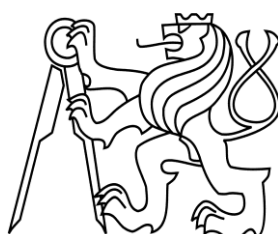


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

ANALÝZA ODSUPOVÝCH VZDÁLENOSTÍ OD PERGOL A PŘÍSTŘEŠKŮ

ANALYSIS OF SEPARATING DISTANCES FROM PERGOLAS
AND SHELTERS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Bc. Zdeněk Jiříček

vedoucí práce: Ing. Marek Pokorný, Ph.D.

2018



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Juříček</u>	Jméno: <u>Zdeněk</u>	Osobní číslo: <u>468321</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra konstrukcí pozemních staveb</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Integrovaná bezpečnost staveb</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Analýza odstupových vzdáleností od pergol a přístřešků</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Analysis of Separating Distances from Pergolas and Shelters</u>	
Pokyny pro vypracování:	
1) Analýza požárních rizik a rozbor skutečných požárů dřevěných pergol a přístřešků	
2) Možnosti stanovení odstupových vzdáleností	
3) Matematický CFD model definující rozdílné chování pergol a přístřešků	
4) Návrh změněného fyzikálního modelu a realizace malorozměrové požární zkoušky pergoly a přístřešku včetně CFD modelu	
5) Validace CFD modelu na základě srovnání s požární zkouškou	
Seznam doporučené literatury:	
1) České technické normy řady ČSN 73 08xx - Požární bezpečnost staveb	
2) SFPE handbook of fire protection engineering. 3rd ed. Bethesda, Md.: Society of Fire Protection Engineers, c2002. ISBN 0877654514	
3) Odborné knihy v edici Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství	
4) Fire Dynamics Simulator User's Guide. 6th ed. NIST, Fire Research Division Engineering Laboratory Gaithersburg, Maryland, USA, 2014	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Marek Pokorný, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>2.10.2017</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>7.1.2018</u>
<i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>	
_____	_____
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>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“.</i>	
_____	_____
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Zdeněk Jiříček

Název diplomové práce: Analýza odstupových vzdáleností od pergol a přístřešků

Základní část: Analýza odstupových vzdáleností od pergol a přístřešků podíl: 100 %

Formulace úkolů:

1) Analýza požárních rizik a rozbor skutečných požárů dřevěných pergol a přístřešků

2) Možnosti stavení odstupových vzdáleností

3) Matematický CFD model definující rozdílné chování pergol a přístřešků

4) Návrh zmenšeného fyzikálního modelu a realizace malorozměrové požární zkoušky pergoly a přístřešku včetně CFD modelu

5) Validace CFD modelu na základě srovnání s požární zkouškou

Podpis vedoucího DP: Datum:

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

-

-

Podpis konzultanta: Datum:

3. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

-

-

Podpis konzultanta: Datum:

4. Část: - podíl: - %

Konzultant (jméno, katedra): -

Formulace úkolů: -

-

-

Podpis konzultanta: Datum:

Poznámka: Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci (vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci s názvem „Analýza odstupových vzdáleností od pergol a přístřešků“ vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Marka Pokorného, Ph.D. a veškeré informace jsem čerpal pouze z uvedených informačních zdrojů.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o autorském právu, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 7. 1. 2018

.....

Bc. Zdeněk Jiríček

Poděkování

Rád bych na tomto místě poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Marku Pokornému, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a především za pomoc při realizaci požárního experimentu. Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Eliášovi za poskytnutí přístupu k výkonné výpočetní stanici, na které jsem prováděl matematické CFD simulace. Nejdůležitější část mého poděkování patří především mým rodičům, kteří mi poskytli zázemí a podporu při studiu vysoké školy.

Obsah

Prohlášení	III
Poděkování	IV
Obsah	V
Abstrakt	VII
Abstract	VIII
Seznam použitých symbolů a zkratk	IX
1 Úvod	1
1.1 Motivace.....	1
1.2 Struktura diplomové práce	2
1.3 Cíl práce	3
2 Současný stav poznání	4
2.1 Úvod do problematiky	4
2.1.1 Pergoly	5
2.1.2 Přístřešky.....	5
2.1.3 Konstrukční a materiálové provedení	6
2.2 Problematika odstupových vzdáleností.....	8
2.2.1 Definice odstupových vzdáleností	8
2.2.2 Možnosti určení odstupových vzdáleností	10
2.3 Faktory ovlivňující odstupové vzdálenosti	13
2.3.1 Požární zatížení	13
2.3.2 Konstrukční části a systémy.....	14
2.3.3 Požární otevřenost ploch.....	16
2.3.4 Hustota tepelného toku.....	17
2.3.5 Teplotní křivky.....	21
2.4 Matematické modelování požáru	22
2.4.1 Zvolený program pro simulaci požáru	22
2.5 Dílčí závěr	23
3 Výpočetní část – matematický CFD model	25
3.1 Úvod.....	25
3.2 Tepelně a požárně technická charakteristika materiálů	25
3.3 Výpočetní oblast (MESH).....	29
3.3.1 Výpočetní oblast pergoly	29
3.3.2 Výpočetní oblast přístřešku.....	30
3.4 Výsledky matematického modelu pergoly.....	31
3.5 Výsledky matematického modelu přístřešku	34
3.6 Dílčí závěr	37
4 Experimentální část – požární experiment	39
4.1 Úvod.....	39
4.1.1 Cíle experimentální části.....	39
4.2 Návrh a výroba modelů.....	40
4.3 Příprava experimentu	41

4.3.1	Požární laboratoř	41
4.3.2	Zápalný zdroj	42
4.3.3	Použitá měřicí zařízení.....	44
4.3.4	Umístění modelů	45
4.4	Průběh experimentu	46
4.4.1	Experiment 1 - model pergoly	46
4.4.2	Experiment 2 - model přístřešku.....	48
4.5	Výsledky experimentu	50
4.5.1	Stanovení HRR výpočtem.....	50
4.5.2	Rozbor výsledků modelu pergoly	54
4.5.3	Rozbor výsledků modelu přístřešku.....	57
4.6	Dílčí závěr	61
5	Porovnání výsledků CFD simulací s výsledky požárních experimentů	65
5.1	Úvod.....	65
5.2	Porovnání výsledků CFD simulace a požárního experimentu pro model pergoly	65
5.3	Porovnání výsledků CFD simulace a požárního experimentu pro model přístřešku.....	68
5.4	Dílčí závěr	72
6	Závěr	73
6.1	Aplikace získaných poznatků při určování odstupových vzdáleností pro pergoly	73
6.1.1	Velikost požárně otevřené plochy	73
6.1.2	Shrnutí pro model pergoly	75
6.2	Aplikace získaných poznatků při určování odstupových vzdáleností pro přístřešky	76
6.2.1	Velikost požárně otevřené plochy.....	76
6.2.2	Shrnutí pro model přístřešku.....	77
6.3	Celkový závěr	78
6.4	Náměty pro další práci	79
	Seznam obrázků.....	80
	Seznam tabulek	81
	Seznam grafů.....	81
	Seznam vztahů.....	82
	Literatura	83
	Příloha 1 – Analýza skutečného požáru přístřešku pro osobní automobil.....	85
	Příloha 2 – Výroba modelů	88
	Příloha 3 – Porovnání sekvenčních snímků požáru pergoly.....	90
	Příloha 4 – Porovnání sekvenčních snímků požáru přístřešku	93
	Příloha 5 – Zdrojové kódy matematických modelů.....	95

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá rozdílem v posuzování odstupových vzdáleností od pergol a přístřešků. Cílem práce je zjištění vlivu střešního pláště na šíření a rozvoj požáru. Teoretická část pojednává o problematice určování odstupových vzdáleností obecně od stavebních objektů i od pergol a přístřešků. Dle norem požární bezpečnosti se pergola a přístřešek dají z hlediska odstupových vzdáleností posuzovat jako otevřený objekt nebo volný sklad, kde každý z těchto objektů má specifický postup pro výpočet odstupových vzdáleností. Praktická část diplomové práce se zabývá vizuálním a numerickým rozborem požáru fyzikálních modelů pergoly a přístřešku. První část řeší matematickou CFD simulaci požáru pergoly a přístřešku s následným vizuálním i numerickým vyhodnocením. Pozornost je kladena na šíření požáru v oblasti střešního pláště. Větší důraz je kladen na požární experiment modelu pergoly a přístřešku, kde je sledován rozvoj a šíření požáru u pergoly bez střešního pláště a u přístřešku se střešním pláštěm. Matematické CFD simulace jsou v samostatné části porovnány s požárními experimenty za účelem jejich validace. Závěr práce se věnuje vyhodnocení získaných poznatků a řeší jejich aplikaci při stanovení odstupových vzdáleností od pergol a přístřešků, a to především z hlediska výše požárního rizika a velikosti požárně otevřených ploch.

Klíčová slova

pergola, přístřešek, odstupová vzdálenost, požární riziko, Computational Fluid Dynamics (CFD), šíření plamene, střešní plášť, požárně otevřená plocha

Abstract

The diploma thesis deals with the difference in the assessment of separating distances from pergolas and shelters. The thesis aims to find out an influence of a roof sheath on fire spread and fire growth. The theoretical part deals with problems regarding the determination of separating distances in general from building structures as well as pergolas and shelters.. According to the Fire Safety Standards, pergolas and shelters can be considered in terms of separating distances as open objects or free warehouses where each of these objects has a specific procedure for calculating separating distances. The practical part of the diploma thesis deals with the visual and numerical analysis of fire of physical models of the pergola and the shelter. The first part deals with mathematical CFD simulation of the pergola and the shelter fire, followed by the visual and numerical evaluation. Attention is paid to the spread of fire in the roofing area. More emphasis is placed on the fire experiment of the pergola and the shelter model, where fire spread and fire growth of the pergola without the roof sheath and the shelter with the roof sheath is monitored. Mathematical CFD simulations are compared in a separate section with fire experiments to validate them. The conclusion of the thesis is to evaluate the acquired knowledge and solve their application in determining of the separating distances from pergolas and shelters, especially concerning fire risk and size of fire-exposed areas.

Keywords

pergola, shelter, separation distance, fire risk, Computational Fluid Dynamics (CFD), fire spread, roof sheath, fire-exposed area

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

A	Plocha	m^2
m	Hmotnost	kg
V	Objem	m^3
c	Měrná tepelná kapacita	J/(kg·K)
p_n	Nahodilé požární zatížení	kg/m^2
p_s	Stálé požární zatížení	kg/m^2
p_v	Výpočtové požární zatížení	kg/m^2
p	Požární zatížení	kg/m^2
b	Součinitel větrání	-
F_o	Parametr odvětrání	$m^{1/2}$
T	Teplota	K; °C
I	Intenzita sálání tepla	kW/m^2
I_o	Kritická hodnota intenzity sálání	kW/m^2
HRR	Heat Release Rate (rychlost uvolněného tepla)	W
HRR_{EXP}	Hodnota HRR z požárního experimentu	W/m^2
HRR_{CFD}	Hodnota HRR z matematické CFD simulace	W/m^2
$HRRPUA$	Heat Release Rate Per Unit Area (rychlost uvolněného tepla na jednotku plochy)	W/m^2
THR	Total Heat Release (celkové uvolněné teplo)	MJ
$ARHE$	Average Rate of Heat Emission (průměrné množství uvolněného tepla)	W
\dot{m}	Rychlost odhořívání	kg/s

t_b	Doba hoření	s
H_c	Čistá výhřevnost	MJ/kg
H_{eff}	Efektivní výhřevnost	MJ/kg
k_{p1}	Poměr efektivní a čisté výhřevnosti	-
d	Odstupová vzdálenost	m
d_s	Odstupová vzdálenost od střešního pláště	m
p_o	Procento požárně otevřených ploch	%
TC	Termoelektrický článek	-

Řecké symboly

λ	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
ρ	Objemová hmotnost / hustota	kg/m ³
ϕ	Polohový faktor	-
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	W/(m ² ·K ⁴)
ε	Emisivita	-
τ_e	Ekvivalentní doba trvání požáru	min

Zkratky

<i>CFD</i>	Computational Fluid Dynamics (dynamika proudění tekutin)
<i>FDS</i>	Fire Dynamics Simulator (software)
<i>DP1, DP2, DP3</i>	Druhy konstrukčních částí
<i>OSB</i>	Oriented Strand Board (dřevoštěpková deska)

1 Úvod

1.1 Motivace

Šíření požáru vně objektu na další přiléhající objekty je odjakživa problém, se kterým se lidstvo potýká od té doby, kdy začalo budovat první obydlí v určité formaci (např. osady). Toto uskupení staveb bylo z hlediska požární bezpečnosti problematické, a to hlavně kvůli šíření požáru z důvodu použití hořlavých materiálů a nedostatečných odstupových vzdáleností. Proluka mezi objekty může mnohdy ochránit majetek před zničením v důsledku šíření požáru. V dnešní době se dají tyto vzdálenosti nazývat odstupovými vzdálenostmi, které nám vymezují prostor, ve kterém může dojít k přenosu požáru vlivem proudění, sálání a dopadem hořících částí konstrukcí.

Odstupové vzdálenosti představují problém v dnešní době především pro investory a projektanty, kteří umisťují stavební objekty blízko hranic pozemků. Umisťování objektů blízko hranice pozemku bývá ve většině případů způsobeno snahou investora o co největší využití pozemku. Ačkoliv je umisťování stavebních objektů vůči hranici pozemku dané legislativou, nemůžeme opomenout stavby, které si lidé staví tzv. „na černo“, tedy bez územního a stavebního řízení, kdy v tomto případě dochází k umístění přímo na hranici pozemku. Pro novostavby tedy největší problém představují tzv. zpětné odstupové vzdálenosti. Kromě určení odstupových vzdáleností od navrhovaných objektů se musí posuzovat také stávající objekty ať už na parcele investora nebo na parcele sousední z hlediska požárně bezpečnostního vlivu na plánovanou stavbu. Na sousedních parcelách se v rámci husté zástavby nachází na hranici mnoho stavebních objektů a mezi těmito objekty figurují právě pergoly a přístřešky, avšak aktuální znění norem požární bezpečnosti se posuzování těchto objektů z hlediska odstupových vzdáleností příliš nevěnuje.

Zpětné odstupové vzdálenosti od sousedních objektů mohou značně komplikovat plánovanou výstavbu. Objekty pergol a přístřešků jsou stavěny blízko hranic pozemků a z hlediska požární bezpečnosti představují značné požární riziko. Snahou této diplomové práce je rozlišit velikost požárního rizika mezi pergolou a přístřeškem a vytvořit doporučení, jak odstupové vzdálenosti od těchto objektů stanovovat.

1.2 Struktura diplomové práce

Diplomová práce je rozdělena do šesti kapitol a je doplněna tematickými přílohami.

Kapitola 1 s názvem „*Úvod*“ uvádí hlavní motivaci pro zpracování diplomové práce v oblasti odstupových vzdáleností.

Kapitola 2 s názvem „*Současný stav poznání*“ řeší základní názvosloví, materiálové a konstrukční řešení pergol a přístřešků. Dále popisuje pohled aktuálně platných norem na problematiku určování odstupových vzdáleností obecně i při aplikaci na objekty pergol a přístřešků. V poslední části jsou v kapitole popsány počítačové softwary, které byly využity pro vytvoření matematického *CFD* modelu pergoly a přístřešku.

Kapitola 3 s názvem „*Výpočetní část – matematický CFD model*“ popisuje tvorbu matematické *CFD* simulace pergoly a přístřešku. Výsledky pro každou simulaci jsou následně rozebrány z pohledu vizuálního, kde se jedná především o zhodnocení rozvoje a šíření požáru, a z hlediska numerického, kde se jedná o zhodnocení naměřených požárnětechnických a tepelnětechnických veličin.

Kapitola 4 s názvem „*Experimentální část - požární experiment*“ se zabývá požárními experimenty pergoly a přístřešku. V úvodu kapitoly jsou popsány samotné modely a jejich konstrukce. Dále je zde popsána požární laboratoř FireLAB, ve které oba experimenty proběhly. Hlavní část této kapitoly se věnuje samotným požárním experimentům. Nejprve jsou zde popsány průběhy experimentů a následuje vizuální vyhodnocení pomocí videozáznamů z průběhu experimentů. V poslední části jsou vyhodnoceny numerické záznamy z měřicích zařízení a porovnány oba experimenty mezi sebou.

Kapitola 5 s názvem „*Porovnání výsledků CFD simulací s výsledky požárních experimentů*“ přináší srovnání získaných vizuálních i numerických výsledků v rámci validačního procesu *CFD* simulace.

Kapitola 6 s názvem „*Závěr*“ shrnuje získané poznatky z provedených *CFD* simulací a požárních experimentů v souvislosti s určováním odstupových vzdáleností od konstrukcí pergol a přístřešku. V závěru této kapitoly jsou uvedena doporučení pro další práci, hlavně v oblasti matematického *CFD* modelování.

V kapitolách s názvem „*Přílohy 1-5*“ jsou uvedeny tematicky související přílohy diplomové práce. Jedná se analýzu skutečného požáru přístřešku, grafické sekvenční srovnání jednotlivých experimentů a zdrojové kódy *CFD* simulací generované programem Pyrosim.

1.3 Cíl práce

Hlavní cíle diplomové práce jsou:

- Rozbor problematiky odstupových vzdáleností v ČR obecně a dále od pergol a přístřešků.
- Sledování rozvoje a chování požáru na konstrukci pergoly a přístřešku v rámci matematické *CFD* simulace.
- Sledování rozvoje a chování požáru na reálném zmenšeném modelu pergoly a přístřešku v rámci požárního experimentu.
- Vizuální a numerické porovnání matematických *CFD* simulací s požárními experimenty.
- Aplikace získaných poznatků při určování odstupových vzdáleností od pergol a přístřešků.

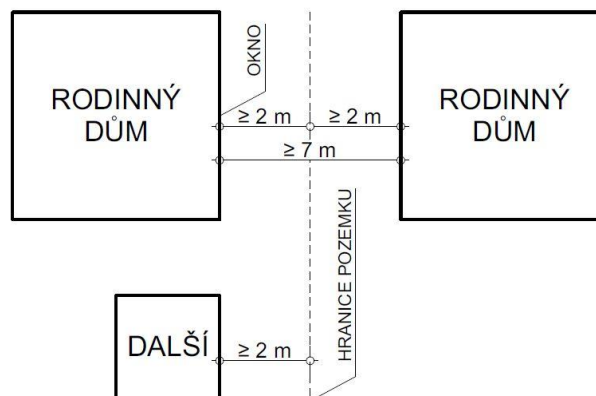
2 Současný stav poznání

2.1 Úvod do problematiky

Značně problematickými konstrukcemi z hlediska požární bezpečnosti se stávají objekty, které se nachází blízko hranice pozemku nebo blízko sousedních staveb. Jedná se především o objekty pergol a přístřešků. Tyto konstrukce slouží pro relaxaci, parkování, ale mnozí lidé je využívají i pro skladování a uchovávání různého materiálu.

Vzdálenosti všech objektů na pozemku investora od ostatních objektů a hranice pozemku jsou stanoveny ve vyhlášce 501/2006 Sb. o obecných požadavcích na využívání území. Je-li mezi rodinnými domy s okenními otvory v obvodových stěnách volný prostor, vzdálenost mezi nimi nesmí být menší než 7 m a jejich vzdálenost od společných hranic nesmí být menší než 2 m (Obr. 1). Toto ustanovení platí i pro stavby garáží a další stavby, které se umísťují na pozemku investora [1].

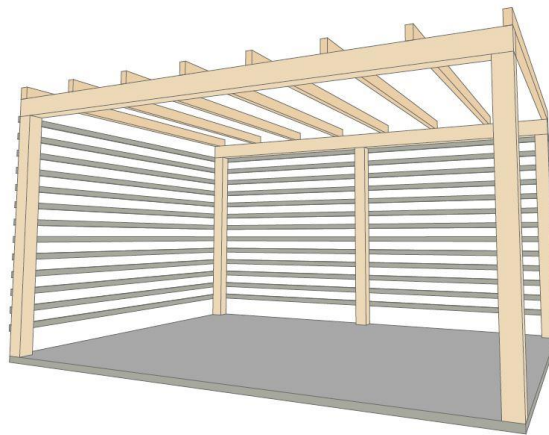
Nejčastějším problémem z hlediska požární bezpečnosti jsou objekty (pergoly, přístřešky, altány) postavené bez územního a stavebního řízení blízko hranice pozemku. Dodatečné povolení těchto konstrukcí bývá značně problematické hlavně z důvodu odstupových vzdáleností. S těmito nepovolenými stavbami se setkáváme často i u řadové zástavby, kde riziko přenesení požáru je mnohonásobně vyšší. Tyto konstrukce ovšem ve většině případů podle stavebního zákona spadají mezi objekty, které nevyžadují územní ani stavební řízení. Toto ustanovení se týká jednopodlažních objektů se zastavěnou plochou do 25 m² [2]. Tuto hraniční hodnotu zastavěné plochy ve většině případů konstrukce pergoly a přístřešku splní a vyhne se tak stavebnímu řízení, ve kterém by se posuzovalo požární riziko těchto konstrukcí.



Obr. 1: Vzájemné odstupy staveb

2.1.1 Pergoly

U rodinných i menších bytových domů se v dnešní době často budují konstrukce, které slouží k relaxaci a posezení. Jednou z těchto konstrukcí je pergola. Jedná se o lehkou konstrukci (sloupy, trámy, latě), která slouží jako podpora k pnutí rostlin [3], tzn. konstrukce nemá souvislý střešní plášť ani plné obvodové konstrukce (Obr. 2). Jednotlivé nosné prvky pergoly nemusí být masivních průřezů, protože nesou pouze samy sebe. U konstrukce pergol se nepředpokládá zatížení sněhem ani větrem. Zatížení větrem se může vyskytovat v případech, kdy by jedna ze stran pergoly měla souvislý plášť.



Obr. 2: Pergola

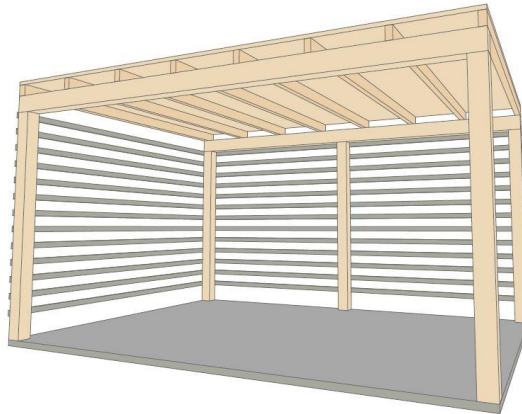
2.1.2 Přístřešky

Přístřešek má dle legislativy České republiky více definicí. V normách pro požární bezpečnost staveb je přístřešek definován jako stavba, která má stěnové konstrukce maximálně na polovině svého obvodu [4]. Dále je definován v Technickém naučném slovníku jako konstrukce chránící prostor pouze shora, ale neuzavírající ho plně ze stran. Může stát volně, častěji je přimknut ke stěně budovy [5].

Rozdíl mezi pergolou a přístřeškem je tedy hlavně v rozdílu zastřešení, popřípadě v obvodových konstrukcích (Obr. 3). Za přístřešek se dá tedy považovat posezení před objektem s celistvou střešní konstrukcí (např. záklop z desek a střešní krytina). Nejčastěji se za přístřešky považují konstrukce, které slouží pro parkování automobilů u objektů a skladování různého materiálu.

Hlavní funkcí přístřešku dle výše uvedených definicí je ochrana před deštěm. Na rozdíl od pergoly, kde se na místě střešního pláště můžeme setkat maximálně s popínavou rostlinou, tvoří přístřešek plnohodnotnou ochranu před vnějšími vlivy, mezi které se mimo deště řadí i sníh

a částečně i vítr (záleží na konstrukčním provedení přístřešku). Z toho důvodu musí být konstrukce přístřešku navržena z masivnějších průřezů než je konstrukce pergoly. Na střešní konstrukce se v zimním období vyskytuje zatížení v podobě sněhové pokrývky, která může u špatně navržené konstrukce způsobit její kolaps. Pokud je přístřešek navržen z části opláštěný, měla by být konstrukce patřičně zavětrována, aby odolala účinkům větru.



Obr. 3: Přístřešek

2.1.3 Konstrukční a materiálové provedení

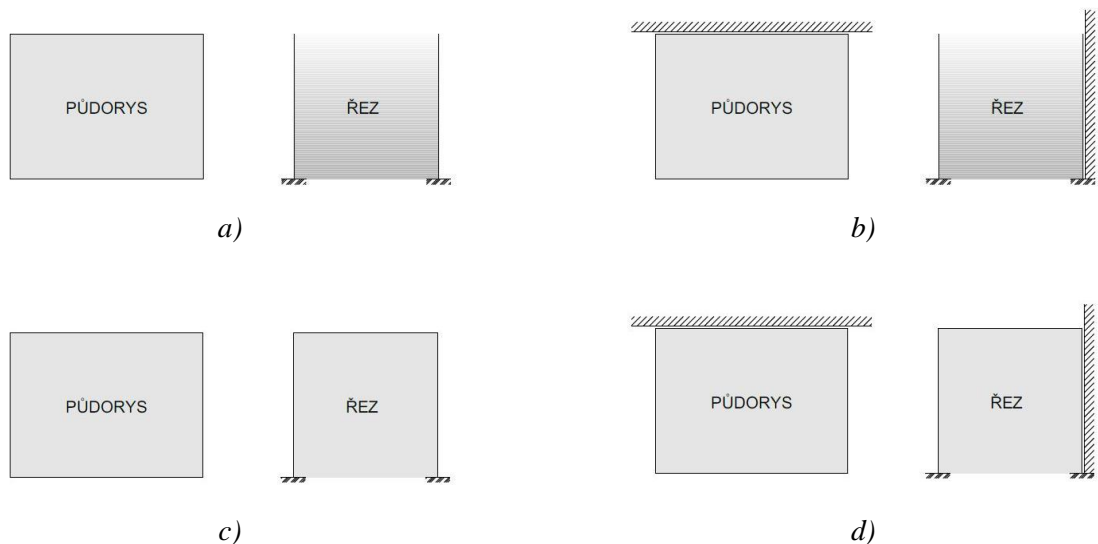
Mezi nejpoužívanější stavební materiál pergol a přístřešků se řadí dřevo. Lehká dřevěná konstrukce sloupkového charakteru, vodorovně spojená vaznicemi a zastřešena jednoduchým střešním pláštěm. Dále se zde řadí ocelové konstrukce, kde se některé systémy dodávají ve formě „stavebnice“. Jednotlivé díly se dle přiloženého návodu smontují, takto zhotovená konstrukce je značnou úsporou času.

Pokud bude konstrukce pergoly nebo přístřešku vytvořena z dřevěných prvků, bude to nejčastěji dřevo smrkové, borovicové nebo modřínové. Smrkové dřevo se řadí mezi nejdostupnější řezivo, které se snadno opracovává a dobře se na něj nanáší různé povrchové úpravy (lak, mořidla). Borovicové a modřínové dřevo oproti smrkovému lépe snáší vlhkost, což je pro vnější prostředí výhodnější. Pergoly nejsou zastřešené, proto je pro jejich konstrukci lepší použít borovicové nebo modřínové dřevo. Vhodnou úpravou všech prvků je hoblování, hladká vrstva bez „fousků“ lépe odolává vnějším vlivům a není tak nasákavá. Z hlediska požáru je toto bezesporu velikou výhodou, protože po hladkém povrchu dřevěného prvku se oheň nebude šířit tak dobře jako po povrchu hrubém.

Založení těchto konstrukcí může být provedeno bez betonáže na ocelové kotvící hroty, které se zapichují přímo do země nebo na ocelové botky, které jsou na závitové tyči

a zabetonovány do betonové patky. Dále je možnost zabetonovat do základové patky ocelovou závitovou tyč a na spodní plochu sloupu se osadí ocelová platforma, která se pak na závitovou tyč našroubuje. Svislé prvky jsou obvykle tvořeny z dřevěných sloupů v dimenzích 100/100 mm až 200/200 mm. Přes sloupy jsou položeny dřevěné trámy, které se dimenzují podle rozponu a přes ně se kolmo uloží krokve. Pro zavětrování se použijí pásky v rozích konstrukcí. Pro zastřešení se použije laťování, na které se klade střešní krytina, nebo bednění a na něj např. plechová nebo asfaltová krytina. Dimenze jednotlivých prvků záleží na konstrukci objektu, tzn. jestli se jedná o pergolu nebo přístřešek.

Konstrukce se mohou nacházet na volném prostranství nebo jsou přistavěny k jinému objektu, např. rodinnému domu, kde plní doplňkovou funkci. Pokud se tedy tato konstrukce nachází u objektu, jsou dvě možnosti statického řešení (Obr. 4). Konstrukce může být na konstrukci sousedního objektu staticky závislá nebo nezávislá. Staticky závislá konstrukce je reprezentována nosným prvkem, který je pevně připojen k sousednímu objektu. Nejčastěji jsou to sloupy nebo vaznice, které se pomocí závitových tyčí připevňují k obvodovým konstrukcím objektu. Staticky nezávislá konstrukce je samostatně stojící objekt, ačkoliv se nachází v těsné blízkosti sousedního objektu, není s ním pevně spojen. Statické řešení těchto konstrukcí ovlivňuje posuzování z hlediska požární bezpečnosti, viz kapitolu 2.2.2.



Obr. 4: Znárodnění umístění pergol a přístřešků: a) samostatně stojící pergola; b) samostatně stojící přístřešek; c) pergola stojící u objektu; d) přístřešek stojící u objektu

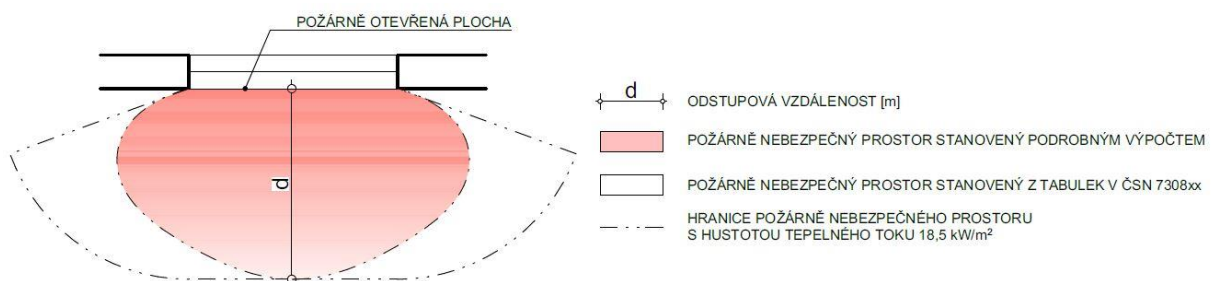
2.2 Problematika odstupových vzdáleností

2.2.1 Definice odstupových vzdáleností

Odstupové vzdálenosti (proluky) představují vzdálenost, ve které hrozí přenos požáru na sousední objekt nebo požární úsek. K zabránění přenosu požáru na jiný objekt musí být objekty vzájemně umístěny ve vzdálenosti, kde intenzita tepelného toku bude tak malá, že nemůže dojít k vznícení hořlavých hmot [6]. V některých případech může dojít k šíření požáru odpařováním hořících částí konstrukce. Rozhodující vzdálenost pro posouzení je větší z obou stanovených hodnot. U jednopodlažních konstrukcí pergol a přístřešků vzdálenost dopadu hořících částí většinou nepředstavuje převládající vzdálenost.

Odstupová vzdálenost u posuzovaného objektu představuje kolmou vzdálenost od požárně otevřené plochy (rovina sálání tepla) k hranici požárně nebezpečného prostoru. Hraniční hodnoty hustoty tepelného toku mají stavební předpisy různých států odlišné. V České republice byla stanovena kritická hustota tepelného toku pro stanovení odstupových vzdáleností $18,5 \text{ kW/m}^2$ [7].

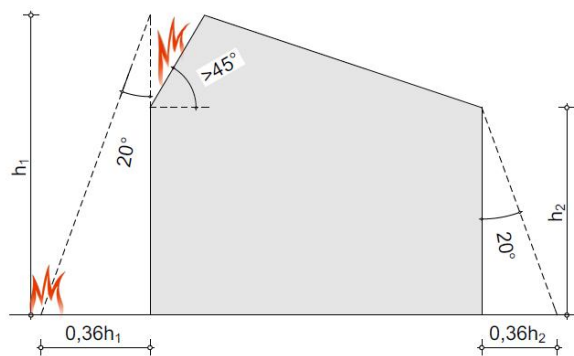
Požárně nebezpečný prostor představuje pomyslný prostor, jehož limitní rozměry udává odstupová vzdálenost. V tomto prostoru hrozí riziko přenesení požáru sáláním tepla nebo dopadem hořících částí konstrukce, viz výše. Požárně nebezpečný prostor může zasahovat do veřejného prostranství nebo na pozemek, ve kterém se objekt nachází. Nesmí zasahovat na sousední objekty, kromě případů uvedených v ČSN 73 0804/Z2 (doplňkové objekty u rodinných domů provozně spolu související). Může zasahovat i na sousední pozemky, ale tato situace se stává předmětem stavebního řízení, do kterého vstupuje majitel sousedního pozemku.



Obr. 5: Porovnání odstupových vzdáleností

Odstupová vzdálenost z hlediska dopadu hořících částí se musí posoudit zejména u objektů s konstrukčními částmi druhu DP3 (např. dřevostavby) a dalších staveb, které mohou tímto způsobem šířit požár. Požárně nebezpečný prostor bude tvořit pomyslnou plochu, do které

by případné hořící části dopadaly. Předpokládá se, že hořící části budou padat pod úhlem 20° od svislé roviny do vzdálenosti 0,36násobku výšky pádu hořlavých částí konstrukce [7].



Obr. 6: Odstupová vzdálenost vymezená dopadem hořících částí DP3

V požárně nebezpečném prostoru se mohou nacházet pouze konstrukce bez požárně otevřených ploch a bez povrchových úprav, které mohou způsobit rozšíření požáru. Mezi tyto povrchové úpravy se řadí např. dřevěné obklady. Za vyhovující se v tomto případě považují nehořlavé výrobky třídy reakce na oheň A1 a A2 dle ČSN 73 0802.

Odstupová vzdálenost od střešního pláště má v normě stanovené pravidlo výpočtu. Hustota tepelného toku požárně otevřených ploch střešních pláštů je stanovena hodnotou 87 kW/m^2 , což odpovídá hodnotě požárního zatížení $p = p_v = 30 \text{ kg/m}^2$. Tato hodnota požárního zatížení je stanovena na základě výpočtu skutečného požárního zatížení klasické skladby střešního pláště, tj. dřevěné krokve, dřevěné bednění, kontralatě, latě a nehořlavá střešní krytina [8]. Při použití jiné skladby je vhodné spočítat skutečnou hodnotu $p = p_v$, která bude odpovídat skutečné skladbě střešní konstrukce. Tyto požadavky se konstrukcí pergol a přístřešků netýkají, protože tyto konstrukce hoří v celém rozsahu a se stejnou intenzitou, tzn. požární zatížení pro výpočet odstupových vzdáleností se ve všech místech konstrukce uvažují stejné. Odstupy od střešních pláštů není třeba stanovovat, pokud stojí objekty osamocně, protože nepředstavují vzhledem k odstupům určených od obvodových konstrukcí žádné riziko. Pokud se objekty pergol a přístřešků nachází u jiného objektu, stanovuje se odstupová vzdálenost ve svislém směru následovně:

$$d_s = A_s^{1/3} \quad (1)$$

kde

d_s – odstupová vzdálenost ve svislém směru [m]

A_s – půdorysný průmět střešního pláště [m^2]

Stanovení této odstupové vzdálenosti může být značně problematické, protože pokud plameny zasahují nad střešní plášť, měly by se objekty posuzovat jako volné sklady (viz kapitola 2.2.2). Odstupové vzdálenosti by poté ve svislém směru byly mnohonásobně vyšší kvůli prošlehávání plamenů po dobu požáru.

2.2.2 Možnosti určení odstupových vzdáleností

Určení odstupových vzdáleností od konstrukcí pergol a přístřešků je dle aktuálně platné legislativy značně složité. Jednotlivé normy řady ČSN 73 08xx se věnují určování odstupových vzdáleností od stavebních objektů, volných skladů a technologických zařízení. Samotný pojem stavební objekty lze definovat jako prostorově ucelenou nebo technicky samostatnou část stavby. Nejznámější zástupce skupiny stavebních objektů je budova, dále se zde zařazuje i přehrada či dálnice. Diplomová práce se zabývá konstrukcemi pergol a přístřešků, které se tedy řadí mezi stavební objekty, a je nutno od nich určovat odstupové vzdálenosti. Určité riziko s sebou tyto konstrukce přinášejí, pokud neprochází územním ani stavebním řízením a vyhnou se tak i posouzení z hlediska požární bezpečnosti, i když pro tyto stavby platí stejné zásady jako pro ostatní stavby. Tyto objekty jsou více náchylné ke vzniku požárů, obsahují množství hořlavých materiálů a mnohdy se nacházejí na místech, kde přímo ohrožují okolní objekty. Snahou je eliminovat odstupovou vzdálenost na co nejmenší, aby neohrožovala okolní objekty, resp. aby požárně nebezpečný prostor nezasahoval na sousední pozemky.

Při bližším pohledu, jak posuzovat tyto konstrukce podle norem řady ČSN 73 08xx, se můžeme setkat s pojmy, ke kterým lze tyto konstrukce zařadit. Lze zde zařadit následující pojmy:

Otevřený objekt

- volně stojící stavební objekt, který je částečně nebo zcela bez obvodového pláště nebo střešní konstrukce, rozsah otevřených ploch musí být prokázán výpočtem parametru větrání F_o [4];
- otevřený objekt se musí z hlediska požární bezpečnosti posuzovat jako ostatní stavební objekty, a to včetně hodnocení požárně nebezpečného prostoru.

Volný sklad

- sklad, který se vyskytuje na volném prostranství a nemá střešní konstrukci [4];
- výpočet odstupových vzdáleností od volných skladů má v normě specifický odstup, který se liší od výpočtu odstupových vzdáleností od stavebních objektů;

- minimální odstupová vzdálenost 6,5 m se nevztahuje na případy, kdy je odstupová vzdálenost určena podrobným výpočtem hustoty tepelného toku, aniž by šlo o sklady s p_n a p_s větším než 30 kg/m^2 .

Výpočet odstupových vzdáleností od otevřených objektů by se měl shodovat s výpočtem odstupových vzdáleností jako pro ostatní stavební objekty. Z uvedené definice otevřeného objektu je zřejmé, že pokud objekt navazuje na sousední objekt, tak se nepovažuje za samostatně stojící. Norma ovšem nezohledňuje vliv střešního pláště na výpočet odstupových vzdáleností. Pokud objekt nemá střešní konstrukci, měla by se ve výpočtu zohlednit výška plamenů, což bylo dokázáno analýzou, kterou provedl Ing. František Pelc [8]. Toto tvrzení má své opodstatnění v článku 8.1.7 c) v normě ČSN 73 0802, ve kterém je uvedeno, že u objektů o jednom nadzemním podlaží s membránovými a jinými obdobnými konstrukcemi s funkcí střechy (jedná se o jakýkoliv plášť s požární odolností nižší jak EW 15), u objektů s nosnou konstrukcí druhu DP3 se odstupové vzdálenosti posuzují jako u volných skladů hořlavých látek. To by znamenalo, že odstupové vzdálenosti od pergol by se musely posuzovat jako u volných skladů, jelikož pergola nemá střešní konstrukci, a do výšky požárně otevřené plochy by vstupovala výška plamenů. Dále je tento postup popsán v článku 5.3.2 1) ČSN 73 0802, ve kterém se popisují prodejní či jiné stánky, a odstupové vzdálenosti je nutné posuzovat jako u volných skládek. Stánky jsou ve většině případů tvořeny z lehké nosné tyčové konstrukce a opláštěné textilií bez požární odolnosti. U přístřešků ovšem k prošlehávání plamenů při požáru dochází také, a to kolem střešního pláště směrem nad střešní plášť, což vede k tomu, že by se odstupy u obou konstrukcí posuzovaly jako pro volné sklady. Pro výpočet odstupových vzdáleností pro volný sklad by se k výšce pergoly tedy připočetla předpokládaná výška plamenů, která by mohla být v případě konstrukcí pergol a přístřešků 3 m. To odpovídá nízké hustotě tepelného toku, která je vyjádřena ekvivalentní dobou trvání požáru $\tau_e = 15 \text{ minut}$. S touto hodnotou při výpočtu ovšem nelze počítat, protože skutečná hodnota ekvivalentní doby trvání požáru u pergol a přístřešků se pohybuje v rozmezí a $\tau_e = 20\text{--}30 \text{ minut}$ ¹. Pokud se tedy ve výpočtu odstupových vzdáleností uvažuje s výškou plamenů, rozdíl v hodnotě odstupových vzdáleností může být až 60 %².

¹ Tato hodnota byla stanovena na základě podrobného výpočtu stálého i nahodilého požárního zatížení podle hmotnostního podílu jednotlivých materiálů v pergole. Celkové požární zatížení bylo dáno součtem stálého požárního zatížení od konstrukce pergoly hodnotou $33,9 \text{ kg/m}^2$ a nahodilého požárního zatížení od sestavy nábytku hodnotou $4,6 \text{ kg/m}^2$.

² Tato hodnota byla získána porovnáním odstupových vzdáleností vypočítaných pro dvě různé výšky požárně otevřených ploch, kde jedna z nich zohledňovala předpokládanou výšku plamenů.

Určení odstupových vzdáleností od přístřešků je v normě stanoveno pouze pro přístřešky pro motorová vozidla. U přístřešku z konstrukčních částí druhu DP1 se nestanovují žádné požární požadavky, a tak od těchto přístřešků není nutné stanovovat odstupové vzdálenosti. Toto ustanovení neřeší problematiku hoření samotného automobilu. V dnešní době, kdy interiér automobilů je tvořen převážně plastovými výrobky, které jsou zde zastoupeny ve velkém množství, je požární riziko spojené s požárem automobilu daleko vyšší. Výhledově se ve světě počítá s vyšším zastoupením plastů při výrobě automobilů, což by mělo vést k levnější výrobě. Podíl plastových výrobků na jednom osobním automobilu by se mohl pohybovat až kolem 25 %. Pokud uvažujeme průměrnou hmotnost osobního automobilu přibližně 1300 kg, tak podíl plastových výrobků by mohl v budoucnu vážit 300-350 kg. Dále se v osobním automobilu vyskytuje množství hořlavých kapalin. Ocelový přístřešek, který je tvořen nehořlavými konstrukcemi, dokáže při požáru automobilu tvořit značné požární riziko.

Dále jsou v článku popsány přístřešky z konstrukčních částí druhu DP3 i postup stanovení odstupových vzdáleností. Ekvivalentní doba požáru je zde stanovena pro 30 minut, délku tvoří skutečná délka posuzovaného přístřešku a výška požárně otevřené plochy je dána hodnotou 1,5 m [4]. Výška požárně otevřené plochy 1,5 m je tvořena bočním průmětem auta [10]. U těchto typů přístřešků je požární riziko zvýšeno hořlavou dřevěnou konstrukcí. Požár ve většině případů vznikne v osobním automobilu a postupně se rozšíří na konstrukci přístřešku. V příloze 1 se nachází analýza skutečného požáru přístřešku.

V článku jsou tedy ekvivalentní doby požáru určeny pro přístřešky z konstrukčních částí druhu DP2 a DP3. Jejich hodnota je zde popsána jako $\tau_e = 15 + 10 = 25 \text{ minut}$ pro přístřešek druhu DP2 a $\tau_e = 15 + 15 = 30 \text{ minut}$ pro přístřešek druhu DP3. V těchto hodnotách ekvivalentní doby požáru se s požárním zatížením od stojícího vozidla počítá. Při přepočítání $\tau_e = 15 \text{ minut}$ na intenzitu sálání vychází tato hodnota 60 kW/m^2 . Hodnoty $\tau_e = 10 \text{ minut}$ a $\tau_e = 15 \text{ minut}$ zohledňují přídavek za druh konstrukčního systému. Pokud bychom tedy vypočetli hodnotu odstupové vzdálenosti pouze pro jeden stojící automobil reprezentovaný hodnotou $\tau_e = 15 \text{ minut}$ a při délce požárně otevřené plochy 5,0 m a výšce 1,5 m, vycházela by tato hodnota přibližně $2,0 \text{ m}^3$. Výše uvedený příklad znamená, že i u přístřešku druhu DP1 s jedním osobním automobilem vzniká riziko přenesení požáru sáláním.

³ Výpočet konkrétní hodnoty odstupové vzdálenosti byl proveden na internetových stránkách Ing. Františka Pelce v záložce Pomocné výpočty.

2.3 Faktory ovlivňující odstupové vzdálenosti

Při výpočtu odstupových vzdáleností vstupuje do výpočtu množství veličin. Pokud budeme odstupové vzdálenosti počítat podle normového postupu, potřebujeme znát procento požárně otevřených ploch, velikost výpočtového požárního zatížení a rozměry požárně otevřené plochy. Další možností je postupovat přes výpočet poklesu hustoty tepelného toku v závislosti na vzdálenosti od požárně otevřené plochy. Pro tento postup potřebujeme znát podrobnější informace, které budou rozebrány v kapitolách 2.3.2 a 2.3.3.

2.3.1 Požární zatížení

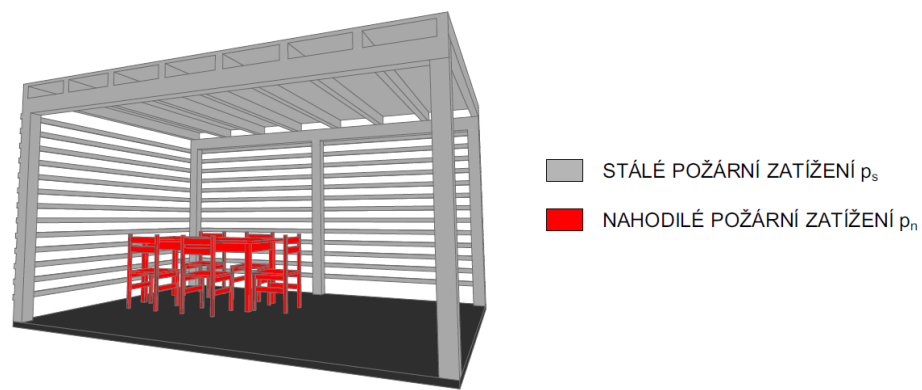
Požární zatížení p je veličina určující požární riziko. Vyjadřuje pomyslné množství smrkového dřeva na jednotce plochy, jehož výhřevnost je ekvivalentní výhřevnosti všech hořlavých látek nacházejících se na posuzované ploše. Požární zatížení se sestává z nahodilého požárního zatížení p_n a stálého požárního zatížení p_s [7].

Určení hodnoty požárního zatížení u pergol a přístřešků závisí na jejich konstrukčním provedení. Pokud jsou tyto objekty staticky závislé na objektu, u kterého jsou postaveny, tak se stanou součástí daného požárního úseku. Následně se při výpočtu odstupových vzdáleností od pergoly a přístřešku uvažuje se stejným požárním zatížením jako v celém požárním úseku. Toto řešení nezohledňuje míru otevřenosti obvodových konstrukcí řešených objektů, a s tím spojený součinitel b , resp. parametr odvětrání F_o . Tyto hodnoty při výpočtu snižují hodnotu požárního rizika, jelikož zohledňují přísun vzduchu do řešeného požárního úseku. Pokud jsou objekty vzájemně staticky nezávislé, je vhodnější řešit tento objekt samostatně. Hodnota výpočtového požárního zatížení se spočítá pouze pro objekt pergoly či přístřešku a v tomto výpočtu se projeví míra otevřenosti, což u otevřených objektů vede ke snížení požárního rizika na polovinu hodnoty. Tímto postupem dosáhneme nejnižším hodnot odstupových vzdáleností. První uvedené řešení je jednodušší z hlediska časové náročnosti, a je proto používanější, hlavně pokud se v blízkosti pergol a přístřešků nenachází žádné další stavební objekty.

Výpočet požárního rizika je možné provádět dvěma způsoby. První způsob je vypočítat požární riziko na základě hodnot nahodilého požárního zatížení p_n a stálého požárního zatížení p_s . V tomto případě stanovíme hodnotu p_n (Obr. 7) na základě skutečného vybavení nebo podle přílohy A.1 v ČSN 73 0802. Hodnota p_s se ve výpočtu nezohledňuje, protože ve výpočtu neuvažujeme s hmotností nosných a požárně dělicích konstrukcí. Je to z důvodu složitého a časově náročného výpočtu, který by jinak jednoduchý výpočet dělal zbytečně zdlouhavým.

Požární riziko od hořlavých nosných a požárně dělicích konstrukcí se ve výpočtu odstupových vzdáleností zohledňuje v určení stupně požární bezpečnosti a zatřídění konstrukčního systému.

Druhý způsob je opakem prvního. Vypočítáme hodnoty p_n a p_s na základě hmotnosti skutečného vybavení a hmotnosti nosné konstrukce pergoly. Např. u pergoly za p_n můžeme považovat vybavení sedacím nábytkem, stoly, příslušenství ke grilování apod. (Obr. 7). Tato hodnota se u běžných pergol pohybuje v rozmezí 5-10 kg/m². Výpočet p_s se provede způsobem, kdy se vypočítá hmotnost všech nosných konstrukcí pergoly zajišťující stabilitu a přepočítá se na normové požární zatížení. Jelikož se tímto postupem zohlední hmotnost nosných konstrukcí, není třeba při zatřídění stupně požární bezpečnosti zohlednit konstrukční systém objektu.



Obr. 7: Znárodnění požárního zatížení u přístřešku

V roce 2015 vyšla změna kmenové normy ČSN 73 0804, která přinesla důležitou změnu týkající se také konstrukcí řešených diplomovou prací. Požárně nebezpečný prostor objektů rodinných domů může zasahovat na sousední objekty, pokud tyto objekty spolu provozně souvisí. Vyhovující jsou i zpětné odstupy, což je neméně důležitá informace. Díky tomuto článku nyní není problém postavit např. hořlavou konstrukci blízko rodinného domu.

2.3.2 Konstrukční části a systémy

Vliv na výpočet odstupových vzdáleností podle prvního postupu uvedeného v předchozí kapitole má zatřídění objektu z hlediska konstrukčního systému. Každý konstrukční systém se sestává z jednotlivých konstrukčních částí.

Konstrukční části se třídí podle třídy reakce na oheň jednotlivých prvků a jejich vlivu na intenzitu požáru a na stabilitu a únosnost konstrukčních částí druhu DP1, DP2 a DP3. Definice jednotlivých konstrukčních částí není pro tuto práci důležitá, protože ve většině případů se konstrukce pergol a přístřešků skládá z konstrukčních částí druhu DP3. Tyto konstrukce

v požadované době požární odolnosti zvyšují intenzitu požáru a jeho hlavním zástupcem je dřevo.

Konstrukčním systémem se rozumí souhrn svislých a vodorovných nosných a požárně dělicích konstrukcí objektu. Dle aktuálně platné legislativy v oblasti požární bezpečnosti staveb se konstrukční systémy třídí na:

- konstrukční systémy nehořlavé,
- konstrukční systémy smíšené,
- konstrukční systémy hořlavé.

Konstrukční systém nehořlavý (Obr. 8a) je tvořen svislými i vodorovnými konstrukcemi druhu DP1 [7]. Patří sem například zděné stavby s betonovými, keramickými nebo kombinovanými stropy, betonové nebo ocelové skelety aj. Za nehořlavý konstrukční systém se tedy považuje např. celoodelová konstrukce přístřešku.

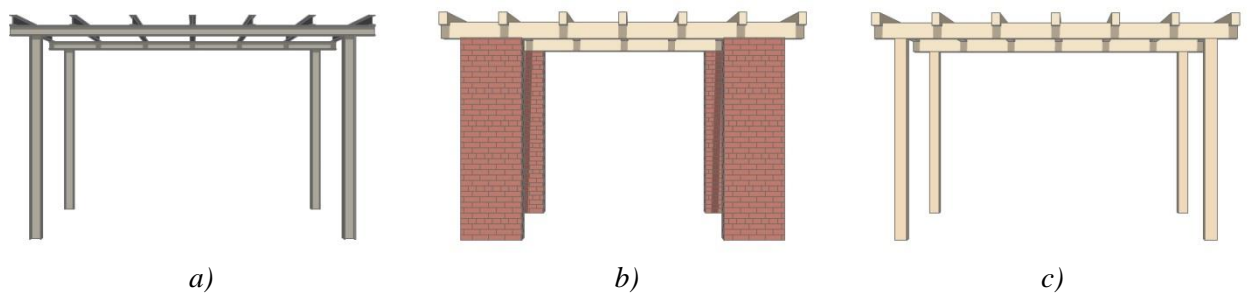
Konstrukční systém smíšený (Obr. 8b) musí mít svislé nosné a požárně dělicí konstrukce druhu DP1, vodorovné konstrukce mohou být druhu DP2 [7]. Typickými představiteli staveb se smíšeným konstrukčním systémem jsou zděné stavby s dřevěnými trámovými stropy se záklopem a omítnutým podhledem. Jako výjimku lze mezi smíšené konstrukční systémy započítat jednopodlažní budovy, jejichž svislé nosné a požárně dělicí konstrukce jsou druhu DP1, zastřešení tvoří konstrukce druhu DP3. Příkladem může být zděná stavba se střechou s dřevěnými vazníky, popř. s dřevěným podhledem. V obou případech svislé nosné a požárně dělicí konstrukce musí být provedeny konstrukčními částmi DP1. Za smíšený konstrukční systém lze považovat např. přístřešek, který má svislé nosné prvky ze zděných pilířů a zastřešení provedené dřevěným krovem.

Konstrukční systém hořlavý (Obr. 8c) může být proveden ve dvou variantách:

- svislé i vodorovné konstrukce nosné a požárně dělicí konstrukce jsou pouze druhu DP2 a nikde v hodnocených konstrukcích se nevyskytuje prvek DP3 [7],
- vodorovné i svislé nosné konstrukce a požárně dělicí konstrukce jsou pouze druhu DP3 [7].

Zatřídění objektu z hlediska konstrukčního systému ovlivňuje výpočet odstupových vzdáleností z hlediska hodnoty p_v . Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, u hodnoty p_s se neuvažuje s hmotností nosných a požárně dělicích konstrukcí. Výpočet p_s by byl zbytečně zdlouhavý, protože by se ve výpočtu musely zohlednit veškeré vestavěné nosné konstrukce

objektu. Jako příklad použijí nosný stropní trám, kde by se v požadované době požární odolnosti musela spočítat odhořelá vrstva trámu a započítat se do stálého požárního zatížení. Proto byl vliv nosných konstrukcí zajišťujících stabilitu objektu a požárně dělicích konstrukcí na stálé požární zatížení zahrnut v diferenciaci stupňů požární bezpečnosti požárních úseků [6]. Rozdělení je tedy na konstrukční systémy nehořlavé, smíšené a hořlavé. Při výpočtu odstupových vzdáleností se zařídění konstrukčního systému zohlední připočtením 5 kg/m^2 u smíšeného konstrukčního systému, 10 kg/m^2 a 15 kg/m^2 u hořlavého konstrukčního systému podle způsobu provedení. Tento postup se týká pouze zcela požárně otevřených ploch, což souvisí s výpočtem odstupových vzdáleností od pergol a přístřešků, jelikož se u těchto objektů ve většině případů vyskytují pouze zcela požárně otevřené plochy.



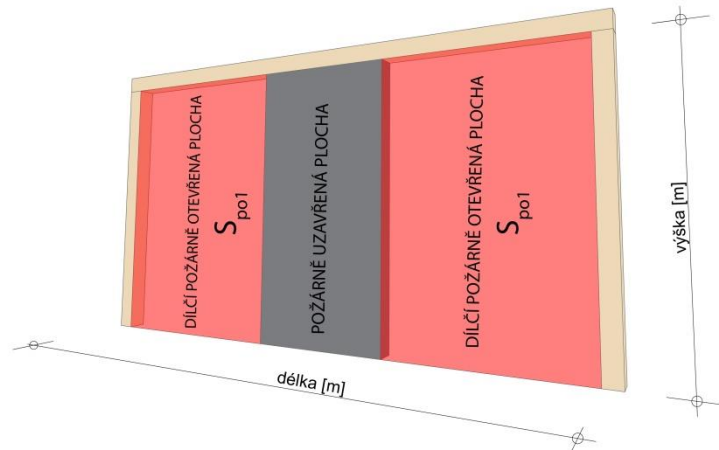
Obr. 8: Konstrukční systémy vztažené na konstrukce pergol: a) nehořlavý z konstrukčních částí DP1; b) smíšený, kde svislé konstrukce jsou druhu DP1 a vodorovné druhu DP3; c) hořlavý z konstrukčních částí DP3

2.3.3 Požární otevřenost ploch

U konstrukcí pergol a přístřešků, kde obvodové stěny chybějí nebo nevykazují požadovanou požární odolnost, se obvodové konstrukce považují za zcela požárně otevřené plochy, tzn. pro výpočet odstupových vzdáleností se uvažuje délka a výška celé obvodové konstrukce, která představuje zcela požárně otevřenou plochu. Zcela požárně otevřená plocha představuje intenzitu sálání v rovině stěny více než 60 kW/m^2 [7], což je hodnota odpovídající teplotě přibližně 740 °C podle křivky ISO 834. Pokud bychom uvažovali při výpočtu křivku vnějšího požáru (viz kapitola 2.3.4), u které můžeme mít v sálající rovině maximální teplotu 680 °C , dosáhneme hodnoty intenzity sálání přibližně $46,77 \text{ kW/m}^2$. Tato hodnota nemůže být překročena, protože hodnota teploty 680 °C u křivky vnějšího požáru je konstantní.

Částečně požárně otevřené plochy, které jsou dány intervalem od 15 kW/m^2 do 60 kW/m^2 se u konstrukcí řešených v diplomové práci nevyskytují [7]. Další jsou požárně uzavřené plochy, které by v tomto případě představovaly např. zděné stěny. Zděná část obvodové stěny může do výpočtu požární otevřenosti ploch vstoupit hodnotou procenta sálání. Pokud se v rovině sálání

nachází část konstrukce, která je bez požárně otevřených ploch, stanoví se procentuální podíl požárně otevřených ploch v závislosti na celé sálavé ploše. Na příkladu (Obr. 9) je uvedena obvodová konstrukce pergoly, ve které se nachází zděná část, která tvoří požárně uzavřenou plochu. Výpočet procenta požárně otevřených ploch je následující:



Obr. 9: Znárodnění požárně otevřených a uzavřených ploch

$$p_o = \frac{\sum S_{poi}}{S_p} \quad (2)$$

kde

p_o – podíl požárně otevřených ploch [%]

S_{poi} – dílčí požárně otevřené plochy, v tomto případě plocha vymezená červenou barvou mezi nosnými sloupky a zdí [m^2]

S_p – celková plocha požárně otevřené plochy [m^2]

Ve většině případů je podíl požárně otevřených ploch 100 %. Obvodové konstrukce jsou tvořeny pouze požárně otevřenými plochami v celé ploše stěny. Pokud podíl požárně otevřených ploch je menší než 40 %, uvažuje se dále s touto hodnotou [7].

2.3.4 Hustota tepelného toku

Při požáru dochází k sdílení tepla vně objektu prouděním a sáláním. Proudění se vztahuje více k podlažím nad řešeným hořícím objektem. Z hlediska odstupových vzdáleností v půdorysné rovině je podstatná sálavá složka tepla. Tato složka je schopna přenést požár na značnou vzdálenost na okolní objekty. Pokud chceme zabránit vznícení hořlavých konstrukcí vně objektu v důsledku sálání tepla, musí být intenzita dopadající složky nižší než kritická hodnota (18,5 kW/ m^2).

Zásadní rozdíl z hlediska hustoty tepelného toku představuje srovnání reálné požárně otevřené plochy s počítanou požárně otevřenou plochou. Ve výpočtu odstupových vzdáleností se předpokládá stejná hustota tepelného toku v celé ploše požárně otevřené plochy. Ve skutečnosti ovšem při požáru dochází v horní části požárně otevřené plochy k vyšlehávání plamenů, k proudění a sálání vně objektu. Spodní část slouží jako přívod vzduchu, který si požár pro svoji potřebu rozvoje sám nasává. Hranice mezi těmito plochami se nazývá neutrální rovina. Pro ruční výpočet je tato skutečnost ovšem záměrně opomenuta, protože by z jednoduchého výpočtu odstupových vzdáleností vytvořila složitý výpočet. Vyšlehávání plamenů může z hlediska určení velikosti sálavé plochy představovat problém. Plameny vyšlehávající před požárně otevřenou plochu mohou svým rozměrem mnohonásobně překonávat rozměr sálavé plochy a pro výpočet odstupových vzdáleností by představovaly značný problém. Tato skutečnost je při výpočtech zohledňována bezrozměrnou veličinou zvanou emisivita, která má ve většině případů hodnotu $\varepsilon = 1$. Tato hodnota emisivity není zcela správná, měla by být přibližně o 20 % nižší, ale zvýšená hodnota ($\varepsilon = 1$) kompenzuje vyšlehávání plamenů z hořícího prostoru.

Výpočet odstupových vzdáleností z hlediska sálání tepla sestává ze tří základních bodů, tj. stanovení intenzity sálání tepla z hořícího prostoru, stanovení kritické intenzity sálání tepla (pro nás je hraniční hodnota $18,5 \text{ kW/m}^2$), určení vzdálenosti, při níž poklesne intenzita sálání tepla na kritickou hodnotu [6]. Stanovení intenzity sálání z hořícího prostoru se pro naše použití určí z výpočtu intenzity sálání za pomoci Stefan-Boltzmannova zákona (vztah 3).

Stanovení intenzity tepla z hořícího prostoru

Stefan-Boltzmannův zákon popisuje intenzitu záření (hustota tepelného toku) absolutně černého tělesa. Pokud se tato definice přenese do oboru požární bezpečnosti, tak vyjadřuje hustotu tepelného toku vyzařovanou z námi počítaného prostoru. Při výpočtu hustoty tepelného toku nám vyjadřuje intenzitu sálání v rovině požárně otevřené plochy, od které se následně určuje odstupová vzdálenost:

$$I = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \theta^4 \quad (3)$$

kde

I – intenzita sálání tepla [W/m^2]

ε – emisivita tělesa

σ – Stefan-Boltzmannova konstanta ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

θ – absolutní teplota tělesa, tj. $\theta = T + 273$ (bude vysvětleno dále)

Absolutní teplota tělesa je stanovena na základě předpokládané teploty v hořícím prostoru podle **teplotní křivky ISO 834** nazývané také jako „**normová teplotní křivka**“. Vyjadřuje časovou dobu po celkovém vzplanutí (Graf 1).

$$T = T_0 + 345 \cdot \log(8t + 1) = T_0 + 345 \cdot \log(8 \cdot p_v + 1) \quad (4)$$

kde

T – teplota hořících plynů podle ISO 834 [°C]

T_0 – počáteční teplota, tzn. před požárem [°C]

t – čas od počátku požáru [min]

p_v – výpočtové požární zatížení [kg/m²]

Stanovení kritické intenzity sálání tepla

V diplomové práci je několikrát zmíněna hodnota kritické intenzity sálání tepla s hodnotou 18,5 kW/m². Tato hodnota byla stanovena na základě pokusů, kdy se zjišťoval vliv sálavého tepla na dřevěné konstrukce. Při dlouhodobějším působení sálavého tepla dochází k rozkladu dřeva a uvolňování plynů. Z laboratorních měření vyplývá, že při vlhkosti dřeva 10-15 % nedojde k uvolňování hořlavých plynů dříve, než za 15 minut při intenzitě sálání tepla 18,5 kW/m². Tato hodnota je tvořena průměrnou hodnotou kritického hodnoty intenzity sálání tepla. Dle grafu 1 u normové teplotní křivky teplota v hořícím prostoru stoupá a s tím stoupá i hodnota intenzity sálání tepla (Vztah 1 a 2). Proto byla stanovena průměrná kritická hodnota z časového úseku 20 minut. Tato kritická hodnota tedy ze zkoumaných vzorků uvolňovala hořlavé plyny, ale nedošlo k samovznícení plynů. K tomu je dle měření potřeba min. 33,5 kW/m² po dobu 3-5 minut. Při stanovení kritické hodnoty se také muselo uvažovat i s jinými hořlavými materiály s jinou hodnotou (nižší) vlhkosti [6].

Určení vzdálenosti za poklesu hustoty tepelného toku

Pro výpočet vzdálenosti, při níž poklesne intenzita sálání na hraniční hodnotu 18,5 kW/m², budeme potřebovat součinitel zvaný polohový faktor. Tento součinitel určuje podíl celkového sálavého tepla vycházejícího ze sálajícího povrchu a dopadajícího na danou příjmovou rovinu. Hodnota tohoto součinitele závisí na velikosti sálavé roviny, na vzdálenosti přijímajícího povrchu od sálavého povrchu a na jejich vzájemné orientaci (rovnoběžná dispozice, kolmá dispozice nebo obě roviny svírají určitý úhel). Jedná se o bezrozměrnou veličinu pohybující se v intervalu <0;1>. V praxi se využívá při výpočtu tepelného namáhání vnitřních i vnějších prvků [9].

Nejvyšší hodnota polohové faktoru vychází pro případ, kdy sálavá a pohlcující rovina jsou vzájemně rovnoběžné. Tomuto případu se budu nadále věnovat, protože cílem je zjištění této nejvyšší hodnoty. Polohový faktor je určen poměrem kritické intenzity sálání I_o a intenzity sálání ze sálající roviny I (Vztah 3). Dále lze polohový součinitel sčítat a odčítat. Tento fakt znamená, že pokud máme požárně otevřenou plochu a v ní nesálající část, jednoduše spočteme polohový faktor celé plochy a od něj odečteme polohový faktor nesálající části.

$$\phi = \frac{I_o}{I} \quad (5)$$

kde

ϕ – polohový faktor [-]

I_o – kritická hodnota intenzity sálání tepla [kW/m^2]

I – intenzita sálání v rovině sálání [kW/m^2]

Rovnice se vztahuje k výpočtu polohového faktoru v těžišti požárně otevřené plochy. Po dosazení získáme hodnotu polohového faktoru dílčí plochy ϕ_1 . Abychom dostali polohový faktor celé plochy, musíme sečíst polohové faktory všech dílčích sálajících povrchů. Pro výpočet odstupových vzdáleností musíme dosadit do rovnice pro výpočet polohového faktoru (Vztah 6) takovou hodnotu odstupové vzdálenosti, abychom dostali stejnou hodnotu polohového faktoru, jako je uvedeno ve vztahu výše (Vztah 5).

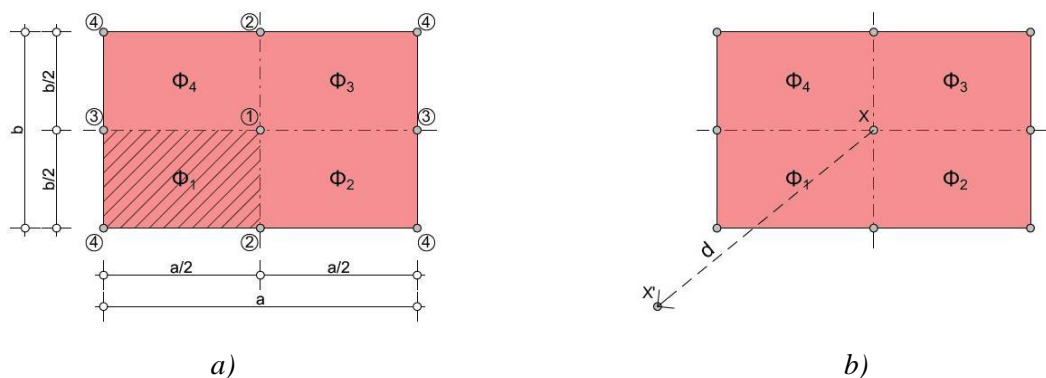
$$\phi = \frac{1}{2\pi} \left[\tan^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \right) \cdot \left(\frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right) \cdot \left(\frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right) \right] \quad (6)$$

kde

ϕ - polohový faktor

X - $(a/2)/d$; d - odstupová vzdálenost

Y - $(b/2)/d$; d - odstupová vzdálenost



Obr. 10: Polohový faktor: a) Popis sálavé plochy pro výpočet polohového faktoru; b) Sálavá plocha a ozařovaná ploška

2.3.5 Teplotní křivky

Hodnota teploty při výpočtu odstupových vzdáleností má ve výsledcích důležitou roli. Na jejím základě je určena hustota tepelného toku v rovině požárně otevřené plochy. Hodnoty odstupových vzdáleností na základě přílohy F v ČSN 73 0802 jsou určeny pro teplotní křivku ISO 834, tedy normovou teplotní křivku. Podle normové teplotní křivky se např. zkouší požární odolnost konstrukcí ve zkušebních pecích. V řadách analýz, např. analýza Ing. Františka Pelce, je dokázáno, že při požáru konstrukcí vně objektů (viz kapitola 2.2.2) nedochází k překročení hraniční hodnoty teploty pro křivku vnějšího požáru, která je 680 °C (jedná se o teplotu naměřenou v rovině požárně otevřené plochy) [10]. V tomto případě by do výpočtu intenzity sálání tepla (Vztah 3 a 4) vstoupila rovnice křivky vnějšího požáru. Tím by se dramaticky snížila odstupová vzdálenost, protože by teplota v posuzovaném prostoru nemohla překročit limitní hodnotu křivky vnějšího požáru (Graf 1). Ve vnějším prostředí v úrovni sálavé plochy ve většině případů nemůže dojít k růstu teploty stejným způsobem, jako tomu dochází u uzavřených stavebních objektů, a tak je pro výpočet odstupových vzdáleností vhodné použít křivku vnějšího požáru.

Křivka vnějšího požáru a její hraniční teplota 680 °C představují teplotu, která nebude při požáru překročena a lze ji definovat následujícím vztahem (Vztah 7):

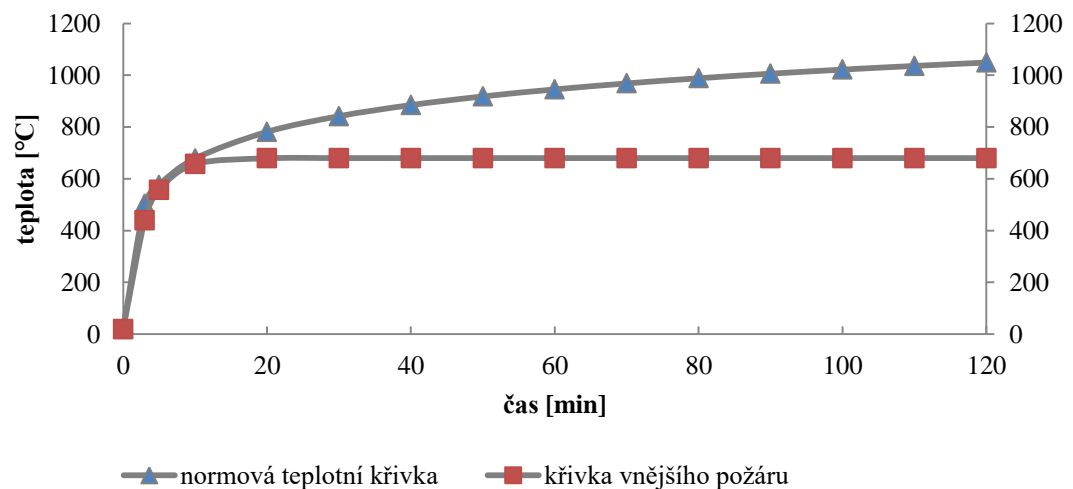
$$T = T_0 + 660 \cdot (1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-0,38t}) \quad (7)$$

kde

T - teplota hořících plynů křivky vnějšího požáru [°C]

T_0 - počáteční teplota, tzn. před požárem [°C]

t - čas od počátku požáru [min]



Graf 1: Srovnání nominálních teplotních křivek

2.4 Matematické modelování požáru

V dnešní době se ve světě i u nás realizují projekty, které jsou svou složitostí neřešitelné klasickými normovými postupy, a tak se do popředí dostávají postupy, kterými jsme schopni tyto složité projekty řešit. Jedná se o matematické modelování dynamiky požáru, kdy jsme schopni za pomoci různých softwarů simulovat požár jak v uzavřeném, tak i otevřeném prostředí staveb. Tyto programy pracují na principu *CFD* (Computational Fluid Dynamics), což v překladu znamená dynamické proudění tekutin. Tekutina je v tomto případě reprezentována směsí vzduchu, kouře a plynných zplodin hoření [11]. Pro diplomovou práci byl zvolen program Pyrosim, který slouží jako grafická nástavba výpočetního programu *FDS*.

2.4.1 Zvolený program pro simulaci požáru

Matematické modely přístřešku a pergoly (viz kapitolu 3), kterými se tato práce zabývá, jsou vymodelovány v programu Pyrosim od společnosti Thunderhead engineering (výuková verze). Tento program slouží jako grafická nástavba výpočetního programu *FDS* (Fire Dynamics Simulator, dále jen *FDS*), který pracuje na již zmíněném principu *CFD*.

FDS je program, který byl poprvé představen již v roce 2000 v USA. Program byl vyvinut Institutem národních standardů a technologií (NIST), který se zabývá inovacemi v oblasti průmyslu a obchodu [12]. Program pracuje na principu výpočtu Navier-Stokesových rovnic pohybu tekutin, avšak pouze pohybu s nízkou rychlostí (Machovo číslo ≤ 3) [11]. Samotný program nám umožňuje simulovat následující:

- transport tepla a kouře prouděním a sáláním,
- přestup tepla mezi vzduchem a pevnými povrchy,
- jednorozměrný transport tepla uvnitř pevných těles,
- pyrolýza pevných a kapalných materiálů,
- šíření plamene a rozvoj požáru,
- sprinklerové hasicí zařízení apod.

Vstupní parametry se v programu *FDS* zapisují do textového souboru ve formě zdrojového kódu, což je bez grafického zobrazení velice náročné. Pro urychlení práce a vyšší uživatelský komfort vznikly grafické nástavby, které umožňují tvorbu modelu v grafickém rozhraní a zároveň vytvářejí zdrojový kód.

Pyrosim je jednou z mnoha grafických nástaveb programu FDS. Program tvoří pre-processor, tedy uživatelské rozhraní, které nám umožní sestavit požadovaný model. Součástí programu je tedy i FDS, které tvoří tzv. procesor, což představuje výpočetní modul, ve kterém probíhá samotný výpočet. Vizualizace výsledku je umožněna programem Smokeview, který je součástí programu FDS a jedná se o tzv. post-processor. Největší výhodou a zároveň úskalím programu je automatická tvorba zdrojového kódu na základě námi vkládaných prvků modelu. Modelování pracuje na principu vlákání knihovnic prvků, kterým se pomocí dialogového okna nastavují různé parametry. Program si sám tyto prvky zapisuje v samostatné záložce ve formě zdrojového kódu pro výpočet v procesoru FDS. Úskalím tohoto postupu je to, že nejsme schopni ručně upravit zdrojový kód. Pyrosim do něj implementuje množství „specifických“ částí kódu, které mohou způsobit prodloužení doby výpočtu. Jedinou možností je exportování souboru do formátu *.fds, který pak můžeme v textovém editoru upravit a zpátky importovat do Pyrosimu.

Po vytvoření modelu a zadání nezbytných hodnot pro průběh simulace se spustí FDS, které v závislosti na složitosti modelu vypočte množství diferenciálních rovnic. Po ukončení výpočtu nám program nabídne zobrazení výsledků ve formátech *.xls, které si musíme následně upravit pro naši potřebu.

Smokeview je post-processor, který nám umožňuje ve své grafickém rozhraní sledovat chování požáru, kouře a měřených parametrů. Výsledné hodnoty jsou pouze přibližné, protože program není schopný ukázat přesné hodnoty, k tomu nám slouží soubory ve formátu *.xls. Tyto grafické výstupy jsou vhodné hlavně pro prezentaci výsledků. Výhodou Smokeview je možnost spuštění už v průběhu výpočtu, takže jsme schopni si ověřit v průběhu výpočtu, jestli náš model funguje správně.

2.5 Dílčí závěr

Z teoretické část vyplývá, že hlavní rozdíl v posuzování odstupových vzdáleností mezi pergolou a přístřeškem tvoří střešní plášť. Podle zatřídění objektů pergol a přístřešků k pojmům otevřený objekt a volný sklad, by se měly stanovovat odstupové vzdálenosti, kde u pergoly bez střešního pláště by výška požárně otevřené plochy byla navýšena o výšku plamenů. K tomuto jevu ovšem dochází i u přístřešků, takže by se odstupové vzdálenosti od obou konstrukcí posuzovaly jako od volných skladů.

Střešní plášť tedy tvoří hlavní rozdíl z hlediska konstrukčního i z hlediska požární bezpečnosti. Na tuto problematiku je zaměřena praktická část diplomové práce, ve které jsou provedeny matematické CFD simulace a požární experimenty fyzikálních modelů pergoly a přístřešku, za účelem zjištění vlivu střešního pláště na rozvoj a šíření požáru.

3 Výpočetní část – matematický CFD model

3.1 Úvod

Tato část diplomové práce řeší tvorbu a vyhodnocení matematických *CFD* modelů pergoly a přístřešku. Jedná se o zmenšené modely pergoly a přístřešku, které byly použity při požárním experimentu, viz kapitolu 4. Geometrie řešených modelů je naprosto totožná, avšak u přístřešku se nachází navíc střešní plášť, od kterého se dá očekávat, že bude způsobovat hlavní rozdíl v rozvoji a šíření požáru. Hlavní cílem této kapitoly je tedy vytvoření funkční *CFD* simulace požáru jednotlivých konstrukcí za účelem získání poznatků z průběhu hoření a následného vyhodnocení vizuálních a numerických výsledků.

Geometrie a konstrukční provedení modelů bylo provedeno tak, abych dosáhl co největšího rozvoje požáru. Z toho důvodu jsou dvě strany modelu opatřeny vodorovným laťováním, na kterém se očekává rychlé šíření požáru.

3.2 Tepelně a požárně technická charakteristika materiálů

Základní požárnětechnické charakteristiky, které vstupují do simulace, jsou objemová hmotnost, součinitel tepelné vodivosti a měrná tepelná kapacita. Další neméně důležitá veličina je efektivní výhřevnost. Průběh hoření dřevěného modelu byl definován rychlostí uvolněného tepla (*HRR*). V následujících odstavcích budou jednotlivé veličiny více rozebrány a odůvodněn jejich výběr.

Objemová hmotnost ρ [kg/m^3]

Hmotnost jednotkového objemu. Pokud použijeme veličinu *BULK DENSITY*, tak výpočetní procesor *FDS* bude počítat množství definované látky na základě zadané objemové hmotnosti a objemu tělesa, nikoliv na tloušťce vrstvy definované příkazem *THICKNESS*. Pokud tedy nspecifikujeme objemovou hmotnost (*BULK DENSITY*), bude se množství paliva počítat na základě hustoty materiálu a tloušťky vrstvy [13].

Pro bližší vysvětlení výše uvedené problematiky jsem provedl simulaci části dřevěného sloupu použitého v modelech. Jde o těleso s rozměry 20/30 mm a výškou 20 mm (výřez sloupu). Provedl jsem simulaci, kde jsem použil hodnotu *HRRPUA* 500 kW/m², abych docílil vyhoření celého prvku během 100 sekund. První dvě simulace jsem provedl se zadanou tloušťkou vrstvy 2,5 mm a 5 mm. Z výsledků je patrné, že celkové množství uvolněného tepla se zvyšuje se

zvyšující se tloušťkou vrstvy (Graf 2). Poté jsem provedl simulaci, kdy jsem na těleso tvořící sloup aplikoval příkaz *BULK DENSITY* s hodnotou objemové hmotnosti 490 kg/m^3 . Před simulací jsem provedl ruční výpočet předpokládaného množství uvolněného tepla ze simulovaného vzorku.

Výpočet předpokládaného množství uvolněného tepla a délky hoření vzorku sloupu:

Vstupní údaje výpočtu:

$$H_{eff} = 12000 \text{ kJ/kg}$$

efektivní výhřevnost

$$V = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

objem vzorku

$$S = 0,0032 \text{ m}^2$$

povrch vzorku

$$\rho = 490 \text{ kg/m}^3$$

objemová hmotnost dřeva

$$m = 5,88 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

hmotnost vzorku

$$HRR = 500 \text{ kW/m}^2$$

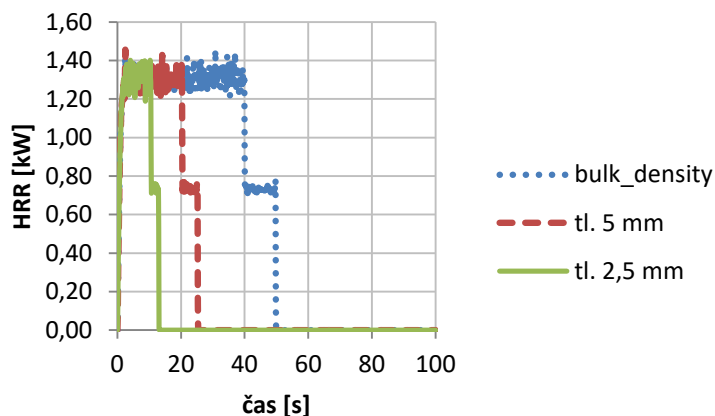
použitá hodnota HRR

Výpočet:

$$THR = m \cdot H_{eff} = 0,00588 \cdot 12000 = 69,9 \text{ kJ} \quad \text{celkové uvolněné teplo} \quad (8)$$

$$t_b = \frac{THR}{HRRPUA} = \frac{69,9}{0,0032 \cdot 500} = 44 \text{ s} \quad \text{čas potřebný ke spálení vzorku} \quad (9)$$

Výše uvedený výpočet názorně ukazuje, kolik by měl simulovaný požár vzorku sloupu uvolnit tepla a za jak dlouho by mělo dojít ke spálení vzorku. Pokud tuto hodnotu porovnáme s ostatními hodnotami (Graf 2), v simulaci došlo ke spálení vzorku v 50 sekundě a celkové množství uvolněného tepla bylo 59 kJ (jedná se o vzorek s příkazem *BULK DENSITY*). Předběžný výpočet tedy přibližně odpovídá výstupním hodnotám ze simulace. Pokud bychom nevyužili příkaz *BULK DENSITY* a použili příkaz *THICKNESS*, hodnoty celkového množství uvolněného tepla by neodpovídaly předběžnému výpočtu (Graf 2).



Graf 2: Srovnání hodnot uvolněného tepla v závislosti na použitém příkazu

Pro účely modelu byly použity dva dřevěné materiály. Borovicové dřevo použité na konstrukci modelu a střešní plášť tvořený OSB deskou. Hodnota objemové hmotnosti pro borovici byla zvolena 490 kg/m^3 . Tato hodnota byla zvolena na základě měření vzorků, které byly použity na konstrukci modelů pro požární experiment, viz kapitolu 4.2. U OSB desky byla objemová hmotnost stanovena na základě hodnot z technických listů výrobce, a to hodnotou 600 kg/m^3 .

Součinitel tepelné vodivosti λ [$W/(m \cdot K)$]

Množství tepla, které za jednotku času projde tělesem jednotkové délky, kde na této délce je zajištěn jednotkový teplotní rozdíl. V *FDS* má tato veličina označení *CONDUCTIVITY*. Jelikož jde o veličinu, která se mění s narůstající teplotou, umožňuje program zadat změnu hodnoty λ v závislosti na čase. V modelu se vyskytují pouze prvky malých rozměrů, proto nebylo třeba využívat tuto možnost. Hodnoty λ byly zvoleny ze stejného zdroje⁴, pro borovici byla tato hodnota $0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ a pro OSB desku $0,12 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

Měrná tepelná kapacita c [$kJ/(kg \cdot K)$]

Množství tepla, které je potřebné k ohřátí jednoho kilogramu látky o jeden teplotní stupeň. V *FDS* má tato veličina označení *SPECIFIC HEAT*. Stejně jako u součinitele tepelné vodivosti, se c mění v závislosti na teplotě. V mém případě bude hodnota po celou dobu simulace konstantní. Pro borovici byl tato hodnota⁵ $2,5 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ a pro OSB desku $1,55 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$.

Efektivní výhřevnost H_{eff} [kJ/kg]

Množství tepla, které se při hoření uvolní z jednotky hmotnosti zkoušené látky, přičemž voda zůstává ve formě páry ve spalinách. Efektivní výhřevnost uvažuje nedokonalé spalování, z toho důvodu je hodnota efektivní výhřevnosti nižší než čistá výhřevnost. Hodnoty čisté výhřevnosti pro oba typy materiálů byly tedy vynásobeny součinitelem k_{p1} , který vyjadřuje podíl efektivní výhřevnosti H_{eff} a čisté výhřevnosti H téže hořlavé látky. Hodnoty součinitele k_{p1} byly převzaty z normy ČSN 73 0824 – Výhřevnost hořlavých látek. Vypočtená efektivní výhřevnost borovice má hodnotu 12 kJ/kg , pro OSB desku je tato hodnota $14,5 \text{ kJ/kg}$.

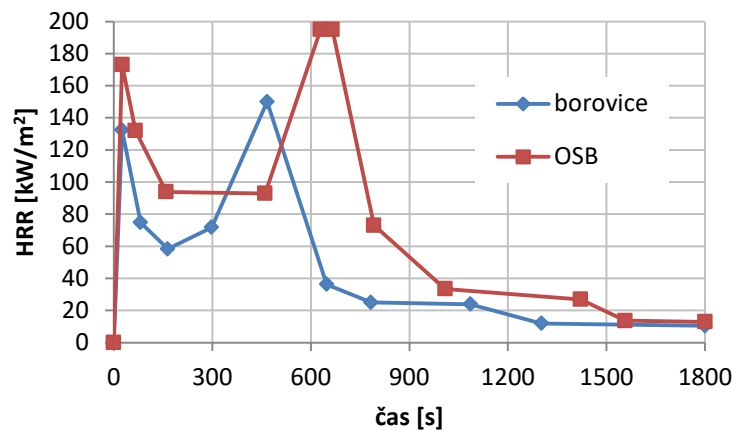
⁴ Součinitel tepelné vodivosti byl převzat pro oba materiály z https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html.

⁵ Hodnoty měrné tepelné kapacity byly převzaty pro oba materiály z https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-solids-d_154.html

Rychlost uvolňování tepla HRR [kW]

Časově proměnná veličina, která představuje rychlost tepla uvolněné v čase. Tato hodnota se měří laboratorně v kónickém kalorimetru. V *FDS* nám tento parametr udává, jakým způsobem bude povrch, na který aplikujeme tento parametr, hořet. Druhou možností je zadat proces hoření pomocí kinetických vlastností hoření jednotlivých materiálů. Hodnoty pro tento postup jsou obtížně dostupné, proto jsem zvolil submodel hoření na základě hodnot HRR .

Hodnoty rychlosti uvolňování tepla pro borovici a *OSB* desku mi poskytl Ing. arch. Petr Hejtmánek. Naměřené hodnoty rychlosti uvolňování tepla pochází z TÚPO HZS ČR (Technický ústav požární ochrany), kde byly dřevěné vzorky měřeny v kónickém kalorimetru. V rámci zjištění hodnoty HRR byly měřeny vždy tři vzorky pro tepelné toky 35 kW/m^2 a 50 kW/m^2 .



Graf 3: Rychlost uvolňování tepla pro oba typy použitého materiálu

Na grafu (Graf 3) jsou zobrazeny průběhy hodnot HRR z kalorimetrické zkoušky. Zvolené průběhy byly získány jako průměr tří provedených zkoušek pro každý vzorek. Maximální dosažená hodnota HRR_{max} byla pro borovici 150 kW/m^2 a pro *OSB* desku 195 kW/m^2 .

V programu je nutné definovat hodnotu výkonu na jednotce plochy, tzv. $HRRPUA$ (Heat Release Rate per Unit Area). Získané hodnoty HRR už byly přímo ve výstupních datech z kalorimetru přepočítány na jednotku plochy, tudíž byly do programu vloženy jako $HRRPUA$. Jediný prvek modelu, kde musel být výkon přepočítán na jednotku plochy, byl zápalný zdroj (plynový hořák). Vymodelovaný hořák měl stejné rozměry i výkon jako hořák u experimentu. Půdorysná plocha byla $0,03 \text{ m}^2$ ($0,3 \times 0,1 \text{ m}$) a výkon 10 kW . Výsledná hodnota $HRRPUA$ pro hořák tedy byla 333 kW/m^2 . Výkon hořáku byl regulován na základě provedeného požárního experimentu, tedy u pergoly byl výkon snížen v 900. sekundě na hodnotu 2 kW a u přístřešku v 620. sekundě na hodnotu 2 kW .

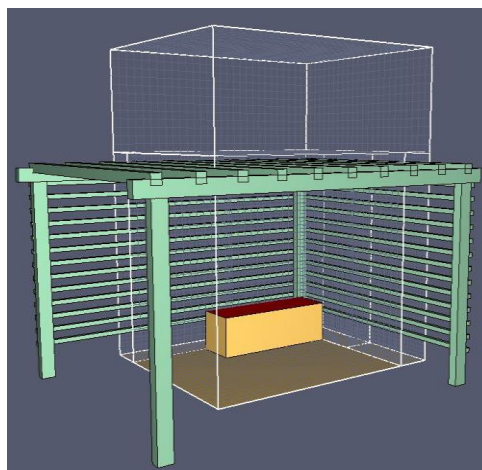
3.3 Výpočetní oblast (MESH)

Simulace probíhá v námi definované výpočetní oblasti (mesh). Každá výpočetní oblast se skládá z jednotlivých kontrolních objemů, mezi kterými probíhá vzájemná výpočetní interakce. Narůstající množství počtu buněk navyšuje časovou náročnost výpočtu. Pro oba modely byly použity dva druhy výpočetní sítě, a to síť hrubá s velikostí výpočetní buňky 20 x 20 x 20 mm a síť jemná s velikostí buňky 10 x 10 x 10 mm. Velikost jednotlivých prvků částečně vychází z předběžných simulací, které sloužily pro stanovení velikosti výpočetní sítě a stanovení časové náročnosti výpočtu. Pro zpřesnění CFD simulace byly následně velikosti jednotlivých částí konstrukcí zvoleny na základě velikosti fyzického modelu, viz kapitolu 4.2. Nejmenší prvky modelu (dřevěné laťování) mají průřez 10 x 10 mm. Ostatní konstrukce mají dimenze 20 x 20 mm a 20 x 30 mm. Jemná síť je primárně určena pro místo, kde podle experimentu došlo k největšímu rozvoji požáru, tzn. dřevěné konstrukce v blízkosti zápalného zdroje a případně kolem dřevěných konstrukcí, po kterých se mohl požár šířit. Hrubá síť vyplňovala prostor kolem konstrukcí modelu, v této síti docházelo pouze k měření teplot a sledování chování plamene.

3.3.1 Výpočetní oblast pergoly

Rozložení výpočetní sítě jsem zvolil na základě provedeného požárního experimentu. Z toho důvodu byla výpočetní oblast u pergoly omezena na zadní pravou část pergoly (Obr. 11). Během požárního experimentu pergoly došlo k rozvoji požáru pouze v tomto místě a požár se nešířil dál, proto jsem usoudil, že je zbytečné, aby se ve výpočetní síti nacházela celá konstrukce. Tímto rozložením výpočetní sítě jsem docílil snížení počtu buněk, a tím i snížení časové náročnosti výpočtu. Pro ověření této hypotézy jsem provedl předběžnou simulaci, která potvrdila moje očekávání, a simulovaný požár proběhl pouze v místech hořáku. Došlo k částečnému šíření požáru po střešních krokách, ale toto šíření považuji za zanedbatelné, jelikož vodorovné šíření požáru neprobíhalo ani na vodorovném laťování i přes malou dimenzi dřevěných prvků.

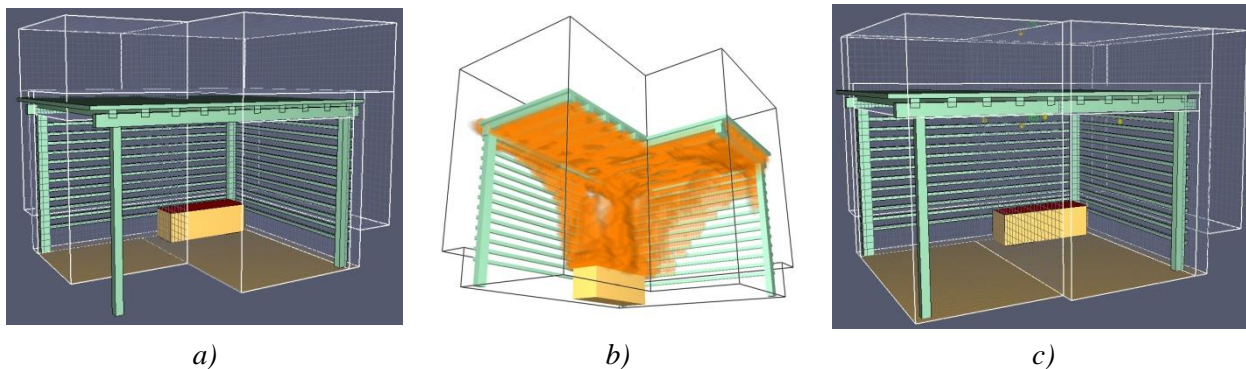
Počet buněk v jednotlivé síti a celkový počet sítí jsem zvolil na základě výpočetní jednotky (počítač), na které jsem výpočet prováděl. Simulaci lze provést tzv. paralelním výpočtem, kdy se každá dílčí část výpočetní oblasti přiřadí k jednotlivým jádrům procesoru, tzn. na každém jádru procesoru probíhá i-tý počet procesů. Záleží na tom, kolik se jich jednotlivému jádru přiřadí. Z toho důvodu jsem zvolil rozdělení výpočetní oblasti na šest výpočetních sítí, jelikož počítač, na kterém probíhal výpočet, obsahoval 6jádrový procesor. Celkový počet buněk byl u pergoly 60 000.



Obr. 11: Zvolená výpočetní oblast pro pergolu

3.3.2 Výpočetní oblast přístřešku

Při návrhu výpočetní sítě pro přístřešek jsem také vycházel z poznatků, které jsem získal během požárního experimentu. Střešní plášť měl hlavní vliv na rozšíření požáru na celou konstrukci. Z toho důvodu jsem provedl předem několik simulací, ve kterých jsem ověřoval, jestli můžu výpočetní oblast omezit stejně jako u pergoly, nebo jestli ji budu muset rozšířit na celou konstrukci přístřešku. Jelikož při požárním experimentu vůbec nebyla požárem zasažena pravá přední část, rozhodl jsem se tuto oblast z výpočetní sítě odečíst (Obr. 12a). Provedl jsem simulaci takto omezené výpočetní sítě. V simulaci došlo k šíření požáru po spodní straně střešního pláště (*OSB* deska) v celé ploše výpočetní sítě, tudíž je zde předpoklad, že kdyby byla výpočetní síť rozšířena na celou konstrukci, požár by se šířil i do pravé přední části konstrukce (Obr. 12b). V důsledku tohoto zjištění proběhla úprava výpočetní sítě, kdy jsem výpočetní síť rozšířil na celou konstrukci přístřešku (Obr. 12c).



Obr. 12: Zkouška omezené výpočetní oblasti: a) ukázka omezené výpočetní oblasti; b) šíření požáru pod střešním pláštěm omezeným výpočetní sítí; c) ukázka rozšířené výpočetní oblasti

Rozšíření výpočetní sítě jsem provedl i v přední části konstrukce, kde jsem vyzoroval tendenci vyšlehávání plamenů nad střešní plášť. Toto chování šíření plamenů jsem pozoroval i u experimentu požáru přístřešku, viz kapitolu 4.4.2. Rozšíření výpočetní sítě na stranách opatřených vodorovným laťováním jsem provedl z důvodu možnosti sledování předpokládaného vybočení plamenů, jako k tomu došlo při požárním experimentu přístřešku.

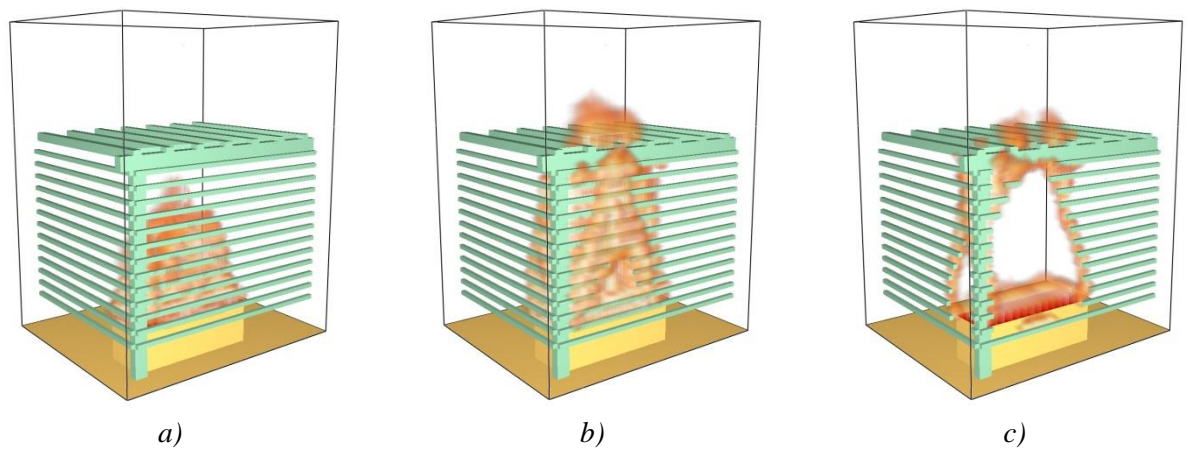
Výpočetní oblast byla rozdělena do deseti jednotlivých výpočetních sítí. Důvod takto vysokého množství výpočetních sítí je ten, že jsem se snažil co nejvíce snížit celkový počet buněk. Dělením sítě na jemnou síť a hrubou síť v závislosti na jejím umístění jsem dokázal snížit celkový počet buněk přibližně na 115 000 z původních 180 000. Hlavní rozdíl v počtu výpočetních buněk mezi pergolou a přístřeškem tvořila výpočetní síť kolem střešního pláště u modelu přístřešku, kde jsem použil jemnou síť kvůli tloušťkám konstrukcí. Výpočet simulace požáru přístřešku neprobíhal na stejné výpočetní jednotce jako pergola. Jelikož výpočet probíhal bez mého přímého přístupu k počítači, nemohl jsem použít paralelního výpočtu, jak tomu bylo u pergoly. I tak by to byl u této konstrukce problém, protože bych musel optimalizovat počet výpočetních sítí, což by se projevilo zvýšením času simulace.

3.4 Výsledky matematického modelu pergoly

V matematickém modelu pergoly byl jeden z hlavních cílů sledování rozvoje požáru a chování plamenů u konstrukce bez střešního pláště. Výstupní data byla zpracována v tabulkovém editoru do formy grafů a v grafické nástavbě Smokview bylo sledováno chování a šíření plamenů.

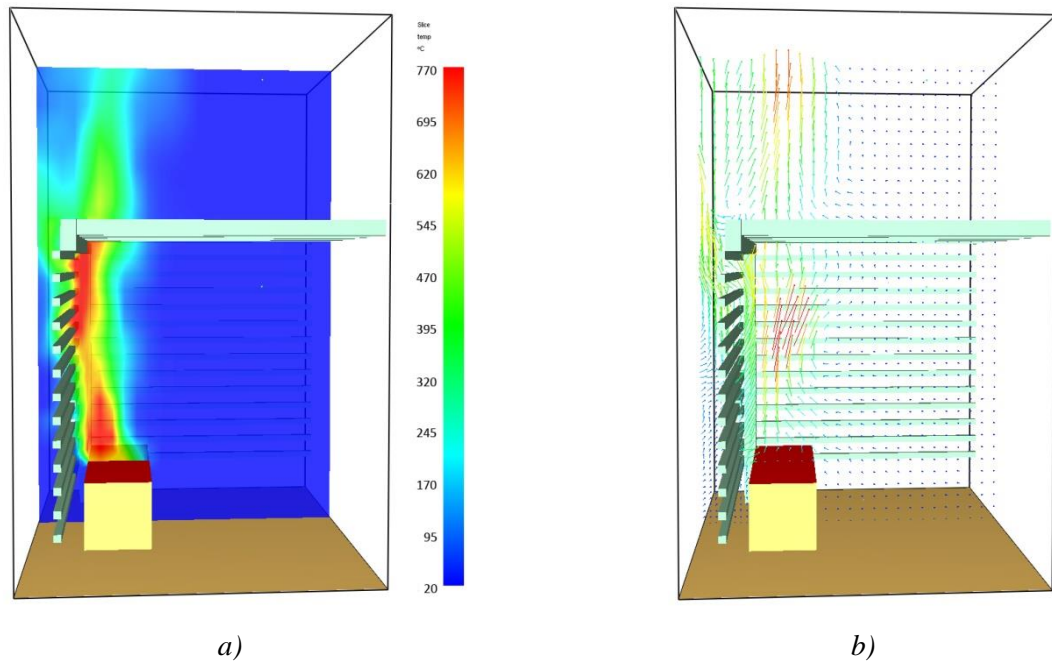
Rozhořivání zadního laťování nastalo přibližně kolem 100. sekundy simulace (Obr. 13a), kdy se požár začal šířit ve vertikálním směru po vodorovných dřevěných prvcích po jejich vnitřní straně. Ve 120. sekundě začalo docházet k prošlehávání plamenů nad rovinu konstrukce střechy, což trvalo až do konce simulace. Hlavní zdroj požáru, a tedy i paliva, tvořilo zadní vodorovné laťování, které bylo celou dobu simulace hlavním zdrojem hoření. Největší rozvoj požáru a tím pádem i nejvyšší hodnota HRR byla zaznamenána v čase 465 sekund (Obr. 13b), v tomto čase bylo zadní vodorovné laťování zcela v plamenech, boční laťování hořelo na vnitřní straně a došlo k rozšíření plamenů na krokve. Maximální zaznamenaná hodnota HRR byla 18,1 kW. Od 465. sekundy docházelo k postupnému odhořivání dřevěného materiálu na zadní i boční části vodorovného laťování. V čase 900 sekund došlo ke snížení výkonu hořáku na 2 kW. Jelikož v tomto čase tvořil plynový hořák převážnou část výkonu, došlo po 900. sekundě k postupnému uhasinání požáru, které trvalo až do konce simulace, tedy 1200 sekund. V průběhu simulace

nedošlo k výraznému šíření požáru na ostatní části konstrukce pergoly a požár proběhl pouze v místě hořáku, čímž se potvrzuje správnost použité výpočetní sítě, viz kapitolu 3.4.1.



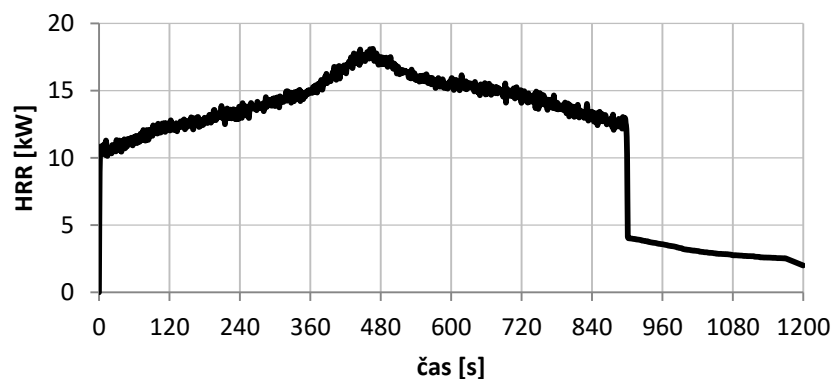
Obr. 13: Rozvoj požáru pergoly v čase: a) 100 s; b) 465 s; c) 900 s

Chování plamenů v oblasti vodorovného laťování a konstrukce střechy nevykazovalo žádné abnormality. Jelikož se ve vodorovné rovině nenacházela žádná plošná konstrukce, mohly se plameny šířit pouze ve vertikální rovině bez výrazného vyšlehávání. Pro ověření tohoto chování jsem v modelu provedl řezové roviny, ve kterých lze zobrazit vizuálně hodnoty měřené veličiny i směrovou tendenci vývoje hoření. Na obrázcích 14a a 14b je vidět chování plamenů v celé výšce výpočetní sítě. Po celou dobu simulace plameny směřovaly ve stejném směru kromě malých odchylek. Maximální zaznamenaná výška plamenů v simulaci oscillovala 12 cm nad rovinou střechy, ale tato hodnota nemůže být brána jako relevantní, jelikož se nad rovinou konstrukce střechy nacházelo rozhraní dvou dílčích výpočetních sítí (jemná a hrubá), kde v tomto místě docházelo ke grafickým anomáliím způsobených rozdílností hustoty výpočetní sítě. Pokud by byla použita po celé výšce pouze jedna výpočetní síť, průběh a výška plamenů by byla z grafického rozhraní lépe rozeznatelná.



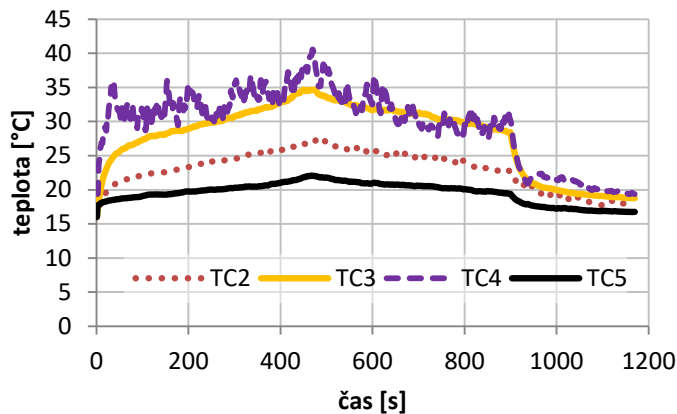
Obr. 14: Směr šíření plamenů ve vertikální rovině: a) v teplotním poli; b) ve směrových vektorech

Model pergoly měl nastaven měřicí zařízení ve stejných místech jako při požárním experimentu. Termočlánky se nacházely uprostřed modelu, v rovině kratší obvodové stěny a nad modelem. Ve výstupních datech tedy kromě HRR byla data pro každý termočlánek umístěný v simulaci. Získaná hodnota HRR měla nízkou rychlost nárůstu, kromě první sekundy simulace, kdy došlo k zapnutí hořáku s výkonem 10 kW. Nárůst byl pozvolný bez výrazných výkyvů. Maximální hodnota, tedy 18,1 kW, byla dosažena v 465. sekundě, kdy došlo k maximálnímu rozvoji požáru na zadním vodorovném laťování (Obr. 14b, Graf 4). Z této hodnoty je patrné, že samotný výkon požáru bez vlivu hořáku byl nízký, vezmeme-li v úvahu výkon hořáku 10 kW. Poté hodnoty HRR téměř lineárně klesaly až do 900. sekundy, kdy došlo ke snížení výkonu na 2 kW, což je na grafu vidět jako náhlý pokles křivky.

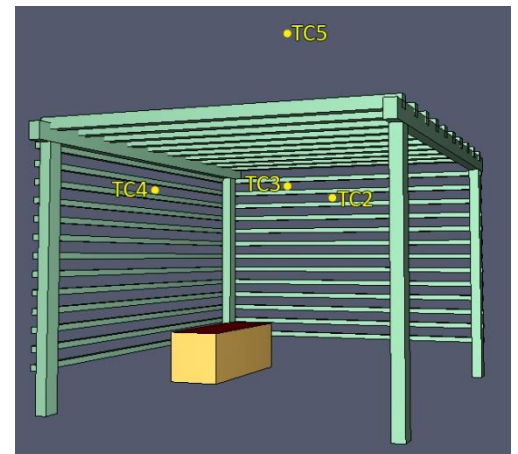


Graf 4: Rychlost uvolňování tepla z CFD simulace pergoly

Měření teplot bylo ze značné míry ovlivněno umístěním termočlánků. Rozmístění termočlánků je vidět na obrázku 15. Naměřené hodnoty na všech termočláncích se pohybují v rozmezí 25 °C, to znamená, že nebyly zasaženy přímými účinky požáru, tedy plameny, ale pouze radiční nebo konvektivní složkou požáru. Největší zaznamenané hodnoty a zároveň největší výchyly vykazuje průběh teplot zaznamenaný termočlánkem TC4. Tyto výchyly jsou způsobeny umístěním termočlánku blíže zdroji hoření.



Graf 5: Průběh teplot z CFD simulace pergoly



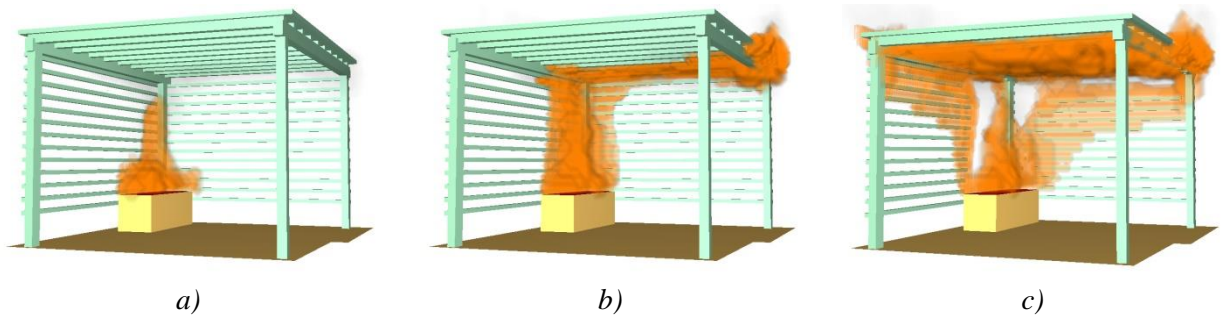
Obr. 15: Rozmístění termočlánků

3.5 Výsledky matematického modelu přístřešku

Stejně jako u CFD simulace pergoly i u přístřešku byl hlavní cíl sledování rozvoje a chování požáru. Oproti simulaci pergoly byla doba výpočtu zkrácena na 800 sekund, a to z důvodu proběhlého požárního experimentu přístřešku, kdy v době 660 sekund došlo k zřícení modelu a zaznamenaná data po tomto čase už nebyla vhodná pro srovnání, které je provedené samostatně v kapitole 5.3.

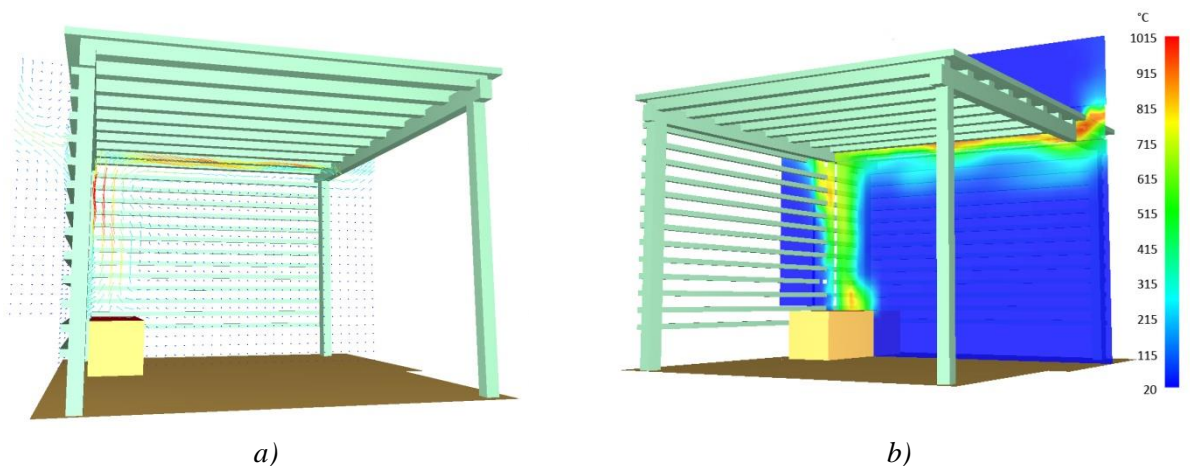
Rozvoj požáru po zadní straně dřevěného laťování nastalo přibližně v 60. sekundě simulace (Obr. 16a). Požár se zde stejně jako u pergoly začal šířit ve vertikálním směru po vodorovných dřevěných prvcích po jejich vnitřní straně v místě umístění hořáku. Ve 100. sekundě došlo k rozhoření spodní strany střešního pláště a šíření požáru pod střešním pláštěm na druhou stranu přístřešku (Obr. 16b). Na obou stranách střešního pláště došlo k vyšlehávání plamenů nad střešní pláště. Tento jev byl sledován až do konce simulace. Maximální rozvoj požáru nastal po 450. sekundě, tedy v době, kdy hořela celá konstrukce střešního pláště (spodní strana) a obě strany vodorovného laťování. Poté měl výkon požáru mírně klesající tendenci do 620. sekundy, kdy došlo k snížení výkonu hořáku na 2 kW. V době ukončení simulace byl vizuální rozvoj požáru podobný jako v době po 450. sekundě (Obr. 16c).

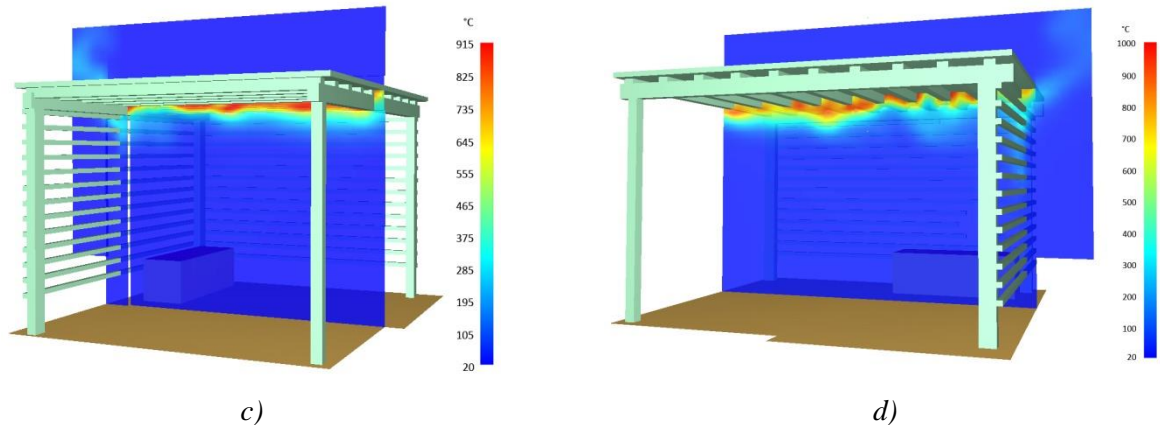
Střešní plášť tedy způsobil rozšíření požáru na celou konstrukci přístřešku ve vrchní části. Spodní část konstrukcí nebyla požárem vůbec zasažena.



Obr. 16: Rozvoj požáru v CFD simulaci přístřešku v čase: a) 60 s; b) 240 s; c) 800 s

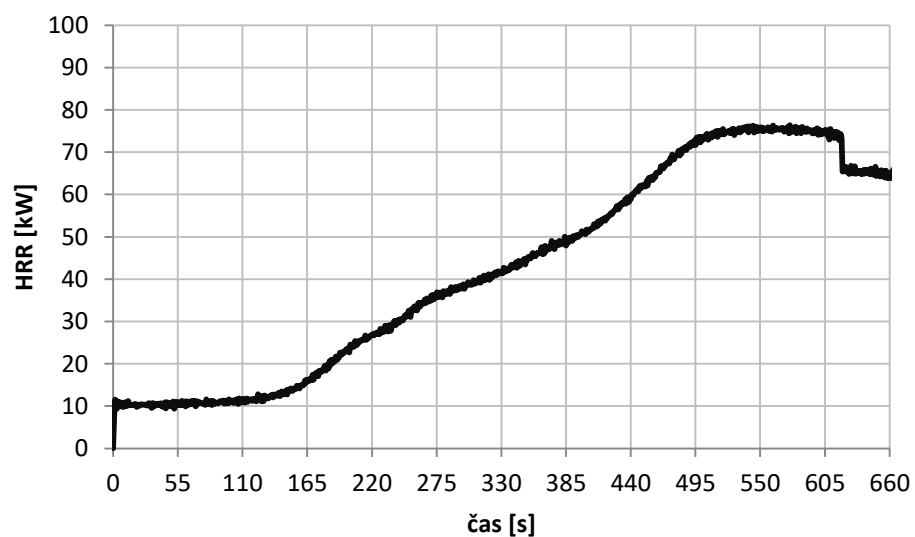
Šíření a chování plamenů v oblasti vodorovného laťování a konstrukce střechy bylo tedy značně ovlivněno použitím střešního pláště. Tendence vyšlehávání plamenů nad střešní plášť byla znatelná po rozhoření konstrukce po celou dobu simulace. Vizuální výška plamenů se u simulace potýkala se stejným problémem, jako u simulace pergoly, viz kapitolu 3.5. Nad rovinou střešního pláště se nacházelo rozhraní dvou výpočetních sítí a i přes úpravy hranice těchto sítí se zde projevil stejný jev jako u simulace pergoly. Na rozhraní hrubé a jemné výpočetní sítě došlo ke grafickým anomáliím a s tím spojené nepřesné zobrazení velikosti plamenů (Obr. 17b, c, d). Pro ověření chování plamenů v oblasti střešního pláště jsem provedl v simulaci řezové roviny zobrazující měřené velečiny a směrovou tendenci hoření. Na obrázcích 17a až 17d můžeme vidět směrovou tendenci plamenů v oblasti střešního pláště. Střešní plášť způsoboval vyšlehávání plamenů převážně v rovině kolmé k delší straně přístřešku. V rovině rovnoběžné s delší stranou přístřešku docházelo jen k šíření požáru pod střešním pláštěm a téměř žádnému vyšlehávání plamenů (Obr. 17d). Šíření požáru pod střešním pláštěm a rychlost šíření pyrolyzních plynů způsoboval hlavně výkon hořáku (Obr. 17a).





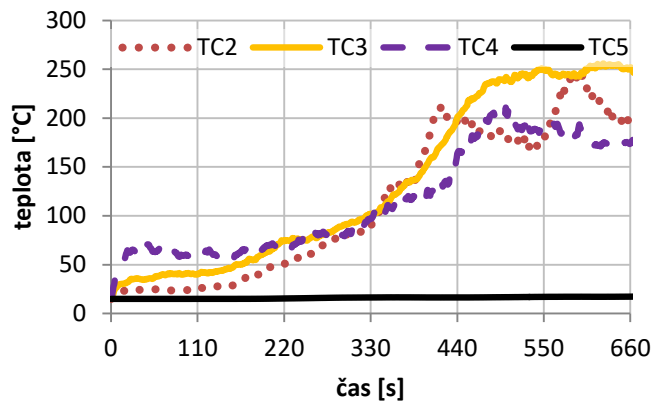
Obr. 17: Směr šíření plamenů ve vertikální rovině: a) ve směrových vektorech; b) v teplotním poli řez 1; c) v teplotním poli řez 2; d) v teplotním poli řez 3

Omezení časové osy na grafu rychlosti uvolňování tepla pro *CFD* simulaci přístřešku (Graf 6) je provedeno z důvodu následného srovnání, viz úvod této kapitoly. Mírný nárůst *HRR* začal po 50. sekundě, kdy došlo k rozhoření vodorovného laťování (Obr. 16a). Od 110. sekundy byl nárůst téměř lineární bez výkyvů. Tento klidný nárůst se dá vysvětlit pomalým rozhoříváním celé konstrukce, u které se nenacházelo místo, ve kterém by došlo k výraznějšímu rozhoření (předpoklad byl, že k tomuto jevu dojde na zbylé části vodorovného laťování). Maximální hodnota 76,4 kW byla dosažena v 575. sekundě, tedy v době, kdy byla celá spodní strana střešního pláště v plamenech a docházelo k hoření obou stran vodorovného laťování i části vrchní strany střešního pláště. Poté následoval mírný lineární pokles až do konce simulace, kromě 620. sekundy, kdy došlo ke snížení výkonu hořáku.



Graf 6: Rychlost uvolňování tepla z *CFD* simulace přístřešku

Umístění termočlánku u přístřešku bylo stejné jako u pergoly. Termočlánky TC2 až TC4 (Graf 7, Obr. 18) měly srovnatelné průběhy teplot po celou dobu simulace, kdy hodnoty teplot postupně narůstaly a míra nárůstu teplot koresponduje s rozvojem požáru celé konstrukce a s tím spojených hodnot *HRR*. Nárůst teploty u termočlánků TC2 a TC4 byl způsoben rozhořením vodorovného laťování na obou stranách přístřešku, ale došlo k tomu až poté, co se požár rozšířil na celou spodní plochu střešního pláště. Až poté se požár rozšířil na dřevěné laťování, takže zde docházelo k šíření požáru shora směrem dolů, což je málo vídaný jev. Termočlánek TC5 (Graf 7, Obr. 18), který by umístěn nad střešním pláštěm, byl po celou dobu simulace odstíněn od účinků požáru, z toho důvodu nezaznamenal téměř žádnou teplotní změnu. Jelikož došlo v 620. sekundě ke snížení výkonu hořáku, nepředpokládám, že by mohlo dojít k rozšíření požáru na celou vrchní plochu střešního pláště.



Graf 7: Průběh teplot z CFD simulace přístřešku



Obr. 18: Rozmístění termočlánků

3.6 Dílčí závěr

Po vizuální stránce byl požár v *CFD* simulaci přístřešku rozsáhlejší než u pergoly, a to díky rozšíření požáru po střešním plášti. Střešní plášť umožnil u přístřešku rozhoření vrchní části vodorovného laťování v celé délce stěny, k čemuž u pergoly nedošlo. Rozdílné chování požáru bylo patrné přibližně od 100. sekundy simulace, kdy docházelo k rozdílnému rozhořování konstrukcí. U přístřešku docházelo k rychlému šíření požáru na střešní plášť a dále do všech stran, zatímco u pergoly docházelo pouze k hoření konstrukcí v blízkosti hořáku. U simulací nedocházelo k významnému vyšlehávání plamenů do stran, což bylo ovšem způsobeno rozložením výpočetních sítí. Hlavně u přístřešku je předpoklad, že při zvolení jemnější a celistvé výpočetní sítě by byl jev vyšlehávání lépe patrný a rozeznatelný. Dále byl u obou simulací použit parametr *BURN_AWAY*, a tak jsem byl schopen sledovat postupné odhořívání hořlavého

materiálu v průběhu simulace. Během obou simulací nedošlo k úplnému vyhoření žádného z hlavních nosných prvků. U pergoly došlo k vyhoření pouze vodorovného laťování v blízkosti hořáku a krokví v místě nad hořákem. U přístřešku došlo díky rozšíření požáru k odhoření téměř celých vaznic, krokví, vodorovného laťování a spodní části střešního pláště. Nejvíce mě u obou simulací překvapil zadní pravý sloup (u hořáku), který i na konci obou simulací zůstal celistvý. I zde je třeba říci, že simulace přístřešku nebyla provedena po stejnou dobu jako u pergoly a je zde předpoklad, že by k tomuto odhoření došlo v pozdějším čase. Program ovšem neumí simulovat pád konstrukce, ke kterému by díky přehoření hlavních nosných prvků došlo, a tím pádem i k odlišnému rozvoji požáru po zbylou část simulace.

Je důležité upozornit na úskalí, které s sebou matematické modelování požáru přináší. Výsledky vizuálního a numerického porovnání obou simulací mohou být ovlivněny řadou faktorů. Největším úskalím tvorby *CFD* simulací jsou samotná vstupní data. Pro stejný materiál existuje množství požárně technických i tepelně technických charakteristik a je na samotném uživateli, z jakého zdroje tyto informace čerpá. Výsledná chyba simulace tedy odpovídá chybovosti vstupních dat, tudíž to není chyba softwaru, který simulaci provádí. Nejdůležitějším krokem k ověření správnosti získaných hodnot je validační proces, ve kterém se srovnávají data získaná z *CFD* simulace s experimentálně získanými údaji [11]. Jelikož byl součástí diplomové práce i požární experiment, bylo vhodné využít získaná experimentální data a provést validaci matematického modelu, což je provedeno v samostatné kapitole 5 - Porovnání výsledků *CFD* simulací s výsledky požárních experimentů.

4 Experimentální část – požární experiment

4.1 Úvod

Nejdůležitější částí diplomové práce je požární experiment zmenšených modelů pergoly a přístřešku. Záměrem tohoto experimentu nebylo zjišťování kritické hustoty tepelného toku na hranici požárně nebezpečného prostoru ($18,5 \text{ kW/m}^2$), jelikož u těchto zmenšených konstrukcí nelze těchto hodnot tepelného toku dosáhnout, ale zkoumat vliv střešního pláště na rozvoj požáru, samotné chování plamenů v závislosti na střešním plášti, a tím dokázat, že tyto konstrukce jsou z pohledu velikosti požárního rizika značně rozdílné. Nedílnou součástí experimentu bylo také validovat matematický *CFD* model pergoly a přístřešku na základě chování požáru a naměřených hodnot.

4.1.1 Cíle experimentální části

1) *Vytvoření zmenšených modelů*

Pro účely experimentu vytvořit dva dřevěné modely, které budou v měřítku zmenšeny na rozměry schopné přepravy a následné požární zkoušky. Základní rozměry, ze kterých jsem pro stavbu modelů vycházel, jsou $4 \times 3 \times 2,5 \text{ m}$, tudíž měřítko modelů bylo 1:5.

2) *Měření požárně technických veličin při požární zkoušce*

Základními měřenými veličinami bude průběh teplot, velikost sálavé složky tepelného toku, rychlost uvolňování tepla a měření úbytku hmotnosti.

3) *Sledování chování rozvoje požáru*

Dokumentace a zhodnocení průběhu požární zkoušky a zjištění vlivu střešní konstrukce na rozvoj a šíření požáru.

4) *Ověření naměřených hodnot *HRR* výpočtem*

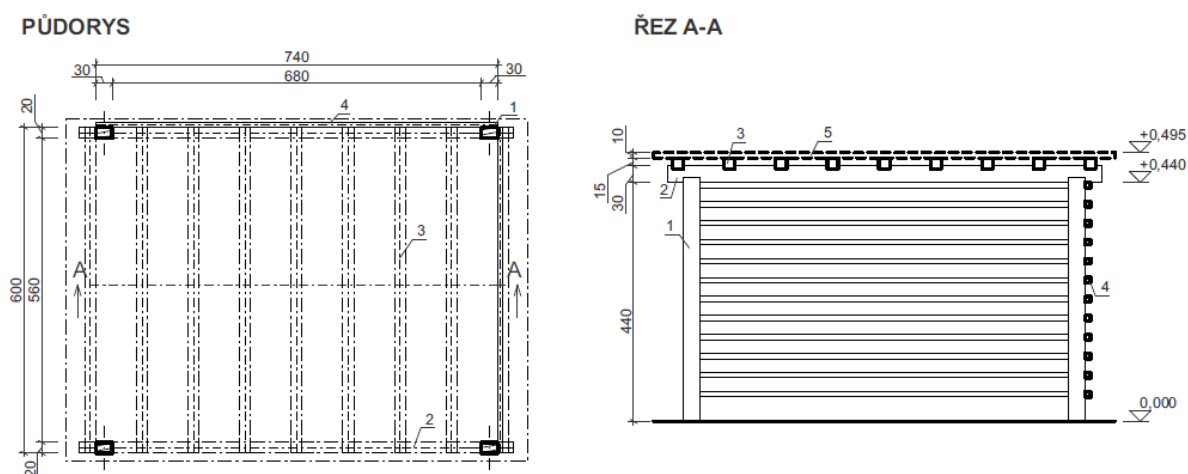
Výpočet *HRR* z rychlosti úbytku hmotnosti a porovnání s hodnotami rychlosti uvolněného tepla získanými měřením při požárním experimentu.

5) *Validace matematického *CFD* modelu*

Ověření relevantnosti výsledků z matematického *CFD* modelu na základě provedeného požárního experimentu a následného srovnání vypočítaných a naměřených hodnot. Ověření výsledků je provedeno v samostatné kapitole 5.

4.2 Návrh a výroba modelů

Oba zmenšené modely byly poměrově zmenšeny ze skutečných rozměrů konstrukcí na velikost, která umožnila jejich převezení osobním automobilem. Dřevěné modely jsem si nejprve vymodeloval v programu Archicad a následně vytvořil pracovní výkresy (Obr. 19), dle kterých jsem vytvořil model pergoly a přístřešku. Průřezy prvků byly zvoleny v násobcích 10 mm, protože jsem je následně modeloval v programu *FDS* a chtěl jsem dosáhnout optimálního množství výpočetních buněk. Kdybych zvolil rozměry prvků v násobcích 5 mm, musela by výpočetní síť být jemnější, tzn. výpočet by trval mnohonásobně delší dobu.



Obr. 19: Pracovní výkres modelů; legenda: 1 = sloup, 2 = vaznice, 3 = krokev, 4 = latě, 5 = střešní plášť

Modely byly navrženy z následujících dřevěných dílců:

- 4x rohový sloup 20/30 mm
- 2x vaznice 20/30 mm
- 9x krokev 20/20 mm
- 24x vodorovné latě 10/10 mm
- 1x OSB deska tl. 10 mm – pouze u konstrukce přístřešku

Pro výrobu obou modelů jsem zvolil borovicové dřevo, které bylo po dobu pěti let skladováno v suchém prostředí a jeho vlhkost se pohybuje v rozmezí 8-10 %. Objemovou

hmotnost borovicového dřeva jsem vypočítal na základě zkoušení čtyř různých vzorků. Průměrná hodnota byla zvolena 490 kg/m^3 .

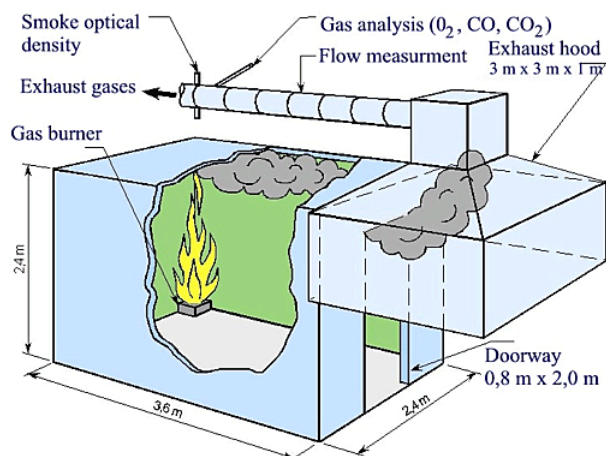
Jednotlivé prvky byly řezány z borovicových prken průřezu 30/100 mm a délky 900 mm. Pro řezání jednotlivých prvků byla použita stolní okružní pila, na které jsem si pomocí svorek a rovné latě pokaždé odměřil požadovaný rozměr prvku a podél latě jsem tento prvek přesně uřezal. Z prken byly nařezány všechny hlavní nosné prvky modelů. Vodorovné laťování bylo nařezáno z kopených borovicových hranolků 10/10 mm na požadovaný rozměr. Jednotlivé kroky výroby jsou popsány v Příloze 2.

4.3 Příprava experimentu

Experiment proběhl 14. 11. 2017 v požární laboratoři FireLab pod vedením ing. Marka Pokorného, Ph.D. ve výzkumném centru UCEEB ČVUT v Praze (Univerzitní centrum energeticky efektivních budov), které se nachází na periferii obce Buštěhrad.

4.3.1 Požární laboratoř

Celý experiment probíhal v uzavřené laboratoři, ve které se nachází zkušební zařízení, tzv. Room Corner Test (Obr. 20). Toto zařízení umožňuje zjišťovat chování různých povrchových úprav stěn, stropů nebo hořících předmětů. Zařízení je schopno měřit rychlost uvolňování tepla, teploty, tepelné toky a úbytky hmotnosti. Dále pak šíření plamene po povrchu a optickou hustotu kouře a složky zplodin hoření. Celé zkušební zařízení se sestává z požární komory, před kterou je umístěn odsávací zvon s potrubím, ve kterém probíhá fyzikální a chemická analýza zplodin hoření [14]. Kromě místnosti, kde se nachází zařízení Room Corner Testu, se v laboratoři nachází sklad a místnost měření a regulace (MaR). Z chodby je přes místnost měření a regulace přivedeno vzduchotechnické potrubí, které slouží pro přívod spalovacího vzduchu. Experiment probíhal přímo pod odsávacím zvonem.



Obr. 20: Schéma zkušebního zařízení (dostupné z: <https://www.sp.se>)

Celý experiment je řízen softwarem, který se řídí předpisy vydané Mezinárodní organizací pro normalizaci (ISO), resp. podle ISO 9705, která specifikuje zkušební metodu pro Room Corner Test. Použitý software umožňuje nastavení celého průběhu experimentu a ukazuje měřené veličiny v průběhu experimentu. Tímto softwarem se reguluje i výkon hořáku, jelikož je na tuto výpočetní stanici napojena propanová láhev. Výkon se určuje na základě hmotnostního průtoku plynu potrubím.

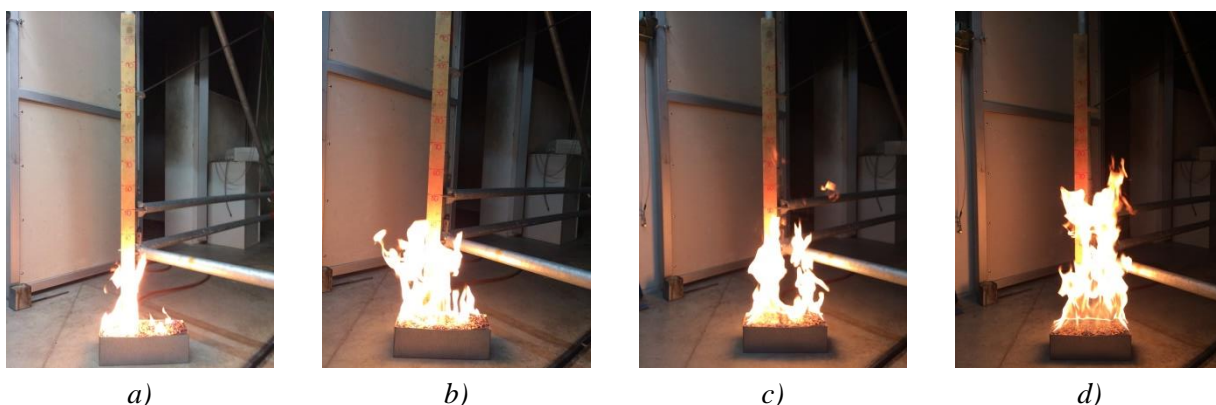
Úskalím tohoto měřícího zařízení je, že je primárně určeno pro požární zkoušky většího rozsahu, než představují požáry malých vzorků. Z toho důvodu mohou být naměřené hodnoty nepřesné. Tento fakt je jedním z důvodů, proč jsem se rozhodl vypočítat HRR z rychlosti odhořívání (úbytku hmotnosti), což je uvedeno v samostatné kapitole 4.5.3.

4.3.2 Zápalný zdroj

Pro experiment bylo nutné určit vhodnou náhradu nahodilého požárního zatížení. U skutečných konstrukcí p_n tvoří ve většině případů nábytek (Obr. 7). Pro účely experimentu byl jako zdroj hoření zvolen plynový hořák, kterému se zadal konstantní výkon 10 kW, který se v určité době zredukoval na 2 kW, aby bylo možné sledovat chování konstrukce bez přítomnosti hlavního zdroje hoření. Ponechání výkonu 2 kW bylo provedeno především kvůli matematické CFD simulaci, kdy simulace mají tendenci vyhasínat bez přítomnosti zápalného zdroje. Hořák má simulovat hoření dřevěného nábytku. V rámci diplomové práce nebyla zjišťována příčina vzniku požáru u skutečných konstrukcí. Cílem bylo u obou modelů dosáhnout plně rozvinutého požáru, z toho důvodu byl zvolen jako zdroj požáru plynový hořák umístěný u vodorovného laťování.

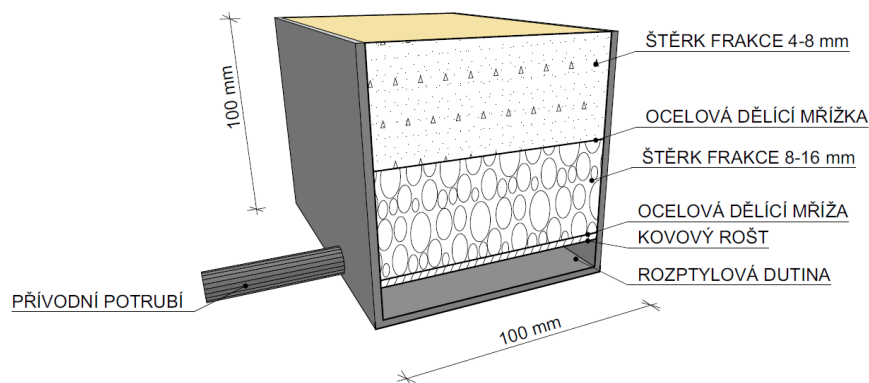
Dva týdny před hlavním experimentem proběhl menší experiment, který měl za úkol zjistit, jaký je vhodný výkon hořáku pro účely požárního experimentu. V rámci toho pokusu byly

porovnány dva hořáky, a to hořák s půdorysnými rozměry 75 x 75 mm a větší hořák s půdorysnými rozměry 100 x 300 mm. Hořáky byly umístěny u stojanu, na kterém byla připevněna dřevěná měřicí lať, díky které byla zjištěna výška plamenů pro jednotlivé výkony hořáků. Výška plamenů spojená s výkonem hořáku měla reprezentovat ono nahodilé požární zatížení p_n od sestavy nábytku, u kterého je předpokládána výška plamenů přibližně po výšku stropní konstrukce. Výška plamene hořící sestavy nábytku byla určena na základě zkoumání požárních zkoušek hořícího nábytku, např. zkouška provedená panem Charlesem Fleischmannem z instituce SFPE [17]. Pro menší výkon hořáku byly postupně zvoleny tyto výkony: 1, 3, 5, 7, 10 a 15 kW a pro větší hořák byly zvoleny výkony: 5, 10, 15, 20, 25, 30 a 40 kW (Obr. 21a-d). Zvolený výkon 10 kW (Obr. 21b) u hořáku s rozměry 100 x 300 mm (Obr. 22) způsoboval, že plameny oscilovaly ve výšce 45 cm nad úrovní podlahy. Tyto hodnoty odpovídají výšce zkoušených modelů, jelikož výška střešní konstrukce je přibližně 450 mm nad povrchem.



Obr. 21: Vizuální srovnání výkonu hořáku 100x300 mm: a) 5 kW; b) 10 kW; c) 15 kW; d) 30 kW

Pro účely experimentu byl tedy zvolen pískový propanový hořák s půdorysnými rozměry 100 x 300 mm (Obr. 22). Konstrukce hořáku je tvořena kovovou obdélníkovou nádobou z pozinkovaného plechu. Tato nádoba je vyplněna po vrstvách šterkovou výplní různé frakce, aby došlo k rovnoměrnému rozptýlení přiváděného plynu ve spodní části hořáku. U pergoly byl hořák zapnut v čase 0 sekund na hodnotu 10 kW a v 900. sekundě byl výkon hořáku zredukován na 2 kW. U přístřešku byl hořák zapnut ve stejném čase jako u pergoly na stejnou hodnotu výkonu, tedy 10 kW. V 620. sekundě byl výkon hořáku zredukován na 2 kW.



Obr. 22: Řez plynovým hořákem

4.3.3 Použitá měřicí zařízení

Mezi sledované veličiny patřila teplota a radiační složka tepelného toku. Z toho důvodu byly pro účely experimentu použity plášťové termočlánky typu „K“ s průměrem 1,5 mm se schopností měřit rozsah teplot od -40 do 1150 °C. Dále byl použit jeden deskový snímač teploty, jehož součástí jsou dva plášťové termočlánky typu „K“. Schopnost měřit teploty u plášťových termočlánků vychází z tzv. Seebeckova termoelektrického jevu. Termočlánek se skládá ze dvou různých kovů (vodičů) uvnitř pláště, které reagují na změnu teploty vznikem napětí v obvodu (velikost napětí se pohybuje v řádech mikrovoltů na stupeň Celsia). Rozdíl v napětí je následně přepočítán na teplotu. Použitý deskový snímač teploty byl kalibrován pouze na měření teplot. Výše uvedená měřicí zařízení byla zapojena do měřicí ústředny (Tab. 1). Pomocí softwaru, ve kterém se nastavil interval sběru dat (v mém případě 5 sekund), byly získávány aktuální informace z měřicí ústředny. Povrchové teploty konstrukcí byly zaznamenávány v intervalu 15 sekund pomocí termokamery VarioCAM od společnosti Jenoptik. Kamera dokáže měřit pouze povrchovou teplotu, na základě množství vyzařovaného elektromagnetického záření. Výhodou této termokamery je možnost post-produkce jednotlivých snímků v softwaru dodávaném k termokameře.

Pro měření hodnoty tepelného toku byl zvolen radiometr od firmy Hukseflux s rozsahem měření do 20 kW/m². Jedná se o zařízení, které je určeno k měření celkového tepelného toku, tedy radiometr neumí rozlišit radiační a konvektivní části tepelného toku. Radiometr je tvořen kovovým tělem, které je chlazené proudící vodou, která zamezuje přehřívání radiometru. Radiometr zachycuje dopadající tepelný tok měřícím senzorem (černá vnitřní část).

Ostatní měřené hodnoty byly vyhodnocovány v potrubí nad nasávacím zvonem. V tomto potrubí jsou umístěna měřicí zařízení schopná měřit chemické složení zplodin hoření, rychlostní

průtok zplodin, optickou hustotu kouře a v neposlední řadě výkon požáru na základě poklesu koncentrace kyslíku v odtahovém potrubí. Pro mou potřebu byly zjišťovány jen hodnoty *HRR*. Všechny použité měřicí přístroje měly náležitě technické listy a záznamky o kalibraci.

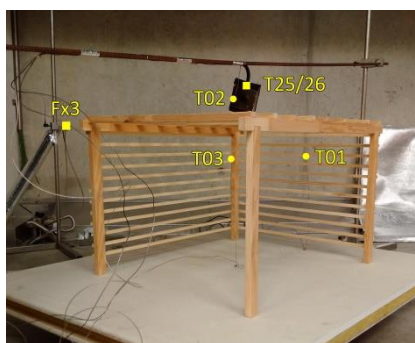
Tab. 1: Popis měřících zařízení zapojených do ústředny

<i>Typ</i>	<i>Označení</i>	<i>Poloha</i>
<i>Plášťový termočlánek</i>	<i>T01</i>	<i>obvodová konstrukce</i>
<i>Plášťový termočlánek</i>	<i>T02</i>	<i>v blízkosti deskového snímače</i>
<i>Plášťový termočlánek</i>	<i>T03</i>	<i>uprostřed konstrukce</i>
<i>Deskový snímač</i>	<i>T25</i>	<i>nad střešní konstrukcí</i>
	<i>T26</i>	
<i>Radiometr</i>	<i>Fx3</i>	<i>1 m kolmo na delší stěnu modelu</i>

4.3.4 Umístění modelů

Nejprve bylo nutné umístit model do prostoru pod odsávací zvon. Bylo zvoleno úhlopříčné uložení modelu, abych získal co nejdelší prostor před modelem i za modelem. Za modelem byl umístěn radiometr ve vzdálenosti 1,0 m kolmo na delší stěnu modelu. U vchodu do místnosti (kolmo na čelní stranu modelu) byla umístěna termokamera a videokamera. Nejprve se do prostoru umístily váhy, které byly z vrchní strany chráněny vytvořeným sendvičem ze dvou sádkartonových desek tl. 10 mm, mezi které byla vložena deska z minerální vaty tl. 50 mm. Toto souvrství zajistilo dostatečnou ochranu vah před účinky požáru.

Poté se na ochranný podklad umístil samotný model. Půdorysný rozměr modelu byl 740 x 600 mm, takže ze všech stran modelu byl zajištěn prostor, na kterém následně docházelo k padání hořících částí konstrukcí modelu. Zachycení padajících hořících částí bylo nutné z důvodu měření úbytku hmotnosti modelu. Následně se umístily plášťové termočláanky (Obr. 23). Termočlánek s označením T03 byl umístěn doprostřed konstrukce a do 2/3 výšky, aby zaznamenával průběh teplot uvnitř modelu. Druhý termočlánek s označením T01 byl umístěn přímo u obvodové konstrukce. Třetí termočlánek s označením T02 byl umístěn nad konstrukcí stejně jako deskový snímač T25/26, termočlánek měl sloužit k ověření správnosti naměřených hodnot deskovým snímačem (Obr. 23). Umístění termočláanky uprostřed modelu a v rovině stěny má své opodstatnění z hlediska odstupových vzdáleností, kdy byl zjišťován rozdíl mezi teplotami v rovině stěny, která z hlediska odstupových vzdáleností představuje sálavou rovinu a uprostřed konstrukce, kde uvnitř konstrukce dochází ke stanovení výše požárního rizika, které je jednou ze vstupních hodnot pro výpočet odstupových vzdáleností.



Obr. 23: Schéma umístění měřících zařízení

Propanový hořák byl umístěn do zadního pravého rohu (blízko laťování na obou stranách), aby co nejdříve došlo k rozvoji požáru. Na nehořlavou část potrubí (ocelová trubka) délky 300 mm byla osazena plynová hadice. Jelikož je tato část přívodu plynu hořlavá, musela se ochránit. Hadice byla chráněna dvěma pórobetonovými příčkovkami tl. 50 mm, do kterých jsem pomocí kladiva vytvořil podélnou drážku, do které se následně schovala přívodní hadice (Obr. 24).



Obr. 24: Ochrana přívodní plynové hadice

4.4 Průběh experimentu

4.4.1 Experiment 1 - model pergoly

Začátek požární zkoušky byl nastaven v počítači (průběh zkoušky byl řízen softwarem, viz kapitolu 3.3.1) na dobu -60 sekund. Záporná časová doba znamená, že k některým úkonům muselo dojít ještě před zapnutím hořáku. V následující tabulce (Tab. 2) je uvedena časová posloupnost jednotlivých fází experimentu.

Tab. 2: Časová posloupnost experimentu 1 (pergola)

čas [s]	popis
-60	začátek experimentu, spuštění videokamer a měřících zařízení
-30	spuštění ventilátoru
-5	vzorkování

0	<i>spuštění hořáku na výkon 10 kW</i>
900	<i>snížení výkonu hořáku na 2 kW</i>
1200	<i>vypnutí hořáku, ukončení záznamu dat</i>
1860	<i>vypnutí videokamer</i>

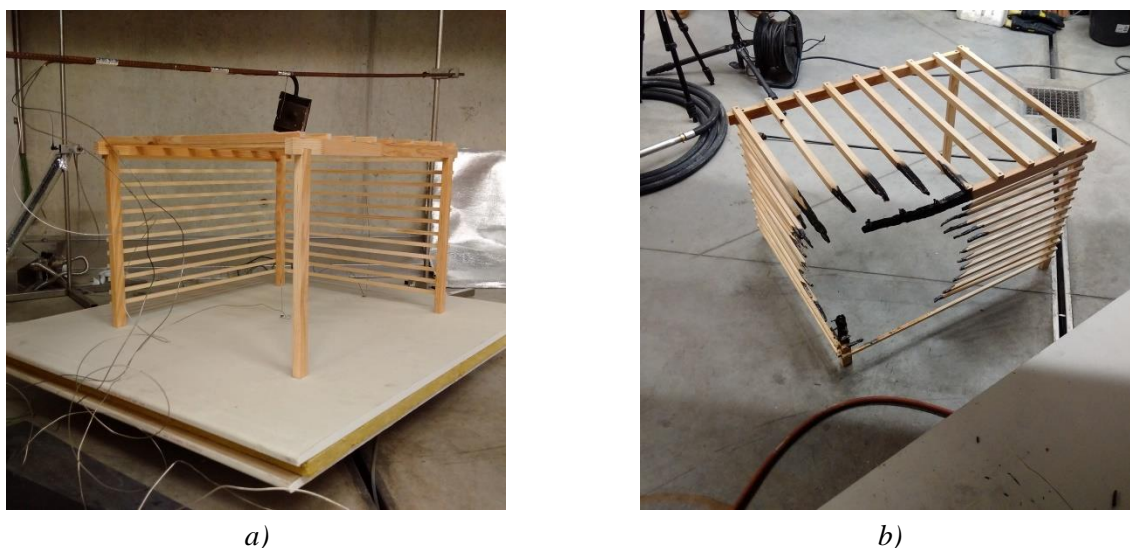
V čase 0 sekund byl hořák zapálen pomocí ocelové tyče, která měla na konci hořlavou textilií. Ve 140. sekundě začalo docházet k rozhořívání zadního opláštění pergoly (vodorovné dřevěné laťování). Vizually došlo k maximálnímu rozvoji požáru zadního opláštění ve 215. sekundě (Obr. 25), kdy plameny vyšlehávaly do výšky cca 400 mm (300 mm nad střešní plášť), ovšem pouze v místě hořáku. Ve 480. sekundě došlo ke kompletnímu vyhoření dřevěného laťování v místě za hořákem, požár se šířil pouze po střešních krokvicích, které opět hořely jen v místě působení hořáku. V této fázi došlo k rozvoji požáru na pravém opláštění modelu (dřevěné laťování), které po vizuální stránce nijak výrazně nepřispělo v rozvoji požáru modelu. Po vyhoření části vodorovného laťování i na pravé straně nedocházelo k výraznějšímu rozhoření modelu i za přítomnosti stále aktivního plynového hořáku. Do 900. sekundy, kdy došlo ke snížení výkonu hořáku na 2 kW, nenastaly v rozvoji požáru žádné změny. Po snížení výkonu až do vypnutí hořáku v 1200. sekundě nedošlo k žádným změnám, postupně docházelo k samozhašení modelu, až do chvíle, kdy se už na modelu nevyskytovalo žádné hořící místo. Model se nadále po dobu 600 sekund nechal kompletně vychladnout a poté byl přemístěn vně objekt, aby mohl být lépe prohlédnut a zdokumentován.



Obr. 25: Maximální rozvoj požáru pergoly v 215. sekundě

Na ohořelém modelu (Obr. 26b) je patrné, že požár proběhl pouze v místě hořáku. Konstrukce, které se nacházely v místě hořáku, kompletně odhořely. Samotný hořák nedokázal zapálit ostatní části konstrukce a konstrukce nebyla schopna sama šířit požár po svém povrchu. Nejvíce mě překvapilo chování vodorovného laťování, které i přes svoje malé rozměry (10/10

mm) nedokázalo rozšířit požár ve vodorovném směru ani ve svislém směru v ostatních částech konstrukce. V místě hořáku došlo k porušení a následnému zhroucení rohové sloupku 20/30 mm, zadní vaznice 20/30 mm a krokví, které se nacházely v místě nad hořákem. Model byl zkonstruován pomocí tesařských spojů, které byly doplněny ocelovými vruty, a tak i přes značnou deformaci hlavních nosných prvků zůstal celistvý.



Obr. 26: Pohled na zkoušený model pergoly: a) před experimentem; b) po experimentu

4.4.2 Experiment 2 - model přístřešku

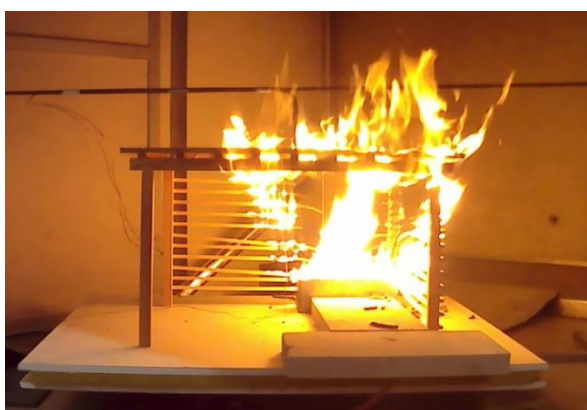
Časová posloupnost požární zkoušky přístřešku byla podobná zkoušce pergoly. Počátek požární zkoušky byl opět stanoven na dobu -60 sekund a do doby 0 sekund proběhly stejné kroky jako u modelu pergoly. Průběh požáru byl ovšem značně odlišný.

Tab. 3: Časová posloupnost experimentu 2 (přístřešek)

čas [s]	popis
-60	začátek experimentu, spuštění videokamer a měřících zařízení
-30	spuštění ventilátoru na 30 %
-5	vzorkování
0	spuštění hořáku na výkon 10 kW
620	snížení výkonu hořáku na 2 kW
660	pád konstrukce, pozorování zříceného modelu
900	vypnutí videokamer z důvodu hašení
1200	ukončení záznamu dat a vypnutí hořáku

Zapálení hořáku proběhlo stejně jako u předchozího experimentu v čase 0 sekund ocelovou tyčí s hořlavou textilií. Vzplanutí a rozvoj požáru na vodorovném laťování proběhly velice rychle, a to už v 80. sekundě. Střešní plášť způsoboval vyšlehávání plamenů vnější strany přístřešku

po vodorovném laťování a přispíval tak k rychlosti šíření požáru. Ve 160. sekundě bylo zadní vodorovné laťování zcela v plamenech a požár se začínal šířit pod střešním pláštěm na ostatní konstrukce přístřešku. Dřevěné laťování na pravé straně díky šíření požáru pod střešním pláštěm začalo hořet ve 180. sekundě a docházelo zde ke stejnému efektu vyšlehávání plamene vně obvodového pláště. Toto rozhořívání konstrukce probíhalo až do 380. sekundy, kdy vizuálně začal požár klesat na výkonu. Střešní plášť dokázal díky podstropnímu šíření pyrolyzních plynů a šíření plamene rozšířit požár na celou konstrukci přístřešku (Obr. 27a), takže v 540. sekundě bylo téměř veškeré laťování odhořelé a hořela už jen samotná nosná konstrukce přístřešku a střešní plášť. V tomto čase také došlo ke zhroucení zadního pravého nosného sloupu a části zadní vaznice. V 620. sekundě byl výkon hořáku snížen na 2 kW a nadále byl model sledován, zda dojde k dalšímu šíření nebo rozhoření bez přítomnosti výkonnějšího iniciátoru. Jelikož už od 500. sekundy docházelo k deformacím hlavních nosných prvků, byl očekáván pád celé konstrukce, který nastal v 660. sekundě. Zřícení proběhlo z důvodu chybějícího zadního pravého sloupu, zadní vaznice a povolení spoje mezi předním pravým sloupem a vaznicí. Po zřícení modelu se pokračovalo v měření i natáčení, jelikož mě zajímalo chování požáru konstrukce při kumulaci hořlavých materiálů v jednom místě. Od doby pádu konstrukce až do 880. sekundy, kdy byl požár přístřešku tak rozsáhlý (Obr. 27 b), že jsme se ho rozhodli uhasit pomocí hasicího mlhového zařízení. Střešní plášť z OSB desky, který byl po pádu ve sklonu cca 30-40°, se velice rychle rozhořel, mnohonásobně více než byl rozsah požáru celistvé konstrukce přístřešku. Po uhašení modelu se zbytky konstrukce nechaly vychladnout a byly zdokumentovány.



a)



b)

Obr. 27: Rozvoj požáru na konstrukci přístřešku: a) před zřícením; b) po zřícení

Z požární zkoušky přístřešku je zřejmé, že zlomovým bodem v rozvoji požáru bylo zřícení konstrukce a následné rozhoření celého střešního pláště. Hořák dokázal zapálit hlavní nosné prvky přístřešku, což nadále vedlo k odhoření hlavních nosných prvků. Pád celé konstrukce byl

potom způsoben oslabením spoje mezi předním pravým sloupem 20/30 mm a přední vaznicí 20/30 mm, které byly spojeny čepem. Zuhelnatěním dřeva a odpadnutím ocelové vruty došlo v tomto spoji (Obr. 28) ke ztrátě stability a celkovému kolapsu konstrukce. Tento spoj byl přetížen, protože musel přenášet zatížení, které před kolapsem přenášel spoj u zadního pravého sloupu. Samotný kolaps konstrukce způsobil rozšíření požáru na celou konstrukci i po snížení výkonu hořáku na 2 kW, což znamenalo, že hořák téměř nehořel.



Obr. 28: Vyznačené místa, ve kterých došlo ke kolapsu

4.5 Výsledky experimentu

Výsledky experimentu odpovídaly předpokládanému chování požáru u zastřešené a nezastřešené konstrukce. Rozdíl v rozsahu požáru u obou modelů byl evidentní na první pohled. Naměřené hodnoty teplot a tepelného toku od měřících zařízení byly ze softwaru exportovány ve formátu *.dat a nadále zpracovány v tabulkovém editoru Microsoft Excel. Výsledky z obou experimentů budou rozebrány samostatně a následně porovnány v samostatné kapitole.

4.5.1 Stanovení HRR výpočtem

Při experimentu se hodnoty HRR počítají na základě spotřeby kyslíku, kterou zaznamenává analyzátor poklesu koncentrace kyslíku v odtahovém potrubí. Fáze rozhořívání nebo malé výkony požárů mohou při požární zkoušce mít malý vliv na spotřebu kyslíku, a tím i správnost stanovení hodnoty HRR . Tento fakt mě vedl k tomu, že bylo třeba ověřit správnost zaznamenaných hodnot na základě jiného postupu. Druhou možností zjištění hodnot HRR je matematické stanovení na základě znalosti rychlosti úbytku hmotnosti modelu. Změna hmotnosti obou modelů v čase je popsána v samostatných kapitolách 4.5.2 a 4.5.3.

V rozboru výsledků jednotlivých požárních experimentů je popsán i úbytek hmotnosti během hoření modelu. Na základě těchto hodnot lze matematicky stanovit výkon požáru při znalosti sekundového úbytku hmotnosti (rychlost odhořívání) a efektivní výhřevnosti dřeva. I zde se mohou vyskytovat nepřesnosti, a to hlavně ve stanovení hodnoty efektivní výhřevnosti

H_{eff} . Tato hodnota byla převzata stejně jako u *CFD* modelů z normy ČSN 73 0824 - Výhřevnost hořlavých látek [18].

Nejdříve bylo nutné určit rychlost odhořívání. Jedná se o veličinu určující jednotkový úbytek hmotnosti za jednotku času. Při výpočtu rychlosti odhořívání z naměřených hodnot úbytku hmotnosti jsem narazil na problém, který se projevil u naměřených hodnot u pergoly, u které oproti přístřešku docházelo k menšímu poklesu hmotnosti. Při výpočtu sekundového úbytku hmotnosti z 5sekundového intervalu⁶ byly hodnoty nevypovídající, jelikož u pergoly docházelo k pomalému poklesu hmotnosti, tudíž při použití 5sekundového intervalu se neprojevil téměř žádný sekundový úbytek hmotnosti. To vedlo ve většině časových krocích k nulové hodnotě sekundového úbytku. Aby se sekundový úbytek hmotnosti více projevil, zvolil jsem pro výpočet sekundového úbytku hmotnosti větší interval. Celkem jsem u pergoly stanovil sekundový úbytek hmotnosti pro intervaly <0;5>, <0;10> a <0;20> sekund. Ve výsledku nejplynulejší křivku tvořily hodnoty vypočítané z intervalu <0;20>. Vypočítána hodnota byla tedy úbytek hmotnosti za jednotku času, tedy kg/s v jednotlivých časových krocích. Stejný postup stanovení sekundového úbytku hmotnosti jsem aplikoval na data z požáru přístřešku. I zde jsem stanovil sekundový úbytek pro více časových intervalů, ale jelikož u přístřešku došlo při požáru k výraznějšímu poklesu hmotnosti, projevil se tento pokles i při 5sekundovém intervalu.

Dalším krokem bylo stanovení efektivní výhřevnosti H_{eff} . Pro výpočet efektivní výhřevnosti u pergoly jsem použil hodnotu čisté výhřevnosti H_c , která se vynásobila součinitelem k_{p1} , který udává podíl efektivní výhřevnosti a čisté výhřevnosti [18]. U přístřešku byly použity dva druhy materiálu (borovice a *OSB*), ale záznam úbytku hmotnosti byl proveden pro celý model, nikoliv pro jednotlivé části konstrukce. Z těchto údajů tedy nelze zjistit vážený průměr H_{eff} pro celý model přístřešku. H_{eff} jsem tedy stanovil jako vážený průměr efektivních výhřevností, kde váhu tvořila váha jednotlivých částí konstrukce před požárem.

Vstupní údaje výpočtu H_{eff} :

$$H_c = 17 \text{ MJ/kg} = 17000 \text{ kJ/kg}$$

$$k_{p1,pergola} = 0,7$$

$$k_{p1,přístřešek} = 0,85$$

$$m_{bor} = 3,533 \text{ kg}$$

zdroj:

ČSN 73 0824, pol. 1.2.10 a pol. 1.2.3

ČSN 73 0824, pol. 1.2.10

ČSN 73 0804, příloh B, tab. B.1

hmotnost borovicové části přístřešku, zváženo

⁶ Veškeré záznamy veličin byly při pokusech zaznamenány v 5sekundových intervalech.

$$m_{OSB} = 3,187 \text{ kg}$$

hmotnost OSB části přístřešku, zváženo

Výpočet:

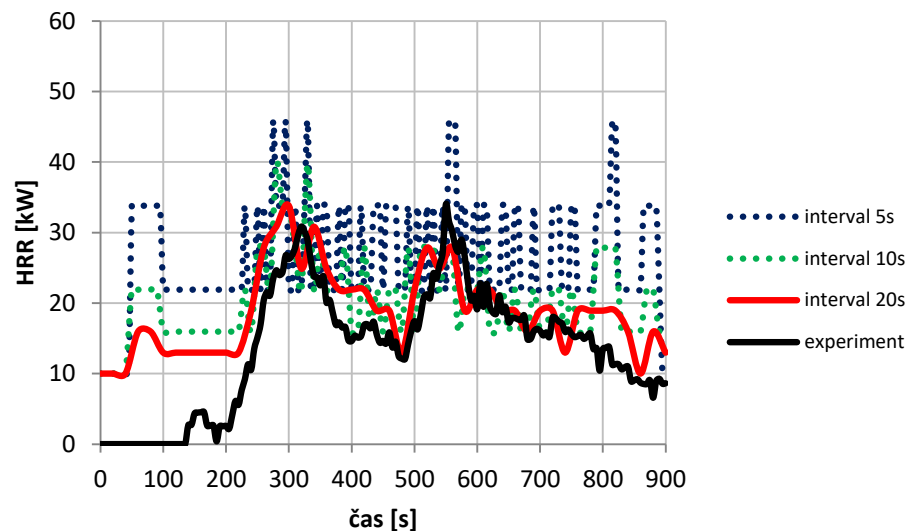
$$H_{eff,pergola} = H_c \cdot k_{p1} \quad (10)$$

$$H_{eff,pergola} = 17000 \cdot 0,7 = 11900 \text{ kJ/kg}$$

$$H_{eff,přístřešek} = \frac{m_{bor} \cdot H_{c,bor} \cdot k_{p1,bor} + m_{OSB} \cdot H_{c,OSB} \cdot k_{p1,OSB}}{m_{celkem}}$$

$$H_{eff,přístřešek} = \frac{3,533 \cdot 17000 \cdot 0,7 + 3,187 \cdot 17000 \cdot 0,85}{6,72} = 13100 \text{ kJ/kg} \quad (11)$$

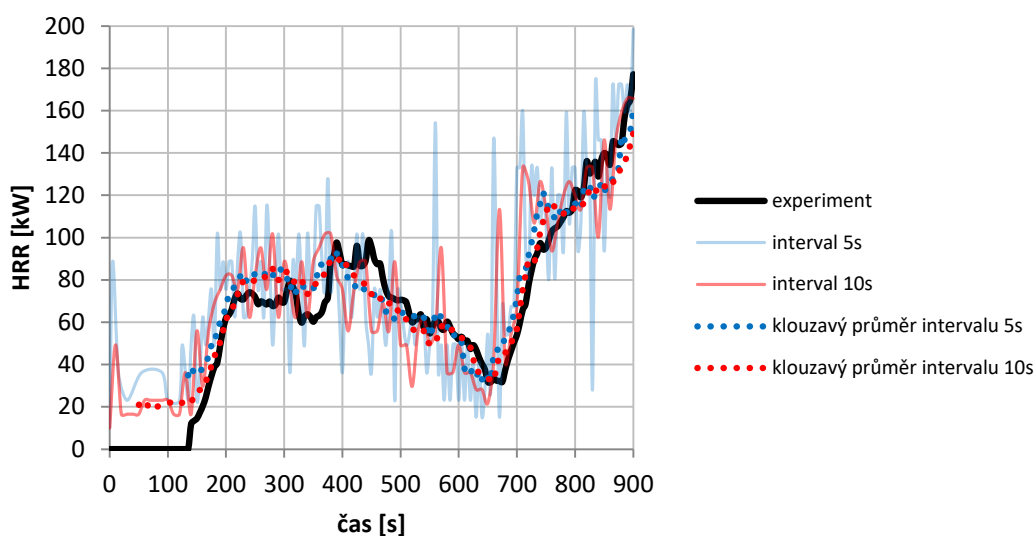
Stanovení hodnoty HRR je v tomto kroku tedy už jen vynásobení sekundového úbytku hmotnosti (rychlosti odhořívání) \dot{m} , efektivní výhřevnosti druhu dřeva H_{eff} a připočtení výkonu hořáku, tedy hodnoty 10 kW. Tímto výpočtem tedy získáme hodnotu HRR v obou bodech časového intervalu, ve kterém probíhal výpočet. Celkový čas, ve kterém výpočet probíhal, byl zkrácen na 900 sekund, protože u obou modelů došlo po 900. sekundě k vnějšímu zásahu a hodnoty úbytku hmotnosti byly nepřesné. Výpočtem jsem tedy získal hodnotu množství uvolněného tepla v každém počítaném časovém kroku. Tyto hodnoty v závislosti na čase tvoří rychlost uvolňování tepla HRR spočtenou na základě rychlosti odhořívání.



Graf 8: Srovnání hodnot HRR pro pergolu

Na grafu (Graf 8) se nachází mnou vypočítané hodnoty HRR , které jsem vypočítal pro různé časové intervaly. Tyto vypočtené hodnoty jsou v grafu srovnány s hodnotou HRR pro pergolu získanou během požárního experimentu. Průběh uvolněného tepla vypočítaný z intervalu

<0;5> sekund značně osciluje v rozmezí 10 kW, což bylo způsobeno nízkým poklesem hmotnosti v časovém kroku 5 sekund. Největší přesnosti, tedy shody mezi hodnotami získanými během požárního experimentu a vypočítanými hodnotami HRR , dosáhly hodnoty vypočítané z časového intervalu <0;20> sekund. Výrazný rozdíl hodnot v prvních 200 sekundách je způsoben pouze tím, že ve vypočítaných hodnotách se projevuje výkon od hořáku, který byl u experimentu zaznamenán až od 140. sekundy. Míru nepřesnosti shody mezi vypočítanými hodnotami a hodnotami získanými z experimentu u modelu pergoly přisuzují pomalému poklesu hmotnosti, což v některých místech (časových krocích) výpočtu vedlo k nepřesnostem. Z vypočítaných hodnot (pro interval 20 s) vyplývá, že bylo dosaženo shody mezi hodnotami získanými během požárního experimentu a hodnotami vypočítanými na základě rychlosti odhořívání. Tímto ověřením jsem dokázal, že míra nepřesnosti měření nebyla u experimentu pergoly velká a naměřené hodnoty HRR mohou považovat za správné. Určitou míru nepřesnosti může do výpočtu vnášet stanovená hodnota efektivní výhřevnosti H_{eff} , jelikož skutečná hodnota pro dřevo nebyla zjišťována.



Graf 9: Srovnání hodnot HRR pro přístřešek

Výpočet HRR na základě rychlosti odhořívání u přístřešku byl jednodušší z toho důvodu, že u přístřešku docházelo v časovém kroku 5 sekund k většímu úbytku hmotnosti, než tomu bylo u pergoly. I tak jsem zvolil výpočet pro dva časové intervaly, a to <0;5> sekund a <0;10> sekund. Aby bylo možné lépe porovnat vypočítané hodnoty s hodnotami získanými během experimentu, proložila se křivka klouzavým průměrem, který lépe vystihuje skutečný trend křivky. Na grafu (Graf 9) můžeme vidět, že průběhy hodnot HRR obou časových intervalů (interval 5 s a interval 10 s) se téměř shodují s průběhem hodnot HRR získanými během

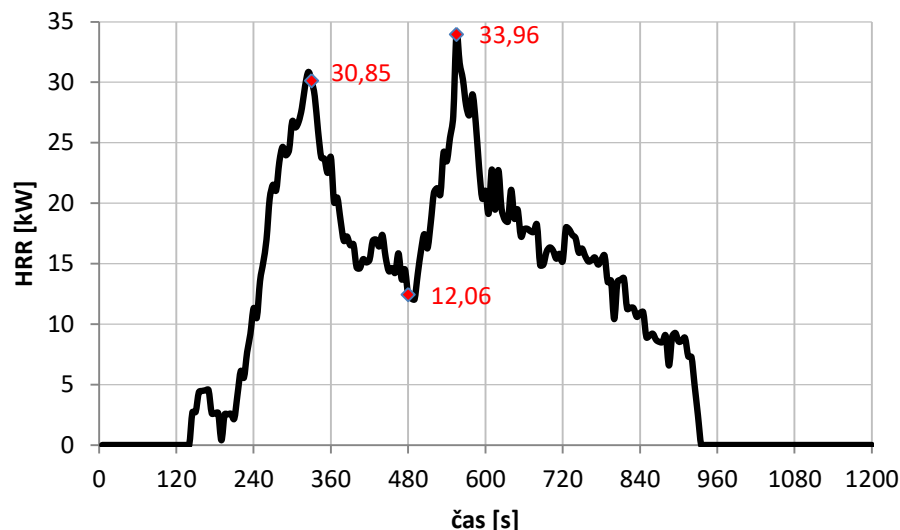
požárního experimentu. Vysokou shodu mezi těmito hodnotami přisuzuji většímu výkonu požáru a hlavně rychlejšímu úbytku hmotnosti, než tomu bylo u pergoly. Rychlejší úbytek hmotnosti vedl k určení přesnějšího sekundového úbytku hmotnosti. I zde mohu konstatovat, že jsem prokázal správnost měření hodnot *HRR* během experimentu.

Výše uvedenými výsledky jsem tedy dokázal splnit jeden z cílů experimentální části práce, a to ověřit, do jaké míry se budou shodovat naměřené a vypočítané hodnoty *HRR*, případně zjištění důvodu nepřesnosti. Z toho důvodu mohu dále z naměřenými hodnotami *HRR* pracovat v následujících kapitolách.

4.5.2 Rozbor výsledků modelu pergoly

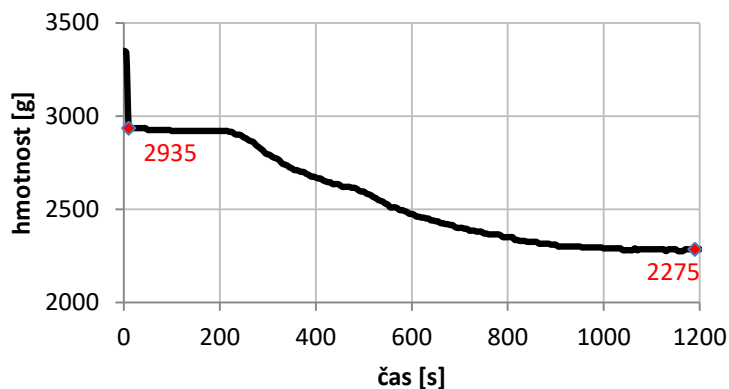
Mezi hlavní sledované veličiny patřila rychlost uvolňování tepla (Heat Release Rate)⁷. Tato veličina nám ukazuje celkové množství uvolněného tepla v závislosti na čase. Na grafu (Graf 10) je vidět, že množství uvolněného tepla začalo narůstat ve 140. sekundě, což odpovídá i vizuálnímu popisu v kapitole 3.4.1, kdy v této fázi došlo k vzplanutí vodorovného laťování na zadní stěně objektu. Ve 210. sekundě došlo k rychlému nárůstu množství uvolněného tepla, které pokračovalo až do 320. sekundy, kdy dosáhlo druhé nejvyšší hodnoty, a to 30,8 kW. Poté následoval prudký pokles až do 480. sekundy na hodnotu 12 kW, což bylo způsobeno rychlým vyhořením vodorovného laťování umístěného za hořákem. V této fázi došlo k rozhořívání laťování na kratší straně pergoly, a tím pádem k nárůstu množství uvolněného tepla na maximální hodnotu 33,9 kW, která byla zaznamenána v 550. sekundě. Nadále docházelo k hoření tenkých dřevěných prvků, avšak už nedošlo k dalšímu šíření požáru po konstrukci a tepelný výkon požáru nadále konstantně klesal a konstrukce přestávala hořet i za přítomnosti stále stejně výkonného hořáku (10 kW). V 900. sekundě došlo ke snížení výkonu hořáku na 2 kW, což zapříčinilo náhlý pokles množství uvolněného tepla z hodnoty 9,2 kW na hodnotu 2,4 kW a dále na 0 kW, jelikož konstrukce v této chvíli zcela vyhasla i za přítomnosti hořáku se sníženým výkonem na 2 kW. Z grafu 2 je patrné, že největší vliv na výkon požáru měl samotný hořák. Konstrukce odhořela jen v části umístěného hořáku a nepřispěla k většímu rozvoji požáru.

⁷ Měření rychlosti uvolňování tepla probíhá na principu měření spotřeby kyslíku, kdy pro většinu materiálů je konstantní množství energie uvolněné na jednotku hmotnosti spotřebovaného kyslíku. Tato hodnota je 13,1 MJ/kg. Používaná zkratka pro toto slovní spojení je *HRR*, což vychází z anglických slov Heat Release Rate.



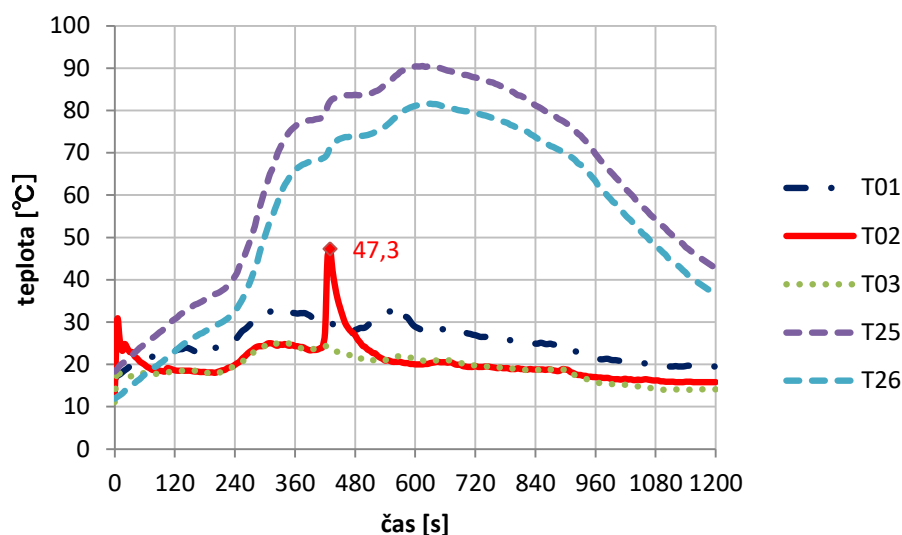
Graf 10: Rychlost uvolňování tepla u modelu pergoly

Po celou dobu experimentu byl model umístěn na vahách, které měly za úkol zaznamenávat úbytek hmotnosti během procesu hoření. Před spuštěním experimentu byla hmotnost modelu 2935 g. Z výsledných údajů byl vytvořen graf 3, na kterém je vidět závislost úbytku hmotnosti na čase. Na grafu (Graf 11) začíná křivka na hodnotě 3350 g a následuje rychlý pokles. Tento výkyv byl způsoben položením ocelové tyče s hořlavou textilií na konstrukci hořáku a po jeho zapálení byla tyč odebrána. Do 210. sekundy nedocházelo k většímu úbytku hmotnosti, jelikož ještě nedošlo k odhoření dřevěné konstrukce. Od 210. sekundy byl úbytek hmotnosti podle grafu parabolický bez výkyvů a změn až do 1200. sekundy, kdy došlo k ukončení experimentu. Výsledná hmotnost modelu 2275 g. Při požární zkoušce pergoly tedy došlo ke ztrátě 660 g na hmotnosti pergoly, což procentuálně činí ztrátu 22,5 %. Na fotografii ohořelého modelu (Obr. 26b) můžeme vidět, že největší vliv na úbytek hmotnosti měly hlavně prvky vodorovného laťování na obou stranách pergoly a zadní pravý sloup.



Graf 11: Úbytek hmotnosti pergoly v závislosti na čase

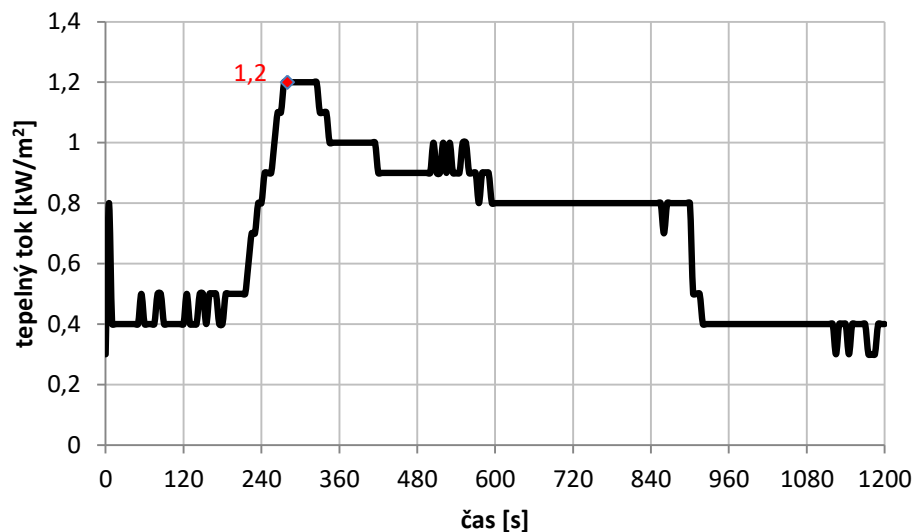
Průběh teplot při experimentu byl měřen plášťovými termočládky T01-T03 a jedním deskovým snímačem teploty, který obsahoval dva plášťové termočládky T25 a T26. Termočlánek T01 (kratší strana s dřevěným laťováním) a termočlánek T03 (střed konstrukce) měly podobné průběhy teplot s tím rozdílem, že termočlánek T01 měl průměrný průběh teplot vyšší o 6 °C. Ani jeden z termočládků se nenacházel přímo v místě výskytu plamenů a za celou dobu experimentu jimi nebyl zasažen. Dvě místa s výraznějším nárůstem průběhu teplot u termočládku T01 odpovídají dvěma vrcholům na křivce rychlosti uvolňování tepla (Graf 10). Z grafu průběhu teplot termočládku T01 a T03 je vidět, že nedošlo k vyšším nárůstům teplot za celou dobu experimentu. Výkyv na teplotu 47 °C v čase 430 sekund u termočládku T02 nemá opodstatnění. Dle videozáznamu a grafu rychlosti uvolňování tepla v tomto čase nedošlo k žádnému nárůstu výkonu, nebo vyšlehnutí plamene směrem na termočlánek. Termočlánek T02 se nacházel přibližně 50 mm před deskovým snímačem teploty a měl za úkol sledovat hlavně rozdíl v měření plášťového termočládku a deskového snímače teploty. Deskový snímač teplot zaznamenal diametrálně vyšší hodnoty teplot než plášťové termočládky. Hlavním důvodem tohoto rozdílu je použitelnost těchto snímačů pro tyto typy požárních zkoušek. Deskové snímače teploty se využívají primárně pro řízení teplot v pecích u zkoušek požární odolnosti konstrukcí, a tak tyto naměřené hodnoty nemají takovou váhu jako hodnoty naměřené plášťovými termočládky.



Graf 12: Průběh teplot u modelu pergoly

Měření sálavé složky tepelného toku probíhalo stejně jako u ostatních měřených veličin. Pro větší přesnost měření by bylo lepší umístit radiometr blíže měřenému objektu. Ve vzdálenosti 1,0 m od modelu měřil radiometr velmi nízké hodnoty tepelného toku. Průběh

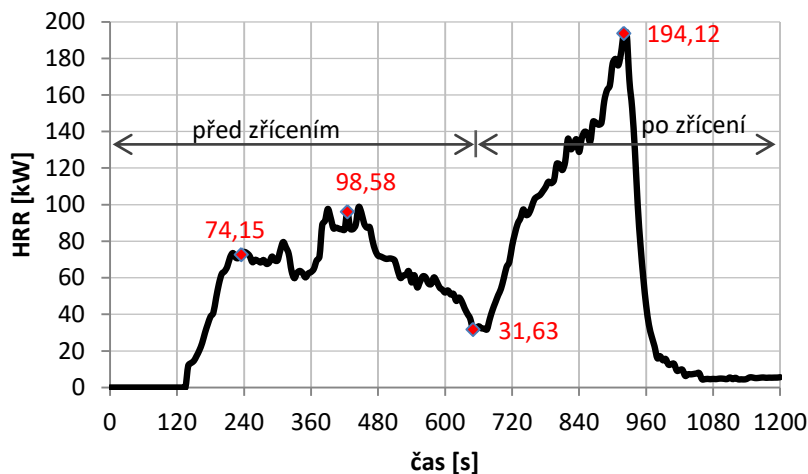
křivky (Graf 13) opět odpovídal křivce rychlosti uvolněného tepla. Stejně jako u grafu (Graf 10), i zde došlo ve 210. sekundě k nárůstu tepelného toku na maximální hodnotu, která ve 320. sekundě činila $1,2 \text{ kW/m}^2$. Poté už následoval pouze pokles až do 900. sekundy, kde byl výkon hořáku snížen na 2 kW. Křivka se pohybuje na začátku a konci experimentu na hodnotě $0,3 \text{ kW/m}^2$, což je hodnota tepelného toku od plynového hořáku.



Graf 13: Průběh hustoty tepelného toku u pergoly

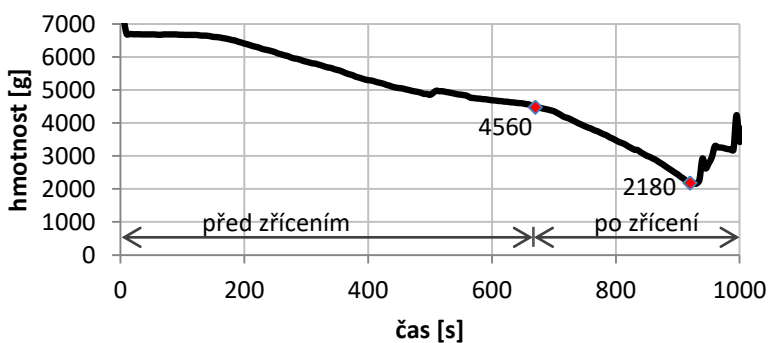
4.5.3 Rozbor výsledků modelu přístřešku

Křivka *HRR* (Graf 14) odpovídá vizuálnímu hodnocení průběhu požáru. Prudký nárůst uvolněného tepla začal ve 140. sekundě, kdy v této fázi došlo k vzplanutí vodorovného laťování na zadní stěně objektu. Růst trval až do 240. sekundy, kdy hodnota množství uvolněného tepla dosáhla 74,1 kW. Poté hodnota oscilovala mezi hodnotami 60-80 kW až do 360. sekundy, kde došlo k nárůstu na hodnotu 98,6 kW. Jednalo se nejvyšší hodnotu množství uvolněného tepla pro konstrukci před kolapsem. V této fázi již většina vodorovného laťování odhořela a plameny zasáhly střešní konstrukci (vaznice, krokve a *OSB* deska). Až do 650. sekundy následoval pokles výkonu požáru na hodnotu 31,6 kW. Tento pokles byl způsoben také tím, že v 620. sekundě byl snížen výkon hořáku na 2 kW. Následný kolaps konstrukce způsobil kumulaci hořícího dřeva pod skloněným střešním pláštěm a následné rozhoření střešního pláště. Došlo k rychlému nárůstu množství uvolněného tepla až na hodnotu 194,1 kW, a to v 925. sekundě. Jednalo o nejvyšší dosaženou hodnotu za celý experiment. Náhlý pokles křivky byl způsoben hašením požáru hasicím mlhovým zařízením. Hodnoty v grafu neklesly na nulu z toho důvodu, že došlo pouze k uhašení plamenů a kompletní vychladnutí ohořelých zbytků proběhlo už mimo měření.

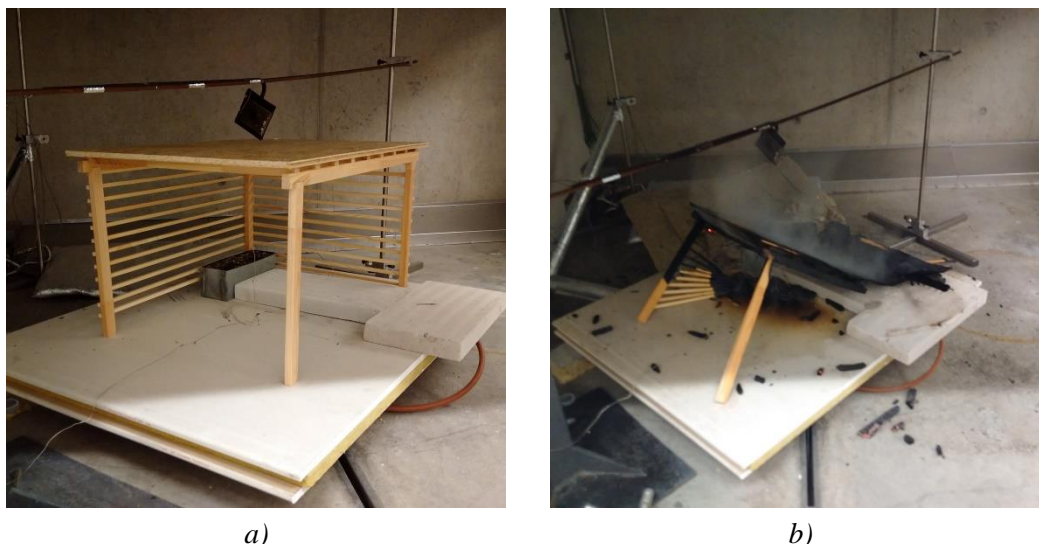


Graf 14: Rychlost uvolňování tepla u modelu přístřešku

Hmotnost přístřešku před experimentem byla 6690 g. Největší podíl na hmotnosti této konstrukce měl střešní plášť tvořený OSB deskou tl. 10 mm. Na počátku experimentu se opakuje stejný výkyv hmotnosti (Graf 15) jako u pergoly, který byl způsoben odebráním ocelové tyče s hořlavou textilií. Poté docházelo k úbytku hmotnosti téměř lineárně až do doby, kdy se zřícená konstrukce rozhořela natolik, že musela být uhašena. Graf byl záměrně ukončen v 1000 sekundách, protože dále bylo s modelem manipulováno z vnější a tento zásah se projevil na naměřené hmotnosti. Tato změna je vidět už od 925. sekundy, kdy se hmotnost přístřešku zastavila na 2180 g, což je také výsledná hodnota. Pokud by požár pokračoval dále, je zde předpoklad, že by hmotnost nadále ubývala lineární rychlostí. Pokus byl ovšem úmyslně přerušen za účelem uhašení požáru. Za dobu 925 sekund tedy došlo ke ztrátě 4510 g, což procentuálně odpovídá 67,4 % původní hmotnosti modelu. Došlo tedy k odhoření téměř 2/3 hmotnosti modelu. Hmotnost přístřešku před kolapsem byla 4560 g, což procentuálně odpovídá ztrátě 32 % původní hmotnosti.

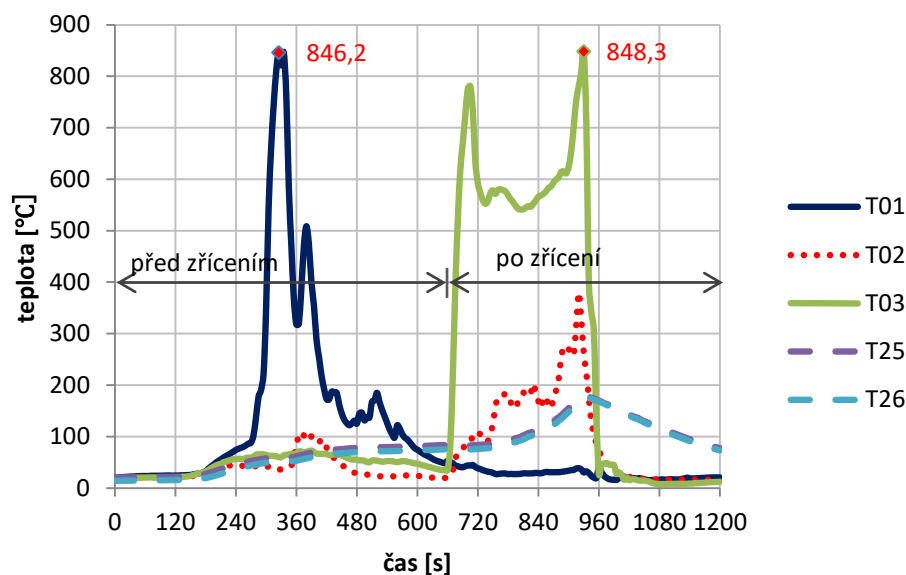


Graf 15: Úbytek hmotnosti přístřešku v závislosti na čase



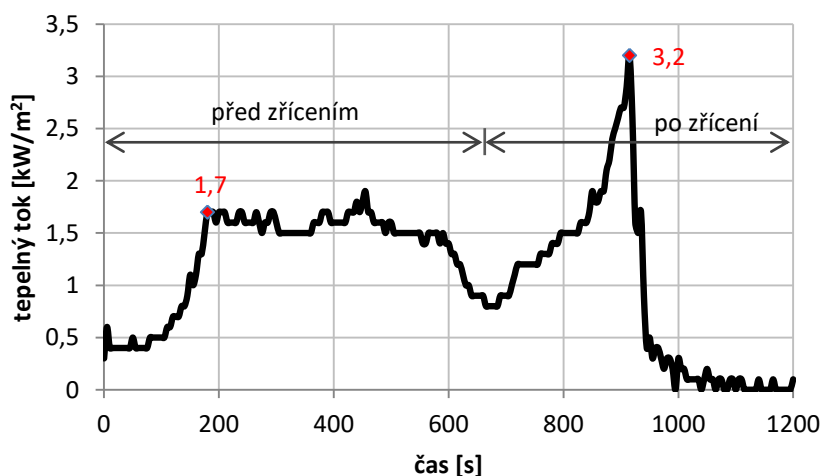
Obr. 29: Pohled na zkoušený model přístřešku: a) před experimentem; b) po experimentu

Na grafu (Graf 16) jsou patrné dva extrémní průběhy teplot. Jedná se o průběhy teplot u plášťových termočlánků T01 (kratší strana s dřevěným laťováním) a T03 (střed konstrukce). Prudký nárůst teplot u termočlánku T01 nastal ve 250. sekundě. Nárůst byl způsoben rozhořením téměř celého vodorovného laťování, u kterého se nacházel termočlánek T01. Maximální teploty 846 °C bylo dosaženo ve 325. sekundě. Poté došlo k rychlému poklesu, jelikož došlo ke kompletnímu vyhoření laťování. Dále už teplota konstantě klesala až do uhašení modelu. Nárůst teplot u termočlánku T03 nastal ve chvíli zřícení konstrukce, tedy v 660. sekundě. Střešní plášť spadl na termočlánek, který se zdeformoval a nacházel se přitisklý přímo na spodní straně střešního pláště, který se postupně rozhořival. Teplotní maximum naměřené tímto termočlánkem bylo 848 °C. Následoval rychlý pokles způsobený hašením modelu. Hodnoty naměřené plášťovým termočlánkem T02 a deskovým snímačem teplot T25/T26 vykazovaly stejné rozdíly, jako u modelu pergoly, viz kapitolu 4.5.1. K nárůstu teplot došlo v okamžiku, kdy se střešní plášť zcela rozhořel a všechna měřicí zařízení umístěná na vodorovné tyči nad modelem byla zcela v plamenech. U plášťového termočlánku došlo k nárůstu teplot na hodnotu 380 °C.



Graf 16: Průběh teplot u modelu přístřešku

Hodnoty radiometru (Graf 17) vykazovaly řádově stejně nízké hodnoty jako u modelu pergoly, kvůli umístění radiometru v příliš velké vzdálenosti od hořícího modelu. Průběh sálavé složky tepelného toku odpovídá křivce rychlosti uvolněného tepla (Graf 14). K nárůstu tepelného toku docházelo už od doby zapálení hořáku, jelikož plameny vyšlehávaly skrz dřevěné laťování. Ve 180. sekundě dosáhla hodnota tepelného toku $1,7 \text{ kW/m}^2$, což je maximální naměřená hodnota u konstrukce před kolapsem. V 620. sekundě došlo k poklesu díky snížení výkonu hořáku na 2 kW. V 660 sekundě došlo ke kolapsu konstrukce a následnému rozhoření zbytku konstrukce přístřešku. Tepelný tok narostl na maximální hodnotu $3,2 \text{ kW/m}^2$ v 915. sekundě. Pokles na nulu byl způsoben vypnutím hořáku a hašením požáru.



Graf 17: Průběh hustoty tepelného toku u přístřešku

4.6 Dílčí závěr

Z předcházejících odstavců je zřejmé, že požár přístřešku byl vizuálně i fyzikálně rozsáhlejší. Hlavní příčinou tohoto rozdílu byl střešní plášť, resp. *OSB* deska tvořící střešní plášť přístřešku. Jelikož byl použit hořlavý střešní plášť, došlo u modelu přístřešku k navýšení stálého požárního zatížení p_s o hmotnost *OSB* desky. V přístřešku se tedy nacházelo větší množství hořlavého materiálu, což byl jeden z důvodů většího rozsahu požáru. Dalším důvodem bylo chování požáru během experimentu.

Chování plamenů v závislosti na použití střešního pláště patřilo mezi hlavní sledované jevy experimentu. V obou experimentech docházelo k rozdílnému chování plamenů. U pergoly plameny směřovaly ve vertikální rovině bez výrazných fluktuací směrem vzhůru a to jen v místě, kde se nacházel plynový hořák (Obr. 30). U přístřešku plameny vybočovaly směrem od obvodové konstrukce už při rozhořívání dřevěného laťování. Při kontaktu se střešním pláštěm u přístřešku došlo k dalšímu vybočení (Obr. 30b, Obr. 31b). Míra vybočení je tedy způsobována velikostí přesahu střešního pláště. U modelu přístřešku byl tento přesah pouze 25 mm, a z toho důvodu nedocházelo k většímu vybočení plamenů. Tento jev u pergoly nastat nemohl, jelikož se u ní nenacházely žádné plošné konstrukce, které by toto chování plamenů způsobovaly.



a)



b)

Obr. 30: Chování plamenů v místě střešní konstrukce: a) u pergoly; b) u přístřešku

Další podstatný rozdíl, který s sebou přináší použití střešního pláště je šíření požáru pod touto konstrukcí. Použitý hořlavý střešní plášť způsobil šíření požáru podstřešním prostorem. Požár se šířil postupným odhoříváním *OSB* desky na jejím spodním povrchu a za pomoci šíření pyrolyzních plynů pod střešním pláštěm. Toto šíření bylo usměrněno a urychleno krokvemi, které pod střešním pláštěm tvořily „kanál“, ve kterém se tyto plyny a plameny šířily. Pokud by

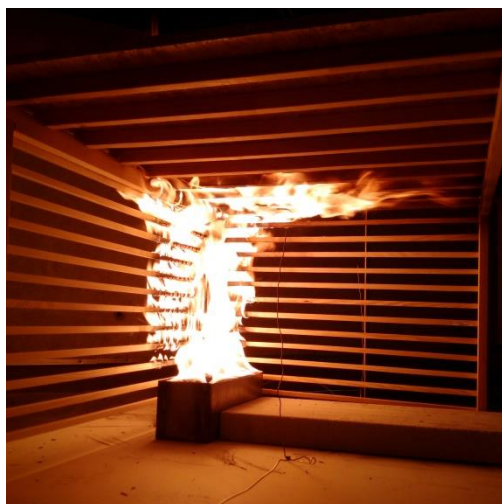
byl tedy použit i nehořlavý střešní plášť, došlo by k podobnému efektu šíření nakumulovaných hořlavých plynů a plamenů pod střešním pláštěm, což by způsobilo vzplanutí konstrukcí, které se nachází ve větší vzdálenosti od zdroje požáru. Tento jev je velice podobný tzv. rollover efektu (Obr. 31a), kdy dochází ke kumulaci hořlavých plynů pod nehořlavou stropní konstrukcí a požár se „roluje“ pod stropem do dalších částí objektu. Tímto způsobem došlo k rozšíření požáru na téměř celou konstrukci přístřešku. U pergoly k tomuto jevu dojít nemohlo, a proto požár proběhl pouze v místě plynového hořáku. Vyšlehávání požáru nad střešní plášť způsobilo šíření požáru po okrajích střešního pláště, což následně umocnil pád celé konstrukce.

Rozdílné chování požáru obou modelů je patrné i na výsledcích měřících zařízení z obou experimentů. Kromě zásadního vizuálního rozdílu požáru obou modelů je tento rozdíl patrný i při pohledu na průběhy *HRR* (Graf 10, Graf 14) pro oba dva modely. Rozdíl v naměřených hodnotách koresponduje s vizuálním rozdílem požáru, kdy rozsah požáru přístřešku překonal rozsah požáru pergoly ve všech měřených veličinách. Z naměřených údajů *HRR* mohu konstatovat pro oba dva modely následující:

- Rychlost nárůstu uvolněného tepla (*FIGRA*⁸) u modelu přístřešku je vyšší než u modelu pergoly, kde u přístřešku došlo po zapnutí hořáku k rychlému nárůstu množství uvolněného tepla, zatímco u pergoly byl nárůst pozvolný.
- Maximální získaná hodnota *HRR_{max}* (peak) byla u přístřešku 98,6 kW před pádem konstrukce, zatímco u pergoly pouze 34 kW. Po pádu přístřešku vzrostla až na 194,1 kW, ale jelikož se jednalo až o 15. minutu experimentu, je zde předpoklad, že při reálném požáru by už byl v tomto čase veden protipožární zásah jednotek požární ochrany.
- Ze získaných průběhů *HRR* je na první pohled vidět velikost ploch pod křivkou jednotlivých grafů, a tím pádem i celkové množství uvolněného tepla při požáru (*THR*⁹). Celkové množství uvolněného tepla pro pergolu činí 12,5 MJ, zatímco u přístřešku je to 69 MJ. Více informací k hodnotám celkového množství uvolněného tepla je uvedeno v samostatné kapitole 5.

⁸ Fire Growth Rate vyjadřuje, jak rychle se zvyšuje intenzita hoření. Jedná se o tangentu proloženou křivkou *HRR* [16].

⁹ Total Heat Release vyjadřuje, kolik tepla se celkem z materiálu uvolní během procesu hoření. Jedná se o plochu pod křivkou *HRR* [16].



a)



b)

Obr. 31: Chování požáru v závislosti na střešním plášti: a) šíření požáru pod střešním pláštěm; b) vyšlehávání plamenů zpoza střešního pláště

Vyšší hodnoty průběhu teplot (Tab. 4) u modelu přístřešku jsou způsobeny hlavně tím, že pláštěvé termočlánky zde byly na rozdíl od požáru pergoly vystaveny přímému účinku plamenů, jelikož u přístřešku došlo k většímu rozsahu požáru. Požár pergoly proběhl pouze v místě hořáku, tudíž jednotlivé termočlánky nemohly naměřit vyšší hodnoty.

Průběh naměřených hodnot sálavé složky tepelného toku byl značně závislý na poloze radiometru. Jak bylo uvedeno v předchozích kapitolách, vzhledem k velikosti požáru obou modelů, byl radiometr umístěn příliš daleko na to, aby dokázal plynuleji zaznamenat změnu hodnot tepelného toku. Avšak i tak je patrný rozdíl v průběhu křivky v grafu, kde zákonitě byly hodnoty tepelného toku u přístřešku vyšší než u pergoly. Největší rozdíl v grafu (Graf 13, Graf 17) je patrný po 840. sekundě, kde u pergoly nedocházelo k dalšímu šíření požáru, ale k jeho utlumení, zatímco u přístřešku po pádu celé konstrukce došlo k rozhoření všech dřevěných nakumulovaných konstrukcí.

Další měřená veličina, na které lze vidět značný rozdíl je úbytek hmotnosti modelů. Na výše uvedených fotografiích (Obr. 26, Obr. 29) lze názorně vidět, jak oba modely vypadaly před experimentem a po experimentu. Jelikož požár přístřešku vykazoval mnohonásobně vyšší výkon, muselo dle přímé úměry dojít k vyhoření vyššího množství paliva, což se odrazilo na výsledné hmotnosti obou modelů. U pergoly došlo ke ztrátě 22,5 % původní hmotnosti. Podle fotografie (Obr. 26b) ohořelého modelu pergoly, došlo k odhoření pouze dřevěné konstrukce v blízkosti hořáku. U přístřešku došlo ke ztrátě 67,4 % původní hmotnosti, což bylo způsobeno rozšířením požáru na celou konstrukci a jejím následným zřícením.

Zjištěné vizuální a numerické výsledky budou posouzeny z hlediska určování odstupových vzdáleností v závěrečné kapitole 6.

Tab. 4: Srovnání maximálních hodnot obou experimentů

model	max. naměřená teplota [°C]			max. naměřená hodnota tepelného toku [kW/m ²]	max. hodnota HRR [kW]		poměrný úbytek hmotnosti [%]
	T01	T02	T03		naměřená	vypočítaná	
pergola	25	20	19	1,2	33,9 ¹⁾	33,8 ¹⁾	22,5
přístřešek	846	380	848	3,2	177,1 ²⁾	181,8 ²⁾	67,4

Poznámka:

1) Uvedené hodnoty byly dosaženy v různých časech, naměřená hodnota byla zaznamenána v 550. sekundě, vypočítaná hodnota odpovídá 300. sekundě.

2) Uvedené hodnoty jsou pro čas 900 sekund, vypočítaná hodnota je získána jako průměr hodnot dvou časových intervalů v 900. sekundě.

3) Hodnoty z deskového snímače zde nejsou uvedeny, protože se jedná o měřicí zařízení, které není vhodné pro měření teplot u těchto typů zkoušek, viz kapitolu 3.5.1.

5 Porovnání výsledků CFD simulací s výsledky požárních experimentů

5.1 Úvod

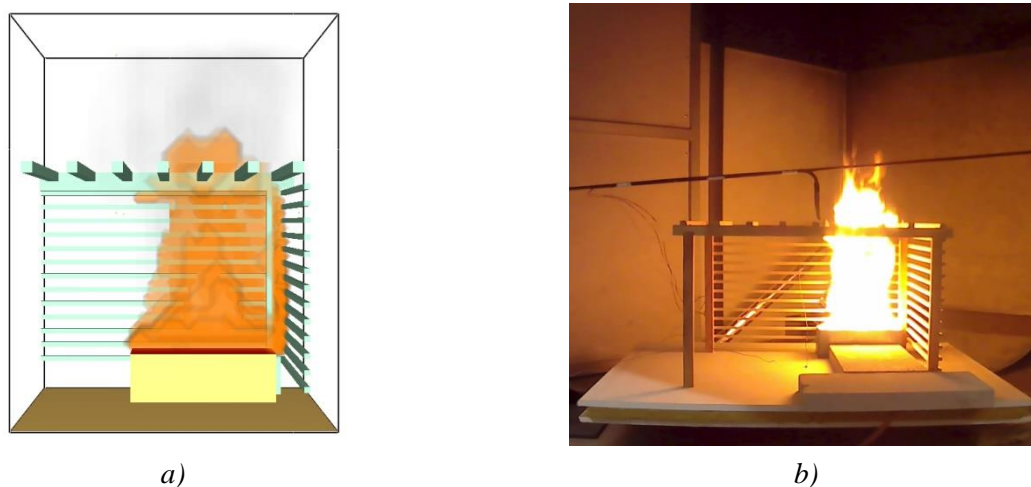
V předchozích kapitolách bylo provedeno zhodnocení výsledků jednotlivých *CFD* simulací a požárních experimentů. Jedním z cílů diplomové práce bylo vzájemné porovnání *CFD* simulací s požárním experimentem, a to jak po vizuální stránce (videozáznam, vizualizace ve Smokeview), tak i pomocí vypočítaných a naměřených hodnot pro jednotlivé modely. Chování a šíření plamenů po konstrukci je neustálý a rychle se měnící jev, který je náročné jakkoliv předpovídat. Výsledky z *CFD* simulací jsou proto srovnány s výsledky z požárních experimentů. Toto srovnání je procesem validace matematického modelu, aby se ověřila jeho správnost.

5.2 Porovnání výsledků CFD simulace a požárního experimentu pro model pergoly

Pro srovnání matematické *CFD* simulace pergoly s požárním experimentem pergoly jsou porovnány sekvenční snímky (Příloha 3) z průběhu simulace/experimentu, získané hodnoty rychlosti uvolněného tepla (*HRR*) a průběhy teplot z měřicích zařízení.

Z pořízeného videozáznamu z požární zkoušky a vizualizace simulace ve Smokeview jsou vidět rozdíly v chování plamene a hoření jednotlivých částí konstrukcí. Jelikož mezi hlavní cíle matematické *CFD* simulace i požárního experimentu patřilo sledování výšky plamenů a chování plamenů v místě střešní konstrukce, byly porovnány jednotlivé časové kroky. Celé sekvenční srovnání *CFD* simulace s požárním experimentem je uvedeno v Příloze 3. V *CFD* simulaci došlo k maximálnímu rozvoji požáru v 465. sekundě, kdy byla zaznamenána i nejvyšší výška plamenů. Jak bylo zmíněné v kapitole 3.5, kvůli napojení více výpočetních sítí v místě nad konstrukcí střechy v tomto místě nedocházelo vizuálně k velkému nárůstu výšky plamene. U požárního experimentu pergoly plameny dosahovaly nejvýše přibližně mezi 215. až 330. sekundou a to 300-400 mm nad rovinu konstrukce střechy (Obr. 32b). Čas, ve kterém došlo u požárního experimentu k rozvoji výšky plamenů, koresponduje s časem, ve kterém byl zaznamenán první vrchol křivky (peak) *HRR*. Stejně tak je tomu i u *CFD* simulace, kdy největší výška plamenů byla zaznamenána v čase, kdy hodnoty *HRR* dosáhly maxima (Obr. 32a). Časový rozdíl mezi

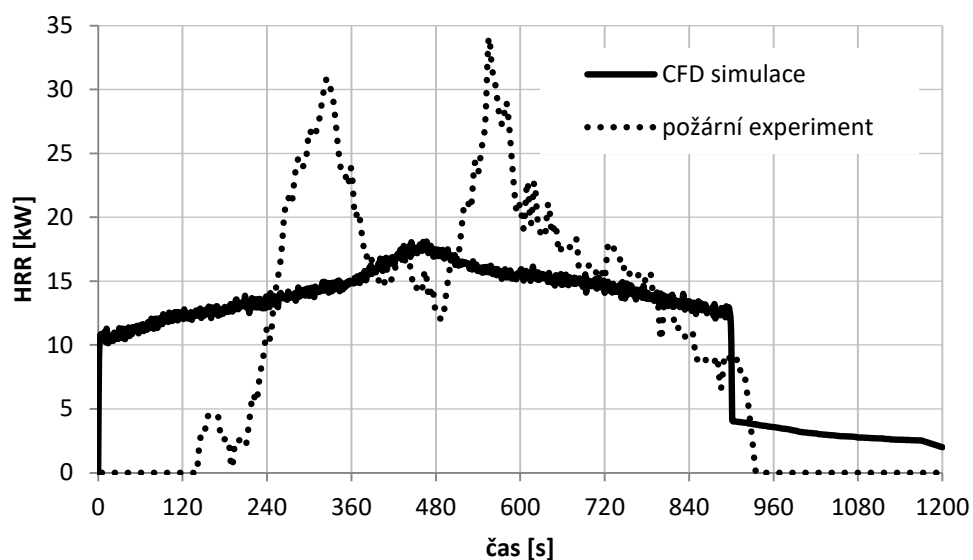
zaznamenanou maximální výškou plamenů u *CFD* simulace a požárního experimentu je přibližně 130 sekund.



Obr. 32: Srovnání výšky plamenů u pergoly: a) *CFD* simulace; b) požární experiment

Hodnoty rychlosti uvolněného tepla jsou ve srovnání značně odlišné a korespondují se získanými sekvenčními snímky. Z grafu (Graf 18) je patrný veliký rozdíl v průběhu hoření. U požárního experimentu pergoly došlo k nárůstu HRR_{EXP} až na hodnoty nad 30 kW, což bylo způsobeno rozhořením vodorovného laťování na obou stranách pergoly. U *CFD* simulace nedošlo k rychlému nárůstu HRR_{CFD} , ale pozvolnému náběhu na hodnotu 18,1 kW, což odpovídá časově bodu mezi dvěma maximálními hodnotami HRR_{EXP} . Hlavní rozdíl je tedy v rychlosti nárůstu uvolněného tepla a v maximálních dosažených hodnotách. Tyto oba zásadní rozdíly přisuzují velikosti jednotlivých výpočetních buněk v oblasti vodorovného laťování, které zásadně přispělo v rychlosti nárůstu uvolněného tepla u požárního experimentu. Velikost buněk byla v místě vodorovného laťování 10 mm, což odpovídalo rozměru jednoho dřevěného prvku. Ze získaných poznatků k programu FDS vím, že pokud by v místě vodorovného laťování byla zvolena menší velikost buněk, došlo by k rozvoji požáru rychleji na celém povrchu dřevěného prvku. Toto řešení by ovšem způsobilo značný nárůst výpočetního času. Pokud se zaměříme u grafu 16 na interval, ve kterém došlo k nárůstu a poklesu rychlosti uvolněného tepla, tak můžeme vidět shodu. Jak u *CFD* simulace, tak i u požárního experimentu došlo k samovolnému uhasnutí požáru přibližně ve stejné době. Nárůst hodnot HRR_{EXP} u požárního experimentu až po 120. sekundě a pokles na nulovou hodnotu po 900. sekundě byl způsoben citlivostí analyzátoru spotřeby kyslíku, viz kapitolu 4.5.1. Ačkoliv se tedy hodnoty HRR_{EXP} a HRR_{CFD} značně liší, množství uvolněného tepla v průběhu celé simulace/experimentu se shoduje.

Pro zjištění celkového množství uvolněného tepla pro oba získané průběhy *HRR* bylo nutné zjistit plochu pod křivkou. Křivka *HRR* nám ukazuje závislost množství uvolněného tepla na čase. Plocha pod křivkou se dá vypočítat pomocí určitého integrálu, ale jelikož neznám funkci grafu, bylo nutné tuto plochu vypočítat zjednodušeným postupem, a to tak, že jsem plochu pod křivkou rozdělil na vodorovné ose na časové intervaly, které odpovídaly hodnotě časového kroku 5 sekund. Hodnoty na svislé ose v každém časovém kroku jsem zjistil jako průměr dvou hodnot¹⁰ *HRR*, které se nacházely na obou stranách časového intervalu. Z těchto hodnot jsem vypočetl plochu pro každý jednotlivý časový interval a plochy sečetl. Zjednodušená plocha tedy udává celkové množství uvolněného tepla. Na základě tohoto postupu bylo stanoveno celkové množství uvolněného tepla při požárním experimentu pergoly na hodnotu 12,5 MJ a pro *CFD* simulaci na hodnotu 13,6 MJ. Rozdíl mezi celkovým množstvím uvolněného tepla činí 8 %.

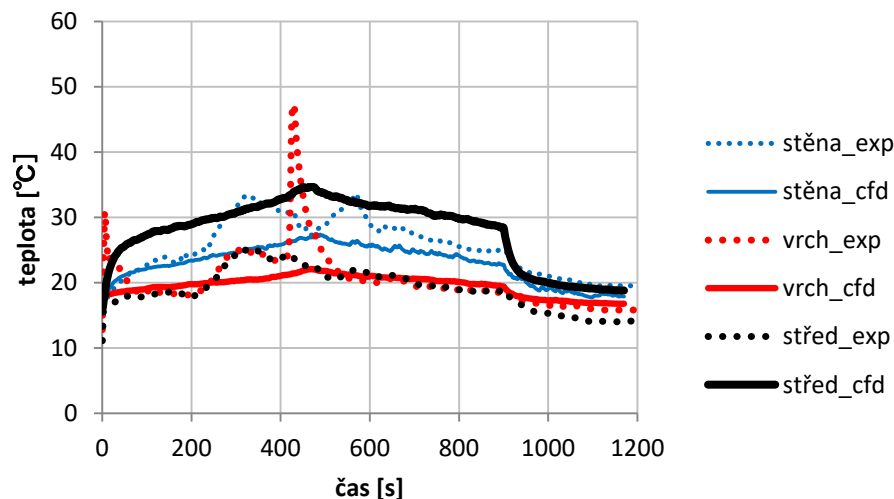


Graf 18: Porovnání rychlostí uvolněného tepla pro pergolu

Průběhy teplot jsou porovnány na grafu (Graf 19), na kterém jsou stejnou barvou označeny totožné termočlánky, kdy plnou čarou je zaznamenán průběh hodnot z *CFD* simulace a tečkovanou čarou průběh teplot z požárního experimentu. Získané průběhy teplot jsou si svým průběhem velice podobné, rozdíl se zde pohybuje maximálně do 10 °C. Maximální zaznamenané teploty korespondují s maximálně naměřenými hodnotami *HRR*. Výkyv u termočlánku nad konstrukcí střechy (vrch_exp) nemá opodstatnění, viz kapitolu 4.5.2. Žádný z termočlánků nebyl při *CFD* simulaci ani požárním experimentu zasažen přímými účinky plamenů ani se nenacházel

¹⁰ Tímto postupem dojde ke stanovení průměrného množství uvolněného tepla v časovém kroku, což odpovídá definici ARHE (Average Rate of Heat Emission).

v těsné blízkosti místa hoření, tudíž získané průběhy teplot jsou velmi nízké. Rozdíly v získaných hodnotách průběhu teplot nejsou vysoké a průběhy teplot se shodují i trendem křivky.



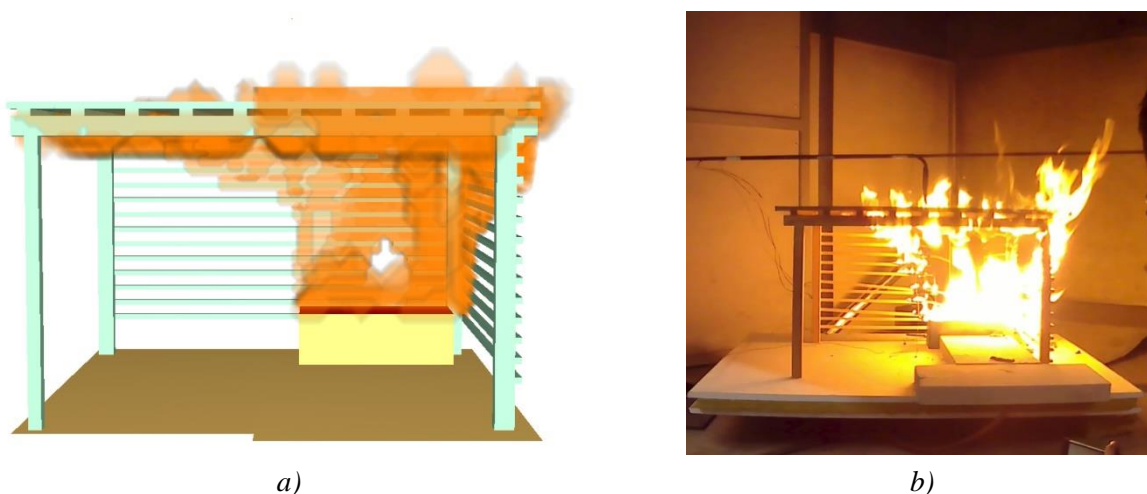
Graf 19: Porovnání průběhů teplot pro pergolu

5.3 Porovnání výsledků CFD simulace a požárního experimentu pro model přístřešku

Stejně jako u porovnání modelu pergoly i pro porovnání matematické *CFD* simulace přístřešku s požárním experimentem přístřešku posloužily sekvenční snímky získané z videozáznamu a Smokeview a dále pak numerické záznamy. Vizuelní i numerické srovnání je provedeno v časovém rozsahu 660 sekund, kdy v této době došlo u požárního experimentu ke zřícení a porovnání by po tomto časovém bodu už nebylo průkazné, jelikož *CFD* simulace neumí simulovat pád konstrukce, viz kapitolu 3.6.

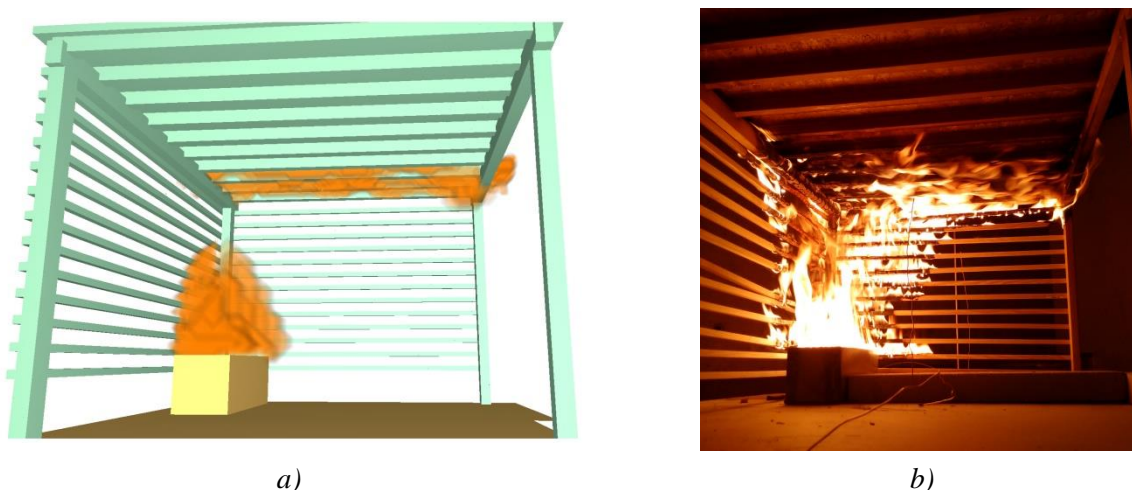
U přístřešku se rozdíly v hoření mezi *CFD* simulací a požárním experimentem projeví více. Hlavně v rozvoji požáru na dřevěném vodorovném laťování se nachází veliké rozdíly, které se projeví jak ve vizuelním porovnání, tak i v numerickém srovnání. Největší vizuelní rozdíl byl patrný v oblasti střešního pláště a s tím spojené vyšlehávání plamenů, kde docházelo ke stejným rozdílům jako u pergoly vlivem napojení výpočetních sítí. U *CFD* simulace nebylo vyšlehávání plamenů do stran a nad střešní plášť tak výrazné, jako tomu bylo u požárního experimentu, kde výška vyšlehávajících plamenů byla přibližně 300-400 mm (Obr. 33b), a to od 180. sekundy až do pádu konstrukce, který nastal v 660. sekundě. U *CFD* simulace plameny vyšlehávaly v daleko menší míře od 200. sekundy simulace až do jejího konce (Obr. 33a). I zde

vizuální rozvoj plamenů u *CFD* simulace a požárního experimentu koresponduje s hodnotami *HRR*.



Obr. 33: Srovnání výšky plamenů u přístřešku: a) *CFD* simulace; b) požární experiment

Největší rozvoj požáru tedy nastal v čase, kdy byly zaznamenány nejvyšší hodnoty rychlosti uvolněného tepla. U požárního experimentu přístřešku došlo tedy vizuálně k daleko většímu rozsahu plamenů, a to jak uvnitř modelu, tak i nad rovinou střešního pláště. U obou konstrukcí přispěl k šíření požáru střešní pláště. U *CFD* simulace (Obr. 34a) i požárního experimentu (Obr. 34b) nastalo šíření požáru a následné vyšlehávání plamenů na opačné straně přístřešku přibližně ve stejném čase, tudíž docházelo ke stejné rychlosti šíření plamenů. V tomto čase už ovšem u přístřešku byla zadní a boční část vodorovného laťování v plamenech, což u *CFD* simulace nastalo až následným rozšířením požáru na laťování ze střešního pláště.

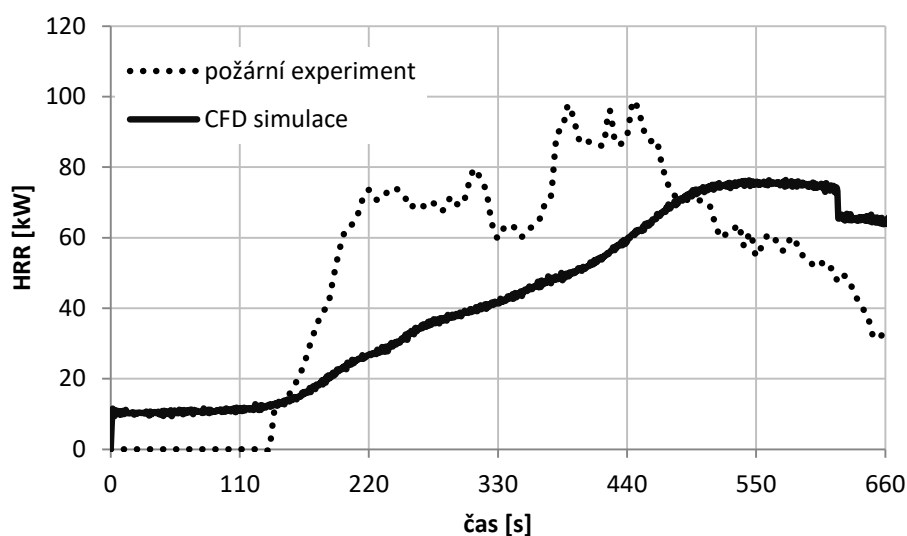


Obr. 34: Šíření plamenů pod střešním pláštěm: a) *CFD* simulace; b) požární experiment

Rozdíl v rozsahu požáru jde u numerických záznamů nejvíce vidět na rychlosti uvolněného tepla, která byla pro *CFD* simulaci a požární experiment značně odlišná. Stejně jako u pergoly

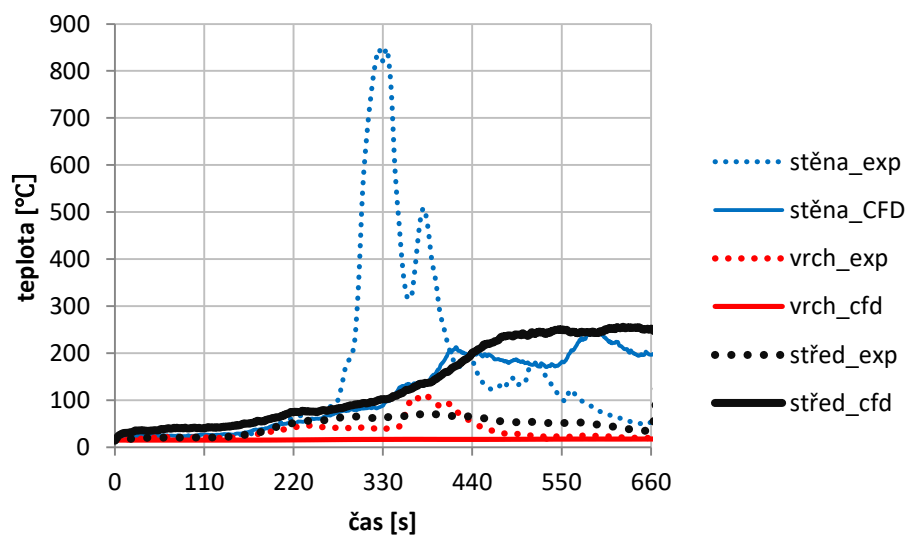
i zde koresponduje průběh HRR se získanými sekvenčními snímky. Na grafu (Graf 20) můžeme vidět rozdíl, který narůstal od 110. sekundy. U CFD simulace docházelo stejně jako u pergoly k pozvolnému nárůstu HRR_{CFD} bez výrazných výkyvů až na maximální hodnotu 76,4 kW v 575. sekundě. U požárního experimentu došlo k daleko rychlejšímu nárůstu hodnot HRR_{EXP} na první vrchol křivky (peak) s hodnotou 72,7 kW a dále na druhý vrchol s hodnotou 96,2 kW. Stejně jako u pergoly je i zde hlavní rozdíl v rychlosti nárůstu uvolněného tepla, což ovlivnilo i maximální dosažené hodnoty. Maximální hodnota HRR byla u požárního experimentu dosažena po 100 sekundách od rozhoření konstrukce, zatímco u CFD simulace k tomu došlo až po úplném rozhoření střešního pláště v 500. sekundě. Tento velký rozdíl i zde přisuzuji velikosti výpočetních buněk v místě vodorovného laťování, kde maximální dovolená velikost výpočetních buněk (10 mm) způsobila zpomalení šíření plamene po těchto subtilních dřevěných prvcích, a to jen po jedné straně. Z požárního experimentu vím, že rychlý nárůst hodnot HRR_{EXP} byl způsoben rychlým rozšířením požáru na vodorovném laťování, k čemuž u CFD simulace docházelo velice pomalu.

Stejně jako u porovnání CFD simulace a požárního experimentu u pergoly jsem provedl i zde výpočet celkového množství uvolněného tepla THR . Výpočet jsem provedl stejným způsobem jako u pergoly, a to na základě vypočítání plochy pod zjednodušenou křivkou, která odpovídá průběhu křivky $ARHE$. Celkové množství uvolněného tepla u CFD simulace přístřešku bylo 28,4 MJ, zatímco u požárního experimentu byla tato hodnota 33,4 MJ. Rozdíl v THR tedy činí 15 %, což je větší rozdíl, než byl vypočítán u porovnání pergoly.



Graf 20: Porovnání rychlostí uvolněného tepla pro přístřešek

Průběhy teplot jsou porovnány na grafu (Graf 21), na kterém jsou stejnou barvou označeny totožné termočlánky, kdy plnou čarou je zaznamenán průběh hodnot z *CFD* simulace a tečkovanou čarou průběh teplot z požárního experimentu. U průběhu teplot se nachází větší rozdíly, než tomu bylo u pergoly. Největší shody dosahují termočlánky umístěné nad konstrukcí střešního pláště, protože jak u *CFD* simulace, tak i u požárního experimentu byly po celou dobu (660 sekund) odstíněny střešním pláštěm, a tak nezaznamenaly vyšší hodnoty. Na grafu, který ukazuje průběh teplot při celém požárním experimentu (Graf 16), je vidět nárůst teploty u termočlánku po pádu konstrukce a rozhoření střešního pláště. U *CFD* simulace by k tomuto jevu nedošlo, protože konstrukce v simulaci spadnout nemohla a po snížení výkonu hořáku by docházelo k postupnému útlumu výkonu požáru až do úplného vyhasnutí. Střešní plášť by se nemohl rozhořet a termočlánek umístěný nad ním by nezaznamenal nárůst teploty. Rozdílné hodnoty na termočláncích umístěných na středu konstrukce jsou z důvodu odlišného chování plamenů v průběhu simulace/experimentu. Největší rozdíl je patrný na termočláncích umístěných na kratší stěně vodorovného laťování. U *CFD* simulace došlo k rozhoření pouze vrchní části vodorovného laťování až poté, co se požár rozšířil po spodní straně střešního pláště, zatímco u požárního experimentu se vodorovné laťování rozhořelo společně se střešním pláštěm a zadním laťováním. Výrazný hodnotový rozdíl byl způsoben tím, že u požárního experimentu se termočlánek nacházel v plamenech, u *CFD* simulace nikoliv.



Graf 21: Porovnání průběhů teplot pro přístřešek

5.4 Dílčí závěr

Tato kapitola se věnovala porovnání matematických *CFD* simulací s požárními experimenty. Geometrie zkoušených konstrukcí i použité materiály byly totožné pro *CFD* simulaci i požární experiment. Průběh simulace/experimentu byl také totožný, jednalo se o iniciaci požáru za pomoci plynového hořáku, kterému se reguloval výkon v rámci sledování rozvoje požáru. Následovalo vizuální i numerické porovnání jednotlivých modelů mezi sebou (pergola vs. pergola, přístřešek vs. přístřešek). Na základě těchto porovnání mohu konstatovat následující:

- Vizuální srovnání bylo zaměřené především na rozvoj požáru a chování plamenů. Vizuálně docházelo u obou *CFD* simulací k pomalejšímu rozhořívání a šíření plamenů, což ovlivnilo i rozdíl v maximálních získaných hodnotách *HRR*. Výška plamenů byla značně rozdílná u obou *CFD* modelů, což bylo způsobeno především napojením výpočetních sítí v oblasti nad konstrukcí střechy, kde se tyto plameny vyskytovaly. Styk jemné a hrubé sítě zapříčinil nepřesné zobrazení plamenů, jelikož docházelo ke vzniku plamenů v jemné síti a přechodem do hrubší sítě.
- Největší rozdíl jak vizuální, tak numerický byl způsoben schopností vodorovného laťování hořet a šířit požár. V *CFD* simulacích docházelo k velmi pomalému rozhoření těchto subtilních konstrukcí, zatímco při požárním experimentu docházelo k velmi rychlému rozhoření a s tím spojené rychlosti nárůstu uvolněného tepla. U obou *CFD* simulací z důvodu pomalého rozhořívání těchto konstrukcí došlo k menšímu nárůstu výkonu požáru, než tomu bylo u požárního experimentu.
- Pomalé rozhoření vodorovného laťování bylo způsobeno velikostí výpočetních buněk. Pokud by byla v oblasti vodorovného laťování zvolena jemnější síť (použitá síť byla 10 mm), došlo by k rychlejšímu rozhoření těchto konstrukcí a dále k rychlejšímu šíření požáru.
- Schopnost šíření požáru pod střešním pláštěm u porovnání přístřešku byla potvrzena u *CFD* simulaci u požárního experimentu. Především u *CFD* simulace došlo k rozšíření požáru ze střešního pláště na horní část vodorovného laťování a k šíření požáru zde docházelo zhora dolů.
- Výsledky matematické *CFD* simulace jsou zcela závislé na použitých vstupních datech. Tepelnětechnické a požárnětechnické charakteristiky borovicového dřeva a *OSB* desky se mohly lišit, jelikož dřevo je nehomogenní materiál a tyto charakteristiky můžou být pro stejný materiál značně odlišné.

6 Závěr

6.1 Aplikace získaných poznatků při určování odstupových vzdáleností pro pergoly

Teoretická část pojednává při určování odstupových vzdáleností u pergol o dvou základních pojmech, kterými jsou otevřený objekt a volný sklad (viz kapitola 2.2.2). Stanovení odstupových vzdáleností pro otevřené objekty je z hlediska velikosti odstupových vzdáleností příznivější, jelikož do výšky požárně otevřené plochy nezapočítáváme výšku plamenů. Cílem této kapitoly je zařazení objektu pergoly k jednomu z těchto pojmů.

Poznatky jsou získány z provedených matematických *CFD* simulací, ve kterých proběhla simulace požáru pergoly a přístřešku, a dále pak z požárních experimentů, kde byl vizuálně i numericky vyhodnocen požár fyzikálních modelů pergoly a přístřešku.

6.1.1 Velikost požárně otevřené plochy

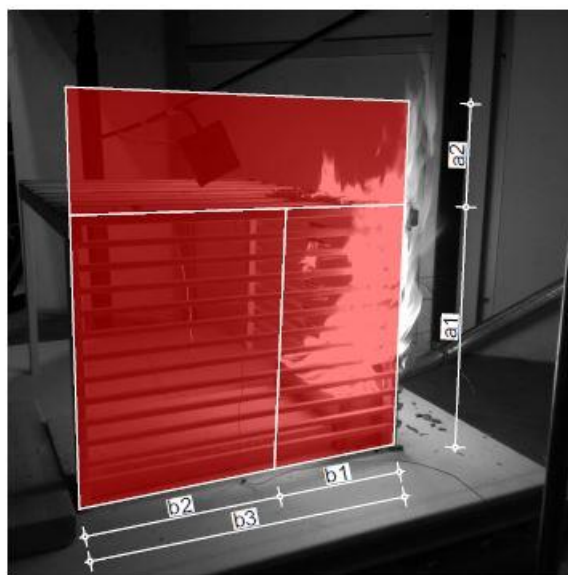
U matematické *CFD* simulace a převážně u požárního experimentu pergoly došlo při požáru k nárůstu velikosti plamenů do výšky přibližně 300-400 mm nad rovinu konstrukce střechy. Tento vývin plamenů byl způsoben intenzitou hoření vodorovného laťování. Vznik a rozvoj požáru v tomto místě byl po celou dobu podmíněn umístěním plynového hořáku. Pokud by byl hořák umístěn uprostřed konstrukce, což by odpovídalo umístění sestavy nábytku u skutečných konstrukcí pergol, nedošlo by k téměř žádnému rozvoji požáru. Požár by proběhl pouze v místě nad hořákem hořením dřevěných krokví. Výška plamenů by se zde odvíjela tedy pouze od výkonu požáru hořící sestavy nábytku a z části dřevěných konstrukcí, na které by se požár rozšířil. Z těchto zjištěných informací mohu konstatovat k výšce požárně otevřené plochy následující:

- Výška požárně otevřené plochy se u otevřeného objektu určuje pro zcela požárně otevřenou plochu celou její výškou. V tomto případě by výška požárně otevřené plochy byla tedy výška celé konstrukce bez výšky plamenů. Plameny při požáru nevyšlehávaly do boků a nad úroveň konstrukce střechy se vyskytovaly pouze krátkou dobu.
- Výška plamenů při požáru pergoly byla způsobena převážně požárem šířícím se po vodorovných dřevěných prvcích a umístěním plynového hořáku. V konstrukcích reálných

rozměrů by vodorovné laťování tvořily průřezy větších dimenzí a vlivem tvorby uhlíkatého zbytku by nedošlo k celkovému vyhoření.

Rozvoj požáru proběhl pouze v místě zdroje hoření a šíření požáru v horizontálním směru nenastalo (Obr. 26b). Ani dřevěné prvky malých dimenzí nedokázaly šířit požár, a tudíž se jednalo pouze o lokální požár v místě hořáku. Z hlediska určení odstupových vzdáleností se jednalo o zcela požárně otevřené plochy, avšak každá strana pergoly by s ohledem na provedené simulace/experimenty vykazovala v rovině sálavé plochy jiné hodnoty tepelného toku. Určení odstupových vzdáleností od takové konstrukce by bylo tedy značně složité, a proto je na straně bezpečnosti uvažovat na všech požárně otevřených plochách maximální hodnotu hustoty tepelného toku. Uživatelé mají v těchto konstrukcích i další množství materiálu (např. uložené z vnější strany), které by mohlo přispět k nárůstu výkonu požáru a s tím spojené velikosti odstupových vzdáleností. Jelikož konstrukce pergoly slouží jako podpora k růstu popínavých rostlin, může tato rostlina v případě sucha způsobit rozšíření požáru na celou plochu požárně otevřené plochy. Z výše uvedených informací mohu konstatovat následující:

- Šířka požárně otevřené plochy pergoly je uvažována v celé šířce stěny (Obr. 35) se stejnou hodnotou tepelného toku ve všech požárně otevřených plochách. Takto určená velikost požárně otevřené plochy je na straně bezpečnosti.

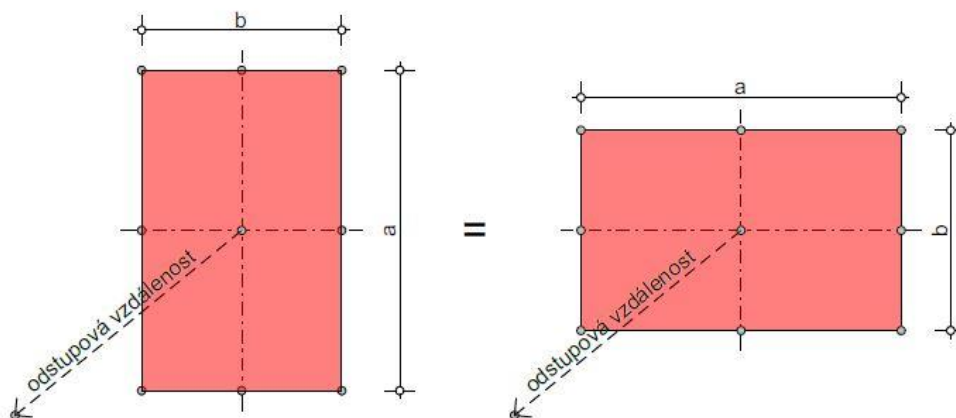


- a1 - snížená výška požárně otevřené plochy
- a2 - výška plamenů
- b1 - skutečná šířka požárně otevřené plochy
- b2 - rozšíření požárně otevřené plochy
- b3 - celková šířka požárně otevřené plochy

Obr. 35: Schéma rozdělení požárně otevřené plochy

- Pokud aproximujeme výšku požárně otevřené plochy s plameny za výšku požárně otevřené plochy bez plamenů (Obr. 36) a jako šířku budeme uvažovat celou délku posuzované konstrukce, odstupové vzdálenosti tímto postupem vyjdou vždy vyšší, tzn. výpočet je

na straně bezpečnosti. Pokud máme požárně otevřenou plochu s délkou a a výškou b , tak odstupová vzdálenost by vyšla stejná, pokud bychom tyto hodnoty zaměnili¹¹ (Obr. 36).



Obr. 36: Porovnání odstupových vzdáleností při změně výšky (resp. orientace požárně otevřené plochy)

6.1.2 Shrnutí pro model pergoly

Z výše uvedených odstavců, které byly získány studiem teorie určování odstupových vzdáleností a hlavně provedením matematické CFD simulace a požárního experimentu, lze zařadit objekt pergoly k pojmu otevřený objekt. Stanovení odstupových vzdáleností od konstrukce pergoly bude probíhat stejně jako u kteréhokoliv stavebního objektu. Poznatky a doporučení k určování odstupových vzdáleností od pergoly:

- Šířka a výška požárně otevřené plochy odpovídá rozměrům obvodové konstrukce, výška plamenů nemá vliv na výšku požárně otevřené plochy.
- Při stanovení požárního rizika je nejlépe postupovat výpočtem nahodilého požárního zatížení dle skutečného vybavení a stále požární zatížení uvažovat pouze v případě použití hořlavé podlahy, takto vypočítané požární riziko bude navýšeno o přídavek za druh konstrukčního systému.
- Oproti přístřešku došlo u pergoly k mnohonásobně menšímu úbytku hmotnosti během požáru, tudíž nosná konstrukce pergoly téměř nepřispívá k výkonu požáru. Ve zkratce se dá říci, že u pergoly hoří pouze vlastní vybavení.
- Jedná se o objekt bez obvodového a střešního pláště. V rovině požárně otevřené plochy se teplota vyšší než je 680 °C může vyskytovat jen v případě výskytu hořlavých materiálů, a to

¹¹ Porovnání je možné např. v tabulce F.2 v příloze normy ČSN 73 0802.

v omezené míře. Hlavní zdroj požáru u pergoly bude ve většině případů tvořit vždy nábytek nebo materiál umístěný uvnitř pergoly. Pro výpočet odstupových vzdáleností je tedy vhodné použít křivku vnějšího požáru, která zohledňuje namáhání konstrukcí při venkovním požáru, a takto vypočítané odstupové vzdálenosti vycházejí nižší.

6.2 Aplikace získaných poznatků při určování odstupových vzdáleností pro přístřešky

Výsledky *CFD* simulace a požárního experimentu potvrdily předpoklady uváděné v teoretické části práce. Střešní plášť má podstatný vliv na rozvoj požáru, šíření požáru a v neposlední řadě na odstupové vzdálenosti. V rámci této kapitoly je dána větší váha výsledkům požární zkoušky přístřešku, ve které se naplno projevil vliv střešního pláště na rozvoj a šíření požáru. Podrobnější vysvětlení uvedeny v samostatných podkapitolách.

6.2.1 Velikost požárně otevřené plochy

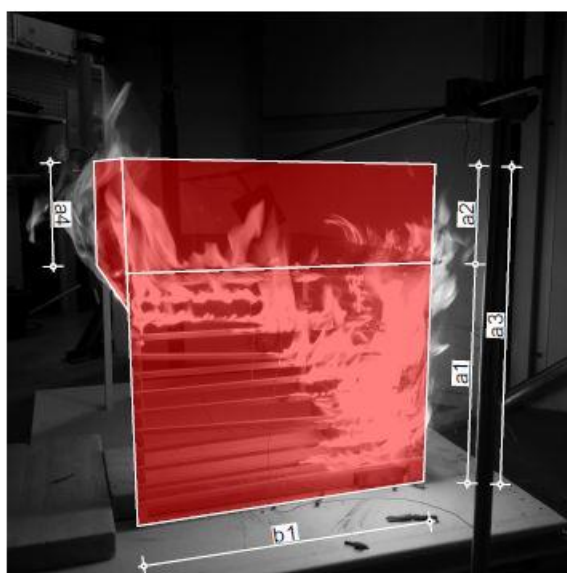
Vliv střešního pláště na způsob a rychlost šíření požáru se dá v tomto případě označit za zásadní. Střešní plášť usměrnil tok hořlavých plynů a samotných plamenů před i nad konstrukci střešního pláště a výška plamenů tak byla zcela odlišná od požáru pergoly. Oproti pergole se zde hlavně plameny nad rovinou střechy vyskytovaly téměř celou dobu požárního experimentu. Výška plamenů byla ovlivněna hořlavým střešním pláštěm a vodorovným laťováním. Umístění hořáku by zde takový vliv nemělo, jelikož by se stejně požár rozšířil na celou konstrukci přístřešku. Důležitým zjištěním bylo, že plameny vyšlehávaly nad konstrukci střešního pláště v celé ploše konstrukce, tedy i u stran bez dřevěného laťování. Ze získaných poznatků mohou k výšce požárně otevřené plochy uvést následující:

- Vyšlehávání plamenů zde probíhalo po celou dobu experimentu, tudíž by se výška plamenů měla zohlednit v celkové výšce požárně otevřené plochy s ohledem na konstrukční provedení.
- Umístěním zdroje hoření do středu konstrukce by docházelo k šíření požáru pouze za pomoci střešního pláště. Pokud by obvodové konstrukce byly bez vodorovného laťování, výška požárně otevřené plochy by zde byla tvořena pouze výškou plamenů.

Šířka požárně otevřené plochy je stejně jako u pergoly dána jejím konstrukčním provedením, ale z hlediska bezpečnosti je nejlepší uvažovat s celou délkou posuzované strany. Konstrukčním

provedením se myslí např. použití vodorovné laťování, které rozšíří požár na celou plochu jedné ze stran přístřešku. Z výše uvedených informací mohu konstatovat následující:

- Šířka požárně otevřené plochy přístřešku je uvažována v celé šířce stěny (Obr. 37) se stejnou hodnotou tepelného toku ve všech požárně otevřených plochách. Takto určená velikost požárně otevřené plochy je na straně bezpečnosti.



- a1 - výška konstrukce
- a2 - výška plamenů
- a3 - celá výška požárně otevřené plochy na straně s vodorovným laťováním
- a4 - výška požárně otevřené plochy na straně bez vodorovného laťování
- b1 - šířka požárně otevřené plochy

Obr. 37: Schéma rozdělení požárně otevřené plochy

6.2.2 Shrnutí pro model přístřešku

Ačkoliv výše uvedené informace predikují, aby se objekt přístřešku posuzoval z hlediska odstupových vzdáleností jako volný sklad, není to zcela pravda. Při výpočtu odstupových vzdáleností od volných skladů se musí objekt zařadit z hlediska hustoty tepelného toku. Tomuto zařazení je normově daná hodnota ekvivalentní doby trvání požáru. Tyto hodnoty ovšem absolutně nezohledňují míru požárního rizika, a proto je lepší tuto hodnotu stanovit přímo výpočtem. Oproti pergole je přístřešek daleko větším nebezpečím z hlediska rozsahu a šíření požáru. Co nelze opomenout je i část požární zkoušky, kdy došlo k pádu konstrukce a rozhoření všech ostatních částí. Tato fáze požáru je lépe přirovnatelná k definici volného skladu a z hlediska odstupových vzdáleností tvoří tato fáze požáru nejvyšší riziko. Tato fáze požáru ovšem nastává až v době, kdy ve většině případů už probíhá zásah jednotek požární ochrany. Závěrečné shrnutí je následující:

- Výška a šířka požárně otevřené plochy by měla odpovídat konstrukčnímu provedení obvodových stran přístřešku. Pokud ovšem budeme uvažovat vždy celou výšku i s výškou plamenů a celou délku objektu, bude toto řešení vždy na straně bezpečnosti.
- Pod střešním pláštěm a uvnitř přístřešku budou teploty vyšší než u pergoly hlavně díky kumulaci hořlavých plynů pod střešním pláštěm. V úrovni obvodových stěn se teplota vyšší než je 680 °C bude vyskytovat pouze zřídka. Vyšší teploty se dají očekávat pouze v místě, kde v rovině obvodové stěny vyšlehávají plameny. Pro výpočet odstupových vzdáleností je tedy vhodné použít křivku vnějšího požáru.
- Nosná konstrukce přístřešku oproti pergole přispívá k výkonu požáru hlavně díky hořlavému střešnímu plášti. Přístřešek tedy tvoří z hlediska požární bezpečnosti daleko větší riziko.

6.3 Celkový závěr

Pergola a přístřešek jsou dvě rozdílné konstrukce a je třeba na ně takto nahlížet i z hlediska požární bezpečnosti. Součástí diplomové práce jsou matematické *CFD* modely požáru pergoly a přístřešku i požární experimenty pergoly a přístřešku, které potvrdily výše uvedená fakta. Z hlediska určování odstupových vzdáleností by se mělo vycházet z možných požárních rizik, které tyto konstrukce představují. Konstrukce pergol z hlediska požárního rizika nepředstavují velké požární riziko, jelikož u nich nedochází k šíření požáru nebo kumulaci hořlavých plynů, které následně mohou vyšlehávat a šířit požár na ostatní části konstrukce. Z hlediska míry bezpečnosti je lepší uvažovat jako velikost požárně otevřených ploch těchto objektů celou obvodovou stěnu, což způsobí nárůst odstupových vzdáleností, ale hlavně jistotu, že v případě požáru nedojde k šíření sálavou složkou tepla. Přístřešky představují větší požární riziko jednak z důvodu uskladňování materiálu a hlavně z důvodu, že při požáru dochází rozšíření požáru na celou konstrukci.

Velikost požárně otevřených ploch je dle provedených požárních experimentů značně závislá na konstrukčním provedení obvodových stěn objektů. S tímto provedením je spojená i následná výška plamenů při požáru, která dle zjištěných poznatků nemá u pergoly zásadní vliv na velikost požárně otevřených ploch na rozdíl od přístřešku, kde plameny vyšlehávaly nad střešní plášť po celou dobu experimentu. Z hlediska odstupových vzdáleností teda přístřešky představují větší nebezpečí a to hlavně v případech, kdy se nacházejí na hranici parcel a mohou tak ohrožovat objekty na parcelách sousedních.

6.4 Náměty pro další práci

Náměty pro další práci vidím především v podrobnější práci s *CFD* simulacemi. V rámci diplomové práce bylo vytvořeno několik simulací, avšak pro získání relevantnějších výsledků by bylo lepší vytvořit těchto simulací více. *CFD* simulace provedené v rámci diplomové práce byly také omezeny velikostí výpočetních buněk, a to hlavně kvůli úspoře času při následném výpočtu. Vytvořením jemnějších sítí v oblastech kolem dřevěných prvků by bylo dosaženo rychlejšího šíření požáru a získané numerické výsledky by poté více odpovídaly získaným experimentálním datům.

S matematickými *CFD* simulacemi souvisí i požárnětechnické charakteristiky. Pro diplomovou práci byly použity hodnoty *HRR*, které byly získány ze zkoušky v kónickém kalorimetru, kde byly zkoušeny plošné vzorky ve vodorovné poloze. Použitím těchto hodnot na konstrukci pergoly a přístřešku ovšem není zcela správné, protože hodnoty *HRR* byly aplikovány především na tyčové prvky, které byly orientovány svisle i vodorovně. Ze svých zkušeností vím, že totožný dřevěný vzorek hoří naprosto odlišně v závislosti na jeho orientaci v prostoru. Z toho důvodu by bylo lepší využít dvě hodnoty *HRR*, a to hodnoty získané ze zkoušení ve vodorovné poloze a svislé poloze.

Diplomová práce se v praktické části zabývala pouze staticky nezávislými objekty. Pokud by byly konstrukce pergol a přístřešků staticky závislé na sousedních objektech, představovaly by z hlediska posuzování odlišné požární riziko, viz kapitolu 2.1.3. V případě dispozičního umístění pergol a přístřešků před otvory v obvodových stěnách objektů, by hlavní nebezpečí v případě požáru představovalo šíření požáru z interiéru objektu na konstrukci pergoly nebo přístřešku. Námětem další práce by mohlo být stanovení výše požárního rizika a velikosti odstupových vzdáleností od staticky závislých objektů.

Seznam obrázků

Obr. 1: Vzájemné odstupy staveb	4
Obr. 2: Pergola.....	5
Obr. 3: Přístřešek	6
Obr. 4: Znázornění umístění pergol a přístřešků: a) samostatně stojící pergola; b) samostatně stojící přístřešek; c) pergola stojící u objektu; d) přístřešek stojící u objektu	7
Obr. 5: Porovnání odstupových vzdáleností	8
Obr. 6: Odstupová vzdálenost vymezená dopadem hořících částí DP3	9
Obr. 7: Znázornění požárního zatížení u přístřešku.....	14
Obr. 8: Konstrukční systémy vztažené na konstrukce pergol: a) nehořlavý z konstrukčních částí DP1; b) smíšený, kde svislé konstrukce jsou druhu DP1 a vodorovné druhu DP3; c) hořlavý z konstrukčních částí DP3	16
Obr. 9: Znázornění požárně otevřených a uzavřených ploch	17
Obr. 10: Polohový faktor: a) Popis sálavé plochy pro výpočet polohového faktoru; b) Sálavá plocha a ozařovaná plocha	20
Obr. 11: Zvolená výpočetní oblast pro pergolu	30
Obr. 12: Zkouška omezené výpočetní oblasti: a) ukázka omezené výpočetní oblasti; b) šíření požáru pod střešním pláštěm omezeným výpočetní sítí; c) ukázka rozšířené výpočetní oblasti..	30
Obr. 13: Rozvoj požáru pergoly v čase: a) 100 s; b) 465 s; c) 900 s	32
Obr. 14: Směr šíření plamenů ve vertikální rovině: a) v teplotním poli; b) ve směrových vektorech.....	33
Obr. 15: Rozmístění termočlánků	34
Obr. 16: Rozvoj požáru v CFD simulaci přístřešku v čase: a) 60 s; b) 240 s; c) 800 s	35
Obr. 17: Směr šíření plamenů ve vertikální rovině: a) ve směrových vektorech; b) v teplotním poli řez 1; c) v teplotním poli řez 2; d) v teplotním poli řez 3	36
Obr. 18: Rozmístění termočlánků	37
Obr. 19: Pracovní výkres modelů; legenda: 1 = sloup, 2 = vaznice, 3 = krokev, 4 = latě, 5 = střešní plášť	40
Obr. 20: Schéma zkušebního zařízení (dostupné z: https://www.sp.se).....	42
Obr. 21: Vizuální srovnání výkonu hořáku 100x300 mm: a) 5 kW; b) 10 kW; c) 15 kW; d) 30 kW	43
Obr. 22: Řez plynovým hořákem.....	44
Obr. 23: Schéma umístění měřících zařízení	46
Obr. 24: Ochrana přívodní plynové hadice.....	46

Obr. 25: Maximální rozvoj požáru pergoly v 215. sekundě	47
Obr. 26: Pohled na zkoušený model pergoly: a) před experimentem; b) po experimentu	48
Obr. 27: Rozvoj požáru na konstrukci přístřešku: a) před zřícením; b) po zřícení.....	49
Obr. 28: Vyznačené místa, ve kterých došlo ke kolapsu	50
Obr. 29: Pohled na zkoušený model přístřešku: a) před experimentem; b) po experimentu.....	59
Obr. 30: Chování plamenů v místě střešní konstrukce: a) u pergoly; b) u přístřešku	61
Obr. 31: Chování požáru v závislosti na střešním pláště: a) šíření požáru pod střešním pláštěm; b) vyšlehávání plamenů zpoza střešního pláště.....	63
Obr. 32: Srovnání výšky plamenů u pergoly: a) CFD simulace; b) požární experiment	66
Obr. 33: Srovnání výšky plamenů u přístřešku: a) CFD simulace; b) požární experiment.....	69
Obr. 34: Šíření plamenů pod střešním pláštěm: a) CFD simulace; b) požární experiment	69
Obr. 35: Schéma rozdělení požárně otevřené plochy	74
Obr. 36: Porovnání odstupových vzdáleností při změně výšky (resp. orientace požárně otevřené plochy)	75
Obr. 37: Schéma rozdělení požárně otevřené plochy	77
Obr. 38: Schéma místa požáru.....	86
Obr. 39: Fotografie místa požáru: a) zadní strana přístřešku; b) boční strana přístřešku	87

Seznam tabulek

Tab. 1: Popis měřicích zařízení zapojených do ústředny.....	45
Tab. 2: Časová posloupnost experimentu 1 (pergola)	46
Tab. 3: Časová posloupnost experimentu 2 (přístřešek).....	48
Tab. 4: Srovnání maximálních hodnot obou experimentů.....	64

Seznam grafů

Graf 1: Srovnání nominálních teplotních křivek	21
Graf 2: Srovnání hodnot uvolněného tepla v závislosti na použitém příkazu	26
Graf 3: Rychlost uvolňování tepla pro oba typy použitého materiálu	28
Graf 4: Rychlost uvolňování tepla z CFD simulace pergoly	33
Graf 5: Průběh teplot z CFD simulace pergoly.....	34
Graf 6: Rychlost uvolňování tepla z CFD simulace přístřešku	36

Graf 7: Průběh teplot z CFD simulace přístřešku	37
Graf 8: Srovnání hodnot HRR pro pergolu.....	52
Graf 9: Srovnání hodnot HRR pro přístřešek	53
Graf 10: Rychlost uvolňování tepla u modelu pergoly	55
Graf 11: Úbytek motnosti pergoly v závislosti na čase	55
Graf 12: Průběh teplot u modelu pergoly	56
Graf 13: Průběh hustoty tepelného toku u pergoly	57
Graf 14: Rychlost uvolňování tepla u modelu přístřešku	58
Graf 15: Úbytek hmotnosti přístřešku v závislosti na čase.....	58
Graf 16: Průběh teplot u modelu přístřešku.....	60
Graf 17: Průběh hustoty tepelného toku u přístřešku	60
Graf 18: Porovnání rychlostí uvolněného tepla pro pergolu.....	67
Graf 19: Porovnání průběhů teplot pro pergolu.....	68
Graf 20: Porovnání rychlostí uvolněného tepla pro přístřešek	70
Graf 21: Porovnání průběhů teplot pro přístřešek	71

Seznam vztahů

Vztah 1: Stanovení odstupové vzdálenosti od střešního pláště	9
Vztah 2: Stanovení procenta požárně otevřených ploch.....	17
Vztah 3: Výpočet intenzity sálání	18
Vztah 4: Rovnice teplotní křivky ISO 834	19
Vztah 5: Celková hodnota polohového faktoru	20
Vztah 6: Výpočet dílčího polohového faktoru.....	20
Vztah 7: Rovnice teplotní křivky vnějšího požáru	21
Vztah 8: Stanovení hodnoty celkového množství uvolněného tepla	26
Vztah 9: Čas potřebný ke spálení vzorku	26
Vztah 10: Efektivní výhřevnost pro pergolu.....	52
Vztah 11: Efektivní výhřevnost pro přístřešek	52

Literatura

1. Vyhláška č. 501/2006 Sb. *Vyhláška o obecných požadavcích na využívání území*. 2006.
2. Zákon č. 183/2006 Sb. *Zákon u územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon)*. 2006.
3. SYROVÝ, BOHUSLAV. *Architektura – naučný slovník*. Praha : SNTL, 1961.
4. ČSN 73 0804. *Požární bezpečnost staveb – Výrobní objekty*. Praha : ÚNMZ, 2010 + Z1:2013 + Z2:2015.
5. KUTINOVÁ, Blanka. *Technický naučný slovník*. Praha : SNTL, 1983.
6. REICHEL, Vladimír. *Navrhování požární bezpečnosti staveb: díl II*. Edice Zabraňujeme škodám : Česká státní pojišťovna, 1979.
7. ČSN 73 0802. *Požární bezpečnost staveb – Nevýrobní objekty*. Praha : ÚNMZ, 2009 + Z1:2013 + Z2:2015.
8. PELC, František. *Požární bezpečnost staveb. ČSN 73 0802:2009 - komentář k článku 8.15.4*. [Online] <https://www.pelcfrantisek.cz/csn02/02komrx8154a.php>.
9. PELC, František. *Požární bezpečnost staveb. Výpočet odstupových vzdáleností pro kritickou hustotu tepelného toku 18.5 kW/m²*. [Online] <http://www.pelcfrantisek.cz/vyp/odstup18-kon.php>.
10. PELC, František. *Požární bezpečnost staveb. ČSN 73 0804:2010 - komentář k článku I 3.1*. [Online] <https://www.pelcfrantisek.cz/csn04/04komrxI31.php>.
11. WALD, František. *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha : Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03157-8.
12. PELC, František. *Požární bezpečnost staveb. ČSN 73 0802:2009 - komentář k článku 10.3.2*. [Online] <https://www.pelcfrantisek.cz/csn02/02komrx1032.php>.
13. WALD, František, a další, a další. *Modelování dynamiky požáru v budovách*. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.
14. NIST. National Institute of Standards and Technology. [Online] <https://www.nist.gov/>.
15. McGrattan, K., a další, a další. *Fire Dynamic Simulator User's Guide, NIST Special Publication 1019*. Gaithersburg, Maryland, USA : National Institute for Standards and Technology, 2016.
16. POKORNÝ, Marek. *Požární laboratoř*. [Online] <http://www.uceeb.cz/pozarni-laborator>.
17. FLEISCHMANN, Charles. The Society of Fire Protection Engineers. *Evaluating the Fire Threat from Upholstered Furniture*. [Online] http://www.sfpe.org/?page=FPE_ET_Issue_39&hhSearchTerms=%22chair+and+fire+and+fleischmann%22.
18. ČSN 73 0824. *Požární bezpečnost staveb – Výhřevnost hořlavých látek*. Praha : Federální úřad pro normalizaci a měření, 1992.

-
19. ŠEVČÍK, Libor, HEJTMÁNEK, Petr, NAJMANOVÁ, Hana. Rychlost uvolňování tepla jako parametr pro hodnocení chování materiálů při požáru. *iMateriály*. [online] https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/rychlost-uvolnovani-tepla-jako-parametr-pro-hodnoceni-chovani-materialu-pri-pozaru_42776.html.
20. Hasičský záchranný sbor Zlínského kraje. *Odborné vyjádření k požáru*. 2017

Příloha 1 – Analýza skutečného požáru přístřešku pro osobní automobil

V rámci diplomové práce jsem si od Hasičského záchranného sboru Zlínského kraje vyžádal informace¹² z oblasti vyšetřování požárů k objektům pergol a přístřešků. Jelikož místně příslušný hasičský záchranný sbor neměl tak rozsáhlou databázi jako větší okresy, byl vybrán pro tuto analýzu jeden požár přístřešku pro jeden osobní automobil v obci Velké Karlovice v okrese Vsetín. Tato analýza umožňuje nahlédnout, jak se postupuje při vyšetřování příčin požáru, důsledku požáru u přístřešku pro automobily a následné škody na samotném přístřešku a v okolí přístřešku.

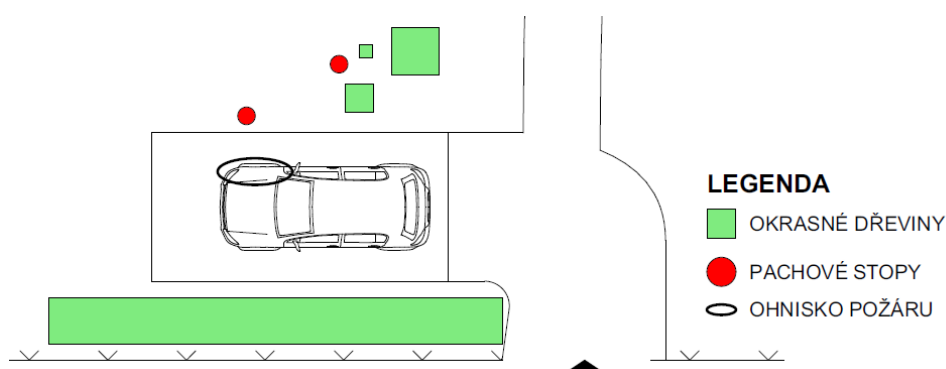
Požár vznikl dne 24. 5. 2017 v nočních hodinách na osobním automobilu, který byl umístěn pod dřevěným přístřeškem. Přístřešek se nacházel hned za vjezdovou branou na pozemek v těsné návaznosti na živý plot z okrasných dřevin (tují). Půdorysné rozměry přístřešku byly 6 x 3 m se světlou výškou cca 2 m. Nosná konstrukce přístřešku byla tvořena masivními dřevěnými hranoly, které byly ukotveny do ocelových patek. Střešní plášť byl tvořen pultovou střechou sestávající se ze záklopu z prken, na kterém byly umístěny plechové trapézové šablony. Záklop byl proveden na masivních dřevěných krokách. Zavětrováno objektu bylo provedeno ve všech rozích objektu dřevěnými pásky. Jelikož se jednalo z hlediska článku I.3.1 ČSN 73 0804 o přístřešek, tak měl objekt všechny strany otevřené bez jakéhokoliv opláštění či výplně. V přístřešku nebyla zavedena elektrická instalace.

V den požáru bylo s vozidlem manipulováno ve smyslu krátké jízdy (cca 2 kilometry). Během jízdy majitel vozidla nepozoroval žádnou poruchu. Požár byl zpozorován v 01:42 hodin a majitel bezprostředně ohlásil požár na tísňovou linku. Na místo byly vyslány dvě jednotky dobrovolných hasičů obcí Velké Karlovice a Karolinka a dále jedna profesionální jednotka HZS Zlínského kraje ze stanice Vsetín. Zásah byl zahájen v 01:58 hodin vodním proudem a následně těžkou pěnou, kterou se požár definitivně uhasil.

Nejvíce požár poškodil osobní automobil, který byl zaparkovaný přímo pod přístřeškem. Automobil byl kompletně zasažen účinky požáru hlavně z důvodu vysokého obsahu hořlavých látek (více viz kapitolu 2.2.2). Kromě kompletního vyhoření interiéru vozidla došlo také k degradaci motoru. Pneumatiky byly ohořelé jen z části. Díky masivní konstrukci přístřešku

¹² Analýza je zpracována na základě odborného vyjádření k požáru, které mi poskytl Hasičský záchranný sbor Zlínského kraje - Územní odbor Vsetín se sídlem ve Valašském Meziříčí [17].

nedošlo k závažnému narušení nosných dřevěných sloupů (sloupy byly vystaveny účinkům požáru ze tří stran, vnější strana zůstala neporušená). Krov objektu byl požárem zasažen v celém rozsahu, kde z důvodu mírného sklonu záklopu došlo k rozšíření požáru na celou konstrukci střechy¹³. Větší degradace dřevěného záklopu byla patrna hlavně v místě automobilu, kde došlo i k degradaci plechové střešní krytiny. Jelikož byly v těsné blízkosti přístřešku vysázeny túje, došlo k přenesení požáru na tyto okrasné dřeviny. I když nebyly túje viditelně vyschlé, tak došlo k jejich vyhoření. Dalšímu šíření požáru na přilehlé dřeviny zabránilo včasné zpozorování požáru a příjezd jednotek požární ochrany. Vlivem sálavé tepelné složky požáru došlo k zasažení trávníku v rozsahu 5 m od obvodové konstrukce přístřešku¹⁴.



Obr. 38: Schéma místa požáru

Ohnisko požáru (Obr. 38) bylo dle svědecké výpovědi v přední části vozidla na jeho pravé straně. V tomto místě došlo k největší degradaci jak automobilu, tak konstrukce přístřešku a okolního trávního porostu. Iniciátor požáru nebyl konkrétně stanoven ani po vyšetření a ohledání místa specialisty z oblasti kriminalistické techniky a expertizy. Jako možný iniciátor požáru byla zvolena technická závada na automobilu nebo úmyslné zapálení. Pro identifikaci iniciátoru byli nasazeni speciálně vycvičení psi s psovody, ale i tento krok skončil bez pozitivního výsledku. Psi označili dvě místa (pachové stopy), ze kterých byly odebrány vzorky půdy. Po analýze jednotlivých vzorků byla zjištěna přítomnost benzínu, což mohlo být způsobeno únikem paliva ze sekačky na trávu nebo ze samotného automobilu. Místo odebraných vzorků bylo bohužel taky zasaženo požárem, a to sálavou složkou požáru, tudíž i pachové stopy byly částečně znehodnoceny. Nejpravděpodobnější příčina požáru byla poškozená nádrž automobilu. Výše uvedeným šetřením úmyslného zapálení automobilu nebyla tato verze vyloučena.

¹³ Vliv střešního pláště na šíření požáru byl pozorován i při požárním experimentu přístřešku.

¹⁴ Zde je vidět vliv sálavé složky požáru na okolí přístřešku. Jelikož se v blízkosti přístřešku nenacházel žádný objekt, nemohlo dojít k rozšíření požáru.

Druhou možností byla technická závada na automobilu. Automobil byl starý 6 let. Tři týdny před požárem u něho byla provedena kompletní prohlídka v rámci státní technické kontroly. Ve dne, kdy došlo k požáru, absolvoval automobil krátkou trasu, jak již bylo zmíněno výše. Vozidlo bylo dle majitele v pořádku. Jako možný iniciátor byly zvoleny elektrické rozvody (vznik elektrického zkratu s elektrickým obloukem) od akumulátoru vozidla, jelikož se akumulátor nacházel v části automobilu, ve které byl majitelem zpozorován požár. Vznik elektrického zkratu mohl proběhnout kvůli opotřebení izolační vrstvy použitých vodičů a následným spojením vodičů s rozdílným potenciálem. K porušení izolační vrstvy dochází vlivem stárí, proříznutím o ostré předměty nebo zalomením vodičů. Při vyšetřování bylo zjištěno, že se v konkrétním místě vyskytuje veliké množství lasicovitých šelem. Sama majitelka vozu uvedla, že na kapotě vozu mnohokrát našla stopy kun. Přítomnost těchto zvířat potvrdila i svědecká výpověď sousedů. Kvůli silné degradaci všech komponentů nebylo možné tuto teorii potvrdit ani vyloučit tuto teorii. Na základě provedeného šetření nebyla tedy tato verze vyloučena. Závěrem vyšetřování tedy byly obě dvě verze, a to cizí zavinění nebo technická závada.

Rozsah požáru nebyl z důvodu včasného příjezdu jednotek požární ochrany značný, avšak došlo k nezvratnému poškození jak automobilu, tak i přístřešku. Celková plocha požáru byla při příjezdu jednotky požární ochrany cca 20 m². Sám majitel se nesnažil požár nijak uhasit. V okolí přístřešku došlo k šíření požáru po okrasných dřevinách. Jelikož nebylo období sucha, ani tyto dřeviny nebyly nikterak vyschlé, nedošlo k rychlému šíření, a tak se požár nerozšířil na další dřeviny v blízkosti požáru. V těsné blízkosti přístřešku se nenacházela žádná stavba, která by mohla být zasažena požárem, a z důvodu dostatečných odstupových vzdáleností nemohlo dojít k dalšímu šíření požáru. Došlo tedy pouze k poničení vlastní konstrukce přístřešku, osobního automobilu, okolních dřevin a travního porostu.



a)



b)

Obr. 39: Fotografie místa požáru: a) zadní strana přístřešku; b) boční strana přístřešku

Příloha 2 – Výroba modelů

Fotodokumentace výroby modelů pergoly a přístřešku, které byly následně podrobeny požárnímu experimentu. Fotografie a k nim uvedený popis jsou seřazeny podle po sobě jdoucích kroků výroby.

Fotografie

Popis



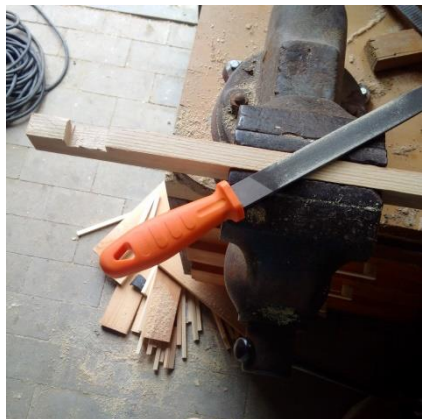
- nejprve došlo k nařezání jednotlivých prken, které měly průřez 30/100 mm a délku 900 mm
- nařezané latě měly průřez 20/20 a 20/30 a dle výkresu tvoří hlavní nosné prvky obou modelů
- prvky s průřezem 10/10 mm, které tvoří vodorovné laťování, byly nařezány ze zbytků



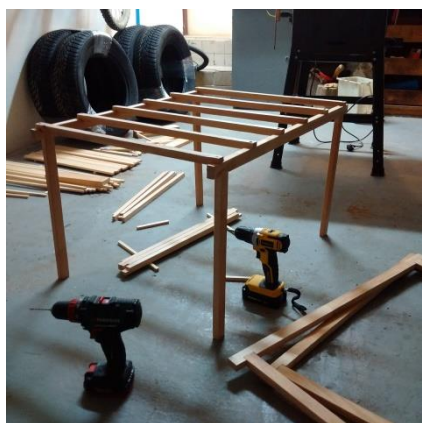
- do vodorovných prvků (vaznic) se vytvořily zářezy, které měly sloužit pro uložení svislých sloupů a zajistit tak větší tuhost stoje vaznice se sloupem
- další zářezy byly vytvořeny i na krokách, aby jejich osazením na vaznice došlo ke ztužení modelu
- zářezy byly vytvořeny pomocí okružní pily s přednastavenou výškou řezu



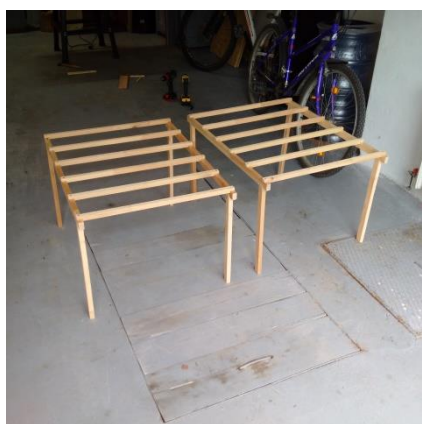
- zářezy se vytvořili na obou koncích vaznic a dále na obou koncích všech kroků



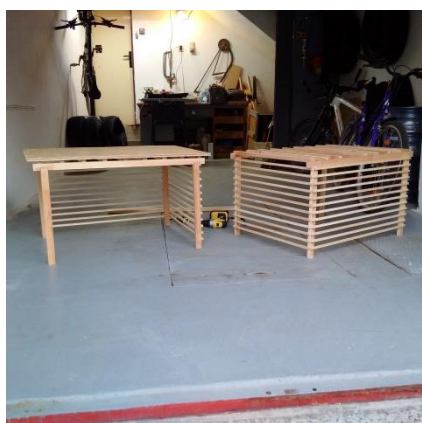
- *každý jednotlivý prvek byl pečlivě obroušen, aby byly odstraněny povrchové „chloupky“, které by měly vliv na šíření požáru*
- *nejprve se na hrubo prvky opracovaly rašplí a následně se ruční brusku opracovaly do hladka*



- *po obroušení všech prvků se model sestavil podle výkresové dokumentace*
- *sloupy se osadily do zářezů ve vaznicích a spoj se sešrouboval ocelovým vrutem*
- *na vaznice se následně připevnily krokve, které měly na koncích taky zářezy pro osazení, spoje se sešroubovaly ocelovými vruty*



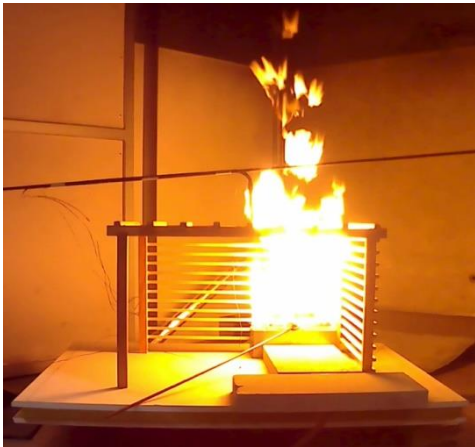
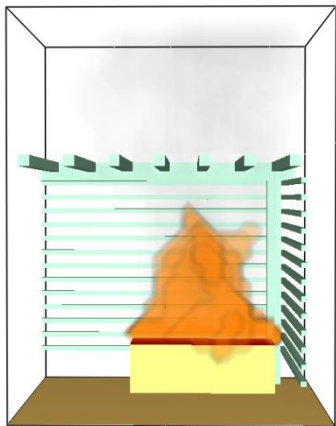
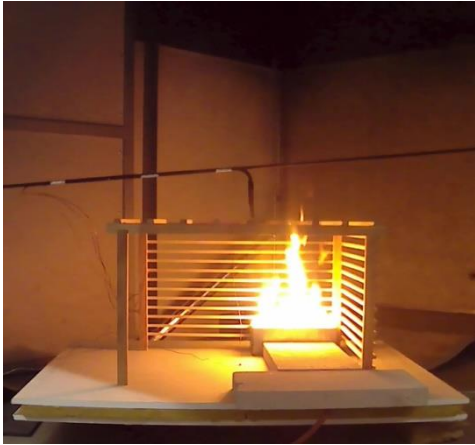
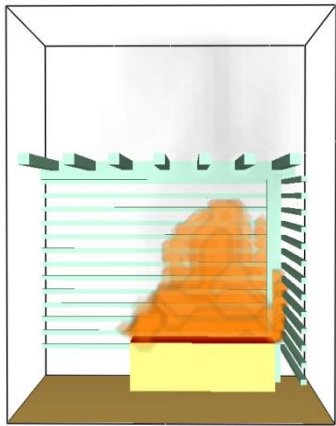

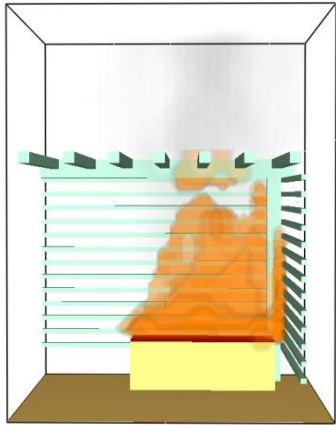
- *vytvořily se nosné skelety obou konstrukcí (pergola a přístřešek), na kterých ještě došlo k úpravě osové vzdálenosti krokví, kdy byla na každou konstrukci přidána jedna krokev navíc*



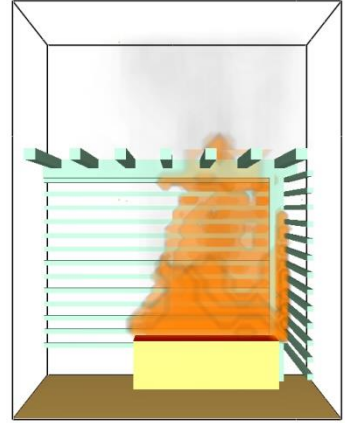
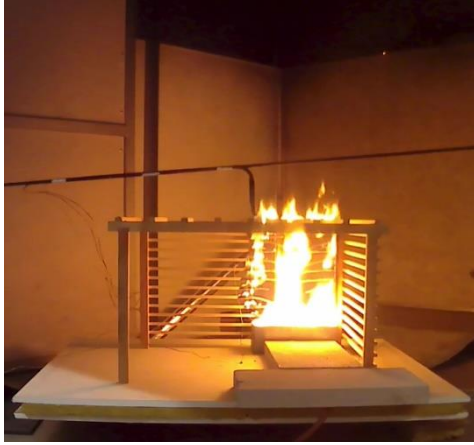
- *v poslední řadě se na sloupy ze dvou stran připevnily vodorovné laťky u obou modelů pomocí ocelových vrutů*
- *u přístřešku se v posledním kroku z vrchní strany připevnila OSB deska pomocí ocelových vrutů v místě krokví*

Příloha 3 – Porovnání sekvenčních snímků požáru pergoly

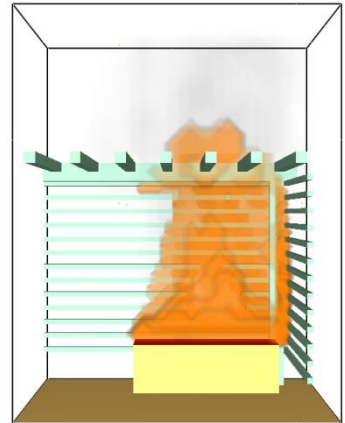
Porovnání sekvenčních snímků z průběhu požární zkoušky a matematické *CFD* simulace. Srovnány budou snímky vytvořené z videozáznamu a vizualizační snímky pořízené v post-procesoru Smokeview. Následující srovnání se týká konstrukce pergoly. Snímky budou porovnány od počátku do konce experimentu a simulace v časovém kroku 2 minut.

<i>čas [min]</i>	<i>snímek z videozáznamu</i>	<i>snímek ze Smokeview</i>
0		
2		
4		

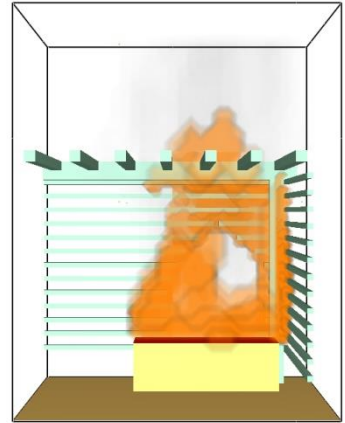
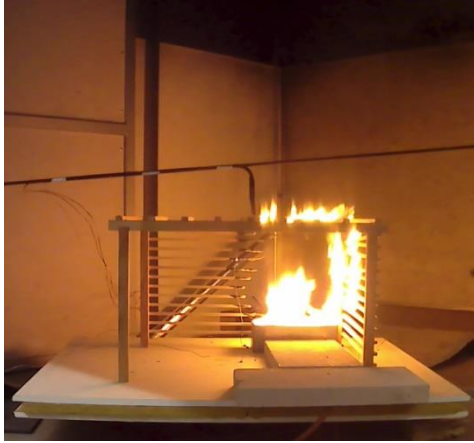
6



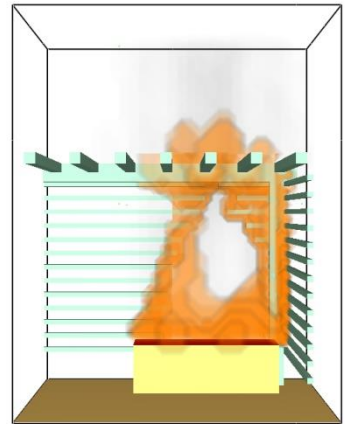
8



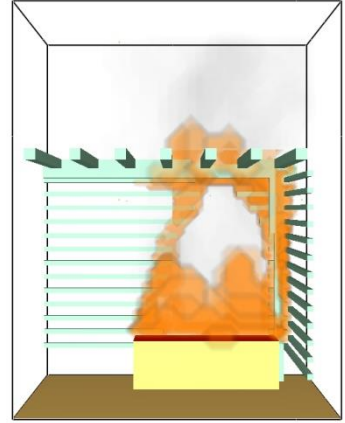
10



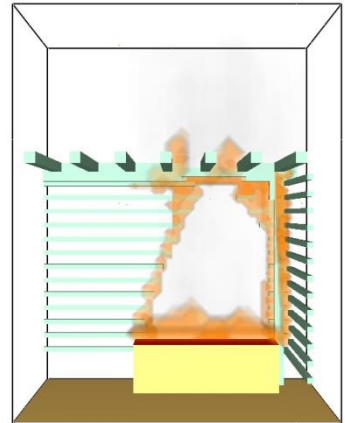
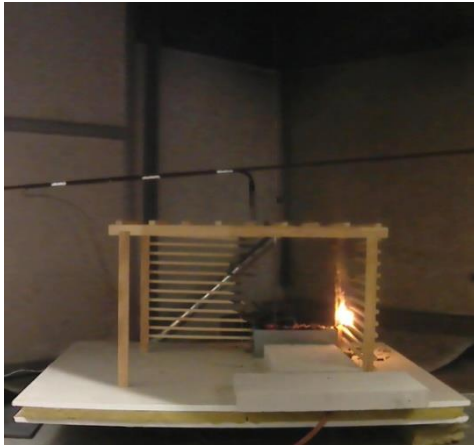
12



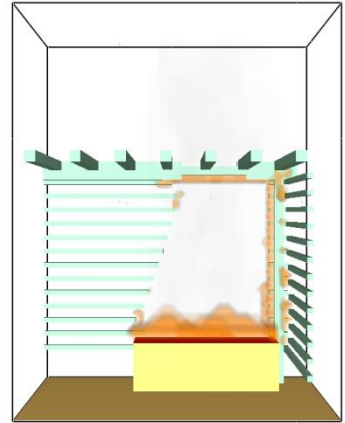
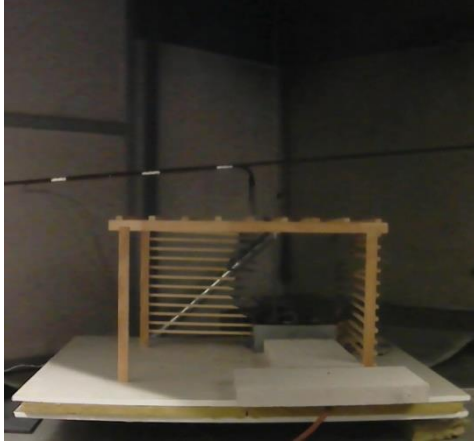
14



16


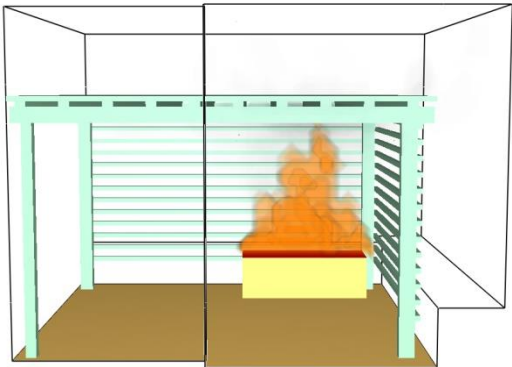
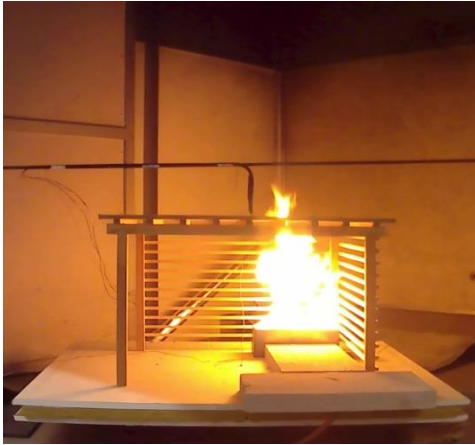
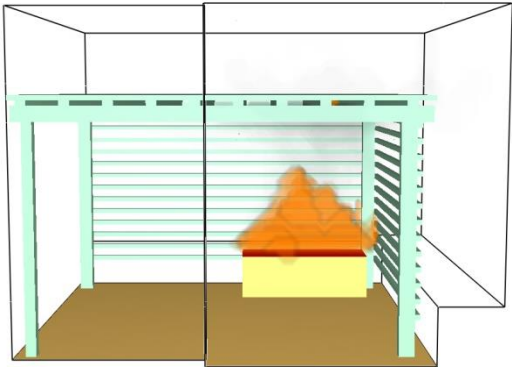
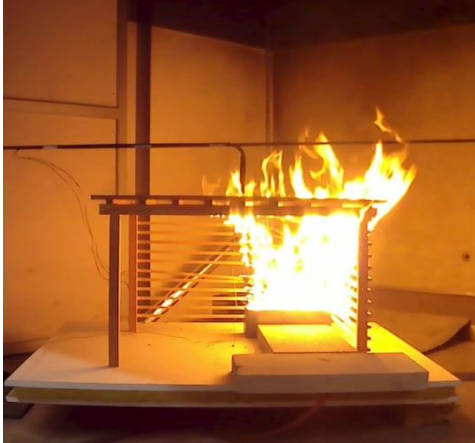
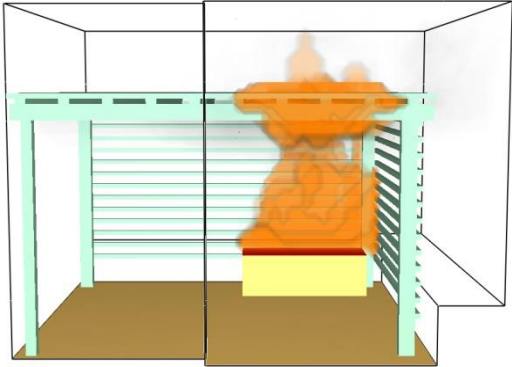


19

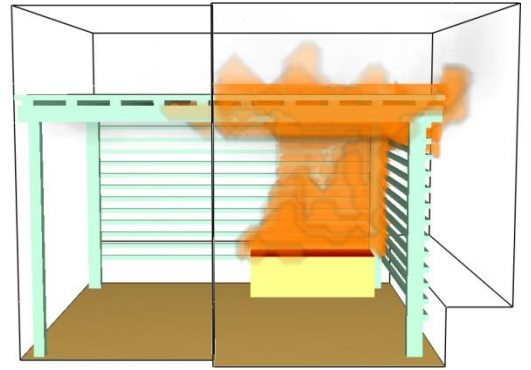
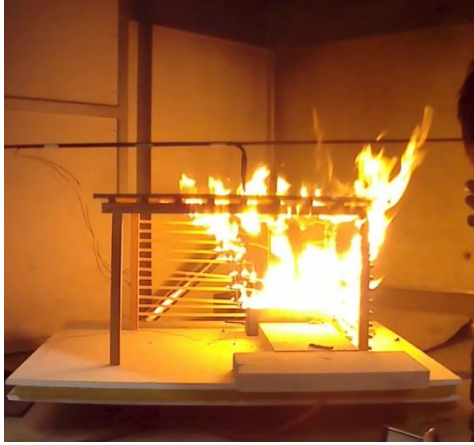


Příloha 4 – Porovnání sekvenčních snímků požáru přístřešku

Porovnání sekvenčních snímků z průběhu požární zkoušky a matematické *CFD* simulace. Srovnány budou snímky vytvořené z videozáznamu a vizualizační snímky pořízené v post-procesoru Smokeview. Následující srovnání se týká konstrukce přístřešku. Snímky budou porovnány od počátku do konce experimentu a simulace v časovém kroku 2 minut.

<i>čas [min]</i>	<i>snímek z videozáznamu</i>	<i>snímek ze Smokeview</i>
0		
2		
4		

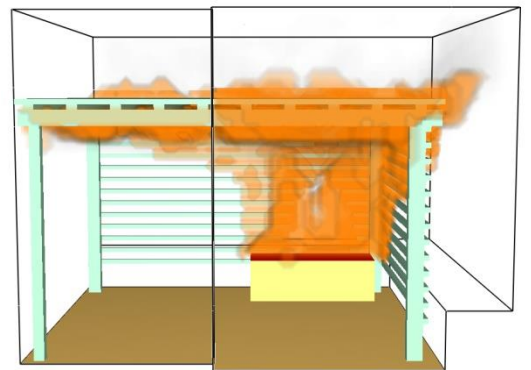
6



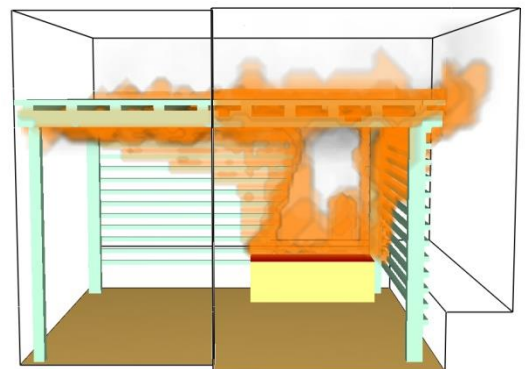
8



10



12



Příloha 5 – Zdrojové kódy matematických modelů

Zdrojový kód matematického modelu pergoly

pergola_02.fds

Generated by PyroSim - Version 2017.1.0209

14.12.2017 14:36:47

```
&HEAD CHID='pergola_02'/
&TIME T_END=1200.0/
&DUMP RENDER_FILE='pergola_02.ge1', DT_RESTART=300.0/
&MESH ID='1', IJK=25,20,25, XB=0.25,0.75,0.18,0.58,0.0,0.5/
&MESH ID='2_a', IJK=30,8,50, XB=0.53,0.83,0.58,0.66,0.0,0.5/
&MESH ID='2_b', IJK=28,8,50, XB=0.25,0.53,0.58,0.66,0.0,0.5/
&MESH ID='3_a', IJK=8,20,50, XB=0.75,0.83,0.38,0.58,0.0,0.5/
&MESH ID='3_b', IJK=8,20,50, XB=0.75,0.83,0.18,0.38,0.0,0.5/
&MESH ID='4', IJK=29,24,12, XB=0.25,0.83,0.18,0.66,0.5,0.74/
&REAC ID='DREVO',
    FUEL='REAC_FUEL',
    C=6.3,
    H=7.1,
    O=2.1,
    SOOT_YIELD=0.008/
&PROP ID='TC1 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/
&PROP ID='TC2 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/
&PROP ID='TC3 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/
&PROP ID='TC4 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/
&PROP ID='TC5 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/
&DEVC ID='TC1', PROP_ID='TC1 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.61,0.53,0.4/
&DEVC ID='TC2', PROP_ID='TC2 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.78,0.34,0.39/
&DEVC ID='TC3', PROP_ID='TC3 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.43,0.32,0.39/
&DEVC ID='TC4', PROP_ID='TC4 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.43,0.61,0.39/
&DEVC ID='TC5', PROP_ID='TC5 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.43,0.32,0.69/
&MATL ID='BOROVICE',
    SPECIFIC_HEAT=2.5,
    CONDUCTIVITY=0.15,
    DENSITY=490.0,
    HEAT_OF_COMBUSTION=1.2E4/
&SURF ID='BOROVICE',
    RGB=146.0,202.0,166.0,
    HRRPUA=150.0,
    RAMP_Q='BOROVICE_RAMP_Q',
    IGNITION_TEMPERATURE=300.0,
    BURN_AWAY=.TRUE.,
    BACKING='VOID',
    MATL_ID(1,1)='BOROVICE',
```

```
MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,
THICKNESS(1)=0.005/
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=25.216, F=0.8822/
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=81.582, F=0.4984/
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=164.648, F=0.3888/
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=298.146, F=0.4785/
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=467.244, F=1.0/
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=648.208, F=0.2417/
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=783.189, F=0.167/
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=1085.79, F=0.1595/
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=1302.35, F=0.0798/
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=1800.0, F=0.0698/
&SURF ID='HORAK',
  COLOR='RED',
  HRRPUA=333.0,
  RAMP_Q='HORAK_RAMP_Q'/
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=0.0, F=1.0/
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=899.0, F=1.0/
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=900.0, F=0.2/
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=1200.0, F=0.2/
&OBST ID='vaznice_vrchni', XB=0.0,0.8,0.58,0.6,0.44,0.47, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='vaznice_spodni', XB=0.0,0.8,0.0,0.02,0.44,0.47, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='levy_spodni', XB=0.03,0.06,0.0,0.02,0.0,0.44, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='levy_vrchni', XB=0.03,0.06,0.58,0.6,0.0,0.44, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='pravý_spodni', XB=0.74,0.77,0.0,0.02,0.0,0.44, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='pravý_vrchni', XB=0.74,0.77,0.58,0.6,0.0,0.44, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_10', XB=0.75,0.77,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_9', XB=0.67,0.69,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_8', XB=0.59,0.61,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_7', XB=0.51,0.53,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_6', XB=0.43,0.45,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_5', XB=0.35,0.37,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_4', XB=0.27,0.29,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_3', XB=0.19,0.21,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_2', XB=0.11,0.13,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_1', XB=0.03,0.05,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.43,0.44, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.4,0.41, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.37,0.38, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.34,0.35, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.31,0.32, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.28,0.29, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.25,0.26, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.22,0.23, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.19,0.2, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
```

&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.16,0.17, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.13,0.14, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.1,0.11, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.07,0.08, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.43,0.44, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.4,0.41, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.37,0.38, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.34,0.35, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.31,0.32, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.28,0.29, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.25,0.26, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.22,0.23, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.19,0.2, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.16,0.17, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.13,0.14, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.1,0.11, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.07,0.08, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='horak', XB=0.45,0.75,0.48,0.58,0.0,0.1, SURF_IDS='HORAK','INERT','INERT'/

&VENT ID='Mesh Vent: 1 [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.25,0.25,0.18,0.58,0.0,0.5/

&VENT ID='Mesh Vent: 1 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.25,0.75,0.18,0.18,0.0,0.5/

&VENT ID='Mesh Vent: 1 [ZMIN]', SURF_ID='INERT', XB=0.25,0.75,0.18,0.58,0.0,0.0/

&VENT ID='Mesh Vent: 2_a [XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.83,0.83,0.58,0.66,0.0,0.5/

&VENT ID='Mesh Vent: 2_a [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.53,0.83,0.66,0.66,0.0,0.5/

&VENT ID='Mesh Vent: 2_a [ZMIN]', SURF_ID='INERT', XB=0.53,0.83,0.58,0.66,0.0,0.0/

&VENT ID='Mesh Vent: 2_b [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.25,0.25,0.58,0.66,0.0,0.5/

&VENT ID='Mesh Vent: 2_b [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.25,0.53,0.66,0.66,0.0,0.5/

&VENT ID='Mesh Vent: 2_b [ZMIN]', SURF_ID='INERT', XB=0.25,0.53,0.58,0.66,0.0,0.0/

&VENT ID='Mesh Vent: 3_a [XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.83,0.83,0.38,0.58,0.0,0.5/

&VENT ID='Mesh Vent: 3_a [ZMIN]', SURF_ID='INERT', XB=0.75,0.83,0.38,0.58,0.0,0.0/

&VENT ID='Mesh Vent: 3_b [XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.83,0.83,0.18,0.38,0.0,0.5/

&VENT ID='Mesh Vent: 3_b [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.75,0.83,0.18,0.18,0.0,0.5/

&VENT ID='Mesh Vent: 3_b [ZMIN]', SURF_ID='INERT', XB=0.75,0.83,0.18,0.38,0.0,0.0/

&VENT ID='Mesh Vent: 4 [XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.83,0.83,0.18,0.66,0.5,0.74/

&VENT ID='Mesh Vent: 4 [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.25,0.25,0.18,0.66,0.5,0.74/

&VENT ID='Mesh Vent: 4 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.25,0.83,0.66,0.66,0.5,0.74/

&VENT ID='Mesh Vent: 4 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.25,0.83,0.18,0.18,0.5,0.74/

&VENT ID='Mesh Vent: 4 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.25,0.83,0.18,0.66,0.74,0.74/

&BNDF QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/

&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX'/

&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.61/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBY=0.53/

&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBX=0.66/

&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=0.24/

&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=0.4/

&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=0.58/

```

&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.61/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.53/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.62/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.79/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.56/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.51/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.46/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.41/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.66/
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.71/
&TAIL /

```

Zdrojový kód matematického modelu přístřešku

pristresek_03.fds

Generated by PyroSim - Version 2017.1.0209

14.12.2017 14:55:37

```

&HEAD CHID='pristresek_03'/
&TIME T_END=800.0/
&DUMP RENDER_FILE='pristresek_03.ge1', DT_RESTART=50.0/
&MISC TMPA=15.0/
&MESH ID='hruba_01-b', IJK=19,32,22, XB=0.38,0.76,-0.06,0.58,0.0,0.44/
&MESH ID='jemna_05', IJK=78,6,51, XB=0.02,0.8,0.58,0.64,0.0,0.51/
&MESH ID='jemna_01', IJK=4,64,51, XB=0.76,0.8,-0.06,0.58,0.0,0.51/
&MESH ID='jemna_07-b-a', IJK=36,60,7, XB=0.02,0.38,-0.02,0.58,0.44,0.51/
&MESH ID='jemna_07-b-b', IJK=38,64,7, XB=0.38,0.76,-0.06,0.58,0.44,0.51/
&MESH ID='hruba_02', IJK=45,5,27, XB=0.02,0.92,0.64,0.74,0.11,0.65/
&MESH ID='hruba_03', IJK=6,35,27, XB=0.8,0.92,-0.06,0.64,0.11,0.65/
&MESH ID='hruba_01-a-b', IJK=18,30,22, XB=0.02,0.38,-0.02,0.58,0.0,0.44/
&MESH ID='hruba_04-b-a', IJK=18,33,7, XB=0.02,0.38,-0.02,0.64,0.51,0.65/
&MESH ID='hruba_04-b-b', IJK=21,35,7, XB=0.38,0.8,-0.06,0.64,0.51,0.65/
&REAC ID='DREVO',
  FUEL='REAC_FUEL',
  C=6.3,
  H=7.1,
  O=2.1,
  SOOT_YIELD=0.008/
&PROP ID='TC1 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/
&PROP ID='TC2 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/
&PROP ID='TC3 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/
&PROP ID='TC4 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/
&PROP ID='TC5 props', BEAD_DIAMETER=0.0015/
&DEVC ID='TC1', PROP_ID='TC1 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.61,0.53,0.4/
&DEVC ID='TC2', PROP_ID='TC2 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.78,0.34,0.39/
&DEVC ID='TC3', PROP_ID='TC3 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.43,0.32,0.39/

```

```
&DEVC ID='TC4', PROP_ID='TC4 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.43,0.61,0.39/  
&DEVC ID='TC5', PROP_ID='TC5 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE', XYZ=0.43,0.32,0.65/  
&MATL ID='BOROVICE',  
    SPECIFIC_HEAT=2.5,  
    CONDUCTIVITY=0.15,  
    DENSITY=490.0,  
    HEAT_OF_COMBUSTION=1.2E4/  
&MATL ID='OSB',  
    SPECIFIC_HEAT=1.55,  
    CONDUCTIVITY=0.12,  
    DENSITY=600.0,  
    HEAT_OF_COMBUSTION=1.445E4/  
&SURF ID='BOROVICE',  
    RGB=146.0,202.0,166.0,  
    HRRPUA=150.0,  
    RAMP_Q='BOROVICE_RAMP_Q',  
    IGNITION_TEMPERATURE=300.0,  
    BURN_AWAY=.TRUE.,  
    BACKING='VOID',  
    MATL_ID(1,1)='BOROVICE',  
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,  
    THICKNESS(1)=0.005/  
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/  
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=25.216, F=0.8822/  
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=81.582, F=0.4984/  
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=164.648, F=0.3888/  
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=298.146, F=0.4785/  
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=467.244, F=1.0/  
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=648.208, F=0.2417/  
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=783.189, F=0.167/  
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=1085.79, F=0.1595/  
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=1302.35, F=0.0798/  
&RAMP ID='BOROVICE_RAMP_Q', T=1800.0, F=0.0698/  
&SURF ID='OSB',  
    RGB=146.0,202.0,166.0,  
    HRRPUA=195.0,  
    RAMP_Q='OSB_RAMP_Q',  
    IGNITION_TEMPERATURE=250.0,  
    BURN_AWAY=.TRUE.,  
    BACKING='VOID',  
    MATL_ID(1,1)='OSB',  
    MATL_MASS_FRACTION(1,1)=1.0,  
    THICKNESS(1)=0.005/  
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T=0.0, F=0.0/  
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T=25.6, F=0.8877/  
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T=66.25, F=0.6768/
```

&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T=159.6, F=0.4816/
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T=460.73, F=0.4764/
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T=629.36, F=1.0/
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T=665.5, F=1.0/
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T=791.97, F=0.3749/
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T=1008.78, F=0.1718/
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T=1421.33, F=0.138/
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T=1556.84, F=0.0703/
&RAMP ID='OSB_RAMP_Q', T=1800.0, F=0.0667/
&SURF ID='HORAK',
 COLOR='RED',
 HRRPUA=333.0,
 RAMP_Q='HORAK_RAMP_Q'/
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=0.0, F=1.0/
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=899.0, F=1.0/
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=900.0, F=0.2/
&RAMP ID='HORAK_RAMP_Q', T=1200.0, F=0.2/
&OBST ID='vaznice_vrchni', XB=0.0,0.8,0.58,0.6,0.44,0.47, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='vaznice_spodni', XB=0.0,0.8,0.0,0.02,0.44,0.47, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='levy_spodni', XB=0.04,0.06,0.0,0.02,0.0,0.44, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='levy_vrchni', XB=0.03,0.06,0.58,0.6,0.0,0.44, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='pravý_spodni', XB=0.74,0.77,0.0,0.02,0.0,0.44, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='pravý_vrchni', XB=0.74,0.77,0.58,0.6,0.0,0.44, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_10', XB=0.75,0.77,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_9', XB=0.67,0.69,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_8', XB=0.59,0.61,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_7', XB=0.51,0.53,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_6', XB=0.43,0.45,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_5', XB=0.35,0.37,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_4', XB=0.27,0.29,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_3', XB=0.19,0.21,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_2', XB=0.11,0.13,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='krokev_1', XB=0.03,0.05,0.0,0.6,0.46,0.48, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.43,0.44, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.4,0.41, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.37,0.38, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.34,0.35, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.31,0.32, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.28,0.29, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.25,0.26, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.22,0.23, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.19,0.2, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.16,0.17, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.13,0.14, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.1,0.11, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_delsi', XB=0.03,0.77,0.6,0.61,0.07,0.08, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/

&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.43,0.44, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.4,0.41, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.37,0.38, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.34,0.35, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.31,0.32, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.28,0.29, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.25,0.26, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.22,0.23, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.19,0.2, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.16,0.17, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.13,0.14, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.1,0.11, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='latovani_kratsi', XB=0.77,0.78,0.0,0.6,0.07,0.08, BULK_DENSITY=490.0, SURF_ID='BOROVICE'/
&OBST ID='strecha', XB=-0.02,0.8,-0.02,0.62,0.48,0.49, BULK_DENSITY=600.0, SURF_ID='OSB'/
&OBST ID='horak', XB=0.44,0.74,0.48,0.58,0.0,0.1, SURF_IDS='HORAK','INERT','INERT'/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_01-b [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.38,0.38,-0.06,-0.02,0.0,0.44/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_01-b [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.38,0.76,-0.06,-0.06,0.0,0.44/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_01-b [ZMIN]', SURF_ID='INERT', XB=0.38,0.76,-0.06,0.58,0.0,0.0/
&VENT ID='Mesh Vent: jemna_05 [XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.8,0.8,0.58,0.64,0.0,0.11/
&VENT ID='Mesh Vent: jemna_05 [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.02,0.02,0.58,0.64,0.0,0.51/
&VENT ID='Mesh Vent: jemna_05 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.02,0.8,0.64,0.64,0.0,0.11/
&VENT ID='Mesh Vent: jemna_05 [ZMIN]', SURF_ID='INERT', XB=0.02,0.8,0.58,0.64,0.0,0.0/
&VENT ID='Mesh Vent: jemna_01 [XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.8,0.8,-0.06,0.58,0.0,0.11/
&VENT ID='Mesh Vent: jemna_01 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.76,0.8,-0.06,-0.06,0.0,0.51/
&VENT ID='Mesh Vent: jemna_01 [ZMIN]', SURF_ID='INERT', XB=0.76,0.8,-0.06,0.58,0.0,0.0/
&VENT ID='Mesh Vent: jemna_07-b-a [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.02,0.02,-0.02,0.58,0.44,0.51/
&VENT ID='Mesh Vent: jemna_07-b-a [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.02,0.38,-0.02,-0.02,0.44,0.51/
&VENT ID='Mesh Vent: jemna_07-b-b [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.38,0.38,-0.06,-0.02,0.44,0.51/
&VENT ID='Mesh Vent: jemna_07-b-b [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.38,0.76,-0.06,-0.06,0.44,0.51/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_02 [XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.92,0.92,0.64,0.74,0.11,0.65/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_02 [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.02,0.02,0.64,0.74,0.11,0.65/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_02 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.02,0.92,0.74,0.74,0.11,0.65/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_02 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.02,0.92,0.64,0.74,0.65,0.65/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_02 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.02,0.92,0.64,0.74,0.11,0.11/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_03 [XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.92,0.92,-0.06,0.64,0.11,0.65/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_03 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.8,0.92,-0.06,-0.06,0.11,0.65/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_03 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.8,0.92,-0.06,0.64,0.65,0.65/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_03 [ZMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.8,0.92,-0.06,0.64,0.11,0.11/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_01-a-b [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.02,0.02,-0.02,0.58,0.0,0.44/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_01-a-b [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.02,0.38,-0.02,-0.02,0.0,0.44/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_01-a-b [ZMIN]', SURF_ID='INERT', XB=0.02,0.38,-0.02,0.58,0.0,0.0/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_04-b-a [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.02,0.02,-0.02,0.64,0.51,0.65/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_04-b-a [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.02,0.38,-0.02,-0.02,0.51,0.65/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_04-b-a [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.02,0.38,-0.02,0.64,0.65,0.65/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_04-b-b [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.38,0.38,-0.06,-0.02,0.51,0.65/
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_04-b-b [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=0.38,0.8,-0.06,-0.06,0.51,0.65/

```
&VENT ID='Mesh Vent: hruba_04-b-b [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=0.38,0.8,-0.06,0.64,0.65,0.65/  
&BNDF QUANTITY='GAS TEMPERATURE'/  
&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX'/  
&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.61/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.53/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBX=0.66/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=0.24/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=0.4/  
&SLCF QUANTITY='INTEGRATED INTENSITY', PBZ=0.58/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.61/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.53/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.62/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.79/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.56/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.51/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.46/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.41/  
&SLCF QUANTITY='VELOCITY', VECTOR=.TRUE., PBX=0.36/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.48/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.43/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.38/  
&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', PBX=0.37/  
&TAIL
```