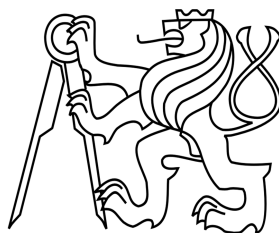


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Studijní program: Integrální bezpečnost staveb

Diplomová práce

MODELOVÁNÍ POŽÁRU A ANALÝZA POŽÁRNÍ ODOLNOSTI KONSTRUKCÍ SE ZOHLEDNĚNÍM NÁHODNOSTI VSTUPNÍCH PARAMETRŮ

Modelling of fire and analysis of structural fire resistance considering randomness of input
parameters

Bc. Tomáš Kovářík

Vedoucí práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

Vedoucí práce: Ing. Šárka Košťálová

2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kovářik	Jméno: Tomáš	Osobní číslo: 468709
Zadávací katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:	Modelování požáru a analýza požární odolnosti konstrukcí se zohledněním náhodnosti vstupních parametrů	
Název diplomové práce anglicky:	Modelling of fire and analysis of structural fire resistance considering randomness of input parameters	
Pokyny pro vypracování:	Rešerše literatury Analýza dostupných metod pro zohlednění náhodnosti vstupních parametrů Výpočty Vyhodnocení Závěr	
Seznam doporučené literatury:	SHI, K. Guo, Q. JEFFERS, A. Stochastic Analysis of Structures in Fire by Monte Carlo Simulation. Journal of Structural Fire Engineering. 2013 roč. 13 č. 4, s.37-46. doi:10.1260/2040-2317.4.1.37. GUO, Q., JEFFERS, A., E., Finite-Element Reliability Analysis of Structures Subjected to Fire. Journal of Structural Engineering [online]. 2015, roč. 15 141(4), 04014129. ISSN 0733-9445, 1943-541X. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001082 PURKISS, J A. Fire safety engineering design of structures (2nd Edition). Oxford: Butterworth-Heinemann-Elsevier, 2006	
Jméno vedoucího diplomové práce:	Ing. Radek Štefan Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce:	22.9.2021	Termín odevzdání diplomové práce: 2.1.2022 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry	

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Modelování požáru a analýza požární odolnosti konstrukcí se zohledněním náhodnosti vstupních parametrů vypracoval samostatně pod vedením Ing. Radka Štefana, Ph.D., a Ing. Šárky Košťálové. Veškeré literární nebo jiné zdroje použité pro vznik této práce jsou uvedené v části Literatura.

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

V Praze dne 1. ledna 2022

.....

Tomáš Kovářik

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svým vedoucím diplomové práce Ing. Radku Štefanovi, Ph.D., a Ing. Šárce Košťálové za odborné vedení, poskytnuté podklady a cenné rady při zpracování této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a přátelům za podporu během celého studia. Tato diplomová práce byla vytvořena v rámci podpory Studentské grantové soutěže ČVUT, č. projektu SGS21/040/OHK1/1T/11.

Obsah

Prohlášení	ii
Poděkování	iii
Abstrakt	vi
Abstract	vii
Seznam použitých zkratk a symbolů	viii
1 Úvod	1
1.1 Motivace	1
2 Současný stav poznání	2
2.1 Požár	2
2.1.1 Pyrolýza a spalování plynů	2
2.1.2 Rozvoj a průběh požáru v uzavřeném prostoru	3
2.2 Modelování požáru	4
2.2.1 Fyzikální modely požáru	4
2.2.2 Matematické modely požáru	5
2.3 Nominální teplotní křivka	6
2.4 Přirozené modely požáru	7
2.5 Zpřesněné přirozené modely požáru	8
2.6 Parametrická teplotní křivka	9
2.6.1 Obecný popis	9
2.6.2 Vstupní parametry	10
2.6.3 Návrhová hustota požárního zatížení	11
2.6.4 Faktor otvorů	11
2.6.5 Tepelná pohltivost ohraničujících konstrukcí	11
2.6.6 Rychlost rozvoje požáru	11
2.7 Generování náhodných vstupních parametrů	12
2.7.1 Generování náhodných čísel	12
2.7.2 Transformace pseudonáhodných čísel	13
2.7.3 Generování vstupních parametrů metodou Monte Carlo	13
2.7.4 Generování vstupních parametrů metodou Latinských Nadkrychlí	14
2.8 Použité rozdělení pro jednotlivé parametry	16

2.8.1	Rovnoměrné rozdělení	16
2.8.2	Normální rozdělení (Gaussovo rozdělení)	17
2.8.3	Gumbelovo rozdělení (Extreme I)	18
2.8.4	Logaritmickeo-normální rozdělení (log-normální rozdělení)	18
2.8.5	Návrhová hustota požárního zatížení	19
2.8.6	Faktor otvorů	22
2.8.7	Tepelná pohltivost ohraničujících konstrukcí	24
2.8.8	Rychlost rozvoje požáru	25
3	Řešený příklad	26
3.1	Popis řešeného příkladu	26
3.2	Citlivostní analýza	27
3.2.1	Kombinace č.1	27
3.2.2	Kombinace č.2	28
3.2.3	Kombinace č.3	30
3.2.4	Kombinace č.4	32
3.3	Aplikace Monte Carlo	34
3.3.1	Určení vstupních parametrů	34
3.3.2	Pravděpodobnostní rozdělení vstupních parametrů	35
3.3.3	Počet simulací a cyklů	36
3.3.4	Postup výpočtu metodou Monte Carlo	36
3.3.5	Vyhodnocení výsledků	37
3.4	Aplikace metody Monte Carlo a metody Latinských Nadkrychlí	39
3.4.1	Určení vstupních parametrů	39
3.4.2	Počet simulací a cyklů	41
3.4.3	Postup výpočtu	41
3.4.4	Vyhodnocení výsledků	43
4	Závěr	46
	Seznam obrázků	48
	Seznam tabulek	50

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou modelování požáru pomocí pravděpodobnostního přístupu, zejména náhodnosti vstupních parametrů. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části jsou zprvu popsány modely požáru. Podrobněji je zde popsána parametrická teplotní křivka, která je dále používána jako model požáru v řešených příkladech. Popsán je teoretický základ pro generování náhodných čísel spolu s pravděpodobnostními rozděleními, které na sebe úzce navazují. Jako poslední část teoretického základu je zpracován přehled použitých pravděpodobnostních rozdělení pro jednotlivé vstupní parametry z jiných publikací.

Praktická část práce je rozdělena do tří řešených příkladů. Všechny modely řešených příkladů jsou sepsané jako kód v programovacím jazyce Python. Tento model zjednodušuje práci s velkým výpočetním objemem, který je v pravděpodobnostním přístupu nezbytný. Oproti preskriptivnímu přístupu se pravděpodobnostní přístup neobejde bez vícekrát provedeného výpočtu modelu požáru.

Prvním řešeným příkladem je citlivostní analýza vstupních parametrů, modelem jsou vygenerovány 2D a 3D grafy, které ukazují chování parametrické teplotní křivky dle ČSN EN 1991-1-2. Druhý řešený příklad se zabývá pravděpodobnostním přístupem pomocí metody Monte Carlo. Hlavním cílem, je zkoumání vlivu množství provedených výpočtů na výsledné hodnoty. Třetí řešený příklad se zabývá pravděpodobnostním přístupem pomocí metody Monte Carlo a metody Latinských Nadkrychlí. Hlavním cílem, je porovnání metod mezi sebou. Porovnávají se výsledné hodnoty ve vztahu k počtu provedených výpočtů. Aplikace druhého a třetího řešeného příkladu je provedena na konkrétní požární úsek, se vstupními údaji z teoretické části.

Klíčová slova

Požár, modely požáru, požární odolnost konstrukcí, spolehlivost konstrukcí, náhodnost, pravděpodobnost, nejistota, Monte Carlo, Latinské Nadkrychle, statistika

Abstract

The diploma thesis deals with the problem of fire modelling using a probabilistic approach, especially the randomness of the input parameters. The work is divided into two parts, theoretical and practical.

The theoretical part first describes the fire models. There is a parametric temperature curve described in more details here, which is further used as a fire model in the examples. The theoretical basis for generating random numbers is described along with probability distributions which are closely related. As a last part of the theoretical basis, an overview of used ones is prepared probability distributions for individual input parameters from other publications.

The practical part of the work is divided into three solved examples. All models of solved examples are written as code in the Python programming language. This model simplifies working with large the computational data required in the probabilistic approach. In contrast to the prescriptive access the probability access is not possible without multiple calculations of the fire model.

The first example is the sensitivity analysis of input parameters, the model generates 2D and 3D graphs that show the behavior of the parametric temperature curve according to ČSN EN 1991-1-2. The second example deals with the probabilistic approach using the Monte Carlo method. The main goal here was to examine the effect of the number of calculations performed to gain the resulting values. The third example deals with the probabilistic approach using the Monte Carlo method and the Latin hypercube sampling. The main goal here was to compare the methods with each other. The resulting values were compared in relation to the number of calculations performed. The application of the second and third solved example is performed to a specific fire section, using input data from the theoretical part.

Key words

Fire, fire models, fire resistance of structures, reliability of structures, randomness, probability, uncertainty, Monte Carlo method, Latin Hypercubes Sampling, statistic

Seznam použitých zkratk a symbolů

Latinské symboly

A_f	Celková podlahová plocha	m^2
A_t	Celková plocha konstrukcí ohraničující PÚ	m^2
b	Tepelná pohltivost celé ohraničující konstrukce	$J m^{-2} s^{-1/2} K^{-1}$
c	Měrná tepelná kapacita	$J kg^{-1} K^{-1}$
erf	Gaussova chybová funkce	
O	Faktor otvorů	$m^{1/2}$
$q_{t,d}$	Návrhová hustota požárního zatížení vztažená na A_t	$MJ m^{-2}$
$q_{f,d}$	Návrhová hustota požárního zatížení vztažená na A_f	$MJ m^{-2}$
$q_{f,k}$	Charakteristická hustota požárního zatížení	$MJ m^{-2}$
t	Čas	min
t_{lim}	Rychlost rozvoje požáru	min
h_{eq}	Vážený průměr výšek oken ve všech stěnách ohraničujících PÚ	m

Řecké symboly

θ_g	Teplota plynů v požárním úseku	$^{\circ}C$
ρ	Objemová hmotnost	$kg m^{-3}$
λ	Tepelná vodivost konstrukcí	$W m^{-1} K^{-1}$
μ	Střední hodnota	
σ	Rozptyl	

Zkratky

NTK	Normová teplotní křivka
PÚ	Požární úsek
MV	Minerální vata
EC1	Eurokód 1: Zatížení konstrukcí
SDK	Sádrokarton
LHS	Latinské nadkrychle (Latin Hypercubes Sampling)
CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator (software)
2D	Dvoudimenzionální
3D	Trojdimenzionální

Kapitola 1

Úvod

1.1 Motivace

Dnes máme v zásadě dva možné přístupy k požární bezpečnosti staveb. Prvním je preskriptivní přístup. Jedná se o návrh zohledňující závazné normy a vyhlášky popřípadě jiné technické předpisy. Druhým je požárně inženýrský přístup (performance-based design). Tento přístup umožňuje větší individualitu a kreativitu pro konkrétně řešený problém, při dodržení určitých kritérií.

V současné době a v nejbližší budoucnosti preskriptivní přístup tvoří nástroj pro řešení většiny projektů. Obecně se uvažuje, že návrh je na straně bezpečné.

Požárně inženýrský přístup začíná být dostupnější a využívanější, než tomu bylo dříve. Souvisí to s vyššími nároky na projekty, výkonnější výpočetní technikou, lepším stavem poznání a globalizací, která rozšiřuje zdroj informací a metod.

Pravděpodobnostní přístup je odchylný od normativního přístupu, zařídíme ho do oblasti požárně inženýrské. Zatímco normativní přístup využívá deterministické veličiny, které nejistoty a variability popisují součiniteli. Tyto hodnoty lze poměrně snadno vyčíst z norem. Pravděpodobnostní přístup pracuje s nejistotami popsány metodami matematické statistiky. Tyto statistické hodnoty však nejsou ještě dostatečně prozkoumány a ověřeny.

Bylo by zajímavé sjednotit vstupní parametry, které byly doposud publikovány. Dále vyhledat zdroje, dle kterých by se daly sestavit vlastní vstupní parametry. S těmito daty pracovat jak kvantitativně tak kvalitativně. Parametrická teplotní křivka svým charakterem je dobrý nástroj pro pravděpodobnostní přístup.

Další zajímavou částí tohoto tématu je práce s výsledky. Normový postup pracuje s jednou výslednou hodnotou, která udává kdy prvek podlehe účinkům zatížení a požáru. Pravděpodobnostní přístup generuje soubor výstupů. Jak velký soubor je potřeba, jak tento soubor zpracovat a vyhodnotit, na to není vytvořena metodika.

Kapitola 2

Současný stav poznání

2.1 Požár

„Pro účely požární ochrany se za požár považuje každé nežádoucí hoření, při kterém došlo k usmrcení či zranění osob nebo zvířat, anebo ke škodám na materiálních hodnotách. Za požár se považuje i nežádoucí hoření, při kterém byly osoby, zvířata nebo materiální hodnoty nebo životní prostředí bezprostředně ohroženy.“ [1]. Při navrhování staveb se stal tento jev nedílnou součástí návrhu a posouzení. Disciplína zabývající se tímto jevem se nazývá „požární bezpečnost“. V dnešní době neexistuje absolutní definice, v prostředí, kde se požární bezpečností staveb zabýváme, by obstála tato definice:

Požární bezpečnost lze definovat jako aplikaci vědeckých a technických principů na účinky požáru s cílem snížení ztrát na životech a poškození majetku kvantifikací příslušných rizik a poskytnout optimální řešení pro použití preventivních nebo ochranných opatření.

Požární bezpečnost se využívá všude tam, kde by požár mohl být potencionální hrozbou. Diplomová práce se bude zabývat modely požáru v objektech občanské vybavenosti [7].

2.1.1 Pyrolýza a spalování plynů

Proces pyrolýzy probíhá na základě rozkladu pevných či kapalných látek. Pyrolýza je chemický proces při zvýšených teplotách i bez přístupu oxidačních činidel (kyslík). Dochází zde k chemickým rozkladům na menší těkavé molekuly. Proces pyrolýzy tedy není reakcí oxidantu a činidla. Čím více tepla je dodáno, tím rychleji a intenzivněji probíhá pyrolýza. Teplotní intervaly pro běžné materiály lze rozdělit na tři intervaly. Od 100 do 300 °C, zde se jedná spíše o tepelnou degradaci než pyrolýzu, od 300 do 500 °C mírná pyrolýza, nad 800 °C se jedná o intenzivní pyrolýzu. V plamenu ohně tedy nehoří pevná látka či kapalina, ale plynné látky vznikající pyrolýzou nebo odpařováním hořlavé látky [5].

Zapálení materiálu tedy musí splňovat základní tři vlastnosti. První je dostatečné množství hořlavých plynů z hořlavé látky nebo kapaliny. Druhá je smíchání těchto plynů s oxidantem, v našem případě nejčastěji vzdušným kyslíkem. Třetí je zdroj zapálení, může

se jednat o jiskru od elektrického vedení, případně už hořící materiál. Jiskra slouží jako iniciační zdroj pro lokální zahřátí a tím způsobený požár. Hořící materiál okolo našeho sledovaného materiálu může vytvořit dostatečně vysokou teplotu, při které dojde k samovznícení [4, 6].



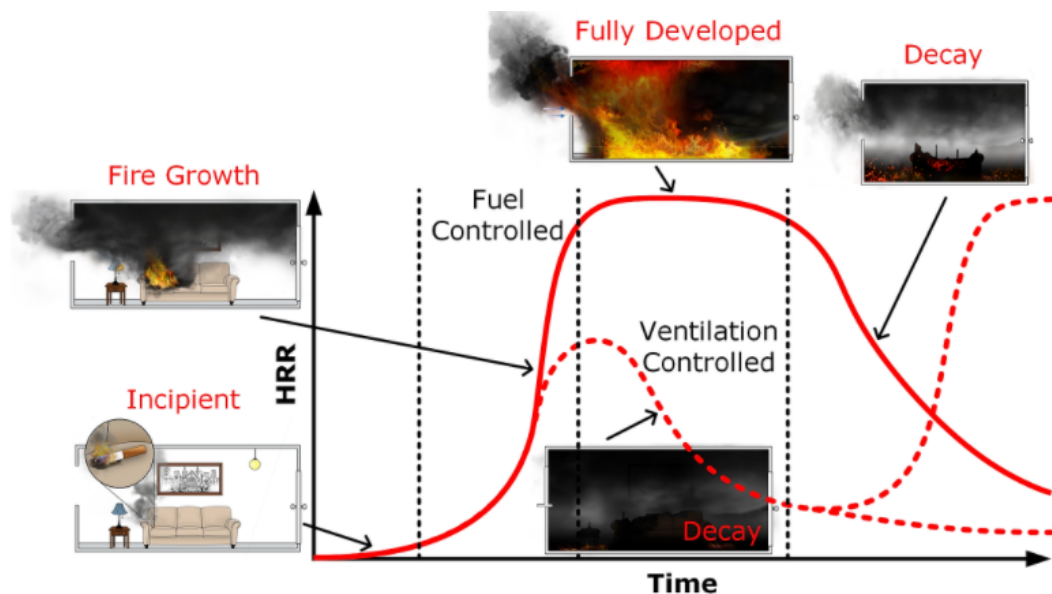
Obrázek 2.1: Trojúhelník hoření, převzato z [9].

2.1.2 Rozvoj a průběh požáru v uzavřeném prostoru

Charakter průběhu požáru může mít mnoho podob. Hlavní faktory ovlivňující průběh požáru jsou druh paliva, plocha, na které palivo může hořet, ventilace, geometrie prostoru zasaženého požárem a materiálové vlastnosti ohraničující konstrukce [10].

První možností je lokální požár, ten nastává, pokud zapálený materiál vyhoří a nepřenesení se požár do celého požárního úseku. Druhá možnost je při dostatečném množství paliva, ale velmi omezené možnosti ventilace. Požár hoří buď velmi pomalu, nebo dokonce zhasíná pro nedostatek kyslíku. Pokud je dostatek paliva a dostatečná ventilace může dojít k vzplanutí hořlavých materiálů v celém požárním úseku. Na obrázku 2.2 je vidět jak rozvinutý požár, tak požár s nedostatečnou ventilací. Rozvinutý požár lze rozdělit do několika fází.[12, 10]

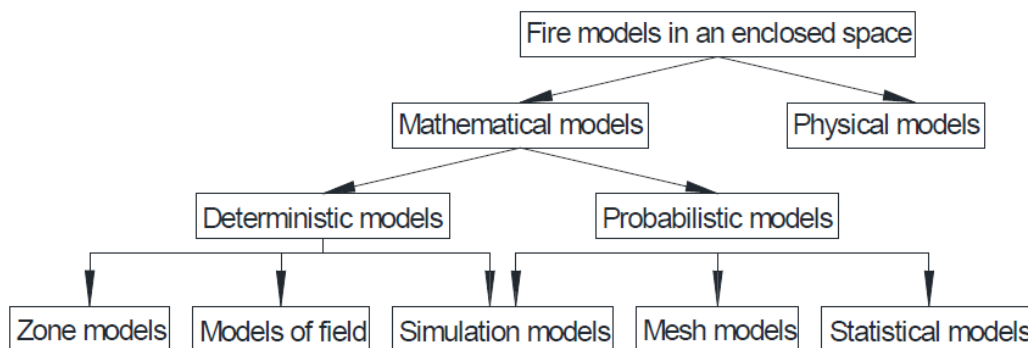
1. Počáteční fáze, během které dochází k iniciaci požáru. Požár se pomalu rozrůstá.
2. Růst, rychlost rozhořívání je závislá na hořlavých materiálech, ventilaci, geometrii a okolních konstrukcích. V případě nedostatku kyslíku nebo paliva oheň může zhasnout. Při dostatečném množství paliva a přístupu kyslíku dojde v uzavřených prostorech k přechodu požáru na všechny hořlavé materiály po celém prostoru, tzv. flashover.
3. Plně rozvinutý požár, jedná se o fázi, během které dochází k největšímu uvolňování tepla a požár je rozvinut po celém prostoru. Ve většině případů dochází k požáru řízenému ventilací, v prostoru není dostatek kyslíku pro lepší hoření.
4. Dohořívání nastává při vyhoření většiny paliva v prostoru požáru, teplota a uvolněné teplo klesá, dokud nevyhoří všechen materiál.



Obrázek 2.2: Průběh požáru, převzato z [11].

2.2 Modelování požáru

V požárním inženýrství existuje několik možností, jak modelovat požár, viz obrázek 2.3. Všechny modely pracují se zjednodušením. Míra zjednodušení je daná potřebnou přesností návrhu, dostupností vstupních údajů, náročností na výpočetní techniku a čas. V dnešní době převažují matematické modely nad fyzikálními. Nevýhodou fyzikálních modelů je zejména finanční nákladnost [13].



Obrázek 2.3: Schéma modelů požáru, převzato z [14].

2.2.1 Fyzikální modely požáru

Jedná se o požární zkoušky, jsou modelovány celé konstrukce nebo jen části konstrukce. Tyto modely jsou často velmi nákladné a je problematické je opakovat. Na základě výsledků fyzikálních modelů se často matematické modely tvoří a ověřuje jejich platnost [13].

2.2.2 Matematické modely požáru

Matematické modely popisují fyzikální a chemické procesy. Pro tyto modely se snažíme definovat a kvantifikovat potřebné vstupní údaje pro úspěšné vymodelování. Složitost vstupních parametrů spočívá v jejich proměnlivosti v čase. Například se jedná o uvolněné teplo do okolí, teplotu plynů v prostoru, šíření požáru, ventilaci. Samotná definice a kvantifikace vstupních údajů závisí na použitém modelu. Matematické modely se mohou rozdělit na deterministické a pravděpodobnostní. Pravděpodobnostní modely se často nazývají stochastické, významem se jedná o stejné pojmy. Základní rozdíl mezi těmito typy modelů je přístup k nejistotám během modelování [15, 16].

Matematický model je soubor vzorců. Tyto vzorce tvoří simulaci požáru. Numerické modelování se provádí v těchto krocích: [16]

- zadání vstupních dat (výchozí podmínky modelu – proměnné rovnice apod.),
- výpočet soustavy matematických rovnic,
- interpretace a zhodnocení výsledků.

Deterministické modely

Deterministický model je takový, ve kterém je soubor proměnných dat jedinečně určen parametry v modelu a souborem předchozích dat těchto proměnných. Z toho vyplývá, že deterministické modely vykonávají stejné postupy pro dané vstupní podmínky. Náhodnost je zde reprezentována součiniteli [15, 17].

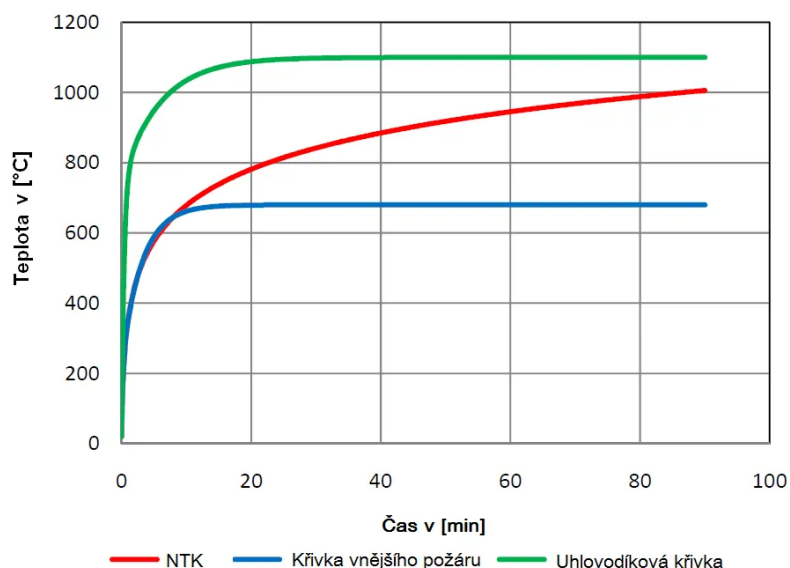
Stochastické modely

Ve stochastickém modelu je přítomná náhodnost a pravděpodobnost. Tyto modely aplikují teorii pravděpodobnosti. Popisují jevy s předem neznámým výsledkem. Vychází se z „náhodného pokusu“. Vstupní soubory dat nebývají popsány jedinečnými hodnotami, častěji se používá pravděpodobnostní rozdělení. Konkrétní hodnoty vstupů se často stanovují z dostupných statistik a inženýrského úsudku. Stochastické výstupy tvoří odhad pravděpodobnostních rozdělení potenciačních výstupů.

Oproti deterministickému výpočtu, pokud spustíme výpočet se stejnými vstupními údaji, dostaneme rozdílné výsledky. Vycházíme z předpokladu nestejného průběhu požáru. Požár jako fyzikální a chemický proces nikdy nevypadá stejně, nedokážeme úplně přesně namodelovat požár ani v požárních pecích, kde můžou být základní parametry ovládané v průběhu času [15, 17, 18].

2.3 Nominální teplotní křivka

Nominální teplotní křivky vyjadřují teploty plynů v požárním úseku. Teplota plynů je závislá pouze na čase. Z této závislosti vyplývá jejich jednoduché využití. Nejsou třeba vstupní údaje. Jednoduchost použití je vykoupena omezenou přesností výsledků. Teplota plynů je uvažovaná pro celý požární úsek stejná. Některé nominální křivky jsou uvedeny na obrázku 2.4 [1, 19].



Obrázek 2.4: Nominální teplotní křivky, převzato z [20].

Normová teplotní křivky

Normová teplotní křivka je často označována v literatuře jako ISO 834. Tato křivka je nejnámější a nepoužívanější při získávání teploty plynů v požárních úsecích. Využívá se pro zkoušení požární odolnosti ve zkušebnách. Křivka nezohledňuje fázi chladnutí. Obvykle se uvažuje použití normové teplotní křivky jako konzervativní, ukázalo se, že pro některé požární situace a konstrukce tomu tak není [1, 19, 21]. Vztah pro křivku:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1), \quad (2.1)$$

kde: θ_g je teplota plynu v požárním úseku [°C],
t čas v [min].

Křivka vnějšího požáru

Křivka vnějšího požáru se používá pro namáhání obvodových konstrukcí budovy. Vztah pro křivku: [1, 20]

$$\theta_g = 20 + 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-0,38t}), \quad (2.2)$$

kde: θ_g je teplota plynu v požárním úseku [°C],
t čas v [min].

Uhlovodíková teplotní křivka

Uhlovodíková křivka se používá pro hoření požárů s rychlým nárůstem teploty. Vztah pro křivku: [1, 20]

$$\theta_g = 1\,080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20, \quad (2.3)$$

kde θ_g je teplota plynu v požárním úseku [°C],
t čas v [min].

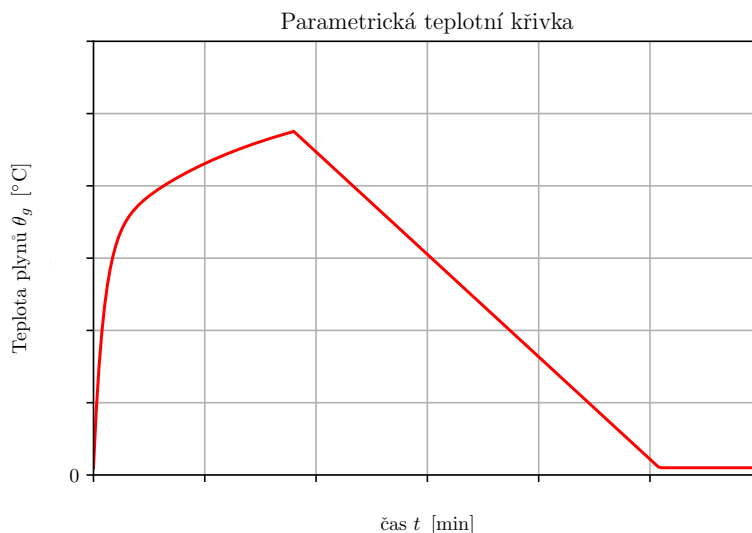
2.4 Přirozené modely požáru

Přirozené modely požáru se dělí na zjednodušené a zdokonalené. Modely jsou založeny na specifických fyzikálních parametrech s omezeným použitím. Při správném výběru modelu, dodržení okrajových podmínek a zadání správných vstupních údajů jsou tyto modely schopny lépe popsat skutečný požár než nominální teplotní křivky. Mezi zjednodušené modely požáru patří parametrické teplotní křivky, lokální požár, rychlost uvolňování tepla, tepelné zatížení vnějších prvků a hustota požárního zatížení. Mezi zpřesněné modely požáru patří jednozónové modely, dvouzónové modely a CFD modely (FDS) [1, 19].

Parametrická teplotní křivka

Je hned několik parametrických teplotních křivek, v ČSN 1991-1-2 [1] je definována obecným vztahem (2.4). Teplota plynů v požárním úseku má fázi rozhořívání, fázi hoření a fázi chladnutí. Teplota je uvažována rovnoměrně po celém požárním úseku. Podrobnému popisu křivky se tato práce bude věnovat v kapitole 2.6.

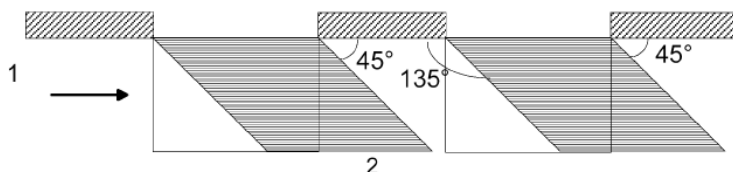
$$\theta_g = 20 + 1\,325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}). \quad (2.4)$$



Obrázek 2.5: Obecný průběh parametrické teplotní křivky.

Tepelné zatížení vnějších prvků

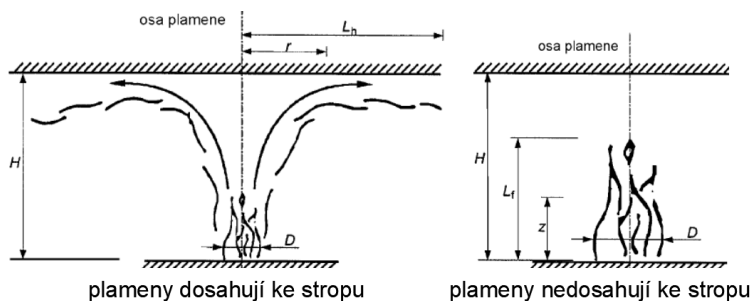
Tepelné zatížení vnějších prvků umožňuje stanovit maximální teploty v požárním úseku, velikost a teploty plamenů šlehajících z požárního úseku, parametry sálání a proudění [1, 14].



Obrázek 2.6: Odklon plamene větrem v půdorysu, rozměry plamene bez průvanu, převzato z: [1].

Lokální požár

Lokální požár nastává pokud nedochází k šíření požáru v požárním úseku, ale hoří jen v malé části požárního úseku. Při modelování se rozlišuje, zda plameny dosahují stropní konstrukce nebo nedosahují [1].



Obrázek 2.7: Schématický řez lokálním požárem, převzato z: [1].

2.5 Zpřesněné přirozené modely požáru

Jednozónový model

Jednozónový model uvažuje homogenní parametry v celém požárním úseku. Jednozónový model lze využít při prostorovém vzplanutím. Další vhodné využití je pro případy, kdy teplota zplodin hoření výrazně nepřevyšuje teplotu okolí [19, 25].

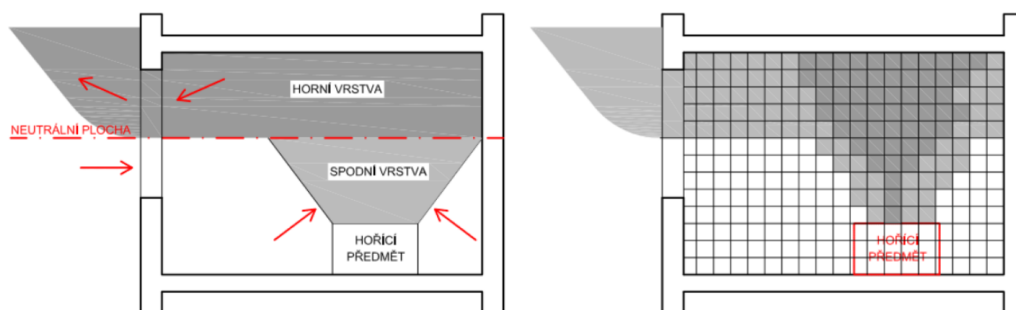
Dvouzónový model

Dvouzónový model využívá rozdělení požárního úseku na dvě horizontální vrstvy. Tyto vrstvy odděluje neutrální rovina. Neutrální rovina vzniká rozdílnou hustotou horkých a chladných plynů. Horní vrstvu tvoří horká vrstva plynů. Dolní vrstva je studená, z této vrstvy je nasáván vzduch do požáru. Dvouzónové modely často v pozdějších fázích požáru

přecházejí do jednozónových. Zónové modely mají omezenou použitelnost v závislosti na geometrii řešených prostorů, např. šachet a tunelů. Výstupem z těchto modelů mohou být jak teploty plynů, tak například sálavé teplo, výška kouřové vrstvy [19, 25, 17].

CFD modely

Computational Fluid Dynamics, v překladu výpočet dynamiky tekutin, je nástroj, který byl vyvinut mimo požární inženýrství. Importován byl až později, například ve formě FDS, v překladu simulátor požární dynamiky. Řešený prostor je rozdělen na kontrolní objemy. Mezi těmito kontrolními objemy je prováděn výpočet zachování hmoty, hybnosti a energie pomocí parciálních diferenciálních rovnic. Modely mohou předpovídat změnu podmínek v celém prostoru, ale zpravidla vyžadují mnohem delší čas a výkonnější hardware pro výpočet než zónové modely. Výstupy z CFD, respektive FDS nabízejí velké množství měřitelných parametrů, od teploty plynů v každém kontrolním objemu až po množství a složení produktu spalování. Abychom mohli získávat takto podrobné výsledky, odpovídá tomu i vkládání podrobných vstupních parametrů, které jsou těžko dostupné, anebo nejsou vůbec dostupné [19, 25, 17].



Obrázek 2.8: Vlevo základní princip zónového modelu, vpravo základní princip CFD modelu, převzato z: [19, 25].

2.6 Parametrická teplotní křivka

Diplomová práce vyhodnocuje průběh teplot parametrické teplotní křivky. Vstupní parametry budou modelovány s přihlédnutím k náhodnosti a variabilitě. V této kapitole je parametrická teplotní křivka popsána podrobněji.

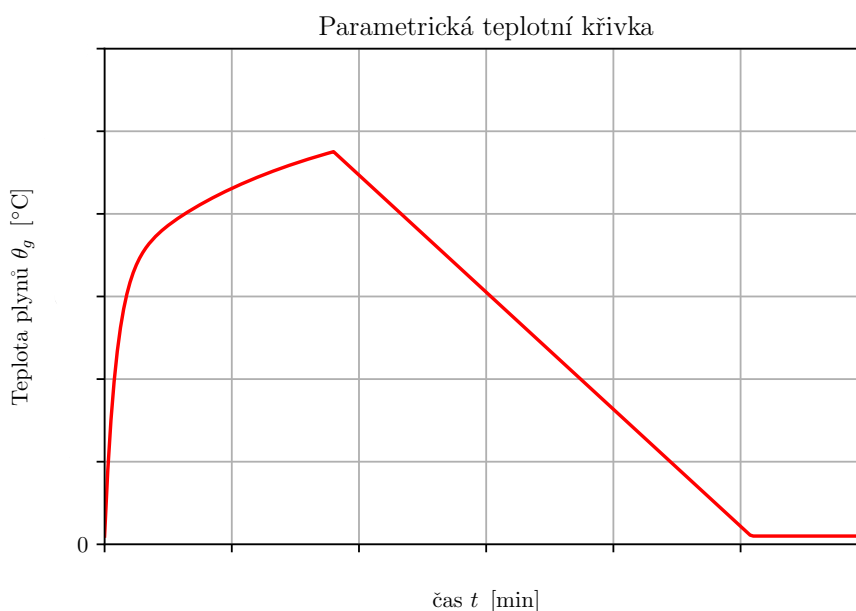
2.6.1 Obecný popis

Parametrickou křivku popisuje ČSN EN 1991-1-2, příloha A [1]. Současný model vychází ze švédské křivky poprvé publikované v roce 1970 (Magnusson a Thelandersson) [22, 23]. Některé země spadající do Evropského výboru pro normalizaci (CEN) mají ve svých národních přílohách úpravu této křivky. Například existují parametrické teplotní křivky dle dánské národní přílohy a německé národní přílohy [8, 25].

Jako u nominálních křivek se zde uvažuje teplota plynů rovnoměrně pro celý požární úsek. Oproti nominálním křivkám požáru zde uvažujeme okrajové podmínky. Omezuje se půdorysná plocha požárního úseku do 500 m^2 , maximální výška požárního úseku na 4 m a nesmí být otvory ve stropě. Další omezení se týká rozmezí pro hustotu požárního zatížení, faktoru otvorů, tepelné pohltivosti ohraničujících konstrukcí, tyto parametry jsou podrobněji popsány níže [24].

Obecný průběh parametrické teplotní křivky je na obrázku 2.9. Rozhořívání popisuje exponenciální růst, ten končí v maximální teplotě. Následné chladnutí probíhá lineárním poklesem. Teplota klesá na předpokládanou teplotu okolního prostředí (většinou na $20 \text{ }^\circ\text{C}$) [24, 1]. Vztah pro křivku:

$$\theta_g = 20 + 1\,325(1 - 0,324e^{-0,2t^*} - 0,204e^{-1,7t^*} - 0,472e^{-19t^*}) \quad (2.5)$$



Obrázek 2.9: Parametrická teplotní křivka

2.6.2 Vstupní parametry

- Návrhová hustota požárního zatížení $q_{t,d}$ [MJ m^{-2}],
- Faktor otvorů O [$\text{m}^{1/2}$],
- Tepelná pohltivost ohraničujících konstrukcí b [$\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}$],
- Rychlost rozvoje požáru t_{lim} [min].

2.6.3 Návrhová hustota požárního zatížení

Tento parametr reprezentuje množství paliva v požárním úseku. Hodnota návrhové hustoty požárního zatížení je vztažena k celé ploše povrchu A_t . Návrhové hodnoty hustoty požárního zatížení upřesňuje ČSN 1991-1-2, příloha E. Pro použití parametrické teplotní křivky může nabývat mezních hodnot $50 \leq q_{t,d} \leq 1000$ [MJ m⁻²]. Je dána následujícím vztahem: [1, 24]

$$q_{t,d} = q_{f,d} \frac{A_f}{A_t}, \quad (2.6)$$

kde $q_{f,d}$ je návrhová hodnota hustoty požárního zatížení [MJ m⁻²],
 A_f je celková podlahová plocha PÚ [m²],
 A_t je celková plocha konstrukcí ohraničujících PÚ [m²].

2.6.4 Faktor otvorů

Faktor otvorů zde reprezentuje ventilaci. Součinitel může pro použití parametrické teplotní křivky nabývat mezních hodnot $0,02 \leq O \leq 0,2$ [m^{1/2}]. Je dán následujícím vztahem:

$$O = \frac{A_v}{A_t} \sqrt{h_{eq}}, \quad (2.7)$$

kde A_v je celková plocha svislých otvorů ve všech stěnách ohraničujících PÚ [m²],
 A_t je celková plocha konstrukcí ohraničujících PÚ [m²],
 $\sqrt{h_{eq}}$ je vážený průměr výšek oken ve všech stěnách ohraničujících PÚ [m].

2.6.5 Tepelná pohltivost ohraničujících konstrukcí

Tepelná pohltivost ohraničujících konstrukcí reprezentuje, kolik energie odeberou konstrukce ohraničující požární úsek. Hodnotu součinitel b určují materiálové charakteristiky konstrukcí. Součinitel může pro použití parametrické teplotní křivky nabývat mezních hodnot $100 \leq b \leq 2200$ [J m⁻² s^{-1/2} K⁻¹]. Pro homogenní konstrukce je dána následujícím vztahem [1, 25]:

$$b = \sqrt{\rho c \lambda}, \quad (2.8)$$

kde ρ je objemová hmotnost ohraničujících konstrukcí PÚ [kg m⁻³],
 λ je tepelná vodivost ohraničujících konstrukcí PÚ [W m⁻¹ K⁻¹],
 c je měrná tepelná kapacita ohraničujících konstrukcí PÚ [J kg⁻¹ K⁻¹].

2.6.6 Rychlost rozvoje požáru

Rychlost rozvoje požáru reprezentuje, jaký materiál hoří, tato hodnota je tabulkově určena ČSN 1991-1-2 pro různé provoz. Jsou tři stupně rychlosti rozvoje požáru:

malá $t_{lim} = 25$ min,
 střední $t_{lim} = 20$ min,
 velká $t_{lim} = 15$ min.

2.7 Generování náhodných vstupních parametrů

Pro stochastický model parametrické teplotní křivky je náhodnost reprezentována vstupními parametry. Náhodné generování vstupních parametrů závisí na vhodně zvoleném generátoru náhodných čísel, převedení náhodných čísel na pravděpodobnostní rozdělení s určitým rozsahem. Možností, jak generovat náhodná čísla, je několik [49]:

- mechanické generátory,
- fyzikální generátory,
- tabulky náhodných čísel,
- aritmetické generátory.

2.7.1 Generování náhodných čísel

Typickým představitelem mechanického generátoru je použití urny, ve které je 10 stejných koulí označených čísly od 0 do 9. Z urny jsou postupně vyjmuty jednotlivé koule a číslice jsou zapisovány na příslušnou pozici, po zapsání čísla kouli vrátíme do urny. Fyzikální generátory jsou založeny na pozorování fyzikálních jevů s náhodným charakterem. Například radioaktivní rozpad nebo šum elektronky. Princip tabulky náhodných čísel je založen na rozsáhlých souborech dat získaných k jiným účelům. Například čísla v telefonním seznamu. Tyto tři metody dávají náhodná čísla, bohužel je problém s jejich použitím při velkém objemu náhodných čísel, interpretací (fyzikální generátory) a propojením s počítačovými experimenty.

Při generování náhodných čísel pro počítačové experimenty se nejčastěji používají aritmetické generátory. Principiálně jsou založeny na rekurentním vztahu, například rovnice (2.9). Další člen posloupnosti závisí na hodnotách předchozích, nejedná se tedy o opravdová náhodná čísla, hovoří se zde o pseudonáhodných číslech [49].

$$x_{n+1} = f(x_n, x_{n-1}, \dots, x_0). \quad (2.9)$$

V této práci je použit modul `random` v programovacím jazyce Python. Python využívá Mersenne Twister jako hlavní generátor pseudonáhodných čísel. Téměř všechny funkce modulu `random` využívají základní funkci „`random()`“, která generuje rovnoměrná čísla v intervalu $(0; 1)$ [50].

2.7.2 Transformace pseudonáhodných čísel

Po vygenerování náhodných čísel v intervalu $(0; 1)$, je potřeba tato čísla převést na obecný interval $(a; b)$, jelikož používáme oříznuté distribuční funkce. Kde $(a; b)$ představuje spodní a horní hranice intervalu. V této práci jsou generovány hodnoty řídicí se určitým rozdělením pravděpodobnosti, proto zde je použita metoda inverzních transformací. To znamená, že jsou použity inverzní distribuční funkce jednotlivých pravděpodobnostních rozdělení, viz obrázky 2.11, 2.13 [49]. Pro řešený příklad jsou použity:

1. Inverzní distribuční funkce rovnoměrného rozdělení

$$F^{-1}(p) = a + p(b - a), \quad (2.10)$$

kde: $0 < p < 1$,
 a je spodní hranice intervalu,
 b je horní hranice intervalu.

2. Inverzní distribuční funkce normálního rozdělení (Gaussovo rozdělení)

$$F^{-1}(p) = \mu + \sigma\sqrt{2} \operatorname{erf}^{-1}(2p - 1), \quad (2.11)$$

kde: $0 < p < 1$,
 μ je střední hodnota,
 σ je směrodatná odchylka.

3. Inverzní distribuční funkce Gumbelova rozdělení

$$F^{-1}(p) = \mu - \beta \ln(-\ln(p)), \quad (2.12)$$

kde: $0 < p < 1$,
 μ je střední hodnota,
 β je měřítko.

4. Inverzní distribuční funkce logaritmickeo-normálního rozdělení

$$F^{-1}(p) = \exp(\mu + \sqrt{2\sigma^2} \operatorname{erf}^{-1}(2p - 1)), \quad (2.13)$$

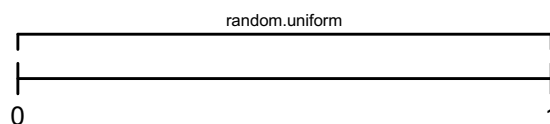
kde: $0 < p < 1$,
 μ je střední hodnota,
 σ je směrodatná odchylka.

2.7.3 Generování vstupních parametrů metodou Monte Carlo

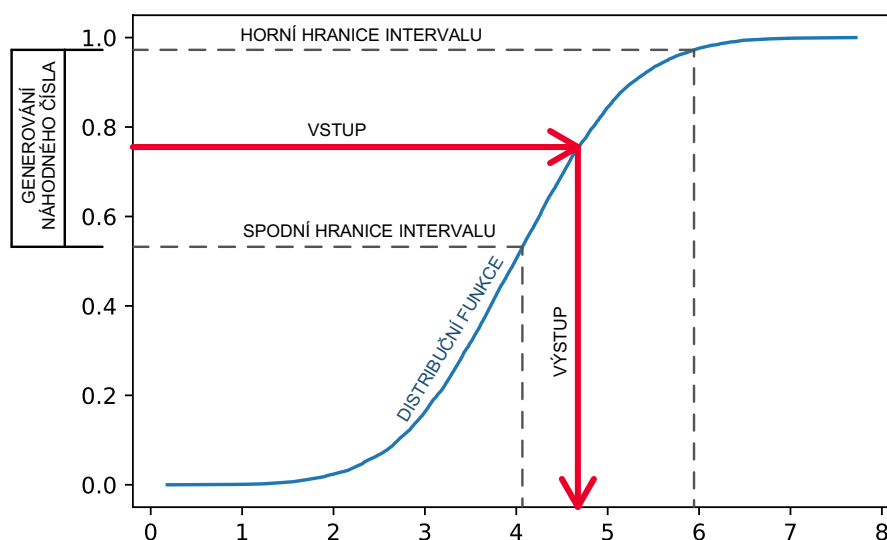
Konkrétní případ použití metody Monte Carlo lze dle výše uvedeného postupu rozdělit do 3 hlavních kroků. Prvním z nich je generování náhodných čísel v intervalu $(0; 1)$ pomocí funkce „random“, viz obrázek 2.10. Čísla generována v tomto intervalu mají rovnoměrné rozdělení, vygenerování každého čísla v intervalu má stejnou pravděpodobnost. Druhým krokem je transformace těchto generovaných čísel na řešený interval. Třetím krokem je

transformace náhodných čísel pomocí rovnic (2.10, 2.11, 2.12, 2.13) inverzních distribučních funkcí. Tyto rovnice transformují náhodná čísla na konkrétní hodnoty návrhové hustoty požárního zatížení, faktoru otvorů, součinitele b a rychlosti rozvoje požáru. Výsledné hodnoty se dále dosadí do parametrické teplotní křivky.

Protože se jedná o oříznuté pravděpodobnostní rozdělení, horní a spodní hranice intervalů byla určena pomocí distribučních funkcí jednotlivých rozdělení. Schematický postup je vidět na obrázku 2.11.



Obrázek 2.10: Schéma generování náhodných čísel v intervalu $(0; 1)$ metodou Monte Carlo.



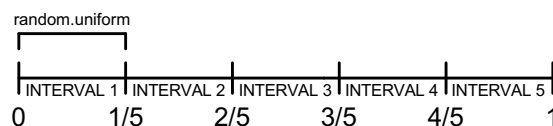
Obrázek 2.11: Schéma generování vstupních parametrů pomocí inverzní distribuční funkce metodou Monte Carlo.

2.7.4 Generování vstupních parametrů metodou Latinských Nadkrychlí

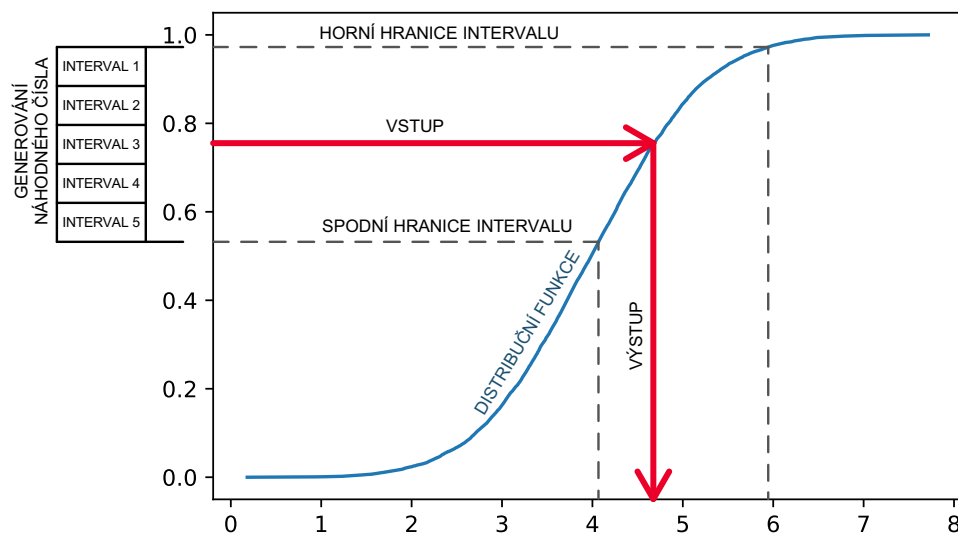
Konkrétní případ použití metody Latinských Nadkrychlí lze dle výše uvedeného postupu rozdělit do 4 hlavních kroků. Prvním z nich je rozdělení intervalu $(0; 1)$ na n stejných intervalů. V rámci intervalu je pomocí funkce „random.uniform“ generováno náhodné číslo, viz 2.12. Čísla generována v intervalech mají rovnoměrné rozdělení, vygenerování každého čísla v intervalu má stejnou pravděpodobnost. Druhým krokem je transformace těchto generovaných čísel na řešený interval, případně podintervaly, viz obrázek 2.13. Třetím krokem je transformace náhodných čísel pomocí rovnic (2.10, 2.11, 2.12, 2.13) inverzních distribučních funkcí. Rovnice transformují náhodná čísla na konkrétní hodnoty návrhové hustoty

požárního zatížení, faktoru otvorů, součinitele b a rychlosti rozvoje požáru. Čtvrtým krokem je náhodné vybrání z intervalů každého vstupního parametru pro jednu simulaci, viz obrázek 2.14. Pro tento krok je použita funkce „random.shuffle“. Tento krok je nezbytný, jinak by pro jednotlivé simulace byly použity sady vstupních parametrů vždy pro interval 1,2,3 až n , což by mělo za následek chybné výsledky. Pro náhodné vybrání z jednotlivých intervalů jsou použity permutace vstupních parametrů, viz obrázek 2.14. Výsledné hodnoty se dále dosadí do parametrické teplotní křivky.

Protože se jedná o oříznuté pravděpodobnostní rozdělení, horní a spodní hranice intervalů je určena pomocí distribučních funkcí jednotlivých rozdělení. Schematický postup je vidět na obrázcích 2.13.



Obrázek 2.12: Schéma generování náhodných čísel v intervalu (0; 1) metodou Latinských Nadkrychlí.



Obrázek 2.13: Schéma generování vstupních parametrů pomocí inverzní distribuční funkce metodou Latinských Nadkrychlí.

<i>gtd</i>	<i>O</i>	<i>b</i>	random.shuffle	<i>gtd</i>	<i>O</i>	<i>b</i>
1	1	1		5	4	5
2	2	2		1	1	3
3	3	3		4	5	4
4	4	4		2	3	1
5	5	5		3	2	2

Obrázek 2.14: Schématický postup použití permutací pro vstupní parametry.

2.8 Použité rozdělení pro jednotlivé parametry

Při použití metod Monte Carlo a Latinských Nadkrychlí se vstupní údaje modelují pomocí distribučních funkcí spojité veličiny a hustoty pravděpodobnosti. Je mnoho pravděpodobnostních rozdělení a s nimi souvisejících distribučních funkcí, např. Cauchyho rozdělení, Studentovo rozdělení, Rovnoměrné rozdělení [26].

Pro parametrickou teplotní křivku byly v rámci dohledaných podkladů použity níže vypsané distribuční funkce:

- Rovnoměrné rozdělení,
- Normální rozdělení (Gaussovo rozdělení),
- Gumbelovo rozdělení (Extreme I),
- Logaritmicko-normální rozdělení (log-normální rozdělení).

2.8.1 Rovnoměrné rozdělení

Rovnoměrné rozdělení má konstantní hustotu pravděpodobnosti (přiřazuje všem hodnotám náhodné veličiny se stejnou pravděpodobností) v intervalu (a, b) a nulovou hustotu pravděpodobnosti mimo interval, viz obrázek 2.15.

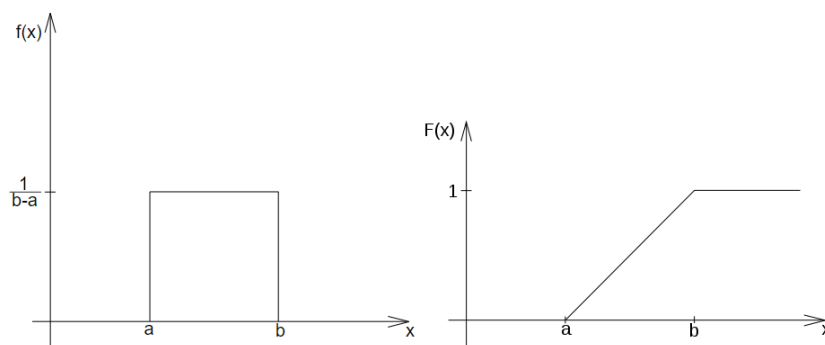
Značení: $X \sim R(a, b)$,

Parametry: $a, b \in \mathbb{R}; a < b$,

Nosič: $X \in (a, b)$,

Hustota:
$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{pro } x \in (a, b), \\ 0, & \text{pro } x \notin (a, b) \end{cases}$$

Distribuční funkce:
$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & x > b \end{cases}$$



Obrázek 2.15: Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce rovnoměrného rozdělení.

2.8.2 Normální rozdělení (Gaussovo rozdělení)

Normální, neboli Gaussovo rozdělení pravděpodobnosti je jedno z nejdůležitějších rozdělení pravděpodobnosti spojité náhodné veličiny. Tímto rozdělením pravděpodobnosti se sice přesně řídí jen málo náhodných veličin, ale jeho význam spočívá v tom, že za určitých podmínek dobře aproximuje řadu jiných pravděpodobnostních rozdělení (spojitých i diskrétních) [35].

Náhodná veličina X má v celém základním souboru normální rozdělení závislé na střední hodnotě μ a směrodatné odchylce $\sigma > 0$, která charakterizuje variabilitu náhodné veličiny X [36, 38].

Značení: $X \sim N(\mu, \sigma)$,

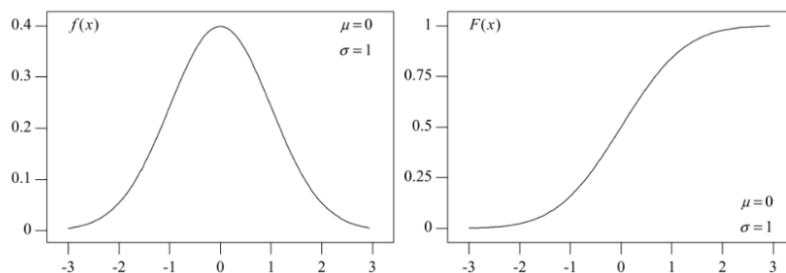
Parametry: $\mu \in \mathbb{R}; \sigma^2 > 0$,

Nosič: $X \in \mathbb{R}$,

Hustota: $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$, pro $x \in \mathbb{R}$,

Distribuční funkce: $F(x) = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$, kde výpočet distribuční funkce.

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} du,$$



Obrázek 2.16: Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce normálního rozdělení, převzato z: [38].

2.8.3 Gumbelovo rozdělení (Extreme I)

Gumbelovo rozdělení, též extrémní rozdělení typu I. Jedná se o parametrické rozdělení pravděpodobnosti [26]. Z obrázku 2.17 je vidět, že jde o asymetrické rozdělení.

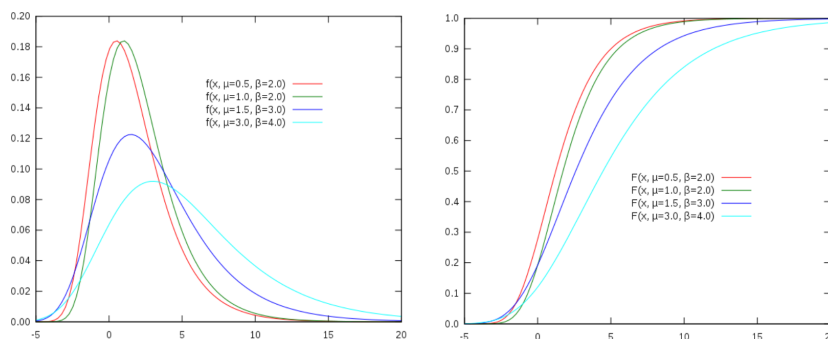
Značení: $X \sim G(\mu, \beta)$,

Parametry: $\mu \in \mathbb{R}; \beta > 0$,

Nosič: $X \in \mathbb{R}$,

Hustota: $f(x) = \frac{1}{\beta} e^{\left(-\frac{x-\mu}{\beta} - e^{-\frac{x-\mu}{\beta}}\right)}$, pro $x \in \mathbb{R}$

Distribuční funkce: $F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\beta}}}$, pro $x \in \mathbb{R}; \beta > 0$



Obrázek 2.17: Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce Gumbelova rozdělení, převzato z: [40].

2.8.4 Logaritmicko-normální rozdělení (log-normální rozdělení)

Logaritmicko-normální rozdělení má dva parametry μ a σ . Toto rozdělení často mívají veličiny, které nabývají svých hodnot v důsledku velkého množství vlivů [38]. Jedná se o asymetrické rozdělení.

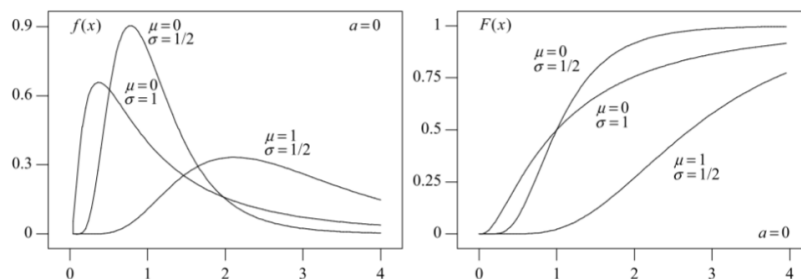
Značení: $X \sim \text{LN}(\mu, \sigma)$,

Parametry: $\mu \in \mathbb{R} \sigma^2 > 0$,

Nosič: $X \in \mathbb{R}$,

Hustota: $f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-0,5\frac{(\ln x - \mu)^2}{\sigma^2}}, & \text{pro } x \in (-\infty, 0) \\ 0, & \text{pro } x \in (0, +\infty) \end{cases}$

Distribuční funkce: $F(x) = \begin{cases} \Phi\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right), & \text{pro } x \in (-\infty, 0) \\ 0, & \text{pro } x \in (0, +\infty) \end{cases}$



Obrázek 2.18: Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce logaritmicke-normálního rozdělení, převzato z: [38].

2.8.5 Návrhová hustota požárního zatížení

Hustota požárního zatížení je pro parametrickou křivku popsána v ČSN EN 1991-1-2, příloze E, tabulka 2.1, v které jsou hodnoty pro vybrané provozy. Jsou zde hodnoty průměru a 80 % kvantilu, tyto hodnoty vychází z Gumbelova rozdělení [1].

V tabulce 2.2 jsou sepsány údaje, které již byly použity pro statistické vyhodnocení požáru pomocí stochastických postupů a metod. V rámci těchto odborných publikací bylo nejčastěji použito Gumbelovo rozdělení [27, 28, 29, 33, 31], dalším použitým rozdělením bylo logaritmicke-normální [41]. Pro tyto odborné publikace byl většinou použit následující postup. Vyhledání odborných článků, které měřily skutečné požární zatížení. Výsledná hodnota pak byla určena i s přihlédnutím k normovým hodnotám, viz tabulka 2.1.

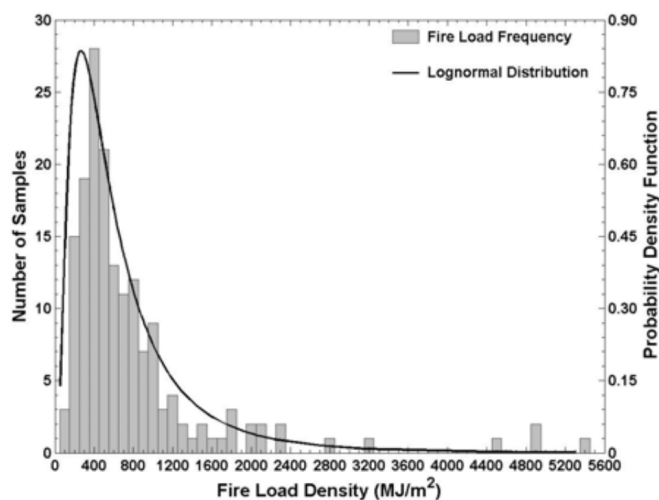
V [29, 30] byly použity údaje měřené v 23 typických kancelářských budovách v USA. Toto měření bylo publikováno v roce 1976. Musíme brát v úvahu, že vybavení budov se od té doby změnilo. Používají se více hořlavé materiály, tuto úvahu potvrzují získané informace z [43].

Tabulka 2.1: Hustoty požárního zatížení $q_{f,d}$ [MJ m^{-2}], převzato z ČSN EN 1991-1-2.

Provoz	Průměr	80 % kvantil
byty	780	948
nemocnice (pokoje)	230	280
hotely (pokoje)	310	377
knihovny	1500	1824
kanceláře	420	511
školní třídní	285	347
nákupní centrum	600	730
divadla (kina)	300	365
doprava (prostory pro veřejnost)	100	122
POZNÁMKA 80% kvantil je stanoven za předpokladu Gumbelova rozdělení		

V případě práce [33] autoři brali v úvahu EC1 a odborný článek [43]. Měření ukázala vyšší hustotu požárního zatížení až o 40 %. Rozsah hustoty požárního zatížení byl proto zvolen tak, aby pokrýval všechny prostory od řídce vybavených (učebna, 347 MJ/m^2) až po hustě zatížené (obchodní kancelář, 1315 MJ/m^2).

V práci [41] bylo jednou použito logaritmicko-normální rozdělení, měření proběhla na 168 komerčních zařízeních. Jednalo se o obchody s nehořlavými materiály až po knihkupectví, sklad knihkupectví, obchod s obuví a papírnictvím. Na obrázku 2.19 je vidět že v levé části grafu jsou skutečné hodnoty hustoty požárního zatížení hezky popsány, v pravé části jsou tři hodnoty mimo distribuční funkci, jedná se o výše zmíněné knihkupectví, sklad knihkupectví, obchod s obuví a papírnictvím.



Obrázek 2.19: Četnosti hustoty požárního zatížení 168 sledovaných obchodů, převzato z: [41].

Tabulka 2.2: Statistické vlastnosti návrhové hustoty požárního zatížení.

Provoz	Střední hodnota [MJ m ⁻²]	Variační koeficient	Směrodatná odchylka [MJ m ⁻²]	Citlivost	Rozmezí hodnot [MJ m ⁻²]	Zdroj
Gumbelovo rozdělení						
Kanceláře	564	0,62	N	0,931	N	[27]
Kanceláře	564	0,62	N	0,0185	N	[28]
Kanceláře	564	0,62	N	N	N	[29]
Kanceláře	564	0,62	N	0,931	N	[30]
Kanceláře	411	0,3	N	N	347-1315	[33]
Kanceláře	420	N	126	N	N	[31]
Archiv	1780	N	1260	N	N	[31]
Kanceláře	420	N	126	N	25-1200	[42]
Logaritmicko-normální rozdělení						
Komerční p.	747	N	832	N	56-5305	[41]
N = nedefinováno						

Porovnání vhodně zvolené hustoty pravděpodobnosti a distribuční funkce pro naměřenou návrhovou hustotu požárního zatížení

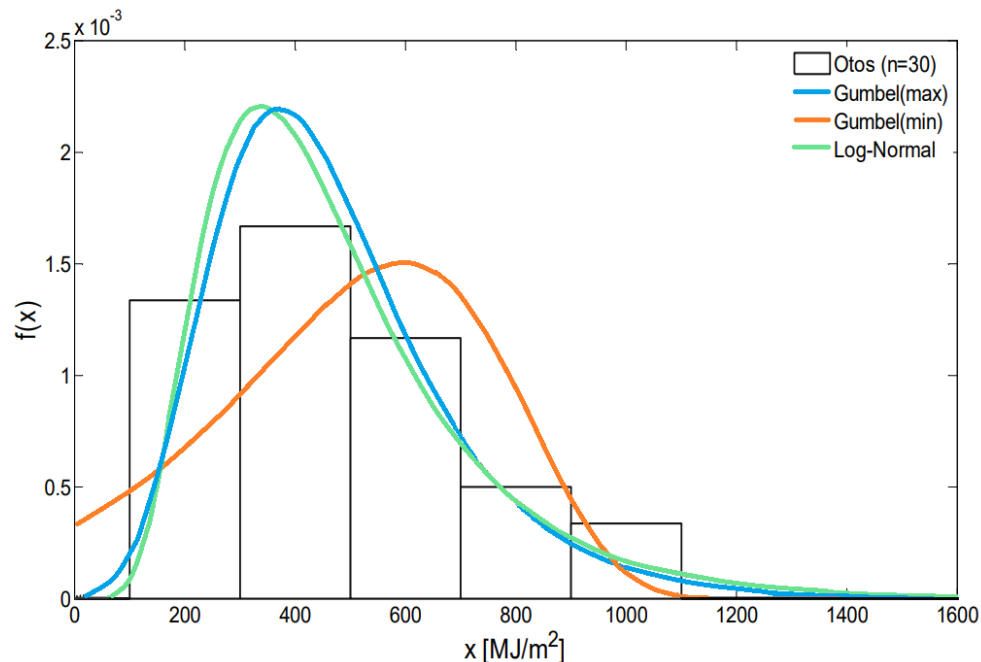
V odborném článku [34] bylo zkoumáno, jak dobře popisují požární zatížení jednotlivé distribuční funkce. Bylo zde měřeno 30 objektů občanské vybavenosti. Jedná se o objekty

z oblasti Seinäjoki ve Finsku.

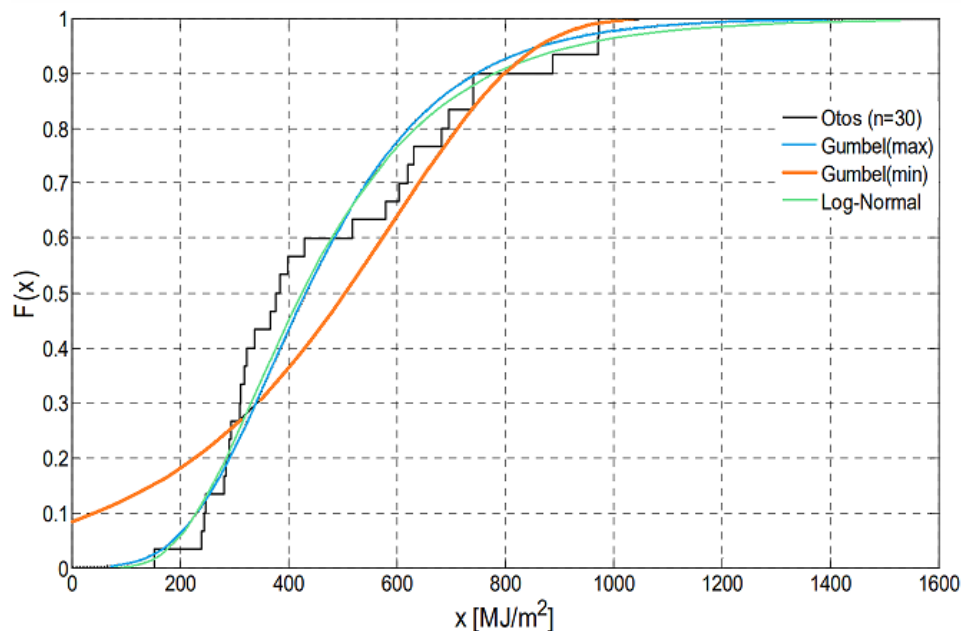
Zkoumané typy obchodů byly: prodejny potravin (9), prodejny nábytku (2), prodejna dekorací (1), prodejny domácích spotřebičů (2), železářství (1), videopůjčovna (2), hračkářství (1), prodejna sportovních potřeb (1), drapérie (1), optika (1), knihkupectví (2), prodejny obuvi (2), prodejna oděvů (3), prodejna tašek (1) a drogerie (1). Přidružené prostory související s obchody byly většinou sklady (17), společenské prostory (4) a kanceláře.

Naměřenými hodnotami byly proloženy křivky hustoty pravděpodobnosti a distribuční funkce. Jedná se o funkce logaritmicko-normálního, Gumbelova (maximální), Gumbelova (minimální) rozdělení. Na obrázku 2.20 a 2.21 jsou grafy s jednotlivými funkcemi, už pohledem na tyto grafy nejlépe odpovídá výsledkům logaritmicko-normálního rozdělení. Pomocí χ^2 – testu bylo zjištěno, že naměřená a vypočtená funkce hustoty požárního zatížení odpovídá logaritmicko-normálnímu rozdělení výrazně spolehlivěji než Gumbelovu (minimální) rozdělení a o něco spolehlivěji než Gumbelovo (maximální) rozdělení. V případě přidružených prostorů jsou výsledky odpovídající.

Závěrem tedy je, že logaritmicko-normální rozdělení popisuje měření založené na hustotě požárního zatížení nejspolehlivěji. V případě Gumbelova (maximálního) rozdělení však odchylka není významná. Autoři tvrdí, že 80% kvantil z EC1 730 MJ/m² je vhodná charakteristická hodnota pro návrh komerčních prostorů s výjimkou skladů a přidružených prostorů. V rámci této studie se požární zatížení skladů a přidružených prostorů naměřilo 1,5krát větší než v obchodech. Zejména požární zatížení ve skladech se může značně lišit a musí být stanoveno podle druhu, množství a umístění zboží.



Obrázek 2.20: Přizpůsobené funkce hustoty pravděpodobnosti požárního zatížení $f(x)$ pro obchodní domy. Změřená hustota požárního zatížení je vyjádřeny histogramem, převzato z: [34].



Obrázek 2.21: Přizpůsobené distribuční funkce požárního zatížení $F(x)$ pro obchodní domy. Změřená distribuční funkce požárního zatížení je vyjádřena pomocí stupňovité křivky, převzato z: [34].

2.8.6 Faktor otvorů

Pro faktor otvorů bylo použito několik druhů rozdělení, problematika selhání zasklení při požáru je v dnešní době aktuální. Ze stavebních výkresů lze vyčíst rozměry oken zcela jednoznačně, toto neplatí o samotném chování zasklení při požáru. Dnes je běžným standardem dvojitě a trojitě zasklení, které má vyšší odolnost proti požáru. Teoreticky by se v pravděpodobnostním hodnocení mohlo v rozsahu distribuční funkce zohlednit dodatečné přidání otvorů v rámci rekonstrukcí nebo přísávání vzduchu pomocí vzduchotechnických instalací anebo přímo instalačními šachtami.

Další faktor ovlivňující selhání zasklení je druh skla: drátěné sklo, bezpečnostní sklo či obyčejné. Zasklené otvory tedy často odolávají požáru a nemusí dojít k plnému vysypání skla. V odborné literatuře se neuvažují jen situace, kdy skla jsou 100% rozbitá. Takto uvažované podmínky by neodpovídaly realitě. Tomuto faktu se přizpůsobily např. normy ČSN 73 0802 a ČSN 73 0804, zde se zasklení s požární odolností E 15 (sklo s drátěnou vložkou, tvrzeným či bezpečnostním sklem, skleněnými tvárnicemi) nezapočítávají do ventilace. Tato formulace byla v normě upravena v roce 2000 pro ČSN 73 0802 a v roce 2002 pro ČSN 73 0804.

Obecně se jedná o parametr těžko předvídatelný. Základní parametry pro porušení skla jsou závislé na intenzitě tepelného toku, tepelném gradientu, nerovnoměrném zahřívání.

K problematice selhání skla bylo publikováno několik odborných článků, některé se zabývají teplotou plynů nebo teplotou skla, kdy se sklo poruší, například publikace [44]. Práce je také doplněna popisem toho, jak se skla porušují. Tyto údaje jsou cenné, proto abychom si uvědomili, že problematiku ventilace není jednoduché přesně popsat. V pub-

likaci [44] byla zejména zkoumána teplota plynů a čas, při kterém se okna poruší. Tyto výpočty byly podloženy zkouškou, bohužel zkoumaný vzorek není reprezentativní pro tuto práci, z hlediska dostatečného množství vzorků.

Dalším zdrojem informací byla rozsáhlá práce [45], v které se zkoumaly zejména první praskliny skel v závislosti na čase nebo na teplotě. Výsledky jsou prokládány distribučními funkcemi. Autorům se povedlo jednotlivá selhání dobře popsat. Aplikovat tyto výsledky na modelu parametrické křivky je komplikované, narážíme zde na limity použitelnosti.

Pro vstupní údaje této práce jsou statistické vlastnosti vypsány v tabulce 2.3. Jedná se o data, která byla už použita při statistickém hodnocení požáru. Autoři zde používali spíše inženýrský odhad založený na vlastním úsudku a některých publikacích zkoumajících ventilaci při požáru. V odborných článcích [27, 30] byla použita konstantní hodnota 0,04 MJ/m². V práci [33] zvolili rovnoměrné rozdělení od 0,02 do 0,2 MJ/m², což je vlastně rozmezí, které dovoluje norma. Autoři zde chtěli pokrýt všechny možnosti, které mohly nastat.

V článku [29] uvažovali faktor odvětrání jako snadno určitelný ze stavebních výkresů. Uvažovali, že jmenovité hodnoty jsou průměrné hodnoty při variačním koeficientu 0,05 s normálním rozdělením.

Ve dvou článcích [42, 31] byla použita oříznutá logaritmicko-normální rozdělení. Jako x je zvoleno procento selhání okenních otvorů, tato hodnota je získána pomocí logaritmicko-normálního rozdělení, výsledná hodnota je součin (1-x) a faktoru otvorů. Takto uvažovaný parametr odvětrání reprezentuje spíše myšlenku, že se okenní otvory poruší jen z části, ale nedochází k celému vysklení.

V tabulce 2.3 jsou uvedené dva druhy dat, první data jsou uvedena v [m^{1/2}], druhé data jsou uvedena v procentech uvažovaných faktorech otvorů.

Tabulka 2.3: Statistické vlastnosti faktoru otvorů.

Střední hodnota [m ^{1/2}]	Variační koeficient	Směrodatná odchylka [m ^{1/2}]	Citlivost	Rozmezí hodnot [m ^{1/2}]	Rozmezí hodnot [%]	Zdroj
Normální rozdělení						
1 × nominální	0,05	N	N	N	N	[29]
Logaritmicko-normální rozdělení						
0,2*	N	0,2	N	N	0-1	[31]
0,2*	N	0,2	N	N	0-1	[42]
Rovnoměrné rozdělení						
N	N	N	N	0,02-0,2	N	[33]
N = nedefinováno						
*výsledná hodnota (1-x), kde x je procento selhání zasklení						

2.8.7 Tepelná pohltivost ohraničujících konstrukcí

V publikacích se uvádějí statistické hodnoty pro tepelnou pohltivost ohraničujících konstrukcí, viz tabulka 2.4 nebo statistické hodnoty objemové hmotnosti ohraničujících konstrukcí, tepelnou vodivost, měrnou tepelnou kapacitu, viz tabulky 2.5, 2.6, 2.7.

V tabulce jsou statistické hodnoty vlastností pro jednotlivé materiály nebo kombinaci materiálů. Převážně bylo použito normální rozdělení [28, 27, 29]. Údaje byly stanoveny na základě statistických dat například z JCSS probabilistic model code [31].

V publikaci [33] bylo použito rovnoměrné rozdělení, rozsah hodnot byl stanoven pomocí normových hodnot EC 1992-1-2 pro obyčejný beton nebo pro lehký beton.

Malta s ocelovými vlákny byla použita jako ochrana pro ocelový nosník, údaje byly zjištěny pomocí metody konečných prvků a statistických údajů.

Vypsání vlastností materiálů v tabulkách 2.4, 2.5, 2.6, 2.7 neuvažují změnu tepelných charakteristik při zvýšené teplotě.

Tabulka 2.4: Statistické vlastnosti součinitele b.

Materiál	Střední hodnota [J m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹]	Variační koeficient	Směrodatná odchylka [J m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹]	Citlivost	Rozmezí hodnot [J m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹]	Zdroj
Normální rozdělení						
SDK	423,5	0,09	N	N	N	[28]
SDK	423,5	0,09	N	N	N	[27]
obyčejný beton	1830	0,094	N	N	N	[29]
Lehký beton	640	0,107	N	N	N	[29]
SDK	423,5	0,09	N	N	N	[29]
50/50 obyčejný beton/SDK	1127	0,1	N	N	N	[29]
Rovnoměrné rozdělení						
Obyčejný beton	N	N	N	N	1159-2200	[33]
N = nedefinováno						

Tabulka 2.5: Statistické vlastnosti objemové hmotnosti.

Materiál	Střední hodnota [kg m ⁻³]	Variační koeficient	Směrodatná odchylka [kg m ⁻³]	Citlivost	Rozmezí hodnot [kg m ⁻³]	Zdroj
Normální rozdělení						
Beton	2400-2600	0,03-0,05	N	N	N	[32]
Malta s ocelovými vlákny	300	0,29	N	-0,3455	N	[28]
Malta s ocelovými vlákny	300	0,29	N	-0,061	N	[29]
Rovnoměrné rozdělení						
Lehký a normální beton	N	N	N	N	1900-2300	[33]
N = nedefinováno						

Tabulka 2.6: Statistické vlastnosti součinitele tepelné vodivosti.

Materiál	Střední hodnota [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Variační koeficient	Směrodatná odchylka [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Citlivost	Rozmezí hodnot [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Zdroj
Logaritmicko-normální rozdělení						
SDK*	0,159	0,28	N	N	N	[29]
Stříkaná ochrana*	0,187	0,24	N	N	N	[29]
Malta s ocelovými vlákny	0,12	0,24	N	2,8536	N	[30]
Rovnoměrné rozdělení						
Lehký a obyčejný beton	1-1,95	N	N	N	1-1,95	[33]
N = nedefinováno						
* hodnoty při teplotě 400-600°C						

Tabulka 2.7: Statistické vlastnosti měrné tepelné kapacity.

Materiál	Střední hodnota [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Variační koeficient	Směrodatná odchylka [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Materiál	Rozmezí hodnot [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Zdroj
Rovnoměrné rozdělení						
Lehký a obyčejný beton	N	N	N	N	840-1100	[33]
N = nedefinováno						

2.8.8 Rychlost rozvoje požáru

V dohledaných odborných člancích nebyl tento parametr uvažován jako proměnný. Souvislost to může mít s prostory, které zde byly modelovány.

V odborných člancích byly uvažovány kancelářské prostory, archiv a komerční prostory. Norma tyto provozy definuje. Pro každý provoz lze rychlost rozvoje požáru poměrně snadno určit. Například v kancelářských prostorech bude pořad stejné palivo jen ho bude třeba více či méně.

Kapitola 3

Řešený příklad

3.1 Popis řešeného příkladu

Řešený příklad má tři části. První část řeší chování parametrické teplotní křivky pomocí citlivostní analýzy. Je zde zkoumaný vliv změny vstupních parametrů na maximální dosažené teploty. Druhá a třetí část se věnuje aplikaci stochastického přístupu na konkrétním požárním úseku, kde je vyhodnocována maximální teplota plynů v požárním úseku. V druhém řešeném příkladu je aplikovaná metoda Monte Carlo. Ve třetím řešeném příkladu je aplikována jak metoda Monte Carlo, tak metoda Latinských Nadkrychlí.

Použitý software

Pro analýzu dat je využit objektově orientovaný programovací jazyk Python, verze 3.9.0. Jako uživatelské prostředí byl použit program Spyder verze 4.1.5. Python je relativně jednoduchý, ale výkonný. Spyder je vývojové prostředí napsané v Pythonu. Spyder je velmi přívětivý pro inženýrskou činnost, což dokazuje jeho hojné využití.



Obrázek 3.1: Loga: vlevo Python, vpravo Spyder, převzato z: [46, 47].

3.2 Citlivostí analýza

Cílem citlivostní analýzy bylo zjištění, jak se mění maximální dosažené teploty v požárním úseku ve vztahu ke vstupním parametrům. Zejména bylo cílem vyšetřit, zda se jedná o monotónní funkci či nikoliv. Pomocí programu Spyder [46] byly vytvořeny 2D a 3D grafy.

Analýza byla provedená následujícím způsobem. Parametrická teplotní křivka dle [1] má 4 vstupní parametry. Dva parametry byly fixní (neměnné) a dva parametry byly proměnné. Pro dostatečnou analýzu charakteristického chování parametrické teplotní křivky bylo nutné v rámci možného rozsahu hodnot měnit i fixní parametry, a to následujícím způsobem. Byla provedena simulace pro dva fixní parametry a dva proměnné parametry. Fixní parametry se v průběhu simulace neměnily a proměnné parametry byly měněny vždy v maximálním dovoleném rozsahu. Pro další simulaci byly vybrány jiné fixní parametry, které po dobu simulace byly zase konstantní. Tento postup byl aplikován tak, aby výsledky poskytly dostatečné množství informací. Sledovaným parametrem byla maximální dosažená teplota pro každou kombinaci. Výsledky jsou vykresleny ve 3D grafech, 2D grafech s vrstevnicemi a 2D grafech.

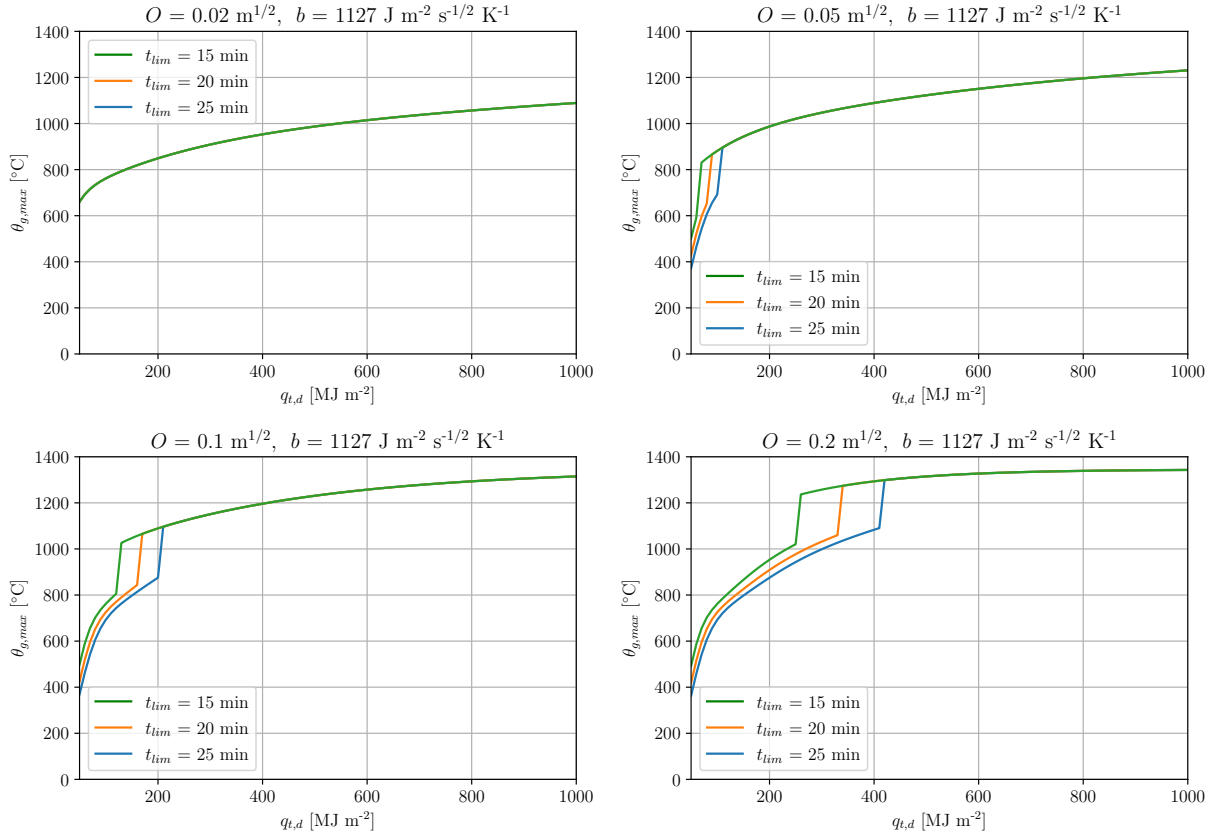
Jako dvojice proměnných byly zvolené následující parametry:

- Návrhová hustota požárního zatížení $q_{t,d}$, faktor otvorů O ,
- Návrhová hustota požárního zatížení $q_{t,d}$, tepelná pohltivost ohraničujících konstrukcí b ,
- Faktor otvorů O , tepelná pohltivost ohraničujících konstrukcí b ,
- Rychlost rozvoje požáru t_{lim} , Návrhová hustota požárního zatížení $q_{t,d}$.

3.2.1 Kombinace č.1

V první kombinaci jsou fixní parametry O, b . Parametr $b = 1127 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}$ je zvolen na základě [29]. Pro ohraničující konstrukce z železobetonu a sádkkartonu. Parametr O je zvolen tak, abychom viděli charakteristické změny průběhu maximální dosažené teploty plynů. Rychlost rozvoje požáru je zadána pro malou rychlost rozvoje požáru, střední rychlost rozvoje požáru, velkou rychlost rozvoje požáru. Hustota požárního zatížení je zvolena v rozsahu $50 \leq q_{t,d} \leq 1000 \text{ [MJ m}^{-2}\text{]}$. Na obrázku 3.2 jsou 4 grafy pro různé hodnoty faktory otvorů. Kromě prvního grafu, kde je vidět jen jedna křivka, jsou vidět 3 křivky, každá křivka je pro jednu ze tří rychlostí rozvoje požáru. Křivky znázorňují maximální teploty v závislosti na hustotě požárního zatížení.

V prvním grafu křivky splývají, všechny mají stejný průběh. Je zde vidět, že při malé ventilaci nemá rychlost rozvoje požáru vliv na maximální teploty. Na dalších grafech je vidět, jak při velké rychlosti rozvoje požáru dochází k vyšším maximálním teplotám i při menší hustotě požárního zatížení. Tento jev přestává platit při vyšších hustotách požárního zatížení, konkrétní hodnotu ovlivňuje faktor otvorů. Pro tuto kombinaci je patrné, že pro všechny křivky se jedná o monotónní funkci rostoucí.



Obrázek 3.2: Výsledné hodnoty kombinace č.1

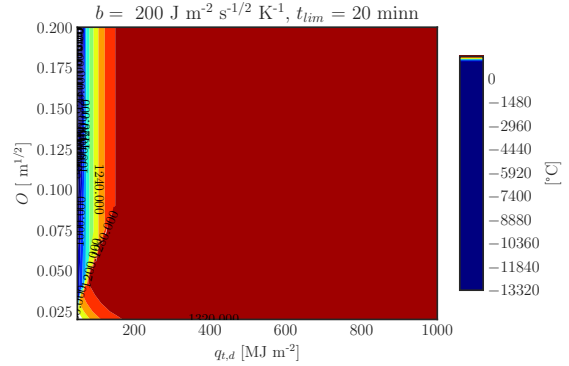
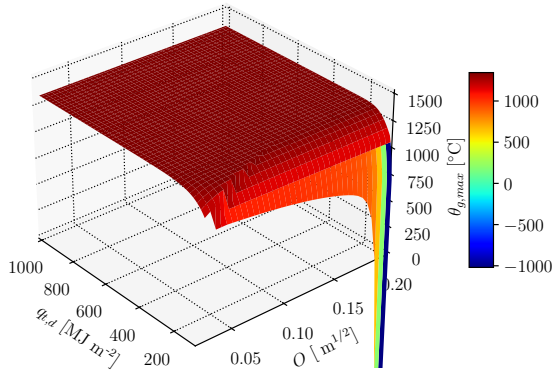
3.2.2 Kombinace č.2

V druhé kombinaci jsou fixní parametry b , t_{lim} . Parametr t_{lim} je zvolen pro střední rychlost rozvoje požáru. Parametr b je zvolen tak, abychom viděli charakteristické změny v průběhu maximální dosažené teploty plynů. Parametr je zde zvolen pro 200, 100, 200 $\text{J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}$, jedná se o hraniční hodnoty intervalu dle ČSN EN 1991-1-2 [1] a prostřední hodnota, je zvolena v polovině tohoto intervalu. Faktor otvorů O je zvolen v rozsahu $0,02 \leq O \leq 0,2 \text{ [m}^{1/2}]$. Hustota požárního zatížení $q_{t,d}$ byla zvolena v rozsahu $50 \leq q_{t,d} \leq 1000 \text{ [MJ m}^{-2}]$. Na obrázku 3.3 jsou 3 3D grafy a 3 2D grafy. Grafy vedle sebe vyjadřují shodné výsledky, jen s jiným vykreslením. Tento postup byl zvolen pro lepší analýzu a přehlednost. Ve 3D grafech jsou na vodorovných osách proměnné parametry a na vertikální ose jsou vykresleny maximální teploty. Ve 2D grafech jsou na osách zobrazeny proměnné parametry a maximální teploty zakresleny pomocí izolinií.

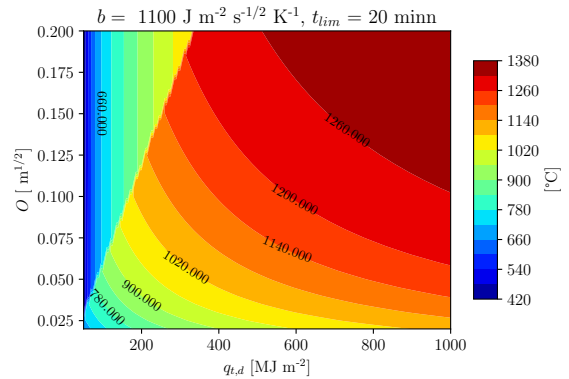
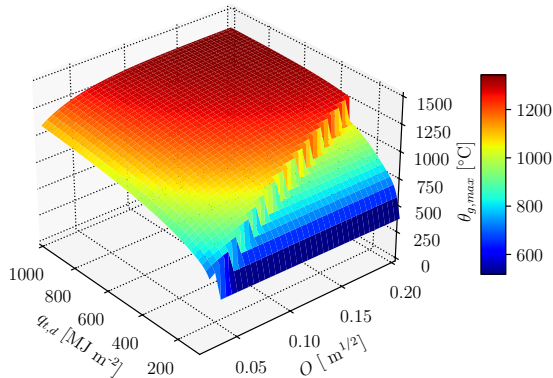
V prvním grafu vidíme, že pro nízkou hodnotu součinitele b dosahuje převážná část kombinací teplotu 1345 °C. Je to maximální teplota, kterou parametrická teplotní křivka umožňuje dosáhnout. V prvním grafu vidíme při kombinaci $q_{t,d} = 100 \text{ MJ m}^{-2}$, $O = 0.2 \text{ m}^{1/2}$, $b = 200 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}$ záporné hodnoty teplot, jedná se o nesmyslné hodnoty související s okrajovými podmínkami parametrické teplotní křivky. Na tuto skutečnost upozornil například publikovaný odborný článek [48]. Tato nepřesnost je způsobena rovnicí A.9 v příloze A z ČSN 1991-1-2 [48]. V dalších grafech je celkem očekávaný vliv souči-

nitele b , čím větší součinitel je, tím jsou maximální teploty nižší. Kdybychom graf proložili úsečkou od $q_{t,d} = 50 \text{ MJ m}^{-2}$ a $O = 0.02 \text{ m}^{1/2}$ do $q_{t,d} = 330 \text{ MJ m}^{-2}$ a $O = 0.02 \text{ m}^{1/2}$, tak uvidíme jak tato úsečka lemuje skok maximálních teplot. Tento skok je přibližně o $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Strmý, ale plynulejší nárůst maximálních teplot je také od $q_{t,d} = 50 \text{ MJ m}^{-2}$ do $q_{t,d} = 220 \text{ MJ m}^{-2}$. Zejména z 2D grafů s izoliniemi je vidět, že pro tyto kombinace se nejedná o monotónní funkci.

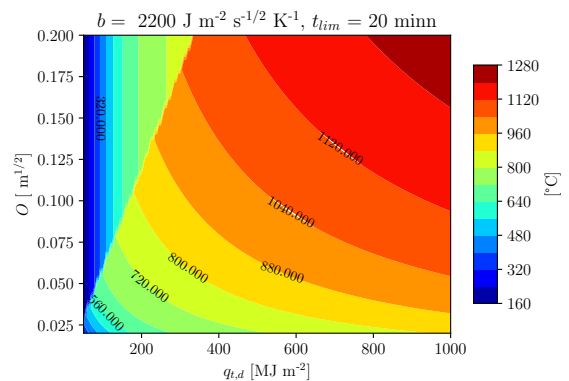
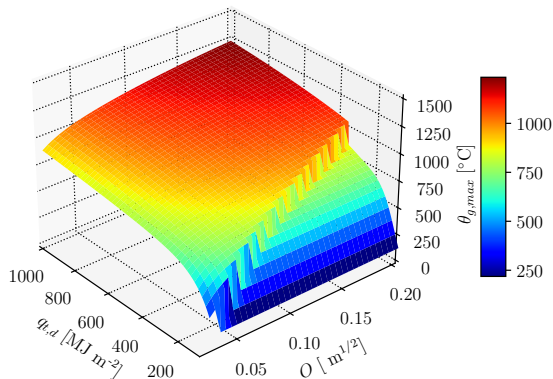
$$b = 200 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}, t_{lim} = 20 \text{ minn}$$



$$b = 1100 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}, t_{lim} = 20 \text{ minn}$$



$$b = 2200 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}, t_{lim} = 20 \text{ minn}$$

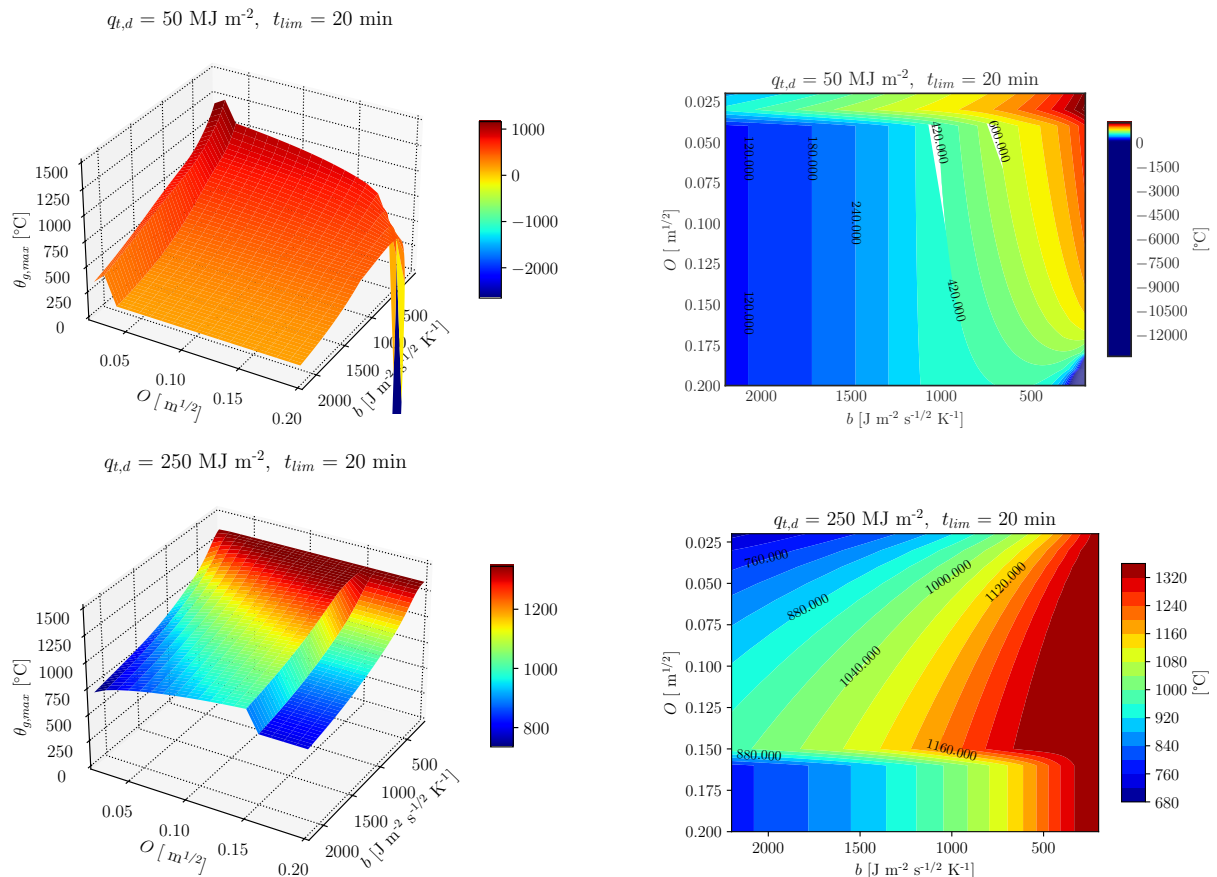


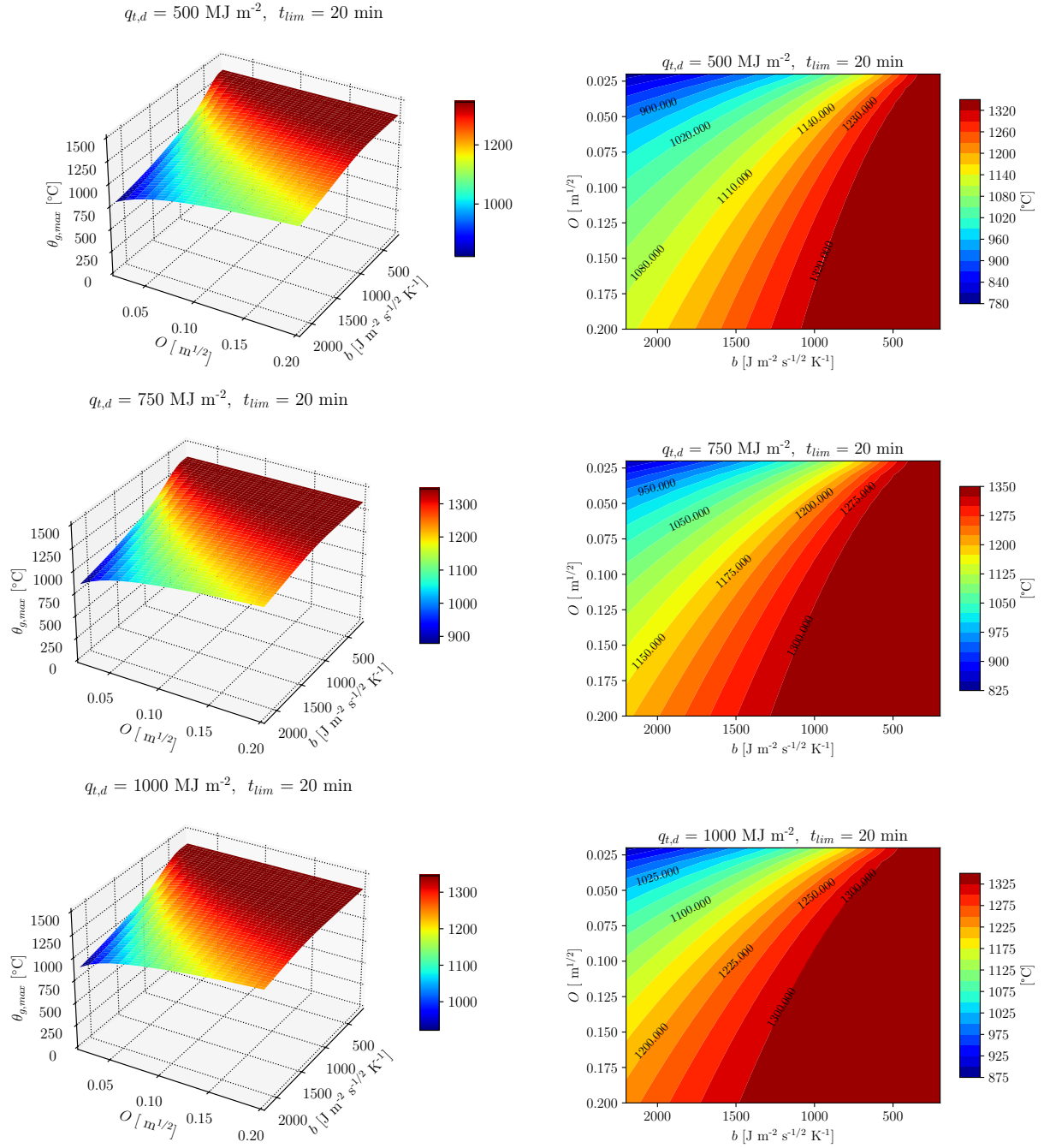
Obrázek 3.3: Výsledné hodnoty kombinace č.2.

3.2.3 Kombinace č.3

V třetí kombinaci jsou fixní parametry $q_{t,d}$, t_{lim} . Parametr t_{lim} je zvolen pro střední rychlost rozvoje požáru. Parametr $q_{t,d}$ je zde zvolen pro 50, 250, 500, 750, 1 000 MJ m⁻², jedná se o hraniční hodnoty intervalu dle ČSN EN 1991-1-2 [1], dále jsou vybrány hodny tak, aby ukazovaly charakteristiku maximálních teplot. Faktor otvorů O je zvolen v rozsahu $0,02 \leq O \leq 0,2$ [m^{1/2}]. Hustota požárního zatížení b byla zvolena v rozsahu $100 \leq b \leq 2200$ [J m⁻² s^{-1/2} K⁻¹]. Na obrázku 3.5 je 5 3D grafů a 5 2D grafů. Grafy vedle sebe vyjadřují shodné výsledky, jen s jiným vykreslením. Tento postup byl zvolen pro lepší analýzu a přehlednost. Ve 3D grafech jsou na vodorovných osách proměně parametry a na vertikální ose jsou vykresleny maximální teploty. Ve 2D grafech jsou na osách zobrazeny proměnné parametry a maximální teploty zakresleny pomocí izolinií.

V prvním grafu vidíme při kombinaci $q_{t,d} = 100$ MJ m⁻², $O = 0,2$ m^{1/2}, a $b = 200$ J m⁻² s^{-1/2} K⁻¹ záporné hodnoty teplot, jedná se o nesmyslné hodnoty. Tato kombinace a s ní související nesmyslné hodnoty nastaly už v kapitole 3.2.2 v kombinaci č.2. V prvním grafu je také vidět velký vliv součinitele b pro malou hustotu požárního zatížení. V prvním a druhém grafu je vidět skokový nárůst maximálních teplot. Tento skok je přibližně o 200 °C. Z citlivostní analýzy vyplývá, že tento skok souvisí s hustotou požárního zatížení, v grafu tři už tento skok není. Při hodnotách nad $q_{t,d} = 500$ MJ m⁻² je průběh teplot klidnější a nedochází k neočekávaným skokům. Jako v kombinaci č.2 se nejedná o monotónní funkci.



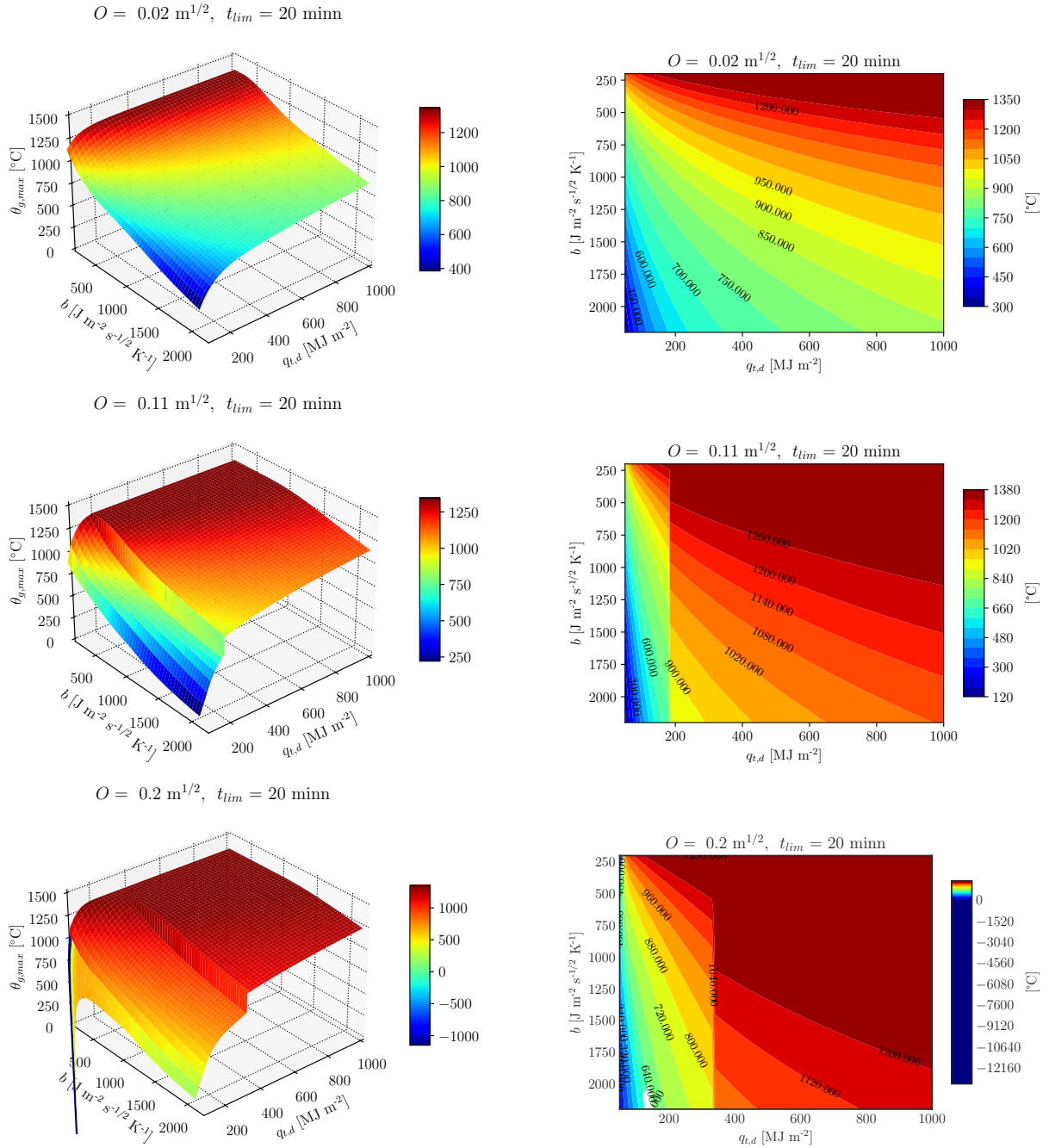


Obrázek 3.5: Výsledné hodnoty kombinace č.3.

3.2.4 Kombinace č.4

Ve čtvrté kombinaci jsou fixní parametry O , t_{lim} . Parametr t_{lim} je zvolen pro střední rychlost rozvoje požáru. Parametr O je zde zvolen pro 0.02, 0.11, 0.2 $m^{1/2}$, jedná se o hraniční hodnoty intervalu dle ČSN EN 1991-1-2 [1] a třetí hodnota, je zvolena v polovině tohoto intervalu. Na obrázku 3.6 jsou 3 3D grafy a 3 2D grafy. Grafy vedle sebe vyjadřují shodné výsledky, jen s jiným vykreslením. Tento postup byl zvolen pro lepší analýzu a přehlednost. Ve 3D grafech jsou na vodorovných osách proměnné parametry a na vertikální ose jsou vykresleny maximální teploty. Ve 2D grafech jsou na osách zobrazeny proměnné parametry a maximální teploty zakresleny pomocí izolinií.

Záporné nesmyslné hodnoty jsou tentokrát v poslední dvojici grafu. Jedná se však o stejné vstupní parametry jako v předchozích kombinacích, $q_{t,d} = 100 \text{ MJ m}^{-2}$, $O = 0.2 \text{ m}^{1/2}$, a $b = 200 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1/2} \text{ K}^{-1}$, viz 3.2.2, 3.2.3. Pro první dvojici je vidět, že maximální teploty mají plynulý, ale strmý průběh. Na druhé a třetí dvojici grafů se znovu objevuje velký skok maximálních teplot přibližně o 200 °C, tento skok je vidět už ve výše zmíněných kombinacích. Jako v kombinaci č.2 a č.3 se nejedná o monotónní průběhy maximálních teplot.



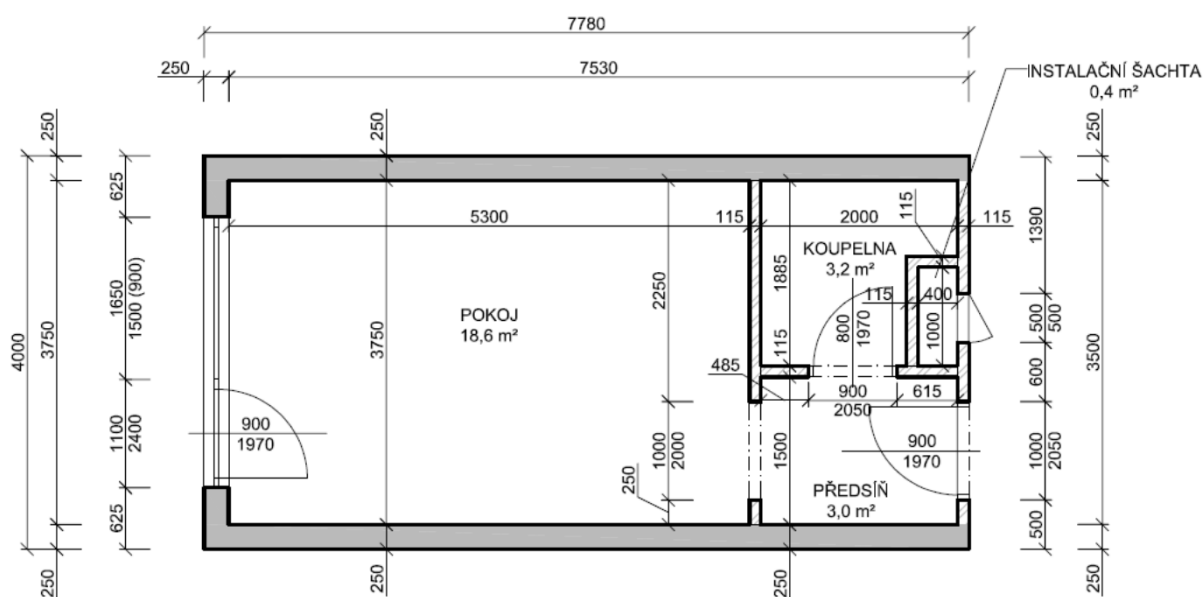
Obrázek 3.6: Výsledné hodnoty kombinace č.4.

3.3 Aplikace Monte Carlo

3.3.1 Určení vstupních parametrů

Pro určení vstupních parametrů vycházíme z požárního úseku hotelového pokoje. Vstupní údaje jsou převzaty z diplomové práce [25]. Hlavní nosný systém tvoří železobetonové stěny, stropní konstrukce tvoří jednosměrně pnutá železobetonová deska. Prostor požárního úseku je rozdělen zděnými příčkami tloušťky 115 mm. Světlá výška je v celém požárním úseku 2600 mm. Schéma požárního úseku viz obrázek 3.7 [25].

V diplomové práci byl nejdříve proveden výpočet dle ČSN EN 1991-1-2. Preskriptivním přístupem byly určeny vstupní údaje, z kterých se následně vycházelo pro určení intervalů pravděpodobnostního přístupu [25].



Obrázek 3.7: Schéma řešeného požárního úseku hotelového pokoje, převzato z: [25].

Návrhová hustota požárního zatížení

Hodnota zjištěná normovým výpočtem byla navýšena o 100 %, viz tabulka 3.1. Důvodem bylo větší využití hořlavých materiálů, například plastů. Dále je také využíváno více elektroniky, s čímž souvisí větší množství kabelů [25].

Faktor otvorů O

Faktor otvorů byl zvolen s ohledem na instalaci dvojskla a trojskla, které se při požáru nemusí vůbec nebo jen částečně porušit, viz kapitola 2.8.6. Výsledný interval byl tedy zvolen od nejnižšího možného faktoru otvorů dle [1] po 100 % vysklených otvorů v požárním úseku, viz tabulka 3.1 [25].

Součinitel b

Ohraničující konstrukce tvoří železobeton. Na stanovený rozsah má vliv objemová hmotnost železobetonu. Pro tento příklad byl použit rozsah součinitel b tak, aby odpovídal objemové hmotnosti od 2300 do 2500 kg/m³, viz tabulka 3.1 [25].

Rychlost rozvoje požáru

Rychlost rozvoje požáru nebyla určena jako proměnný parametr, viz tabulka 3.1. Hotelový pokoj neumožňuje velkou variabilitu provozu. Rychlost rozvoje požáru je tedy uvažována konstantně dle ČSN EN 1991-1-2 [25].

Tabulka 3.1: Rozsah vstupních parametrů pro řešený příklad [25].

Vstupní parametr	Rozsah	Jednotky	Rozdělení
Návrhová hustota požárního zatížení:	$67,036 \leq q_{t,d} \leq 134,072$	MJ m ⁻²	Rovnoměrné
Faktor otvorů:	$0,02 \leq O \leq 0,089$	m ^{1/2}	Rovnoměrné
Součinitel b:	$1831,606 \leq b \leq 2106,419$	J m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹	Rovnoměrné
Rychlost rozvoje požáru:	$t_{lim} = 20$	min	Konstantní

3.3.2 Pravděpodobnostní rozdělení vstupních parametrů

K proměnným vstupním parametrům ($q_{t,d}$, O , b) lze přistupovat jako ke spojitě náhodné veličině. Pro řešený příklad bylo použito rovnoměrné rozdělení. Jedná se tedy o rozdělení, které všem hodnotám náhodné veličiny přiřazuje stejnou pravděpodobnost, viz kapitola 2.8.1. V programu Spyder byla náhodnost vstupních parametrů vypočtena pomocí funkce „random.random()“ z knihovny „numpy“. Viz ukázka kódu pro generování náhodných vstupních parametrů obrázek 3.8.

```
n_rep = 100
s_a = []
for j in range(0,n_rep):
    s = 0
    maxtemps = []
    n_sim = 10
    for i in range(0,n_sim):
        qtd = 67 + np.random.random()*(134-67)
        O = 0.02 + np.random.random()*(0.089-0.02)
        b = 1831 + np.random.random()*(2106.4-1831.6)
        RRP = 2
        maxtemps.append( np.round(ParamTemp(0,qtd,O,b,RRP)[1]))
        temps = []
        for time in times:
            temps.append( ParamTemp(time/60,qtd,O,b,RRP)[0])

        if maxtemps[i] > hledanateplota:
            s = s+1
    s_a.append(s/n_sim)

d = stat.stdev(s_a)*100
```

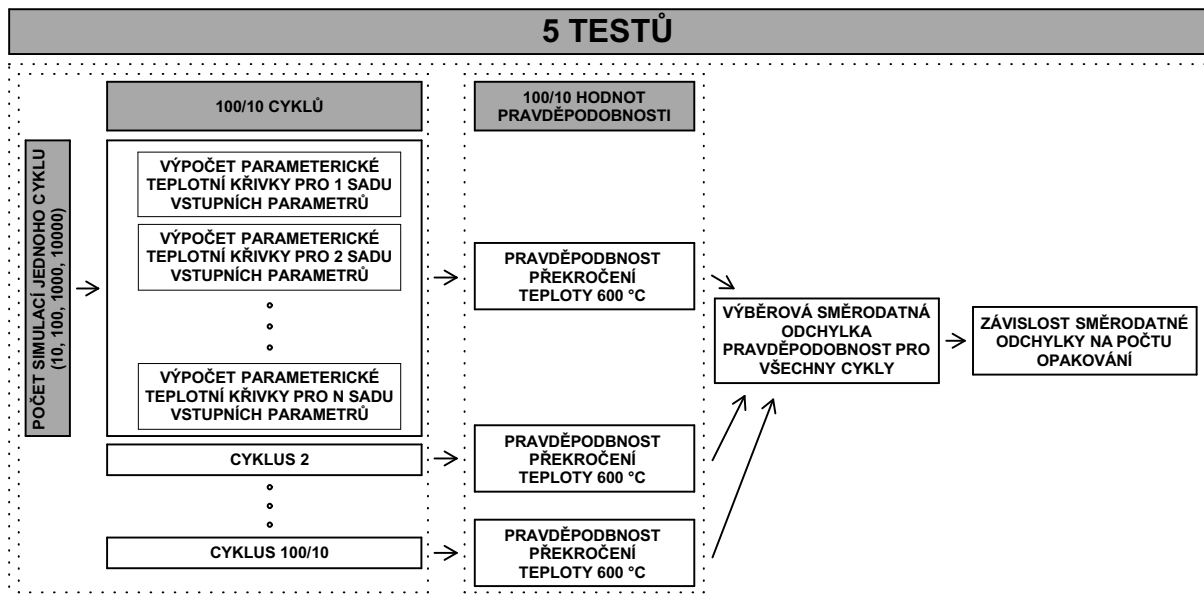
Obrázek 3.8: Ukázka kódu z programu Spyder.

3.3.3 Počet simulací a cyklů

Pro tuto práci je důležité si definovat dva pojmy. Jedná se simulaci a cyklus. Simulace je v rámci této práce definována jako jeden kompletní výpočet parametrické teplotní křivky. Je zde zahrnuto vygenerování vstupních parametrů dle pravděpodobnostního rozdělení a použité metody náhodného výběru, dále výpočet samotné parametrické teplotní křivky a zjištění maximální dosažené teploty plynů, u této teploty je dále zkoumáno, zda překročí hranici 600 °C. Tato teplota byla zvolena jako ilustrativní na základě inženýrského úsudku, při které se očekává porušení konstrukce. Cyklus je v rámci této práce definován jako soubor několika simulací, z kterého se dále určuje pravděpodobnost překročení teploty 600 °C v rámci jednoho cyklu. Zde tedy máme soubor vstupních parametrů, několikrát provedený výpočet parametrické teplotní křivky, několik maximálních teplot, a hodnotu pravděpodobnosti překročení teploty 600 °C. Tyto definované pojmy se vyskytují zejména v obrázku 3.9, kde je znázorněn postup řešení příkladu.

3.3.4 Postup výpočtu metodou Monte Carlo

V programu Spyder je nakódována parametrická teplotní křivka dle ČSN EN 1991-1-2 [1]. Je prováděno 100 cyklů výpočtu. Každý cyklus obsahuje 10, 100, 1 000 nebo 10 000 simulací parametrické teplotní křivky pro náhodné vstupní parametry. Z každého cyklu se určí pravděpodobnost, s jakou byla překročena teplota 600 °C. Máme tedy 100 pravděpodobností pro cykly s 10, 100, 1 000, 10 000 simulacemi. Pro těchto 100 pravděpodobností jsou určeny výběrové směrodatné odchylky. Tyto výběrové směrodatné odchylky jsou pak mezi sebou porovnány v grafu 3.11 a 3.12. Schéma postupu viz obrázek 3.9.

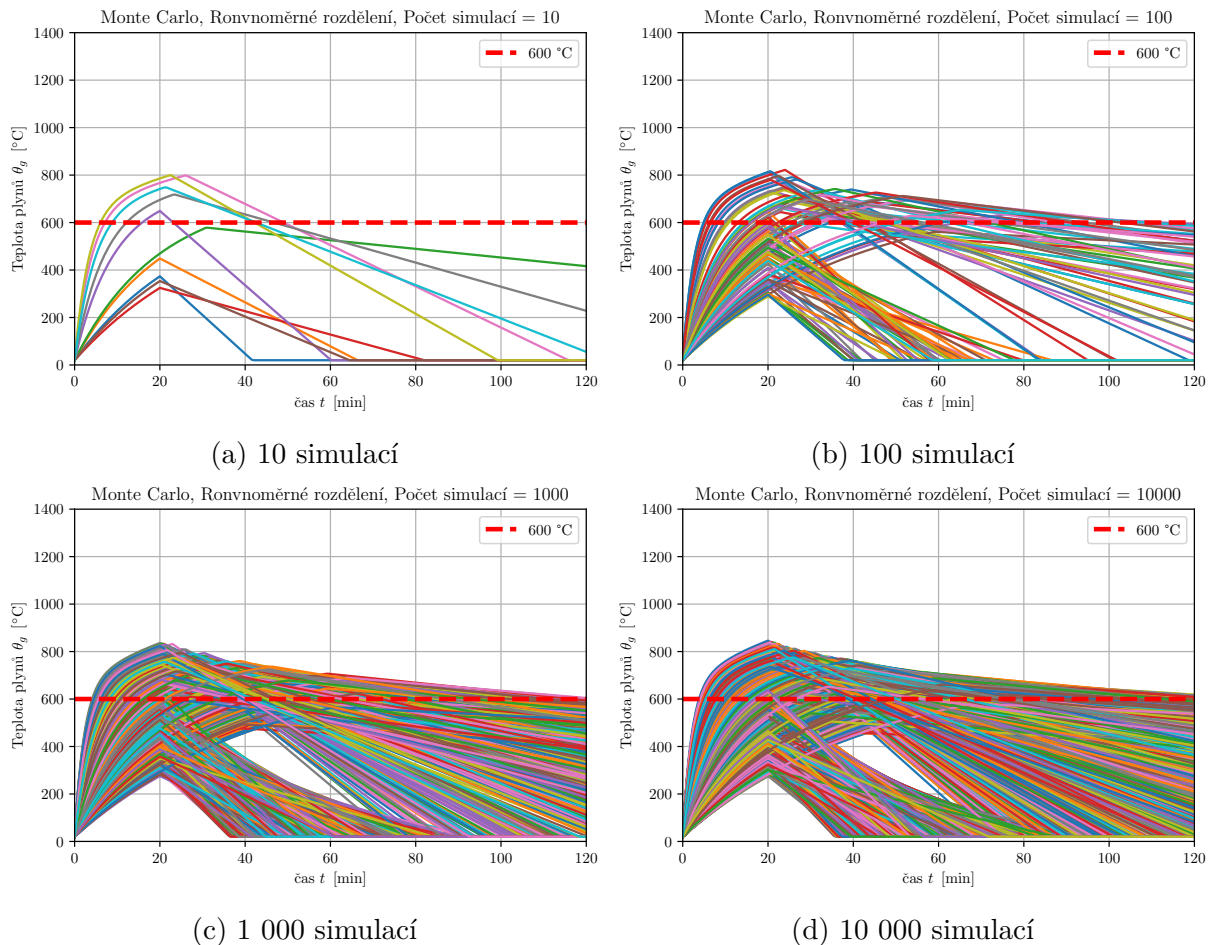


Obrázek 3.9: Schéma postupu řešení příkladu.

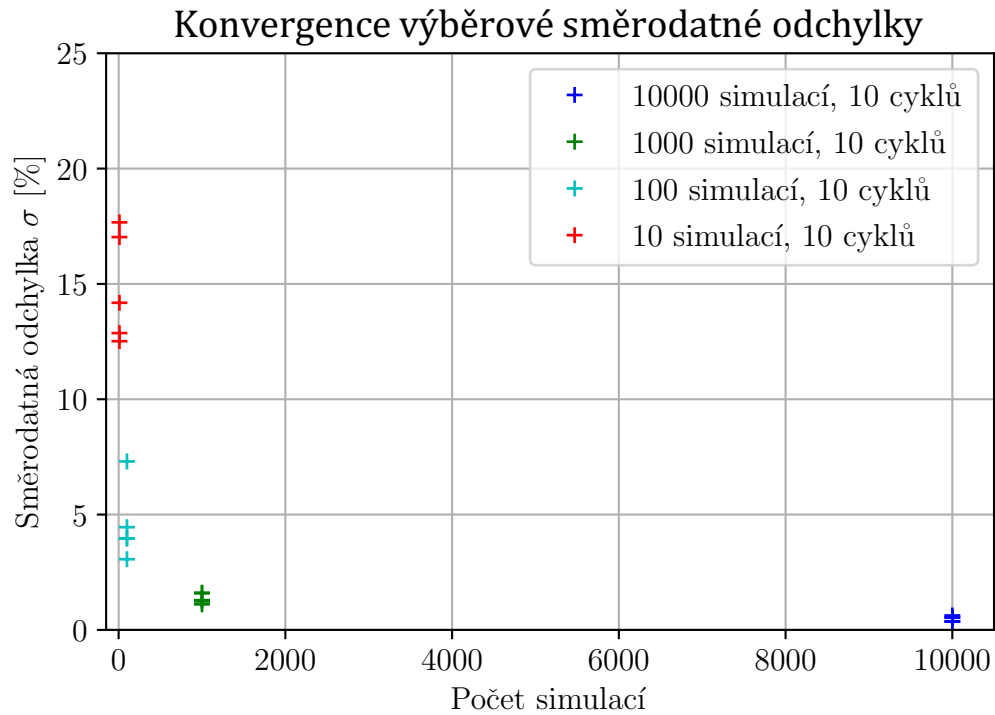
3.3.5 Vyhodnocení výsledků

Na obrázku 3.10 jsou grafy průběhu teplot pro různý počet simulací. Když porovnáme grafy s počtem simulací 10 a 100, uvidíme zde jasné znaky náhodnosti. Jedním z nich je, že pro graf s 10 simulacemi maximální teploty nepřesáhnou 800 °C, zatímco pro graf s 100 simulacemi hranici 800 °C překročí hned několik křivek. Neznamená to však, že čím větší počet simulací, tím vyšších teplot dosáhneme. Pro výpočet jsou vždy stejné podmínky, tedy vygenerování vstupních parametrů v určitém rozsahu, kde každá hodnota má stejnou pravděpodobnost. Výše uvedené značí jen to, že jeden cyklus neobsahuje a nemůže obsahovat všechny možné kombinace.

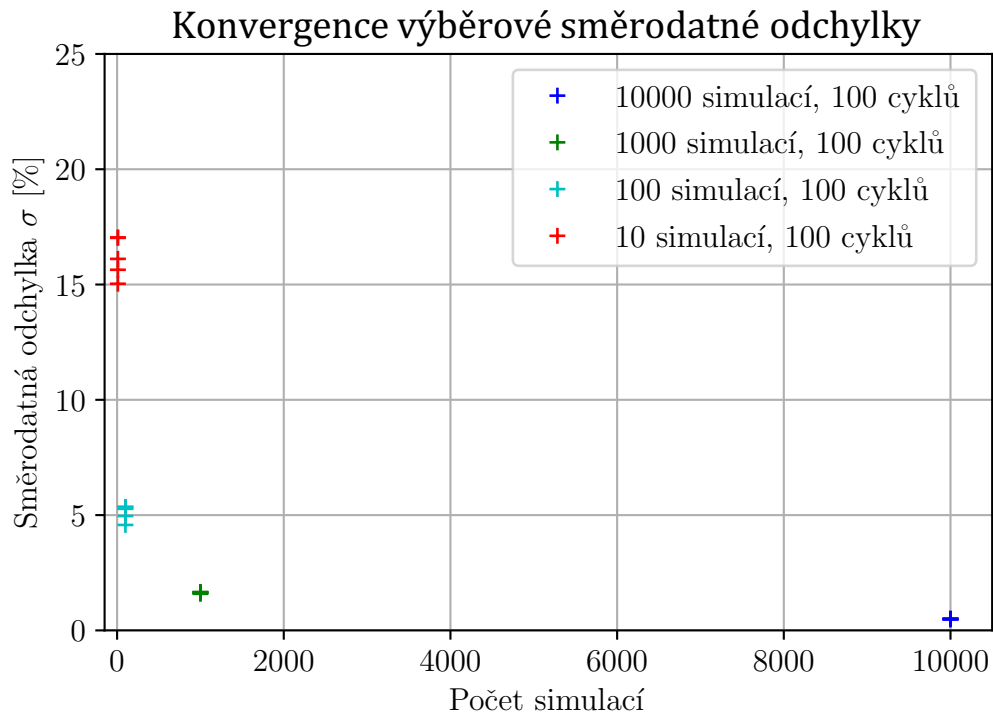
Na obrázcích 3.11 a 3.12. jsou porovnány výběrové směrodatné odchylky v závislosti na počtu simulací a počtu cyklů. Nepřekvapivě s počtem simulací se snižuje hodnota výběrové směrodatné odchylky, a s menším počtem cyklů se zvětšuje rozptyl hodnot výběrových směrodatných odchylek. Nejvýrazněji je to vidět při porovnání 100 simulací, kde pro 10 cyklů výběrová směrodatná odchylka je v rozmezí od 3,1 % do 7,4 %, pro 100 cyklů je v rozmezí od 4,5 % do 5,2 %.



Obrázek 3.10: Výsledky jednoho cyklu metody Monte Carlo, (a) pro 10 simulací, (b) pro 100 simulací, (c) pro 1 000 simulací, (d) pro 10 000 simulací.



Obrázek 3.11: Graf porovnání výběrové směrodatné odchyly v závislosti na počtu simulací při 10 cyklech.



Obrázek 3.12: Graf porovnání výběrové směrodatné odchyly v závislosti na počtu simulací při 100 cyklech.

3.4 Aplikace metody Monte Carlo a metody Latinských Nadkrychlí

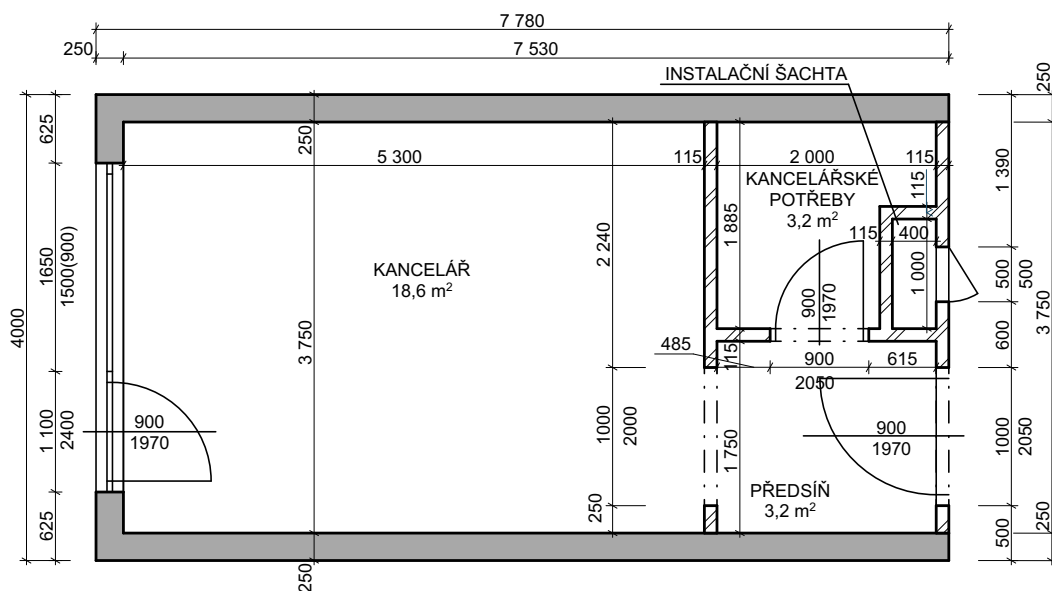
Třetí část řešeného příkladu se zabývá aplikací pravděpodobnostních přístupů na zvoleném konkrétním požárním úseku. Jsou použity dvě metody pro generování náhodných vstupních parametrů do parametrické teplotní křivky dle ČSN EN 1991-1-2. První z nich je metoda Monte Carlo a druhá je metoda Latinských Nadkrychlí. Obecně lze říct, že metoda Latinských Nadkrychlí potřebuje méně simulací k dosažení požadované korelace mezi všemi simulovanými veličinami [26, 32].

Zkoumaným prvkem je, zda je možné metodu Latinských Nadkrychlí použít pro modelování požáru, a jaký vliv má počet simulací a cyklů na rozptyl výsledků. Porovnání proběhne s referenčními hodnotami vstupních parametrů generovanými pomocí metody Monte Carlo.

3.4.1 Určení vstupních parametrů

V této části práce se bude uvažovat prostor využívaný jako kancelář s příslušenstvím. Změna provozu souvisí s dostupností vstupního parametru hustoty požárního zatížení pro kancelářské provozy, které jsou nejlépe dostupné. Hlavní nosný systém tvoří železobetonové stěny, stropní konstrukce tvoří jednosměrně pnutá železobetonová deska. Prostor požárního úseku je rozdělen zděnými příčkami tloušťky 115 mm. Světlá výška je v celém požárním úseku 2600 mm. Schéma požárního úseku viz 3.13 [25].

V diplomové práci byl nejdříve proveden výpočet dle ČSN EN 1991-1-2. Preskriptivním přístupem byly určeny vstupní údaje, z kterých se následně vycházelo pro určení intervalů pravděpodobnostního přístupu. V našem případě používáme kombinaci tohoto postupu se získanými daty z jiných vědeckých prací [25].



Obrázek 3.13: Schéma řešeného požárního úseku kanceláře, převzato z: [25].

Návrhová hustota požárního zatížení

Část vstupních parametrů byla převzata z odborného článku [31], kde se zabývali také náhodností vstupních parametrů a tvorbou matematického modelu. Převzaty jsou hodnoty směrodatné odchylky, střední hodnoty a použité pravděpodobnostní rozdělení. Rozsah hodnot byl stanoven na základě výpočtu obdobně jako v diplomové práci [25]. Spodní hranice byla spočítána na hodnotu 131 MJ m^{-2} , což odpovídá 80% kvantilu Gumbelova pravděpodobnostního rozdělení se vstupními daty z tabulky 3.2. Horní hranice byla spočtena navýšením 80% kvantilu o 100 % na hodnotu 362 MJ m^{-2} . Důvodem bylo větší využití hořlavých materiálů jako například plastů. Dále je také využíváno více elektroniky, s čímž souvisí větší množství kabelů [25]. Konkrétní použité hodnoty jsou vypsány v tabulce 3.2.

Faktor otvorů O

Faktor otvorů byl zvolen s ohledem na instalaci dvojskla a trojskla, které se při požáru nemusí vůbec nebo jen částečně porušit, viz 2.8.6. Vstupní parametry pravděpodobnostního rozdělení, střední hodnoty a směrodatné odchylky byly převzaty z odborných článků [31, 42]. Uvažují zde oříznuté logaritmicko-normální rozdělení. Jako x je zvoleno procento selhání okenních otvorů, x je generováno pomocí logaritmicko-normálního rozdělení. Výsledná hodnota je součin $(1-x)$ a faktoru otvorů. Výsledný interval byl tedy zvolen od nejnižšího možného faktoru otvorů dle ČSN EN 1991-1-2 po 100 % vysklených otvorů v požárním úseku, viz tabulka 3.2. Jak již bylo v dřívější části zmíněno, tento předpoklad spíše uvažuje, že se okenní otvory poruší jen z části [42, 31].

Součinitel b

Ohraničující konstrukce stěn, podlah a stropů požárního úseku tvoří železobeton. Vstupní parametry pravděpodobnostního rozdělení, střední hodnoty a směrodatné odchylky byly převzaty z odborného článku [29]. Uvažovali zde normální rozdělení. Na stanovený rozsah má vliv objemová hmotnost železobetonu. Pro tento příklad byl použit rozsah součinitele b , tak aby odpovídal objemové hmotnosti od 2300 do 2500 kg/m^3 , viz tabulka 3.2 [25].

Rychlost rozvoje požáru

Rychlost rozvoje požáru nebyla určena jako proměnný parametr viz tabulka 3.2. V dohledaných odborných člancích nebyl tento parametr uvažován jako proměnný. Rychlost rozvoje požáru byla tedy uvažována konstantně pro kancelářské prostory dle ČSN EN1991-1-2.

Tabulka 3.2: Rozsah vstupních parametrů pro řešený příklad.

Vstupní parametr	Střední hodnota	Směrodatná odchylka	Rozsah	Jednotky	Rozdělení	Zdroj
Návrhová hustota požárního zatížení	420	126	$131 \leq q_{t,d} \leq 262$	[MJ m ⁻²]	Gumbelovo	[31]
Faktor otvorů	0,2*	0,2	$0,02 \leq O \leq 0,089$	[m ^{1/2}]	Log-normal	[31, 42]
Součinitel b	1830	172,02	$1831 \leq b \leq 2106$	[J m ⁻² s ^{-1/2} K ⁻¹]	Normální	[29]
Rychlost rozvoje požáru			$t_{lim} = 20$	min	Konstantní	
*výsledná hodnota (1-x), kde x je procento selhání zasklení						

3.4.2 Počet simulací a cyklů

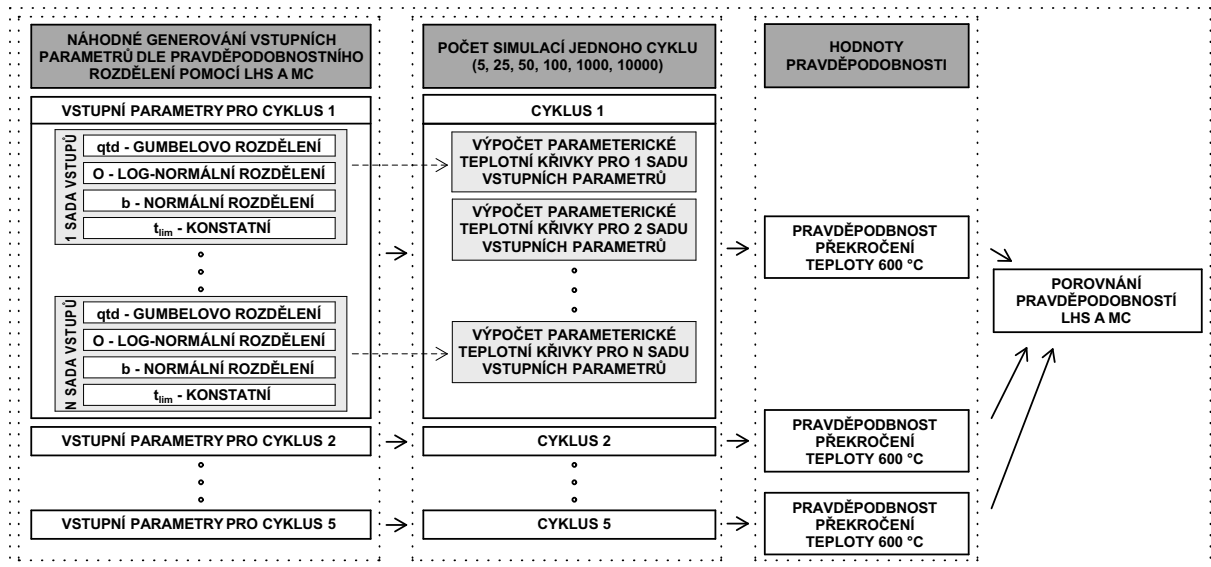
Zkoumaným prvkem bude zda je možné metodu Latinských Nadkrychlí použít pro modelování požáru, a při jakém počtu simulací dostaneme spolehlivé výsledky. Porovnání proběhne s generováním vstupních parametrů pomocí metody Monte Carlo, u které jsme si stanovili z kapitoly 3.3.5 vzorky při 10 000 simulacích, viz obrázek 3.11 a 3.12.

Pro metodu Latinských Nadkrychlí bylo zvoleno 5, 25, 50, 100, 1 000 simulací. Při volbě se vychází z výše zmíněného předpokladu. I malý počet simulací by měl být schopen generovat spolehlivé výsledky [26, 32].

Pro tuto práci je důležité si zadefinovat dva pojmy. Jedná se simulaci a cyklus. Simulacemi je v rámci této práce definována jako jeden kompletní výpočet parametrické teplotní křivky. Je zde zahrnuto vygenerování vstupních parametrů dle pravděpodobnostního rozdělení a použité metody náhodného výběru, dále výpočet samotné parametrické teplotní křivky a zjištění maximální dosažené teploty plynů, u této teploty je dále zkoumáno, zda překročí hranici 600 °C. Tato teplota byla zvolena jako ilustrativní na základě inženýrského úsudku, při které se očekává porušení konstrukce. Cyklus je v rámci této práce definován jako soubor několika simulací, z kterého se dále určuje pravděpodobnost překročení teploty 600 °C v rámci jednoho cyklu. Zde tedy máme soubor vstupních parametrů, několikrát provedený výpočet parametrické teplotní křivky, několik maximálních teplot, a hodnotu pravděpodobnosti překročení teploty 600 °C. Tyto definované pojmy se vyskytují zejména v obrázku 3.16, kde je znázorněn postup řešení příkladu.

3.4.3 Postup výpočtu

V programu Spyder byl sepsán kód generátoru náhodných čísel, parametrické teplotní křivky dle ČSN EN 1991-1-2 [1], nastavení počtu simulací a cyklů, výpočet pravděpodobnosti překročení určité teploty. Pro názornost je na obrázku 3.14 část kódu. Generátor byl nastaven tak, že lze vybrat určité pravděpodobnostní rozdělení a pomocí základních statistických charakteristik se upraví do požadovaného formátu. Pro tento řešený příklad se používají vstupní parametry z tabulky 3.2.



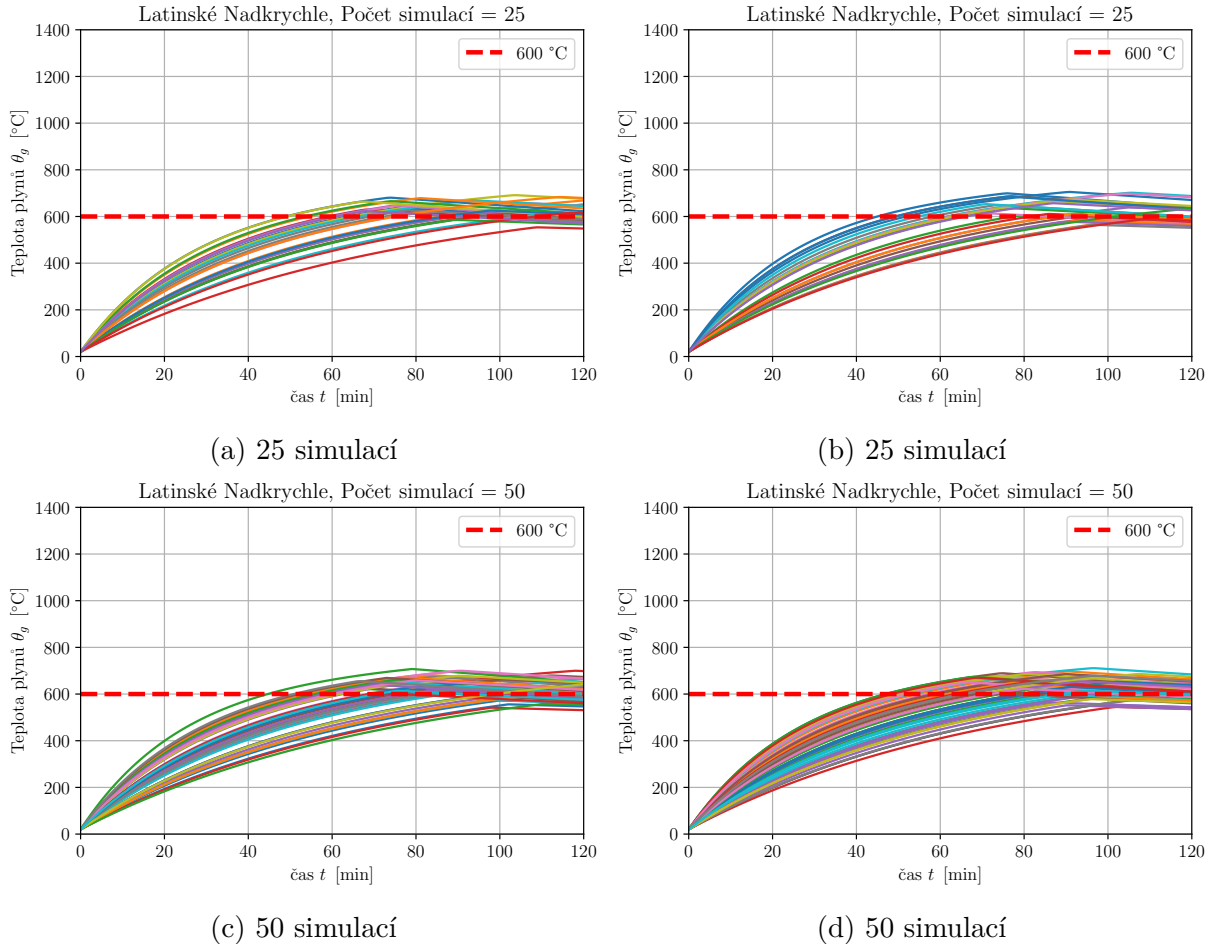
Obrázek 3.16: Schéma postupu řešení příkladu.

3.4.4 Vyhodnocení výsledků

Na obrázku 3.17 jsou vidět průběhy teplot plynů v požárním úseku. Jedná se o dva cykly s 25 a 50 simulacemi. Grafy znázorňují náhodnost, kdy dva různé cykly mají jiné průběhy křivek, respektive maximálních dosažených teplot. Pro obrázek 3.17(a) s 25 simulacemi se jedná o cyklus s 88% pravděpodobností překročení teploty 600 °C a rozmezí maximálních hodnot od 568 °C do 725 °C . Pro obrázek 3.17(b) s 25 simulacemi se jedná o cyklus s 72% pravděpodobností překročení teploty 600 °C a rozmezí maximálních hodnot od 560 °C do 700 °C . Pro obrázek 3.17(c) s 50 simulacemi se jedná o cyklus s 90% pravděpodobností překročení teploty 600 °C a rozmezí maximálních hodnot od 575 °C do 589 °C . Pro obrázek 3.17(d) s 50 simulacemi se jedná o cyklus s 84% pravděpodobností překročení teploty 600 °C a rozmezí maximálních hodnot od 546 °C do 710 °C . Jedná se o vybrané cykly z tabulky 3.3.

Z vypočítaných dat je vidět, že v tomto modelu výsledné hranice intervalu nekorelují s pravděpodobností překročení teploty. Porovnání cyklů s 25 simulacemi kde je pravděpodobnost o 16% vyšší, ale hranice intervalu spočtených teplot jsou v průměru o $16,5\text{ °C}$ nižší. Pro cykly s 50 simulacemi je pravděpodobnost o 6% vyšší a hranice intervalu spočtených teplot jsou v průměru o 46 °C vyšší.

Z průběhu teplot je také patrné, že každý vypočtený cyklus může mít jiný trend, nemohou být vyčerpány všechny možnosti kombinací jednotlivých parametrů.



Obrázek 3.17: Výsledky jednoho cyklu metody Latinských Nadkrychlí, (a) pro 25 simulací, (b) pro 25 simulací, (c) pro 50 simulací, (d) pro 50 simulací.

V tabulce 3.3 jsou výsledné hodnoty výpočtu. Je zde vypsáno po sobě jdoucích 10 cyklů výpočtu metodou Latinských Nadkrychlí a metodou Monte Carlo, dále jsou zde vypočteny základní statistické charakteristiky. Nepřekvapivě s počtem simulací se snižuje hodnota výběrové směrodatné odchylky a rozmezí nabývaných hodnot. Tedy čím menší tyto hodnoty jsou, tím lepší je přesnost modelu. Porovnání výběrové směrodatné odchylky 0,45 % pro 10 000 simulací metody Monte Carlo a 0,35 % pro 1 000 simulací metody Latinských Nadkrychlí. Pro 10 krát menší počet simulací je rozdíl výběrových směrodatných odchylek 0,10 %.

Jako nevhodné se v našem případě nechá označit 5, 25, 50 a 100 simulací, kde rozmezí hodnot je 40 %, 16 %, 12% a 8 %. Tato rozmezí jsou poměrně vysoká a při použití v praxi by mohla významně ovlivnit návrh, jak na stranu bezpečnou tak na stranu nebezpečnou. Tedy návrh by byl buď neekonomický, anebo životy ohrožující. Pro 1 000 a 10 000 simulací je rozmezí hodnot 1,6 % pro průměrnou hodnotu 82,7 % a rozmezí 1,07 % pro průměrnou hodnotu 82,63 %. Což se zdá být přijatelnější. Jak velká by měl být výběrová směrodatná odchylka nebo rozmezí hodnot, tak aby model fungoval dostatečně dobře, zde nebylo stanoveno. Jedná se o komplikované téma, které by mělo být zpracované samostatně.

Zajímavé jsou průměrné hodnoty z 10 cyklů Latinských Nadkrychlí v porovnání s metodou Monte Carlo, které mají rozdíl 0,63 % pro 5 simulací, 1,83 % pro 25 simulací, 0,971 % pro 50 simulací, 0,571 % pro 100 simulací a 0,071 % pro 1 000 simulací. Zdá se tedy, že je vhodné, se zaměřit pro dosažení co nejpřesnějšího výsledku nejen na počet simulací, ale i na počet cyklů, a to hned z několika důvodů. Prvním je už výše zmíněné zpřůměrování, které se liší maximálně o 1,83 %. Druhým je porovnání například průměrné hodnoty pro 10 cyklů s 5 simulacemi, kde průměrná hodnota je 82 % a cyklu číslo 8 pro 10 000 simulací kde průměrná hodnota je 83,23 % (záměrně byla vybrána nejdlejší hodnota pravděpodobnosti). Rozdíl pravděpodobností je 1,23 %, ale rozdíl počtu simulací je pro metodu Latinských Nadkrychlí dvěstěkrát menší. V obou případech by se jednalo vzhledem k metodě Monte Carlo o znatelné ušetření výpočetního času.

Tabulka 3.3: Pravděpodobnost, s jakou překročí maximální teplota plynů v požárním úseku 600 °C.

Počet simulací	Latinské Nadkrychle					Monte Carlo
	5	25	50	100	1 000	10 000
Cyklus č.1	70 %	80 %	84 %	82 %	83,4 %	82,28 %
Cyklus č.2	100 %	80 %	80 %	80 %	82,7 %	82,16 %
Cyklus č.3	80 %	80 %	86 %	83 %	82,6 %	82,38 %
Cyklus č.4	80 %	72 %	84 %	85 %	82,1 %	82,54 %
Cyklus č.5	90 %	88 %	84 %	82 %	82,7 %	82,59 %
Cyklus č.6	80 %	72 %	84 %	84 %	82,4 %	82,45 %
Cyklus č.7	80 %	84 %	88 %	88 %	82,4 %	82,85 %
Cyklus č.8	100 %	76 %	78 %	84 %	82,7 %	83,23 %
Cyklus č.9	60 %	80 %	78 %	80 %	83,7 %	83,12 %
Cyklus č.10	80 %	88 %	90 %	84 %	82,3 %	82,69 %
Rozmezí hodnot	40 %	16 %	12 %	8 %	1,6 %	1,07 %
Průměrná hodnota	82 %	80,8 %	83,6 %	83,2 %	82,7 %	82,63 %
Výběrová směrodatná odchylka	12,2 %	5,2 %	4,2 %	2,5 %	0,45 %	0,35 %

Kapitola 4

Závěr

Diplomová práce se dělí na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou zprvu popsány modely požáru. Podrobněji je zde popsána parametrická teplotní křivka, která je používána jako model požáru v řešených příkladech. Jsou zde popsány postupy pro generování náhodných vstupních parametrů pro metodu Monte Carlo a Latinské Nadkrychle. Popisují se zde všechny kroky postupu, od generování náhodného čísla, použití hustoty pravděpodobnostních rozdělení, distribučních funkcí, inverzních distribučních funkcí pro generování konkrétních vstupních parametrů. Je zde popsán rozdíl mezi metodou Monte Carlo a Latinských Nadkrychlí. Pro stochastické modely požáru je potřeba mít k dispozici hustoty pravděpodobnosti a pravděpodobnostní rozdělení pro jednotlivé parametry, proto byla v rámci teoretické části zpracována přehledná tabulka s dostupnými daty z jiných odborných prací.

Praktická část práce je rozdělena do tří řešených příkladů. Pro všechny řešené příklady byl sepsán model v programovacím jazyce Python. Python byl použit z důvodu práce s velkým výpočetním objemem, který je v pravděpodobnostním přístupu nezbytný. V modelu byla použita parametrická teplotní křivka dle ČSN EN 1991-1-2.

Prvním řešeným příkladem je citlivostní analýza vstupních parametrů, modelem jsou vygenerovány 2D a 3D grafy. Cílem citlivostní analýzy bylo zjištění, jak se mění maximální dosažené teploty v požárním úseku ve vztahu k jeho vstupním parametrům. Zejména vyšetřit, zda se jedná o monotónní funkci či nikoliv. Vždy byly modelovány dva parametry jako konstantní a dva parametry jako proměnné. Výsledky ukazují, že parametrická teplotní křivka není v celém rozsahu monotónní funkce. Hodnoty generované pomocí metody Latinských Nadkrychlí budou tedy pomaleji konvergovat.

Druhý řešený příklad se zabývá pravděpodobnostním přístupem pomocí metody Monte Carlo na konkrétním požárním úseku. Bylo zde použito rovnoměrné rozdělení pro vstupní parametry. Hlavním cílem zde bylo zkoumání vlivu množství provedených výpočtů na výsledné hodnoty pravděpodobnosti. Měřeným parametrem byla pravděpodobnost překročení maximální teploty plynů v požárním úseku s hranicí 600 °C. Měnily se zde různé počty simulací a cyklů. Pro vyhodnocení sloužily výběrové směrodatné odchylky pravděpodobnosti, které byly vykresleny do grafu. Výsledky nepřekvapivě ukazují, že při větším počtu simulací a cyklů se snižuje výběrová směrodatná odchylka. Pro 10 000 simulací nepřesáhne hodnota výběrové směrodatné odchylky hodnotu 0,7 %.

Třetí řešený příklad se zabývá pravděpodobnostním přístupem pomocí metody Monte

Carlo a metody Latinských Nadkrychlí na konkrétním požárním úseku. Vstupní parametry byly zvoleny pro různé pravděpodobnostní rozdělení. Tato rozdělení byla převzata z teoretické části. Hlavním cílem zde bylo porovnání metod mezi sebou. Porovnávaly se výsledné hodnoty ve vztahu k počtu provedených výpočtů. Obdobně jako u druhého řešeného příkladu, byl měřený parametr pravděpodobnost překročení maximální teploty plynů hranici 600 °C. Bylo zde provedeno několik variant simulací pro 10 po sobě jdoucích cyklů. Výsledné pravděpodobnosti byly dále porovnávány mezi sebou pomocí rozmezí hodnot, průměrné hodnoty a výběrové směrodatné odchylky. Výsledné hodnoty ukazují stejný trend jako řešený příklad dva. Při větším počtu simulací se snižuje výběrová směrodatná odchylka. Jako nevhodné je v našem případě označit 5, 25, 50 a 100 simulací, kde rozmezí hodnot je 40 %, 16 %, 12% a 8 %. Tato rozmezí jsou poměrně vysoká a při použití v praxi by mohla významně ovlivnit návrh, jak na stranu bezpečnou tak na stranu nebezpečnou. Pro 1 000 simulací metodou Latinských Nadkrychlí je rozmezí hodnot 1,6 % pro průměrnou hodnotu 82,7 % a 10 000 simulací metodou Monte Carlo je rozmezí 1,07 % pro průměrnou hodnotu 82,63 %. Což se zdá být přijatelnější. Zajímavé jsou také průměrné hodnoty pravděpodobností Latinských Nadkrychlí v porovnání s metodou Monte Carlo. Nepochází zde k velkým odchýlkám při snížení výpočetního času. Porovnání například průměrné hodnoty pro 10 cyklů s 5 simulacemi metodou Latinských Nadkrychlí a cyklu číslo 8 pro 10 000 simulací metodou Monte Carlo. Rozdíl pravděpodobností je 1,23 %, ale rozdíl počtu simulací je pro metodu Latinských Nadkrychlí dvěstěkrát menší. Jedná se zde o znatelné ušetření výpočetního času vzhledem k metodě Monte Carlo. Výše uvedené poznatky ukazují důležitost počtu simulací, ale i cyklů pro dosažení co nejpřesnějšího výsledku s rozumným omezením výpočetního času.

Tato fakta platí pro druhý a třetí řešený příklad. Jedná se o konkrétní požární úsek s konkrétními vstupními parametry. Pokud by byl posuzován jiný požární úsek, nebo by byly stanoveny jiné předpoklady, je možné, že by výsledné hodnoty mohly nabývat značných odchylek. Dále je důležité zmínit skutečnou náhodnost modelu, tedy pokud by všechny stochastické výpočty byly spuštěny znovu, dostaneme odlišné hodnoty. Budou mít s velkou pravděpodobností velmi podobný trend, ale rozhodně nebudou shodné.

Tato práce se nezabývá určením přesné hodnoty, která by zaručovala dostatečnou přesnost. Otázka, jak moc přesný model by měl být nebo jaké parametry mají být sledované, je dost komplikovaná a zasloužila by si zpracovat jako samostatná práce.

Seznam obrázků

2.1	Trojúhelník hoření, převzato z [9].	3
2.2	Průběh požáru, převzato z [11].	4
2.3	Schéma modelů požáru, převzato z [14].	4
2.4	Nominální teplotní křivky, převzato z [20].	6
2.5	Obecný průběh parametrické teplotní křivky.	7
2.6	Odklon plamene větrem v půdorysu, rozměry plamene bez průvanu, převzato z: [1].	8
2.7	Schématický řez lokálním požárem, převzato z: [1].	8
2.8	Vlevo základní princip zónového modelu, vpravo základní princip CFD modelu, převzato z: [19, 25].	9
2.9	Parametrická teplotní křivka	10
2.10	Schéma generování náhodných čísel v intervalu (0; 1) metodou Monte Carlo.	14
2.11	Schéma generování vstupních parametrů pomocí inverzní distribuční funkce metodou Monte Carlo.	14
2.12	Schéma generování náhodných čísel v intervalu (0; 1) metodou Latinských Nadkrychlí.	15
2.13	Schéma generování vstupních parametrů pomocí inverzní distribuční funkce metodou Latinských Nadkrychlí.	15
2.14	Schématický postup použití permutací pro vstupní parametry.	15
2.15	Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce rovnoměrného rozdělení.	16
2.16	Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce normálního rozdělení, převzato z: [38].	17
2.17	Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce Gumbelova rozdělení, převzato z: [40].	18
2.18	Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce logaritnicko-normálního rozdělení, převzato z: [38].	19
2.19	Četnosti hustoty požárního zatížení 168 sledovaných obchodů, převzato z: [41].	20
2.20	Přízpusobené funkce hustoty pravděpodobnosti požárního zatížení $f(x)$ pro obchodní domy. Změřená hustota požárního zatížení je vyjádřeny histogramem, převzato z: [34].	21
2.21	Přízpusobené distribuční funkce požárního zatížení $F(x)$ pro obchodní domy. Změřená distribuční funkce požárního zatížení je vyjádřena pomocí stupňovité křivky, převzato z: [34].	22

3.1	Loga: vlevo Python, vpravo Spyder, převzato z: [46, 47].	26
3.2	Výsledné hodnoty kombinace č.1	28
3.3	Výsledné hodnoty kombinace č.2.	29
3.5	Výsledné hodnoty kombinace č.3.	31
3.6	Výsledné hodnoty kombinace č.4.	33
3.7	Schéma řešeného požárního úseku hotelového pokoje, převzato z: [25]. . . .	34
3.8	Ukázka kódu z programu Spyder.	35
3.9	Schéma postupu řešeného příkladu.	36
3.10	Výsledky jednoho cyklu metody Monte Carlo, (a) pro 10 simulací, (b) pro 100 simulací, (c) pro 1 000 simulací, (c) pro 10 000 simulací.	37
3.11	Graf porovnání výběrové směrodatné odchylky v závislosti na počtu simulací při 10 cyklech.	38
3.12	Graf porovnání výběrové směrodatné odchylky v závislosti na počtu simulací při 100 cyklech.	38
3.13	Schéma řešeného požárního úseku kanceláře, převzato z: [25].	39
3.14	Ukázka kódu z programu Spyder.	42
3.15	Schématický postup použití permutací pro vstupní parametry.	42
3.16	Schéma postupu řešeného příkladu.	43
3.17	Výsledky jednoho cyklu metody Latinských Nadkrychlí, (a) pro 25 simulací, (b) pro 25 simulací, (c) pro 50 simulací, (d) pro 50 simulací.	44

Seznam tabulek

2.1	Hustoty požárního zatížení $q_{f,d}$ [MJ m^{-2}], převzato z ČSN EN 1991-1-2. . .	19
2.2	Statistické vlastnosti návrhové hustoty požárního zatížení.	20
2.3	Statistické vlastnosti faktoru otvorů.	23
2.4	Statistické vlastnosti součinitele b.	24
2.5	Statistické vlastnosti objemové hmotnosti.	24
2.6	Statistické vlastnosti součinitele tepelné vodivosti.	25
2.7	Statistické vlastnosti měrné tepelné kapacity.	25
3.1	Rozsah vstupních parametrů pro řešený příklad [25].	35
3.2	Rozsah vstupních parametrů pro řešený příklad.	41
3.3	Pravděpodobnost, s jakou překročí maximální teplota plynů v požárním úseku 600 °C.	45

Literatura

- [1] ČSN EN 1991-1-2: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Praha: Český normalizační institut, 2004, Třídící znak 73 0035
- [2] ČSN EN 1992-1-2: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-2: Obecná pravidla – Navrhování konstrukcí na účinky. Praha: Český normalizační institut, 2006, Třídící znak 73 1201
- [3] Vyhláška č. 246/2001 Sb., Vyhláška Ministerstva vnitra o stanovení podmínek požární bezpečnosti a výkonu státního požárního dozoru (vyhláška o požární prevenci).In: *Sbírka zákonů* 23. 07. ISSN 1211-1244 Dostupné z <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-246/zneni-20210201>
- [4] STAUFFER, E., Concept of pyrolysis for fire debris analysts, *Scientific and technical leden/březen 2003, roč. 43, č.1 , s. 29-40, ISSN 1355-0306*
- [5] MOLDOVEANU SC., *Analytical Pyrolysis of Natural Organic Polymers. In: Techniques and instrumentation in analytical chemistry.* Elsevier: Amsterdam, 1998.
- [6] STAUFFER E. Identification and Characterization of Interfering Products in Fire Debris Analysis. Master's thesis. Miami: Florida International University, 2001.
- [7] PURKISS, J A. *Fire safety engineering design of structures (2nd Edition).* Oxford: Butterworth-Heinemann-Elsevier, 2006
- [8] KUČERA, P., KAISER R., PAVLÍK T. a POKORNÝ J., *Metodický postup při odlišném způsobu splnění technických podmínek požární ochrany.* EDICE SPBI SPEKTRUM 56.Ostrava: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2008. ISBN 978-80-7385-044-9.
- [9] UHROVÁ I., *Šíření plamene po vrstvě prachu tvořené dřevní biomasou* In: *TZB-info* [online]. 11.3.2013. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/9636-sireni-plamene-po-vrstve-prachu-tvorene-drevni-biomasou>
- [10] KARLSSON, B., QUINTIERE, J. *Enclosure Fire Dynamics. Environmental & Energy Engineering.* CRC Press, 1999. isbn: 9781420050219.
- [11] TRACEY, S., McBride P., Module 3 Enclosure Fire Dynamics. Z: *firedynamicstraining* [online]. 2018 dostpné z: <https://guides.firedynamicstraining.ca/g/fd203-enclosure-fires-pres/119004>

- [12] D. Drysdale. *An Introduction to Fire Dynamics*. Wiley, 2011. isbn: 9781119976103.
- [13] JANSSENS M.L. *introduction to Mathematical Fire Modeling*. CRC Press, 2000. isbn: 9781482279009, dostupné z: <https://books.google.es/books?id=8dgcCAAAQBAJ>
- [14] BENÝŠEK M. *Modelování požáru v požárním inženýrství*. In: Katedra betonových a zděných konstrukcí, 2020
- [15] *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. 2008* SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th Edition
- [16] ČERNÝ, O., SENOVSKY, P., (2010). Nekonvenční metody modelování rozvoje požáru. *Sborník vědeckých prací, řada Bezpečnostní inženýrství. 5. 2010* s 23-30.
- [17] MIKLÓS, J., *Způsoby ověřování metamatických modelů požárů* . Ostrava VŠB - Technická univerzita ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, [online] 2008 . dostupné z: <<https://theses.cz/id/ue7jco/>>
- [18] WALD, F., POKORNÝ, M., HOROVÁ, K., HEJTMÁNEK, P., NAJMANOVÁ, H., BENÝŠEK, M., KUREJKOVÁ, M. a SCHWARZ, I. *Modelování dynamiky požáru v budovách*. Praha: ČVUT v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.
- [19] WALD, F., *Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 978-80-01-03157-5.
- [20] FRENZEL S., Structural Fire Design According to EN 1993-1-2 (Fire Curves) z: *dlubal.com* [online] 15.5.2017 dostupné z: <https://www.dlubal.com/cs/podpora-a-skoleni/podpora/databaze-znalosti/001438>
- [21] WANG, Y., C, BURGESS, W., I., ed. Performance-based fire engineering of structures. Boca Raton, Fla.: *CRC Press/Spon Press, 2013*. ISBN 978-0-203-86871-3.
- [22] HOROVÁ, K. Součást projektu COST CZ: Šíření požáru ve vícepodlažních budovách. 2011
- [23] PETTERSSON, O, Sven-Erik MAGNUSSON s. E., THOR, J. *Fire Engineering Design of Steel structures*. Stockholm: Swedish Institute of Steel Construction, 1976.
- [24] KUČERA, J., *PARAMETRICKÉ MODELY POŽÁRU PRO EN 1991-1-2:2021* Praha: ČVUT, 2019
- [25] BOUŠOVÁ, J., *Variabilita a náhodnost vstupních parametrů požárních modelů a jejich vliv na průběh požáru a požární odolnost konstrukcí* Praha: ČVUT, 2021
- [26] KREJSA, M, KONEČNÝ, P., *SPOLEHLIVOST A BEZPEČNOST STAVEB - interaktivní studijní materiál* [online]. B.m.: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Západočeská univerzita v Plzni. 2012. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/spolehlivost_obr.pdf

- [27] SHI, K. Guo, Q. JEFFERS, A. Stochastic Analysis of Structures in Fire by Monte Carlo Simulation. *Journal of Structural Fire Engineering*. 2013 roč. 13 č. 4, s.37-46. doi:10.1260/2040-2317.4.1.37.
- [28] GUO, Q., JEFFERS, A., E., Finite-Element Reliability Analysis of Structures Subjected to Fire. *Journal of Structural Engineering* [online]. 2015, roč. 15 141(4), 04014129. ISSN 0733-9445, 1943-541X. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001082
- [29] IQBAL, S., HARICHANDRAN, R., Capacity Reduction and Fire Load Factors for Design of Steel Members Exposed to Fire. *Journal of Structural Engineering-asce - J STRUCT ENG-ASCE*. 2010 roč. 12 136. 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000256.
- [30] Guo, Q., Shi, K., Jia, Z. et al. Probabilistic Evaluation of Structural Fire Resistance. *Fire Technol* 49, s.793–811 (2013). <https://doi.org/10.1007/s10694-012-0293-6>
- [31] RICKARD, I., et al. *Assessing spalling risk in buildings: Considering spalling in probabilistic fire safety design*. In: *6th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire exposure*. 2019.
- [32] LEHKÝ, D., Vybrané pravděpodobnostní modely a směrné hodnoty spolehlivosti, z: *fce.vutbr* [online]. 2.3.2020. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/STM/lehky.d/>
- [33] HEIDARI, M., ROBERT, F., LANGE, D., et al. Probabilistic Study of the Resistance of a Simply-Supported Reinforced Concrete Slab According to Eurocode Parametric Fire. *Fire Technol* 55, 1377–1404 (2019), dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0704-4>
- [34] BJÖRKMAN, J., et al. Fire load survey of commercial premises in Finland. *Proceedings of International Conferencen*. Praha: Application of Structural Fire Design 2011. s. 400-404. ISBN 978-80-01-04798-9
- [35] HEBAK P., KAHOUNOVÁ, J., *Počet pravděpodobnosti v příkladech*. SNTL Praha 1978.
- [36] *Pravděpodobnostní rozdělení spojité náhodné veličiny pro základní soubory*, dostupné z: <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn2/rozdelZS.htm>
- [37] NAVARA M. *Pravděpodobnost a matematická statistika* Praha: ČVUT, 2007 ISBN: 978-80-01-03795-9
- [38] NADRCHAL, T., *Generátory pseudonáhodných čísel rozdělení pravděpodobností*. Pardubice: Univerzita Pardubice, Dopravní Fakulta Jana Pernera, 2013
- [39] *Přehled pravděpodobnostních rozdělení*, 2019 dostupné z: <https://www2.karlin.mff.cuni.cz/pesta/NMFM301/rozdeleni.pdf>
- [40] ŠTĚPÁNEK, P., *Statistické vyhodnocení zkoušek elektrické pevnosti*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2018

-
- [41] HADJISOPHOCLEOUS, G. V.; ZALOK, E. Development of design fires for performance-based fire safety designs. *Fire Safety Science*, 2008, 9: 63-78.
- [42] FU, I., et al. Application of Python programming language in structural fire engineering Monte Carlo simulation. z: *Interflam 2019-15th International Fire Science and Engineering Conference*. 2019. p. 1713-1723.
- [43] THAUVOYE, CH, ZHAO, B., KLEIN, J., FONTANA, M., Fire load survey and statistical analysis. *Fire Safety Science*, 2008, 9: 991-1002. dostupné t: doi:10.3801/IAFSS.FSS.9-991
- [44] MARKS, V., *Vliv odvětrání uvažovaného při výpočtu požárního rizika a numerické simulaci požáru* Praha: ČVUT, 2019
- [45] HIETANIEMI, J., *Probabilistic simulation of glass fracture and fallout in fire*. VTT: Vuorimiehentie, Finland, 2005, 18.
- [46] *SPYDER The Scientific Python Development Environment [online]*. 2020. Dostupné z: <https://www.spyder-ide.org/>
- [47] *CRANDALL, Tom. PYTHON / BEGINNERS GUIDE [online]*. 2019. Dostupné z: <https://hangtenseo.com/python-beginners-guide/>
- [48] BENÝŠEK, M., ŠTEFAN, R., PROCHÁZKA, J., Effect of Fire Model Parameter Variability on Determination of Fire Resistance of Concrete Structural Members. In: *Solid State Phenomena*. Trans Tech Publications Ltd, 2020. p. 208-215.
- [49] DORDA, M., Generování pseudonáhodných čísel při simulaci. In: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava [online]*, Dostupné z: http://homel.vsb.cz/dor028/Aplikace_4.pdf.
- [50] *Python Software Foundation, 2001-2012*. Dostupné z: <https://docs.python.org/3/library/random.html>