elektrolytu na uhličitán lithný. Ethylen může být produkován reakcí lithia a elektrolytického rozpouštědla nebo reakcí lithia s vrstvou mezi pevnou látkou a elektrolytem. Procentuální rozložení unikajících hořlavých plynů závisí na materiálu použitém na katodě a také na stavu nabití baterie (viz Obr. 4-2 a Obr. 4-3). [20]



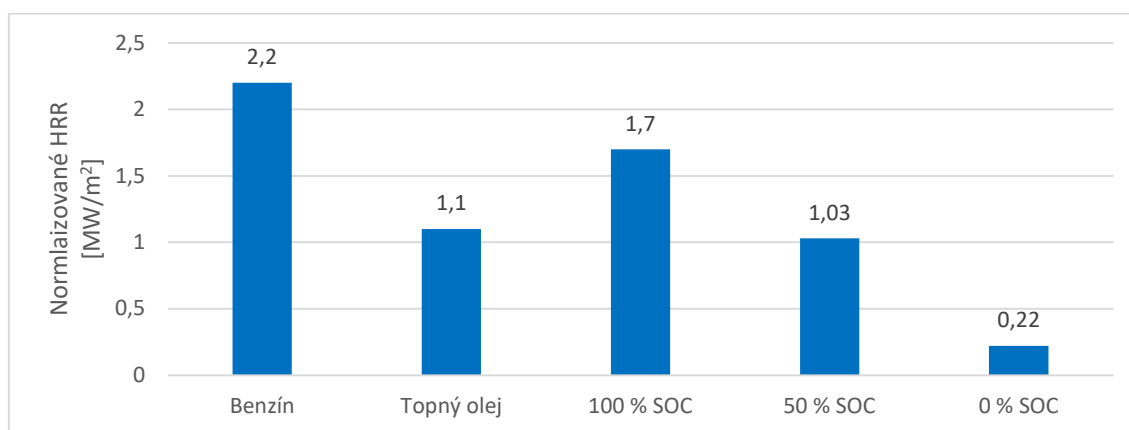
Obr. 4-2: Procentuální rozložení hořlavých plynů pro články na bázi grafitu při 100 % SOC [20]



Obr. 4-3: Procentuální rozložení hořlavých plynů pro články LCO pro různá SOC – převzato z [20]

4.1.4 Vliv stavu nabití na průběh požáru

Stav nabití má velký vliv na chování baterie v průběhu požáru. Obecně platí, že doba do tepelného úniku po zahřátí baterie a po dosažení teploty, při které dochází k tepelnému úniku, klesá s rostoucím stavem nabití baterie (SOC). Předchozí poznámka znamená, že tepelná stabilita baterie klesá s vyšším stavem nabití. Vrchol HRR je tím vyšší, čím je vyšší SOC. Stav nabití baterie je tak dominantní faktor při určování chování baterie při požáru. Obr. 4-4 znázorňuje normalizované HRR, které udává hodnotu HRR dělené plochou baterie, v porovnání s normalizovaným HRR benzínu a topného oleje. Další vliv na průběh požáru má materiál katody. Baterie LCO se pravděpodobně silněji vznítí, jelikož propouští větší množství kyslíku ve srovnání s LFP. Dle studií jsou LFP baterie bezpečnější než LMO a NCM. [20]



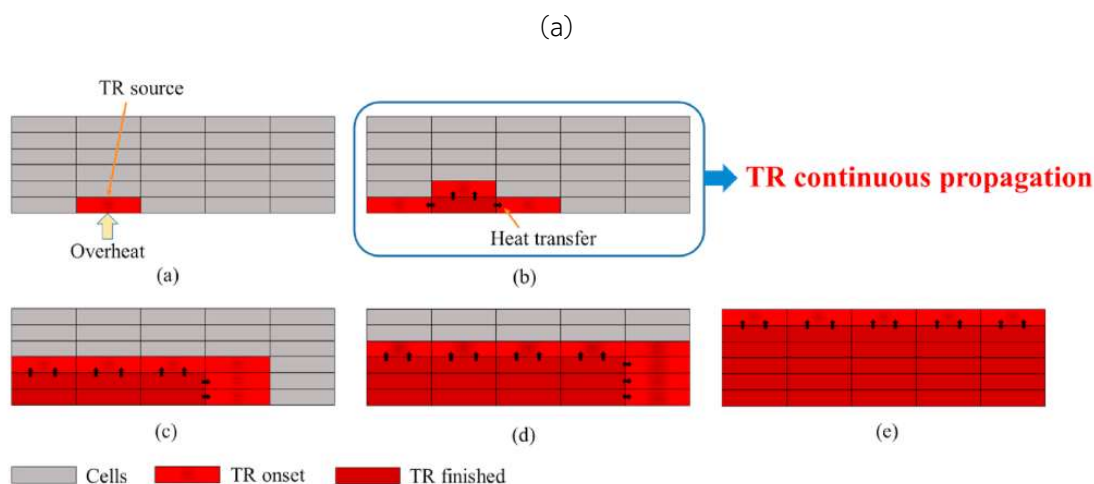
Obr. 4-4: Porovnání normalizovaného HRR benzínu a topného oleje s normalizovaným HRR EV dle SOC – převzato z [20]

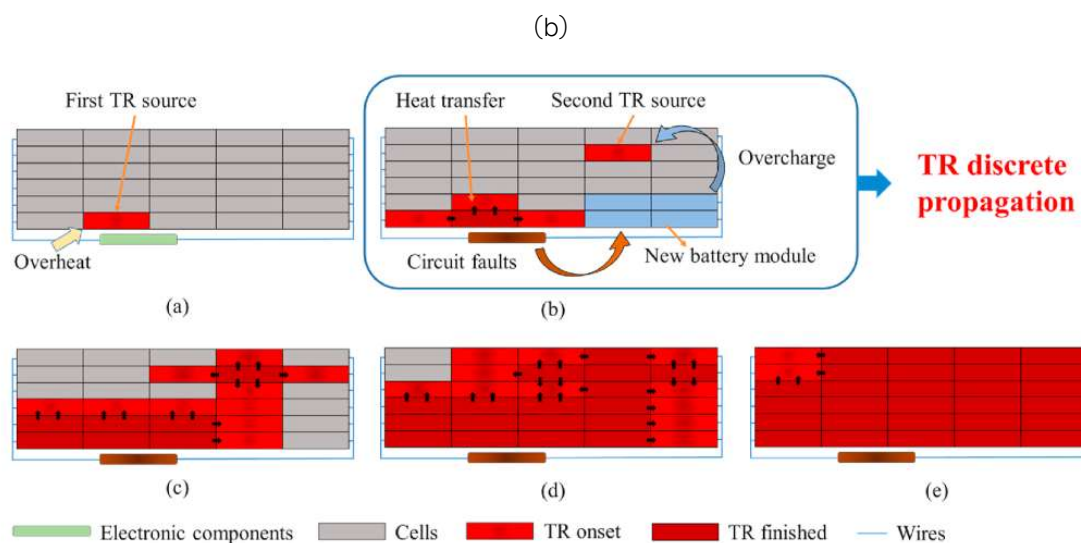


4.1.5 Šíření požáru

Jelikož jsou bateriové moduly tvořeny několika články (např. Tesla má přes 7 tisíc článků), může se při porušení jednoho článku začít šířit po celém bateriovém modulu a výsledky takového šíření mohou být katastrofální. Bylo zjištěno, že celkové teplo uvolněné bateriovým modulem je úměrné počtu buněk s mocninou 1,26, což znamená, že teplo uvolněné modulem není součtem spalného tepla každého článku. Hoření jedné buňky modulu může podpořit zahoření dalších buněk. Obecně lze říct, že pokud dojde k tepelnému úniku buňky, která je umístěna uprostřed modulu, šíření tepelného úniku skrz celek baterie je rychlejší ve srovnání s případem, kdy dojde k iniciaci krajní buňky modulu. V bateriovém modulu jsou články propojeny sériově nebo paralelně a elektrická konektivita má vliv na charakteristiku šíření tepelného úniku v rámci modulu. [20]

Šíření tepelného úniku z jednotlivých článků na další články lze rozdělit na dva druhy – kontinuální a diskrétní šíření. Kontinuální šíření (viz Obr. 4-5 a) znamená, že z prvního článku, u kterého dochází k tepelnému úniku, se tepelný únik šíří mezi sousední články v bateriovém modulu. Tedy při kontinuálním šíření je vytvořen pouze jeden zdroj tepelného úniku. U diskrétního šíření (viz Obr. 4-5 b) nastává jak kontinuální šíření, tak je v připojeném bateriovém modulu vytvořen další článek s tepelným únikem ještě dříve, než dojde k tepelnému úniku v sousedních člancích. Diskrétní šíření je způsobeno poškozenými elektronickými součástkami a obvody bateriového modulu. Diskrétní šíření může nastat jen v bateriových modulech s kompletním obvodem. Ke kontinuálnímu šíření může docházet ve všech bateriových modulech bez ohledu na to, zda jsou moduly k sobě připojeny nebo ne. [21]





Obr. 4-5: (a) proces kontinuálního šíření tepelného úniku v nepřipojeném bateriovém článku, (b) proces diskrétního šíření tepelného úniku v připojeném bateriovém modulu [21]

4.2 Velkorozměrové požární zkoušky

Jelikož jsou požární zkoušky elektrovozidel finančně nákladné, existuje pouze omezené množství veřejně dostupných experimentálních poznatků. Experimenty ve studiích [22], [23] a [24] obsahují poznatky o průběhu požáru EV a ICEV.

4.2.1 Velkorozměrová požární zkouška vozidel z roku 2012

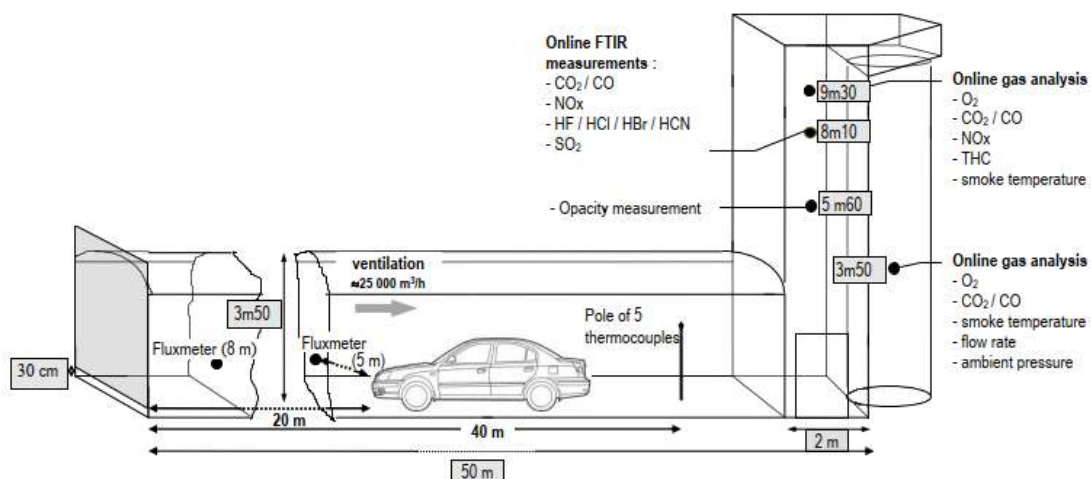
Dle studie [22] byly zkoušky v reálném měřítku provedeny v požárním tunelu INERIS podle postupů a specifikací vyvinuté bezpečnostní skupinou pro EV. Tyto postupy mají za cíl charakterizovat obecné chování baterií a vozidel v případě tepelné zátěže. Postupy definují pět různých testů:

- požární zkouška ohněm na bateriovém článku a modulové sestavě elementárních článků, baterie reprezentuje alespoň 10 % z celkové hmotnosti baterie nebo její energie je alespoň 1,5 kWh;
- požární zkouška na bateriovém článku s hašením požáru;
- požární zkouška na plném bateriovém modulu, jehož hmotnost je 250–300 kg, s pozdním hašením;
- požární zkouška EV s plně nabitou baterií;
- požární zkouška na obdobném dieselovém vozidle s plnou nádrží.



Zkoušky byly provedeny v prostoru, který lze považovat za velký požární kalorimetr. Větrání prostoru bylo nucené a monitorované tak, aby bylo dosaženo úplné odsávání spalin z výfukového systému a aby bylo možné provádět měření. Kalibrovaný zdroj musel být nastavený tak, aby zajistil samo udržitelný oheň testovaných prvků. Je důležité, aby bylo možné vypnout zdroj v momentě, kdy je požár schopný se sám udržet. Energie uvolněná při vlastním hoření vozidla byla měřena bez jakéhokoliv vnějšího příspěvku. Vliv přechodné fáze při zážehu byl minimalizován, aby byla měření co nejpřesnější. [22]

Požární zkoušky byly provedeny v požárním tunelu INERIS (viz Obr. 4-6). Tunel je 50 m dlouhý, 3,5 m vysoký (ve vrcholu klenutého stropu) a 3 m široký. Na tunel navazuje věž, ve které byly umístěny hlavní senzory. Věž je vysoká 10 m, široká 3 m a dlouhá 2 m. Požární tunel má monitorovaný systém větrání a systém čištění plynu, který umožňuje vyčistit kouř ze spalování před jeho vypuštěním do atmosféry. [22]



Obr. 4-6: Požární tunel INERIS pro zkoušky vozidel [22]

Podmínky zkoušky jsou v požárním tunelu řízeny s možností analýzy spalovaných plynů, tedy s možností kvantifikovat požárně technické charakteristiky. Ve věži byl umístěn přístroj FTIR s měřením průtoků. Průtok vzduchu v tunelu byl cca 25 000 m³/h a byl měřen po celou dobu požáru. Větrací systém byl odsávací. Čerstvý vzduch se do tunelu dostával pod dveřmi (úsek 3 m x 30 cm) a byl extrahován ve věži. V požárním tunelu byly provedeny čtyři zkoušky reálného měřítka vozidel od francouzských výrobců. U každého výrobce byla po předběžných zkouškách bateriových článků a modulů provedena požární zkouška na celém EV a další test byl proveden na analogickém vozidle ICEV. Pro zapálení vozidel byl použit 6 kW propanový hořák. Aby byl zajištěn trvalý požár vozidla, bylo roztrženo levé přední sedadlo a okna auta byla otevřena.



Plynový hořák byl aktivován během 1 minuty, orientován doleva před přední sedadlo uvnitř vozidla. [22]

On-line analýza plynu byla provedena několika metodami: [22]

- klasická analýza využívající nedisperzní infračervenou spektroskopii pro měření oxidu uhličitého CO₂ a oxidu uhelnatého CO, kyslíku O₂ a oxidy dusíku;
- FTIR spektrometr, který slouží pro optickou analýzu zplodin hoření.

Dalšími on-line měřenými parametry byly: [22]

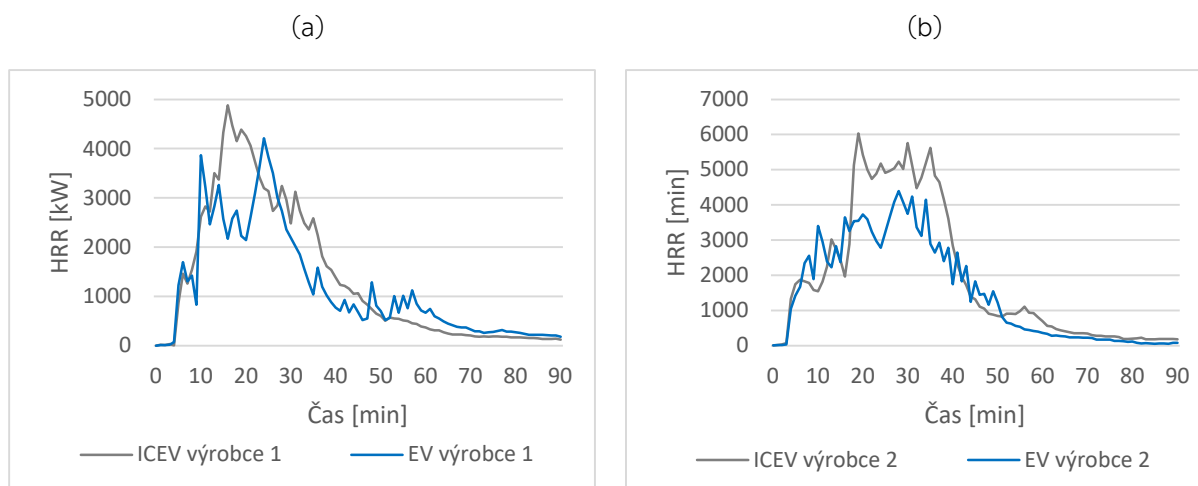
- tepelný tok pomocí dvou průtokoměrů umístěných 5 a 8 m před vozidlem;
- teplota uvnitř a na povrchu vozidla;
- teplota kouře;
- průtok (rychlost výfuku kouře).

Byla také provedeno off-line měření, analýza sazby a úbytku hmotnosti. Celkové spalné teplo a růst požáru byly stanoveny pomocí metody spotřeby kyslíku, při které se vychází z faktu, že na jednotku hmotnosti spotřebovaného kyslíku se uvolní cca 13,1 MJ energie. [22]

Vývoj požáru byl u všech vozidel obdobný, oheň se nejdříve rozšířil uvnitř vozidla a poté dále do zadní části vozu. Za zmínku stojí, že šíření požáru může být ovlivněno ventilací v průběhu zkoušky a metodou zapálení vozidla. Obecně bylo chování požáru obou typů vozidel při vnější iniciaci podobné. Při požáru EV nebyla pozorována žádná exploze. [22]

Naměřená ztráta hmotnosti byla u EV i ICEV podobná, u obou typů vozidel byla cca 20 % z původní hmotnosti. Maximální HRR a celkové efektivní spalné teplo byly u obou typů analogických vozidel blízké. Výpočet HRR je založen na principu spotřeby kyslíku. Pro výrobce 1 bylo maximální HRR 4,2 MW pro EV a 4,8 MW pro ICEV (viz Obr. 4-7 a). Maximální hodnoty HRR nastaly zhruba po 35 minutách od zapálení. Pro výrobce 2 bylo maximální HRR 4,7 pro EV a 6,1 MW pro ICEV (viz Obr. 4-7 b). [22]

Výsledky zkoušek ukazují obecné chování ICEV a EV vystavených stejnému vnějšímu tepelnému působení. Sledované požárně technické charakteristiky, jako je rychlost uvolňování tepla (HRR), celkové spalné teplo a efektivní spalné teplo byly u obou typů vozidel blízké. Výsledky zkoušek jsou výsledkem čtyř testovaných vozidel od dvou automobilek. Parametry jako je událost iniciující scénář požáru, technologie baterie, její balení, konstrukce a její umístění ve vozidle mohou hrát významnou roli na celkovém chování EV vystaveného vnějšímu požáru. [22]



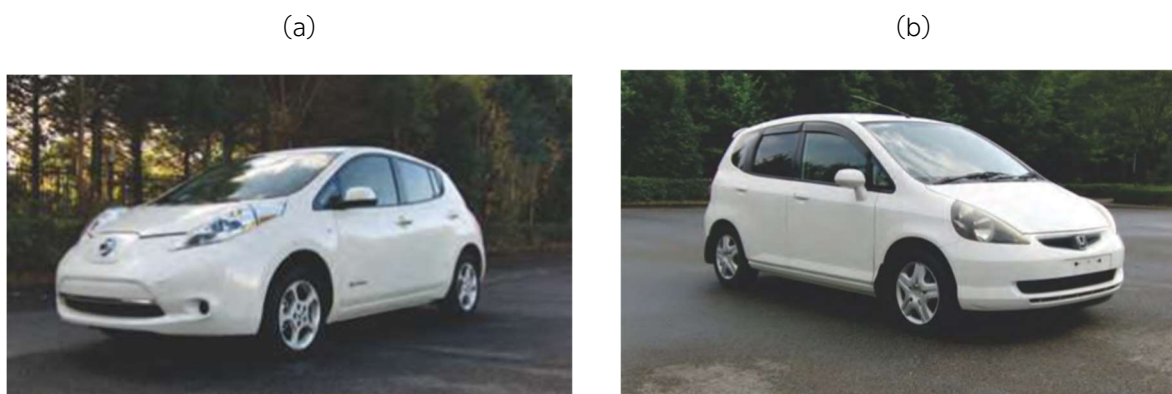
Obr. 4-7: Porovnání HRR při požáru EV a ICEV: (a) výrobce 1, (b) výrobce 2 – převzato z [22]

4.2.2 Velkorozměrová požární zkouška vozidel Nissan a Honda z roku 2012

Studie [23] objasňuje riziko požáru vozidla ve srovnání bateriového EV a benzínového ICEV. Ve studii bylo zkoumáno šíření plamene, rychlost uvolňování tepla (HRR) a radiální tepelný tok ve velkorozměrových požárních zkouškách EV Nissan Leaf a jemu velikostně odpovídajícímu ICEV Honda Fit. Testy byly ve studii provedeny zapálením plně integrovaného měkkého zadního nárazníku. Při testu EV vznikl plamen požáru výbuchem hořlavého plynu, avšak nedošlo k explozivnímu zničení baterie. Při požární zkoušce byly použity následující vozidla: Nissan Leaf (EV) a Honda Fit (ICEV) (viz Obr. 4-8). Jedná se o pětidveřové hatchbacky, Nissan Leaf byl vybaven čtyřmi pneumatikami a Honda Fit čtyřmi pneumatikami a jednou rezervní pneumatikou. Elektromotor Nissanu Leaf a spalovací motor Hondy Fit byly umístěny v přední části vozidla. U modelu Honda Fit byla plastová palivová nádrž umístěna pod sedadly řidiče a spolujezdce. Dveře a kapota motorového prostoru byly vyrobeny u Nissanu Leaf z hliníku a u Hondy Fit z oceli. Tab. 4-1 udává technické specifikace testovaných vozidel. [23]

Tab. 4-1: Technické parametry testovaných vozidel – převzato z [23]

Vozidlo	Rok výroby	Umístění pohonu	Rozměry			Hmotnost [kg]
			Délka [mm]	Šířka [mm]	Výška [mm]	
Nissan Leaf (EV)	2011	Elektromotor, přední pohon	4445	1770	1545	1520
Honda Fit (ICEV)	2003	Spalovací motor, přední pohon	3830	1670	1520	1275



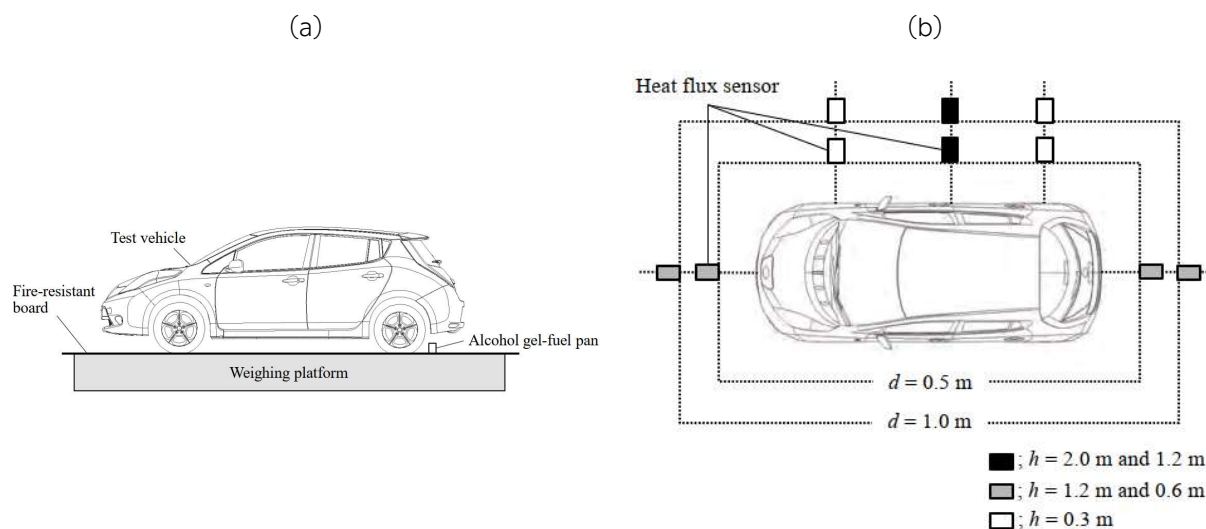
Obr. 4-8: Zkoušená vozidla: (a) Nissan Leaf (EV), (b) Honda Fit (ICEV) [23]

Při požární zkoušce byla baterie EV plně nabita (SOC 100 %). V palivové nádrži ICEV bylo 10 l benzínu. Okna dveří byla zavřena. Elektromotor i spalovací motor byly v průběhu zkoušky vypnuty. Tab. 4-2 shrnuje všechny podmínky zkoušky. Zapálení bylo iniciováno měkkým zadním nárazníkem na levé straně vozidla. Vozidla byla vystavena požáru do doby, dokud samy neuhaslly. [23]

Tab. 4-2: Podmínky zkoušky – převzato z [23]

Vozidlo	Dveře vozidla	Množství paliva	Stupeň nabití SOC	Umístění zdroje zapálení	Zdroj zapálení
Nissan Leaf (EV)	Zavřené	-	100 %	Levý zadní nárazník	80 g alkoholu
Honda Fit (ICEV)	Zavřené	10 l benzínu	-	Levá zadní ochrana proti vodě	80 g alkoholu

Zkoušky byly provedeny v požární zkušebně o rozměrech 15x15x15 m. K měření byly do testovacích vozidel umístěny termočlánky pro měření teploty a videokamery pro sledování šíření požáru z místa jeho vzniku. Každé testovací vozidlo bylo umístěno na vážící plošinu (viz Obr. 4-9 a), která sloužila ke stanovení ztráty hmotnosti hořícího vozidla. Údaje o teplotě, ztrátě hmotnosti a tepelného toku byly zaznamenávány každou sekundu. Tepelný tok byl měřen na přední pravé i zadní části hořícího vozidla, v místě středových sloupků a na přední i zadní pneumatice. Vzdálenost snímačů tepelného toku od povrchu vozidla byly nastaveny na 0,5 a 1,0 m. Výška snímačů tepelného toku nad povrchem vážící plošiny byly nastaveny na 1,2 a 0,6 m pro přední a zadní senzory a 2,0 a 1,2 m pro senzory u středového sloupku. Senzory pro měření tepelného toku u pneumatik byly umístěny ve výšce 0,3 m (viz Obr. 4-9 b). [23]



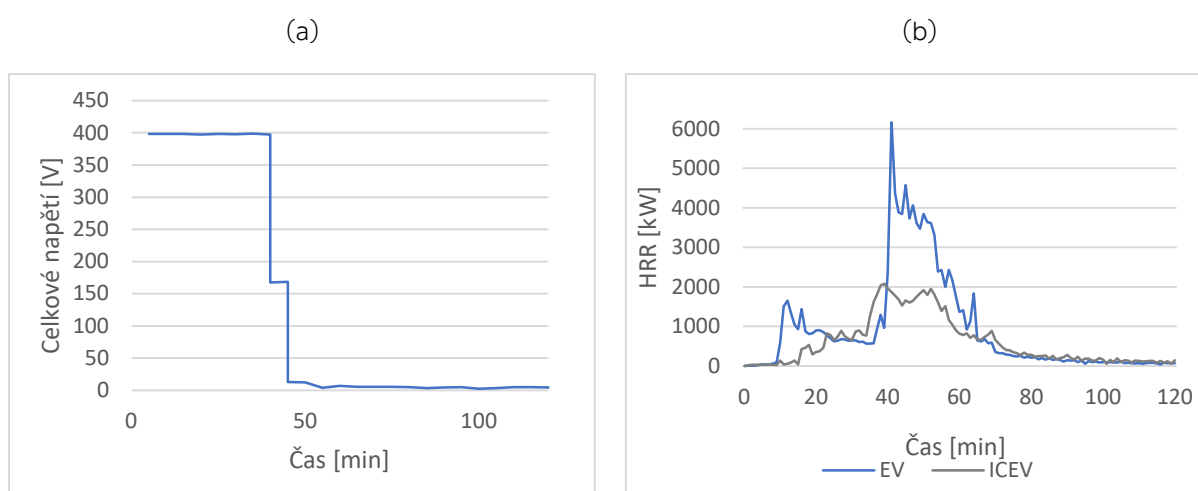
Obr. 4-9: Parametry zkoušky: (a) plošina k měření ztráty hmotnosti hořícího zkušební vozidla, (b) rozmístění senzorů pro měření tepelného toku [23]

V průběhu požáru byl pomocí videozáznamu zaznamenán časový průběh požáru jednotlivých částí. Při požáru EV se požár vycházející z levého zadního nárazníku rozšířil po výšce vozidla až po střechu. Poté začaly hořet obě zadní pneumatiky a zavazadlový prostor. Následně se rozbilo zadní okno a o 20 minut později se začaly tavit zadní dveře. Panely předních dveří vpravo a vlevo se začaly tavit spalováním prostoru pro cestující. Baterie při testu nepraskla ani neexplodovala. Napětí baterie EV v průběhu zkoušky klesalo z původních 400 V téměř na 0 V v průběhu cca 50 minut. Při požáru ICEV se plamen ze zadního nárazníku šířil po výšce až ke střeše podél karoserie. Poté došlo k zapálení pravé a levé zadní pneumatiky a zavazadlového prostoru. Unikající benzínové výpary z nádrže způsobily vznik plamene v blízkosti víka palivové nádrže. Z těchto plamenů došlo k zapálení zadní části vozidla a rozbití zadních okének. Dále došlo k rozvinutému požáru v prostoru cestujících. Při požáru ICEV nedošlo k úniku benzínu z palivové nádrže. [23]

Křivka rychlosti uvolňování tepla byla vypočtena pomocí experimentálních hodnot rychlosti ztráty hmoty. Při požáru EV bylo celkové uvolněné teplo 6,4 GJ. Z křivky rychlosti uvolňování tepla (viz Obr. 4-10 a) jsou jednoznačné dva vrcholy: první vrchol po 9 minutách požáru spalováním zadní části vozu a druhý po 40 minutách po vytvoření souvislého plamene v prostoru pro cestující a spalováním elektrolytu baterie, hodnoty ve vrcholech byly 1,8 a 6,3 MW. Po druhém vrcholu ve 40. minutě byla nadále překračována hodnota rychlosti uvolňování tepla 3,0 MW po dobu cca 15 minut. Celkové



uvolněné teplo při požáru ICEV bylo 4,3 GJ, jelikož množství hořlavých látek ve vozidle s benzínovým pohonem bylo nižší než u elektrovozidla. Při jiných zkouškách benzínových vozidel bylo naměřeno celkové uvolněné teplo 7,4 GJ pro luxusní sedan Toyota, 5,9 GJ pro Minivan Toyota, 5,3 GJ pro minivan Nissan, 5,6 GJ pro Subaru kombi a 5,1 GJ pro Toyota sedan. Vrcholy průběhu rychlosti uvolňování tepla nebyly ostré jako u elektrovozidla, ačkoliv nastaly dva vrcholy: jeden po 35 minutách po vytvoření plamene v prostoru pro cestující a druhý po 53 minutách po vzniku plamene v motorovém prostoru, hodnoty ve vrcholech byly 2,1 a 2,0 MW. Po prvním vrcholu rychlost uvolňování tepla nadále překračovala 1,8 MW po dobu asi 20 minut. [23]



Obr. 4-10: Grafy ze zkoušek: (a) pokles napětí baterie v závislosti na čase, (b) porovnání HRR při požáru EV a ICEV – převzato z [23]

Výsledky z těchto i předchozích zkoušek naznačují, že celkové uvolněné teplo pro EV je podobné jako pro běžné benzínové vozidlo. Z výsledků požárních zkoušek vychází porovnání rychlosti uvolňování tepla a celkového uvolněného tepla při požáru EV a ICEV. Při požárních zkouškách nedošlo k žádné explozivní reakci článků baterie. Maximální velikosti rychlosti uvolňování tepla a tepelný tok byly u EV větší než u ICEV, zároveň riziko, které představuje dobíjecí baterie EV je vyšší než riziko ICEV, avšak požární riziko EV bylo srovnatelné s dříve změřeným ICEV luxusním sedanem Toyota, tyto vozidla ovšem nejsou velikostně srovnatelné. Z požární zkoušky velikostně odpovídajících vozidel lze tedy vyvodit závěr, že požární riziko je u EV větší než u velikostně srovnatelného ICEV. [23]



4.2.3 Velkorozměrová požární zkouška EV a ICEV z roku 2015

Velkorozměrová požární zkouška porovnávající více vozidel jak na elektrický pohon, tak na pohon konvenčními palivy byla provedena v roce 2015 kanadskou federální výzkumnou organizací National Research Council Canada v Carleton Place v Ontariu. Požární zkoušky byly provedeny celkem pro 7 vozidel – 3 EV, 2 PHEV a 2 ICEV. Vozidla byla vystavena požáru po dobu 30 minut. Zkušební plocha byla umístěna pod 6x6 m velkou digestoř napojenou na systém odtahového ventilátoru, který sloužil ke sběru kouře a horkých plynů. K iniciaci požáru byl použit pískový propanový hořák o rozměrech 2,4x1,2 m. Výkon propanového hořáku byl 2,0 MW. Kolem hořáku byla postavena montážní plošina, jejíž horní část byla v úrovni okraje hořáku a zkušební vozidlo bylo umístěno uprostřed nad hořákem. Vozidla byla podepřena na škvárových blocích, aby se zabránilo jeho pádu na zem v případě prasknutí pneumatik. U každého vozidla byla všechna okna a dveře zcela zavřená. Vozidla jsou dle studie označena písmeny A, B, C a D dle výrobce. U vozidel A byly provedeny 3 zkoušky – ICEV, EV s 100 % SOC a EV s 85 % SOC. U vozidel B byly provedeny 2 zkoušky – ICEV a EV s 100 % SOC. U vozidel C a D se jedná o PHEV. U vozidla A nebyl ICEV identický s EV, ale měl podobnou velikost. U vozidla B byly ICEV a EV stejného modelu s různými pohonnými systémy. Modely EV vozidel A a B obsahovaly akumulátory s podobnou kapacitou, avšak vozidlo B obsahovalo dva samostatné akumulátory s různým umístěním na rozdíl od vozidla A, které obsahovalo jeden akumulátor. Vozidlo C mělo menší baterii než vozidlo D. Konvenční vozidla měla v průběhu zkoušek plnou nádrž. Tab. 4-3 zobrazuje podrobnější informace o testovaných vozidlech. [24]

Tab. 4-3: Testovaná vozidla – převzato z [24]

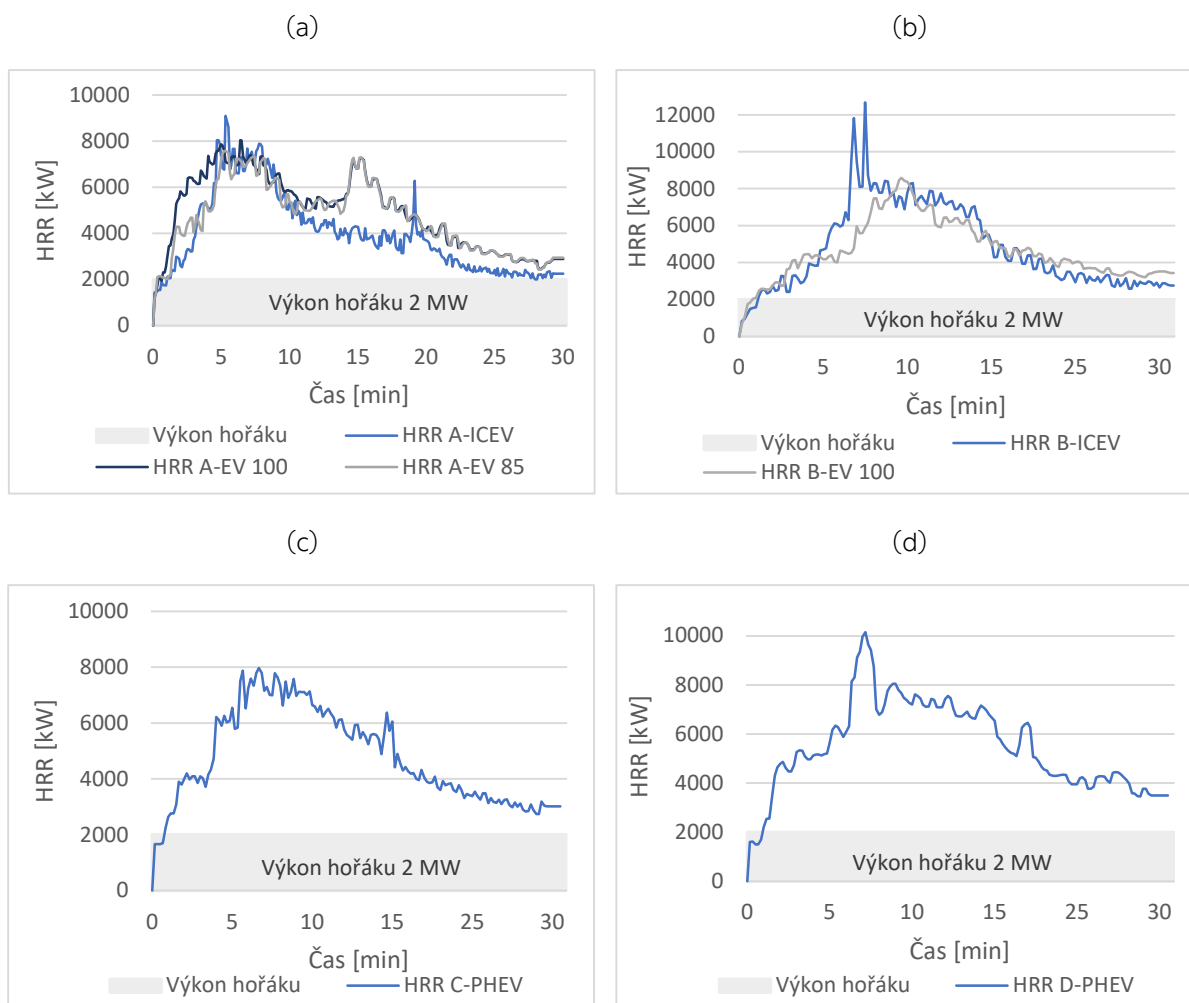
Označení vozidla	Typ vozidla	Rok výroby	Palivová nádrž	Kapacita baterie	Stav nabití
A	ICEV	2015	Plná	-	-
A	EV	2014	-	Vysoká	100 %
A	EV	2013	-	Vysoká	85 %
B	ICEV	2013	Plná	-	-
B	EV	2013	-	Vysoká	100 %
C	PHEV	2013	Plná	Malá	85 %
D	PHEV	2014	Plná	Střední	100 %



Obr. 4-11 znázorňuje průběhy HRR všech požárních zkoušek. Při zkouškách vozidel A je u EV vidět, že v průběhu prvních 5 minut je jejich HRR značně vyšší než u ICEV (viz Obr. 4-11 a), to je pravděpodobně dáno plastovým krytem baterie, který v této době shořel. U vozidla A-EV 100 selhaly datové kanály cca po 5 minutách testu, ale bylo předpokládáno následné zvýšení HRR podobné tomu, které bylo pozorováno u vozidla A-EV 85. Nebateriové komponenty A-EV 100 poskytly primární příspěvek k celkovému HRR a tepelnému toku mezi 5. a 10. minutou požáru. Příspěvek obsahu palivové nádrže vozidla A-ICEV lze vidět asi po 6 minutách, což odpovídá náhlému skoku v HRR a tepelném toku. Tento hrot křivky měl velmi krátké trvání, což naznačuje, že benzín byl vypuštěn najednou. Baterie u A-EV 100 se pravděpodobně plně zapojila do požáru až kolem 10. minuty, kdy byly pozorovány výrazné skoky v teplotě a tepelném toku, přičemž baterie A-EV 85 se zapojila do požáru později. Tento fakt může být dán vyšším stavem nabití u A-EV 100 než u A-EV 85. [24]

Při zkouškách vozidel B je u ICEV zaznamenán výrazný nárůst HRR po 7 minutách požáru, což bylo pravděpodobně způsobeno uvolněním obsahu palivové nádrže. Z grafu (viz Obr. 4-11 b) je patrné, že mezi 10. a 30. minutou nedochází k žádnému zřetelnému zvýšení HRR, v tomto čase jsou údaje HRR B-EV 100 a B-ICEV srovnatelné. Rozdíly mezi vozidly jsou značné před 10. minutou požáru a byly způsobeny především přítomností benzínu u B-ICEV. [24]

Při požáru vozidla C-PHEV se nejvyšší hodnoty HRR objevily mezi 6. a 10. minutou se sekundárním vrcholem kolem 15. minuty. Z videonahrávek vycházela řada praskavých zvuků a viditelných jisker baterie mezi 13. a 16. minutou, což nastává ve stejnou dobu jako sekundární vrchol HRR po 15 minutách (viz Obr. 4-11 c) a ukazuje tak spálení součástí baterie. Výše uvedené naznačuje, že baterie u vozidla C-PHEV začala hořet přibližně po 6 minutách, což přispívá k vysokým hodnotám HRR mezi 6. a 10. minutou. Po 15 minutách došlo k menšímu sekundárnímu zvýšení HRR generované ostatními součástmi vozidla. U vozidla D-PHEV jsou patrné dva velké skoky v hodnotách HRR mezi 7. a 9. minutou (viz Obr. 4-11 d). Poté, co benzín shořel, HRR a tepelný tok zůstaly relativně konstantní. Nádrž paliva byla u vozidla D-PHEV jako jediná kovová. U vozidla D došlo ke spálení baterie a dalších součástí vozidla, které přispěly k vyšším úrovním HRR mezi 9. a 13. minutou. [24]



Obr. 4-11: Porovnání HRR: (a) vozidla A – ICEV, EV 100 % SOC a EV 85 % SOC, (b) vozidla B – ICEV, EV 100 % SOC, (c) vozidlo C – PHEV 85 % SOC, (d) vozidlo D – PHEV 100 % SOC – převzato z [24]

Tab. 4-4 shrnuje výsledky ze všech provedených požárních zkoušek. V tabulce jsou uvedeny maximální hodnoty HRR po odečtení vlivu 2 MW propanového hořáku a dobu jeho výskytu, celkové teplo uvolněné během požáru, ztrátu hmotnosti a efektivní spalné teplo, které bylo odhadnuté na základě naměřených ztrát hmotnosti. Z prvních dvou sloupců je zřejmé, že vrcholy maximálních hodnot HRR byly pro modely ICEV vyšší než u EV. Zároveň i časy vrcholu HRR pro ICEV byly dřívější než pro EV. Vzhledem k tomu, že vrchol HRR pro ICEV odpovídal spálení obsahu palivové nádrže, výše uvedené trendy naznačují, že vozidlo s plnou nádrží produkuje větší riziko z hlediska HRR než u sady baterií u EV. [24]

Požárními zkouškami bylo zjištěno, že rozdíl mezi průběhy teplot při požáru EV a ICEV není nijak výrazný a přítomnost baterie ve vozidle nepředstavuje větší riziko než konvenční vozidlo. [24]



Tab. 4-4: Data z výsledků zkoušek po odečtení vlivu 2MW propanového hořáku [24]

Označení vozidla	Křivka HRR		Celkové uvolněné teplo [MJ]	Ztráta hmotnosti		Efektivní spalné teplo [MJ/kg]
	Max. hodnota HRR [MW]	Čas dosažení max. hodnoty [min]		Uvedená v [kg]	Uvedená v [%]	
A-ICEV	7,1	6,0	3290	274	25	12
A-EV 100	6,0	7,0	-	333	23	-
A-EV 85	5,9	5,8	4910	295	20	17
B-ICEV	10,8	8,0	4950	336	25	15
B-EV 100	6,9	10,2	4660	363	22	13
C-PHEV 100	6,0	7,5	4630	308	21	15
D-PHEV 100	7,9	8,3	5850	445	26	13

4.2.4 Porovnání výsledků z výše uvedených studií

Z předchozích kapitol 4.2.1, 4.2.2 a 4.2.3 lze říci, že maximální HRR EV se pohybuje v průměru okolo 6 MW. U PHEV vychází maximální hodnoty HRR okolo 8–10 MW, což je způsobeno kombinací EV a ICEV, kdy ve vozidle hoří jak baterie pohánějící EV část, tak i palivová nádrž pohánějící ICEV část vozidla. V kapitole 4.2.1 a 4.3.3 je i vidět, že maximální HRR vychází pro ICEV vyšší než pro EV. V těchto studiích byla použita totožná vozidla s rozdílným zdrojem energie. V kapitole 4.2.2 vychází vyšší HRR u EV, avšak v této studii nebyly požární zkoušky prováděny na totožných vozidlech a nádrž ICEV vozidla nebyla plná, pro EV a ICEV byly dokonce použita vozidla od jiných výrobců, kde nelze předpokládat stejné hmotnostní rozložení hořlavých hmot.

4.2.5 Porovnání křivek požáru vozidel s rychlostmi rozvoje požáru

Počátek a celý rozvoj požáru je ovlivněn rychlostí uvolňování tepla. Hodnota rychlosti uvolňování tepla je ovlivněna daným provozem požárního úseku, velikostí požárního úseku a časem. Fáze rozvoje požáru je tedy definována vztahem dle Rovnice 4-2. [25]

Rovnice 4-2: Rychlost uvolňování tepla [25]

$$Q = 10^6 \cdot \left(\frac{t}{t_\alpha}\right)^2$$

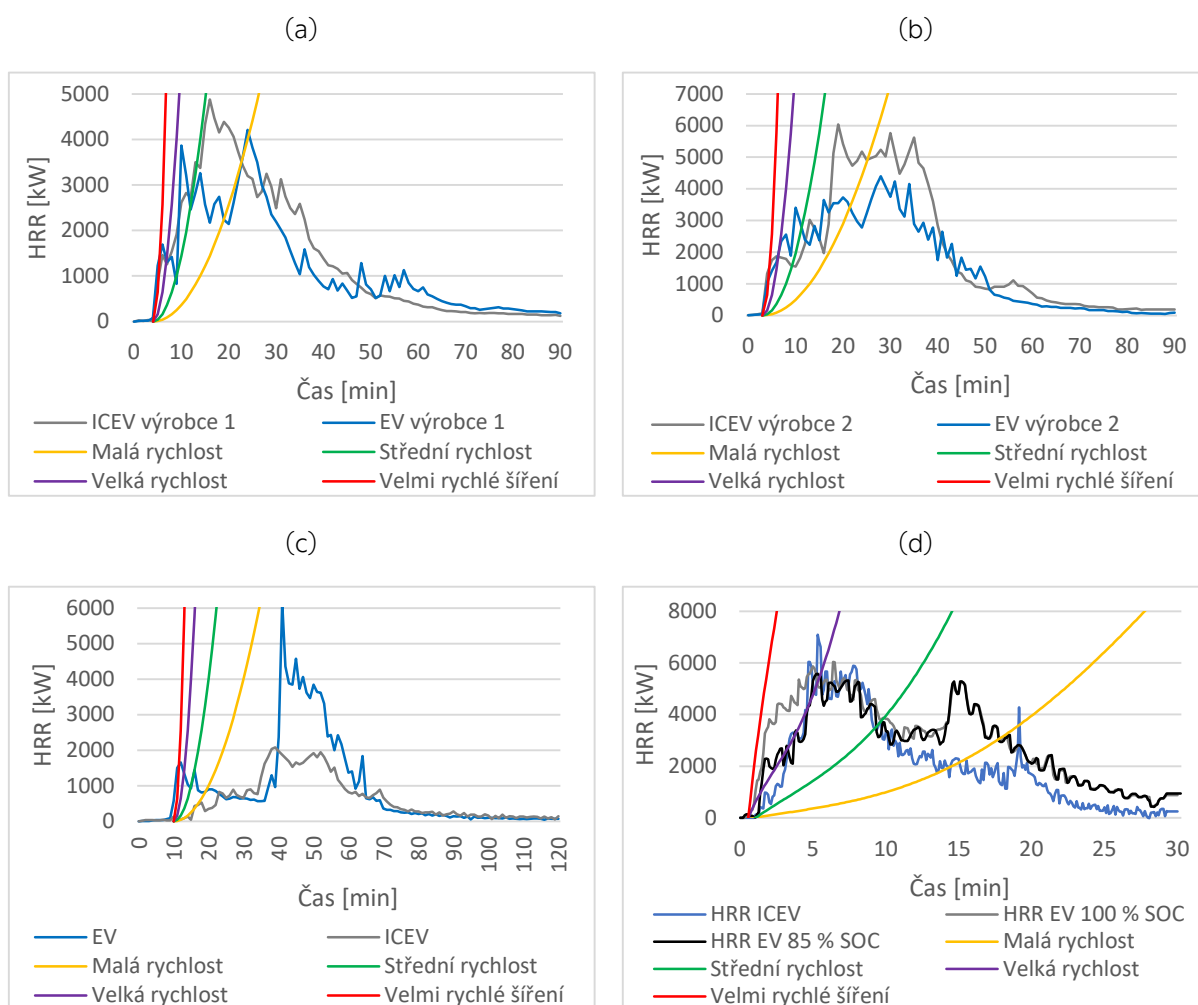
Kde Q je rychlost uvolňování tepla [W], t je čas [s] a t_α je doba potřebná pro dosažení rychlosti uvolňování tepla 1 MW. Rychlost rozvoje požáru má parabolický průběh. Fáze

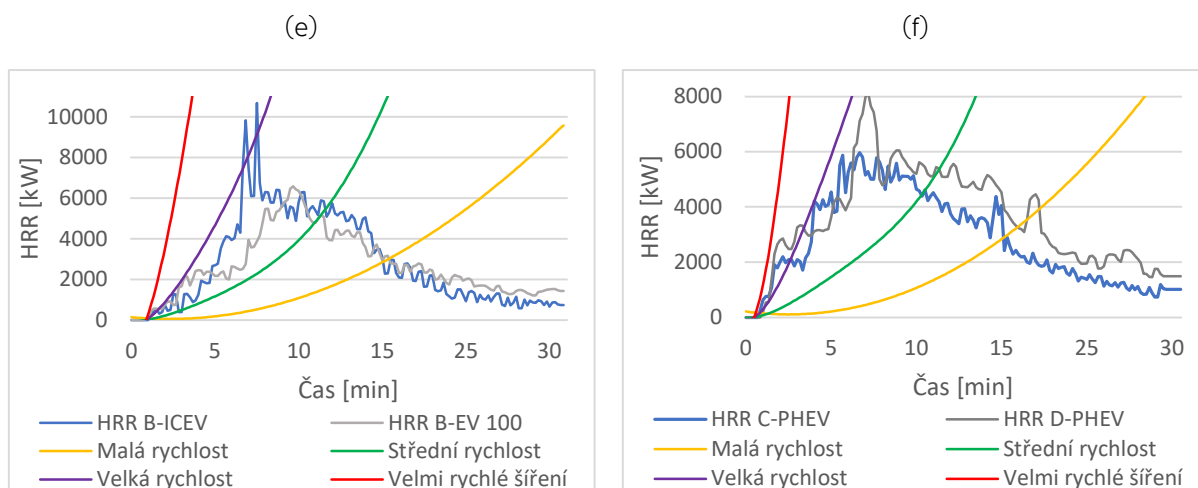


rozvoje požáru je omezena vodorovnou rovinou, která odpovídá ustálenému stavu a hodnotě $Q = RHR_f A_{fi}$, kde RHR_f [kW/m^2] je maximální rychlost uvolňování tepla produkovaná na 1 m^2 požáru řízeného palivem a A_{fi} je maximální plocha požáru [m^2], kterou je požární úsek v případě rovnoměrně rozděleného požárního zatížení. [25] Provozy v budovách se dle [25] dělí do 3 kategorií rychlosti rozvoje požáru:

- malá;
- střední;
- velká.

Pro malou rychlost rozvoje požáru je $t_{\alpha} = 600$ sekund, pro střední rychlost rozvoje požáru je $t_{\alpha} = 300$ sekund a pro velkou rychlost rozvoje požáru je $t_{\alpha} = 150$ sekund. Při velmi rychlém šíření požáru lze uvažovat $t_{\alpha} = 75$ sekund. [25] Grafy na Obr. 4-12 níže zobrazují porovnání průběhů rychlostí rozvoje požáru s grafy z jednotlivých velkorozměrových zkoušek viz kap. 4.2.1, kap. 4.2.2 a kap. 4.2.3.





Obr. 4-12: Porovnání rychlostí rozvoje požáru s křivkami ze zkoušek pro: (a) EV a ICEV výrobce 1 z [22], (b) EV a ICEV výrobce 2 z [22], (c) EV a ICEV z [23], (d) EV a ICEV výrobce A z [24], (e) EV a ICEV výrobce B z [24], (f) PHEV výrobce C a výrobce D z [24]

Počátek rozvoje požáru pro velkorozměrovou požární zkoušku elektrovozidel výrobce 1 a výrobce 2 ze studie [22] odpovídá dle Obr. 4-12 a) a b) velmi rychlému šíření požáru. Počátek rozvoje požáru pro velkorozměrovou požární zkoušku ze studie [23] dle Obr. 4-12 c) odpovídá velké rychlosti šíření požáru. U těchto studií je počátek křivek rozvoje požáru posunutý od počátku vzhledem ke skutečnému rozvoji dle křivek HRR. Počátek rozvoje požáru pro velkorozměrovou požární zkoušku elektrovozidel výrobce A odpovídá velmi rychlému šíření, elektrovozidel od výrobce B a hybridních vozidel výrobce C a D ze studie [24] odpovídá dle Obr. 4-12 d), e) a f) velké rychlosti rozvoje požáru. Na základě grafů lze konstatovat, že rychlost rozvoje požáru elektrovozidel téměř odpovídá velké rychlosti šíření požáru s dobou potřebnou pro dosažení rychlosti uvolňování tepla 1 MW $t_{\alpha} = 150$ sekund a velmi rychlému šíření požáru s dobou potřebnou pro dosažení rychlosti uvolňování tepla 1 MW $t_{\alpha} = 75$ sekund. Toto však platí pouze pro výše popsané.



5 Problematika hašení požárů elektrovozidel

Hasičský zásah při požáru elektrovozidla se v mnohém neliší od požáru konvenčního vozidla, lze jej zvládnout i běžně používanými prostředky, je však nutné uvažovat s následujícími specifiky: [15]

- možnost samovznícení či opětovného samovzněcování baterie;
- vyšší spotřeba vody;
- riziko úrazu elektrickým proudem;
- možnost vzniku termálního úniku;
- vyšší spotřeba dýchací techniky;
- možnost odletování článků baterie a hoření alkalických kovů.

I u zcela neporušené baterie lze předpokládat, že může dojít k samovznícení, pokud byla vystavena vyšším teplotám než 80 °C. K samovznícení trakční baterie může dojít i mechanickým namáháním, které může být zapříčiněno samotnou událostí nebo v průběhu záchranných prací. K samovznícení baterie může dojít během hodin i dnů po požáru vozidla. Trakční baterii je nutné po uhašení požáru dále chladit, aby nedocházelo k dalšímu samovznícení. Spotřeba vody může být až 30 m³. Rozvody a samotná trakční baterie mohou být pod životu nebezpečným napětím. Největší riziko však představují vozidla, která jsou připojena k nabíječce. V průběhu požáru může dojít k přehřátí trakční baterie, následně k náhlému uvolnění přehřátého elektrolytu a jeho prudkému vyhoření v blízkém okolí vozidla. Proto je důležité, aby zasahující osoba k hořícímu vozidlu vždy přistupovala v kompletním zásahovém oděvu a byla vybavena dýchacím přístrojem. Zplodiny hoření trakční baterie obsahují fluorovodík a doba, po kterou je nutné využívat dýchací techniku je tak mnohem delší než u požáru konvenčních vozidel. Pokud se vlivem nehody nebo určité události stane, že se jednotlivé články baterie uvolní, může při požáru dojít k jejich odletování (toto platí především pro cylindrické články), zároveň se mohou objevit i drobné výbuchy. Odletující články mohou nechráněné osoby poranit. Zároveň mohou články zakládat další ohniska požáru v jejich okolí. [15]

Výrobci doporučují i po lehčích nehodách vozidla EV, PHEV nebo HEV odstavit na odstavené místo a vyčkat s opravou minimálně 48 hodin, nejen po požáru. Tímto se zaručí bezpečnost, snahou je předejít situacím, kdy může poškozené vozidlo způsobit



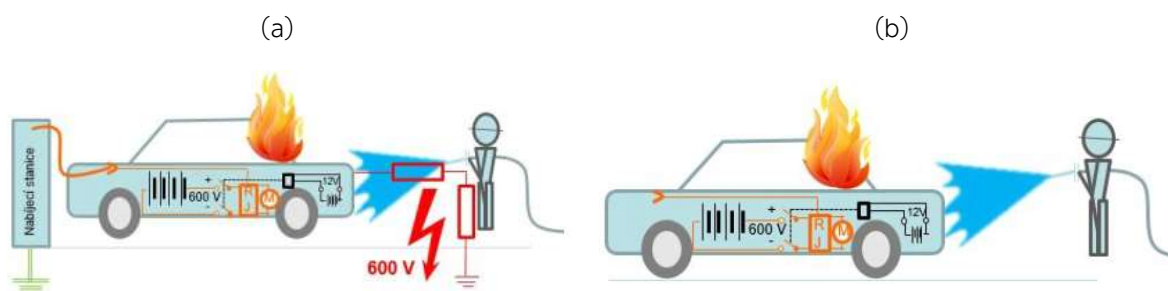
požár uvnitř dílny autoservisů. Odstupová vzdálenost od hořlavých materiálů a budov je 5 m, výrobce EV Tesla doporučuje vzdálenost až 15 m po dobu minimálně 48 hodin. [15]

5.1 Hašení EV, PHEV a HEV

Zpočátku zásahu je nutné vyhodnotit, jaké hasební prostředky použít s ohledem na úraz elektrickým proudem. Zejména u PHEV a HEV je potřeba hasit i konvenční paliva, což může být bez použití pěnidel problematické. Pro hasiče představuje riziko průchod elektrického proudu přes proud hasiva, proto je omezeno používání příměsí smáčedel a pěnidel, které zvyšují vodivost vody a je doporučeno hasit z definované bezpečné vzdálenosti a za minimálního plnicího tlaku. [15]

Riziko úrazu elektrickým proudem představuje vozidlo, které je připojeno pomocí nabíjecího kabelu do elektrické sítě. Při takovém případě může vlivem požáru dojít k poškození izolace vysokonapěťových částí vozidla, vyřazení ochranných prvků vysokonapěťové soustavy vozidla a v nejhorším případě může proti zemi vzniknout potenciál odpovídající nejvyššímu potenciálu vysokonapěťových částí vozidla, tedy cca 600 V (viz Obr. 5-1 a). Riziko může trvat i po vypnutí hlavního vypínače nabíjecí stanice. Dokud je připojen nabíjecí kabel, může být vozidlo „dokonale uzemněno“ a v takovém případě je nutné k vozidlu přistupovat jako k zařízení pod napětím do té doby, než je vozidlo odpojeno od nabíjecí stanice. [15]

Při požáru volně stojícího EV, PHEV nebo HEV může napětí na svorkách baterie a vysokonapěťových částech vozidla dosahovat hodnot až cca 600 V, ale potenciál proti zemi je nulový, stejně tak jako riziko pro zasahující hasiče. Při poškození pneumatik nebo dotyku částí karoserie se zemí není možné hovořit o dokonalém uzemnění, v tomto případě lze k hašení požáru využít i příměsí pěnidel. (viz Obr. 5-1 b) [15]



Obr. 5-1: Schéma hašení vozidla: (a) připojeného k nabíjecí stanici, (b) volně stojícího [15]



U požáru EV, PHEV a HEV je důležité vždy zjistit polohu trakční baterie. Zásah by měl být veden tak, aby byly voleny vhodné metody, při kterých se minimalizuje možnost poškození baterií a vyloučilo se tak jejich mechanické poškození nebo namáhání. Přístup k baterii je důležitý hlavně z toho důvodu, kdy bude nutné baterii v průběhu zásahu ochlazovat. Kolem vozidla musí být dostatečný manipulační prostor, aby byl zajištěn přístup alespoň z jedné strany krytu trakční baterie. Jak již bylo zmíněno výše (viz kapitola 3.3) u EV se baterie umísťují pod podlahu nebo v centrálním tunelu vozidla, u HEV a PHEV se baterie nejčastěji umísťují pod nebo za zadní sedačky, v zavazadlovém prostoru nebo ve spodní části vozidla u zadní nápravy. K vysokonapěťovým komponentům a rozvodům je nutné se chovat tak, jako by byly stále pod napětím, jelikož i přes zajištění vozidla, jeho odpojení 12 V baterie či vypnutí servisních odpojovačů, zůstávají svorky uvnitř trakční baterie pod napětím, zároveň pod napětím zůstávají i vysokonapěťové soustavy vozidla, které se po odpojení baterie vybíjejí. [15]

5.2 Ochlazování

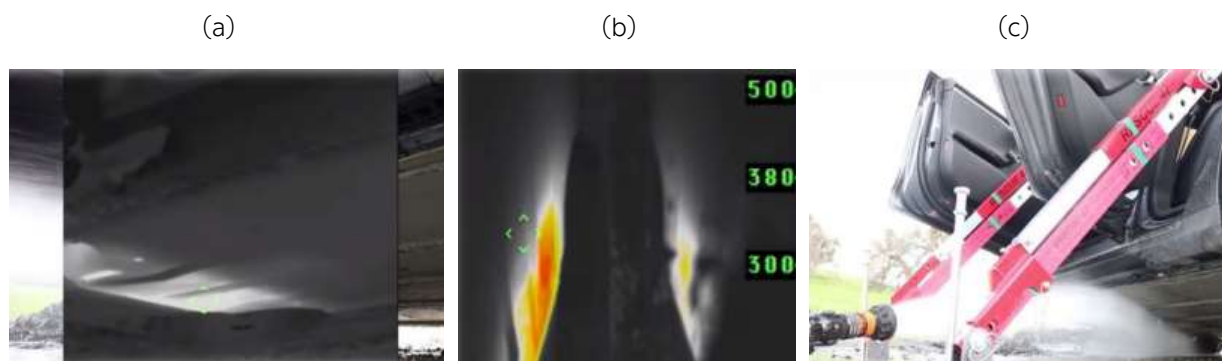
Po požáru EV, PHEV nebo HEV vzniká oproti konvenčním vozidlům riziko, že se trakční baterie může stát znovu iniciátorem dalšího požáru, proto je důležité baterii po uhašení požáru ochlazovat. Hlavním důvodem je zastavení předávání tepla mezi jednotlivými články baterie a jejich sekcemi. Články baterie nemusí vyhořet úplně všechny, i když se část článků trakční baterie při požáru vznítí. Teplo, které vzniká v důsledku chemických reakcí v člancích nebo v důsledku zkratových proudů, lze redukovat pomocí vodního proudu nebo ponořením baterie, případně celého vozidla, do vody. Do pouzdra baterie se obecně nedoporučuje zasahovat, i když je nejefektivnější chladit baterii zevnitř, aplikace vody mezi články je tak možná v případě, pokud je pouzdro baterie již porušeno ať už vzniklým požárem nebo mechanickým namáháním (nehodou). Některé modely mají i větrací otvory baterie, pomocí kterých lze aplikovat vodu mezi články. Nejefektivnějšími způsoby pro ochlazování je vodní proud nebo ponoření do vodní lázně. Dalšími způsoby může být použití CO₂ nebo systému COBRA. [15]

5.2.1 Ochlazování vodním proudem

Hlavním cílem ochlazování je dostat teplotu trakční baterie na teplotu okolí. Je doporučena čistá voda bez příměsí, která je aplikována jedním proudem „C“ po dobu 10 minut, poté se po dobu 5 minut sleduje stav baterie. V případě, kdy se baterie samovolně zahřívá nebo se z ní přímo kouří, musí se ochlazování opakovat znovu



po dobu 10 minut. Pokud se zahřívání stále opakuje, opakuje se proces ochlazování stále dokola. K snímání teploty krytu baterie se využívá termokamera, díky které lze jasně identifikovat místo pro chlazení baterie. (viz Obr. 5-2). Během ochlazování trakční baterie je vhodné vozidlo polohovat. (viz Obr. 5-2 c) Po úspěšném ochlazení baterie se doporučuje její stav dále monitorovat po dobu minimálně 45 minut. [15]



Obr. 5-2: (a) snímání baterie termokamerou, (b) snímek z termokamery, (c) polohování vozidla v průběhu ochlazování baterie [15]

5.2.2 Ochlazování ponořením do vody

V případě, kdy není možné baterii efektivně chladit jiným způsobem, použije se metoda ponoření vozidla do vodní lázně, která však způsobí totální škodu na celém vozidle. Tato metoda se použije i pokud jsou škody způsobené požárem totální. Během ponoření vozidla do vodní lázně mohou při elektrolýze vznikat výbušné plyny, elektrolýza je způsobena průchodem stejnosměrného proudu kapalinou mezi elektrodami. Elektrody mohou tvořit odkryté svorky kontaktů vysokonapěťové baterie, případně živé izolované části vysokonapěťových vodičů. Při této reakci dochází k charakteristickému šumění a bublání, které je pozorovatelné v blízkém okolí ponořeného vozidla. Elektrolýza rozkládá molekuly vody na vodík a kyslík, pokud se produkované plyny nahromadí v uzavřených částech vozidla, může se vytvořit vysoká výbušná koncentrace. V případě, kdy není vysokonapěťové vedení ve vozidle zásadním způsobem poškozeno a je zároveň zachována integrita bateriového pouzdra, probíhá tato reakce uvnitř krytů baterie a konektorů, a samotné šumění a bublání není známkou probíjení vysokonapěťové části do okolní vody. Při tomto jevu dochází k vybíjení baterií. [15]

Před ponořením vozidla (viz Obr. 5-3) je nutné vytvořit podmínky pro únik plynů z uzavřených částí vozidla, s tímto jevem je nutné počítat i při umístění kontejneru, který musí být utěsněn. K tomu lze využít nízko-expanzní pěnu, případně velkou



plachtu. Vozidlo nemusí být ponořené celé, ale musí být ponořeno tak, aby byly zatopeny trakční baterie, ta by měla být ve vodní lázni alespoň 48 hodin. Po ponoření zůstane voda z vodní lázně kontaminovaná a je potřeba ji zlikvidovat. [15]



Obr. 5-3: Ponoření vozidla do vodní lázně [15]

5.2.3 Použití CO₂, systému COBRA a manipulačních vozíků

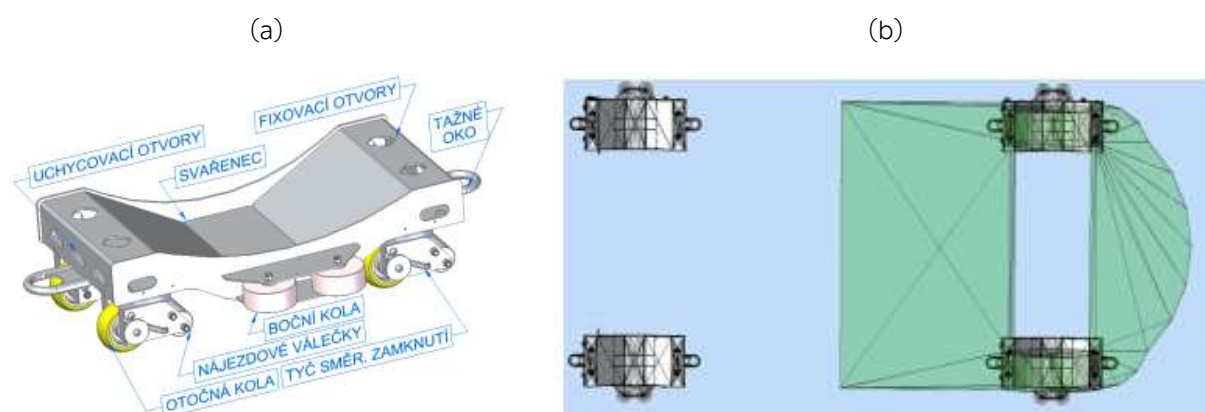
Hašení vozidel s elektrickým pohonem pomocí CO₂ není nejefektivnější volba, jeho hlavním hasicím účinkem je zředování okolního vzduchu a ochlazování. Zředování je na volném prostranství možné jen při aplikaci velkého množství hasicí látky a ochlazovací efekt je v tomto případě zanedbatelný. Pro účinné chlazení je nutné kontinuální chlazení v řádech desítek minut, na které není náplň plynového hasicího automobilu dostatečná, avšak hašení použitím CO₂ je přípustné. [15]

Systém COBRA dokáže proříznout kryt baterie a vodu aplikovat přímo na místo mezi jejími články, a tak efektivně chladit, ale narušení krytu při zásahu není v souladu s doporučením výrobců. Není možné vyloučit, že vodní paprsek poškodí vnitřní elektrické rozvody baterie. Vodním paprskem mohou být narušovány články baterie, které nebyly požárem zatím nijak zasaženy a veškeré její chemikálie jsou tak zbytečně vyplavovány do hasební vody. Systém COBRA lze použít jen v případě, že je pro konkrétní typ vozidla doporučeno výrobcem s přesným uvedením místa řezu. [15]

Nepojízdné vozidlo je nutné dostat mimo požárem zasažený prostor, k tomu slouží manipulační vozíky (viz Obr. 5-4). Vozidlo se na manipulační vozíky umístí pomocí pneumatického zvedáku, popřípadě zvedáním dalšími technickými prostředky. Pod každé kolo se poté umístí jeden vozík, který má nosnost 1000 kg, maximální manipulační rychlost je 5 km/hod. Konstrukce vozíku je tvořena lůžkem se čtyřmi pojezdovými koly, před které jsou uchyceny nájezdové válečky sloužící k překonání příčných zpomalovacích prahů. Vozíky jsou vybaveny upínacími tažnými oky



a uchycovacími popruhy. Kola vozu se postupně zvedají vždy na každé straně zvlášť, po umístění jedné strany vozu na vozíky je nutné oba vozíky omezit v pohybu, k čemuž se využívá sada stabilizačních klínů. Po umístění vozíku pod kola vozidla se musí každé kolo přichytit upínacím popruhem, poté je vhodné propojit dva vozíky na každé straně vozu mezi sebou upínacím popruhem, čímž se omezí pohyb pružných částí na manipulačních vozících. Za tažná oka vozíků se pak uchytí lana, řetěz, popřípadě prvek, který bude sloužit k manipulaci a regulaci pohybu vozidla. [15]



Obr. 5-4: (a) schéma a konstrukce manipulačních vozíků, (b) schéma umístění manipulačních vozíku pod vozidlem [15]



6 Požární bezpečnost hromadných garáží

Při návrhu požárně bezpečnostního řešení garáží se dle Vyhlášky č. 23/2008 Sb. o technických podmínkách požární ochrany staveb [26] postupuje dle ČSN 73 0804 Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty, příloha I [27]. V případě elektromobility lze postupovat dle Metodického doporučení generálního ředitelství Hasičského záchranného sboru České republiky z roku 2021 [28]. Pro projektování garáží platí ČSN 73 6056 Odstavné a parkovací plochy silničních vozidel [29], na kterou přímo navazuje ČSN 73 6058 Jednotlivé, řadové a hromadné garáže [30]. Dle ČSN 73 6056 [29] je základní šířka parkovacího místa při kolmém řazení 2,5 m a délka 5,0 m. Tato norma však byla vydána v roce 2011, od té doby došlo v automobilovém průmyslu ke zvětšování vozidel (např. vozidla SUV), tudíž tato vozidla způsobují, že mezi vozidly nevznikají takové rozestupy jako dříve a může tak být jednodušší přenesení požáru z jednoho vozidla na druhé.

6.1 Legislativní požadavky

Garáže se v dnešní době posuzují dle ČSN 73 0804, příloha I. Za garáže se nepovažují nekryté prostory pro parkování (např. na střeše objektu) a přístřešky pro auta, motocykly a kola (stěny max po ½ obvodu). Norma třídí garáže dle druhu vozidel, dle seskupení odstavných stání, dle druhu paliva, dle umístění a dle uskladnění vozidel. [27]

Každá garáž musí tvořit samostatný požární úsek, pokud nejsou v právních předpisech či jiných normativních dokumentech stanoveny jiné požadavky. Výjimkou je jednotlivá garáž pro osobní, dodávková nebo jednostopá vozidla, která může být součástí požárního úseku rodinného domu, pokud je plocha požárního úseku menší než 600 m². Hromadné garáže se člení do požárních úseků dle počtu stání a vybavení aktivním požárně bezpečnostním zařízením. Navýšení kapacity hromadných garáží je možné při instalaci SHZ a ZOKT. V požárních úsecích hromadných garáží smí být umístěny dozorny sloužící provozu garáží, prostory administrativního charakteru, sloužící provozu garáží s plochou do 50 m², bufety s plochou do 20 m², sociální zařízení nebo mycí boxy. Dále se pro požární úseky garáží stanovuje požární a ekonomické riziko. V rámci ekonomického rizika se pro hromadné garáže navíc hodnotí nejvyšší počet stání s uvažováním vlivu možnosti větrání, SHZ a částečného členění v požárním úseku. Stupeň požární bezpečnosti požárního úseku se stanoví v závislosti na požárním riziku, celkovém počtu podlaží objektu a konstrukčním systému objektu. [27]



Požadavky na instalaci EPS s detektory hořlavých směsí (dle druhu vozidel) se musí navrhnout ve všech hromadných garážích s počtem vozidel přes 20 % dovoleného počtu stání, popř musí být doplněna plynovou detekcí se zvukovou a světelnou signalizací pro vozidla na plynná paliva. Rovněž je EPS navrhována v případech, kdy je činnost ostatních PBZ závislá na včasné detekci od EPS. Obecně se doporučuje navrhovat EPS pro garáže v PP. SHZ se navrhuje zejména pro uzavřené garáže v PP, v 1.PP lze navrhnout bez SHZ jen v případě přímého výjezdu na volné prostranství. ZOKT se navrhuje v PP, pokud se požaduje částečně požárně otevřený PÚ. Hromadné garáže se 2 a více PP nebo s více než 3 NP musí mít vnitřní zásahové cesty. Vnitřní odběrní místa se zřizují pouze v PÚ s obsluhou, jinak nemusí být zřizována. V garážích musí být instalovány přenosné hasicí přístroje pěnové nebo práškové s hasicí schopností 183B. [27]

6.2 Opatření z hlediska elektromobility

Aktuální platná norma, podle které se dnes navrhují garáže ČSN 73 0804, příloha I [27], neřeší požární bezpečnost garáží z hlediska nastupující elektromobility. Na to reagovalo generální ředitelství Hasičského záchranného sboru (HZS) České republiky a v roce 2021 vydalo metodické doporučení [28], které platí pro projektování požární bezpečnosti nových staveb a přiměřeně i pro změny staveb dotýkající-li se změny garážových prostorů. Metodické doporučení se týká prostorů, které zahrnují prostory pro výrobu a skladování baterií pro elektromobily a manipulaci s nimi nebo prostory pro parkování a dobíjení elektromobilů v budovách. [28]

V případě požáru vozidla s bateriovými systémy vznikají nad rámec standardních rizik další bezpečnostní rizika, kterými jsou: [28]

- napětí na svorkách baterie;
- vysoká energie přenášená při nabíjení;
- nebezpečí uvolnění toxických plynů při požáru;
- riziko náhlého výskytu horkého elektrolytu při požáru;
- kontaminace vody využitá pro hašení;
- omezený pracovní prostor v podzemních garážích (včetně nízké světlé výšky);
- malá účinnost hasiva (resp. V současné době nejsou standardní hasiva, která by umožňovala účinné uhašení baterie bez rizika jejího opětovného hoření).



Prostory pro parkování a dobíjení elektrovozidel řeší v metodickém doporučení kapitola 5. Metodika řeší jak parkování vozidel, tak jejich parkování s dobíjením. Požadavky z kapitoly 5 Metodického doporučení [28] pro hromadné garáže jsou sepsány v Tab. 6-1. Zároveň v rámci zhodnocení provedení požárního zásahu by PBR mělo obsahovat zhodnocení a popis způsobu transportu vozidla s baterií v nestandardním stavu (popř. po požáru) z prostoru hromadné garáže při respektování vybavení místně příslušného HZS kraje technickými prostředky pro možné zajištění transportu vozidla a v případě absence odpovídající techniky místně příslušného HZS kraje pro navrhovaný transport vozidla stanovení návrhu opatření pro majitele nebo provozovatele objektu nebo hromadné garáže. Pro požární úseky jednotlivých a řadových garáží se nestanovují požadavky nad rámec norem požární bezpečnosti staveb. [28]

Tab. 6-1: Požadavky pro hromadné garáže dle [28]

Požadavek	Popis daného požadavku	
IV. SPB	Doporučuje se stanovit minimálně IV. SPB, nevyžaduje-li postup dle norem řady ČSN 73 08xx stanovení vyššího stupně požární bezpečnosti (v rámci změn staveb dle ČSN 73 0834 Požární bezpečnost staveb – Změny staveb se tento IV. SPB nesnižuje)	
Požárně bezpečnostní zařízení (PBZ)	EPS	Doporučuje se instalace systému EPS, zároveň se preferuje napojení systému EPS na pult centrální ochrany místně příslušného HZS kraje.
	SSHZ ¹⁾	Doporučuje se instalovat SSHZ v PÚ hromadných garážích nebo alespoň v jejich částech s parkovacími místy pro dobíjení elektrovozidel.
	ZOKT ¹⁾	Doporučuje se instalovat ZOKT v PÚ hromadných garážích nebo alespoň v jejich částech s parkovacími místy pro dobíjení elektrovozidel. V případě změn stávajících stavebních objektů je ZOKT doporučeno až od 4 dobíjecích míst v jednom PÚ.
Šířka parkovacího stání minimálně 3,5 m	Pro možné bezpečné provedení požárního zásahu se doporučuje parkovací stání pro dobíjení elektrovozidel realizovat minimálně v šířce 3,5 m, které odpovídá dle ČSN 73 6056 [29] šířce parkovacího stání pro osoby tělesně postižené.	
Místa pevného stání	Umístění parkovacích stání pro dobíjení elektrovozidel se v hromadných garážích doporučuje pouze v místech pevných stání (podlah), nedoporučuje se umístění dobíjených vozidel v zakladačích nebo obdobných zařízeních.	

Pozn.: ¹⁾ Pokud SSHZ nebo ZOKT není navrženo, je doporučeno toto zdůvodnit i s ohledem na předpokládaný průběh požáru, požárního zásahu, specifická rizika bateriových systémů, projevy požáru apod.



6.3 Řešení požární bezpečnosti hromadných garáží v různých státech

V rámci řešení požární bezpečnosti hromadných garáží byl vytvořen dotazník (viz příloha 1a této práce), ve kterém jsou uvedeny jednotlivé body řešení požární bezpečnosti hromadných garáží dle ČSN 73 0804 příloha I [27] pro prostor hromadné garáže řešeného níže v praktické části této práce. Tento dotazník byl dán k vyplnění odborníkům z různých států zainteresovaným v požární bezpečnosti, aby uvedli, jak se požární bezpečnost řeší dle legislativy v daném státě (viz příloha 1b této práce). Pro porovnání byl dotazník vyplněn dle následujících legislativ: Kodex požární a životní bezpečnosti Spojených arabských emirátů 2018, Saudský stavební zákon 2018 a Britské technické specifikace a postupy 9991:2015 a 9999:2017.

Co se týče elektromobility, ani jedna z výše uvedených legislativ neřeší požární bezpečnost se zahrnutím jejího vlivu.

Rozdělení na požární úseky je pro všechny státy stejné. Hlavní rozdíl v řešení požární bezpečnosti v České republice a ostatních dotazovaných státech je hned na začátku, kdy dotazované státy nepoužívají koncept požárního zatížení ani požárního rizika, který je u nás reprezentován ekvivalentní dobou trvání požáru, a ekonomického rizika. Ostatní státy též nepoužívají stupeň požární bezpečnosti, podle kterého se v České republice stanovuje požadovaná požární odolnost. Co se týče požární odolnosti, v ostatních státech jsou požadavky na jednotlivé konstrukce vyšší, i kdybychom v České republice uvažovali s elektromobilitou dle Metodického doporučení HZS [28]. Z hlediska požární bezpečnostního zařízení je v daném prostoru ve všech ostatních státech požadována instalace EPS, v České republice není instalace požadovaná. Stejně tak není v České republice požadováno pro tento prostor ani instalace SHZ a ZOKT, pokud by se neuvažovala elektromobilita. Oproti tomu je však dle Saudského stavebního zákona požadována instalace SHZ pro tento typ budovy (bytový dům). V ostatních státech není instalace požadována.

Dle výše uvedeného je patrné, že řešení požární bezpečnosti je dle legislativy rozdílné napříč státy, avšak elektromobilita není v těchto legislativách vůbec řešena. Česká republika je oproti dotazovaným státům alespoň maličko napřed, kdy u nás již máme alespoň nějaká doporučení týkajících se elektromobility (viz [28]) a zároveň je aktuálně v řešení i norma, která by toto měla zahrnovat. Obecně by bylo potřeba, aby legislativa jednotlivých států reagovala rychleji na rozvoj elektromobility.



7 Posuzování požární odolnosti konstrukcí

Při požáru vozidel, ať už EV nebo ICEV, vzniká požární zatížení, které stanovuje požární riziko v daném prostoru. Zvýšené teploty při požáru negativně ovlivňují únosnost konstrukcí, které jsou při požáru ohřívány. V návaznosti na požární riziko musí konstrukce dle požárně bezpečnostního řešení splnit požadovanou požární odolnost.

Požární odolnost je schopnost stavebních konstrukcí účinně odolávat účinku plně rozvinutého požáru po určitou dobu, aniž by došlo k narušení mezních stavů. [31] Mezi základní mezní stavy patří únosnost a stabilita R, celistvost E, izolační schopnost I a mezní stav omezení radiace W. Mezní stavy požární odolnosti zohledňují typ konstrukce, např. jestli je prvek nosný nebo nenosný, jestli se jedná o stěnu, sloup nebo dveře. Požární odolnost konstrukce představuje tedy dobu v minutách, po kterou musí být schopny odolávat účinkům požáru bez porušení požadované funkce. [32]

7.1 Metody posuzování požární odolnosti konstrukcí

Dle ČSN EN 1991-1-2 (Eurokód 1) [25] se má požární odolnost ověřit z hlediska:

- Času, kdy návrhová doba požární odolnosti $t_{fi,d}$ je větší než požadovaná doba požární odolnosti $t_{fi,requ}$;

Rovnice 7-1: Posouzení požární odolnosti z hlediska času [25]

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,requ}$$

- Únosnosti, kdy návrhová hodnota únosnosti prvku $R_{fi,d,t}$ při požární situaci v čase t je větší než návrhová hodnota příslušných účinků zatížení $E_{fi,d,t}$ při požární situaci v čase t ;

Rovnice 7-2: Posouzení požární odolnosti z hlediska únosnosti [25]

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$$

- Teploty, kdy návrhová hodnota teploty materiálu θ_d je menší než návrhová hodnota kritické teploty materiálu $\theta_{cr,d}$.

Rovnice 7-3: Posouzení požární odolnosti z hlediska kritické teploty [25]

$$\theta_d \leq \theta_{cr,d}$$



Požární odolnost konstrukcí lze posoudit dle ČSN EN 1992-1-2 (Eurokód 2) [33] pomocí tabulkových hodnot nebo pomocí zjednodušených výpočetních metod. Dle Eurokódu 2 lze při posuzování požární odolnosti zvolit tři návrhové přístupy: [33]

- návrh podle osvědčených návrhových řešení (tabulkové údaje nebo zkoušky);
- jednoduché výpočetní metody pro určité typy prvků;
- zpřesněné výpočetní metody pro simulaci chování nosných prvků, částí konstrukce nebo celé konstrukce.

Pro návrh, tedy posouzení požární odolnosti je dán obecný postup: [33]

- teplotní analýza požárního úseku;
- teplotní analýza konstrukce;
- návrh konstrukce na účinky požáru.

Tabulky pro tabulkové posouzení byly sestaveny na základě požárních zkoušek a výpočtů. Tabulky jsou nejjednodušší postup posouzení požární odolnosti ŽB prvků. Hodnoty pro tabulkové posouzení jsou většinou značně konzervativní. Hodnoty v tabulkách jsou vztaženy k normovému požáru a platí pro prvky z obyčejného betonu s objemovou hmotností 2000–2600 kg/m³ s křemičitým kamenivem. [33]

Pro použití zjednodušených výpočetních metod je nutné vyřešit sdílení tepla neboli přestup tepla do konstrukce, který probíhá vedením, prouděním a sáláním. Teploty v konstrukci je možné řešit numericky nebo pomocí teplotních profilů, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 1992-1-2 (Eurokód 2). Pro použití numerických výpočtů je nutné znát teploty plynu v okolí konstrukce. [33]

Mezi zjednodušené výpočetní metody dle ČSN EN 1992-1-2 (Eurokód 2) [33] patří: metoda izotermie 500 °C; zónová metoda; metoda pro štíhlé sloupy; metoda pro ověření únosnosti ve smyku a kroucení a zjednodušená výpočetní metoda pro nosníky a desky. Nejpoužívanějšími metodami je zónová metoda a metoda izotermie 500 °C. [33]



8 Modelování požáru v řešeném prostoru

Na základě výše uvedené teorie je zřejmé, že v České republice zatím není žádný závazný dokument či norma, který by se týkal navrhování požární bezpečnosti garáží z hlediska elektromobility. V současné době je v řešení návrh normy ČSN 73 0838 – Garáže, která by měla zahrnovat i již zmíněnou elektromobilitu. Zároveň je vydán Metodický pokyn HZS [28], který je však jen doporučením pro navrhování ale není závazný. Z tohoto důvodu je nutné zjistit, zda jsou navrhované požadavky ať už z návrhu normy ČSN 73 0838 či z Metodického doporučení HZS [28] dostatečné či nikoliv. Cílem této kapitoly je tedy zjištění vlivů požáru vozidel na požární bezpečnost daného prostoru a na požární odolnost konstrukcí. V rámci modelování je uvažováno s více variantami vstupních podmínek.

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. Jako první byla dle aktuální normy platné pro navrhování garáží určena požární bezpečnost daného prostoru (viz kap. 8.2). Dále byl definován program pro modelování požáru (viz kap. 8.3). Následně byl v programu nejdříve vymodelován prostor hromadné garáže dle určené dispozice (viz kap. 8.4) a vozidlo, které má přiblížit reálnost šíření požáru. Poté bylo pro modelování požáru nutné stanovit velikost výpočetní sítě provedené pomocí citlivostní analýzy pro různé velikosti výpočetní sítě (viz kap. 8.6). Následně pak byly definovány jednotlivé modelové situace (viz kap. 8.7) a zhodnoceny jejich výsledky (viz kap. 8.8 a 8.9).

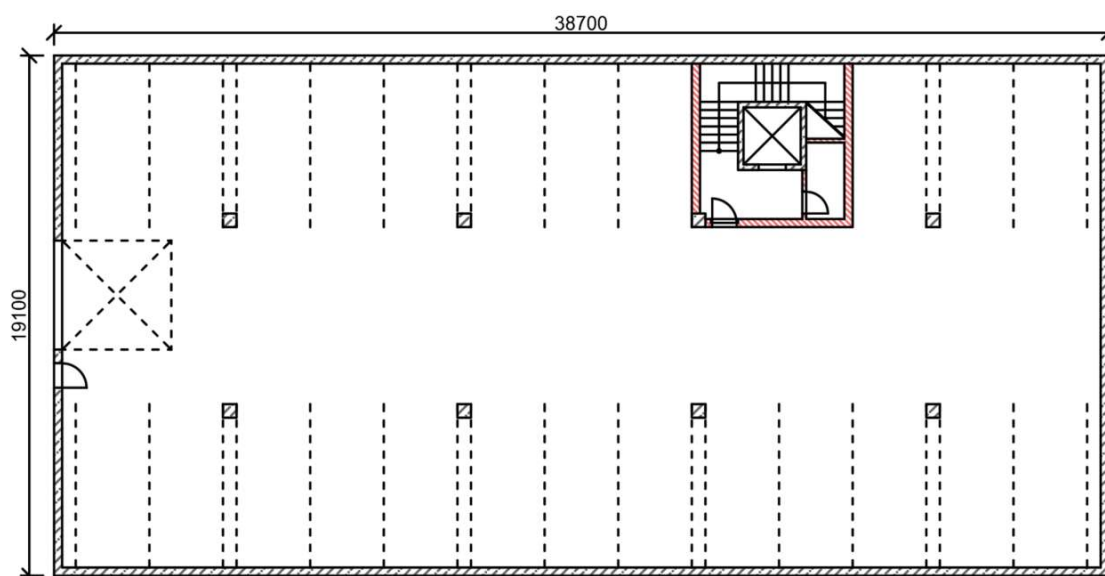
V rámci diplomové práce jsou dále na základě předchozí teorie řešeny následující modelové situace:

- scénář č. 1: Vliv výkonu požáru na teploty plynu, povrchu, viditelnost a koncentraci CO;
- scénář č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru mezi jednotlivými vozidly;
- scénář č. 3: Vliv vstupní křivky požáru (EV, ICEV, PHEV) na teploty plynu, povrchu, viditelnost a koncentraci CO;



8.1 Řešený prostor

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 Obr. 8-1). 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 plynová paliva.



Obr. 8-1: Půdorys řešeného prostoru

Světlá výška garáže je 2,6 m. Svislé nosné konstrukce jsou železobetonové – sloupy a podzemní stěny. Konstrukce schodišťového prostoru je z cihelného zdiva. Ze železobetonu jsou rovněž vodorovné konstrukce – strop a schodišťová ramena.

8.2 Požárně bezpečnostní řešení daného prostoru

Požární bezpečnost stavby je řešena dle ČSN 73 0802 [34] a ČSN 73 0804 [27] a navazujících ČSN, dále je postupováno dle závazných vyhlášek.

Požární výška objektu je $h = 8,9$ m a objekt má nehořlavý konstrukční systém. Objekt slouží jako bytový dům zařazený dle ČSN 73 0833 [35] do budov skupiny OB2. Objekt není vybaven EPS, SHZ ani ZOKT. Objekt je vybaven tlačítkem TOTAL STOP. Bytové jednotky jsou vybaveny zařízením autonomní detekce a signalizace. Pro evakuaci osob slouží CHÚC typu A s nucenou ventilací a nouzovým osvětlením.



K objektu vede stávající přístupová komunikace. U objektu není zřízena dle [34] nástupní plocha. Zároveň není objekt vybaven vnitřními ani vnějšími zásahovými cestami. Objekt je vybaven vnitřními odběrními místy, přenosnými hasicími přístroji a požárně bezpečnostním značením.

8.2.1 Požární úseky, požární riziko a stupeň požární bezpečnosti

V této kapitole je s ohledem na řešený prostor uveden pouze požární úsek hromadné garáže, který je řešen dle ČSN 73 0804 [27] příloha I.

P01.01 – Hromadná garáž

- zařazení garáží:
 - dle druhu vozidel: 1. skupina – osobní a dodávkové automobily, jednostopá vozidla;
 - dle seskupení odstavných stání: hromadné garáže;
 - dle druhu paliva: kapalná paliva nebo elektrické zdroje;
 - dle umístění: vestavěné garáže;
 - dle uskladnění vozidel: bez zakladačového systému;
 - dle možnosti odvětrání: uzavřené – $x = 0,25$;
 - dle případné instalace SHZ: bez instalace SHZ – $y = 1,0$;
 - dle částečného členění: členěné – $z = 1,5$.
- požární riziko:
 - dle ČSN 73 0802, tabulka B.1, položka 11 – $\tau_e = 15 \text{ min}$
- ekonomické riziko:
 - nejvyšší počet stání:
 - $N_{\max} = N \cdot x \cdot y \cdot z = 50 \text{ stání} > 24 \text{ stání} - \text{VYHOVUJE}$
 - nejvyšší počet stání v PÚ dle [27], tabulka I.2: $N = 135$
 - hodnota zohledňující možnost odvětrání garáže dle [27], čl. I.3.4: $x = 0,25$ (uzavřené – $F_o < 0,025 \text{ m}^{1/2}$);
 - hodnota zohledňující instalaci SHZ dle [27], čl. I.3.4: $y = 1,0$ (bez instalace SHZ);
 - hodnota zohledňující částečné požární členění PÚ dle [27], čl. I.3.4: $z = 1,5$ (členěné).



- index pravděpodobnosti vzniku a rozšíření požáru P_1 :
 - $P_1 = p_1 \cdot c = 1,0 \cdot 1,0 = 1,0$
 - pravděpodobnost vzniku a rozšíření požáru dle [27], tabulka E.1, položka 8.3: $p_1 = 1,0$;
 - součinitel vlivu PBZ dle [27], čl. 7.2: $c = 1,0$ (bez vlivu).
 - $P_2 = p_2 \cdot S \cdot k_5 \cdot k_6 \cdot k_7 = 240,4$
 - pravděpodobnost rozsahu škod dle [27], tabulka E.1, položka 8.3: $p_2 = 0,09$;
 - plocha PÚ: $S = 667,7 \text{ m}^2$;
 - součinitel vlivu počtu podlaží dle [27], tabulka 6: $k_5 = 2,00$ (pro 4 NP);
 - součinitel vlivu hořlavosti konstrukčního systému dle [27], čl. 7.3.2: $k_6 = 1,0$ (nehořlavý konstrukční systém);
 - součinitel vlivu následných škod dle [27], čl. 1.4.2: $k_7 = 2,0$.
 - $0,11 \leq P_1 \leq 0,1 + \frac{5 \cdot 10^4}{P_2^{1,5}} - 0,11 < 1,0 < 13,5 - \text{VYHOVUJE}$
 - $P_2 \leq P_{2, \text{mezní}} = \left(\frac{5 \cdot 10^4}{P_1 - 0,1} \right)^{2/3} - 240,4 < 1455,8 - \text{VYHOVUJE}$
- stupeň požární bezpečnosti:
 - dle [27], tabulka 8: I. SPB

8.2.2 Požární odolnost stavebních konstrukcí

Požadovaná požární odolnost svislých nosných konstrukcí je dle ČSN 73 0804, tabulka 10 REI 30 DP1 pro požární stěny (stěny schodišťového prostoru a garáže), REW 30 DP1 pro obvodové stěny a R 30 DP1 pro nosné konstrukce uvnitř PÚ (sloupy). Požadovaná požární odolnost stropní konstrukce je REI 30 DP1. Požadovaná požární odolnost požárního uzávěru mezi schodišťovým prostorem a garáží je EI 15 DP1 – C.

8.2.3 Koncepce evakuace osob z řešeného prostoru

Z požárního úseku garáží vede nechráněná úniková cesta garáží do CHÚC typu A nebo lze unikat přímo dveřmi na volné prostranství. Je proveden výpočet doby evakuace po NÚC podle ČSN 73 0804. Výpočet je proveden pro nejnepříznivější vstupní parametry.



- předpokládaná doba evakuace dle [27], čl. 10.9.1:
 - $t_u = \frac{0,75 \cdot l_u}{v_u} + \frac{E \cdot s}{K_u \cdot u} = 0,88 \text{ min}$
 - délka únikové cesty: $l_u = 27,3 \text{ m}$ (měřeno od nejvzdálenějšího bodu);
 - rychlost pohybu osob dle [27], tabulka 17: $v_u = 30 \text{ m/min}$ (únik po rovině);
 - počet osob dle ČSN 73 0818 [36], položka 10.1: $E = 0,5 \cdot N = 12 \text{ osob}$
 - Počet stání: $N = 24 \text{ stání}$
 - součinitel podmínek evakuace dle [27], tabulka 18: $s = 1,0$ (unikající osoby schopné samostatného pohybu, současný způsob evakuace, nechráněná úniková cesta);
 - jednotková kapacita únikového pruhu dle [27], tabulka 17: $K_u = 40 \text{ osob/min}$ (únik po rovině);
 - započítatelný počet únikových pruhů: $u = 1,5$ (šířka dveří do schodišťového prostoru 900 mm).
- doba zakouření akumulární vrstvy dle [27], čl. 10.1.2:
 - $t_e = 1,25 \cdot \sqrt{\frac{h_s}{p_1}} = 2,01 \text{ min}$
 - světlá výška podlaží: $h_s = 2,6 \text{ m}$
- $t_e \geq t_u \leq t_{u,\max} - 2,01 \text{ min} > 0,88 \text{ min} < 4,0 \text{ min}$
 - maximální doba evakuace dle [27], tabulka 16: $t_{u,\max} = 4,0 \text{ min}$
- mezní délka NÚC dle [27], čl. 10.12.1:
 - $l_{u,\max} = \frac{v_u}{0,75} \cdot \left(t_{u,\max} - \frac{E \cdot s}{K_u \cdot u} \right) = 32 \text{ m} > 27,3 \text{ m} - \text{VYHOVUJE}$

8.3 Použitý výpočtový model

Program PyroSim tvoří grafické uživatelské rozhraní pro komplexní podporu práce v programu FDS 6.7.6, který vyvinul Národní institut pro standardy a technologie (NIST) Ministerstva obchodu Spojených států amerických. K zobrazení výsledků slouží program Smokeview (SMV) 6.7.21 též vyvinutý Národním institutem pro standardy a technologie Ministerstva obchodu Spojených států amerických. Výpočetní program FDS 6.7.6 a SMV 6.7.21 je instalován spolu s PyroSim 2022. V programu PyroSim lze komplexně



definovat modelovaný prostor, který je následně zapsán do zdrojového kódu. PyroSim představuje preprocesor programu, kdy je vytvářen model, procesorem je FDS a postprocesorem je Smokeview, který slouží k zobrazení výsledků.

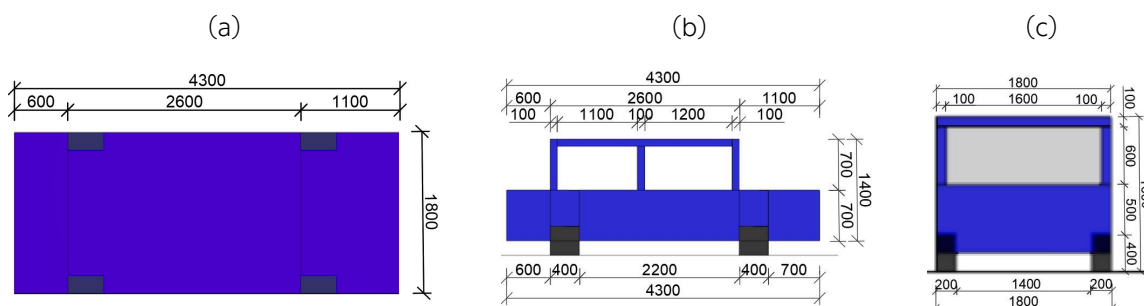
Oba programy slouží k modelování fluidními modely dynamiky požáru a jsou vhodné pro požárně inženýrský přístup. FDS používá pro svoje výpočty výpočetní oblasti tzv. výpočetní sítě. Tyto oblasti jsou rozděleny do konečného počtu trojrozměrných kontrolních objemů (buněk) vytvářejících prostorovou síť.

8.4 Model řešeného prostoru a model vozidla

V programu byl vymodelován prostor hromadné garáže bytového domu (viz Obr. 8-1) a vozidlo, případně vozidla.

8.4.1 Model vozidla

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 [37]. Obr. 8-2 znázorňuje rozměry vozidla.



Obr. 8-2: 2D model vozidla a daných rozměrů: (a) horní pohled, (b) boční pohled, (c) čelní pohled
Materiály, které byly použity při modelování vozidla, znázorňuje Tab. 8-1. V tabulce jsou uvedeny i materiálové charakteristiky, které byly do výpočtu v programu zaneseny. Z hlediska zjednodušení pro řešený příklad nebyly ve vozidle uvažovány žádné další hořlavé materiály, jelikož je požár modelován pomocí křivek HRR, které byly zjištěny velkorozměrovými požárními zkouškami celých vozidel a všechny hořlavé materiály a jejich uvolňované teplo jsou tak již započítány.



Tab. 8-1: Materiály vozidla a jejich charakteristiky

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti λ [W/(m.K)]	Měrná tepelná kapacita c [kJ/(kg.K)]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Část vozidla	Zdroj
Ocel	45,8	0,46	7850	Karoserie	[38]
Pneu	0,13	1,88	1150	Pneumatiky	[37]
Sklo	0,76	0,84	2700	Okna vozidla	[38]

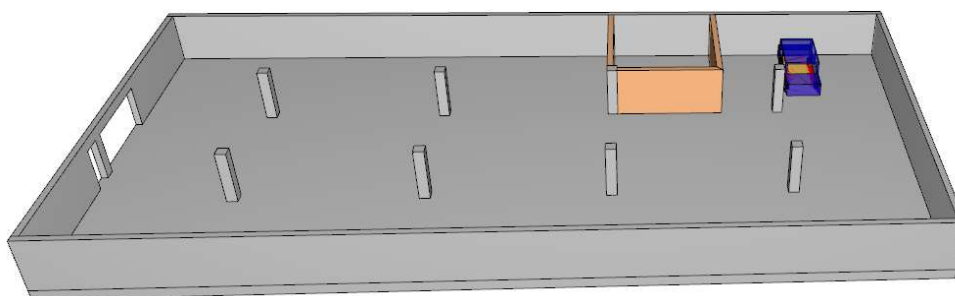
8.4.2 Model prostoru

Dispozice řešeného prostoru byla vymodelována dle Obr. 8-1. 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. Materiálové charakteristiky jsou znázorněny v Tab. 8-2. 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.

Tab. 8-2: Materiály a materiálové charakteristiky konstrukcí garáží

Materiál	Součinitel tepelné vodivosti [W/(m · K)]	Měrná tepelná kapacita c [kJ/(kg.K)]	Objemová hmotnost ρ [kg/m ³]	Emisivita [-]
Beton	1,8	1,04	2280	0,9
Zdivo	Pro teplotu 20-299 °C: 0,36	1,04	750	0,8
	Pro teplotu 300-599 °C: 0,38			
	Pro teplotu > 600 °C: 0,45			

V řešeném prostoru bylo vozidlo umístěno v pravém horním rohu (viz Obr. 8-3), jelikož tento prostor je nejvzdálenější od vjezdových vrat a zároveň je prostor z velké části uzavřený.



Obr. 8-3: 3D model řešeného prostoru s umístěním vozidla



8.5 Vstupní a okrajové podmínky pro modelování požáru

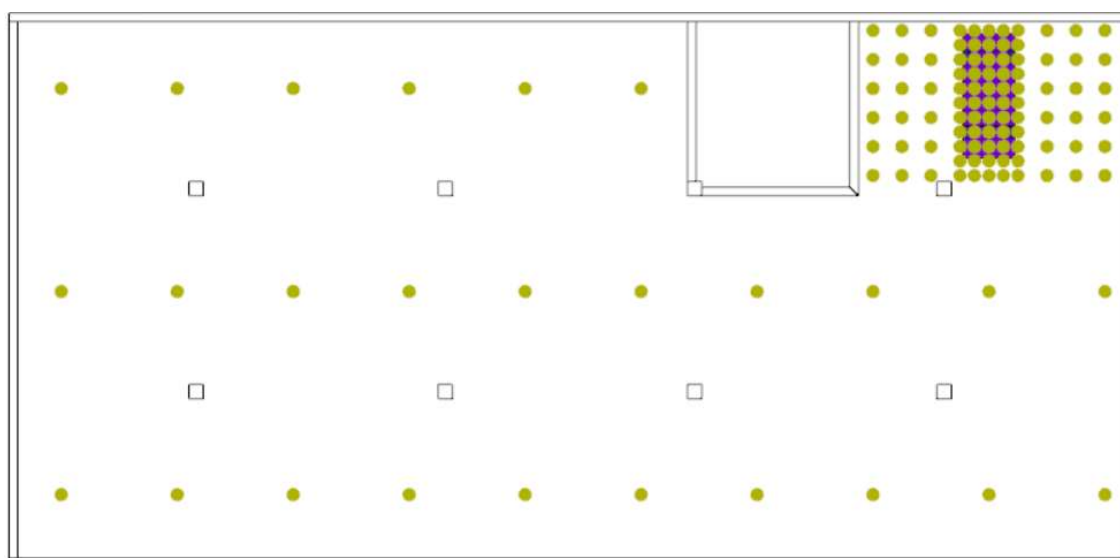
Počáteční podmínky, výkon požáru, chemická reakce a definice termočlánků a snímačů v modelu shrnuje Tab. 8-3. Velikost buněk výpočetní sítě řeší kapitola 8.6.

Tab. 8-3: Vstupní a okrajové podmínky pro modelování požáru

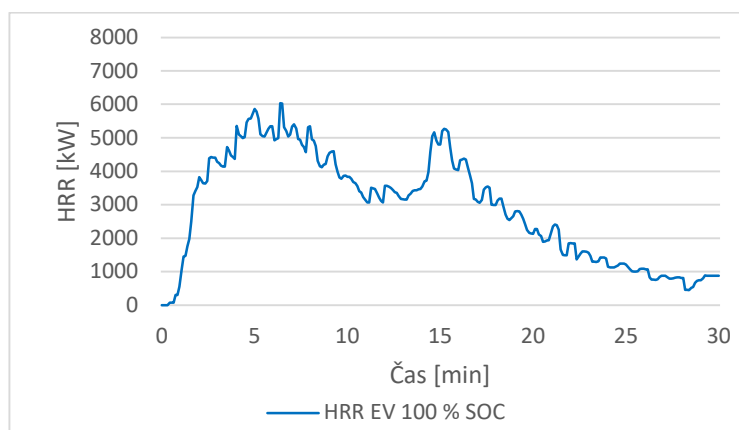
Podmínka	Specifikace
Teplota prostředí	20 °C
Vlhkost	40 % (relativní)
Tlak	1013,25 hPa
Definice výpočetní sítě	Velikost výpočetní sítě je podrobně popsána v kapitole 8.6. Rozsah výpočetní sítě pokrývá celý prostor hromadné garáže.
Iničiační zdroj	<p>Hořák s proměnným výkonem o maximálním výkonu 814,4 kW/m² na ploše 2,0 x 4,0 m, tzn. přepočtený výkon je 2,0 x 4,0 x 814,4 = 6515,2 kW = 6,515 MW, který působí po celou dobu simulace.</p> <p>Definované HRR, které je do modelu vloženo je uvedeno na Obr. 8-5. Pro modelování je použit průběh požáru EV s 100 % SOC (pro scénář č. 3 požáry EV s 85 % a ICEV).</p> <p>Je uvažován idealizovaný požár bez hašení.</p> <p>Požár jednoho, případně dvou vozidel (viz 8.7.2).</p>
Definice termočlánků	<p>Teploty měřeny pomocí termočlánků – teplota plynu a povrchová teplota.</p> <p>Termočlánky pro měření teploty plynu umístěny ve výšce 2,0 m nad povrchem podlahy. Termočlánky pro měření povrchové teploty umístěny ve výšce 2,6 m nad povrchem podlahy.</p> <p>Umístění termočlánků viz Obr. 8-4:</p> <ul style="list-style-type: none"> • V rastru nad požárem ve vzdálenosti 0,5 a 1,0 m; • Dále v prostoru garáže ve vzdálenosti 4,0 m. <p>Termočlánky mají výchozí nastavení dle programu FDS.</p> <p>Ve vozidle byly umístěny termočlánky na jednotlivých oknech, při dosažení teploty 300 °C je simulováno rozbití oken.</p>



Podmínka	Specifikace
Definice snímačů	Dále je měřena: <ul style="list-style-type: none"> • Viditelnost; • Koncentrace oxidu uhelnatého CO. Umístění stejné, jako umístění termočlánků. Snímače umístěny ve výšce 2,0 m nad povrchem podlahy. <ul style="list-style-type: none"> • Čidla viditelnosti a koncentrace CO mají výchozí nastavení dle programu FDS.
Chemická reakce	Polyuretanová reakce se vzorcem $C_{6,3}H_{7,1}O_{2,1}N_1$ <ul style="list-style-type: none"> • Kritická teplota plamene = 1427 °C; • Produkce CO = 0,2 kg/kg; Podíl tvorby částic kouře = 0,1 kg/kg.



Obr. 8-4: Rozmístění termočlánků v modelu



Obr. 8-5: Průběh HRR EV s 100 % SOC – převzato z [22]



8.6 Citlivostní analýza

Před samostatnými výpočty jednotlivých variant byla provedena citlivostní analýza, jejímž cílem bylo zjistit vliv hrubosti sítě na výstupy ze simulace. V citlivostní analýze se řeší stejný modelovaný prostor pro různé velikosti výpočetních sítí. Velikost výpočetní buňky a počet buněk ve výpočetní síti má vliv na výsledky simulace, ale především na výpočetní čas. U hrubé sítě, kde je velikost buněk velká a jejich počet malý, může docházet k většímu riziku odchylek od přesnějších výsledků. U jemné sítě, kde je velikost buněk malá a počet buněk velký, lze očekávat přesnější výsledky. U středně hrubé sítě dochází k mírnějším odchylkám od přesnějších výsledků a zároveň není výpočetní čas tak dlouhý, jako je tomu u jemné sítě.

V rámci citlivostní analýzy byla řešena výpočetní oblast prostoru hromadné garáže (viz Obr. 8-1) se světlou výškou garáže 2,6 m. Pro modelovaný prostor byla použita křivka HRR EV s 100 % SOC vyrobeného v roce 2014 s maximální hodnotou HRR 6,0 MW z velkorozměrové zkoušky z roku 2015. K iniciaci požáru byl použit pískový propanový hořák o rozměrech 2,4 x 1,2 m. Výkon propanového hořáku byl 2,0 MW. U vozidla byla všechna okna a dveře zcela zavřená. [24] Termočlánky a snímače koncentrace oxidu uhelnatého (CO) a viditelnosti byly umístěny dle Obr. 8-4. Pro získání přehledu o velikosti výpočetní buňky a počtu buněk výpočetní sítě byla využita webová kalkulačka FDS v6 Mesh Size Calculator [39], která vychází z velikosti zadaného výpočetního prostoru a zadané maximální hodnoty HRR v kW. Výsledkem z webové kalkulačky jsou doporučené rozměry výpočetní sítě, které zobrazuje Tab. 8-4, kde kalkulačka doporučuje výpočetní síť o velikosti jedné buňky 0,120x0,119x0,120 m.

Tab. 8-4: Doporučené rozměry výpočetní sítě [39]

Výpočetní síť	Počet výpočetních buněk v dané síti [ks]	Velikost jedné buňky [m]
Hrubá	16 000	0,484x0,477x0,520
Středně hrubá	288 000	0,194x0,199x0,200
Jemná	1 228 800	0,120x0,119x0,120

Rozměry výpočetních buněk pro jednotlivé sítě byly upraveny a byla provedena citlivostní analýza. Tab. 8-5 znázorňuje velikosti výpočetních buněk, počet buněk a pro představu i přibližný výpočetní čas na notebooku se čtyřjádrovým procesorem Intel® Core™ i7 s rychlostí 1,80 GHz. Velmi hrubá výpočetní síť s velikostí jedné výpočetní buňky 1,0x1,0x1,0 m byla použita pro ověření funkčnosti modelu.

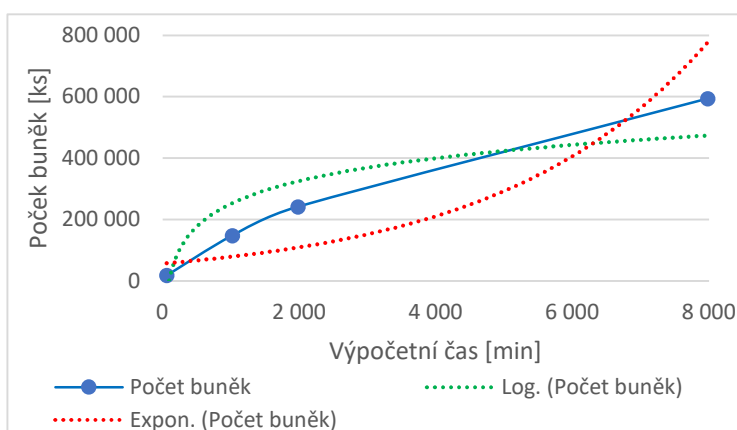


Graf (viz Obr. 8-6) znázorňuje závislost počtu buněk na výpočetním čase. Do grafu není zanesen bod pro velmi hrubou výpočetní síť, neboť ve výpočetním čase pro velmi hrubou síť nedošlo k výpočtu celé simulace. U zkušební výpočetní sítě došlo po zhruba 1565 sekundách simulace požáru k nedostatku kyslíku a numerické nestabilitě modelu, kvůli které se v tomto čase výpočet zastavil.

Na grafu jsou pro představu znázorněny grafy pro exponenciální a logaritmický růst. Graf závislosti počtu buněk na výpočetním čase ukazuje, že pro jemnější výpočetní síť (tedy menší buňky a jejich větší počet) se bude výpočetní čas výrazně prodlužovat.

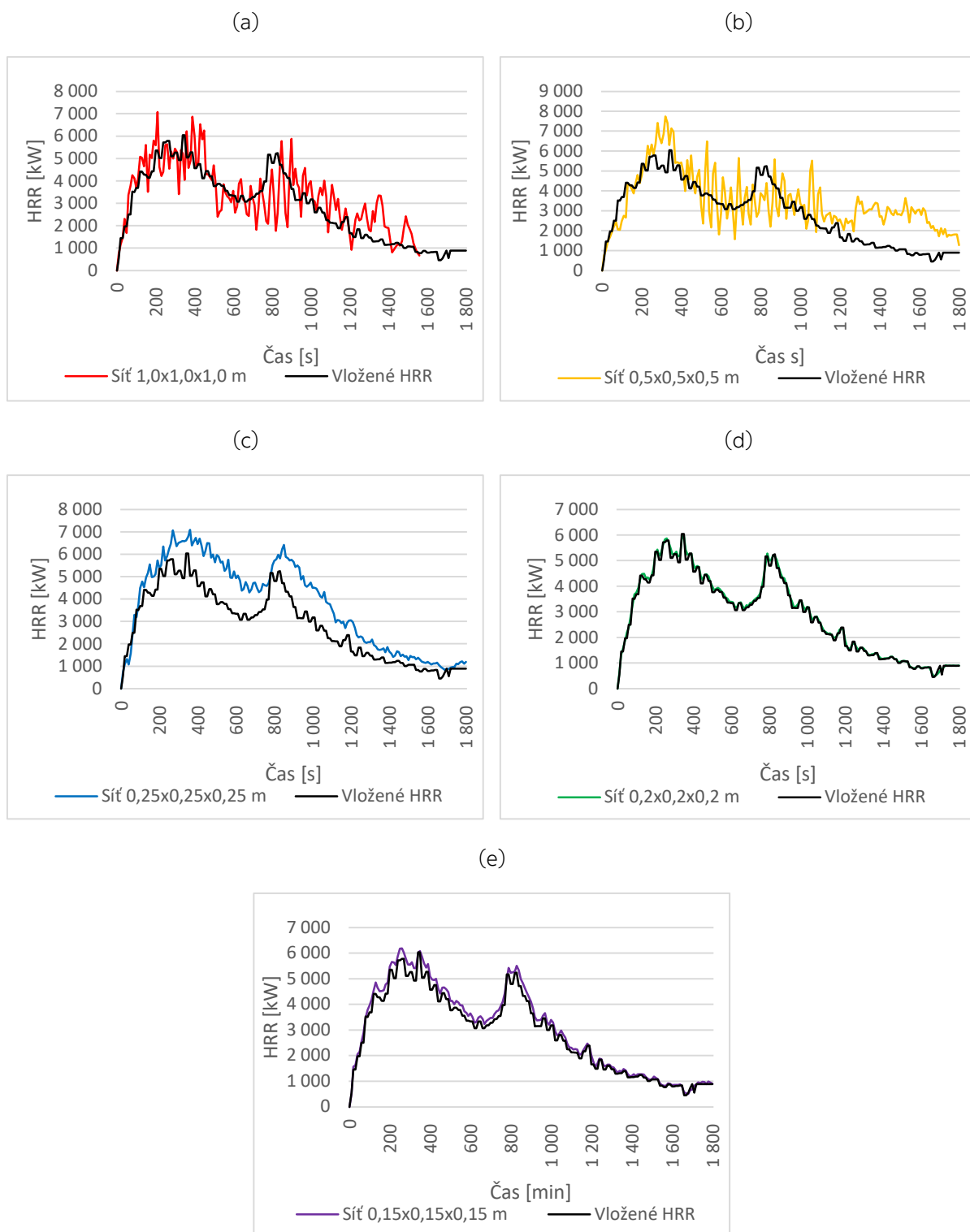
Tab. 8-5: Rozměry výpočetní sítě pro citlivostní analýzu

Výpočetní síť	Počet buněk [ks]	Velikost jedné buňky [m]	Výpočetní čas
Velmi hrubá	2 400	1,000x1,000x1,000	cca 10 minut (výpočet se v tomto čase zastavil, viz výše)
Hrubá	18 252	0,500x0,500x0,500	cca 1 hodina
Středně hrubá	131 285	0,250x0,250x0,250	cca 17 hodin
Středně jemná	260 736	0,200x0,200x0,200	cca 33 hodin
Jemná	594 432	0,150x0,150x0,150	cca 133 hodin



Obr. 8-6: Závislost počtu buněk na výpočetním čase

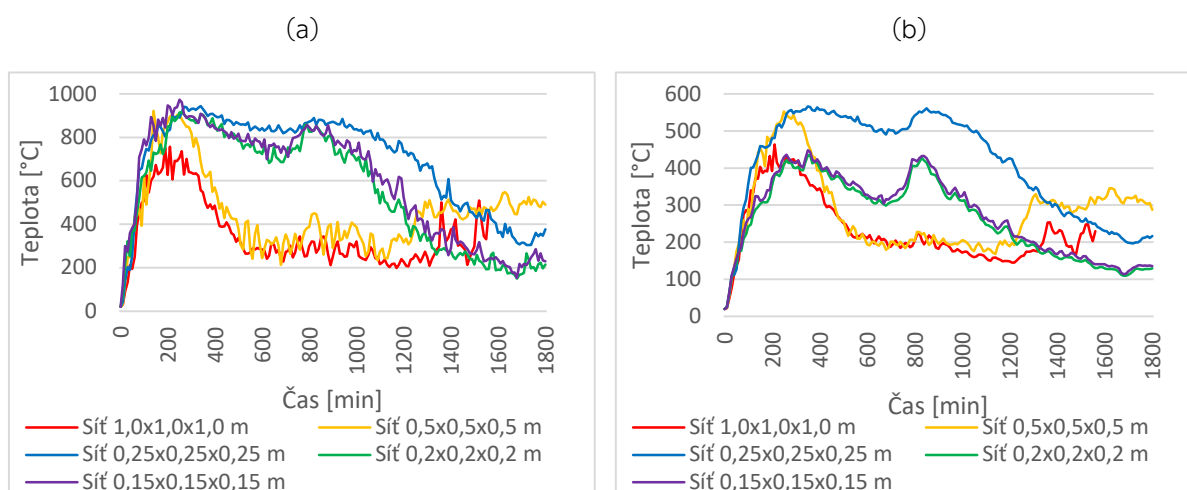
Obr. 8-7 porovnává výsledné HRR modelů s HRR, které bylo do modelu vloženo (černá čára). Z Obr. 8-7 d) a e) je patrné, že pro výpočetní síť 0,2x0,2x0,2 m a 0,15x0,15x0,15 m je výsledné HRR z modelu totožné s HRR, které bylo do modelu vloženo. U výpočetní sítě 0,25x0,25x0,25 m bylo výsledné HRR podstatně vyšší než HRR, které bylo do modelu vloženo. U výpočetních sítí 1,0x1,0x1,0 m a 0,5x0,5x0,5 m došlo vlivem velkých buněk k velké fluktuaci hodnot HRR kolem hodnot vloženého HRR.



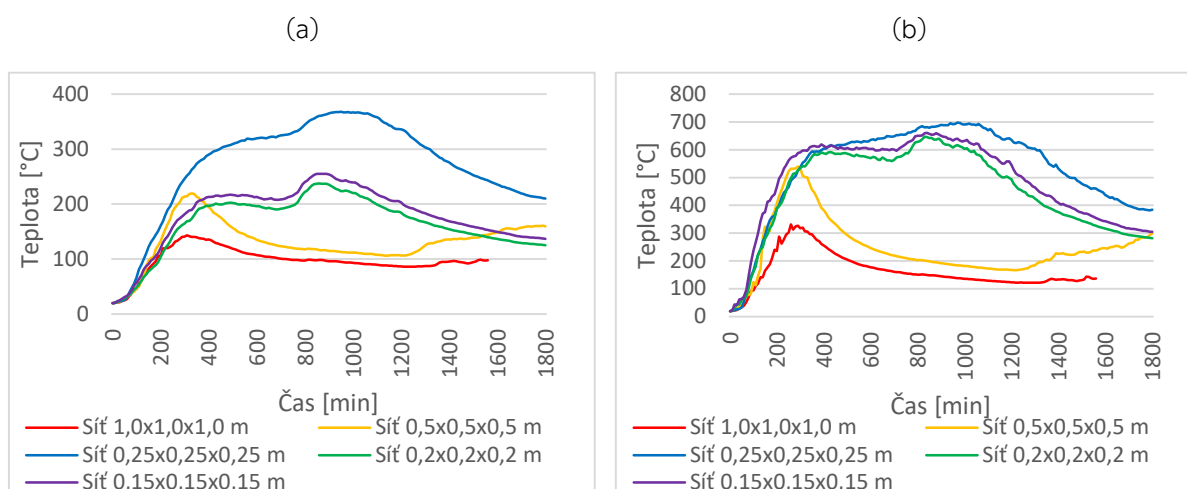
Obr. 8-7: Porovnání výsledného HRR s vloženým HRR: (a) pro síť 1,0x1,0x1,0 m, (b) pro síť 0,5x0,5x0,5 m, (c) pro síť 0,25x0,25x0,25 m, (d) pro síť 0,2x0,2x0,2 m, (e) pro síť 0,15x0,15x0,15 m



Průběhy teplot (viz Obr. 8-8) jsou pro výpočetní sítě 1,0 m a 0,5 m obdobné jak pro průměrnou hodnotu teploty, tak pro maximální hodnotu teploty. U výpočetní sítě 0,25 m a 0,20 m má průběh teplot obdobnou tendenci, avšak hodnoty jsou pro výpočetní síť 0,25 m násobně vyšší. K tomu dochází především u průběhu průměrné teploty, které byly stanoveny jako průměr teplot všech termočlánků (viz Obr. 8-8 a), u maximální teploty (viz Obr. 8-8 b) nejsou rozdíly v hodnotách až tak velké. Tento jev může být dán pozicí termočlánků vzhledem k výpočetní síti, kdy u výpočetní sítě 0,2 m jsou termočlánky umístěny na hranách výpočetních buněk, u výpočetní sítě 0,25 m jsou termočlánky umístěny v prostoru výpočetních buněk. Zároveň jsou teploty vyšší, jelikož výsledné HRR bylo v porovnání s vloženým HRR podstatně vyšší (viz Obr. 8-7). Pro výpočetní síť 0,15 m a 0,2 m jsou průběhy maximálních a průměrných teplot téměř totožné. Stejně tak je to i u průběhu povrchových teplot (viz Obr. 8-9).



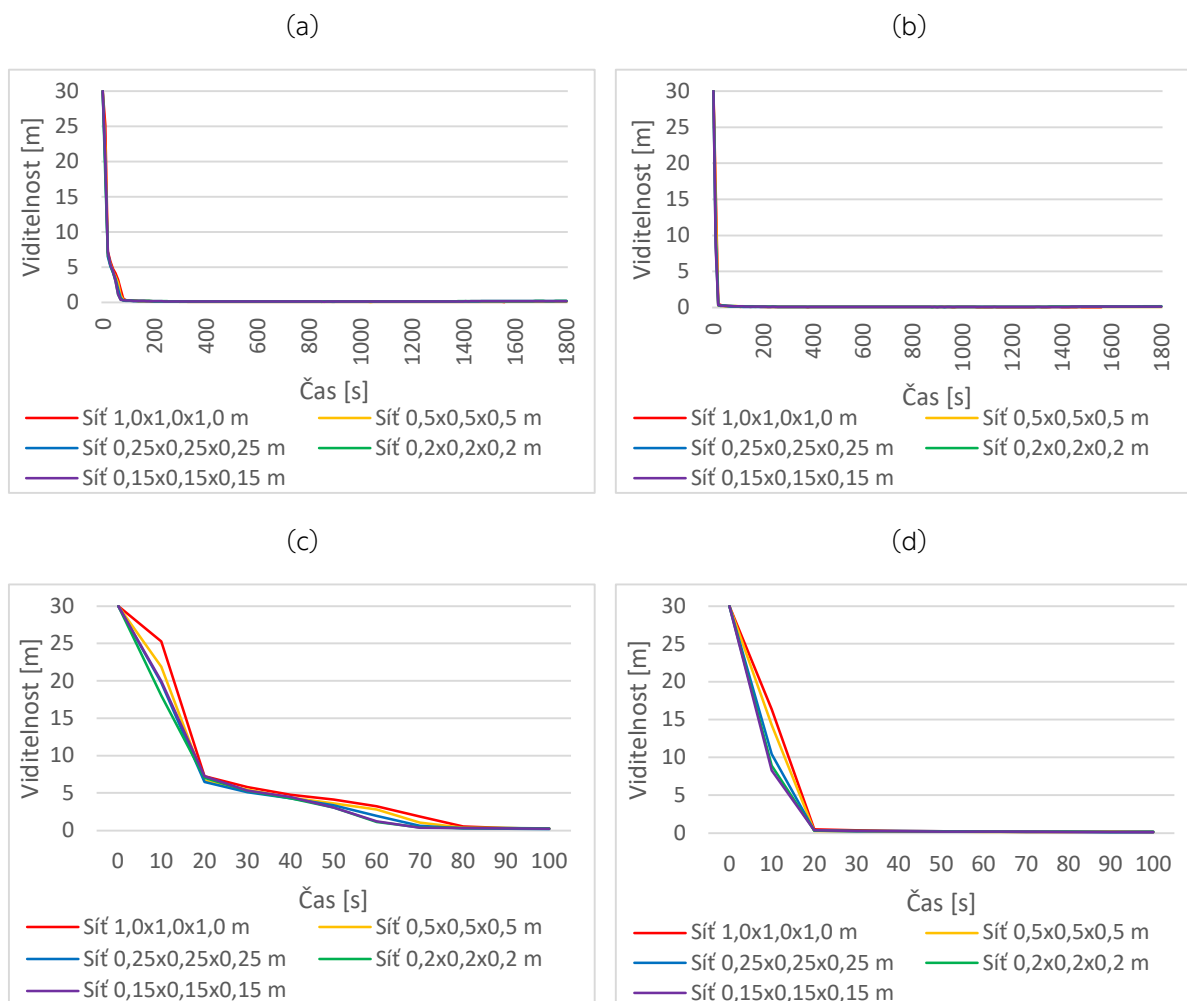
Obr. 8-8: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota plynu, (b) maximální teplota plynu



Obr. 8-9: Porovnání povrchových teplot: (a) průměrná teplota plynu, (b) maximální teplota plynu

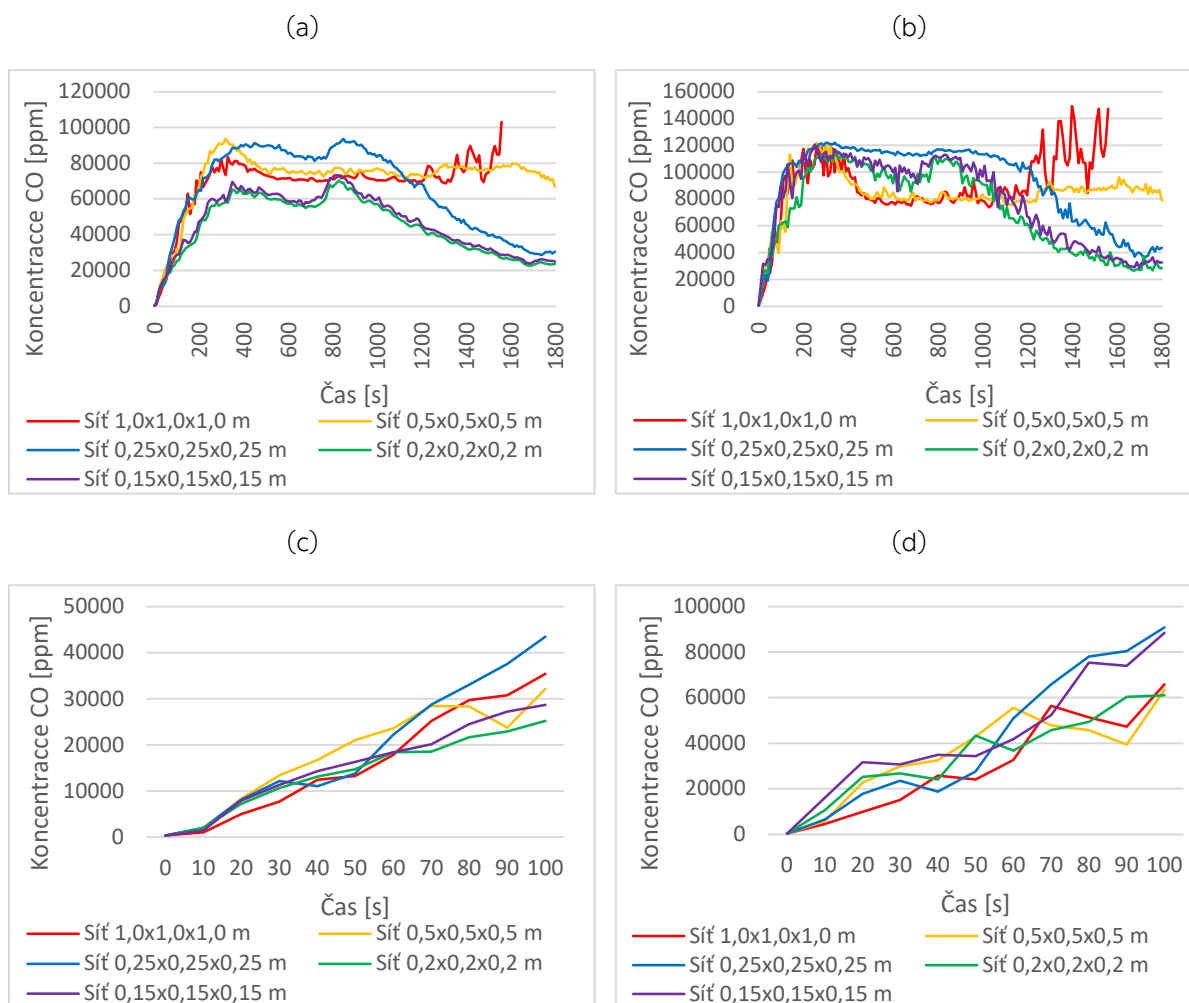


Výsledky viditelnosti jsou zobrazeny na grafech pro celý výpočetní čas (viz Obr. 8-10 a, b) a také pro prvních 100 sekund simulace (viz Obr. 8-10 c, d), jelikož v tomto čase dochází k výrazným změnám, které nejsou v grafech zobrazující viditelnost po celou dobu simulace patrné. Grafy, zobrazující výsledky v prvních 100 sekundách simulace ukazují, že pro průměrnou i minimální viditelnost (viz Obr. 8-10 c, d) vychází nejvyšší hodnoty pro výpočetní síť 1,0 m, pro ostatní výpočetní sítě jsou výsledky téměř stejné.



Obr. 8-10: Porovnání viditelností: (a) průměrná viditelnost po celou dobu simulace, (b) minimální viditelnost po celou dobu simulace, (c) průměrná viditelnost v prvních 100 sekundách simulace, (d) minimální viditelnost v prvních 100 sekundách simulace

Výsledky koncentrace CO jsou zobrazeny na grafech stejně jako grafy viditelnosti, pro celý výpočetní čas (viz Obr. 8-11 a, b) a také pro prvních 100 sekund simulace (viz Obr. 8-11 c, d). Grafy, zobrazující výsledky ukazují, že pro průměrnou i maximální koncentraci (viz Obr. 8-10 a, b) vychází nejvyšší hodnoty pro výpočetní síť 1,0 m, pro výpočetní síť 0,2 m a 0,15 m jsou výsledky téměř stejné.



Obr. 8-11: Porovnání koncentrací CO: (a) průměrná koncentrace, (b) maximální koncentrace, (c) průměrná koncentrace v prvních 100 sekundách simulace, (d) maximální koncentrace v prvních 100 sekundách simulace

Výsledky simulace u velikosti výpočetní sítě 0,2x0,2x0,2 m a 0,15x0,15x0,15 m jsou téměř stejné a zároveň jsou výsledky ustálené a nedochází u jejich průběhů k fluktuaci jako tomu bylo u hrubších výpočetních sítí (viz Obr. 8-7, Obr. 8-8, Obr. 8-9, Obr. 8-10 a Obr. 8-11). Vzhledem k tomu, že jemnější výpočetní síť je mnohem náročnější na výpočetní čas, byla zvolena výpočetní síť s 260 736 buňkami a s velikostí buňky 0,2x0,2x0,2 m. Zároveň u této výpočetní sítě odpovídalo vložené HRR s výsledným HRR z modelu.



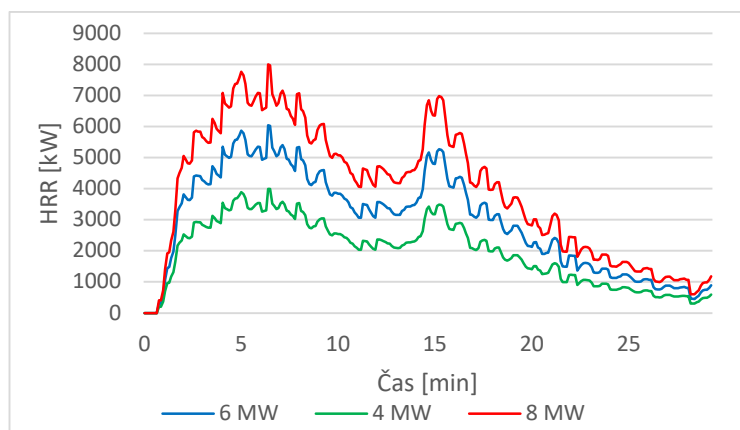
8.7 Popis modelových situací

8.7.1 Scénář č. 1: Vliv výkonu požáru na teploty v prostoru hromadné garáže

Návrh normy ČSN 73 0838 – Garáže doporučuje při návrhu ZOKT počítat s návrhovým požárem jednoho hořícího vozidla bez rozlišení pohonného systému a předpokládá se uvolnění tepelného výkonu sdíleného prouděním v ustáleném stavu, a to $Q_1 = 4$ MW při součinnosti SHZ a ZOKT nebo $Q_1 = 8$ MW v ostatních případech. Prvním scénářem pro modelování požáru je zjišťování vlivu výkonu požáru. V kapitole 8.6 byl uvažován požár elektrovozidla s maximální HRR 6 MW. Na základě předchozího odstavce výše je uvažováno s následujícími scénáři:

- požár EV s průběhem dle Obr. 8-12 s maximálním výkonem 4 MW;
- požár EV s průběhem dle Obr. 8-5 s maximálním výkonem 6 MW;
- požár EV s průběhem dle Obr. 8-12 s maximálním výkonem 8 MW.

Je sledováno, jak moc se výsledky z modelů změní, když se výkon zvýší nebo naopak sníží o 2 MW (tedy o jednu třetinu). Obr. 8-12 znázorňuje průběhy požáru pro jednotlivé výkony. Průběh požáru je zachován dle Obr. 8-5 b, původní hodnoty jsou násobeny koeficienty: 2/3 pro výkon 4 MW a 4/3 pro výkon 8 MW.



Obr. 8-12: Průběh HRR pro jednotlivé výkony požáru

8.7.2 Scénář č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru

Dalším scénářem pro modelování požáru je zjišťování vlivu vzdálenosti mezi vozidly na rozšíření požáru z jednoho vozidla na druhé. Metodické doporučení HZS k elektromobilitě [28] doporučuje šířku parkovacího stání 3,5 m. Dle normy na navrhování rozměrů parkovacích stání ČSN 73 6056 [29] je minimální základní šířka parkovacího stání 2,50 m, přičemž se uvažuje se základní šířkou osobního vozidla bez



zrcátek 1,75 m. [29] Tato norma byla vydána v roce 2011, avšak od té doby se vozidla zvětšují. Předcházející norma, která byla vydána v roce 1988, uvažovala ještě s menší základní šířkou parkovacího stání a to 2,25 m pro osobní vozidla při kolmém stání. Tato norma byla zrušena a nahrazena navazující normou vydanou v roce 2011, ve které se již uvažuje se základní šířkou parkovacího stání 2,5 m viz výše. Se stále častějšími modely SUV je základní šířka osobního vozidla dle normy malá.

Pokud bychom se například podívali na rozměry vozidel od automobilky Škoda auto [40], nejmenší model, který v dnešní době prodává je model Fabia 4. generace s šířkou 1,78 m. Takový SUV model Kodiaq je široký 1,882 m, přičemž představuje největší vozidlo Škoda, co se týče šířky. Tab. 8-6 uvádí šířky modelů vozidel od Škoda auto [40] přičemž průměrná šířka modelů je 1,83 m. Úvaha vozidel od automobilky Škoda nemá představovat reklamu. Jedná se pouze o referenční vzorek a vybranou automobilku na základě toho, že se jedná o původně českého výrobce vozidel s tradicí a zároveň se jedná o nejrozšířenější vozidla u nás.

Tab. 8-6: Porovnání šířek vozidel [40]

Model vozidla	Šířka vozidla (bez zrcátek/se zrcátky)
Fabia	1780/1954
Scala	1793/1988
Kamiq	1793/1988
Octavia	1829/2003
Karoq	1841/2025
Kodiaq	1882/2087
Superb	1864/2031
Enyaq	1879/2148

Pokud bychom uvažovali základní šířku parkovacího stání a základní šířku osobního vozidla dle ČSN 73 6056, vzdálenost vozidel by při parkování byla 75 cm. Při uvažování průměrné šířky vozidel škoda 1,83 m by vzdálenost takových vozidel při minimální šířce parkovacího stání 2,5 m byla cca 65 cm. Pokud bychom však uvažovali největší vozidlo SUV vzdálenost vozidel by byla cca 60 cm. Tyto vzdálenosti jsou uvažovány s předpokladem, že vozidla budou stát na středu parkovacího místa, případně každé na kraji parkovacího stání. V případě, že by jedno vozidlo stálo na středu parkovacího stání a druhé vozidlo na kraji parkovacího stání, by vzdálenost mezi vozidly byla jen 37,5 cm.

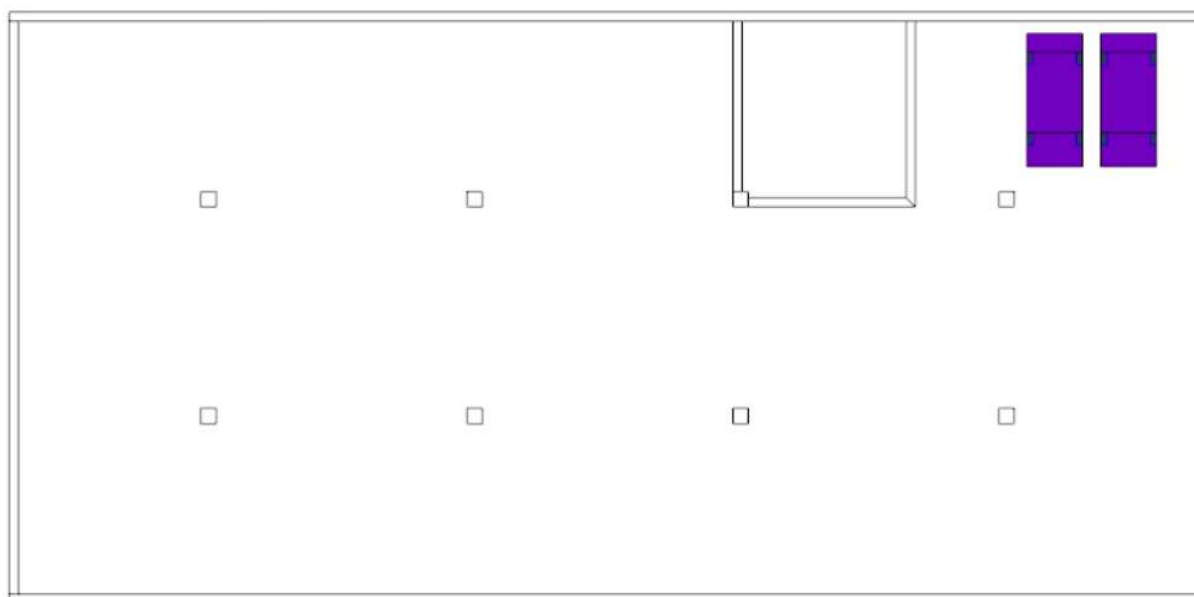


Na základě předchozího a odstavce výše je uvažováno se scénáři:

- požár EV s průběhem dle Obr. 8-5 při vzdálenosti vozidel 40 cm;
- požár EV s průběhem dle Obr. 8-5 při vzdálenosti vozidel 60 cm;
- požár EV s průběhem dle Obr. 8-5 při vzdálenosti vozidel 80 cm.

Při simulaci je sledováno, při jaké vzdálenosti už nedojde k rozšíření požáru na další vozidlo.

V prostoru hromadné garáže dle Obr. 8-3 je vedle původního jednoho vozidla umístěno další vozidlo se stejnými vlastnosti dle Obr. 8-13. Přeskok požáru z jednoho vozidla na druhé byl simulován pomocí teploty vznícení pneumatiky vozidla, kdy byly na pneumatiky na vozidle směrem k prvnímu vozidlu umístěny termočlánky pro snímání teploty. V modelu bylo nastaveno ovládání podlahy druhého vozidla, kdy při dosažení teploty vznícení pneumatiky 440 °C [41] došlo ke vzniku požáru i v druhém vozidle, tedy u druhého vozidla začal požár podle HRR dle Obr. 8-5.



Obr. 8-13: Umístění druhého vozidla v prostoru garáže

8.7.3 Scénář č. 3: Vliv vstupní křivky požáru (EV, ICEV)

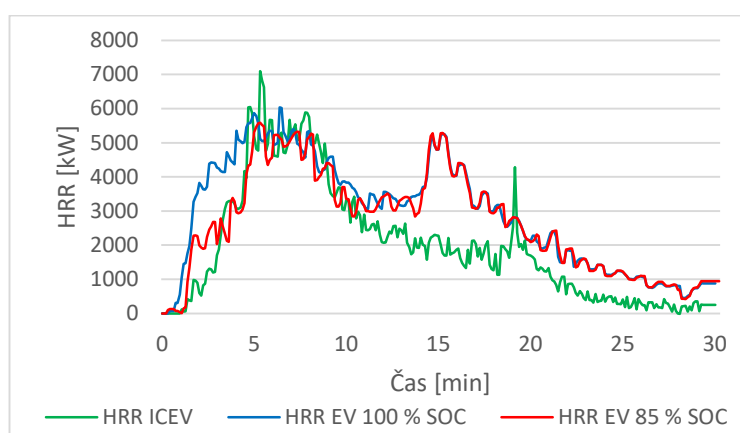
Návrh normy ČSN 73 0838 – Garáže uvažuje s navrhováním garáží pro vozidla se všemi druhy provozu, z toho důvodu je dalším scénářem pro modelování požáru zjišťován vliv druhu vozidla. Z hlediska dostupnosti dat získaných z velkorozměrových požárních zkoušek [24] je uvažováno s požáry EV se 100 % SOC, EV s 85 % SOC a s požárem ICEV.



Na základě předchozího odstavce výše je uvažováno s následujícími scénáři:

- požár EV se 100 % SOC s průběhem dle Obr. 8-14;
- požár EV s 85 % SOC s průběhem dle Obr. 8-14;
- požár ICEV s průběhem dle Obr. 8-14.

Pro požáry vozidel byly použity křivky HRR EV se 100 % SOC vyrobeného v roce 2014 s maximální hodnotou HRR 6,0 MW, EV s 85 % vyrobeného v roce 2013 s maximální hodnotou HRR 5,9 MW a ICEV vyrobeného v roce 2015 s maximální hodnotou HRR 7,1 MW z velkorozměrových zkoušek z roku 2015 (viz Obr. 8-14). [24]



Obr. 8-14: Průběh HRR pro jednotlivé typy vozidel [22]

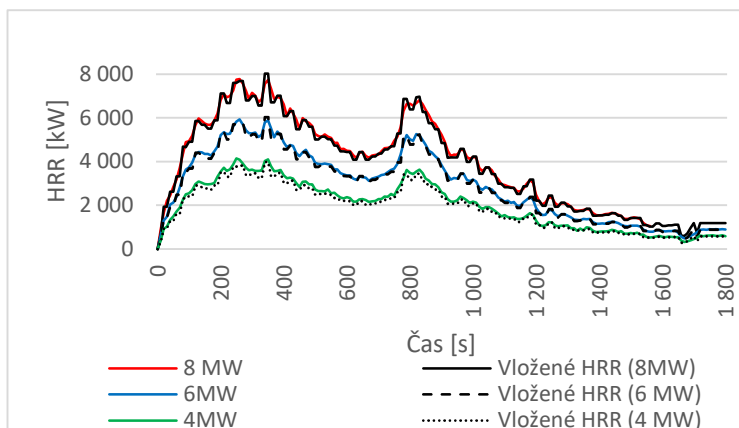
8.8 Výsledky modelových situací

V následujících kapitolách jsou shrnuty výsledky ze simulací pro jednotlivé scénáře. Výsledky jsou zobrazeny na grafech z termočlánků a snímačů koncentrace CO a viditelnosti. Na grafech viditelnosti a koncentrace CO jsou zároveň zobrazeny limitní hodnoty pro bezpečnou evakuaci osob. Za limitní hodnoty se považují: [42]

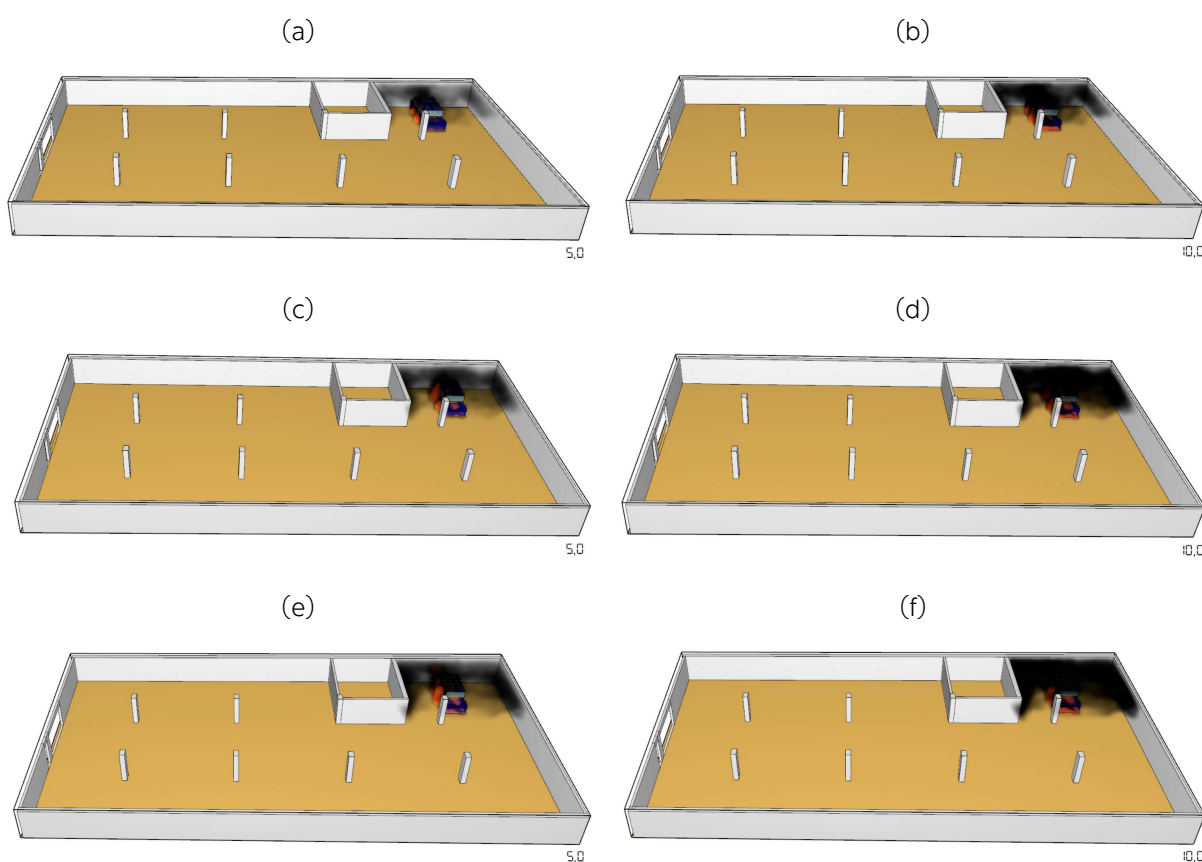
- snížení viditelnosti pod 10 m [42] – měřeno ve výšce 2,0 m nad podlahou;
- překročení teploty nad 65 °C [42] – měřeno ve výšce 2,0 m nad podlahou;
- zvýšení koncentrace oxidu uhelnatého (CO) nad hodnotu 2000 ppm (parts per milion = částí z milionu) [42] – měřeno ve výšce 2,0 m nad podlahou.

8.8.1 Scénář č. 1: Vliv výkonu požáru na teploty v prostoru hromadné garáže

Obr 8-15 porovnává HRR, které bylo vloženo do modelu, s výsledným HRR. Z grafů je patrné, že HRR jsou shodné. Obr. 8-16 zobrazuje referenční obrázky z průběhu simulace pro jednotlivé maximální výkony požáru.



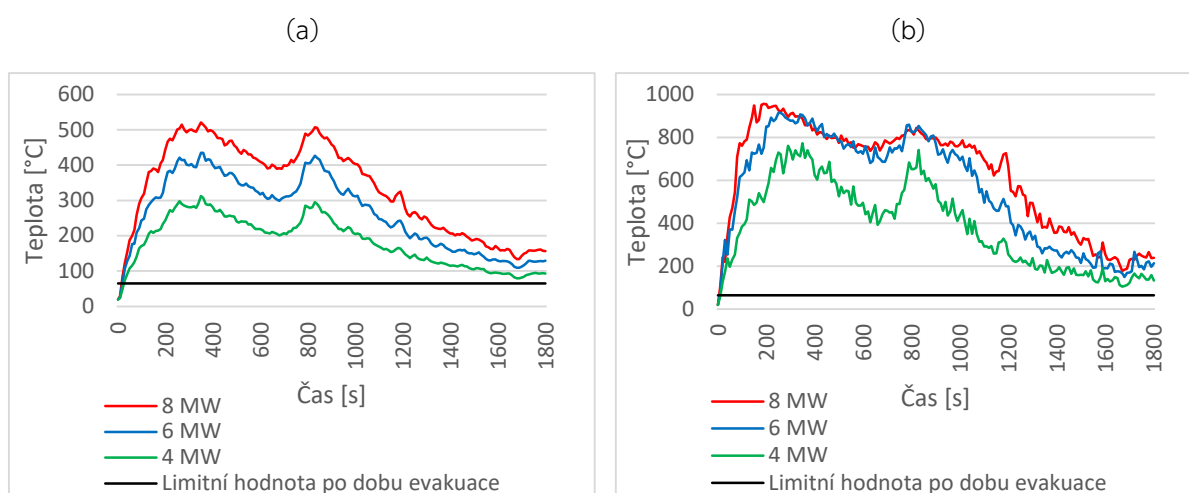
Obr. 8-15: Porovnání výsledného HRR s vloženým HRR pro jednotlivé maximální výkony



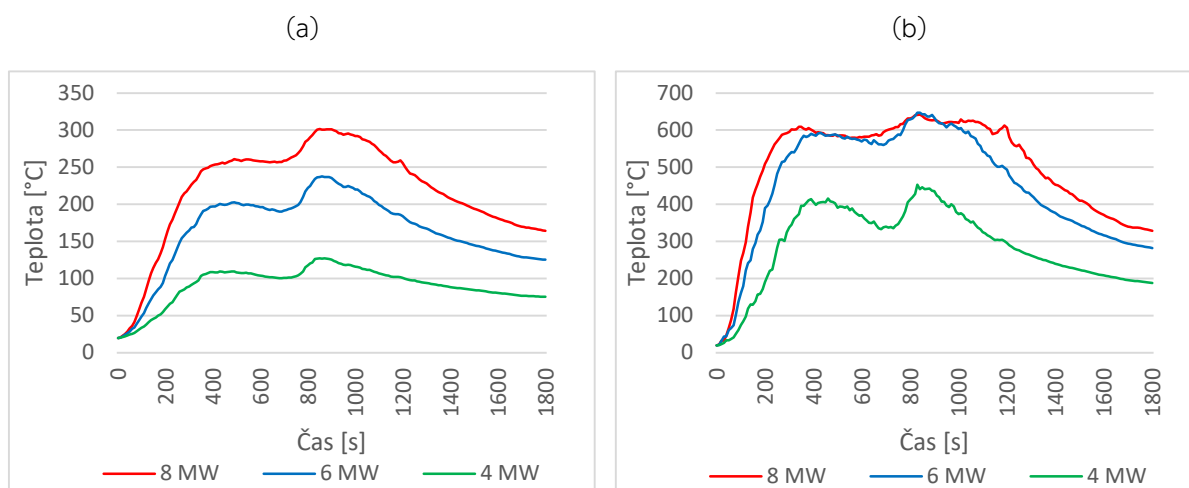
Obr. 8-16: Referenční obrázek průběhu simulace: (a) pro maximální výkon požáru 4 MW v čase 5 sekund, (b) pro maximální výkon požáru 4 MW v čase 10 sekund, (c) pro maximální výkon požáru 6 MW v čase 5 sekund, (d) pro maximální výkon požáru 6 MW v čase 10 sekund, (e) pro maximální výkon požáru 8 MW v čase 5 sekund, (f) pro maximální výkon požáru 8 MW v čase 10 sekund



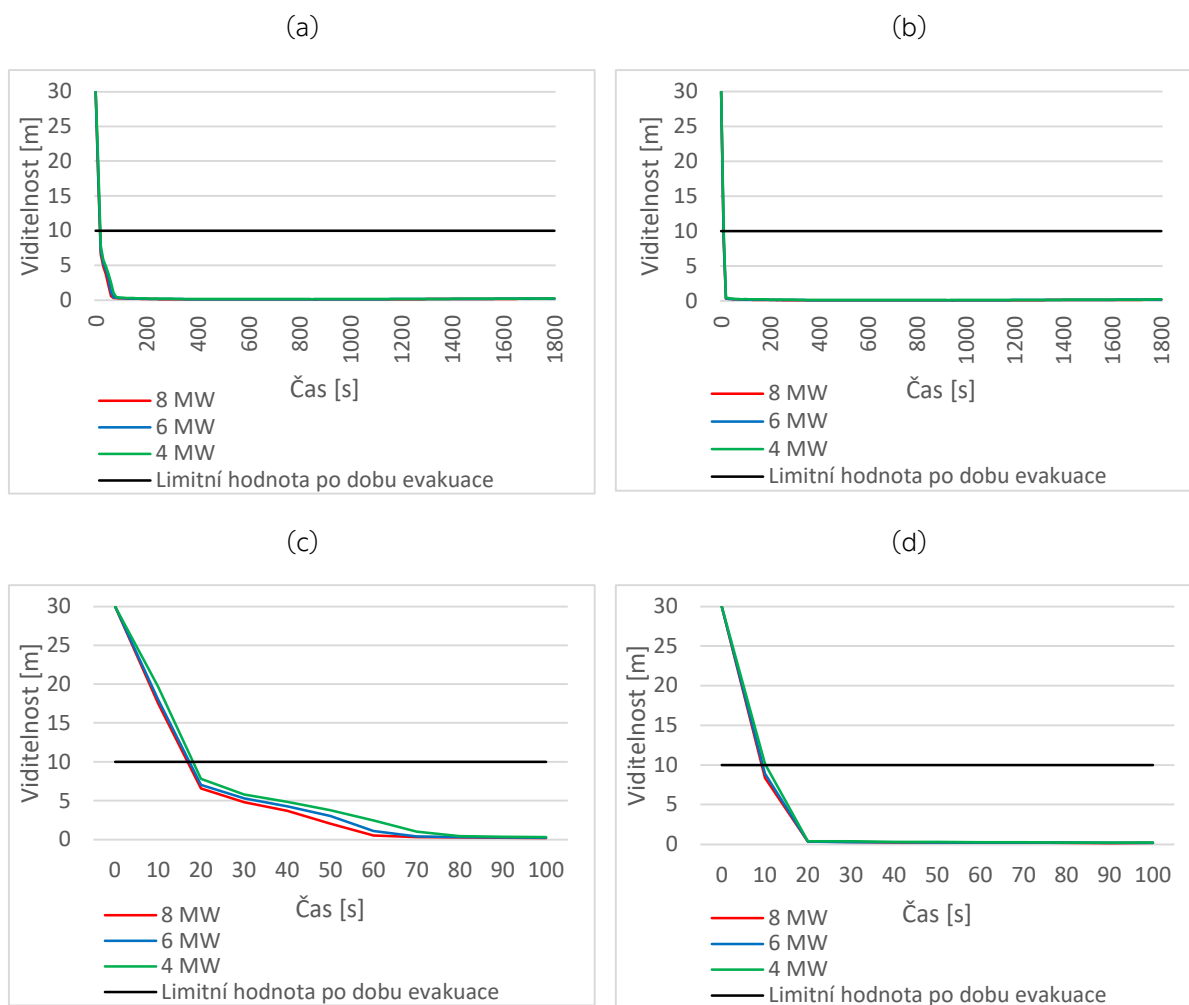
Obr. 8-17 zobrazuje průběhy průměrných (Obr. 8-17 a) a maximálních (Obr. 8-17 b) teplot plynu všech čidel v prostoru hromadné garáže. Obr. 8-18 zobrazuje průběhy průměrných (Obr. 8-18 a) a maximálních (Obr. 8-18 b) teplot povrchu všech čidel v prostoru hromadné garáže. Obr. 8-19 zobrazuje průběhy průměrných (Obr. 8-19 a) a minimálních (Obr. 8-19 b) viditelností všech čidel v prostoru hromadné garáže. Obr. 8-20 zobrazuje průběhy průměrných (Obr. 8-20 a) a maximálních (Obr. 8-20 b) koncentrací CO všech čidel v prostoru hromadné garáže. Zhodnocení jednotlivých výsledků simulace se scénářem č. 1: Vliv výkonu požáru je zobrazen v Tab. 8-7, hodnoty pro maximální výkony 4 MW a 8 MW jsou porovnány s maximálním výkonem 6 MW.



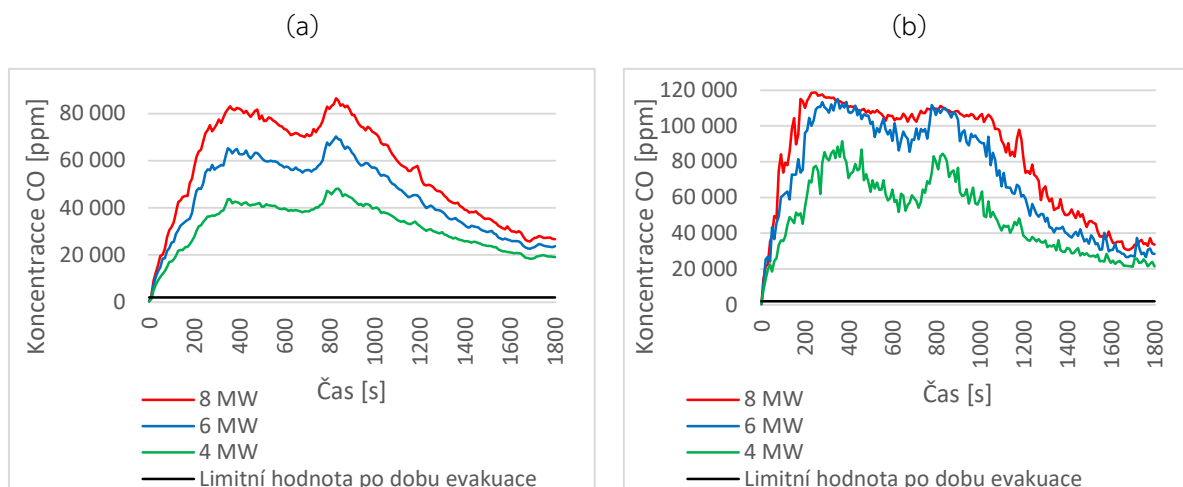
Obr. 8-17: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota plynu, (b) maximální teplota plynu

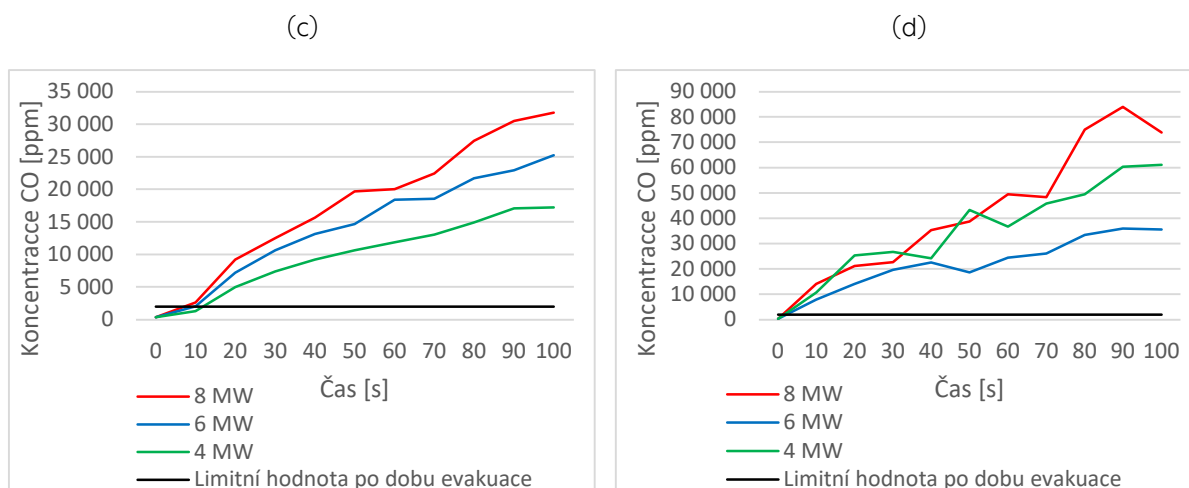


Obr. 8-18: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota povrchu, (b) maximální teplota povrchu



Obr. 8-19: Porovnání viditelností: (a) průměrná viditelnost po celou dobu simulace, (b) minimální viditelnost po celou dobu simulace, (c) průměrná viditelnost v prvních 100 sekundách simulace, (d) minimální viditelnost v prvních 100 sekundách simulace





Obr. 8-20: Porovnání koncentrací CO: (a) průměrná koncentrace, (b) maximální koncentrace, (c) průměrná koncentrace v prvních 100 sekundách simulace, (d) maximální koncentrace v prvních 100 sekundách simulace

Z Obr. 8-19 a) a b) vyplývá, že viditelnost v prostoru garáže klesá pro všechny výkony se zhruba stejnou tendencí. Na Obr. 8-19 c) je patrné, že průměrná viditelnost klesá nejrychleji pro výkon požáru 8 MW a nejpomaleji pro výkon požáru 4 MW. Z Obr. 8-20 a) a b) je patrné, že koncentrace CO roste nejrychleji pro maximální výkon 8 MW.

Tab. 8-7: Zhodnocení jednotlivých výsledků simulace se scénářem č. 1: Vliv výkonu požáru

Zjišťovaná veličina	Maximální výkon požáru	Max./min. hodnota	Vyhodnocení
Maximální teplota plynu	4 MW	773,30 °C	Snížení o 15,5 %
	6 MW	915,75 °C	-
	8 MW	956,92 °C	Zvýšení o 4,5 %
Maximální teplota povrchu	4 MW	452,97 °C	Snížení o 29,5 %
	6 MW	642,08 °C	-
	8 MW	646,68 °C	Zvýšení o 0,75 %
Minimální viditelnost v čase 100 s	4 MW	0,23 m	Zvýšení o 27,8 %
	6 MW	0,18 m	-
	8 MW	0,16 m	Snížení o 11,1 %
Maximální koncentrace CO	4 MW	91 527,6 ppm	Snížení o 20,5 %
	6 MW	115 216,25 ppm	-
	8 MW	118 746,01 ppm	Zvýšení o 3,05 %

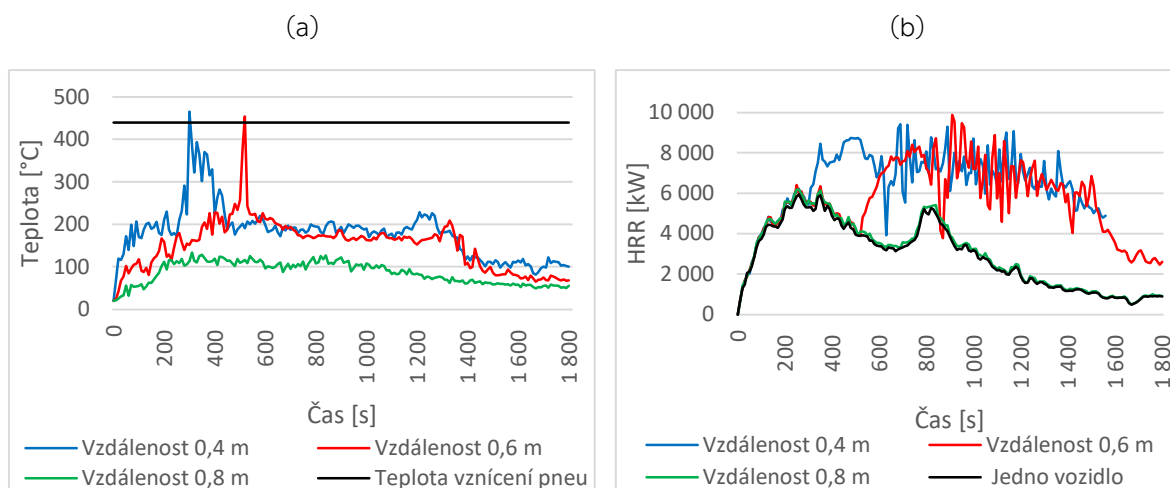


Maximální teplota plynu se při zvýšení maximálního výkonu požáru o jednu třetinu (tedy cca 33 %) zvýšila pouze o 4,5 % oproti požáru s maximálním výkonem 6 MW, při snížení maximálního výkonu požáru o jednu třetinu došlo ke snížení maximální teploty plynu o 15,5 %. Maximální teplota povrchu se při zvýšení maximálního výkonu požáru o jednu třetinu (tedy cca 33 %) zvýšila pouze o 0,75 % v porovnání s požárem o maximálním výkonem 6 MW, při snížení maximálního výkonu požáru o jednu třetinu došlo ke snížení hodnot maximální teploty plynu o 29,5 %, tedy téměř o třetinu. Minimální viditelnost v čase 100 sekund se při zvýšení maximálního výkonu požáru o jednu třetinu snížila o 11,1 % oproti požáru s maximálním výkonem 6 MW, naopak při snížení maximálního výkonu požáru o jednu třetinu se viditelnost zvýšila o 27,8 %. U maximální koncentrace CO došlo při zvýšení maximálního výkonu požáru o jednu třetinu ke zvýšení o 3,05 % oproti požáru s maximálním výkonem 6 MW, naopak při snížení maximálního výkonu požáru o jednu třetinu se koncentrace CO snížila o 20,5 %.

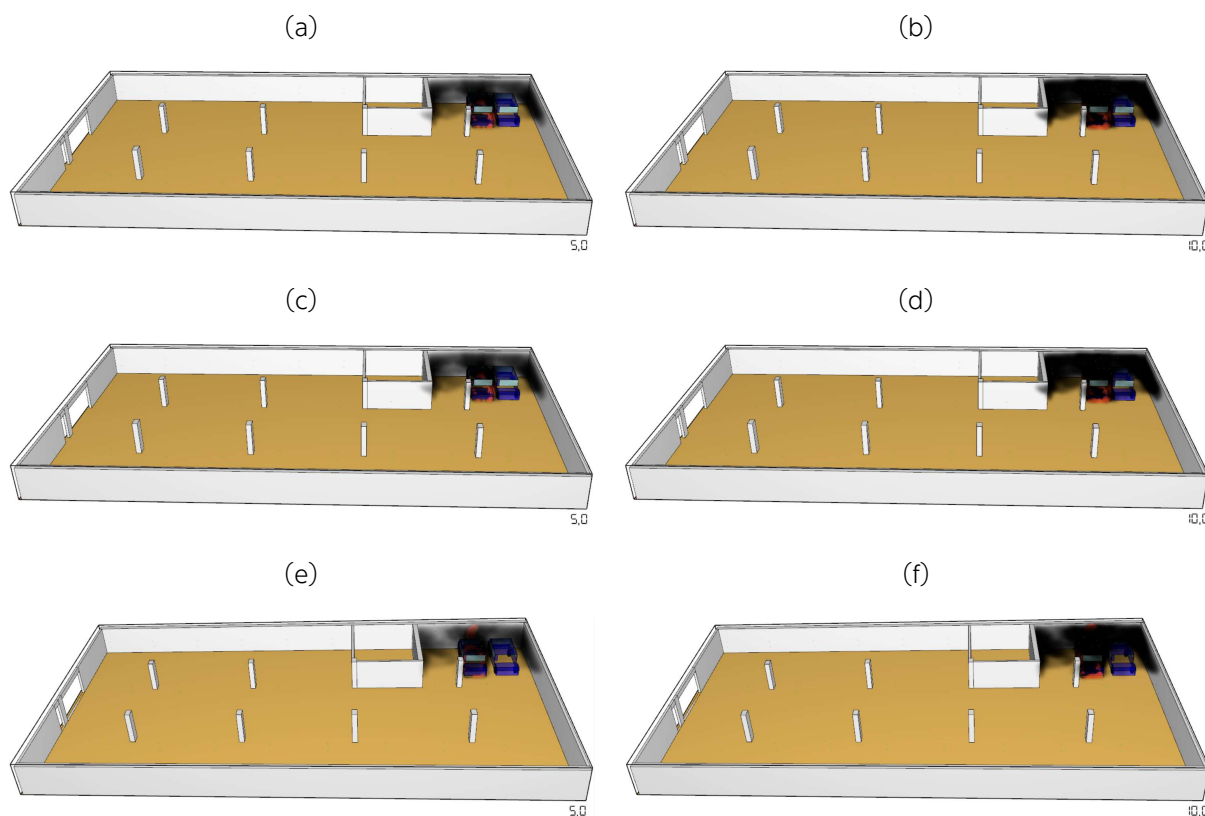
Z předchozích odstavců lze uvést závěr, že při zvýšení či naopak snížení výkonu požáru o jednu třetinu nedochází následně i ke stejnému zvýšení výsledných teplot plynů a povrchu, viditelnosti koncentrace CO.

8.8.2 Scénář č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru

Obr. 8-21 a) zobrazuje výsledné teploty na zadních pneumatikách druhého vozidla. Z výsledků získaných z modelů vyplývá, že při vzdálenosti vozidel 0,4 m došlo k rozšíření požáru na druhé vozidlo již v 300. sekundě simulace, při vzdálenosti 0,6 m došlo k rozšíření na další vozidlo po 520 sekundách simulace a při vzdálenosti 0,8 m nedošlo vzhledem ke vzdálenosti vozidla v čase simulace k rozšíření požáru na další vozidlo. Obr. 8-21 b) zobrazuje průběh HRR jednotlivých modelů. Z průběhu HRR je patrné, kdy došlo k iniciaci požáru i na druhém vozidle. U vzdálenosti 0,4 m lze pozorovat, že průběh je až do 300. sekundy shodný s průběhem HRR jednoho vozidla, poté dochází ve 300. sekundě k iniciaci požáru na druhém vozidle a HRR dále roste. Stejně tak lze toto pozorovat u průběhu HRR při vzdálenosti 0,8 m, do 520. sekundy je průběh stejný s průběhem HRR jednoho vozidla, v 520. sekundě dochází k iniciaci požáru na druhém vozidle a HRR znovu roste. Průběh HRR požáru při vzdálenosti vozidel 0,8 m je shodný s průběhem HRR jednoho vozidla po celou dobu simulace, jelikož nedochází k zapálení druhého vozidla. Obr. 8-22 zobrazuje referenční obrázky z průběhu simulace pro jednotlivé vzdálenosti vozidel.



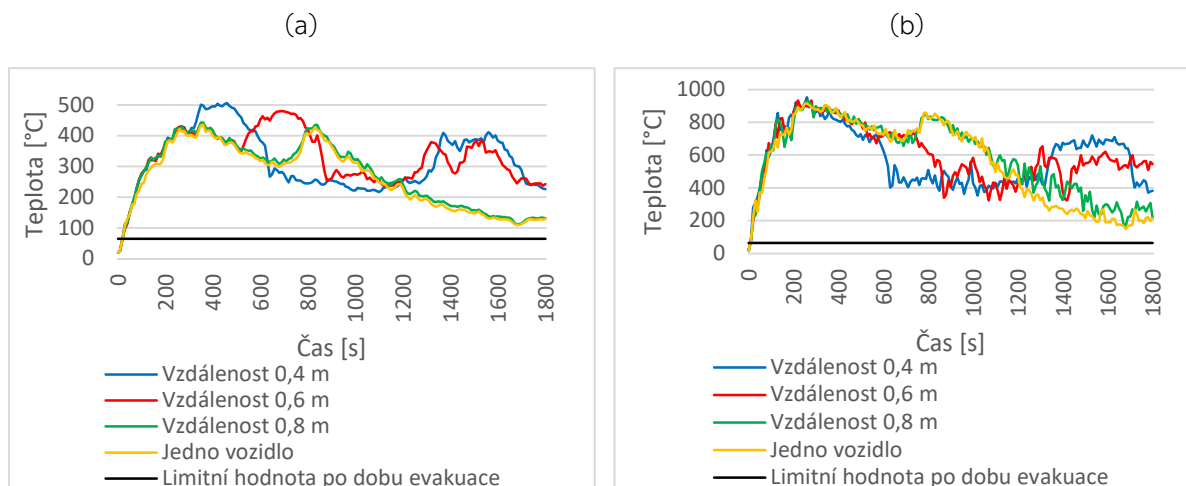
Obr. 8-21: (a) průběhy teplot na zadní pneumatice druhého vozidla pro jednotlivé vzdálenosti vozidel, (b) průběhy HRR pro jednotlivé vzdálenosti vozidel



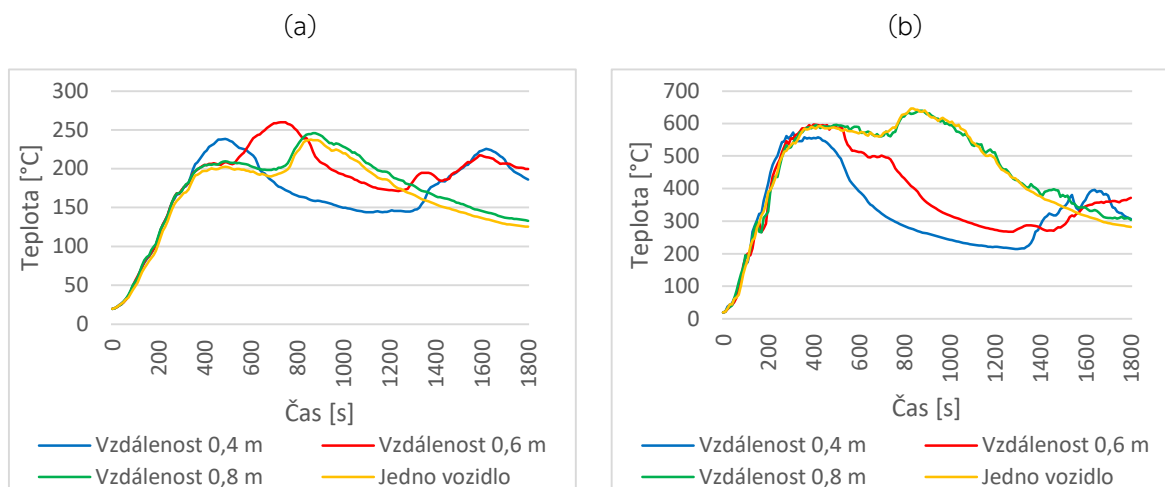
Obr. 8-22: Referenční obrázek průběhu simulace: (a) pro vzdálenost vozidel 0,4 m v čase 5 sekund, (b) pro vzdálenost vozidel 0,4 m v čase 10 sekund, (c) pro vzdálenost vozidel 0,6 m v čase 5 sekund, (d) pro vzdálenost vozidel 0,6 m v čase 10 sekund, (e) pro vzdálenost vozidel 0,8 m v čase 5 sekund, (f) pro vzdálenost vozidel 0,8 m v čase 10 sekund



Obr. 8-23 zobrazuje průběhy průměrných (Obr. 8-23 a) a maximálních (Obr. 8-23 b) teplot plynu všech čidel v prostoru hromadné garáže. Obr. 8-24 zobrazuje průběhy průměrných (Obr. 8-24 a) a maximálních (Obr. 8-24 b) teplot povrchu všech čidel v prostoru hromadné garáže.



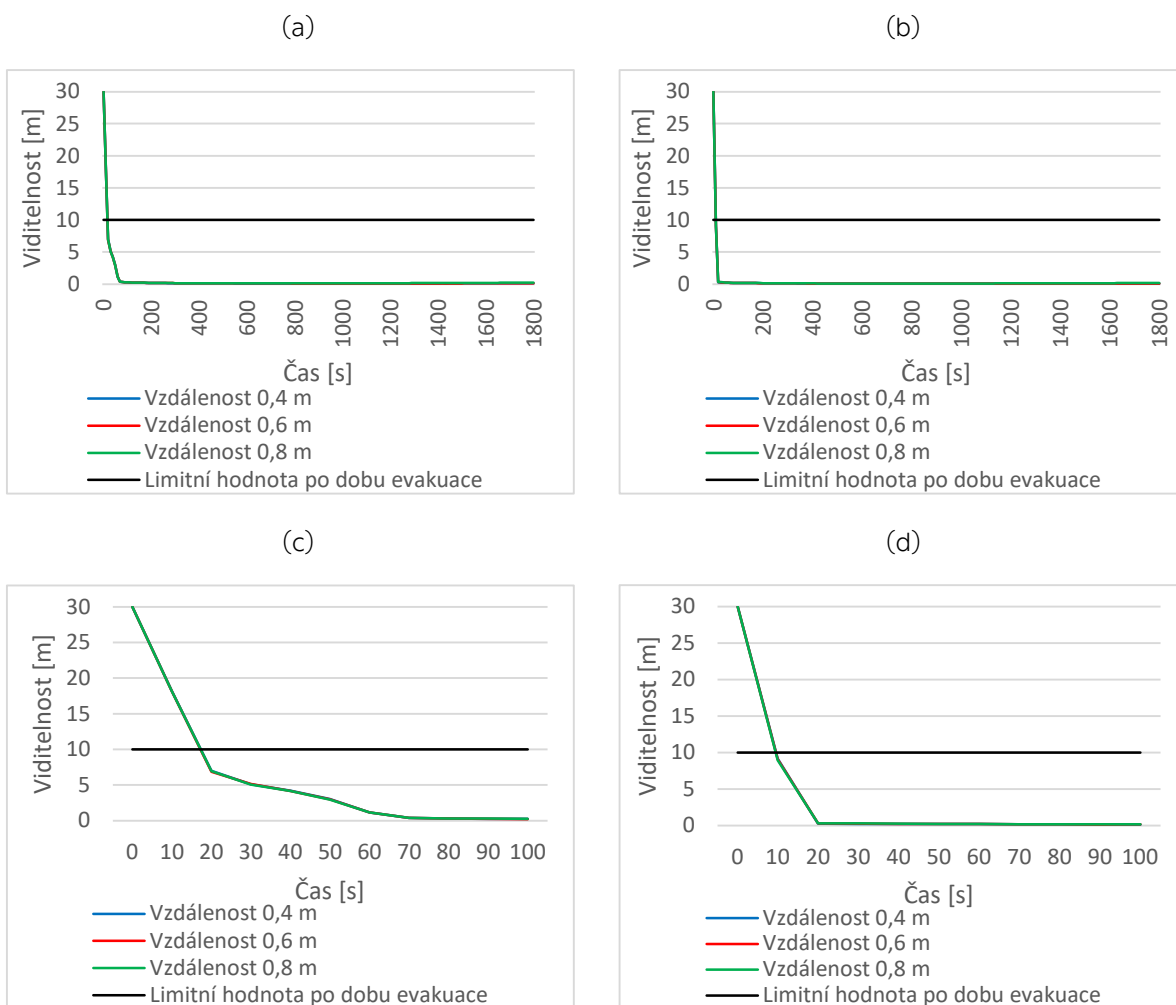
Obr. 8-23: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota plynu, (b) maximální teplota plynu



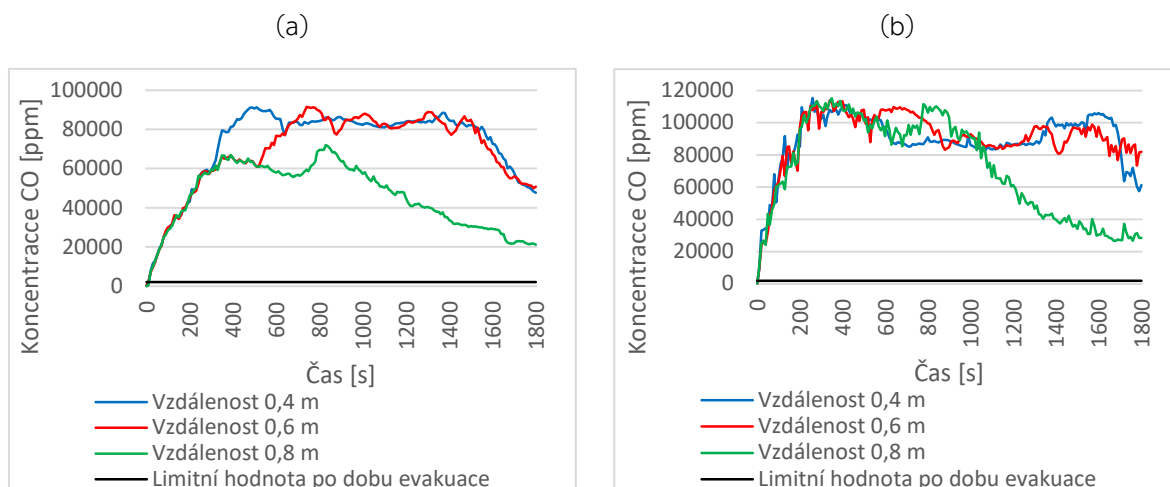
Obr. 8-24: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota povrchu, (b) maximální teplota povrchu

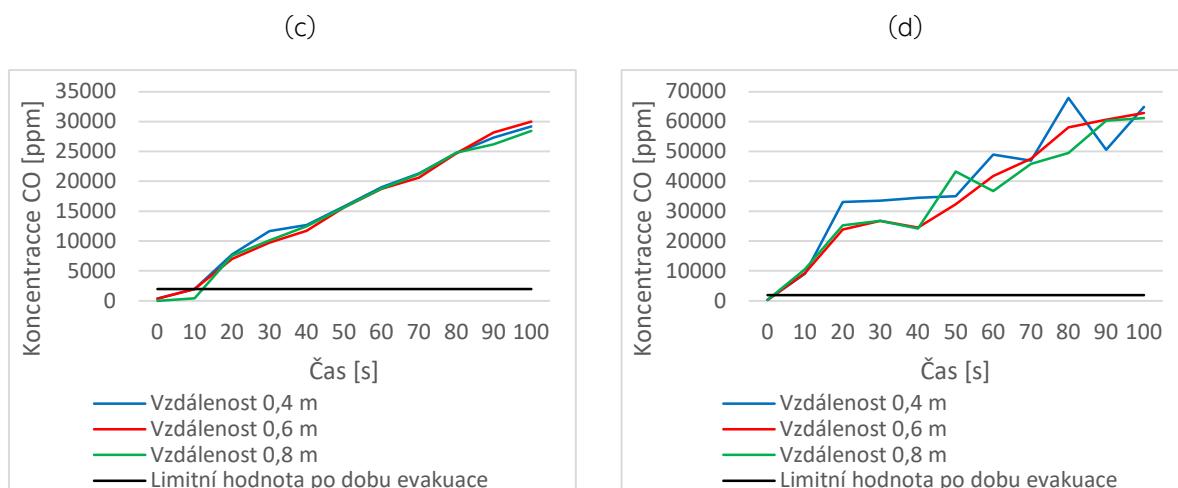
Obr. 8-25 zobrazuje průběhy průměrných (Obr. 8-25 a) a minimálních (Obr. 8-25 b) viditelností všech čidel v prostoru hromadné garáže. Obr. 8-26 zobrazuje průběhy průměrných (Obr. 8-26 a) a maximálních (Obr. 8-26 b) koncentrací CO všech čidel v prostoru hromadné garáže.

Zhodnocení jednotlivých výsledků simulace se scénářem č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru zobrazen v Tab. 8-8, hodnoty pro jednotlivé vzdálenosti jsou porovnány s hodnotami při požáru jednoho vozidla EV.



Obr. 8-25: Porovnání viditelností: (a) průměrná viditelnost po celou dobu simulace, (b) minimální viditelnost po celou dobu simulace, (c) průměrná viditelnost v prvních 100 sekundách simulace, (d) minimální viditelnost v prvních 100 sekundách simulace





Obr. 8-26: Porovnání koncentrací CO: (a) průměrná koncentrace, (b) maximální koncentrace, (c) průměrná koncentrace v prvních 100 sekundách simulace, (d) maximální koncentrace v prvních 100 sekundách simulace

Tab. 8-8: Zhodnocení jednotlivých výsledků simulace se scénářem č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru mezi jednotlivými vozidly

Zjišťovaná veličina	Maximální výkon požáru	Max./min. hodnota	Vyhodnocení
Maximální teplota plynu	Jedno vozidlo	915,75 °C	-
	Vzdálenost 0,4 m	953,48 °C	Zvýšení o 4,1 %
	Vzdálenost 0,6 m	934,66 °C	Zvýšení o 2,0 %
	Vzdálenost 0,8 m	929,61 °C	Zvýšení o 1,5 %
Maximální teplota povrchu	Jedno vozidlo	646,68 °C	-
	Vzdálenost 0,4 m	572,38 °C	Snížení o 11,5 %
	Vzdálenost 0,6 m	597,39 °C	Snížení o 7,6 %
	Vzdálenost 0,8 m	639,22 °C	Snížení o 1,2 %
Minimální viditelnost v čase 100 s	Jedno vozidlo	0,18 m	-
	Vzdálenost 0,4 m	0,15 m	Snížení o 16,7 %
	Vzdálenost 0,6 m	0,16 m	Snížení o 11,1 %
	Vzdálenost 0,8 m	0,18 m	Nemění se
Maximální koncentrace CO	Jedno vozidlo	115 216,25 ppm	-
	Vzdálenost 0,4 m	115 394,97 ppm	Zvýšení o 0,16 %
	Vzdálenost 0,6 m	113 782,84 ppm	Snížení o 1,2 %
	Vzdálenost 0,8 m	115 216,25 ppm	Nemění se

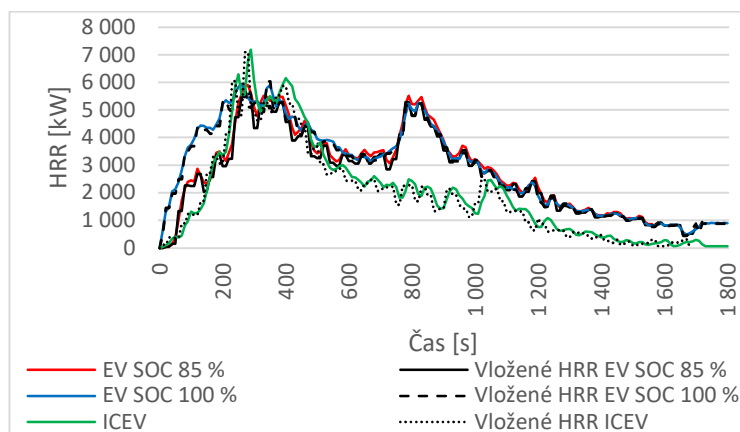


Z výše uvedených výsledků je patrné, že při vzdálenosti vozidel 0,8 m nedojde při požáru EV se 100 % SOC rozšíření požáru na druhé vozidlo. Což by odpovídalo metodickému doporučení HZS týkající se elektromobility [28], které doporučuje minimální šířku parkovacího stání pro dobíjení elektrovozidel 3,5 m. Pokud bychom uvažovali nejširší model Kodiaq automobilky Škoda s šířkou 1882 mm [40], vzdálenost vozidel by při šířce parkovacího stání dle doporučení HZS 3,5 m byla cca 810 mm, při této vzdálenosti již k přenosu požáru na druhé vozidlo nedošlo. Při vzdálenosti 0,6 m dojde k přenosu požáru z prvního vozidla na další vozidlo po 520 sekundách a při vzdálenosti 0,4 m po 300 sekundách od začátku požáru prvního vozidla.

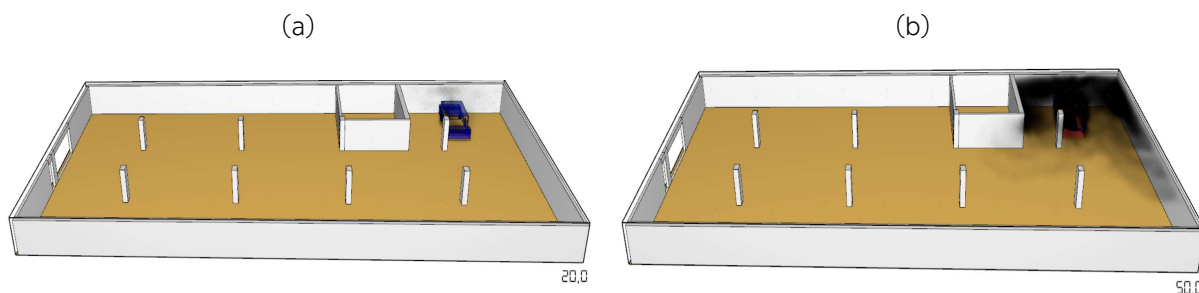
Z výsledků je také patrné, že při přenosu požáru na další vozidlo nejsou výsledky teplot, dvojnásobné, ke zvýšení dochází pouze o 4,1 %. V případě viditelnosti dochází ke snížení pouze o 16,7 %. U koncentrace CO dochází ke zvýšení pouze o 0,16 %.

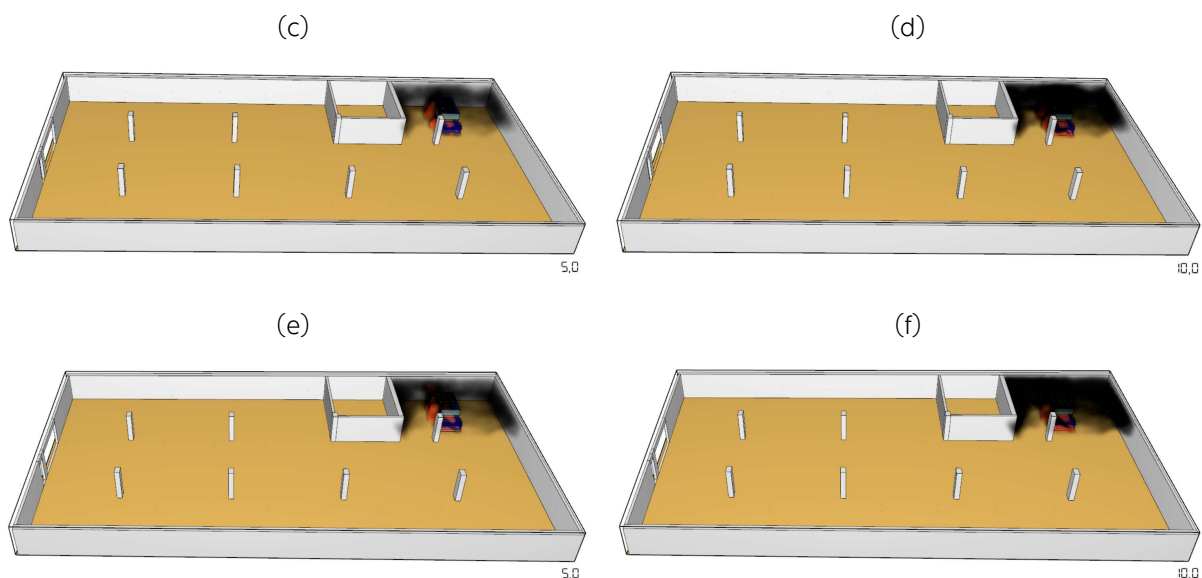
8.8.3 Scénář č. 3: Vliv vstupní křivky požáru (EV, ICEV)

Obr. 8-27 porovnává HRR, které bylo vloženo do modelu, s výsledným HRR. Z grafů je patrné, že HRR jsou pro jednotlivé požáry vozidel shodné. Obr. 8-28 zobrazuje referenční obrázky z průběhu simulace pro jednotlivé vzdálenosti vozidel.



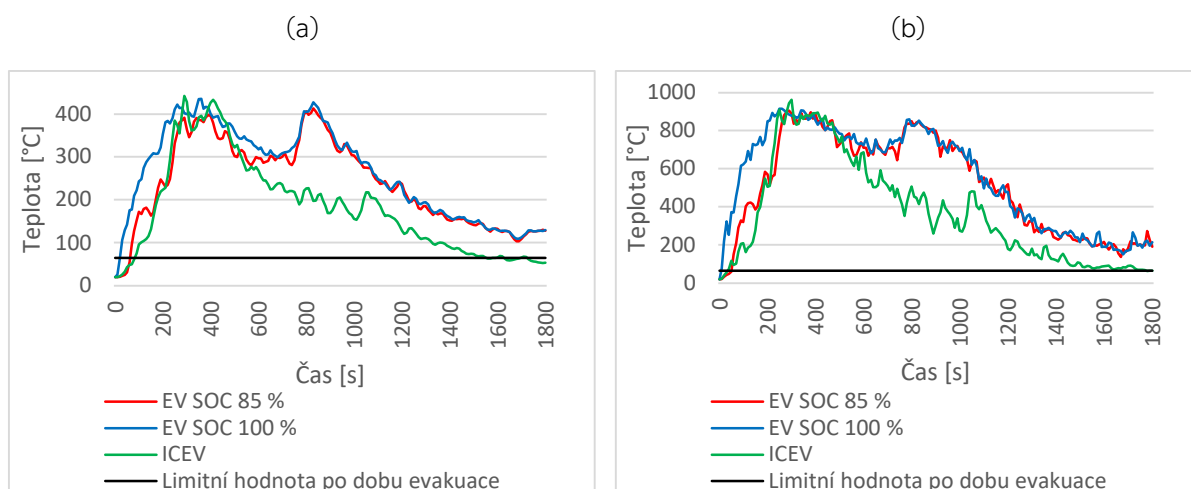
Obr. 8-27: Porovnání výsledného HRR s vloženým HRR pro jednotlivé maximální výkony



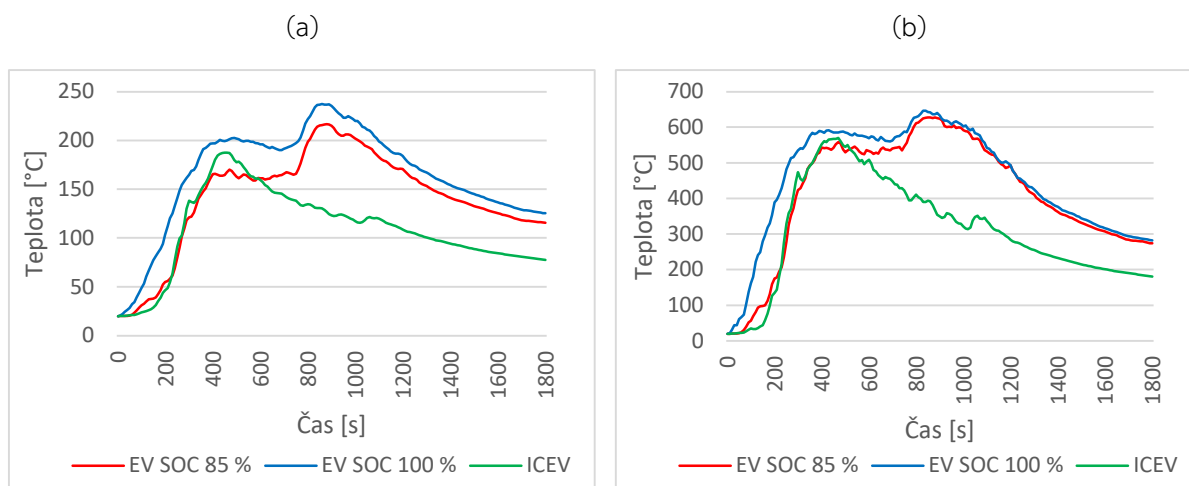


Obr. 8-28: Referenční obrázek průběhu simulace: (a) pro požár EV s 85 % SOC v čase 20 sekund, (b) pro požár EV s 85 % SOC v čase 50 sekund, (c) pro požár EV se 100 % SOC v čase 5 sekund, (d) pro požár EV se 100 % SOC v čase 10 sekund, (e) pro požár ICEV v čase 5 sekund, (f) pro požár ICEV v čase 10 sekund

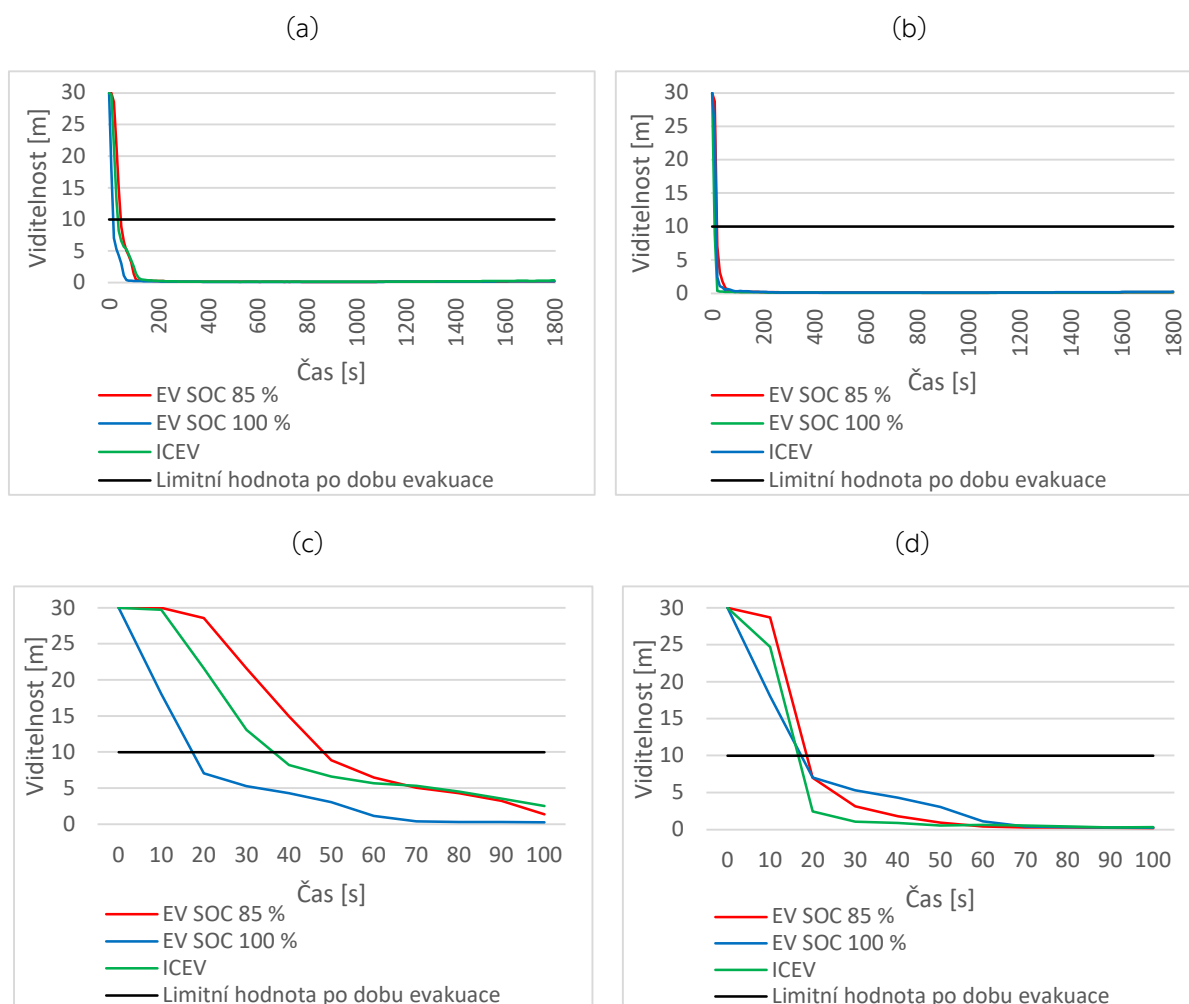
Obr. 8-29 zobrazuje průběhy průměrných (Obr. 8-29 a) a maximálních (Obr. 8-29 b) teplot plynu všech čidel v prostoru hromadné garáže. Obr. 8-30 zobrazuje průběhy průměrných (Obr. 8-30 a) a maximálních (Obr. 8-30 b) teplot povrchu všech čidel v prostoru hromadné garáže. Obr. 8-31 zobrazuje průběhy průměrných (Obr. 8-31 a) a minimálních (Obr. 8-31 b) viditelností všech čidel v prostoru hromadné garáže. Obr. 8-32 zobrazuje průběhy průměrných (Obr. 8-32 a) a maximálních (Obr. 8-32 b) koncentrací CO všech čidel v prostoru hromadné garáže.



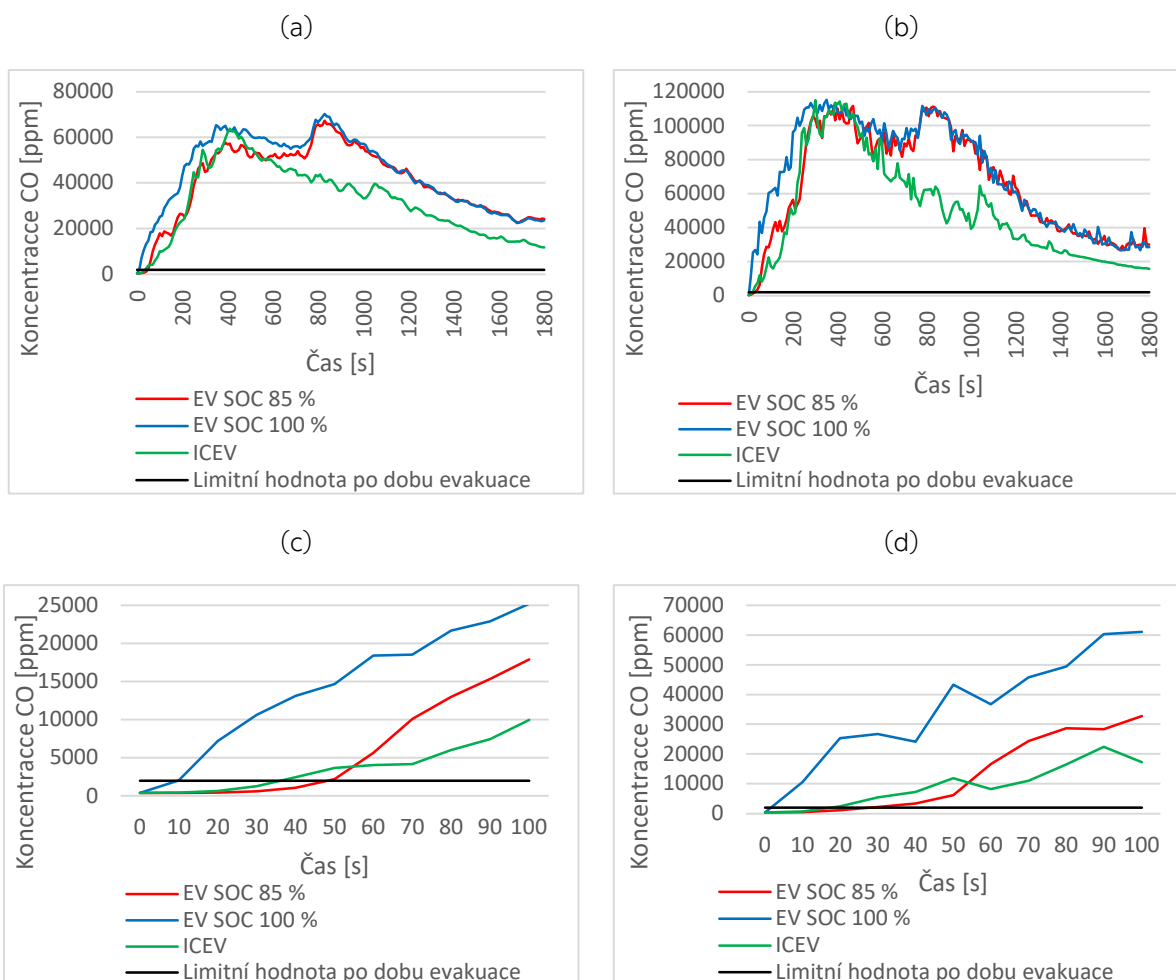
Obr. 8-29: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota plynu, (b) maximální teplota plynu



Obr. 8-30: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota povrchu, (b) maximální teplota povrchu



Obr. 8-31: Porovnání viditelností: (a) průměrná viditelnost po celou dobu simulace, (b) minimální viditelnost po celou dobu simulace, (c) průměrná viditelnost v prvních 100 sekundách simulace, (d) minimální viditelnost v prvních 100 sekundách simulace



Obr. 8-32: Porovnání koncentrací CO: (a) průměrná koncentrace, (b) maximální koncentrace, (c) průměrná koncentrace v prvních 100 sekundách simulace, (d) maximální koncentrace v prvních 100 sekundách simulace

Zhodnocení jednotlivých výsledků simulace se scénářem č. 3: Vliv vstupní křivky požáru je zobrazen v Tab. 8-9, hodnoty pro požár ICEV a EV s 85 % SOC jsou porovnány s hodnotami pro požár EV s 100 % SOC.

Tab. 8-9: Zhodnocení jednotlivých výsledků simulace se scénářem č. 3: Vliv vstupní křivky požáru

Zjišťovaná veličina	Maximální výkon požáru	Max./min. hodnota	Vyhodnocení
Maximální teplota plynu	EV 85 % SOC	904,40 °C	Snížení o 1,2 %
	EV 100 % SOC	915,75 °C	-
	ICEV	956,16 °C	Zvýšení o 5,0 %



Zjišťovaná veličina	Maximální výkon požáru	Max./min. hodnota	Vyhodnocení
Maximální teplota povrchu	EV 85 % SOC	627,75 °C	Snížení o 2,9 %
	EV 100 % SOC	642,08 °C	-
	ICEV	570,59 °C	Snížení o 11,8 %
Minimální viditelnost v čase 100 s	EV 85 % SOC	0,21 m	Zvýšení o 16,7 %
	EV 100 % SOC	0,18 m	-
	ICEV	0,31 m	Zvýšení o 72,2 %
Maximální koncentrace CO	EV 85 % SOC	111 751,43 ppm	Snížení o 3,0 %
	EV 100 % SOC	115 216,25 ppm	-
	ICEV	114 985,57	Snížení o 0,2 %

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 plynu 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.

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

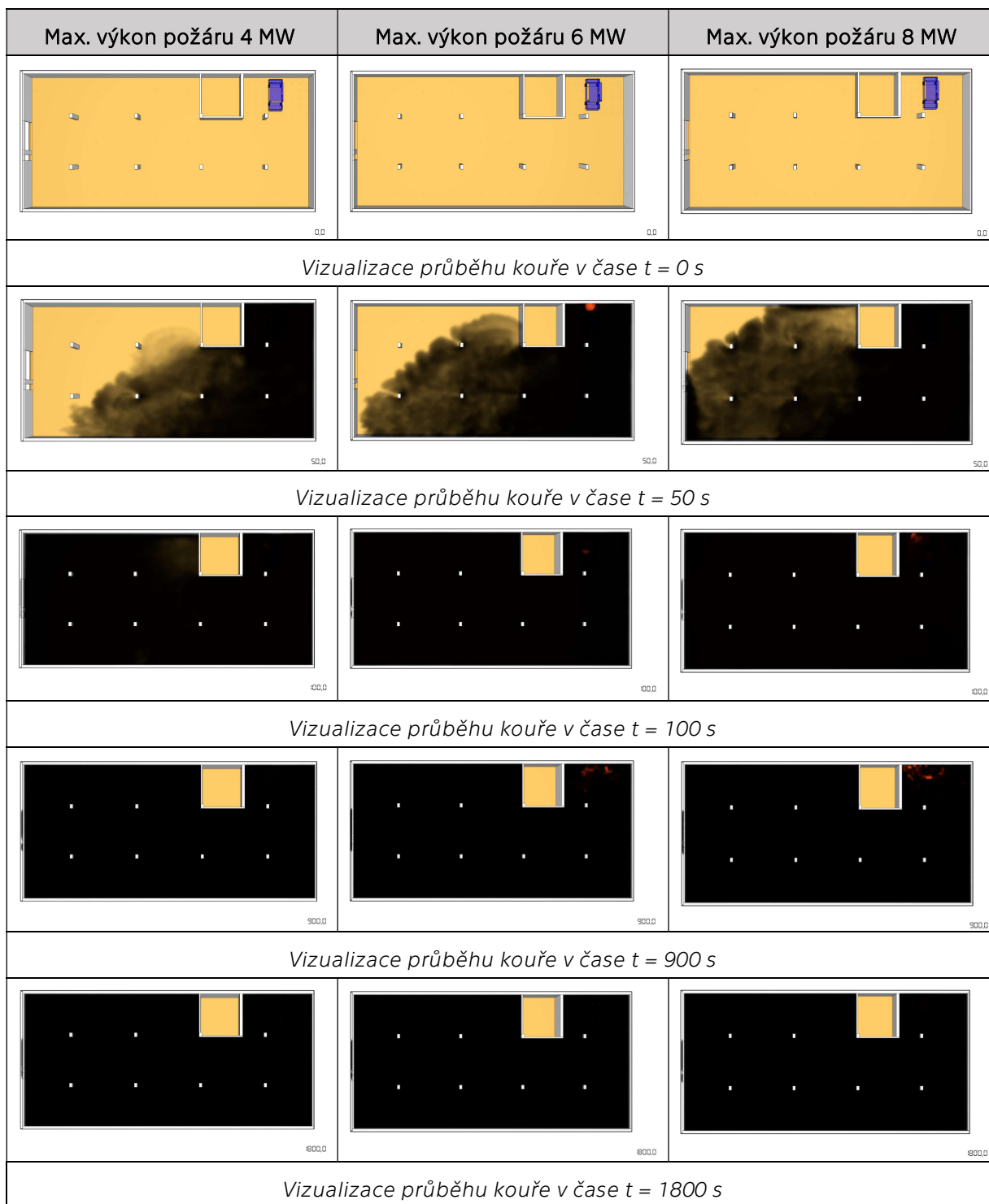
8.9 Vizualizace průběhu požáru z programu Pyrosim a Smokeview

Program Pyrosim slouží k zadání a vytvoření modelu, ke grafickému zobrazení výsledků slouží program Smokeview, který zobrazuje dané grafické výsledky.

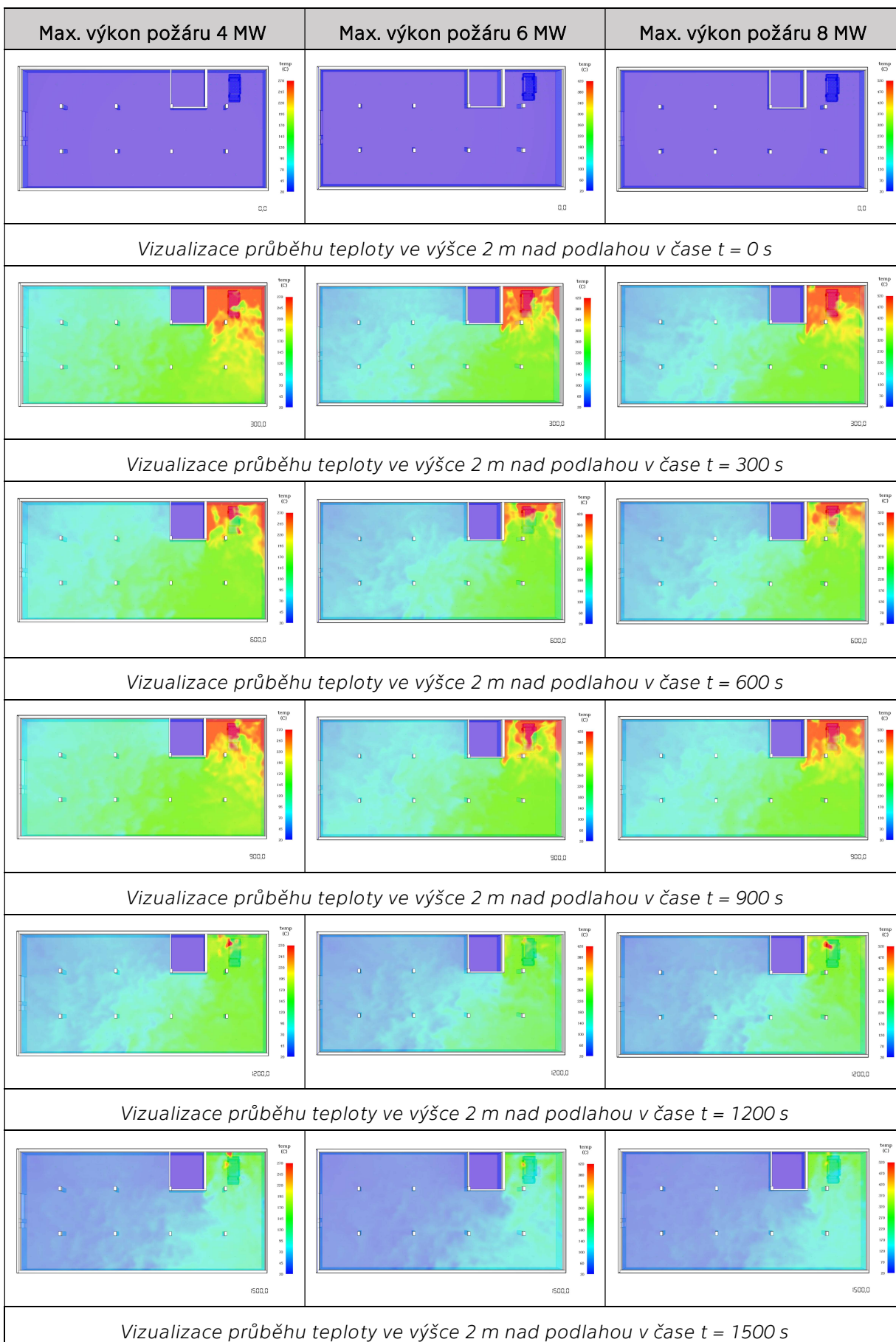
Níže jsou v této kapitole zobrazeny vizualizace průběhu teploty v řešeném prostoru a zakouření v čase v daném prostoru hromadné garáže. Z obrázků níže je patrné, že v čase $t = 100$ sekund je zakouřen již celý prostor hromadné garáže.

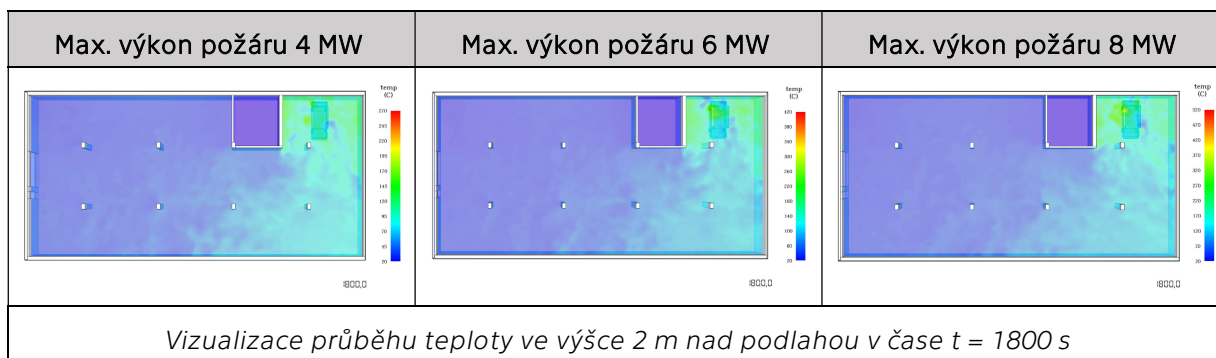


8.9.1 Scénář č. 1: Vliv výkonu požáru na teploty v prostoru hromadné garáže



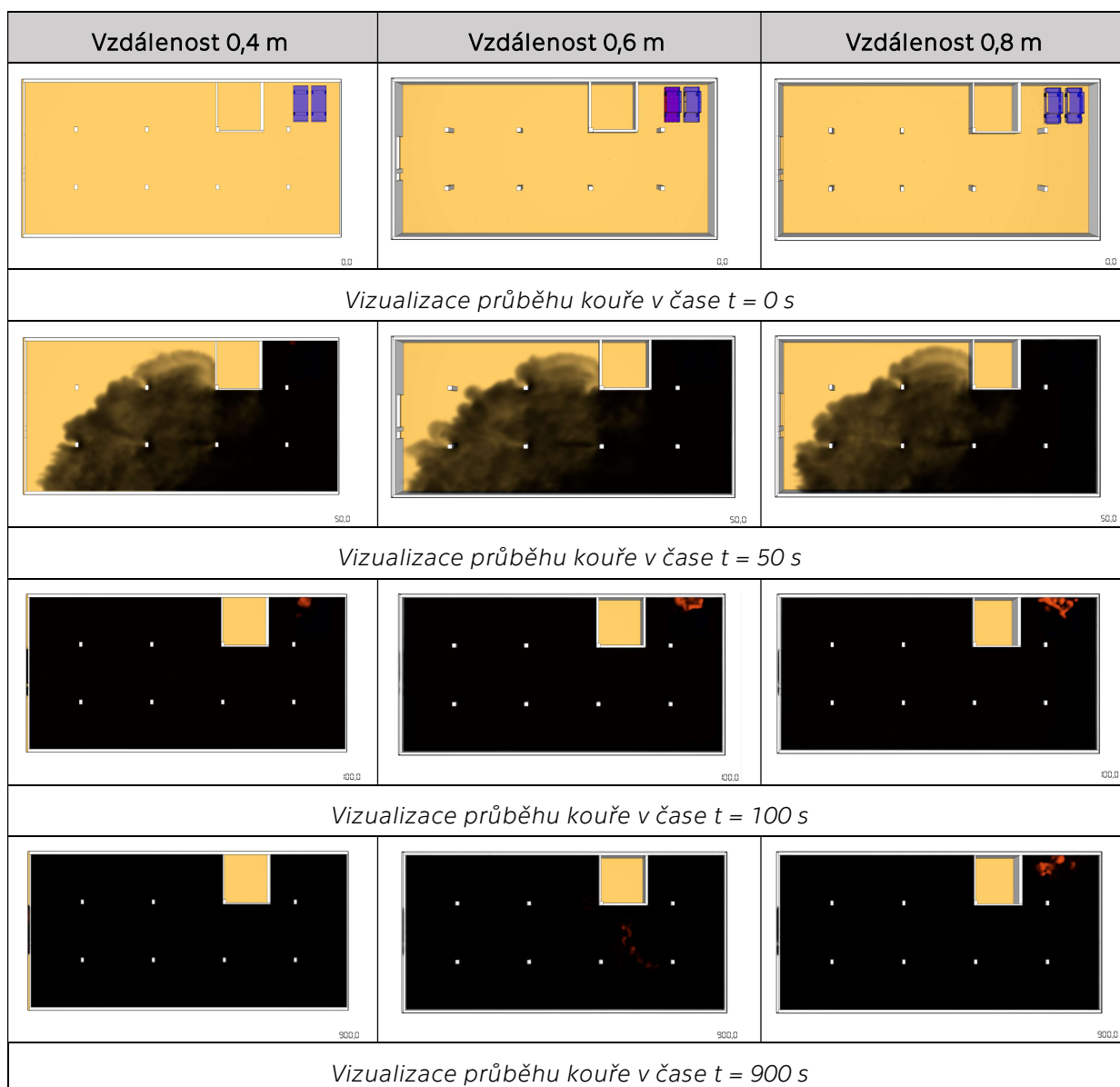
Obr. 8-33: Vizualizace průběhu kouře pro scénář č. 1: Vliv výkonu požáru na teploty v prostoru hromadné garáže v daném čase

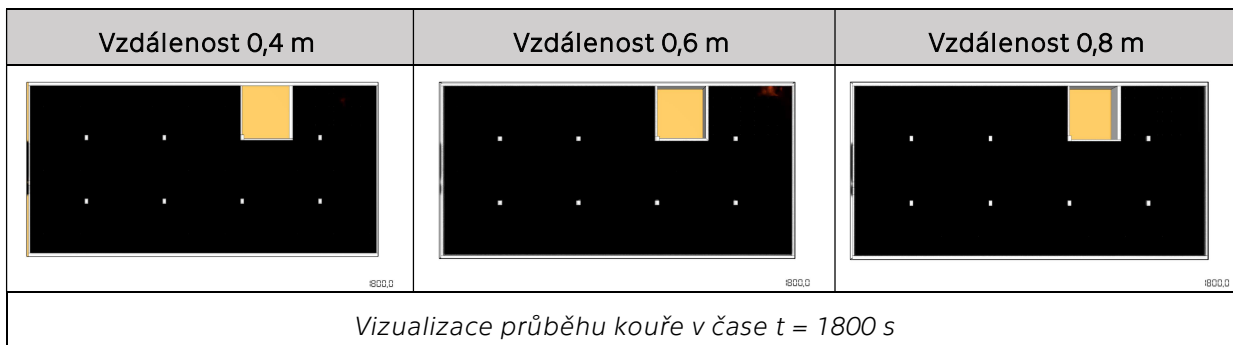




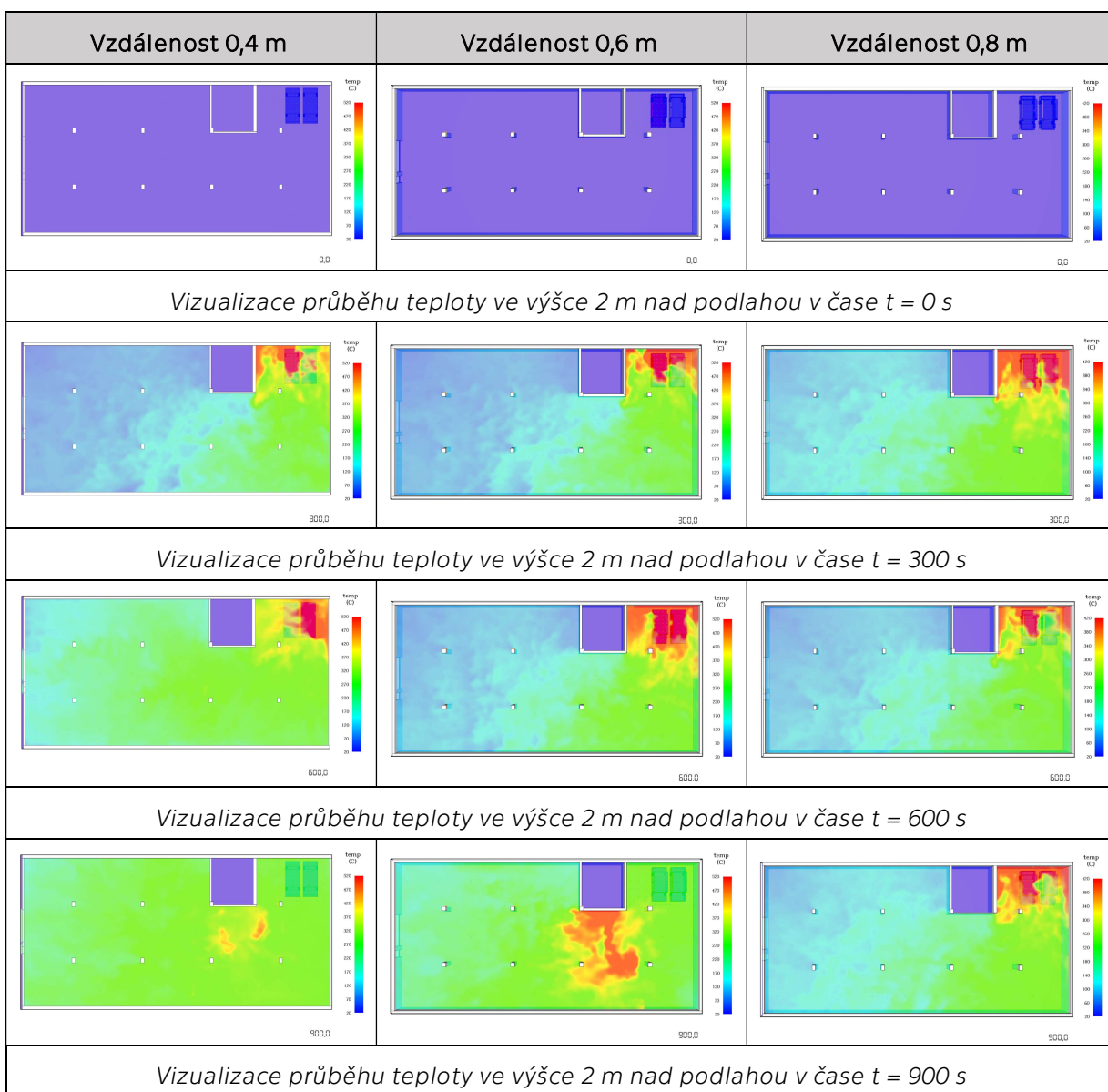
Obr. 8-34: Vizualizace průběhu teploty pro scénář č. 1: Vliv výkonu požáru na teploty v prostoru hromadné garáže ve výšce 2 m nad podlahou v daném čase

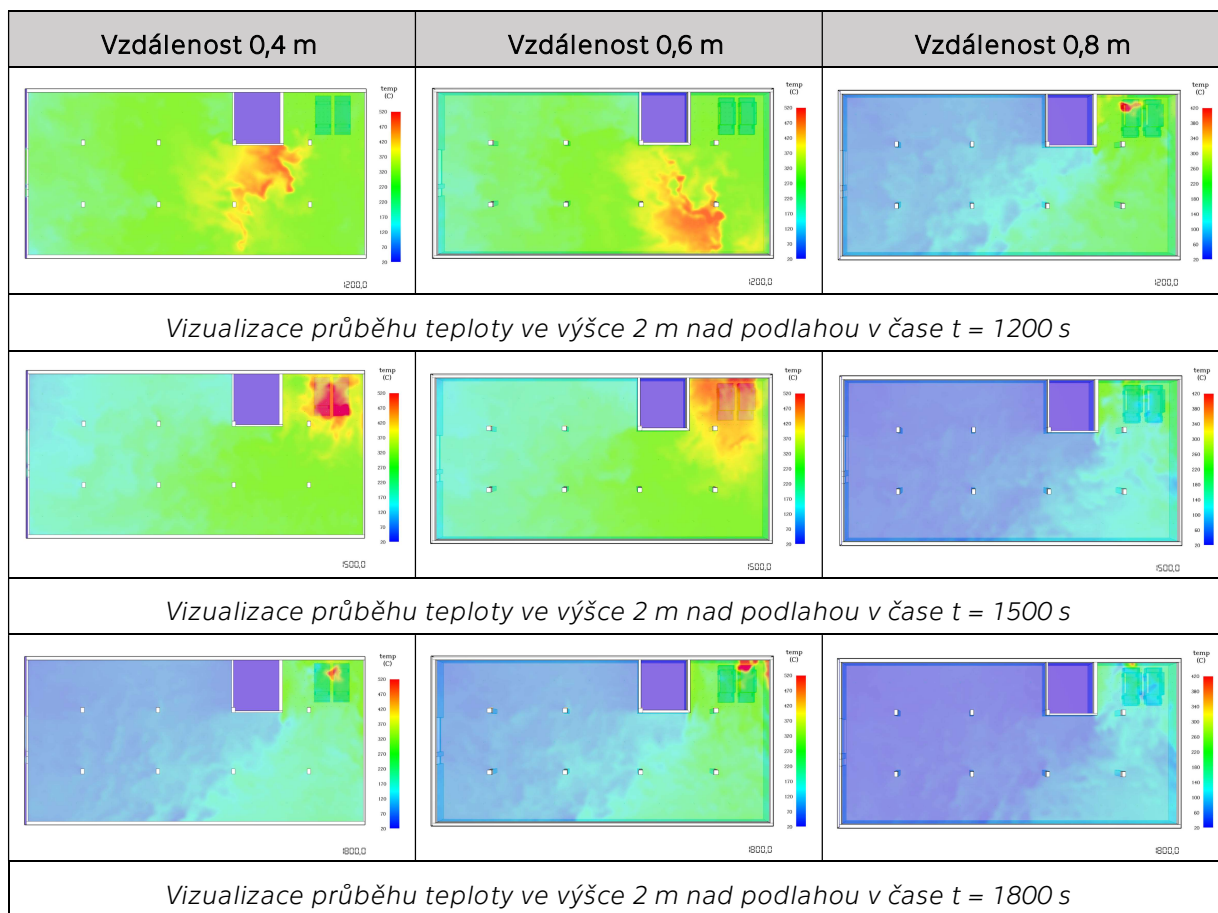
8.9.2 Scénář č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru





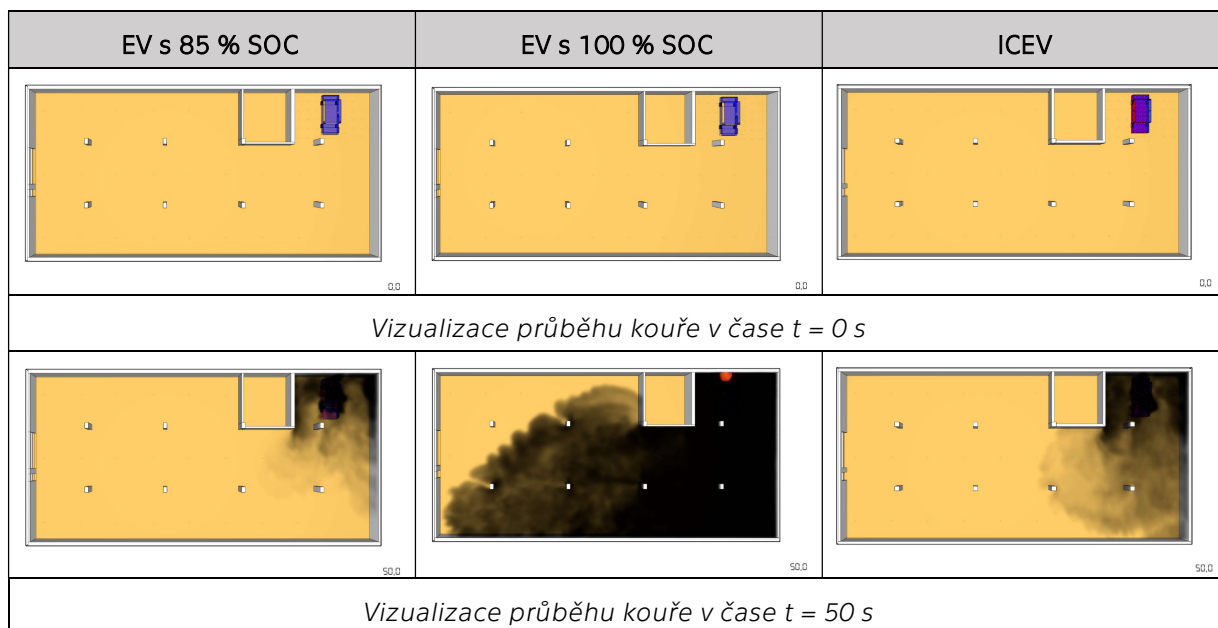
Obr. 8-35: Vizualizace průběhu kouře pro scénář č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru v daném čase

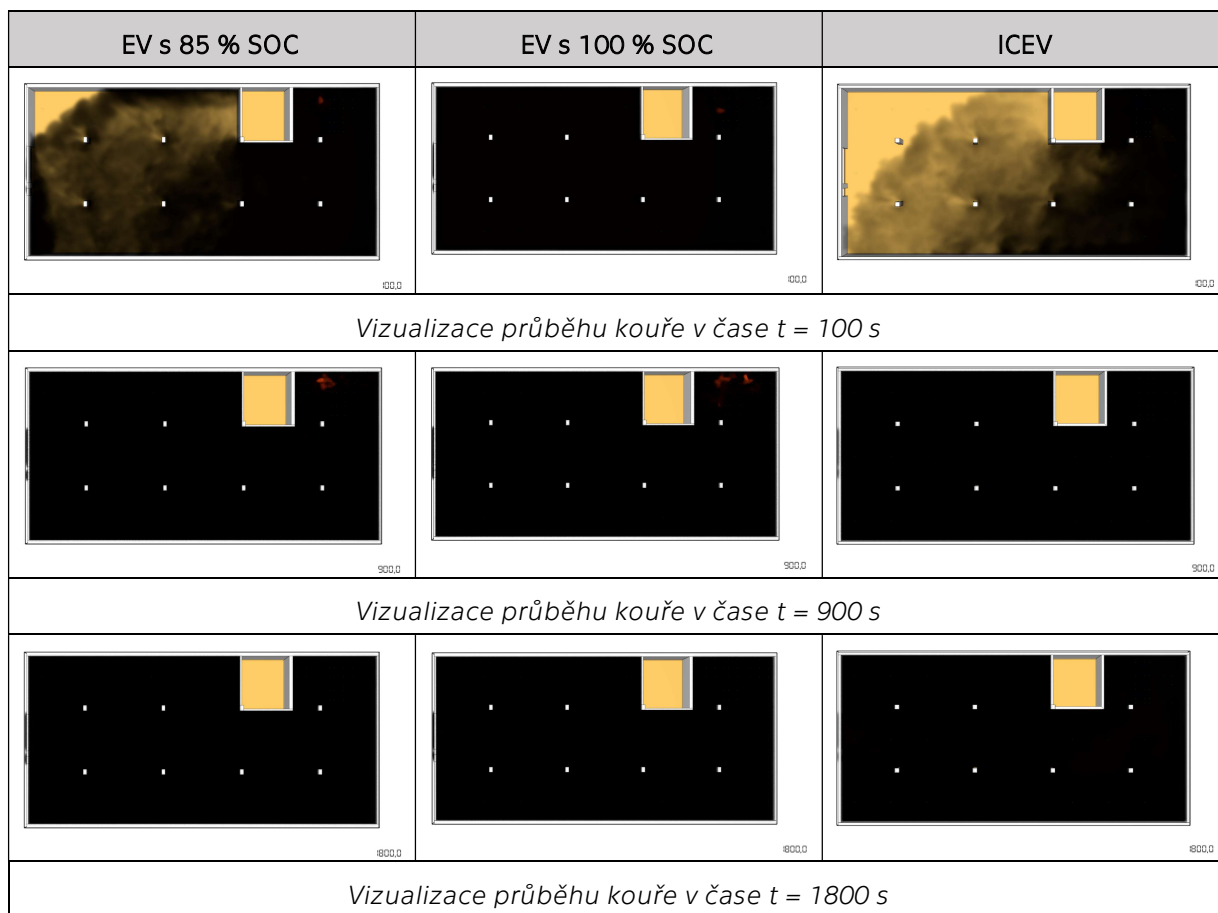




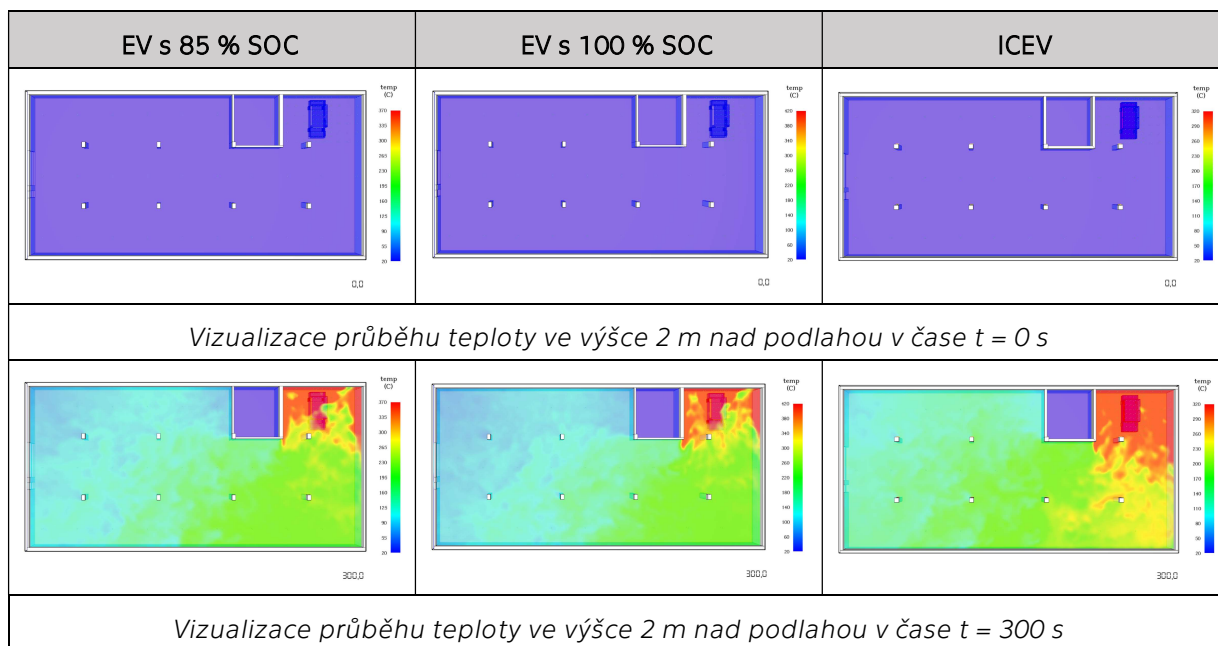
Obr. 8-36: Vizualizace průběhu teploty pro scénář č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru ve výšce 2 m nad podlahou v daném čase

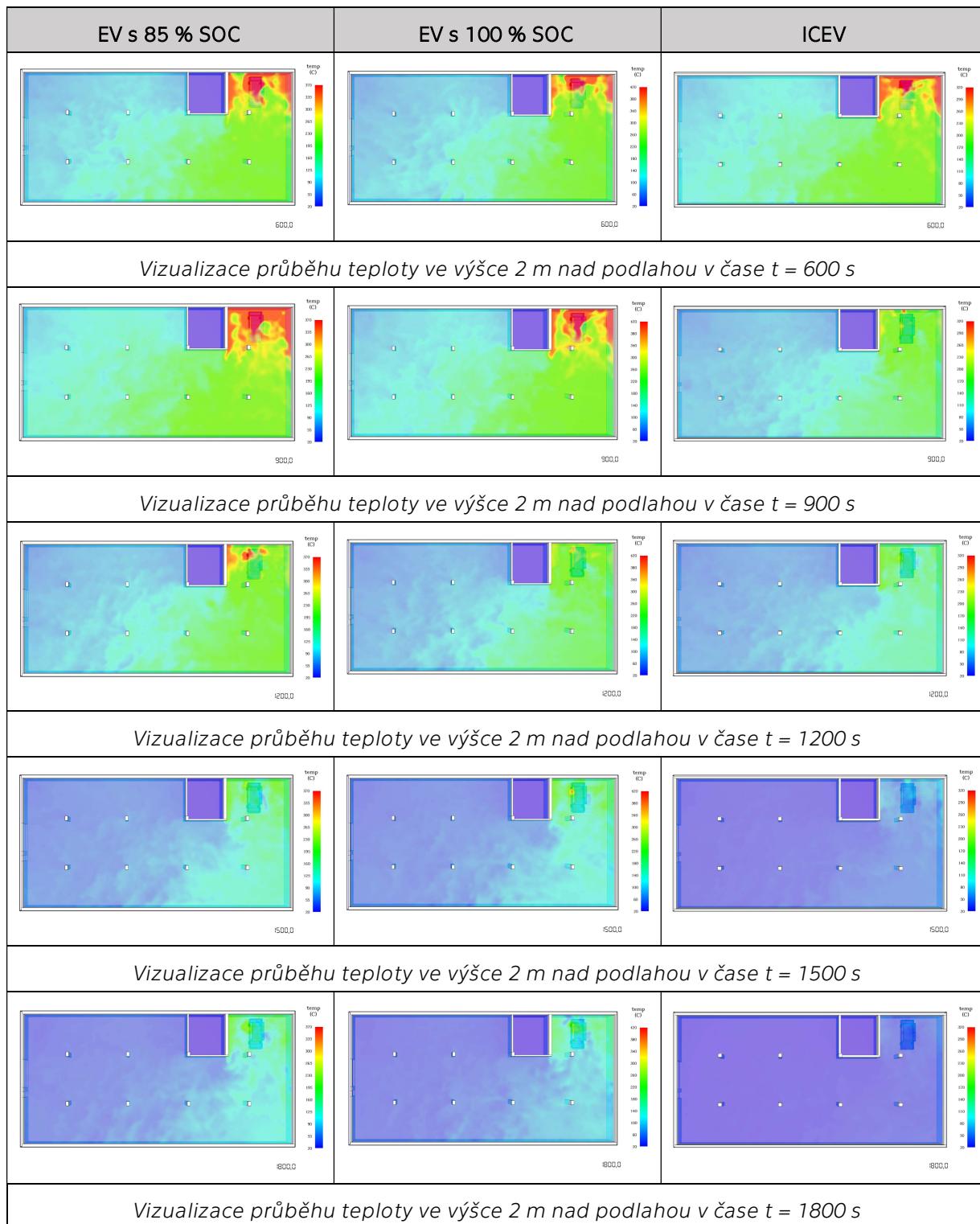
8.9.3 Scénář č. 3: Vliv vstupní křivky požáru (EV, ICEV)





Obr. 8-37: Vizualizace průběhu kouře pro scénář č. 3: Vliv vstupní křivky požáru (EV, ICEV) v daném čase





Obr. 8-38: Vizualizace průběhu teploty pro scénář č. 3: Vliv vstupní křivky požáru (EV, ICEV) ve výšce 2 m nad podlahou v daném čase



9 Posouzení požární odolnosti konstrukce

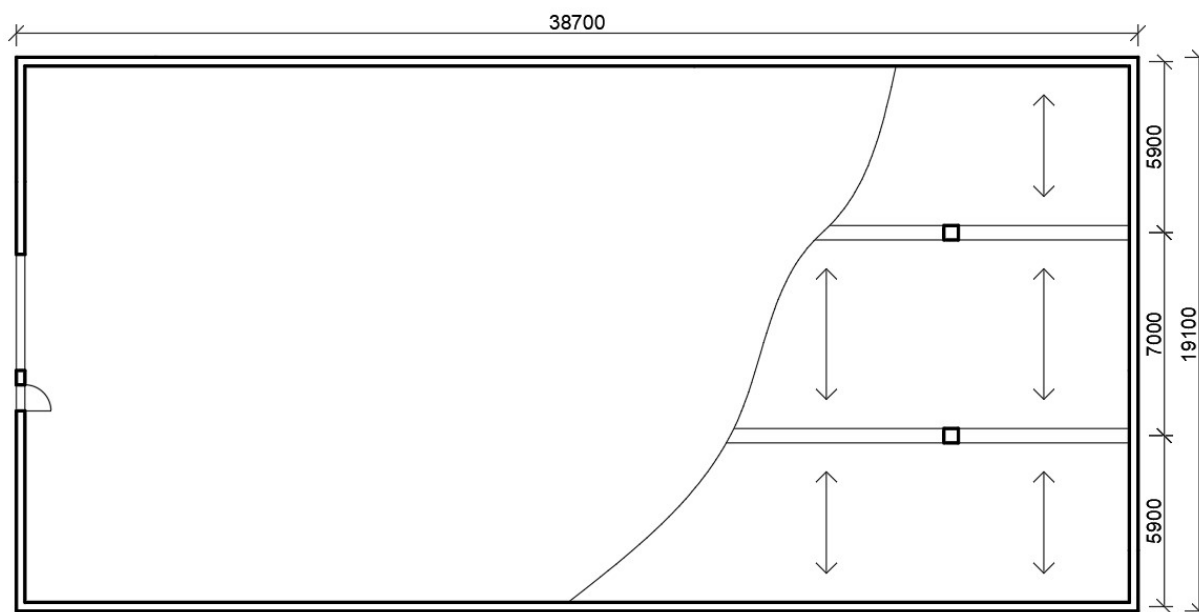
Jak bylo zmíněno výše v kap. 7.1, požární odolnost železobetonových konstrukcí lze posoudit a stanovit pomocí tabulkových hodnot, které jsou mnohdy konzervativní nebo pomocí zjednodušených či zpřesněných výpočetních metod.

V této kapitole je posouzena požární odolnost vybrané železobetonové konstrukce – stropní spojitá deska. Vzhledem k omezeným podmínkám použití zjednodušených výpočetních metod dle ČSN EN 1992-1-2 příloha B [33] je posouzení požární odolnosti konstrukce provedeno pomocí kritických teplot dle Rovnice 7-3. Pro posouzení požární odolnosti je použit průběh maximálních teplot a maximální průběh teplot povrchu pro referenční požár EV dle Obr. 8-5 v prostorách hromadné garáže zjištěné modelováním požáru v řešeném prostoru (viz kap. 8.8). Konstrukce musí být však nejdříve navržena a posouzena na běžný stav za běžné teploty dle ČSN EN 1992-1-1 [43].

9.1 Řešená konstrukce

Geometrie řešeného prostoru je převzata z předchozí kapitoly této práce. Řešenou konstrukcí je spojitá železobetonová stropní deska, která je uložena na železobetonových průvlacích pnutých mezi železobetonové sloupy. Průvlaky a sloupy nejsou předmětem posouzení v rámci této diplomové práce.

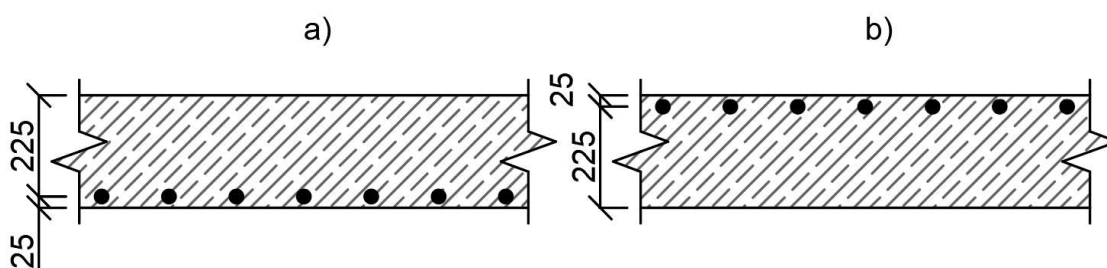
Deska je řešena jako spojitá o třech polích s rozpětími 7,0 a 5,9 m viz Obr. 9-1.



Obr. 9-1: Schéma řešené konstrukce



Stropní konstrukce je řešena spojitou deskou tloušťky 250 mm (viz Obr. 9-2). Stropní deska je rovnoměrně zatížena stálým zatížením (vlastní tíhou konstrukce a tíhou podlahy) s charakteristickou hodnotou $g_k = 11,14 \text{ kN/m}^2$ a proměnlivým zatížením s charakteristickou hodnotou $q_k = 4,05 \text{ kN/m}^2$. Stropní deska byla navržena a posouzena za běžné teploty dle ČSN EN 1992-1-1 [43]. Výpočet je uveden v příloze 2 této práce. Hlavní parametry prvku jsou následující: třída betonu C30/37, výztuž B500B, krycí vrstva $c = 20 \text{ mm}$ a plocha hlavní nosné výztuže $A_{s,prov} = 471,23 \text{ mm}^2$ v prvním a posledním poli, $A_{s,prov} = 785,39 \text{ mm}^2$ nad podporou a $A_{s,prov} = 392,69 \text{ mm}^2$ v prostředním poli. Ostatní výztuž v prvku je při posouzení zanedbána vzhledem k faktu, že posouzení požární odolnosti prvku se dle ČSN EN 1992-1-2 [33] provádí pouze pro hlavní nosnou výztuž.



Obr. 9-2: Průřez stropní desky a vzdálenost výztuže od povrchu pro: a) výztuž v poli, b) výztuž nad podporou

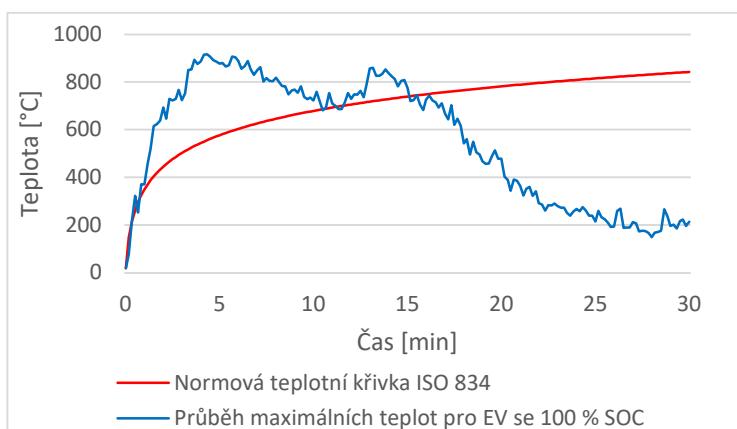
9.2 Posouzení únosnosti konstrukce

Pro stropní desku řešeného prostoru byly stanoveny průběhy teplot ve výztuži pomocí výpočetního programu TempAnalysis [44] (viz příloha 3 této práce), který řeší rovnice přenosu tepla jedním směrem. Materiálové vlastnosti betonu byly uvažovány dle ČSN EN 1992-1-2 [33]. Byla uvažována horní mez tepelné vodivosti, počáteční vlhkost 1,5 % hmotnosti betonu a počáteční objemová hmotnost 2500 kg/m^3 . Okrajové podmínky na ohřívané straně konstrukce byly uvažovány dle ČSN EN 1991-1-2 [25]. Byl uvažován součinitel přestupu tepla $35 \text{ W/m}^2\text{K}$, emisivita 0,7. Vývoj teplot byl převzat z grafu v kap. 8.8.1 viz Obr. 8-17 b) získaného z modelu požáru. Na Obr. 9-3 je znázorněna vstupní teplotní křivka, pro porovnání je zobrazen i průběh normové teplotní křivky ISO 834 dle ČSN EN 1991-1-2 [25], který je dán vztahem dle Rovnice 9-1. Jedná se o jiný model požáru, kdy jde o porovnání z hlediska názornosti. Teploty na počátku požáru jsou dle Obr. 9-3 pro požár EV podstatně vyšší než pro normovou teplotní křivku. Normová teplotní křivka naopak neuvažuje s chladnutím v průběhu požáru, který křivka pro požár EV zahrnuje.



Rovnice 9-1: Normová teplotní křivka dle ČSN EN 1991-1-2 [25]

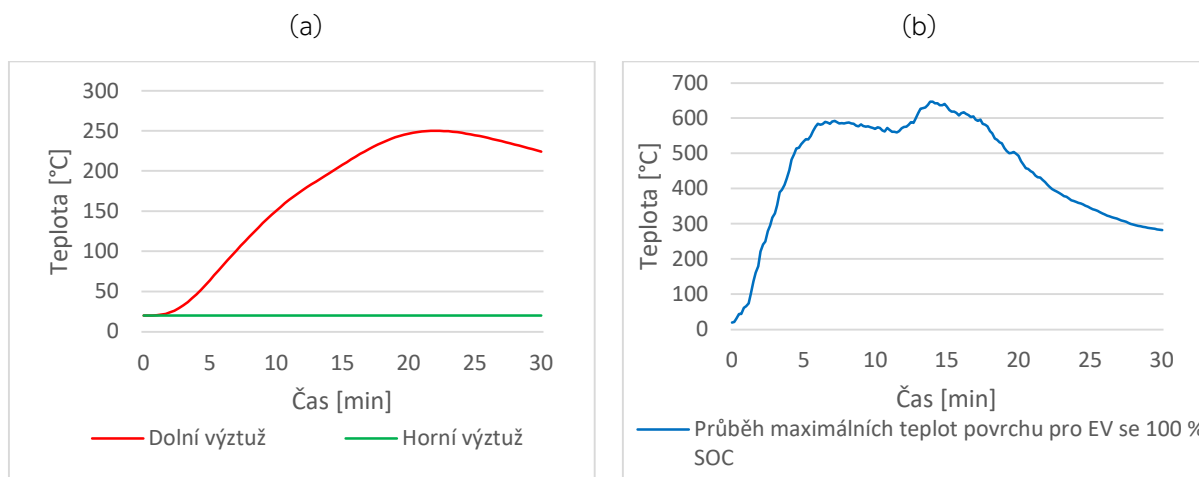
$$\theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1)$$



Obr. 9-3: Vstupní křivka a normová teplotní křivka ISO 834 dle [25]

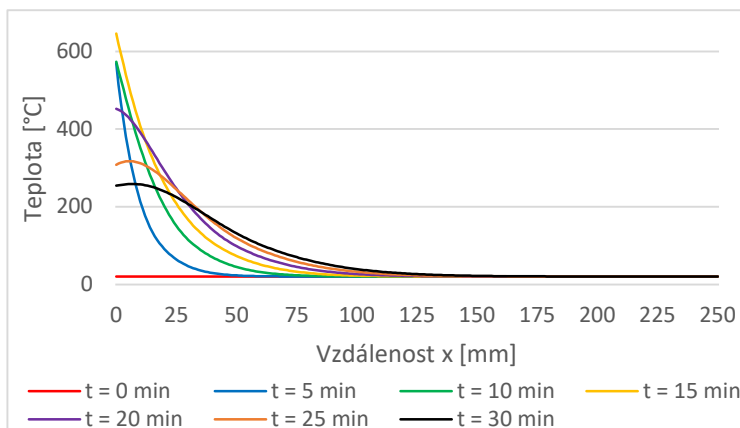
Na odvrácené straně byl uvažován nulový tepelný tok a počáteční rovnoměrná teplota byla předepsána hodnotou 20 °C. Vliv nosné výztuže byl na distribuci teploty v prvky zanedbán.

Výsledný průběh teploty ve výztuži (jak horní, tak dolní) je uveden na Obr. 9-4 a). Na Obr. 9-4 b) je znázorněn průběh maximálních povrchových teplot stropní konstrukce.



Obr. 9-4: Průběh teplot: a) teploty ve výztuži (horní a dolní) [44], b) maximální teploty povrchu

Dle grafu na Obr. 9-4 a) nemá požár téměř žádný vliv na horní výztuž, teplota dolní výztuže nepřekročí 250 °C. Na základě ČSN EN 1992-1-2 [33] lze konstatovat, že návrhová pevnost výztužných prutů nebude při požární situaci redukována příslušným součinitelem, jelikož tento součinitel je pro výztuž válcovanou za tepla roven jedna až do teploty výztuže 400 °C a pro výztuž tvářenou za studena je roven jedné až do teploty výztuže 300 °C.



Obr. 9-5: Grafy průběhů teplot v prvku pro jednotlivé časy

Dle ČSN EN 1992-1-2 [33] je za kritickou teplotu pro beton považována teplota 500 °C, při této teplotě již beton nepřispívá k únosnosti průřezu, naopak při nižší teplotě lze uvažovat stejné mechanické vlastnosti betonu jako při 20 °C. Na základě výše uvedeného grafu na Obr. 9-4 b) a na Obr. 9-5 lze konstatovat, že část betonu z desky by vzhledem k povrchovým teplotám nepřispívala k únosnosti průřezu, avšak tato vrstva by byla menší než 25 mm, jelikož v místě $x = 25$ mm (od povrchu ohřívané konstrukce), kde se nachází výztuž, teplota již nepřekračuje 250 °C.



10 Závěr

Tato diplomová práce byla zaměřena na představení požárního rizika elektrovozidel a modelování jejich požáru pro různé požární scénáře a zhodnocení jeho vlivu na požární odolnost konstrukcí a požární bezpečnost staveb.

V první části diplomové práce byl představen přehledný souhrn aktuálních informací a poznatků jak z české, tak zahraniční literatury týkajících se požárů a požární bezpečnosti z hlediska elektromobility. V úvodu byly popsány základní typy elektrovozidel, charakteristiky a funkce baterie a jejího nabíjení. Dále následovala kapitola zmiňující požární rizika elektrovozidel a baterií. V práci bylo popsáno chování baterií při požáru, velkorozměrové požární zkoušky elektrovozidel a problematika jejich hašení. Teoretická část se v závěru věnovala požární bezpečnosti hromadných garáží (i z hlediska elektromobility) a souvisejícímu posuzování požární odolnosti konstrukcí.

Co se týče řešení požární bezpečnosti hromadných garáží, na základě dotazníku, který byl dán k vyplnění odborníkům z různých států zainteresovaných v požární bezpečnosti, aby uvedli, jak se požární bezpečnost řeší dle legislativy v daném státě, dotazované státy neřeší požární bezpečnost hromadných garáží se zahrnutím vlivu elektromobility. Řešení požární bezpečnosti hromadných garáží je dle legislativy rozdílné napříč státy. Co se týče požární odolnosti, v ostatních státech jsou požadavky na jednotlivé konstrukce vyšší, i kdybychom v České republice uvažovali s elektromobilitou dle Metodického doporučení HZS [27]. Z hlediska požárně bezpečnostního zařízení je v daném prostoru ve všech ostatních státech požadována instalace EPS, v České republice není instalace požadovaná. Stejně tak není v České republice požadováno pro tento prostor ani instalace SHZ a ZOKT, pokud by se neuvažovala elektromobilita. Česká republika je oproti dotazovaným státům alespoň maličko napřed, kdy u nás již máme alespoň nějaká doporučení týkajících se elektromobility (viz Metodické doporučení [27]) a zároveň je aktuálně v řešení i norma, která by toto měla zahrnovat. Obecně by bylo potřeba, aby legislativa jednotlivých států reagovala rychleji na rozvoj elektromobility, který je v posledních letech stále rychlejší.

Ve druhé části diplomové práce byly získané informace a poznatky uplatněny při modelování požáru v řešeném prostoru. Z výše uvedených výsledků z modelování požáru v této práci lze konstatovat, že při zvýšení (případně snížení) výkonu požáru o určitý koeficient nebudou i výsledky o stejný koeficient vyšší (případně nižší).



Na základě modelování přeskoku požáru z jednoho vozidla na druhé lze uvést závěr, který je platný jen pro zvolené okrajové a vstupní podmínky, že při vzdálenosti vozidel 0,8 m a větší již nedojde k rozšíření požáru na druhé vozidlo po sledovanou dobu. Rozšíření požáru z jednoho vozidla na druhé bylo modelováno pomocí teploty vznícení pneumatiky. Tento závěr odpovídá i Metodickému doporučení HZS [28], kdy se pro nabíjení vozidel doporučuje navrhovat stání minimálně v šířce 3,5 m, které odpovídá dle ČSN 73 6056 [28] šířce parkovacího stání pro osoby tělesně postižené. Zároveň bylo sledováno, že při rozšíření požáru z jednoho vozidla na druhé nejsou výsledky maximálních a průměrných teplot plynu, maximálních a průměrných teplot povrchu, minimální a průměrné viditelnosti a maximální a průměrné koncentrace CO dvojnásobné oproti požáru jednoho vozidla, jelikož jsou křivky požáru oproti sobě posunuté. Posledním scénářem byl sledován vliv křivky požáru, tzn. jestli se jedná o EV nebo ICEV, případně EV s nižší SOC dle křivek z experimentů v teoretické části. 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.

Pro všechny scénáře 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 (viz kap. 8.9). Z toho důvodů by bylo v prostorách nutné instalovat ZOKT, jak doporučuje Metodické doporučení HZS [28].

Metodické doporučení HZS [28] zároveň doporučuje instalaci SHZ. 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 požární bezpečnostních zařízení.

Z kap. 9 je patrné, že železobetonová konstrukce by splnila svou požární odolnost při požáru jednoho EV s 100 % SOC, jelikož ve výztuži nejsou takové teploty, aby bylo nutné redukovat její pevnost a redukováná vrstva betonu by byla malá. Konstrukce by tedy požárem jednoho vozidla nebyly výrazně ovlivněny.



Na základě výše uvedeného by bylo vhodné upravit normu na parkování vozidel z hlediska šířky parkovacích stání. Dle dosažených výsledků z modelu a kapitoly o posouzení požární odolnosti konstrukce by železobetonové konstrukce vyhověly požadované požární odolnosti. Problém by mohl nastat u subtilních ocelových konstrukcí. V případě požárů vozidel v hromadných garážích by bylo potřeba se více než na požární odolnost konstrukcí zaměřit na ochranu osob v těchto prostorech.

Další výzkum by bylo vhodné zaměřit na podrobnější modelování požáru elektrovozidel v FDS s uvážením vlivu požárně bezpečnostních zařízení jako je ZOKT a nebo SHZ, respektive vzájemné rozdíly při použití jen jednoho systému, případně kombinace.

Výstupy z této práce byly použity pro účely článku, který byl zařazen a publikován ve sborníku abstraktů XXXI. ročníku mezinárodní konference Požární ochrana 2022 v Ostravě. [45]



Literatura

- [1] BOEHMER, Haavard, Michael KLASSEN a Stephen OLENICK. Modern Vehicle Hazards in Parking Structures and Vehicle Carriers [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Fire-statistics-and-reports/Building-and-life-safety/RFModernVehicleHazards-in-ParkingGarages.pdf>
- [2] HØYER, Karl Georg. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy* [online]. 2008, 16(2), 63–71. ISSN 0957-1787. Dostupné z: [doi:https://doi.org/10.1016/j.jup.2007.11.001](https://doi.org/10.1016/j.jup.2007.11.001)
- [3] BERGMANN, Petr. Historie elektromobilů může být až překvapivě zajímavá! Znáte skutečnou pravdu? elektrické vozy [online]. Dostupné z: <https://elektrickevozy.cz/clanky/historie-elektromobilu-od-prvniho-elektromotoru-po-soucasnost>
- [4] HABĚTÍNEK, Adam. Elektromobilita z hlediska požární bezpečnosti staveb. Praha, 2021. Diplomová práce. ČVUT.
- [5] IEA. Global EV Outlook 2021 [online]. B.m.: Paris. Dostupné z: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>
- [6] Počet elektromobilů v ČR k 1. 1. 2022. [ekovozy.cz](https://www.ekovozy.cz/) [online]. Dostupné z: <https://www.ekovozy.cz/>
- [7] Czech Republic - Summary. European Alternative Fuels Observatory [online]. Dostupné z: <https://www.eafo.eu/countries/czech-republic/1729/summary>
- [8] BERG, Helena. Batteries for electric vehicles: materials and electrochemistry [online]. Cambridge: Cambridge University Press, 2015. Book, Whole. ISBN 1316090973. Dostupné z: <https://go.exlibris.link/MSsfvg1>
- [9] How Do All-Electric Cars Work? U.S. Department of Energy - Alternative Fuels Data Center [online]. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-all-electric-cars-work>
- [10] How Do Hybrid Electric Cars Work? U.S. Department of Energy - Alternative Fuels Data Center [online]. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-hybrid-electric-cars-work>
- [11] How Do Plug-In Hybrid Electric Cars Work? U.S. Department of Energy - Alternative Fuels Data Center [online]. Dostupné z: <https://afdc.energy.gov/vehicles/how-do-plug-in-hybrid-electric-cars-work>
- [12] DORSZ, Adam a Mirosław LEWANDOWSKI. Analysis of Fire Hazards Associated with the Operation of Electric Vehicles in Enclosed Structures. *Energies (Basel)* [online]. 2021, 15(1), 11. ISSN 1996-1073. Dostupné z: [doi:10.3390/en15010011](https://doi.org/10.3390/en15010011)



- [13] SANGUESA, Julio A., Vicente TORRES-SANZ, Piedad GARRIDO, Francisco J. MARTINEZ a Johann M. MARQUEZ-BARJA. A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities* [online]. 2021, 4(1), 372–404. ISSN 2624-6511. Dostupné z: doi:10.3390/smartcities4010022
- [14] MIAO, Yu, Patrick HYNAN, Annette VON JOUANNE a Alexandre YOKOCHI. Current Li-Ion Battery Technologies in Electric Vehicles and Opportunities for Advancements. *Energies* [online]. 2019, 12(6). ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en12061074
- [15] MALKOVSKÝ, Zdeněk, Jan KARL, Ondřej SUCHÝ a Pavel THIN. Aktuální poznatky z elektromobility pro potřeby HZS ČR [online]. B.m.: GŘ HZS ČR. říjen 2020. Dostupné z: https://www.hasici-vzdelavani.cz/sites/default/files/download/soubory/201007%20Komentovan%C3%BD%20v%C3%BDklad%20k%20MU%20s%20EV-H__O__O.pdf
- [16] SUN, Peiyi, Roeland BISSCHOP, Huichang NIU a Xinyan HUANG. A Review of Battery Fires in Electric Vehicles. *Fire technology* [online]. 2020, 56(4), 1361–1410. ISSN 0015-2684;1572-8099; Dostupné z: doi:10.1007/s10694-019-00944-3
- [17] ČSN EN IEC 61851-1 ED.3. Systém nabíjení elektrických vozidel vodivým propojením - Část 1: Všeobecné požadavky. červen 2020
- [18] PHOENIX CONTACT. Základy technologie nabíjení pro elektromobilitu [online]. Dostupné z: <https://www.phoenixcontact.com/cs-cz/prumyslova-odvetvi/elektromobilita/zaklady-technologie-nabijeni-elektrobylity#>
- [19] BISSCHOP, Roeland, Ola WILLSTRAND, Amon FRANCINE a Max ROSENGREN. Fire safety of lithium-ion batteries in road vehicles. Tištěná kniha: International government publication : English. Boras, Sweden: RISE Research Institute of Sweden, 2019. ISBN 978-91-88907-78-3.
- [20] WANG, Qingsong, Binbin MAO, Stanislav I. STOLIAROV a Jinhua SUN. A review of lithium ion battery failure mechanisms and fire prevention strategies. *Progress in energy and combustion science* [online]. 2019, 73(Journal Article), 95–131. ISSN 0360-1285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2019.03.002
- [21] CUI, Yan, Jianghong LIU, Xin HAN, Shaohua SUN a Beihua CONG. Full-scale experimental study on suppressing lithium-ion battery pack fires from electric vehicles. *Fire Safety Journal* [online]. 2022, 129, 103562. ISSN 0379-7112. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2022.103562>
- [22] LECOCQ, Amandine, Marie BERTANA, Benjamin TRUCHOT a Guy MARLAIR. Comparison of the fire consequences of an electric vehicle and an internal combustion engine vehicle. In: 2. International Conference on Fires In Vehicles - FIVE 2012, [online]. 2012, s. 183–193. Dostupné z: <https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00973680/document>



- [23] WATANABE, Norimichi et al. Comparison of fire behaviours of an electric-battery-powered behicle and gasoline-powered vehicle in a real-scale fire test. In: Proceedings from 2nd International Conference on Fires in Vehicles-FIVE. 2012, s. 195–206.
- [24] LAM, Cecilia et al. Full-Scale Fire Testing of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles. In: Fourth International Conference on Fire in Vehicles [online]. nedatováno. Dostupné z: 95 - 106
- [25] ČSN EN 1991-1-2. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. srpen 2004
- [26] Vyhláška 23/2008 Sb., o technických podmínkách požární ochrany staveb [online]. Dostupné z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2008-23>
- [27] ČSN 73 0804. Požární bezpečnost staveb - Výrobní objekty. únor 2010
- [28] MINISTERSTVO VNITRA ČR, GENERÁLNÍ ŘEDITELSTVÍ HZS ČR. Požární bezpečnost staveb - elektromobilita, Metodické doporučení [online]. duben 2021. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/metodicke-doporuceni-elektromobilita-a-pozarni-bezpecnost-staveb.aspx?fbclid=IwAR235VRPP0jj-WF6m2GiTCFuetn28Q9ooJjYLRCKfzPw7cEfEF8mrVjvGsY>
- [29] ČSN 73 6056. Odstavné a parkovací plochy silničních vozidel. březen 2011
- [30] ČSN 73 6058. Jednotlivé, řadové a hromadné garáže. září 2011
- [31] ČSN 73 0810. Požární bezpečnost staveb - Společná ustanovení. červenec 2016
- [32] ČSN EN 13501-2. Požární klasifikace stavebních výrobků a konstrukcí staveb - Část 2: Klasifikace podle výsledků zkoušek požární odolnosti kromě vzduchotechnických zařízení. srpen 2017
- [33] ČSN EN 1992-1-2. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-2: Obecná pravidla - Navrhování konstrukcí na účinky požáru. listopad 2006
- [34] ČSN 73 0802. Požární bezpečnost staveb - Nevýrobní objekty. květen 2009
- [35] ČSN 73 0833. Požární bezpečnost staveb - Budovy pro bydlení a ubytování. září 2010
- [36] ČSN 73 0818. Požární bezpečnost staveb - Obsazení objektů osobami. červenec 1997
- [37] HEINISUO, M a M PARTANEN. Modeling of Car Fires with Sprinklers. 2013. vyd. nedatováno. ISBN ISBN 978-952-15-3025-8.
- [38] 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.



- [39] OVERHOLT, Kristopher. Fire Dynamics Simulator Mesh Size Calculator [online]. Dostupné z: <https://www.sbenkorichi.com/calculators/fds-mesh/>
- [40] ŠKODA AUTO A.S. 2022. Modely ŠKODA [online]. Dostupné z: <https://www.skoda-auto.cz/modely/prehled>
- [41] MINISTERSTVO VNITRA ČR, GENERÁLNÍ ŘEDITELSTVÍ HZS ČR. Požárně technické charakteristiky a technické informace pro potřeby ZPP. 2015
- [42] KUČERA, Petr a Lenka PEZDOVÁ. Základy matematického modelování požáru. Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. ISBN 978-80-7385-095-1.
- [43] ČSN EN 1992-1-1. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. listopad 2006
- [44] ŠTEFAN, Radek a Jaroslav PROCHÁZKA. TempAnalysis - Computer Program for Temperature Analysis of Cross Sections Exposed to Fire. Prague: CTU in Prague, Faculty of Civil Engineering, Dep. of Concrete and Masonry Structures. říjen 2018
- [45] BĚLOHRADSKÁ, Tereza, Martin BENÝŠEK a Radek ŠTEFAN. Analýza požáru elektrovozidel při návrhu konstrukcí. In: Recenzovaný Sborník abstraktů XXXI. ročníku mezinárodní konference. B.m.: Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, z.s., 2022, s. 5–8. ISBN 978-80-7385-256-6.



Použitý software

Microsoft® Word pro Microsoft 365 MSO (Version 2210 Build 16.0.15726.20070)

Microsoft® Excel pro Microsoft 365 MSO (Version 2210 Build 16.0.15726.20070)

AutoCAD® 2022

PyroSim 2022.2.0803, Released on August 3, 2022

FDS version 6.7.9

Smokeview 6.7.21

SCIA Engineer 22

TempAnalysis 1.2 (10-04-2016)



Seznam obrázků

Obr. 2-1: Světový počet elektrovozidel 2010–2020 – upraveno z [5].....	17
Obr. 2-2: Počet elektrovozidel v ČR – upraveno z [7].....	17
Obr. 2-3: Stupeň elektrifikace pro různé typy vozidel – upraveno z [8].....	18
Obr. 2-4: (a) schéma elektrolytického článku (nabíjení), (b) schéma galvanického článku (vybíjení), (c) základní konstrukce elektrochemického článku – převzato a upraveno z [8]....	22
Obr. 2-5: Geometrické formáty článků baterií: (a) válcové, (b) prizmatické, (c) pouzdrové [8]23	
Obr. 2-6: Moduly baterie: (a) Nissan LEAF, (b) Tesla [16].....	24
Obr. 2-7: (a) režim nabíjení 1; (b) režim nabíjení 2, (c) režim nabíjení 3 – typ připojení „A“, (d) režim nabíjení 3 – typ připojení „B“, (e) režim nabíjení 3 – typ připojení „C“, (f) režim nabíjení 4 – převzato z [18].....	28
Obr. 2-8: Schéma CCS – převzato z [18].....	29
Obr. 2-9: Porovnání typů konektorů CCS v závislosti na nabíjecím režimu a oblasti použití – převzato z [18].....	30
Obr. 3-1: Ilustrace bezpečného „okna“ provozu baterie – upraveno z [19].....	31
Obr. 3-2: Umístění baterie: (a) umístění v bezpečné zóně, (b) umístění baterie Nissan LEAF [16].....	33
Obr. 4-1: Schéma kalorimetrie v kyslíkovém válci (CSBS) [20].....	35
Obr. 4-2: Procentuální rozložení hořlavých plynů pro články na bázi grafitu při 100 % SOC [20].....	37
Obr. 4-3: Procentuální rozložení hořlavých plynů pro články LCO pro různá SOC – převzato z [20].....	38
Obr. 4-4: Porovnání normalizovaného HRR benzínu a topného oleje s normalizovaným HRR EV dle SOC – převzato z [20].....	38
Obr. 4-5: (a) proces kontinuálního šíření tepelného úniku v nepřipojeném bateriovém článku, (b) proces diskretního šíření tepelného úniku v připojeném bateriovém modulu [21].....	40
Obr. 4-6: Požární tunel INERIS pro zkoušky vozidel [22].....	41
Obr. 4-7: Porovnání HRR při požáru EV a ICEV: (a) výrobce 1, (b) výrobce 2 – převzato z [22]43	
Obr. 4-8: Zkoušená vozidla: (a) Nissan Leaf (EV), (b) Honda Fit (ICEV) [23].....	44
Obr. 4-9: Parametry zkoušky: (a) plošina k měření ztráty hmotnosti hořícího zkušební vozidla, (b) rozmístění senzorů pro měření tepelného toku [23].....	45
Obr. 4-10: Grafy ze zkoušek: (a) pokles napětí baterie v závislosti na čase, (b) porovnání HRR při požáru EV a ICEV – převzato z [23].....	46
Obr. 4-11: Porovnání HRR: (a) vozidla A – ICEV, EV 100 % SOC a EV 85 % SOC, (b) vozidla B – ICEV, EV 100 % SOC, (c) vozidlo C – PHEV 85 % SOC, (d) vozidlo D – PHEV 100 % SOC – převzato z [24].....	49
Obr. 4-12: Porovnání rychlostí rozvoje požáru s křivkami ze zkoušek pro: (a) EV a ICEV výrobce 1 z [22], (b) EV a ICEV výrobce 2 z [22], (c) EV a ICEV z [23], (d) EV a ICEV výrobce A z [24], (e) EV a ICEV výrobce B z [24], (f) PHEV výrobce C a výrobce D z [24].....	52
Obr. 5-1: Schéma hašení vozidla: (a) připojeného k nabíjecí stanici, (b) volně stojícího [15] ..	54



Obr. 5-2: (a) snímání baterie termokamerou, (b) snímek z termokamery, (c) polohování vozidla v průběhu ochlazování baterie [15].....	56
Obr. 5-3: Ponoření vozidla do vodní lázně [15].....	57
Obr. 5-4: (a) schéma a konstrukce manipulačních vozíků, (b) schéma umístění manipulačních vozíku pod vozidlem [15]	58
Obr. 8-1: Půdorys řešeného prostoru	66
Obr. 8-2: 2D model vozidla a daných rozměrů: (a) horní pohled, (b) boční pohled, (c) čelní pohled.....	70
Obr. 8-3: 3D model řešeného prostoru s umístěním vozidla	71
Obr. 8-4: Rozmístění termočlánků v modelu.....	73
Obr. 8-5: Průběh HRR EV s 100 % SOC – převzato z [22].....	73
Obr. 8-6: Závislost počtu buněk na výpočetním čase	75
Obr. 8-7: Porovnání výsledného HRR s vloženým HRR: (a) pro síť 1,0x1,0x1,0 m, (b) pro síť 0,5x0,5x0,5 m, (c) pro síť 0,25x0,25x0,25 m, (d) pro síť 0,2x0,2x0,2 m, (e) pro síť 0,15x0,15x0,15 m.....	76
Obr. 8-8: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota plynu, (b) maximální teplota plynu.....	77
Obr. 8-9: Porovnání povrchových teplot: (a) průměrná teplota plynu, (b) maximální teplota plynu.....	77
Obr. 8-10: Porovnání viditelností: (a) průměrná viditelnost po celou dobu simulace, (b) minimální viditelnost po celou dobu simulace, (c) průměrná viditelnost v prvních 100 sekundách simulace, (d) minimální viditelnost v prvních 100 sekundách simulace	78
Obr. 8-11: Porovnání koncentrací CO: (a) průměrná koncentrace, (b) maximální koncentrace, (c) průměrná koncentrace v prvních 100 sekundách simulace, (d) maximální koncentrace v prvních 100 sekundách simulace	79
Obr. 8-12: Průběh HRR pro jednotlivé výkony požáru	80
Obr. 8-13: Umístění druhého vozidla v prostoru garáže	82
Obr. 8-14: Průběh HRR pro jednotlivé typy vozidel [22]	83
Obr. 8-15: Porovnání výsledného HRR s vloženým HRR pro jednotlivé maximální výkony	84
Obr. 8-16: Referenční obrázek průběhu simulace: (a) pro maximální výkon požáru 4 MW v čase 5 sekund, (b) pro maximální výkon požáru 4 MW v čase 10 sekund, (c) pro maximální výkon požáru 6 MW v čase 5 sekund, (d) pro maximální výkon požáru 6 MW v čase 10 sekund, (e) pro maximální výkon požáru 8 MW v čase 5 sekund, (f) pro maximální výkon požáru 8 MW v čase 10 sekund	84
Obr. 8-17: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota plynu, (b) maximální teplota plynu	85
Obr. 8-18: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota povrchu, (b) maximální teplota povrchu.....	85
Obr. 8-19: Porovnání viditelností: (a) průměrná viditelnost po celou dobu simulace, (b) minimální viditelnost po celou dobu simulace, (c) průměrná viditelnost v prvních 100 sekundách simulace, (d) minimální viditelnost v prvních 100 sekundách simulace	86
Obr. 8-20: Porovnání koncentrací CO: (a) průměrná koncentrace, (b) maximální koncentrace, (c) průměrná koncentrace v prvních 100 sekundách simulace, (d) maximální koncentrace v prvních 100 sekundách simulace	87



Obr. 8-21: (a) průběhy teplot na zadní pneumatice druhého vozidla pro jednotlivé vzdálenosti vozidel, (b) průběhy HRR pro jednotlivé vzdálenosti vozidel.....	89
Obr. 8-22: Referenční obrázek průběhu simulace: (a) pro vzdálenost vozidel 0,4 m v čase 5 sekund, (b) pro vzdálenost vozidel 0,4 m v čase 10 sekund, (c) pro vzdálenost vozidel 0,6 m v čase 5 sekund, (d) pro vzdálenost vozidel 0,6 m v čase 10 sekund, (e) pro vzdálenost vozidel 0,8 m v čase 5 sekund, (f) pro vzdálenost vozidel 0,8 m v čase 10 sekund.....	89
Obr. 8-23: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota plynu, (b) maximální teplota plynu	90
Obr. 8-24: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota povrchu, (b) maximální teplota povrchu..	90
Obr. 8-25: Porovnání viditelností: (a) průměrná viditelnost po celou dobu simulace, (b) minimální viditelnost po celou dobu simulace, (c) průměrná viditelnost v prvních 100 sekundách simulace, (d) minimální viditelnost v prvních 100 sekundách simulace	91
Obr. 8-26: Porovnání koncentrací CO: (a) průměrná koncentrace, (b) maximální koncentrace, (c) průměrná koncentrace v prvních 100 sekundách simulace, (d) maximální koncentrace v prvních 100 sekundách simulace	92
Obr. 8-27: Porovnání výsledného HRR s vloženým HRR pro jednotlivé maximální výkony	93
Obr. 8-28: Referenční obrázek průběhu simulace: (a) pro požár EV s 85 % SOC v čase 20 sekund, (b) pro požár EV s 85 % SOC v čase 50 sekund, (c) pro požár EV se 100 % SOC v čase 5 sekund, (d) pro požár EV se 100 % SOC v čase 10 sekund, (e) pro požár ICEV v čase 5 sekund, (f) pro požár ICEV v čase 10 sekund.....	94
Obr. 8-29: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota plynu, (b) maximální teplota plynu	94
Obr. 8-30: Porovnání teplot: (a) průměrná teplota povrchu, (b) maximální teplota povrchu..	95
Obr. 8-31: Porovnání viditelností: (a) průměrná viditelnost po celou dobu simulace, (b) minimální viditelnost po celou dobu simulace, (c) průměrná viditelnost v prvních 100 sekundách simulace, (d) minimální viditelnost v prvních 100 sekundách simulace	95
Obr. 8-32: Porovnání koncentrací CO: (a) průměrná koncentrace, (b) maximální koncentrace, (c) průměrná koncentrace v prvních 100 sekundách simulace, (d) maximální koncentrace v prvních 100 sekundách simulace	96
Obr. 8-33: Vizualizace průběhu kouře pro scénář č. 1: Vliv výkonu požáru na teploty v prostoru hromadné garáže v daném čase.....	98
Obr. 8-34: Vizualizace průběhu teploty pro scénář č. 1: Vliv výkonu požáru na teploty v prostoru hromadné garáže ve výšce 2 m nad podlahou v daném čase.....	100
Obr. 8-35: Vizualizace průběhu kouře pro scénář č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru v daném čase.....	101
Obr. 8-36: Vizualizace průběhu teploty pro scénář č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru ve výšce 2 m nad podlahou v daném čase.....	102
Obr. 8-37: Vizualizace průběhu kouře pro scénář č. 3: Vliv vstupní křivky požáru (EV, ICEV) v daném čase.....	103
Obr. 8-38: Vizualizace průběhu teploty pro scénář č. 3: Vliv vstupní křivky požáru (EV, ICEV) ve výšce 2 m nad podlahou v daném čase.....	104
Obr. 9-1: Schéma řešené konstrukce.....	105
Obr. 9-2: Průřez stropní desky a vzdálenost výztuže od povrchu pro: a) výztuž v poli, b) výztuž nad podporou.....	106



Obr. 9-3: Vstupní křivka a normová teplotní křivka ISO 834 dle [25] 107
Obr. 9-4: Průběh teplot: a) teploty ve výztuži (horní a dolní) [44], b) maximální teploty povrchu 107
Obr. 9-5: Grafy průběhů teplot v prvku pro jednotlivé časy..... 108



Seznam tabulek

Tab. 2-1: Příklad kapacity Li-Ion baterií u různých typů elektrovozidel – převzato z [12].....	20
Tab. 2-2: Počet nabíjecích a vybíjecích cyklů v závislosti na stavu vybití [14].....	21
Tab. 4-1: Technické parametry testovaných vozidel – převzato z [23].....	43
Tab. 4-2: Podmínky zkoušky – převzato z [23].....	44
Tab. 4-3: Testovaná vozidla – převzato z [24].....	47
Tab. 4-4: Data z výsledků zkoušek po odečtení vlivu 2MW propanového hořáku [24].....	50
Tab. 6-1: Požadavky pro hromadné garáže dle [28].....	61
Tab. 8-1: Materiály vozidla a jejich charakteristiky.....	71
Tab. 8-2: Materiály a materiálové charakteristiky konstrukcí garáží.....	71
Tab. 8-3: Vstupní a okrajové podmínky pro modelování požáru.....	72
Tab. 8-4: Doporučené rozměry výpočetní sítě [39].....	74
Tab. 8-5: Rozměry výpočetní sítě pro citlivostní analýzu.....	75
Tab. 8-6: Porovnání šířek vozidel [40].....	81
Tab. 8-7: Zhodnocení jednotlivých výsledků simulace se scénářem č. 1: Vliv výkonu požáru	87
Tab. 8-8: Zhodnocení jednotlivých výsledků simulace se scénářem č. 2: Vliv vzdálenosti mezi vozidly na šíření požáru mezi jednotlivými vozidly.....	92
Tab. 8-9: Zhodnocení jednotlivých výsledků simulace se scénářem č. 3: Vliv vstupní křivky požáru.....	96



Přílohy

Příloha 1 – Požární bezpečnost garáží v zahraničí

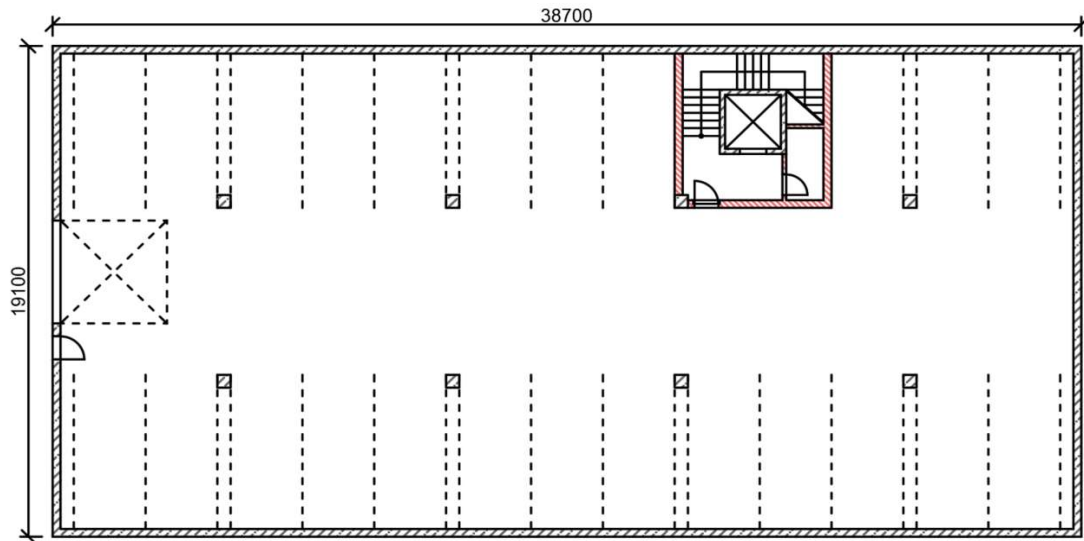
Příloha 2 – Předběžný návrh a posouzení stropní konstrukce

Příloha 3 – Ukázka zadání do programu TempAnalysis



Příloha 1a - Formulář: Stanovení požadavků a parametrů požární bezpečnosti garáží

The floor planning of the garage



The parameters of the garage:

Room area:	667,7 m ²
Construction height:	3,0 m
Clear height:	2,6 m
Number of floors:	1
Above ground/underground floor:	underground
Number of parking spaces:	24
Type of vehicles:	passenger, delivery and one-track vehicles
Door dimension:	900 x 2100 mm
Sectional gate dimension:	4000 x 2100 mm
Vertical load-bearing structures:	reinforced concrete columns 500 x 500 x 2600
Horizontal load-bearing structures:	reinforced concrete slab, thickness 400 mm
Fire separation walls construction:	masonry, thickness 300 mm
Externam walls:	reinforced walls, thickness 300 mm
Material of doors:	steel
Material of floor:	cast floor (non-flammable materials)



Final values and requirements of the fire safety of garage:

		according to Czech Technical Standard for Fire Safety:	according to XX:
Fire safety of garages (codes and standartds):		ČSN 73 0804, annex I (code: Fire safety of buildings. Production facilities)	
Fire safety of garages according to electromobility (codes and standards):		Methodological recommendations of the Fire and Rescue Service (HZS)	
Number of fire compartments of garages:		1 (depends on number of parking and fire safety equipment)	
Permanent fire load:		0 kg/m ² (depends on: flammable material in doors (gates), windows and floor (or flammable material in or at structures, e.g. Indoor insulation))	
Incidental fire load:		10 kg/m ² (according to code ČSN 73 0802, annex A - garages and cleaning areas for passenger, delivery and one-track vehicles)	
Fire risk:		represent as equivalent duration of the fire according to the calculation of equivalent duration of the fire ¹⁾ or use values without calculation: $\tau_e = 15 \text{ kg/m}^2$ (garages for passenger, delivery and one-track vehicles) $\tau_e = 45 \text{ kg/m}^2$ (garages for lorries, buses, special vehicles and tractors)	
Economic risk:		represent as highest number of parking space	
Degree of fire safety: (without the influence of electromobility)		I. (depends on: equivalent duration of fire, fire height, construction system, number of floors)	
Degree of fire safety: (according to electromobility)		IV. (doesn't depends on: equivalent duration of fire, fire height, construction system, number of floors)	
Required fire resistance of: (without the influence of electromobility)	fire separation walls (for underground floor)	REI 30 (min)	
	external walls (for underground floor)	REW 30 (min)	
	roof load-bearing construction (for underground floor)	REI 30 (min)	
Required fire resistance of: (without the influence of electromobility)	internal load-bearing construction (for underground floor)	R 30 (min)	
	openings - door to stairwell space (for underground floor)	EI 15 (min)	



		according to Czech Technical Standard for Fire Safety:	according to XX:
Required fire resistance of: (according to electromobility)	fire separation walls (for underground floor)	REI 90 (min)	
	external walls (for underground floor)	REW 90 (min)	
	roof load-bearing construction (for underground floor)	REI 90 (min)	
	internal load-bearing construction (for underground floor)	R 90 (min)	
	openings - door to stairwell space (for underground floor)	EI 45 (min)	
Requested fire safety equipment: (without the influence of electromobility)	fire alarm system (EPS)	NO (required if: number of parking space is higher than 20 % of allowed number of parking space, cooperation of other fire safety equipment - SHZ, ZOKT)	
	sprinkler system (SHZ)	NO (required if: closed garages in underground floor, possible without SHZ in the first underground floor if there is direct exit to free space)	
	fire ventilation systém (ZOKT)	NO (required if: closed garages in underground floor if there is a requirement for partially open fire department)	
Requested fire safety equipment: (according to electromobility)	fire alarm system (EPS)	YES (the installation of the EPS system is recommended, while the connection of the EPS system to the central protection desk (PCO) of the local HZS region is preferred)	
Requested fire safety equipment: (according to electromobility)	sprinkler system (SHZ)	YES (recommended to install SHZ in the fire department of collective garages or at least in their parts with parking spaces for recharging electric vehicles)	
	fire ventilation systém (ZOKT)	YES (recommended to install ZOKT in the fire department of collective garages or at least in their parts with parking spaces for recharging electric vehicles. In the case of changes to existing buildings, ZOKT recommends up to 4 charging points in one fire department)	
Author of the Fire Safety Design:		authorized fire safety engineer (for planning and building permit)	
Other ²⁾ :			



-
- ¹⁾ Equivalent duration of fire The equivalent duration of fire is a time during which the fire effects on the constructions. The fire proceeds according to the standard temperature-time curve (ISO 834) – EN 1991-1-2, eq. 3.4. The fire produces the same effects as a fully developed fire.
- ²⁾ Others Add other important parameters,.



Příloha 1b - Porovnání výsledků

	according to Czech Technical Standard for Fire Safety:	according to The UAE Fire and Life Safety Code of Practice 2018:	according to Saudi Building Code 2018, SBC 201 and SBC 801:	according to BS 9991:2015 and BS 9999:2017:
Fire safety of garages (codes and standards):	Czech Technical Standard 73 0804, annex I (code: Fire safety of buildings. Production facilities)			
Fire safety of garages according to electromobility (codes and standards):	Methodological recommendations of the Fire brigade and code proposal for fire safety of garages	None exist for EV	None exist for EV	None enforceable for EV
Number of fire compartments of garages:	1 (depends on number of parking spots and fire safety equipment)	1	1	1
Permanent fire load:	0 kg/m² (depends on: flammable material in doors (gates), windows and floor (or flammable material in or at structures, e.g. Indoor insulation))	N/A Fire load concept not used	N/A Fire load concept not used	N/A Fire load concept not used
Variable fire load:	10 kg/m² (according to code Czech Technical Standard 73 0802, annex A - garages and cleaning areas for passenger, delivery and one-track vehicles)	N/A Fire load concept not used	N/A Fire load concept not used	N/A Fire load concept not used
Fire risk:	represent as equivalent duration of the fire according to the calculation of equivalent duration of the fire ¹⁾ or use values without calculation: $\tau_e = 15$ min (garages for passenger, delivery and one-track vehicles)	Concept not used in the relevant code.	Concept not used in the relevant code.	Concept not used in the relevant code.
Economic risk:	represent as highest number of parking plots	Concept not used in the relevant code.	Concept not used in the relevant code.	Concept not used in the relevant code.
Degree of fire safety: (without the influence of electromobility)	I. (depends on: equivalent duration of fire, fire height, construction system, number of floors)	Concept not used in the relevant code.	Concept not used in the relevant code.	Concept not used in the relevant code.
Degree of fire safety: (according to electromobility)	IV. (fixed value without parameter influence)	Concept not used in the relevant code.	Concept not used in the relevant code.	Concept not used in the relevant code.



Required fire resistance of: (without the influence of electromobility)	fire separation walls (for underground floor)	REI 30 (min) , (determined on the basis of the degree of fire safety)	EI 60 for walls REI 120 for shafts	EI 60 for walls REI 120 for shafts	EI 60 for walls REI 120 for shafts
	external walls (for underground floor)	REW 30 (min) , (determined on the basis of the degree of fire safety)	R120 if load-bearing EI can be 0 if external fire spread (to other buildings) is not a problem	Depending on design approach (and type of construction) can be R60 - R120 EI can be 0 if external fire spread (to other buildings) is not a problem	R90 if load-bearing EI can be 0 if external fire spread (to other buildings) is not a problem
	roof load-bearing construction (for underground floor)	REI 30 (min) , (determined on the basis of the degree of fire safety)	R120 (slab between parking and apartments)	Depending on design approach (and type of construction) can be R60-120 (slab between parking and apartments)	R90 (slab between parking and apartments)
	internal load-bearing construction (for underground floor)	R 30 (min) , (determined on the basis of the degree of fire safety)	R120	Depending on design approach (and type of construction) can be R60 - R120	R60
	openings - door to stairwell space (for underground floor)	EI 15 (min) , (determined on the basis of the degree of fire safety)	EI2 90	EI2 90	EI2 60
Required fire resistance of: (according to electromobility)	fire separation walls (for underground floor)	REI 90 (min) , (determined on the basis of the degree of fire safety)	EI 60 for walls REI 120 for shafts	EI 60 for walls REI 120 for shafts	EI 60 for walls REI 120 for shafts
	external walls (for underground floor)	REW 90 (min) , (determined on the basis of the degree of fire safety)	R120 if load-bearing EI can be 0 if external fire spread (to other buildings) is not a problem	Depending on design approach (and type of construction) can be R60 - R120 EI can be 0 if external fire spread (to other buildings) is not a problem	R90 if load-bearing EI can be 0 if external fire spread (to other buildings) is not a problem
	roof load-bearing construction (for underground floor)	REI 90 (min) , (determined on the basis of the degree of fire safety)	R120 (slab between parking and apartments)	Depending on design approach (and type of construction) can be R60-120 (slab between parking and apartments)	R90 (slab between parking and apartments)
	internal load-bearing construction (for underground floor)	R 90 (min) , (determined on the basis of the degree of fire safety)	R120	Depending on design approach (and type of construction) can be R60 - R120	R60
	openings - door to stairwell space (for underground floor)	EI 45 (min) , (determined on the basis of the degree of fire safety)	EI2 90	EI2 90	EI2 60
Requested fire safety equipment: (without the influence of electromobility)	fire alarm system (FAS)	NO (required if: number of parking plots is higher than 20 % of allowed number of parking plots, cooperation of other fire safety equipment - FSS,FVS)	Yes	Yes	Yes
	sprinkler system (FSS)	NO (required if: closed garages in underground floor, possible without FSS in the first underground floor if there is direct exit to free place)	No Can be omitted if building is small, not typical in the region. Most apartments and buildings are sprinkler protected.	Yes Required for residential apartments.	No Not required for shallow basements or low-rise buildings.
	fire ventilation system (FVS)	NO (required if: closed garages in underground floor if there is a requirement for partially open fire department)	No Not required for enclosed parking up to 3600sqm.	No Not required if basement is not deeper than 9m below fire brigade access level.	Yes Can be achieved through natural openings, typically equivalent to at least 2.5% of floor area.



Requested fire safety equipment: (according to electromobility)	fire alarm system (FAS)	YES (the installation of the FAS system is recommended, while the connection of the FAS system to the central protection desk of the local fire brigade region is preferred)	Yes	Yes	Yes
	sprinkler system (FSS)	YES (recommended to install FSS in the fire department of collective garages or at least in their parts with parking plots for recharging electric vehicles)	No Can be omitted if building is small, not typical in the region. Most apartments and buildings are sprinkler protected.	Yes Required for residential apartments.	No Not required for shallow basements or low-rise buildings.
	fire ventilation system (FVS)	YES (recommended to install FVS in the fire department of collective garages or at least in their parts with parking plots for recharging electric vehicles. In the case of changes to existing buildings, FVS recommends up to 4 charging points in one fire department)	No Not required for enclosed parking up to 3600sqm.	No Not required if basement is not deeper than 9m below fire brigade access level.	Yes Can be achieved through natural openings, typically equivalent to at least 2.5% of floor area.
Author of the Fire Safety Design:		authorized fire safety engineer (for planning and building permit)	Can be either: - Lead design consultant - Architect - Contractor - Fire safety specialist Request for approval must be submitted by a licensed Architect of Record.	Can be either: - Lead design consultant - Architect - Contractor - Fire safety specialist Request for approval must be submitted by a licensed Architect of Record.	Fire safety specialist; e.g., major fire safety consultant
Other ²⁾ :			Note: 1. Electric vehicles are not considered by the building code. 2. Questionnaire answered from memory without detailed code review. 3. The building code does not use REI concept, values above are approximately related.	Note: 1. Electric vehicles are not considered by the building code. 2. Questionnaire answered from memory without detailed code review. 3. The building code does not use REI concept, values above are approximately related.	Note: 1. Electric vehicles are not considered by the building code. 2. Questionnaire answered from memory without detailed code review. 3. UK has published industry guidance assisting with the design of EV spaces, this is: <i>RC59: Recommendations for fire safety when charging electric vehicles</i>

¹⁾ **Equivalent duration of fire** The equivalent duration of fire is a time during which the fire effects on the constructions. The fire proceeds according to the standard temperature-time curve (ISO 834) – EN 1991-1-2, eq. 3.4. The fire produces the same effects as a fully developed fire.

²⁾ **Others** Add other important parameters, which determine the fire resistance of constructions.



Příloha 2 – Předběžný návrh a posouzení stropní konstrukce

Pro účely této diplomové práce je proveden předběžný návrh a posouzení železobetonové spojitě desky dle ČSN EN 1992-1-1 [43]. Vzhledem ke zjednodušení je navržena a posouzena pouze stropní desková konstrukce. Návrh je proveden jako zjednodušený pro spojitě zatížení, kde není uvažováno s jednotlivými zatěžovacími stavy.

Materiálové charakteristiky:

BETON: C 30/37

- $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1,5} = \frac{30}{1,5} = 20 \text{ MPa}$
- $f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$
- $f_{ctk0,05} = 2,0 \text{ MPa}$
- $\epsilon_{cu3} = 0,35 \%$
- $E_c = 32 \text{ GPa}$
- $\rho_c = 2500 \text{ kg/m}^3$

OCEL: B500B

- $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$
- $f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1,15} = \frac{500}{1,15} = 434,78 \text{ MPa}$
- $E_s = 200\,000 \text{ MPa}$
- $\epsilon_s = \frac{f_{yd}}{E_s} = \frac{434}{200\,000} = 0,217 \%$
- $\xi_{bal} = \frac{\epsilon_{cu3}}{\epsilon_{cu3} + \epsilon_s} = \frac{0,35}{0,35 + 0,217} = 0,616$

Předběžný návrh rozměrů:

$$h_d = \left(\frac{1}{25} - \frac{1}{30} \right) \cdot l = \left(\frac{1}{25} - \frac{1}{30} \right) \cdot 7000 = 280 - 233 \text{ mm}$$

Návrh: tloušťka stropní desky 250 mm.

Zatížení stropní konstrukce:

Tab. P.2-1: Zatížení

Typ zatížení	Název	Tloušťka [mm]	Objemová tíha [kg/m ³]	Char. zatížení [kN/m ²]	Souč. γ_i [-]	Návrh. zatížení [kN/m ²]
Stálé	Vlastní tíha desky	250	2500	6,25	1,35	8,44
Stálé	Tíha podlahy (zjednodušeně)	100	2000	2,0	1,35	2,70
Proměnné	Užitné kat. A	-	-	1,5	1,50	2,25
Proměnné	Přemýstitelné přičky	-	-	1,2	1,50	1,80
Celkem						15,19



Stanovení krytí:

Vstupní parametry:

Předpokládaná výztuž: $\varnothing_d = 10 \text{ mm}$ (odhad)

Stupeň vlivu prostředí: XC1

Třída konstrukce: S4

Životnost: 50 let

Minimální krycí vrstva:

$$c_{\min} = \max(c_{\min,b}; c_{\min,dur} + \Delta c_{dur,y} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}) = 10 \text{ mm}$$

$c_{\min,b} = \varnothing_d = 10 \text{ mm}$ minimální krycí vrstva z hlediska soudržnosti

$c_{\min,dur} = 10 \text{ mm}$ minimální krycí vrstva z hlediska podmínek prostředí

$$\Delta c_{dur,y} = 0 \text{ mm}, \Delta c_{dur,st} = 0 \text{ mm}, \Delta c_{dur,add} = 0 \text{ mm}$$

Návrhová odchylka

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$$

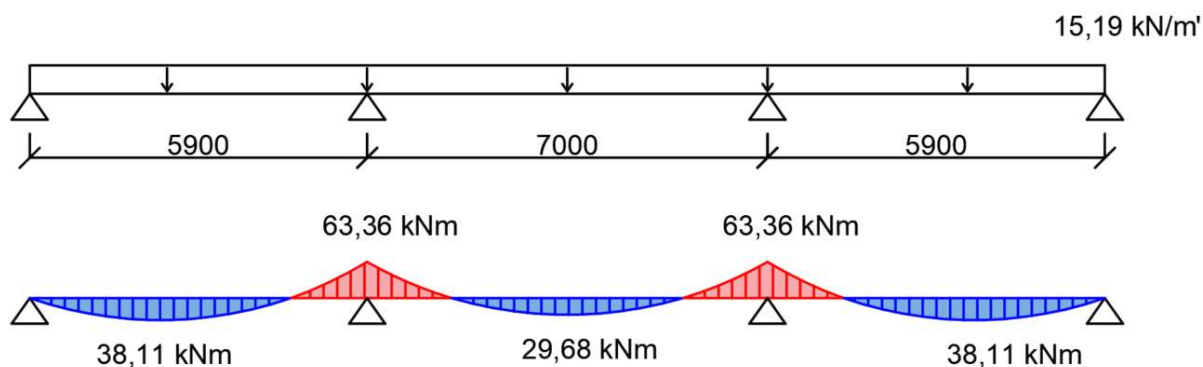
Nominální krycí vrstva:

$$c_{nom} = c_{\min} + \Delta c_{dev} = 10 + 10 = 20 \text{ mm} \rightarrow c_{nom} = 20 \text{ mm}$$

Návrh: krycí vrstva výztuže $c = 25 \text{ mm}$.

Průběh vnitřních sil:

Stropní deska působí jako spojitý nosník, průběh vnitřních sil je určen pomocí SCIA Engineer.



Obr. P2-1: Zatížení na konstrukci a průběh vnitřních sil



Návrh ohybové výztuže v prvním a posledním poli na MSÚ:

Vstupní hodnoty:

Beton: C 30 / 37

$$f_{ck} = 30 \text{ [MPa]}$$

$$f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c = 20,0 \text{ [MPa]}$$

$$f_{ctm} = 2,9 \text{ [MPa]}$$

$$E_{cm} = 32 \text{ [GPa]}$$

Výztuž: ocel B500B

$$f_{yk} = 500 \text{ [MPa]}$$

$$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 434,78 \text{ [MPa]}$$

$$E_s = 200 \text{ [GPa]}$$

Geometrie:

tloušťka desky: $h = 250 \text{ [mm]}$

šířka desky: $b_p = 1000 \text{ [bmm]}$

Navržená výztuž:

ohybová $\varnothing = 10 \text{ [mm]}$

Krycí vrstva:

$$c_{nom} = 25 \text{ [mm]}$$

Maximální velikost zrna kameniva:

$$D_{max} = 16 \text{ [mm]}$$

Maximální moment:

$$M_{Ed} = 39,11 \text{ [kNm]}$$

Návrh plochy výztuže:

účinná výška průřezu: $d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 220 \text{ [mm]}$

rameno vnitřních sil: $z = 0,9 \cdot d = 198,00 \text{ [mm]}$

odhad plochy výztuže: $A_{s,req} = \frac{M_{Ed} \cdot 10^6}{z \cdot f_{yd}} = 454,31 \text{ [mm}^2\text{]}$

Návrh: $\varnothing 10 \text{ mm po } 150 \text{ mm}$

$$A_{s,prov} = 471,239 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Výpočet únosnosti průřezu:

výška tlačené oblasti: $x = \frac{A_{s,prov} \cdot f_{yd}}{0,8 \cdot b \cdot f_{cd}} = 12,81 \text{ [mm]}$

rameno vnitřních sil: $z = d - 0,4 \cdot x = 214,88 \text{ [mm]}$

moment únosnosti: $M_{Rd} = A_{s,prov} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot 10^{-6} = 44,03 \text{ [kNm]}$

$$M_{Rd} = 44,03 \text{ [kNm]} > M_{Ed} = 39,11 \text{ [kNm]}$$

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,06$$

VYHOVUJE

<

$$\xi_{bal} = 0,45$$

VYHOVUJE

$$\text{Využití} = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \cdot 100 = 88,83 \text{ [%]}$$

Konstrukční zásady:

$$A_{s,min} = \max\left(0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d; 0,0013 \cdot b \cdot d\right) = 331,76 \text{ [mm}^2\text{]} < A_{s,prov} = 471,24 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot b \cdot h = 10000,00 \text{ [mm}^2\text{]} > A_{s,prov} = 471,24 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$s_{t,min} = \max(1,2 \cdot \varnothing; D_{max} + 5; 20 \text{ mm}) = 21,0 \text{ [mm]} < s_1 = 140,00 \text{ [mm]}$$

$$s_{max} = 200,0 \text{ [mm]} > s = 150,00 \text{ [mm]}$$

KONSTRUKČNÍ ZÁSADY VYHOVUJÍ

Obr. P2-2: Návrh ohybové výztuže v prvním a posledním poli



Návrh ohybové výztuže v nad podporou na MSÚ:

Vstupní hodnoty:

Beton: C 30 / 37

$$f_{ck} = 30 \text{ [MPa]}$$

$$f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c = 20,0 \text{ [MPa]}$$

$$f_{ctm} = 2,9 \text{ [MPa]}$$

$$E_{cm} = 32 \text{ [GPa]}$$

Výztuž: ocel B500B

$$f_{yk} = 500 \text{ [MPa]}$$

$$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 434,78 \text{ [MPa]}$$

$$E_s = 200 \text{ [GPa]}$$

Geometrie:

tloušťka desky: $h = 250 \text{ [mm]}$

šířka desky: $b_p = 1000 \text{ [bmm]}$

Navržená výztuž:

ohybová $\varnothing = 10 \text{ [mm]}$

Krycí vrstva:

$$c_{nom} = 25 \text{ [mm]}$$

Maximální velikost zrna kameniva:

$$D_{max} = 16 \text{ [mm]}$$

Maximální moment:

$$M_{Ed} = 63,36 \text{ [kNm]}$$

Návrh plochy výztuže:

účinná výška průřezu: $d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 220 \text{ [mm]}$

rameno vnitřních sil: $z = 0,9 \cdot d = 198,00 \text{ [mm]}$

odhad plochy výztuže: $A_{s,req} = \frac{M_{Ed} \cdot 10^6}{z \cdot f_{yd}} = 736,00 \text{ [mm}^2\text{]}$

Návrh: $\varnothing 10 \text{ mm po } 100 \text{ mm}$

$$A_{s,prov} = 785,398 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Výpočet únosnosti průřezu:

výška tlačené oblasti: $x = \frac{A_{s,prov} \cdot f_{yd}}{0,8 \cdot b \cdot f_{cd}} = 21,34 \text{ [mm]}$

rameno vnitřních sil: $z = d - 0,4 \cdot x = 211,46 \text{ [mm]}$

moment únosnosti: $M_{Rd} = A_{s,prov} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot 10^{-6} = 72,21 \text{ [kNm]}$

$$M_{Rd} = 72,21 \text{ [kNm]} > M_{Ed} = 63,36 \text{ [kNm]}$$

VYHOVUJE

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,10$$

<

$$\xi_{bal} = 0,45$$

VYHOVUJE

$$\text{Využití} = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \cdot 100 = 87,74 \text{ [%]}$$

Konstrukční zásady:

$$A_{s,min} = \max\left(0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d; 0,0013 \cdot b \cdot d\right) = 331,76 \text{ [mm}^2\text{]} < A_{s,prov} = 785,40 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot b \cdot h = 10000,00 \text{ [mm}^2\text{]} > A_{s,prov} = 785,40 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$s_{t,min} = \max(1,2 \cdot \varnothing; D_{max} + 5; 20 \text{ mm}) = 21,0 \text{ [mm]} < s_1 = 90,00 \text{ [mm]}$$

$$s_{max} = 200,0 \text{ [mm]} > s = 100,00 \text{ [mm]}$$

KONSTRUKČNÍ ZÁSADY VYHOVUJÍ

Obr. P2-3: Návrh ohybové výztuže nad podporou



Návrh ohybové výztuže v prostředním poli na MSÚ:

Vstupní hodnoty:

Beton: C 30 / 37

$$f_{ck} = 30 \text{ [MPa]}$$

$$f_{cd} = f_{ck}/\gamma_c = 20,0 \text{ [MPa]}$$

$$f_{ctm} = 2,9 \text{ [MPa]}$$

$$E_{cm} = 32 \text{ [GPa]}$$

Výztuž: ocel B500B

$$f_{yk} = 500 \text{ [MPa]}$$

$$f_{yd} = f_{yk}/\gamma_s = 434,78 \text{ [MPa]}$$

$$E_s = 200 \text{ [GPa]}$$

Geometrie:

tloušťka desky: $h = 250 \text{ [mm]}$

šířka desky: $b_p = 1000 \text{ [bmm]}$

Navržená výztuž:

ohybová $\varnothing = 10 \text{ [mm]}$

Krycí vrstva:

$$c_{nom} = 25 \text{ [mm]}$$

Maximální velikost zrna kameniva:

$$D_{max} = 16 \text{ [mm]}$$

Maximální moment:

$$M_{Ed} = 29,68 \text{ [kNm]}$$

Návrh plochy výztuže:

účinná výška průřezu: $d = h - c - \frac{\varnothing}{2} = 220 \text{ [mm]}$

rameno vnitřních sil: $z = 0,9 \cdot d = 198,00 \text{ [mm]}$

odhad plochy výztuže: $A_{s,req} = \frac{M_{Ed} \cdot 10^6}{z \cdot f_{yd}} = 344,77 \text{ [mm}^2\text{]}$

Návrh: $\varnothing 10 \text{ mm po } 200 \text{ mm}$

$$A_{s,prov} = 392,699 \text{ [mm}^2\text{]}$$

Výpočet únosnosti průřezu:

výška tlačené oblasti: $x = \frac{A_{s,prov} \cdot f_{yd}}{0,8 \cdot b \cdot f_{cd}} = 10,67 \text{ [mm]}$

rameno vnitřních sil: $z = d - 0,4 \cdot x = 215,73 \text{ [mm]}$

moment únosnosti: $M_{Rd} = A_{s,prov} \cdot f_{yd} \cdot z \cdot 10^{-6} = 36,83 \text{ [kNm]}$

$$M_{Rd} = 36,83 \text{ [kNm]} > M_{Ed} = 29,68 \text{ [kNm]}$$

VYHOVUJE

$$\xi = \frac{x}{d} = 0,05$$

<

$$\xi_{bal} = 0,45$$

VYHOVUJE

$$\text{Využití} = \frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \cdot 100 = 80,58 \text{ [%]}$$

Konstrukční zásady:

$$A_{s,min} = \max\left(0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d; 0,0013 \cdot b \cdot d\right) = 331,76 \text{ [mm}^2\text{]} < A_{s,prov} = 392,70 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot b \cdot h = 10000,00 \text{ [mm}^2\text{]} > A_{s,prov} = 392,70 \text{ [mm}^2\text{]}$$

$$s_{t,min} = \max(1,2 \cdot \varnothing; D_{max} + 5; 20 \text{ mm}) = 21,0 \text{ [mm]} < s_1 = 190,00 \text{ [mm]}$$

$$s_{max} = 200,0 \text{ [mm]} > s = 200,00 \text{ [mm]}$$

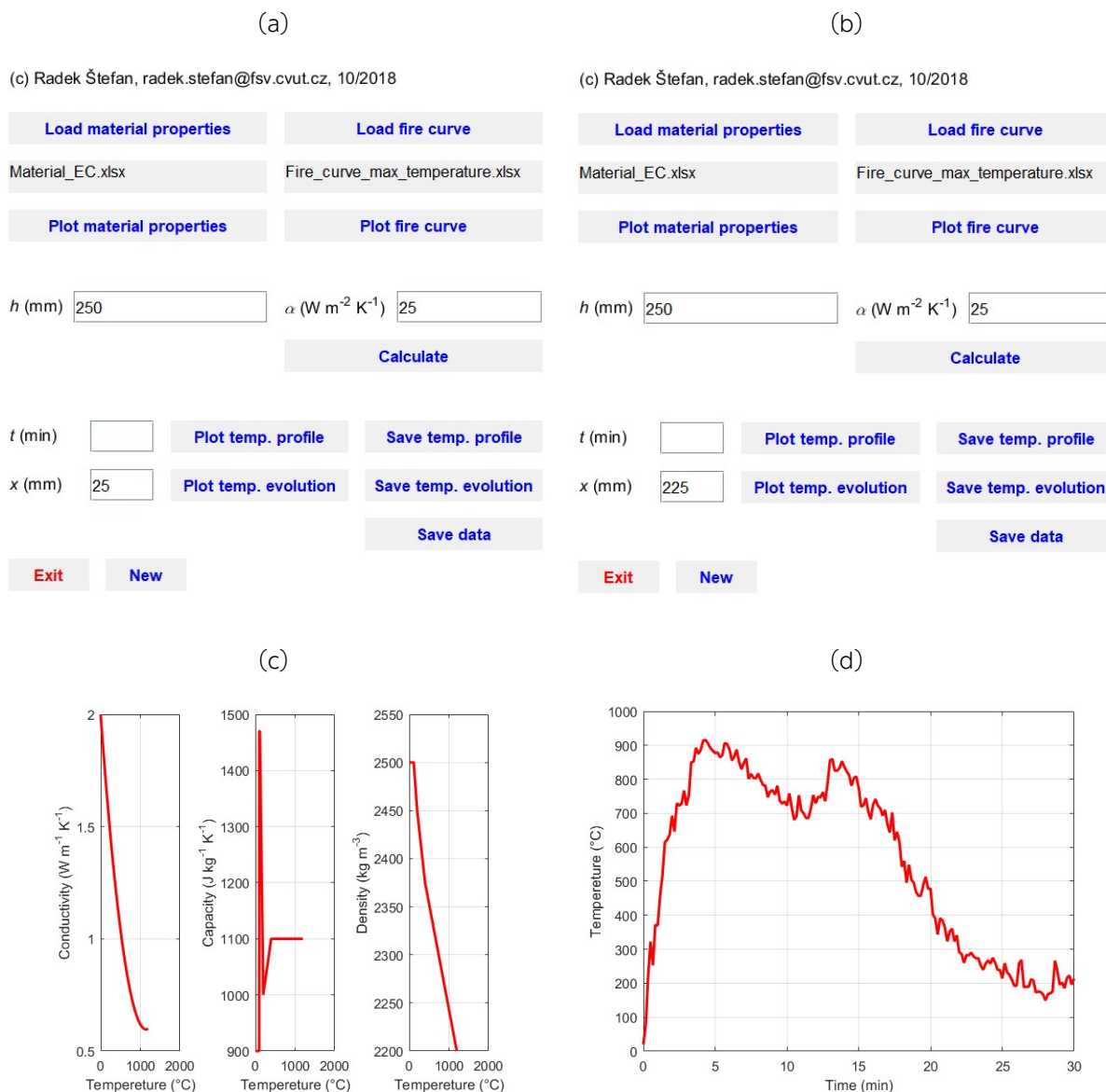
KONSTRUKČNÍ ZÁSADY VYHOVUJÍ

Obr. P2-4: Návrh ohybové výztuže v prostředním poli

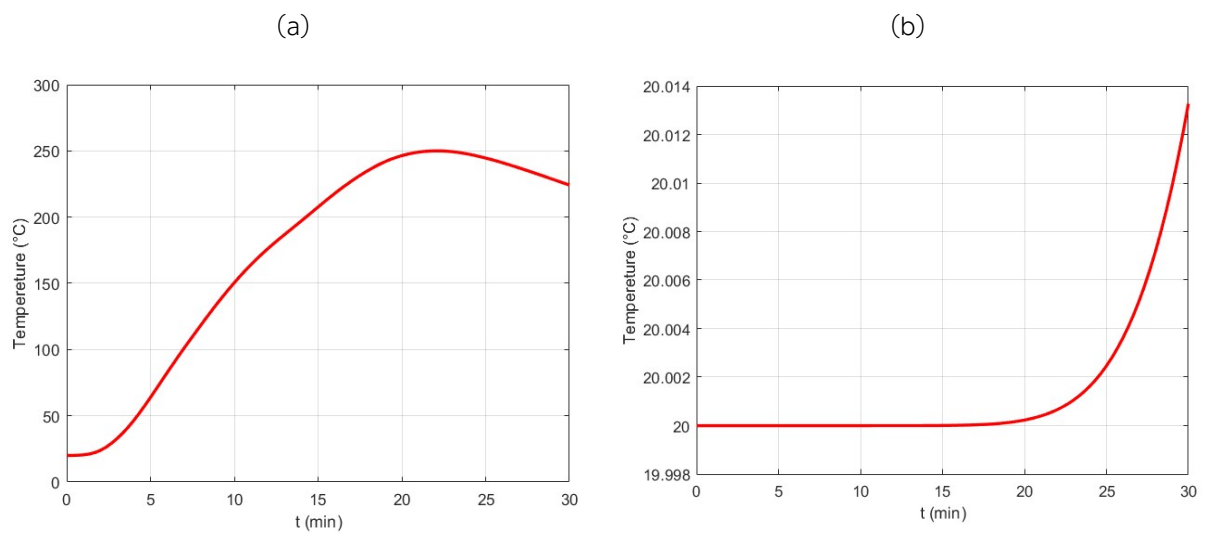


Příloha 3 – Ukázka zadání do programu TempAnalysis

Ukázka zadání pro řešení průběhu teplot ve výztuži je znázorněna na Obr. P3-1 a Obr. P3-2.



Obr. P3-1: Ukázka zadání do programu TempAnalysis [44]: a) nastavení výpočtu pro spodní výztuž; b) nastavení výpočtu pro horní výztuž; c) materiálové charakteristiky; d) vstupní teplotní křivka



Obr. P3-2: Ukázka výsledků z programu TempAnalysis [44]: a) průběh teploty ve spodní výztuži;
b) průběh teploty v horní výztuži