

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**VARIABILITA A NÁHODNOST VSTUPNÍCH PARAMETRŮ
POŽÁRNÍCH MODELŮ A JEJICH VLIV NA PRŮBĚH
POŽÁRU A POŽÁRNÍ ODOLNOST KONSTRUKCÍ**

VARIABILITY AND RANDOMNESS OF INPUT PARAMETERS OF FIRE MODELS AND
THEIR EFFECT ON FIRE PROCESS AND FIRE RESISTANCE OF STRUCTURES

STUDIJNÍ PROGRAM: STAVEBNÍ INŽENÝRSTVÍ
STUDIJNÍ OBOR: INTEGRÁLNÍ BEZPEČNOST STAVEB
VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Martin Benýšek
Ing. Radek Štefan, Ph.D.
VYPRACOVALA: Jana Boušová

Praha 2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Boušová Jméno: Jana Osobní číslo: 458774
Zadávající katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Variabilita a náhodnost vstupních parametrů požárních modelů a jejich vliv na průběh požáru a požární odolnost konstrukcí

Název diplomové práce anglicky: Variability and randomness of input parameters of fire models and their effect on fire process and fire resistance of structures

Pokyny pro vypracování:

Rešerše literatury

Popis metod Monte Carlo a Latin Hypercubes Sampling

Analýza metod posuzování požární odolnosti konstrukcí

Řešený příklad

Vyhodnocení

Závěr

Seznam doporučené literatury:

Q. Guo and A. E. Jeffers. Finite-Element Reliability Analysis of Structures Subjected to Fire. Journal of Structural Engineering

Q. Guo, K. Shi, Z. Jia, and A. E. Jeffers. Probabilistic Evaluation of Structural Fire Resistance.

Fire Technology

M. Heidari, F. Robert, D. Lange, and G. Rein. Probabilistic Study of the Resistance of a Simply-Supported Reinforced Concrete Slab According to Eurocode Parametric Fire. Fire Technology

M. Shrivastava, A. Abu, R. Dhakal, and P. Moss. State-of-the-art of probabilistic performance based structural fire engineering. Journal of Structural Fire Engineering

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Martin Benýšek

Datum zadání diplomové práce: 28.9.2020

Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Variabilita a náhodnost vstupních parametrů požárních modelů a jejich vliv na průběh požáru a požární odolnost konstrukcí vypracovala samostatně pod vedením Ing. Martina Benýška a Ing. Radka Štefana, Ph.D. Veškeré literární nebo jiné zdroje použité pro vznik této práce jsou uvedené v části Literatura.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: 1.1.2021

.....

Jana Boušová

PODĚKOVÁNÍ

Tímto prostřednictvím bych ráda poděkovala paní prof. RNDr. Daniele Jaruškové, Csc. za čas, který mi věnovala a za její cenné rady v oblasti pravděpodobnostních metod Monte Carlo a Latin Hypercubes Sampling. Dále bych ráda poděkovala vedoucím této diplomové práce panu Ing. Martinu Benýškovi a panu Ing. Radku Štefanovi, Ph.D. za jejich drahocenný čas, který mi věnovali a za ochotu a pomoc při konzultacích.

Nakonec, ne však jako posledním, bych ráda poděkovala své rodině a svým přátelům, kteří mě po celou dobu studia na Fakultě stavební, ČVUT v Praze podporovali.

Obsah

Abstrakt	IV
Abstract	V
Seznam použitých symbolů a zkratk	VI
1 Úvod	1
2 Současný stav poznání	2
2.1 Variabilita a náhodnost v oblasti stavebnictví	2
2.2 Požární modely	3
2.2.1 Nominální teplotní křivky	3
2.2.2 Přirozené modely požáru	4
2.3 Parametrická teplotní křivka	7
2.3.1 Obecný popis křivky	7
2.3.2 Vstupní parametry a jejich rozsahy	7
2.3.3 Citlivostní analýza vstupních parametrů	9
2.4 Pravděpodobnostní metody	13
2.4.1 Metoda Monte Carlo	13
2.4.2 Metoda Latinských Nadkrychlí (Latin Hypercube Sampling)	16
3 Požár jako nepředvídatelný jev	18
3.1 Řešení požární bezpečnosti staveb	18
3.2 Pravděpodobnostní přístup	19
3.2.1 Obecný pojem NEJISTOTA	19
3.2.2 Nejistoty v požárním inženýrství	20
3.2.3 Nejistoty v modelu parametrické teplotní křivky	22
4 Aplikace pravděpodobnostních metod	24
4.1 Použitý software	24
4.1.1 Python	24
4.1.2 Spyder	24
4.1.3 Sestavení programu	25
4.2 Řešený příklad	27
4.3 Preskriptivní přístup – standardní výpočet dle Eurokódu	28
4.3.1 Vstupy do modelu	28
4.3.2 Výstupy z modelu	29
4.4 Pravděpodobnostní přístup	30
4.4.1 Určení rozsahů vstupních parametrů	30
4.4.2 Pravděpodobnostní rozdělení vstupních parametrů	31
4.4.3 Kombinace parametrů pomocí metody Monte Carlo	36
4.4.4 Kombinace parametrů pomocí metody Latin Hypercubes Sampling	42
5 Závěr	50
Seznam obrázků	51
Seznam tabulek	53
Literatura	54
Příloha 1	56

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na problematiku týkající se navrhování nosných konstrukcí na účinky požáru pomocí pravděpodobnostního přístupu. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část.

V teoretické části práce jsou nejprve obecně popsány typy požárních modelů. Podrobněji je zde popsána parametrická teplotní křivka, která je uvedena v příloze A normy ČSN EN 1991-1-2, u níž je provedena citlivostní analýza vstupních parametrů. Dále jsou zde popsány dvě pravděpodobnostní metody – Monte Carlo a Latin Hypercubes Sampling.

Závěr teoretické části práce je věnován nejistotám spojeným s požárem jako takovým a nejistotám, které jsou vnášeny do požárních modelů, respektive do modelu parametrické teplotní křivky.

Pro účely vypracování praktické části práce je v programovacím jazyce Python sestaven funkční kód sloužící ke generování náhodných vstupních parametrů na základě, kterých jsou pak generovány odpovídající průběhy parametrické teplotní křivky. Díky takto sestavenému kódu mohl být porovnán průběh modelovaného požáru na základě preskriptivního (normativního) a pravděpodobnostního přístupu.

Oba tyto přístupy jsou aplikovány na konkrétní požární úsek hotelového pokoje, kde je požár simulován pomocí parametrické teplotní křivky. Nejprve je průběh požáru stanoven na základě přílohy A normy ČSN EN 1991-1-2, poté jsou vstupní parametry pro parametrickou teplotní křivku kombinovány pomocí výše zmíněných pravděpodobnostních metod za využití useknutého exponenciálního a rovnoměrného pravděpodobnostního rozdělení.

V závěru praktické části jsou porovnány výsledky obou přístupů, tedy jak normativního, tak pravděpodobnostního a je zhodnocen vliv pravděpodobnostního přístupu na požární odolnost konstrukce.

Klíčová slova

Požár, modely požáru, požární odolnost konstrukcí, spolehlivost konstrukcí, pravděpodobnost, náhodnost, nejistota, metoda Monte Carlo, metoda Latin Hypercubes Sampling

Abstract

The diploma thesis is focused on the issue of designing load-bearing structures for the effects of fire using a probabilistic approach. The work is divided into theoretical and practical part.

The theoretical part of the thesis first describes the types of fire models in general. The parametric temperature curve is described in more detail here, which is given in Annex A of the ČSN EN 1991-1-2 standard, for which a sensitivity analysis of the input parameters is performed. There are also described two probabilistic methods – Monte Carlo and Latin Hypercubes Sampling.

The conclusion of the theoretical part of the work is devoted to the uncertainties associated with fire as such and the uncertainties that are introduced into the fire models, respectively into the model of the parametric temperature curve.

For the purposes of elaborating the practical part of the work, a function code is compiled in the Python programming language used to generate random input parameters on the basis of which the corresponding curves of the parametric temperature curve are then generated. Thanks to the code compiled in this way, the course of the modeled fire could be compared on the basis of a prescriptive (normative) and probabilistic approach.

Both of these approaches are applied to a specific fire compartment of a hotel room, where the fire is simulated using a parametric temperature curve. First, the course of the fire is determined on the basis of Annex A of the ČSN EN 1991-1-2 standard, then the input parameters for the parametric temperature curve are combined using the above-mentioned probability methods using the truncated exponential and uniform probability distribution.

At the end of the practical part, the results of both approaches, ie both normative and probabilistic, are compared and the influence of the probabilistic approach on the fire resistance of the structure is evaluated.

Keywords

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

Seznam použitých symbolů a zkratek

Latinské symboly

t	Čas	min
c	Měrná tepelná kapacita	J/(kg·K)
O	Faktor otvorů	m ^{1/2}
b	Tepelná pohltivost celé ohraničující konstrukce (součinitel b)	J/m ² s ^{1/2} K
q _{t,d}	Návrhová hustota požárního zatížení	MJ/m ²
RHRf	Rychlost uvolňování tepla	kW/m ²
RRP	Rychlost rozvoje požáru	[-]

Řecké symboly

λ	Součinitel tepelné vodivosti	W/(m·K)
ρ	Objemová hmotnost	kg/m ³
θ _{max}	Maximální teplota dosažená v požárním úseku	°C

Zkratky

PÚ	požární úsek
HZS	hasičský záchranný sbor
LHS	Latinské nadkrychle (Latin Hypercubes Sampling)
PIP	požárně inženýrský přístup (vychází z anglického performance – based design)
CFD	Computational Fluid Dynamics
PSFE	performance – based structural fire engineering
PO	požární odolnost

1 Úvod

V současné době se protipožární konstrukce navrhují převážně preskriptivním přístupem, tedy na základě platných norem. Tato práce se zabývá tím, jak může pravděpodobnostní přístup ovlivnit průběh modelovaného požáru a následně tím také ovlivnit požární odolnost konstrukcí.

Nejdůležitějším milníkem pro vytvoření této diplomové práce bylo pochopení dvou pravděpodobnostních metod Monte Carlo a Latin Hypercubes Sampling. Tyto pravděpodobnostní metody byly nejprve vysvětleny v teoretické části práce a následně byly aplikovány na konkrétní požární úsek hotelového pokoje.

Celý postup výpočtu byl naprogramován v programovacím jazyce Python, kde byl vytvořen funkční kód. Díky takto vytvořenému kódu byly dle metody Monte Carlo a LHS generovány náhodné vstupní parametry, na základě kterých se pak generovaly odpovídající průběhy parametrických teplotních křivek.

Zjištěné výsledky obou metod byly následně porovnány mezi sebou a také s výsledky stanovenými na základě normy ČSN EN 1991-1-2.

Pro stanovení vlivu pravděpodobnostního přístupu na požární odolnost konstrukcí byl stanoven předpoklad, že protipožární konstrukce bude považována za vyhovující, pokud po celou dobu požáru nebude dosažena teplota v ose výztuže větší nebo rovna 500 °C.

Podrobné výsledky jsou uvedeny v následujících kapitolách této práce.

2 Současný stav poznání

V současnosti je využívána řada požárních modelů, které nezohledňují variabilitu ani náhodnost vstupních parametrů. To, jak může pravděpodobnostní přístup ovlivnit průběh modelovaného požáru je ukázáno na modelu parametrické teplotní křivky v následujících částech této práce.

2.1 Variabilita a náhodnost v oblasti stavebnictví

Variabilita je pojem, se kterým se lze setkat v oblasti matematické statistiky a pravděpodobnosti a znamená proměnlivost nebo také odchylnost od normálu. Je to schopnost zkoumané proměnné nabývat různých hodnot. Míru variability lze popsat pomocí ukazatelů jako je např. rozptyl, směrodatná odchylka, mezikvartilové rozpětí aj.

Náhodnost, respektive náhodný proces je takový proces, jehož opakování dává za stejných podmínek rozdílné výsledky. Výsledek pokusu není předem znám (není jednoznačně určen podmínkami), ale je předem dána množina možných výsledků. [3]

Obecně platí, že mnoho procesů v reálném světě podléhá náhodnosti. Většinou jde o veličiny, které mohou mít velmi rozdílnou povahu nebo původ. V oblasti stavebnictví můžeme náhodnost najít v souvislosti s návrhem, výrobou, montáží, provozem či údržbou nosných stavebních konstrukcí.

Na základě těchto skutečností je třeba si uvědomit, že nelze realizovat konstrukci absolutně bezpečnou. Do procesu návrhu či posudku stavební konstrukce vždy vstupují menší či větší nejistoty. V případě betonové konstrukce může jít o vlastnosti materiálu, geometrické uspořádání konstrukce nebo např. o skutečné zatížení vyvolané provozem. Další nejistoty, které nelze nezmínit jsou nejistoty vyplývající z výpočtového modelu konstrukce.

Z výše uvedeného je jasné, že na některé příčiny variability člověk vliv nemá, některé jsou naopak přímo způsobeny lidskou činností. Náhodnosti, které jsou zde zmíněny zpravidla nelze eliminovat, důsledkem je poté větší nebo menší variabilita vlastností realizovaných konstrukcí.

Dále platí, že spíše, než reálný systém podrobujeme spolehlivostní analýze jeho teoretický model. Přitom je tento systém (a tedy i jeho model) zatížen celou řadou nejistot. To znamená, že veličiny popisující tento systém nejsou deterministické, tedy dané jednou hodnotou, ale veličiny s náhodnými vlastnostmi.

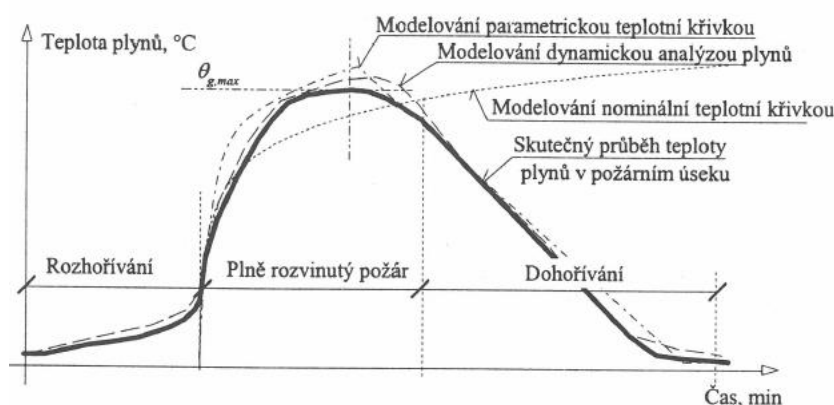
Deterministická veličina – veličina popsaná jednou pevně danou hodnotou (konkrétním číslem). Deterministický přístup je nejjednodušší přístup využívaný v normativních předpisech, kde jsou nejistoty zahrnuty součiniteli spolehlivosti.

Stochastická (náhodná) veličina – veličina, u které jsou nejistoty popsány metodami matematické statistiky. Každé hodnotě náhodné veličiny je pak přiřazena určitá pravděpodobnost, že veličina dosáhne jisté hodnoty. Dále náhodná veličina informuje o tom, že může s danou pravděpodobností nabývat jistých hodnot z určitých intervalů. Obecně platí, že tyto veličiny lépe popisují realitu oproti jediné hodnotě vycházející z deterministického přístupu. [4]

2.2 Požární modely

„Požár je živel, který lze charakterizovat časovým průběhem teplot, tlaku a složením plynů hořících produktů v prostoru.“ [5] Při požáru lze rozlišit tři časové fáze, a to fázi rozhořívání, plně rozvinutý požár a fázi dohořívání viz Obr. 1. Pro namáhání požárem a posuzování požární odolnosti stavebních konstrukcí byly vypracovány modely, které stanovují časový průběh teplot v hořícím prostoru. [5]

Norma ČSN EN 1991-1-2 [1] využívá pro teplotní analýzu požárního úseku různé typy modelů. Podle přesnosti výsledků, jak moc se daný model přibližuje reálnému požáru, norma rozlišuje nominální teplotní křivky a přirozené modely požáru, které následně dělí na zjednodušené a zdokonalené modely požáru.



Obr. 1 - Fáze požáru, převzato z [5]

2.2.1 Nominální teplotní křivky

Nominální teplotní křivky vyjadřují závislost teploty v požárním úseku na době požáru. Mezi nominální teplotní křivky lze zařadit např. normovou teplotní křivku, křivku vnějšího požáru, uhlovodíkovou teplotní křivku a křivku pomalého zahřívání viz. Obr. 2 [5].

2.2.1.1 Normová teplotní křivka

Tato křivka je v odborné literatuře označována jako ISO 834 a používá se při zkouškách požární odolnosti ve zkušebních pecích. Zavedení této křivky umožnilo první zvýšení požární spolehlivosti konstrukcí pomocí výpočtů. [5] Tato křivka je v [1] popsána následujícím vztahem:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1.1)$$

2.2.1.2 Křivka vnějšího požáru

Touto křivkou jsou namáhány obvodové stěny. Lze ji popsat následujícím vztahem viz [1]:

$$\theta_g = 20 + 660 (1 - 0,687 e^{-0,32 t} - 0,313 e^{-0,38 t}) \quad (1.2)$$

2.2.1.3 Uhlovodíková teplotní křivka

Nominální uhlovodíková křivka umožňuje simulaci prudkých požárů s rychlým nárůstem intenzity a je dána vztahem, který byl převzat z [1]:

$$\theta_g = 20 + 1080 (1 - 0,325 e^{-0,167 t} - 0,675 e^{-2,5 t}) \quad (1.3)$$

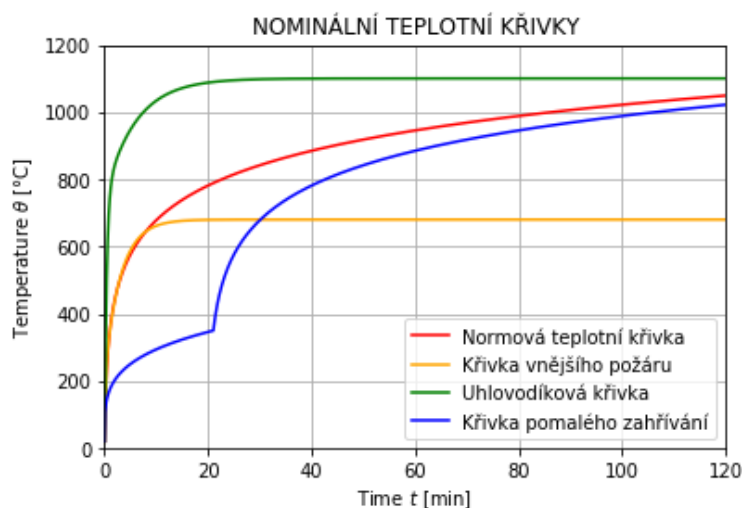
2.2.1.4 Křivka pomalého zahřívání

Křivku pomalého zahřívání lze použít např. v případě, kdy je simulován požár v dutinách zdvojených podlah nebo podhledů. Do 20. minuty požáru se křivka popisuje vztahem:

$$\theta_g = 20 + 154 \sqrt[4]{t} \quad (1.4)$$

a do 40. minuty se předpokládá nárůst teploty podle nominální normové teplotní křivky viz [5]:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10} [8(t - 20) + 1] \quad (1.5)$$



Obr. 2 - Nominální teplotní křivky, převzato z [1]

2.2.2 Přirozené modely požáru

Jak už bylo zmíněno výše, rozlišujeme zjednodušené a zdokonalené modely požáru.

Mezi zjednodušené modely požáru lze zařadit parametrickou teplotní křivku nebo lokální požár. Mezi zdokonalené modely požáru, které uvažují vlastnosti plynu a výměnu hmoty a energie, lze zařadit jednozónové modely, dvouzónové modely a dynamické modely kapalin a plynů, které stanovují vývoj teploty v úseku v čase i prostoru (CFD modely). [5]

2.2.2.1 Zjednodušené modely

- **Parametrické teplotní křivky**

Parametrická teplotní křivka představuje zjednodušený model, který zobrazuje změnu teploty v čase při požáru. Těchto křivek existuje více druhů. V příloze A normy ČSN EN 1991-1-2 [1] lze nalézt druh parametrické teplotní křivky, jejíž matematický zápis a obecný tvar vypadají následovně:

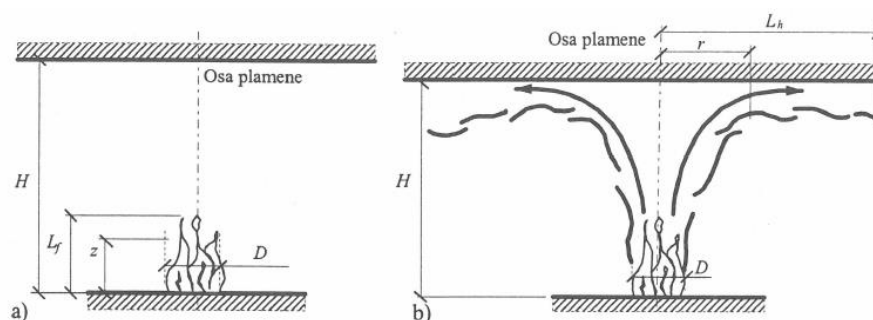
$$\theta_g = 1325 \left(1 - 0,324 e^{-0,2t^*} - 0,204 e^{-1,7t^*} - 0,472 e^{-19t^*} \right) + 20 \quad (1.6)$$



Obr. 3 - Parametrická teplotní křivka, převzato z [1]

- **Lokální požáry**

Lokální požár je takový požár, jehož průběh je pouze místní, tedy nedochází k rozšíření plamene do celé plochy požárního úseku. Rozlišují se případy, kdy plamen nezasahuje strop a kdy plamen strop zasahuje viz Obr. 4 [5].



Obr. 4 - Model lokálního požáru, a) plameny nezasahují strop, b) plameny zasahují strop, převzato z [5]

2.2.2.2 Zdokonalené modely

- **Jednozónové modely**

Jednozónový model uvažuje homogenní parametry v celém prostoru a využívá se při modelování požáru po prostorovém celkovém vzplanutí. Tento model je vhodný i pro případy, kdy teplota zplodin hoření výrazně nepřevyšuje teplotu okolí [5].

- **Dvouzónové modely**

Dvouzónový model uvažuje v prostoru, který je zasažen požárem, dvě vrstvy – horní horkou vrstvu, která obsahuje většinu horkých zplodin hoření a spodní chladnější vrstvu, kterou je přiváděn čerstvý vzduch. Rozhraní mezi vrstvami se nazývá neutrální rovina. Tato plocha vzniká v důsledku rozdílných hustot horkých a chladných plynů.

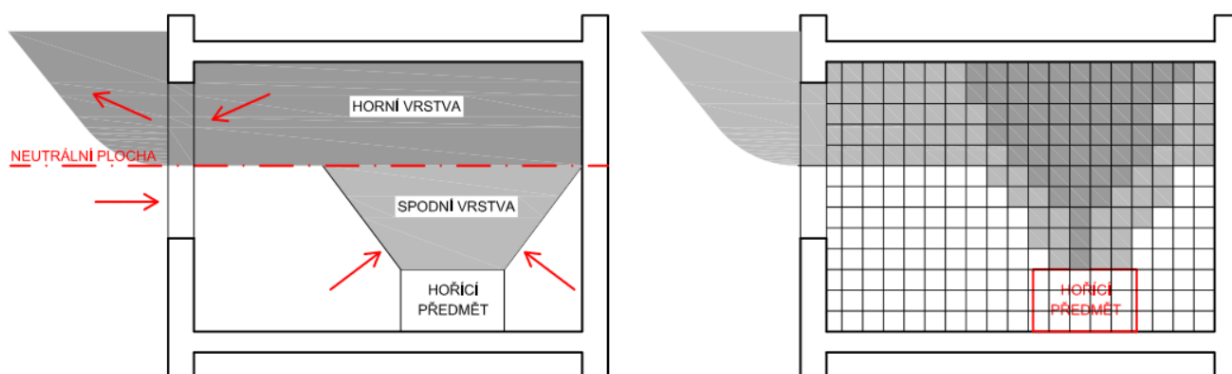
Tento typ modelu není vhodný pro modelování požáru např. v tunelech nebo šachtách, kde nedochází k vytvoření neutrální vrstvy.

Výstupem zónových modelů mohou být tabulky, grafy nebo vizualizace sledovaných veličin v závislosti na čase [5].

- **CFD modely**

„Při modelování pomocí dynamické analýzy plynů se počítají rovnice zachování a přenosu energie, hybnosti a hmoty mezi velkým množstvím objemů, na které je prostor rozdělen. Modeluje se v trojrozměrném prostoru numerickým řešením parciálních diferenciálních rovnic v závislosti na čase. Pro každý kontrolní objem se řeší trojrozměrné proudění plynů, laminární a turbulentní proudění, stlačitelné a nestlačitelné proudění, chemické reakce spalování, uvolňování tepla, přirozené i smíšené sdílení tepla sáláním a prouděním, přenos chemických látek a jejich směšování.“

Výstupem těchto modelů bývá prostorová vizualizace zobrazující gradienty teploty, hustoty tepelného toku, tepelný výkon, koncentraci směsí apod.“ [5] Podrobněji viz [5], [1].



Obr. 5 - Rozdělení 3D objemů pro modelaci, vlevo – dvouzónový model, vpravo – CFD model, převzato z [5]

2.3 Parametrická teplotní křivka

Protože se tato diplomová práce bude podrobněji zabývat průběhem parametrické teplotní křivky a její odezvy na variabilitu a náhodnost jejích vstupních parametrů, bude této křivce věnována samostatná kapitola pro její detailnější popis.

2.3.1 Obecný popis křivky

Jak už bylo zmíněno výše, parametrická teplotní křivka patří mezi zjednodušené modely a její podrobný výpočet lze nalézt v příloze A normy ČSN EN 1991-1-2 [1]. Některé země spadající pod Evropský výbor pro normalizaci (CEN) ale tuto podobu křivky neuznávají, a ve svých národních přílohách ji upravují. Kromě křivky popsané v [1] tak existuje ještě BFD křivka popsána podle německé národní přílohy a dánská křivka popsána podle dánské národní přílohy.

V této práci bude využita pouze parametrická teplotní křivka popsána ve výše zmíněné normě ČSN EN 1991-1-2 [1]. Současná podoba této parametrické teplotní křivky vychází ze švédské křivky, která byla poprvé publikována v roce 1970 (Magnusson a Thelandersson). Tato křivka na rozdíl od nominálních teplotních křivek pracuje s okrajovými podmínkami zkoumaného požárního úseku. Parametrické modely berou v úvahu, pro popis rozvoje teploty v požárním úseku, požární zatížení, tepelně technické vlastnosti ohraničujících konstrukcí a otvory v požárním úseku. Modely předpokládají rovnoměrné rozložení teploty v požárním úseku a jsou určeny k modelování PÚ s omezenou velikostí, kde dojde k celkovému vzplanutí prostoru.

Obecný tvar parametrické křivky je vidět na Obr. 3. První fáze křivky reprezentující ohřev se vyznačuje exponenciálním nárůstem. Tato část končí ve chvíli, kdy je v PÚ dosažena maximální teplota θ_{\max} . Po dosažení maximální teploty začíná druhá fáze křivky s lineárním poklesem. Tato fáze končí v okamžiku, kdy je ve zkoumaném PÚ dosaženo teploty 20 °C, což je předpokládaná teplota okolního prostředí.

Použití této křivky je ale omezeno, a to pro požární úseky do podlahové plochy 500 m², které jsou pouze se svislými otvory, tzn. bez otvorů ve střeše a s maximální výškou požárního úseku 4 m. Toto a další omezení křivky vyplývají z toho, že většina návrhů parametrických teplotních křivek vychází z experimentálních výsledků. [5, 6]

2.3.2 Vstupní parametry a jejich rozsahy

Průběh parametrické teplotní křivky ovlivňují následující vstupní parametry:

- Faktor otvorů O [m^{1/2}]
- Tepelná pohltivost celé ohraničující konstrukce b [J/m²s^{1/2}K]
- Návrhová hustota požárního zatížení $q_{t,d}$ [MJ/m²]
- Rychlost rozvoje požáru (RRP)

2.3.2.1 Faktor otvorů

Tento faktor vyjadřuje objem větrání v závislosti na ploše a výšce otvorů, které se nacházejí ve stěnách posuzovaného požárního úseku, a na celkové ploše povrchů ohraničujících konstrukcí. Je dán následující rovnicí:

$$O = A_v \cdot \frac{h_{eq}}{A_t}, \quad (1.7)$$

kde A_v je celková plocha svislých otvorů ve všech stěnách ohraničující požární úsek, h_{eq} je vážený průměr výšek oken ve všech stěnách ohraničující požární úsek a A_t je celková plocha konstrukcí ohraničující požární úsek [1].

Hodnota faktoru je v ČSN EN 1991-1-2 [1] omezena a lze ho použít pouze v rozsahu $\langle 0,02 \leq O \leq 0,2 \rangle$.

2.3.2.2 Tepelná pohltivost ohraničujících konstrukcí (součinitel b)

Tepelná pohltivost ohraničujících konstrukcí je v [1] popsána součinitelem b . Výši tohoto součinitele ovlivňují materiálové vlastnosti konstrukcí, které ohraničují posuzovaný požární úsek. Pro homogenní konstrukci platí následující rovnice:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c}, \quad (1.8)$$

kde λ je tepelná vodivost konstrukcí ohraničujících požární úsek, ρ je objemová hmotnost konstrukcí ohraničujících požární úsek a c je specifické teplo konstrukcí ohraničujících požární úsek.

Pokud je nutné posoudit vícevrstvou konstrukci, je výpočet složitější. Jeho detailní postup lze opět nalézt v příloze A normy ČSN EN 1991-1-2 [1].

Hodnota součinitele je rovněž omezena a lze ho použít pouze v rozsahu $\langle 100 \leq b \leq 2200 \rangle$.

2.3.2.3 Návrhová hustota požárního zatížení $q_{t,d}$

Tento vstupní parametr vyjadřuje hustotu požárního zatížení, která je uvažována při návrhu na účinky požáru a stanovuje tepelné zatížení. Její hodnota zahrnuje i rezervu pro nejistoty. Je dána rovnicí:

$$q_{t,d} = q_{f,d} \cdot \frac{A_f}{A_t}, \quad (1.9)$$

kde $q_{f,d}$ je návrhová hodnota hustoty požárního zatížení, vztažená k ploše podlahy A_f a celkové ploše konstrukcí ohraničujících požární úsek A_t .

Možný rozsah tohoto vstupního parametru je dle [1] následující: $\langle 50 \leq q_{t,d} \leq 1000 \rangle$

2.3.2.4 Rychlost rozvoje požáru

Rychlost rozvoje požáru je tabulková hodnota, která závisí na provozu, který se v posuzovaném požárním úseku nachází. Máme tři stupně rychlosti rozvoje požáru – malou, střední a velkou. [1]

2.3.3 Citlivostní analýza vstupních parametrů

Cílem prováděné citlivostní analýzy bylo zjištění, jak se mění průběh parametrické teplotní křivky ve vztahu k jejím vstupním parametrům. Tato analýza byla prováděna v programu Python [2], který je podrobněji popsán v části 4.1.

Postup analýzy byl takový, že z celkového počtu 4 vstupních parametrů, které jsou popsány výše, byly vždy 3 fixní (tedy dané jednou neměnnou hodnotou) a jeden parametr byl proměnný – zadaný intervalem. Všechny tři fixní hodnoty pak byly postupně kombinovány s hodnotami v daném intervalu. Vznikly tak celkem čtyři kombinace vstupních parametrů.

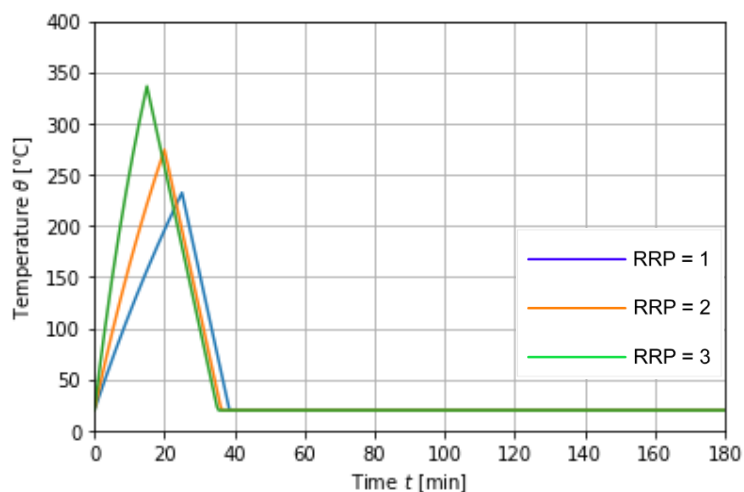
Jako fixní parametry byly zvoleny následující hodnoty:

- $q_{t,d} = 67,036 \text{ MJ/m}^2$
- $O = 0,089 \text{ m}^{1/2}$
- $b = 2106,419 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$
- RRP = 2 (střední rychlost rozvoje požáru)

Tyto parametry odpovídají konkrétnímu PÚ, který je detailně popsán v kapitole 4 této práce.

2.3.3.1 Kombinace č. 1

V první kombinaci tvořily fixní parametry $q_{t,d}$, O a b . Rychlost rozvoje požáru byla zadána intervalem <1;3>, kdy 1 = malá rychlost rozvoje požáru, 2 = střední rychlost rozvoje požáru a 3 = velká rychlost rozvoje požáru. Průběh jednotlivých parametrických křivek je vidět na následujícím obrázku:



Obr. 6 - Výsledné křivky pro kombinaci vstupních parametrů č. 1

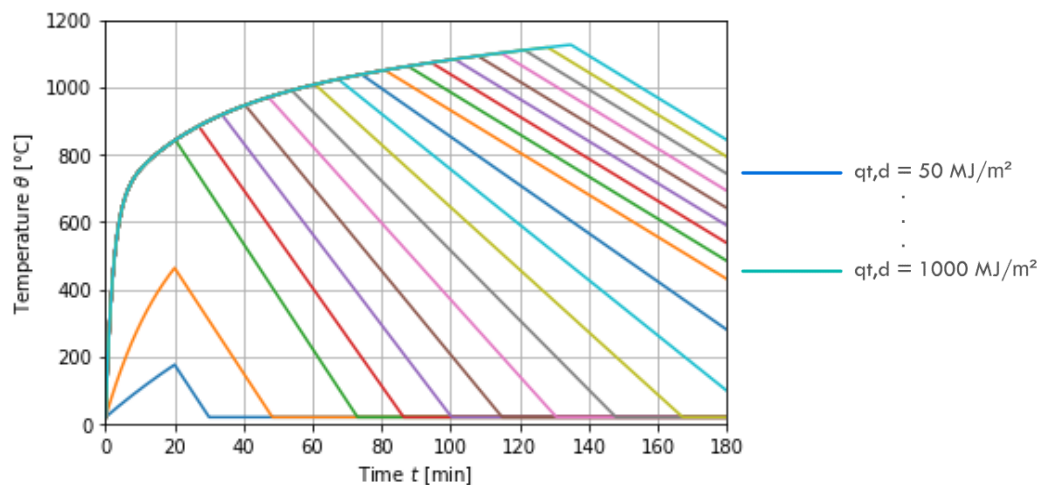
V závislosti na rychlosti rozvoje požáru bylo v PÚ dosaženo následujících teplot:

- RRP = 1 → $\theta_{\max} = 232,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- RRP = 2 → $\theta_{\max} = 274,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- RRP = 3 → $\theta_{\max} = 336,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$

To dokazuje, že čím je rychlost rozvoje požáru větší, tím je dosaženo vyšší maximální teploty v požárním úseku. Z grafu je také patrné, že čím je rychlost rozvoje požáru větší, tím je strmější exponenciální fáze grafu a maximální teploty θ_{\max} je tak dosaženo rychleji.

2.3.3.2 Kombinace č. 2

Druhá kombinace je tvořena třemi fixními parametry – O, b a RRP, $q_{t,d}$ je dáno rozsahem hodnot v intervalu $\langle 50;1000 \rangle$. Po kombinaci parametrů byly generovány následující průběhy parametrických teplotních křivek (viz. následující obrázek), které byly generovány po 50 MJ/m^2 .

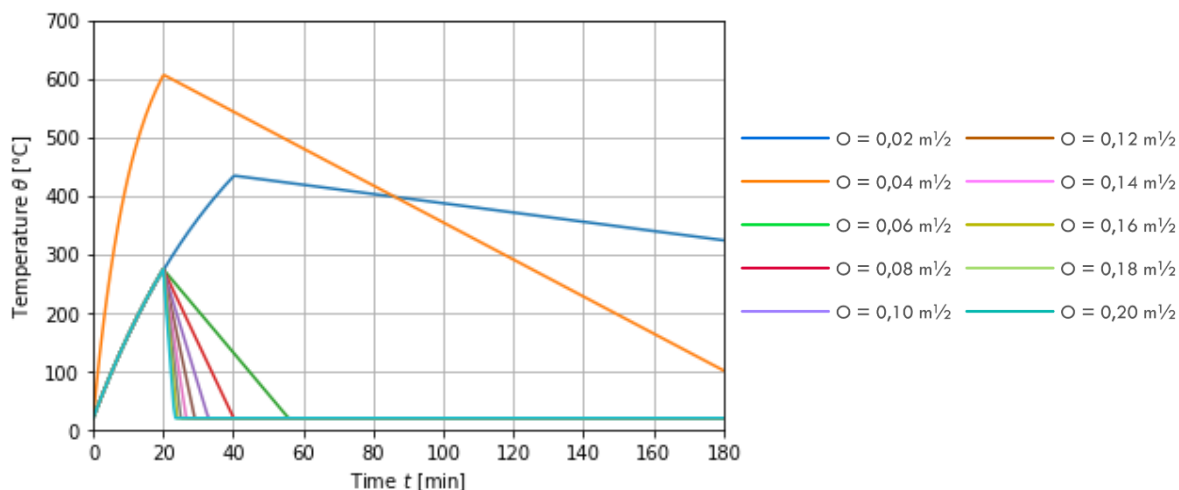


Obr. 7 - Výsledné křivky pro kombinaci vstupních parametrů č. 2

Z grafů je vidět, že návrhová hustota požárního zatížení $q_{t,d}$ ovlivňuje, jaká maximální teplota byla v požárním úseku dosažena a v jaký čas. Např. při $q_{t,d} = 50 \text{ MJ/m}^2$ byla dosažena maximální teplota v PÚ $\theta_{\max} = 175,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy této hodnoty bylo dosaženo přibližně ve 20. minutě požáru. Zatímco při $q_{t,d} = 1000 \text{ MJ/m}^2$ bylo dosaženo $\theta_{\max} = 1125,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ po více jak 120 minutách požáru.

2.3.3.3 Kombinace č. 3

Při třetí kombinaci tvořily fixní parametry $q_{t,d}$, b a RRP a intervalově byl tentokrát zadán parametr O , který byl v rozsahu $\langle 0,02;0,2 \rangle$. Výpočetní krok byl zvolen $0,02 \text{ m}^{1/2}$. Pomocí programu Python [2] byly vygenerovány následující křivky:

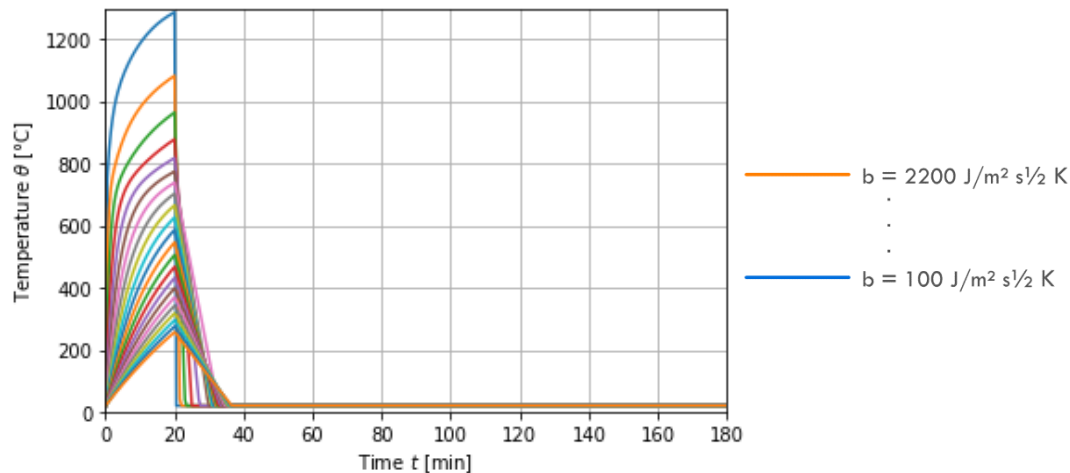


Obr. 8 - Výsledné křivky pro kombinaci vstupních parametrů č. 3

Graf ukazuje, že pro nejnižší hodnotu intervalu, tedy $O = 0,02 \text{ m}^{1/2}$ byla dosažena maximální teplota v PÚ cca $\theta_{\max} = 433,8 \text{ °C}$, pro $O = 0,04 \text{ m}^{1/2}$ byla dosažena maximální teplota $\theta_{\max} = 605,1 \text{ °C}$. Pro zbylé parametry intervalu, tedy $O = 0,06 - 0,2 \text{ m}^{1/2}$, bylo dosaženo vždy stejné maximální teploty $\theta_{\max} = 274,2 \text{ °C}$, rozdílný byl pouze průběh druhé části grafu, tedy lineární pokles, kdy teplota v PÚ dosáhla opět 20 °C .

2.3.3.4 Kombinace č. 4

Při poslední kombinaci této analýzy tvořily fixní parametry $q_{t,d}$, O a RRP a intervalově byl zadáván součinitel b , který se pohyboval v rozsahu $\langle 100; 2200 \rangle$ a výpočetní krok byl zvolen $100 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$. Výsledkem této kombinace byly následující grafy:



Obr. 9 - Výsledné křivky pro kombinaci vstupních parametrů č. 4

Zmíněný graf ukazuje, že pokud je měněna hodnota součinitele b , mění se hodnota θ_{\max} i rychlost, s jakou je maximální teplota v PÚ dosažena. Tentokrát platí, že čím je vyšší hodnota parametru b , tím je nižší θ_{\max} . Pro $b = 100 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$ byla dosažena maximální teplota $\theta_{\max} = 1286,8 \text{ °C}$ a pro $b = 2200 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$ byla dosažena teplota $257,2 \text{ °C}$.

Zajímavou skutečností ale je, že i když je hodnota součinitele b pokaždé jiná, maximální teploty v PÚ je dosaženo vždy ve stejném čase, v tomto případě přibližně ve 20. minutě požáru.

V následujících částech této práce bude ukázáno, jaký mají kombinace vstupních parametrů vliv na průběh parametrické teplotní křivky. Jednotlivé vstupní parametry budou kombinovány pomocí dvou pravděpodobnostních metod – Monte Carlo a Latin Hypercubes Sampling.

2.4 Pravděpodobnostní metody

2.4.1 Metoda Monte Carlo

Metoda Monte Carlo je numerická metoda, která řeší matematické a jiné problémy a úlohy pomocí modelování náhodných veličin a statistického odhadu jejich charakteristik. Matematický základ této metody je tedy založen na teorii pravděpodobnosti a matematické statistice.

Touto metodou je možné řešit nejen matematické úlohy, ale i řadu problémů z mnoha oborů, jako je např. fyzika, technické vědy, ekonomie a jiné, které nelze zvládnout nestochastickými metodami.

Všechny algoritmy založené na metodě Monte Carlo mají jedno společné, a to výpočet založený na mnohokrát opakovaných náhodných pokusech (odhadech náhodné veličiny). Díky tomu lze takto řešit úlohy jak deterministické, tak stochastické.[7] Jelikož je při řešení většiny úloh třeba provést velké množství simulací (obvykle tisíce až miliony), je generování vstupních náhodných čísel, provádění vlastních simulací i ukládání a zpracování výsledků prováděno pomocí počítače. Pro všechny metody Monte Carlo je k provedení simulací třeba získat náhodné proměnné – náhodná čísla. Tato čísla je možné generovat pomocí několika typů generátorů. Mezi nejjednodušší generátory náhodných čísel lze zařadit hrací kostku nebo házení mincí. Pro jednodušší manuální výpočty lze využít tabulky náhodných čísel. Pro náročnější výpočty jsou potom využívány sofistikovanější generátory. Prvním typem je fyzikální generátor, kde jsou náhodná čísla získávána na základě nějakého přírodního jevu s náhodným chováním. Druhým typem je generátor pseudonáhodných čísel, kdy jsou tato čísla generována počítačem pomocí speciálního algoritmu. [8, 9]

Obecně lze říct, že úspěch celého výpočtu metodou Monte Carlo závisí na:

- kvalitě generátoru náhodných, resp. pseudonáhodných čísel,
- výběru racionálního algoritmu výpočtu,
- kontrole přesnosti získaného výsledku. [7]

2.4.1.1 Historie

Historie metody je spojená s vývojem americké atomové bomby za 2. světové války. Tento tajný projekt je znám pod krycím názvem Manhattan a podílel se na něm například polský matematik židovského původu Stanislaw Marcin Ulam, který je v souvislosti s metodou nejčastěji skloňován, a který tuto metodu pojmenoval metodou Monte Carlo. Nechal se inspirovat známým kasinem v Monaku, kde údajně Ulamův strýc kdysi sázel – náhodnost jevů a opakování jejich výskytu jsou prakticky identické k činnostem prováděným v kasinech, kde ruleta představuje jednoduchý fyzikální generátor náhodných čísel. Metoda byla ale použita již dříve např. fyzikem Enricem Fermim a jeho spolupracovníky, kteří se také podíleli, na již zmíněném projektu Manhattan.

První aplikace metody Monte Carlo je známá již z roku 1777, kdy se matematik Georges-Louis Leclerc Comte de Buffon pokoušel odhadnout hodnotu Ludolfova čísla π náhodným vrháním jehly na linkovaný papír. [10]

2.4.1.2 Princip metody

Metoda řeší danou úlohu experimentováním se stochastickým modelem, v němž se využívá vzájemného vztahu mezi hledanými veličinami a pravděpodobnostmi, se kterými nastanou určité jevy. Každý pokus je nezávislý na ostatních, díky čemuž je metoda často nazývána také metodou statistických pokusů (Simple Random Sampling). Počet opakování může být libovolný a závisí na požadované přesnosti výpočtu. Při velkém počtu nezávislých pokusů je možné téměř jistě očekávat, že se relativní četnost bude blížit teoretické hodnotě pravděpodobnosti, což je dáno zákonem velkých čísel. Ten lze popsat s pomocí střední hodnoty a náhodné veličiny:

$$\bar{X}_n = \frac{1}{N}(X_1 + X_2 \dots + X_n) \quad (1.10)$$

Kde X_1, X_2, \dots, X_n představuje nekonečnou posloupnost vzájemně nezávislých náhodných čísel s konečnou střední hodnotou $\mu < \infty$. Se zvyšujícím se počtem historií, kdy $n \rightarrow \infty$, bude střední hodnota vygenerované posloupnosti konvergovat ke střední hodnotě $\bar{X}_n \rightarrow \mu$.

Pokud se metoda Monte Carlo používá pro určení pravděpodobností zkoumaných náhodných jevů, vychází se přitom z elementární definice pravděpodobnosti:

$$P = \frac{N_p}{N}, \quad (1.11)$$

kde N je celkový počet simulací a N_p počet příznivých případů, tj. kdy nastal vyšetřovaný náhodný jev. [10]

2.4.1.3 Hlavní využití

Metoda se využívá hlavně pro:

- výpočet vícerozměrných integrálů,
- simulaci experimentů jako jsou např. štěpné reakce, difuze plynů nebo proudění tekutin,
- řešení diferenciálních rovnic,
- **výpočet nejistot.**

2.4.1.4 Souvislost metody s „problémy“ v oblasti stavebnictví

Metoda Monte Carlo, která se někdy označuje také jako klasická, přímá elementární nebo jednoduchá, je metodou velmi názornou a často používanou. Její názornost je totiž blízká inženýrskému myšlení, protože je schopná určitým způsobem simulovat reálné chování konstrukcí. Postup metody spočívá v numerické simulaci řešeného problému – v opakovaném řešení funkce poruchy $g(\mathbf{X})$ vždy s jiným náhodně generovaným vektorem vstupních náhodných veličin \mathbf{X} . [4]

Postup při obecné simulaci j (kde $j = 1, 2, \dots, N$, kde N je celkový počet simulací) je následující:

- Generování jednotlivých realizací vektoru X (realizace náhodných veličin $x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{n,j}$) podle příslušných rozdělení pravděpodobnosti.
- Na základě vygenerovaných realizací je vypočtena funkce poruchy $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ a je tak získána hodnota rezervy spolehlivosti pro j -tou simulaci:

$$z_j = g(x_{1,j}, x_{2,j}, \dots, x_{i,j}, \dots, x_{n,j}) \quad (1.12)$$

- Výše zmíněným postupem je získán statistický soubor veličiny Z ($z_1, z_2, \dots, z_j, \dots, z_N$), který je následně možno vyhodnotit pomocí matematické statistiky a získat tak odhad střední hodnoty a směrodatné odchylky. Většinou není přímo zjišťována pravděpodobnost poruchy, jejíž funkci nelze uspokojivě definovat. Funkce $g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ pak nepředstavuje funkci poruchy, ale funkci odezvy (např. deformaci konstrukce). [4]
- Pokud je $z_j \leq 0$, pak dochází k poruše. Výsledná pravděpodobnost poruchy p_f je pak získána vztahem, který vychází z elementární definice teoretické pravděpodobnosti:

$$p_f = \frac{N_f}{N}, \quad (1.13)$$

kde N_f je počet případů, kdy nastává porucha, v průběhu všech N simulací.

Přesnost odhadu pravděpodobnosti poruchy závisí na celkovém počtu N simulací a řádu odhadované pravděpodobnosti. Čím větší jsou hodnoty N a N_f , tím je odhad realističtější. Pravděpodobnost poruchy je také náhodná veličina a vždy když dojde ke změně zdrojových čísel generátorů pro generování náhodných veličin, dostáváme jiný odhad.

Obecně lze říct, že pro malé pravděpodobnosti, se kterými se nejčastěji setkáváme ve stavební spolehlivosti, je nutné použít vysoký počet simulací. Tento fakt bohužel silně omezuje použitelnost této metody. Proto byly vyvinuty jiné (dokonalejší) simulační postupy, které nevyžadují tak velké počty simulací jako je např. metoda Latinských nadkrychlí, která bude popsána následně. Vzhledem k tomu, že ale máme k dispozici stále výkonnější počítače je tato metoda používána ve všech inženýrských oblastech. Často se také používá k verifikaci komplikovanějších simulačních metod. [4]

2.4.2 Metoda Latinských Nadkrychlí (Latin Hypercube Sampling)

Metoda Latin Hypercube Sampling (LHS) byla původně vyvinuta k odhadu statistických parametrů odezvy (konstrukce), v současné době představuje jeden z nejučinnějších postupů – výhodou je výrazné snížení počtu simulací oproti prosté metodě Monte Carlo (z řádu tisíců simulací na desítky až stovky). I přes malý počet simulací LHS zachovává funkci rozdělení všech simulovaných veličin a dodržuje požadované korelace mezi veličinami. Proces simulace prováděný pomocí této metody můžeme rozdělit na dvě fáze:

- 1) Výběr vzorků, které reprezentují funkce hustot pravděpodobnosti daných veličin.
- 2) Práce s pořadími vzorků tak, aby se dosáhlo požadované statistické závislosti mezi veličinami.

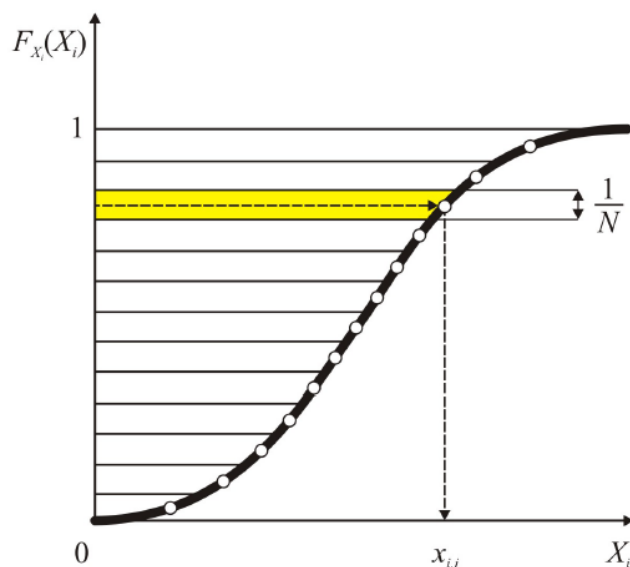
U vzorků nedochází ke změně jejich hodnot, je pouze zaměňováno pořadí, proto rozdělení pravděpodobnosti veličin zůstane původní (nezměněné). [11]

2.4.2.1 Historie

„První zavedení metody Latinských nadkrychlí souvisí s řešením a zpracováním nejistot v analýzách bezpečnosti nukleárních elektráren ve Spojených státech amerických. Metoda byla prvně publikována Conoverem a jeho kolegy v roce 1979 a její praktické použití v práci Imana a Conovera (1982).“ [12]

2.4.2.2 Princip metody

Pravděpodobnost poruchy p_f je v případě metody LHS získávána z určitého počtu realizací funkce poruchy $g(\mathbf{X})$ n náhodných veličin $\mathbf{X} = X_1, X_2, \dots, X_n$ podobně jako u klasické simulace Monte Carlo. Metoda LHS je vhodná pro odhad statistických parametrů funkce poruchy $g(\mathbf{X})$ při malém počtu simulací N . Definiční obor distribuční funkce $F(X_i)$ každé náhodné veličiny X je rozdělen na N intervalů o stejné pravděpodobnosti $1/N$ viz Obr. 10.



Obr. 10 - Rozdělení definičního oboru distribuční funkce spojité náhodné veličiny při výpočtu metodou LHS – převzato z [10]

Reprezentativní hodnoty veličiny jsou při simulaci vybírány náhodně na základě náhodných permutací celých čísel 1, 2, ..., N. Při výpočtu je provedeno právě N simulací, během kterých je každý z intervalů vybrán pouze jednou. Z každého intervalu je vybrána střední hodnota, hodnota odpovídající mediánu nebo naprosto náhodně zvolená hodnota. Z této hodnoty se na základě distribuční funkce $F_{X_i}^{-1}(X_i)$ určí reprezentativní hodnota $x_{i,j}$ náhodné veličiny X_i . Tímto je zajištěno, že se při simulacích rovnoměrně pokryje celý rozsah distribučních funkcí náhodné veličiny, to vede k uspokojivým odhadům výsledných pravděpodobností při relativně malém počtu simulací.

Existuje možnost uvažovat pouze omezený rozsah náhodné veličiny a vyloučit tak nepřipustné realizace. Příkladem jsou např. rozsahy parametrů potřebné pro výpočet parametrické teplotní křivky uvedené v [1] jako je faktor otvorů O ($0,02 \leq O \leq 0,2$), součinitel b ($100 \leq b \leq 2200$) nebo návrhová hustota požárního zatížení $q_{t,d}$ ($50 \leq q_{t,d} \leq 1000$).

Při pravděpodobnostních výpočtech prováděných pomocí metody LHS je možno uvažovat statistickou závislost jednotlivých vstupních veličin a to pomocí tzv. korelační matice, která obsahuje korelační koeficienty mezi jednotlivými náhodnými veličinami. Při výpočtu pak dochází k iteraci, kdy se přeuspořádá obsah tzv. tabulky náhodných permutací tak, aby se korelační matice výsledných náhodných veličin co nejvíce blížila korelační matici zadané.

Tabulka náhodných permutací obsahuje náhodné permutace celých čísel 1, 2, ..., N pro každou náhodnou veličinu. Každý řádek tabulky přísluší specifické simulaci (1, 2, ..., N) a každý sloupec přísluší jedné z uvažovaných náhodných veličin (X_1, X_2, \dots, X_n). Výsledkem takovýchto simulací jsou rezervy spolehlivosti Z_i ($i = 1, 2, \dots, N$).

Metoda LHS tedy poskytuje parametry rezervy spolehlivosti jako je střední hodnota, směrodatná odchylka, koeficient šikmosti nebo koeficient špičatosti a představuje tak jeden z nejúčinnějších postupů k odhadu statistických parametrů odezvy konstrukce. [4, 10, 11]

3 Požár jako nepředvídatelný jev

3.1 Řešení požární bezpečnosti staveb

Obecně lze požární bezpečnost staveb řešit dvěma přístupy – preskriptivním přístupem nebo odlišným tzv. požárně inženýrským přístupem (performance-based design). Požárně inženýrský přístup byl postupně začleněn do právních předpisů po celém světě, v ČR řeší tuto problematiku Zákon 133/1985 Sb. O požární ochraně, § 99. Tento přístup umožňuje požárním inženýrům používat racionální přístup k zajištění požární bezpečnosti staveb. Ponechává prostor pro nové materiály, systémy a metody, které jsou využity pro návrh budovy. Kvalitativně řeší faktory a vstupní parametry, které mají být zohledněny v procesu návrhu.

Oproti tomu preskriptivní přístup řeší návrh budovy v souladu s legislativními předpisy, vychází z historického vývoje a neumožňuje takovou kreativnost a individuální přístup k návrhu jako PIP.

Bez ohledu na to, zda je konstrukční návrh normativní nebo zda byl použit požárně inženýrský přístup je zásadní, aby měl požární inženýr vždy představu o míře rizika, které je spojeno s návrhem konstrukce za požáru. Současné postupy, které se hojně využívají (standardní požární zkouška) nepřinášejí žádné informace o spolehlivosti konstrukce, zejména proto, že jediné, co se při zkoušce získá, je doba trvání do selhání konstrukce při standardní expozici požáru. Normativní metoda je považována za konzervativní a neexistuje zatím způsob, jak skutečně kvantifikovat míru konzervatismu ve stávajících návrzích. [13]

Přechod od normativního (preskriptivního) přístupu k projektování za pomoci požárně inženýrského přístupu umožňuje požárním inženýrům uplatnit poznatky o skutečném strukturálním chování během požáru. Zohlednění nejistot pak umožňuje kvantifikovat spolehlivost navrhovaného řešení. [13, 14]

Protože se pravděpodobnostní přístup odchyluje od normativního přístupu k projektování a snaží se přiblížit možné reálnější průběhy požáru, lze ho zařadit do oblasti projektování požárně inženýrským přístupem. Cílem této práce bude poukázat na to, jak může pravděpodobnostní přístup ovlivnit výsledky požárních modelů (konkrétně průběhy parametrické teplotní křivky) a jak moc se budou tyto výsledky lišit oproti převážně využívaným deterministickým modelům, tedy průběhům, které byly získány na základě výpočtů z normy [1].

3.2 Pravděpodobnostní přístup

Pravděpodobnostní přístup je realizován v mnoha inženýrských oblastech jako je např. problematika týkající se zemětřesení, výbuchu, tsunami, hurikánů nebo větru. Postupně je tento přístup používán i v požárním inženýrství.

Pomocí tohoto přístupu lze v oblasti požárního inženýrství stanovit nejen odezvu konstrukce na účinky požáru, ale také pravděpodobnost různých požárních scénářů (teplotu v PÚ, deformaci konstrukce nebo dobu selhání konstrukce). Odhad selhání konstrukce je z hlediska návrhu nejvýznamnějším ukazatelem spolehlivosti a lze jej stanovit pomocí různých pravděpodobnostních metod jako jsou např. výše zmíněné metody Monte Carlo nebo LHS. [15]

Existuje návrhový přístup nazývaný pravděpodobnostní strukturální požární inženýrství (PSFE), které je založeno na pravděpodobnostním požárně inženýrském přístupu a vychází z inženýrství zabývající se zemětřesením. Tento přístup nejenže posuzuje úroveň bezpečnosti zdraví osob, ale také pomáhá při odhadu pravděpodobných ztrát a škod. Zohledňuje i další cíle návrhu, které zatím nejsou součástí žádných konstrukčních předpisů, ale ovlivňují různé zúčastněné strany jako např. vlastníky budov, pojišťovny nebo hospodářství a ekonomiku obecně. [15]

Z výše uvedeného vyplývá, že pravděpodobnostní analýza požární odolnosti konstrukce poskytuje lepší pochopení faktorů ovlivňujících odolnost konstrukcí vůči požáru a nabízí prostředek pro racionální zlepšení konstrukčních návrhů.

Pravděpodobnostní řešení problému v oblasti požárního inženýrství vyžaduje:

- 1) identifikaci a charakterizaci nejistých parametrů v systému (v modelu),
- 2) stochastickou (pravděpodobnostní) analýzu termomechanické odezvy konstrukce,
- 3) vyhodnocení spolehlivosti konstrukce. [13]

3.2.1 Obecný pojem NEJISTOTA

Nejistota je široký a obecný termín používaný k popisu různých pojmů jako je nedostatek znalostí, variabilita, náhodnost, neurčitost, jazyková nepřesnost nebo chyba. Často se nejistota pojí s nejistotou měření, resp. s pochybností o správnosti výsledků měření. Také může vzniknout z náhodnosti (např. Kde a jak vznikne požár?) nebo může být spojena s variabilitou (např. s okolní teplotou při požáru nebo s celkovým počtem zemřelých v důsledku požáru), což je ovlivněno regionální polohou, ročním obdobím, druhem prostoru nebo velikostí komunity. Neurčitost je v tomto případě myšlena neschopností predikovat budoucnost (např. obsazenost budovy a vybavení se může lišit 10 nebo 20 let po její výstavbě) nebo může dojít k nejistotě v důsledku toho, že nejsme schopni predikovat lidské chování v době požáru. Nejistota také může vzniknout v důsledku obtížného definování řešeného problému.

Jak je vidět pochopení významu nejistoty je zásadní pro přijímání správných rozhodnutí v oblasti požární bezpečnosti. Rozmanitost různých použití pojmu nejistota spolu s absencí dohodnuté terminologie může v oblasti požární ochrany vyvolat značný zmatek. V praxi je ale stále běžnější klasifikovat nejistotu do dvou hlavních kategorií, a to aleatorní nejistoty a epistemické nejistoty. [16]

3.2.1.1 Aleatorní nejistota

Aleatorní nejistota je nejistota spojená s náhodností. Projevuje se například nepředvídatelností času, ve kterém dojde ke konkrétní události např. ke vzniku požáru. Obecně lze říct, že požární modely jsou vytvářeny z událostí, které jsou náhodné a nepředvídatelné. Náhodnost je proto základním prvkem požárního modelu analyzovaného systému. [16]

3.2.1.2 Epistemická nejistota

Epistemická nejistota je nejistota spojená s neúplnými znalostmi analytika jako je např. nedostatek úplných vědeckých poznatků nebo omezené zdroje dat pro modelovaný scénář. Jako každý model se i ten požární snaží co nejvíce se přiblížit realitě. Protože jsou ale znalosti analytika neúplné, vznikají nejistoty už při volbě postupu modelování daného systému. U každého takového modelu je také nutné provést řadu zjednodušení a aproximací. Výsledky požárních modelů proto podléhají epistemické nejistotě.

Oba typy nejistot jsou řešeny matematicky pomocí teorie pravděpodobnosti, je ale důležité zachovávat mezi nimi rozdíl. Podstatný rozdíl mezi oběma nejistotami spočívá v tom, že epistemická nejistota je v zásadě redukovatelná prostřednictvím shromáždění většího množství znalostí, zatímco aleatorní nejistota nikoliv, ta je totiž zakotvena přímo ve struktuře modelu. [16]

3.2.2 Nejistoty v požárním inženýrství

Mezi hlavní zdroje nejistot v oblasti požárního inženýrství můžeme zařadit např.:

- požární modely a jejich zjednodušení,
- metody analýzy,
- rozsahy a závažnosti požárů (výskyt, povaha, vývoj teploty),
- vlastnosti posuzovaných materiálů,
- lidské chování během požáru. [15]

3.2.2.1 Požární modely a jejich zjednodušení

V souvislosti s požárními modely nelze nezmínit nejistoty, které vznikají již v procesu samotného návrhu. Nelze totiž žádným způsobem měřit požární bezpečnost budovy, proto se musíme spoléhat na prediktivní schopnost vědeckých nástrojů, jako jsou požární modely. Problémem ale je, že při používání těchto konstrukčních nástrojů zůstává řada nejistot nerozpoznaných nebo ignorovaných.

Jedním z mnoha typů nejistot, které bývají obvykle nejsnadněji rozpoznatelné a kvantifikovatelné jsou **vědecké nejistoty**, které jsou způsobeny jednak nedostatkem znalostí (např. ve fyzice, chemii nebo mechanice tekutin) a jednak nezbytnými aproximacemi požadovanými pro provozní praktičnost modelu nebo výpočtu. [16]

Mnoho typů vědeckých nejistot lze rozdělit do pěti podkategorií:

1. nejistoty teorie a modelu
2. nejistoty údajů a vstupů
3. omezení výpočtu
4. úroveň podrobností modelu
5. reprezentativnost návrhových scénářů požáru

Nejistoty teorie a modelu vznikají kvůli nedostatku znalostí o tom, jak zahrnout fyzické procesy. Tyto procesy jsou pak modelovány na základě empiricky odvozených korelací nebo jsou vytvořeny zjednodušující předpoklady. Tento typ nejistot bývá přítomen ve většině požárních modelů a způsobuje tak nejistoty ve výsledcích.

Nejistoty údajů a vstupů vyplývají z nedostatečné znalosti konkrétních vstupních hodnot a z jejich možné variace, která je závislá na mnoha faktorech jako je čas, teplota nebo oblastní umístění.

Jakákoliv omezení vstupující do požárních modelů nebo výpočetních postupů mají vliv na výsledky a na úroveň podrobnosti daného modelu.

Další nejistota je do požárních návrhů vnášena počtem a typem požárních scénářů, které jsou nutné pro návrh budovy z hlediska požární bezpečnosti. Mezi požárními scénáři a realitou ale mohou být velké rozdíly, což také velmi ovlivňuje spolehlivost výsledků. [16]

3.2.2.2 Metody analýzy

Problémem, který také vyvstává v souvislosti s nejistotami, je jejich analýza. Analýza nejistot je obtížná hned z několika důvodů jako je nedostatek dat nebo nepraktičnost, kdy by provedení takové analýzy vyžadovalo velkou odbornost v oblasti matematiky.

Panují také obavy, že zpracování nejistoty ukáže, že naše současné schopnosti předvídat některé procesy, jako je hromadění tepla nebo spalování toxických produktů, nejsou tak přesné, aby bylo možné vyhodnotit návrhy jako přijatelné a spolehlivé. V důsledku toho by došlo k oddálení realizace jakéhokoliv návrhu do doby, než by byla zpřesněna určitá kritéria. [16]

3.2.2.3 Rozsahy a závažnosti požárů

Vývoj požáru obecně závisí na čtyřech klíčových faktorech, konkrétně na množství a druhu paliva, větrání, geometrii místnosti a tepelných vlastnostech ohraničujících konstrukcí viz Obr. 11, kde jsou vstupy do modelu zobrazeny v levém sloupci, zatímco výstupy z modelu jsou zobrazeny vpravo. Stochastická analýza systému zahrnuje šíření nejistoty, která ovlivňuje každou fázi odezvy konstrukce na účinky požáru. Například nejistoty v geometrii prostoru, typu a distribuci paliva a v podmínkách větrání vedou k nejistému požárnímu zatížení, které následně ovlivňuje rozložení teploty v konstrukci, a nakonec i mechanickou odezvu konstrukce. [13]



Obr. 11 - šíření nejistoty při simulaci požáru konstrukce – převzato z [13]

3.2.3 Nejistoty v modelu parametrické teplotní křivky

Parametrická teplotní křivka, která je popsána v příloze A normy ČSN EN 1991-1-2 [1], je závislá na hustotě požárního zatížení q_{td} , součiniteli b , který charakterizuje tepelné vlastnosti ohraničujících konstrukcí, na faktoru otvorů O , který charakterizuje podmínky větrání, a na rychlosti rozvoje požáru. [17]

Tento model požáru u některých parametrů jako je geometrie prostoru nebo množství paliva očekává, že způsobí nejistotu v chování konstrukce při požáru, nedokáže ale zachytit účinky jako je např. prostorové rozložení paliva. [13]

3.2.3.1 Požární zatížení

Velkým zdrojem nejistot, které vstupují do požárních modelů, a tedy i do modelu parametrické teplotní křivky, je požární zatížení. Tento vstupní parametr výrazně ovlivňuje průběh a velikost požáru, je ale velice těžké ho stanovit. Hustota požárního zatížení je ovlivněna specifickým využitím každé budovy. I u stejných typů budov se hustota zatížení může lišit, také kultura a zeměpisná poloha ovlivňuje tento vstupní parametr. Variabilita tohoto parametru je příliš velká na to, než aby byla ignorována. Dále je dobré si v souvislosti s tímto parametrem také uvědomit, že současná podoba normy ČSN EN 1991-1-2 [1] uvádí hustotu požárního zatížení pouze pro pár provozů. [15]

3.2.3.2 Větrací podmínky

Dalším faktorem, který ovlivňuje vývoj požáru v prostoru, je větrání. Stav větrání v PÚ je vyjádřen jako faktor otvorů O .

Ačkoliv potenciální maximální ventilace požárního úseku má pevnou hodnotu díky jasně stanoveným rozměrům konstrukcí, resp. otvorů a lze ji tak snadno spočítat, množství ventilace dostupné během požáru je nejisté a závisí na procentuálním podílu otevřených oken a selhání zasklení během požáru. Názory na problematiku větrání během požáru se liší, v [15] je např. uváděna rovnice, která zohledňuje změnu intenzity větrání během požáru.

Tato rovnice používá maximální možnou ventilaci daného požárního úseku a navrhuje hodnotu tzv. dostupné ventilace (tj. po rozbití okenních skel při požáru). Tato rovnice vypadá následovně:

$$F_v = F_{vmax} (1 - \xi), \quad (1.14)$$

kde F_v je faktor otvorů, který je zkrácen na 1, aby byl pozitivní, ξ je redukční faktor s logaritmicko-normální střední hodnotou 0,2 a rozptylem 0,2 a F_{vmax} je maximální faktor otevření daného požárního úseku.

Jiná literatura [18] vychází ze studií, kde se uvádí, že dvojitá nebo trojitá skleněná výplň odolává tepelnému namáhání během požáru bez jakéhokoli nebo jen s omezeným zničením. Tato nejednotnost tedy vyžaduje další studie, které se budou zabývat touto problematikou. Nicméně je jasné, že i tento vstupní parametr vnáší do požárních modelů značné nejistoty a vyžaduje tak pravděpodobnostní přístup.

3.2.3.3 Geometrie místnosti a tepelná charakteristika povrchů ohraničujících konstrukcí

Kromě požárního zatížení a větrání jsou dalšími významnými parametry ovlivňující vývoj požáru geometrie místnosti a tepelná charakteristika povrchů ohraničujících konstrukcí, která je v [1] popsána součinitelem b .

Podle některých vědců je geometrie PÚ, větrání i tepelná charakteristika ohraničujících konstrukcí jasně čitelná ze stavebních výkresů, proto tyto veličiny považují za deterministické. Všechny tyto veličiny se ale významně liší podle využití budovy a jejího umístění, proto je vhodné považovat tyto veličiny za náhodné. [15]

Statistické údaje pro některé parametry požárních modelů uvádí literatura. Některé údaje o dalších parametrech chybí, jsou neúplné nebo zastaralé. Nicméně nedostatek statistických údajů není přijatelný důvod, proč se těmto výpočtům vyhnout zejména proto, že statistické metody lze použít k poskytnutí přiměřené předpovědi odezvy konstrukce. Navíc se ukazuje, že pravděpodobnostní hodnocení je nezbytné pro zajištění konzistentní úrovně bezpečnosti pro protipožární konstrukci. [13]

4 Aplikace pravděpodobnostních metod

Na základě výše zmíněných poznatků budou v rámci řešeného příkladu ukázány oba přístupy, tedy jak preskriptivní, tak i pravděpodobnostní. Výsledky z jednotlivých přístupů budou následně porovnány a vyhodnoceny.

4.1 Použitý software

Veškeré analýzy, včetně řešeného příkladu, byly prováděny v programu Python, verzi 3.7.4 [2], resp. bylo použito vědecké prostředí Spyder 4.0.1.

4.1.1 Python

Python je dynamický, objektově-orientovaný programovací jazyk, který lze využít v mnoha oblastech vývoje softwaru. Vykazuje velkou podporu v integraci s ostatními programovacími jazyky a nástroji. Kromě samotného programovacího jazyka se Python pyšní množstvím knihoven, které dokážou složité úlohy omezit na několik řádků kódu.

Python je relativně jednoduchý, ale přesto výkonný. Právě tato kombinace asi přispěla k jeho velké popularitě. Umožňuje vytvářet mnoho typů programů jako například:

- Finanční, vědecké a mobilní aplikace
- 2D i 3D hry... a další.

4.1.2 Spyder

Spyder je vědecké prostředí napsané v Pythonu, navržené vědci, inženýry a datovými analytiky. Vyznačuje se jedinečnou kombinací pokročilé editace, analýzy, interaktivním prováděním, hloubkovou kontrolou a krásnými vizualizačními schopnostmi vědeckého balíčku.

V kódu, který byl pro účely této práce vytvořen a bude popsán následně, byla využita i knihovna MATLABU, kterou Python dokáže integrovat. [19–21]



Obr. 12 - Použité programy, převzato z [21, 22]

4.1.3 Sestavení programu

Aby bylo zjištěno, jak velký vliv má pravděpodobnostní přístup na průběh parametrické teplotní křivky byl Python [2], včetně vědeckého prostředí Spyder, využit pro naprogramování pravděpodobnostních rozdělení jednotlivých vstupních parametrů parametrické teplotní křivky. Následně v něm byla naprogramována i samotná parametrická teplotní křivka, resp. křivky, které byly generovány na základě kombinací vstupních parametrů metodami Monte Carlo a Latin Hypercubes Sampling. Vznikl tak funkční kód, pro jehož využití uživatel musí znát:

- Rozsahy vstupních parametrů $q_{t,d}$, O a b , které odpovídají konkrétnímu řešenému PÚ a byly stanoveny na základě specifických předpokladů.
- Pravděpodobnostní funkce (hustotu pravděpodobnosti a distribuční funkci), které odpovídají zvoleným rozsahům.
- Inverzní funkci k distribuční funkci zvolených rozdělení (v případě, kdy je pracováno s jiným než rovnoměrným pravděpodobnostním rozdělením).
- Počet simulací, který je nutný pro výpočet.

Pokud uživatel zná výše zmíněné body, je schopen exportovat libovolné množství parametrických teplotních křivek, které jsou vykresleny na základě náhodně generovaných vstupních parametrů, jejich počet odpovídá zvolenému počtu simulací.

Vytvořený funkční kód mimo výše zmíněné body také obsahuje:

- Obecný výpočet pro parametrickou teplotní křivku, která odpovídá příloze A normy ČSN EN 1991-1-2 [1].
- Generátor pseudonáhodných čísel v intervalu $(0; 1)$, která mají rovnoměrné pravděpodobnostní rozdělení. Tato náhodná čísla jsou pak vkládána do rovnic pro inverzní distribuční funkce na základě, kterých se pak generují náhodné vstupní parametry pro parametrickou teplotní křivku.

V souvislosti s těmito fakty je třeba si uvědomit, že takto sestavený kód je funkční **pouze pro určitá pravděpodobnostní rozdělení, která odpovídají konkrétním předpokladům a konkrétnímu PÚ**. Tento PÚ a veškerá další specifika jsou pak popsány v následujících částech této práce.

V případě, že uživatel pracuje za jiných podmínek nebo posuzuje jiný typ PÚ, je třeba kód upravit tak, aby byl v souladu s jeho předpoklady.

```
# Vypocet parametricke teplotni krivky:
#
def ParamTemp(t,0,b,qtd):
    tlim_vent = 0.0002 * qtd/0;
    gamma = (0/b)**2 / (0.04/1160)**2
    if tlim_vent > tlim_fuel:
        # Pozar rizeny vetranim
        Control = 'Ventilation'
        tmax = tlim_vent
        th = t * gamma
        tmaxh = tmax * gamma
        x = 1
    else:
        # Pozar rizeny palivem
        Control = 'Fuel'
        tmax = tlim_fuel
        Olim = 0.1*10**-3 * qtd/tlim_fuel
        if 0 > 0.04 and qtd < 75 and b < 1160:
            k = 1 + (0-0.04)/0.04 * (qtd-75)/75 * (1160-b)/1160
            gammalim = k * (Olim/b)**2 / (0.04/1160)**2
        else:
            gammalim = (Olim/b)**2 / (0.04/1160)**2
        th = t * gammalim
        tmaxh = tmax * gammalim
        x = tlim_fuel / tlim_vent
    Tmax = 20 + 1325*(1 - 0.324*np.exp(-0.2*tmaxh) - 0.204*np.exp(-1.7*tmaxh) - 0.472*np.exp(-19*tmaxh))
    if t <= tmax:
        T = 20 + 1325*(1 - 0.324*np.exp(-0.2*th) - 0.204*np.exp(-1.7*th) - 0.472*np.exp(-19*th))
```

Obr.13 - Ukázka kódu parametrické teplotní křivky odpovídající příloze A normy ČSN EN 1991-1-2 [1]

```
# Vstupni parametry pro promennou qtd, ktere odpovidaji useknutemu normalnimu rozdeleni
a1 = 67.04
b1 = 134.07
delta1 = 25

a2 = -0.02
b2 = -0.089
delta2 = 0.03

a3 = -1831.6
b3 = -2106.4
delta3 = 150

seed(1)
for r in range (1000): # generator pseudonahodnych cisel rovnomerneho rozdeleni v intervalu (0,1)
    r = random()
    print ("random_number = ",r)

    qtd = -(np.log(1-r+(r*(np.exp(-(b1-a1)/delta1)))))*delta1 + a1 # inverzni funkce k distribuci funkci
    qtdqtd.append(qtd)
    rr.append(r)

print ("qtd =",qtd)
```

Obr. 14 - Ukázka kódu v programovacím jazyce Python [2]

4.2 Řešený příklad

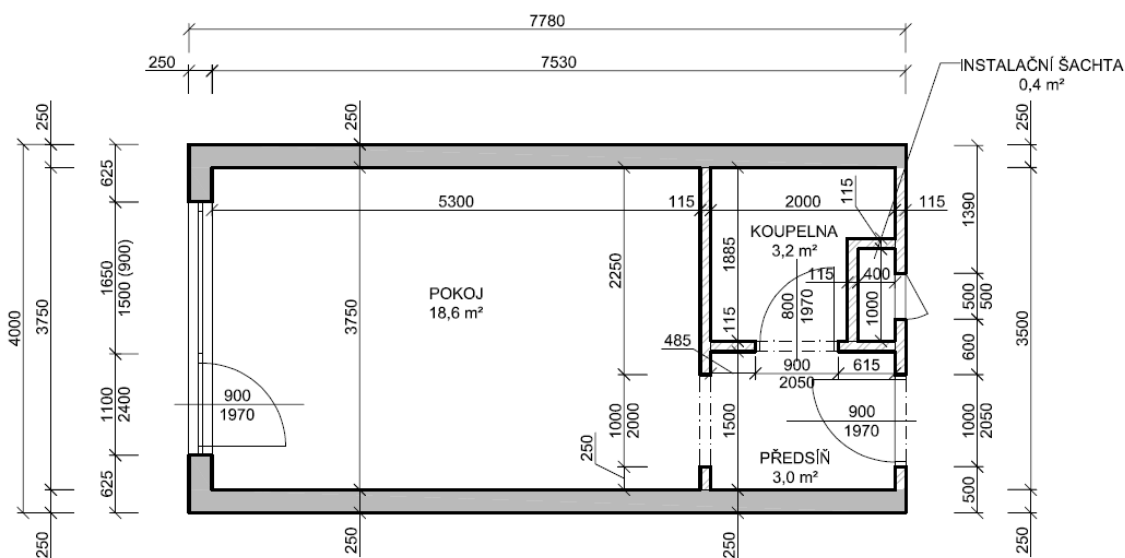
Dle Statistické ročenky 2019 HZS ČR [23] je třetím nejčastějším typem budovy, kde dochází ke vzniku požáru, budova občanské výstavby. V důsledku několika nedávných požárů je v současné době velice řešená otázka požární bezpečnosti hotelů. Proto byl jako řešený příklad vybrán PÚ hotelového pokoje.

Budova, objekt	Počet požárů	Index %	Přímá škoda (mil. Kč)	Index %	Uchráněné hodnoty (mil. Kč)	Usmrceno		
						v přímé souvislosti celkem	Zraněno	
budovy občanské výstavby, včetně budov pro dopravu a spoje	694	96	281,61	68	844,28	18	19	136
bytové domovní fond	1 545	99	169,27	137	913,52	12	16	435
rodinné domky a ostatní budovy pro bydlení	1 606	91	341,03	111	1 247,20	29	31	291
budovy a haly pro výrobu a služby	342	95	317,68	52	3 298,09	1	2	56
energetické výrobní budovy	86	102	85,28	81	2 796,27	0	0	3
budovy a objekty pro garážování	124	97	74,42	62	202,99	2	2	23
budovy pro skladování (bez zemědělských)	52	87	158,29	69	204,19	0	0	7
budovy pro skladování zemědělských produktů	35	58	40,54	22	121,79	0	0	6
budovy pro rostlinou a živočišnou výrobu	36	72	16,65	37	100,49	1	1	4
objekty v zemědělství	8	67	7,56	82	7,03	0	0	6
objekty mimo budovy (bez zemědělských)	182	96	8,51	10	78,58	0	0	7
objekty ve výstavbě a rekonstrukci	41	132	18,32	440	44,61	1	1	7
provizoria a účelové objekty u budov	548	102	54,22	84	243,29	7	9	46
dopravní prostředky a pracovní stroje	2 206	98	518,06	112	1 111,89	6	29	205
zemědělské plochy a přírodní prostředí	608	94	37,28	103	217,73	0	0	14
lesy	1 963	97	17,41	116	319,51	0	0	31
volné skladovací plochy	2 954	78	17,65	130	105,34	4	4	28
demolice, skládky odpadu	4 515	90	29,06	84	201,46	4	4	31
ostatní	1 268	90	23,47	255	293,97	9	10	52

Obr. 15 - Požáry dle místa vzniku, převzato z [23]

PÚ hotelového pokoje se skládá z PŘEDSÍŇE, ze které je přístup do KOUPELNY a do POKOJE. Součástí KOUPELNY je instalační šachta, která je přístupná a kontrolovatelná zvenku. Z POKOJE je přístup na balkón.

Hlavní nosný systém tvoří železobetonové stěny, přes které je uložena jednosměrně pnutá železobetonová deska. Půdorysné členění zajišťují zděné příčky Heluz AKU tloušťky 115 mm. Světlá výška je v celém požárním úseku uvažována 2 600 mm.



Obr. 16 - Půdorys řešeného PÚ

4.3 Preskriptivní přístup – standardní výpočet dle Eurokódu

Pro následné porovnání výsledků byl nejprve proveden standardní výpočet pomocí parametrické teplotní křivky dle ČSN EN 1991-1-2 [1].

4.3.1 Vstupy do modelu

Rozměry PÚ a rozměry veškerých svislých otvorů vycházely z půdorysu PÚ viz Obr. 16. Obvodová, stropní konstrukce i podlaha PÚ byly uvažovány železobetonové, proto byly hodnoty fyzikálních veličin uvažovány následovně:

$$\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$$

$$c = 1020 \text{ J/kg K}$$

$$\lambda = 1,74 \text{ W/mK}$$

Hustota požárního zatížení byla uvažována $q_{fk} = 310 \text{ MJ/m}^2$ a rychlost rozvoje požáru – střední, vše vycházelo z následujících tabulek:

Tab. 1 - Hustoty požárního zatížení q_{fk} [MJ/m²] – převzato z ČSN EN 1991-1-2 [1]

Provoz	Průměr	80 % kvantil
Byty	780	948
nemocnice (pokoje)	230	280
hotely (pokoje)	310	377
knihovny	1 500	1 824
kanceláře	420	511
školní třídy	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 .		

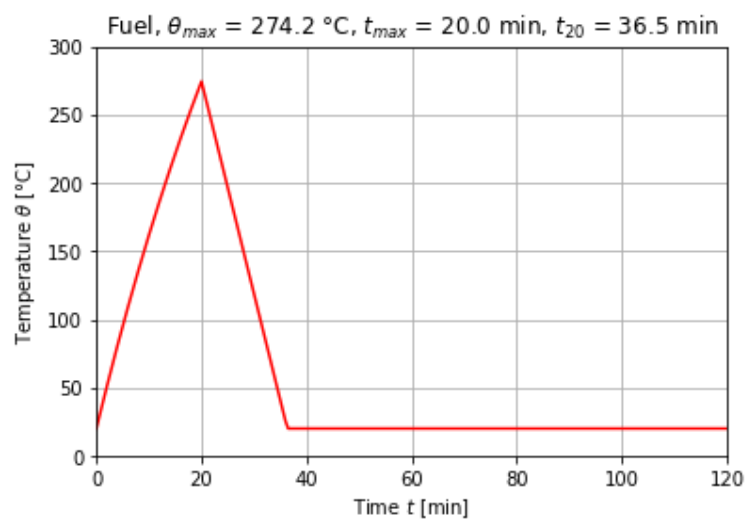
Tab. 2 - Rychlost rozvoje požáru a RHR_f pro různé provozy – převzato z ČSN EN 1991-1-2 [1]

Maximální rychlost uvolňování tepla RHR_f			
provoz	Rychlost rozvoje požáru	t_a [s]	RHR_f [kW/m ²]
byty	Střední	300	250
nemocnice (pokoje)	Střední	300	250
hotely (pokoje)	Střední	300	250
knihovny	Velká	150	500
kanceláře	Střední	300	250
školní třídy	Střední	300	250
nákupní centrum	Velká	150	250
divadla (kina)	Velká	150	500
doprava (prostory pro veřejnost)	Malá	600	250

4.3.2 Výstupy z modelu

Faktor otvorů:	O =	0,089	$m^{1/2}$
Součinitel b:	b =	2106,419	$J/m^2s^{1/2}K$
Návrhová hustota požárního zatížení:	$q_{td} =$	67,036	MJ/m^2

V požárním úseku docházelo k požáru, který byl řízený palivem. Maximální teploty $\theta_{max} = 274,2 \text{ }^\circ\text{C}$ bylo dosaženo ve 20. minutě požáru. Teploty $20 \text{ }^\circ\text{C}$ bylo opět dosaženo v cca 37. minutě.



Obr. 17 - Výsledná parametrická křivka řešeného PÚ

4.4 Pravděpodobnostní přístup

Následně bylo na stejném požárním úseku ukázáno, jak může variabilita a náhodnost vstupních parametrů ovlivnit výsledky modelovaného požáru. Pro modelaci požáru byla opět použita parametrická teplotní křivka, tentokrát ale se zohledněním variability vstupních parametrů. Pro vytvoření kombinací parametrů byly použity dvě výše vysvětlené pravděpodobnostní metody – Metoda Monte Carlo a Latin Hypercubes Sampling.

4.4.1 Určení rozsahů vstupních parametrů

Norma ČSN EN 1991-1-2 [1] udává rozsahy hodnot pro faktor otvorů O ($0,02 \leq O \leq 0,2$), součinitel b ($100 \leq b \leq 2200$) a pro návrhovou hustotu požárního zatížení $q_{t,d}$ ($50 \leq q_{t,d} \leq 1000$), dále rozlišuje rychlost rozvoje požáru (malou, střední, velkou). Rozsahy vstupních parametrů pro PÚ hotelového pokoje byly navrženy tak, aby respektovaly krajní hodnoty výše zmíněných intervalů a vycházely z hodnot uvedených v části 4.3.2 Výstupy z modelu.

4.4.1.1 Faktor otvorů O

Do moderních budov (mezi které se řadí i budova, ve které se nachází posuzovaný PÚ) jsou navrhovány výplně otvorů s dvojitým nebo trojitým zasklením, u nichž ale vůbec nemusí během požáru dojít k prasknutí skla. Charakteristika, orientace a rozměry prosklených vnějších otvorů mohou být architektonicky proměnné, proto byl rozsah parametrů zvolen od nejnižšího možného faktoru otvorů, který je dán Eurokódem 1 [1] tj. 0,02 do hodnoty, která byla na základě Eurokódu vypočtena viz 4.3.2 Výstupy z modelu. Výsledný rozsah hodnot byl uvažován v intervalu: **<0,02; 0,089>**.

4.4.1.2 Součinitel b

Součinitel b charakterizuje tepelné vlastnosti ohraničujících konstrukcí. Ve výše zmíněném požárním úseku byly hlavní nosné konstrukce uvažovány ze železobetonu. I železobeton jako konkrétní materiál ale může mít různé materiálové charakteristiky, proto zde byl výsledný rozsah hodnot součinitele b uvažován tak, aby odpovídal jakékoliv objemové hmotnosti železobetonu $2300 - 2500 \text{ kg/m}^3$, tedy vycházel z intervalu **<1831,606; 2106,419>**.

4.4.1.3 Návrhová hustota požárního zatížení $q_{t,d}$

V současné době je používáno velké množství hořlavých materiálů jako jsou např. plasty. Také využíváme stále větší a větší množství elektroniky, s čímž souvisí také zvýšení počtu kabelů v PÚ. To vše jsou hořlavé materiály, proto bylo v tomto případě uvažováno se 100 % navýšením požárního zatížení. Výsledný rozsah hodnot vycházel z intervalu: **<67,036; 134,072>**.

4.4.1.4 Rychlost rozvoje požáru

Rychlost rozvoje požáru byla dle Eurokódu 1 [1] uvažována **střední** a byla brána jako fixní parametr, typ provozu se totiž neměnil, a proto tento vstupní parametr nebylo nutné brát jako náhodný.

4.4.2 Pravděpodobnostní rozdělení vstupních parametrů

Vstupní parametry zmíněné výše (O , b , $q_{t,d}$) lze zařadit z hlediska teorie pravděpodobnosti a matematické statistiky mezi spojité náhodné veličiny.

Spojité náhodná veličina je totiž taková náhodná veličina, která může nabývat všech hodnot v určitém intervalu. Tuto náhodnou veličinu lze jednoznačně určit rozdělením pravděpodobnosti pomocí pravděpodobnostní funkce – tzv. hustoty pravděpodobnosti nebo také pomocí distribuční funkce.

4.4.2.1 Hustota pravděpodobnosti

Hustota pravděpodobnosti náhodné veličiny X definované na intervalu $\langle a, b \rangle$ je nezáporná, reálná funkce definovaná vztahem:

$$f(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{P(x \leq X < x+h)}{h}, \quad (1.15)$$

kde pro x , které nenáleží $\langle a, b \rangle$ je $f(x) = 0$; $x, x+h$ náleží $\langle a, b \rangle$.

Obecně platí, že vlastnosti hustoty pravděpodobnosti $f(x)$ jsou následující:

- Pro všechna x náležící reálným číslům platí: $f(x) \geq 0$
- $\int_a^b f(x) dx = 1$, kde hodnoty a a b jsou krajní meze intervalu, ve kterém $f(x)$ není 0
- Hustota pravděpodobnosti lze získat derivací distribuční funkce, tedy:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (1.16)$$

Také platí, že distribuční funkce spojité náhodné veličiny geometricky znamená plochu pod grafem hustoty pravděpodobnosti $f(x)$ [10].

4.4.2.2 Distribuční funkce:

Distribuční funkce je reálná funkce, kterou můžeme definovat jako pravděpodobnost, že náhodná veličina X nabude hodnoty menší nebo rovné než určitá hodnota x . Distribuční funkce $F(x_i)$ je tedy vždy přiřazena ke konkrétní hodnotě náhodné veličiny x_i .

Matematický zápis této funkce vypadá následovně:

$$F(x_i) = P(X < x_i) \quad (1.17)$$

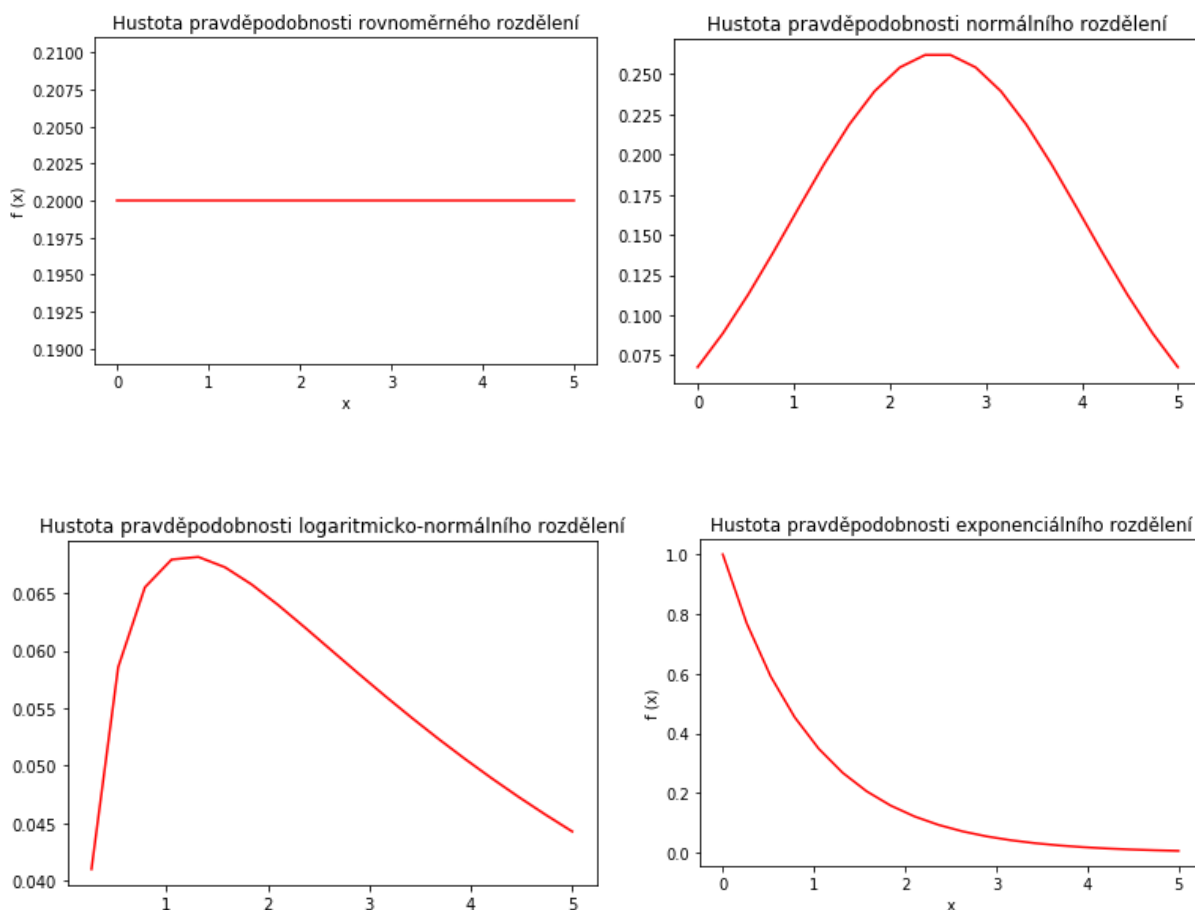
O této funkci lze říci následující fakta:

- Je definována pro všechna reálná čísla x z intervalu $-\infty < x < +\infty$.

- Pro všechna tato čísla může nabývat hodnot $<0; 1>$, platí totiž, že pravděpodobnost $P(X < -\infty)$ je nemožná, proto je $F(-\infty) = 0$ a zároveň platí, že pravděpodobnost $P(X < +\infty)$ je jistá, proto je $F(+\infty) = 1$
- $F(x)$ je neklesající funkce
- Popisuje rozdělení pravděpodobnosti náhodné veličiny kumulativním způsobem.

Mezi důležitá spojitá pravděpodobnostní rozdělení, která mohou být definována zmíněnými pravděpodobnostními funkcemi, patří např.:

- Rovnoměrné rozdělení
- Normální (Gaussovo) rozdělení
- Logaritmicke-normální rozdělení
- Exponenciální rozdělení... a mnoho dalších. [10]



Obr. 18 – Hustoty pravděpodobnosti jednotlivých pravděpodobnostních rozdělení

Ke všem vstupním parametrům parametrické teplotní křivky, které tvoří rozsahy hodnot v určitých intervalech, bylo nutné přiřadit pravděpodobnostní rozdělení. Konkrétní pravděpodobnostní rozdělení bylo vybíráno tak, aby hodnota v intervalu, která vychází z Eurokódu 1 [1] (výchozí hodnota), byla vždy nejvíce pravděpodobná. U zbylých hodnot záleželo při výběru rozdělení na charakteru intervalu.

4.4.2.3 Pravděpodobnostní rozdělení návrhové hustoty požárního zatížení $q_{t,d}$

V případě tohoto vstupního parametru o rozsahu hodnot $\langle 67,04; 134,07 \rangle$ tvoří nejpravděpodobnější hodnotu $67,04 \text{ MJ/m}^2$. Další parametry jsou s rostoucí vzdáleností od této výchozí hodnoty méně a méně pravděpodobné. Těmto podmínkám se nejvíce přibližuje takzvané useknuté exponenciální rozdělení, které má následující pravděpodobnostní funkce:

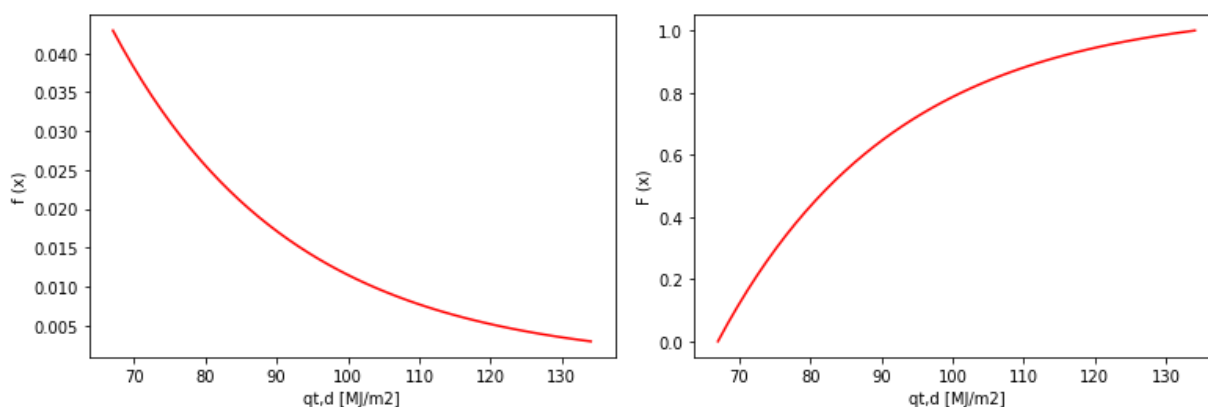
Hustota pravděpodobnosti:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\delta_1} \cdot e^{-\frac{(x-A_1)}{\delta_1}} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\frac{(B_1-A_1)}{\delta_1}}} & \text{pro } x \in \langle A_1, B_1 \rangle \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (1.18)$$

Distribuční funkce:

$$F(x) = \begin{cases} \frac{1 - e^{-\frac{(x-A_1)}{\delta_1}}}{1 - e^{-\frac{(B_1-A_1)}{\delta_1}}} & \text{pro } x \in \langle A_1, B_1 \rangle \\ 0 & \text{pro } x \leq A_1 \\ 1 & \text{pro } x \geq B_1 \end{cases}, \quad (1.19)$$

kde $A_1 = 67,04 \text{ MJ/m}^2$, $B_1 = 134,07 \text{ MJ/m}^2$ a δ_1 je parametr ovlivňující tvar pravděpodobnostních funkcí, v tomto případě je uvažován $\delta_1 = 25$ a tvar funkcí je pak následující:



Obr. 19 - Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce useknutého exponenciálního rozdělení v intervalu $\langle 67,04; 134,07 \rangle \text{ MJ/m}^2$

4.4.2.4 Pravděpodobnostní rozdělení faktoru otvorů O a součinitele b

Faktor otvorů O i součinitel b vychází ze stejného typu intervalu, kdy se výchozí nejpravděpodobnější hodnota nachází na pravém okraji intervalu. V případě faktoru otvorů jde o interval $\langle 0,02; 0,089 \rangle$ a tedy o hodnotu $0,089 \text{ m}^{1/2}$ a v případě součinitele b jde o interval $\langle 1831,606; 2106,419 \rangle$ resp. o hodnotu $2106,419 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$. Opět platí, že s rostoucí vzdáleností od této výchozí hodnoty pravděpodobnost hodnot klesá. Této skutečnosti znovu odpovídá useknuté exponenciální rozdělení. Aby bylo ale dosaženo požadovaného tvaru hustoty pravděpodobnosti, resp. distribuční funkce, byly intervaly vstupních parametrů modelovány následovně:

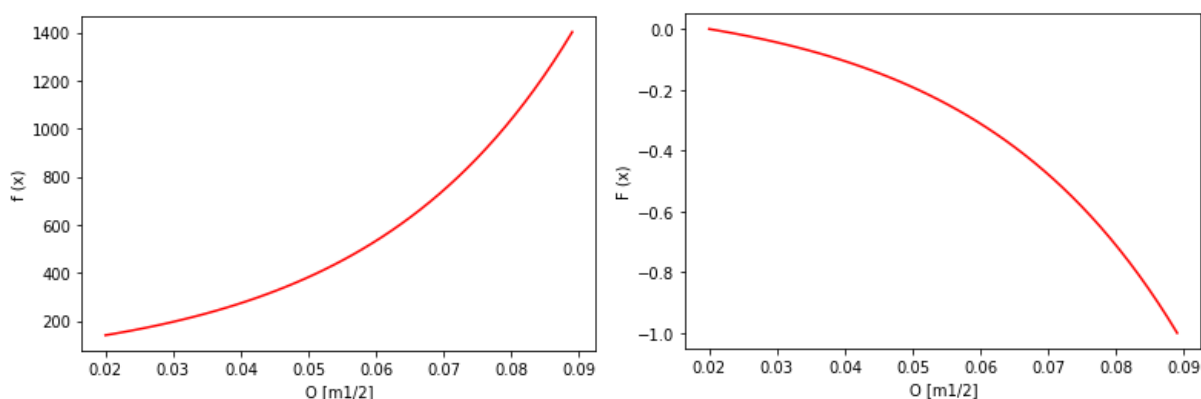
Hustota pravděpodobnosti faktoru otvorů O :

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\delta_2} \cdot e^{-\frac{(x-A_2)}{\delta_2}} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\frac{(B_2-A_2)}{\delta_2}}} & \text{pro } x \in \langle A_2, B_2 \rangle \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (1.20)$$

Distribuční funkce faktoru otvorů O :

$$F(x) = \begin{cases} \frac{1 - e^{-\frac{(x-A_2)}{\delta_2}}}{1 - e^{-\frac{(B_2-A_2)}{\delta_2}}} & \text{pro } x \in \langle A_2, B_2 \rangle \\ 0 & \text{pro } x \leq A_2 \\ 1 & \text{pro } x \geq B_2 \end{cases}, \quad (1.21)$$

kde $B_2 = -0,089 \text{ m}^{1/2}$, $A_2 = -0,02 \text{ m}^{1/2}$ a $\delta_2 = 0,03$, čemuž odpovídají následující tvary pravděpodobnostních funkcí:



Obr. 20 - Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce useknutého exponenciálního rozdělení v intervalu $\langle 0,02; 0,089 \rangle \text{m}^{1/2}$

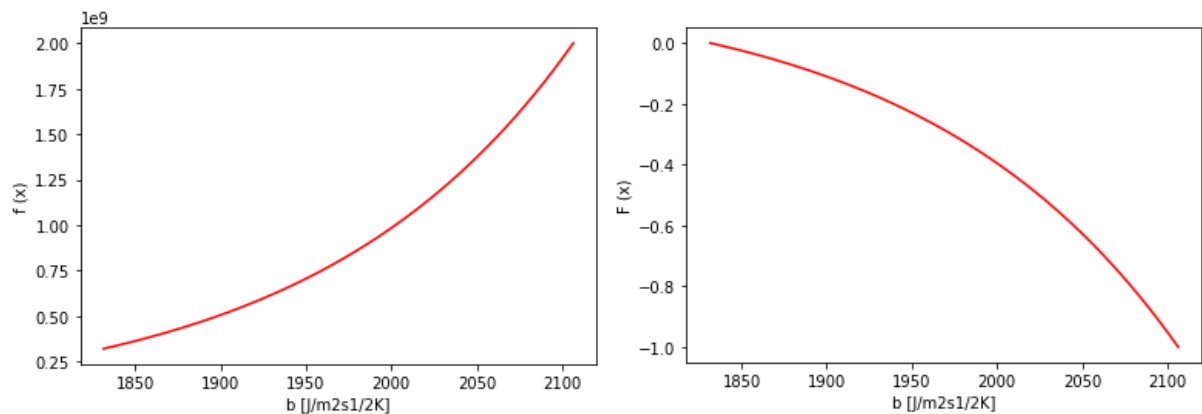
Hustota pravděpodobnosti součinitele b:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\delta_3} \cdot e^{-\frac{(x-A_3)}{\delta_3}} \cdot \frac{1}{1-e^{-\frac{(B_3-A_3)}{\delta_3}}} & \text{pro } x \in \langle A_3, B_3 \rangle \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (1.22)$$

Distribuční funkce součinitele b:

$$F(x) = \begin{cases} \frac{1-e^{-\frac{(x-A_3)}{\delta_3}}}{1-e^{-\frac{(B_3-A_3)}{\delta_3}}} & \text{pro } x \in \langle A_3, B_3 \rangle \\ 0 & \text{pro } x \leq A_3 \\ 1 & \text{pro } x \geq B_3 \end{cases}, \quad (1.23)$$

kde $B_3 = -2106,419 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$, $A_3 = -1831,606 \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$ a $\delta_3 = 150$. Tomuto schématu odpovídají následující pravděpodobnostní funkce:



Obr. 21 - Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce useknutého exponenciálního rozdělení v intervalu $\langle 1831,606; 2106,419 \rangle \text{ J/m}^2\text{s}^{1/2}\text{K}$

V závěru výpočtu bylo nutné u faktoru otvorů O a u součinitele b násobit výsledky (-1) , aby nebyly generovány záporné hodnoty.

4.4.3 Kombinace parametrů pomocí metody Monte Carlo

Teorie metody Monte Carlo je detailněji popsána v části 2.4.1. Pro tento konkrétní příklad se při kombinaci vstupních parametrů touto metodou vycházelo z následujícího postupu:

- 1) Generovala se pseudonáhodná čísla r_i s rovnoměrným rozdělením na intervalu (0; 1)
- 2) Tato náhodná čísla se transformovala na náhodná čísla se složitějším rozdělením
- 3) Náhodná čísla se složitějším rozdělením tvořila vstupní parametry, na základě, kterých byly generovány odpovídající parametrické teplotní křivky. [8]

4.4.3.1 Generování pseudonáhodných čísel

Pseudonáhodná čísla jsou taková čísla, která jsou sice zdánlivě náhodná, ve skutečnosti ale tvoří posloupnost, která je generována deterministickým způsobem. Proto o nich nemluvíme jako o náhodných číslech, ale označujeme je jako čísla pseudonáhodná.

Program Python [2] využívá generátor pseudonáhodných čísel zvaný Mersenne Twister.

Marsen Twister je pseudorandom number generator (PRNG), který vyvinuli v roce 1997 Makoto Matsumoto a Takuji Nishimura. Kromě Pythonu [2] využívá tento generátor řada softwarů jako je např. Microsoft Excel, GNU Octave, MATLAB, C++ nebo Mathematica.

Pro řešený příklad byl využit modul random, díky kterému lze v Pythonu [2] generovat pseudonáhodná čísla v intervalu (0; 1), která mají rovnoměrné rozdělení. [24, 25]

Na následujícím obrázku je vidět ukázka kódu, kde bylo pro názornost vygenerováno 10 pseudonáhodných čísel v intervalu (0; 1).

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from random import seed
4 from random import random
5
6 seed(1)
7
8 for value in range(10):
9     value = random()
10    print(value)

```

In [1]: runfile('C:/Users/...')
0.13436424411240122
0.8474337369372327
0.763774618976614
0.2550690257394217
0.49543508709194095
0.4494910647887381
0.651592972722763
0.7887233511355132
0.0938595867742349
0.02834747652200631

Obr. 22 - Ukázka kódu v programu Python [2]

4.4.3.2 Transformace pseudonáhodných čísel na složitější pravděpodobnostní rozdělení

Rovnoměrně rozdělená pseudonáhodná čísla r_i z intervalu (0; 1), která byla získána, bylo nutné následně transformovat na čísla odpovídající useknutému exponenciálnímu rozdělení. Tento proces byl proveden pomocí tzv. metody inverzní transformace.

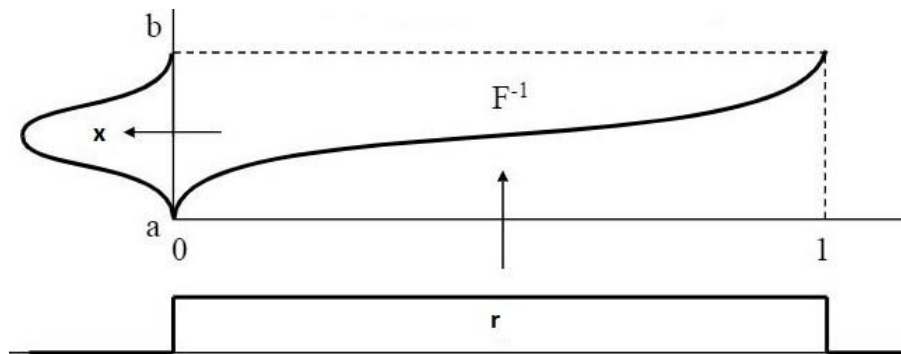
Postup metody inverzní transformace je následující:

Je vygenerováno pseudonáhodné číslo r_i , které má rovnoměrné rozdělení a je z intervalu $(0; 1)$. Mezi hledaným číslem x z intervalu $(a; b)$ a číslem r_i platí následující vztah:

$$r = F(x) \quad (1.24)$$

Cílem je stanovit hodnotu x , proto je nutné nalézt inverzní funkci k distribuční funkci:

$$x = F^{-1}(r) \quad (1.25)$$



Obr. 23 - Princip metody inverzní transformace, převzato z [26]

Předpokladem pro využití této metody je, aby požadované pravděpodobnostní rozdělení mělo distribuční funkci $F(x)$, která je rostoucí, díky čemuž lze sestavit inverzní funkci k distribuční funkci $F^{-1}(x)$. [26, 27]

Tento předpoklad useknuté exponenciální rozdělení splňuje, proto byla výše zmíněným postupem stanovena inverzní funkce k distribuční funkci useknutého exponenciálního rozdělení pro všechny tři vstupní parametry.

Inverzní funkce pro jednotlivé vstupní parametry vypadají následovně:

$$q_{t,d} = -\ln\left(1 - r + r \cdot e^{\frac{-(B_1 - A_1)}{\delta_1}}\right) \cdot \delta_1 + A_1 \quad (1.26)$$

$$0 = -\ln\left(1 - r + r \cdot e^{\frac{-(B_2 - A_2)}{\delta_2}}\right) \cdot \delta_2 + A_2 \quad (1.27)$$

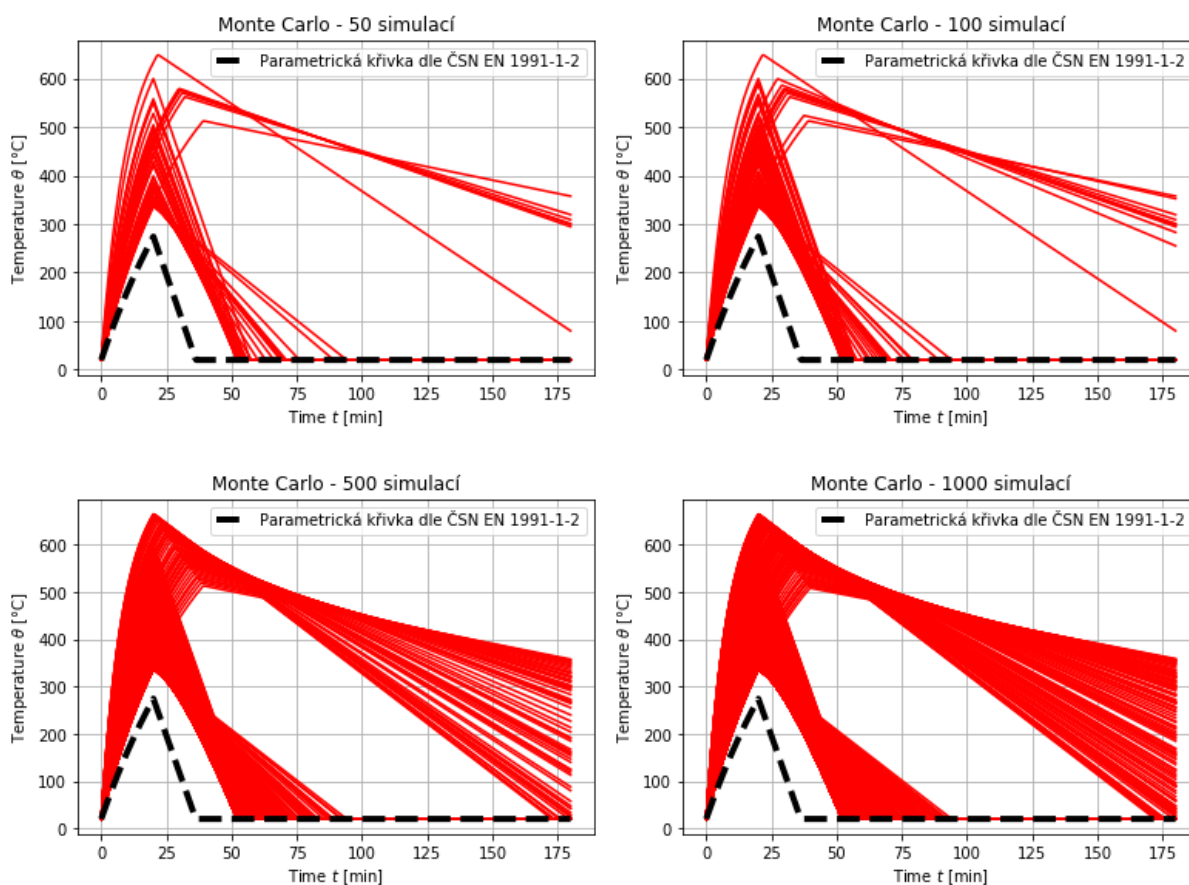
$$b = -\ln\left(1 - r + r \cdot e^{\frac{-(B_3 - A_3)}{\delta_3}}\right) \cdot \delta_3 + A_3, \quad (1.28)$$

kde r jsou pseudonáhodná čísla s rovnoměrným rozdělením v intervalu $(0; 1)$, hodnoty $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ jsou krajní hodnoty výše zmíněných intervalů a δ_1, δ_2 a δ_3 jsou parametry, které ovlivňují tvar pravděpodobnostních funkcí a rovněž jsou zmíněny výše.

4.4.3.3 Výsledky kombinace parametrů metodou Monte Carlo

Celý postup metody byl řešen v programovacím jazyce Python [2]. Kód byl vytvořen tak, aby ke každému pseudonáhodnému číslu r byly generovány všechny tři proměnné vstupní parametry $q_{t,d}$, O a b a následně, aby byla z těchto náhodných vstupů vykreslena odpovídající parametrická teplotní křivka. Výsledné křivky byly generovány pro 50, 100, 500 a 1000 simulací. Tento počet simulací byl náhodně zvolen.

Porovnání různého počtu simulací bylo provedeno s ohledem na funkci random, která umožňuje generovat náhodné vstupní parametry pouze v určité posloupnosti. To tedy znamená že 1000 simulací obsahuje stejných 50, 100 i 500 předchozích simulací. Větším množstvím simulací lze tedy nalézt další nové kombinace vstupních parametrů a lépe tak postihnout množinu možných průběhů požáru (viz následující obrázek).



Obr. 24 - Výsledky metody Monte Carlo pro různý počet simulací

4.4.3.4 Zhodnocení výsledků metodou Monte Carlo

Na Obr. 24 je vidět, jak kombinace vstupních parametrů metodou Monte Carlo významně ovlivňují průběh modelovaného požáru. V případě černě zobrazené parametrické teplotní křivky modelované na základě Eurokódu 1 [1] bylo v PÚ hotelového pokoje dosaženo maximální teploty $\theta_{\max} = 274,2$ °C, zatímco při kombinaci vstupních parametrů metodou Monte Carlo bylo dosaženo maximální teploty $\theta_{\max} = 648,37$ °C při 50 a 100 simulacích. Při 500 simulacích bylo dosaženo $\theta_{\max} = 664,41$ °C a při 1000 simulacích dosahovala maximální teplota v PÚ $\theta_{\max} = 665,3$ °C, což je více jak dvojnásobek hodnoty

stanovené Eurokódem [1]. Zajímavým faktem ovšem zůstává, že ať byly generovány jakékoliv náhodné vstupní parametry v předepsaných rozsazích, byla vždy maximální teplota v PÚ vyšší než ta, která byla stanovena na základě Eurokódu [1]. Tento průběh parametrické teplotní křivky lze tedy v tomto případě označit jako nejkonzervativnější.

4.4.3.5 Porovnání s jiným typem pravděpodobnostního rozdělení

Pro zajímavost byl stejný postup proveden i pro případ, kdy bylo uvažováno, že všechny tři vstupní parametry $q_{t,d}$, O i b mají rovnoměrné rozdělení. Rovnoměrné rozdělení vstupních parametrů znamená, že všechny hodnoty v jednotlivých intervalech mají stejnou pravděpodobnost výskytu. Této skutečnosti odpovídají následující pravděpodobnostní funkce:

Hustota pravděpodobnosti:

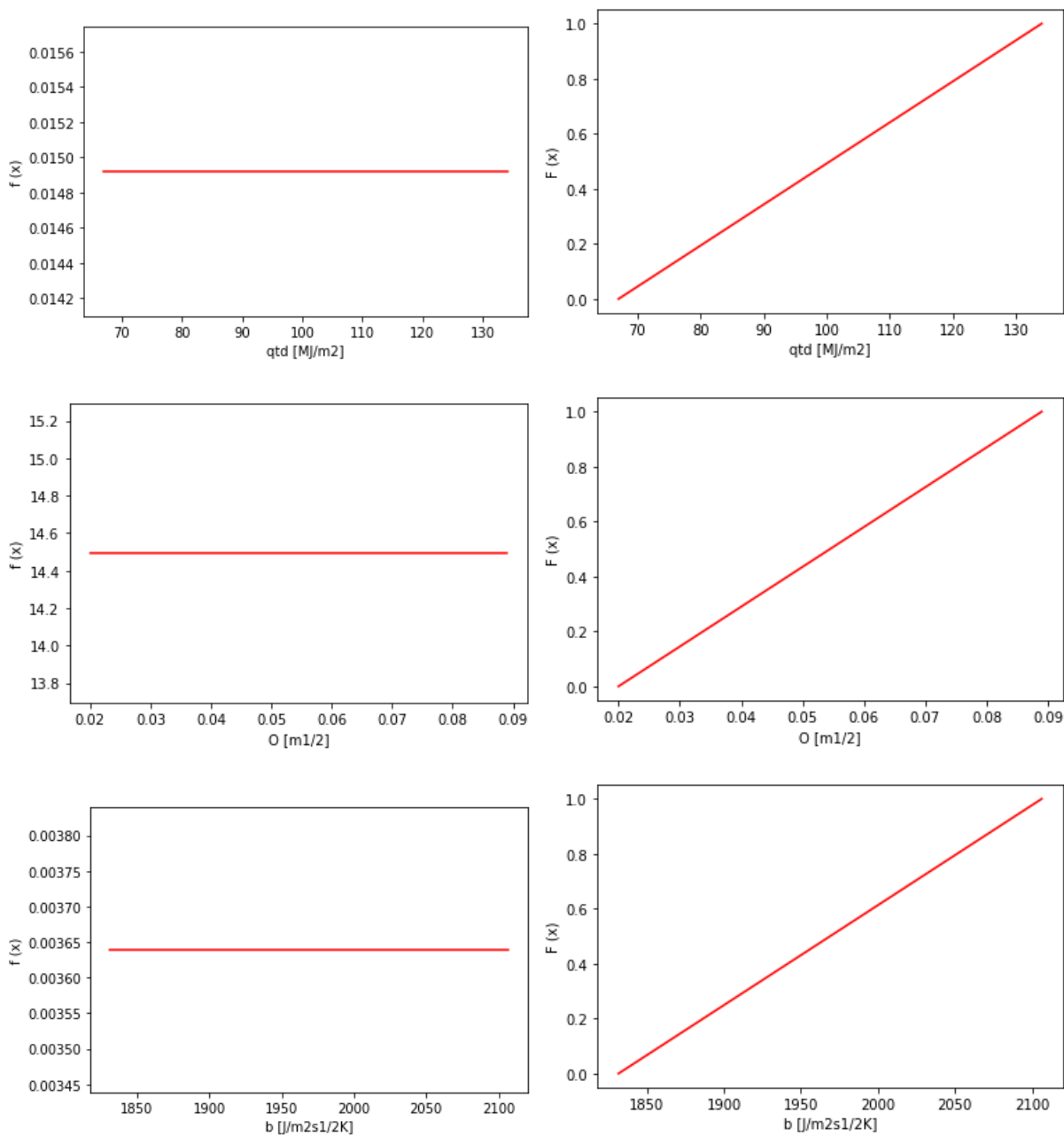
$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{pro } x \in (a; b) \\ 0 & \text{jinde} \end{cases} \quad (1.29)$$

Distribuční funkce:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{pro } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & , \\ 1 & \text{pro } x \geq b \end{cases} \quad (1.30)$$

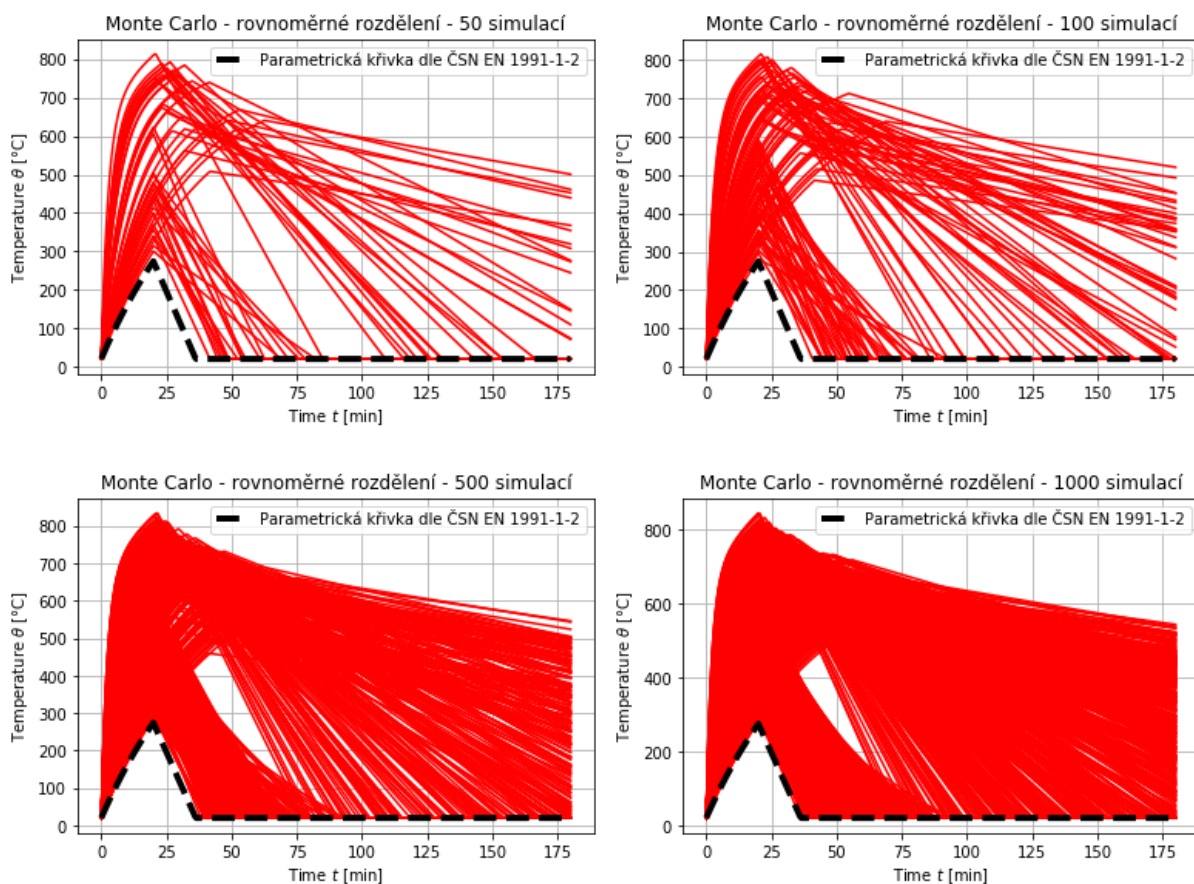
kde a a b jsou krajní hodnoty uvažovaných intervalů vstupních parametrů $q_{t,d}$, O i b . Hodnota x je libovolná hodnota uvnitř těchto intervalů.

Těmto pravděpodobnostním funkcím odpovídají následující obrázky:



Obr. 25 - Pravděpodobnostní funkce rovnoměrného rozdělení vstupních parametrů $q_{t,d}$, O a b

Protože v tomto případě nebylo nutné transformovat rovnoměrné rozdělení na jiný typ rozdělení, nemusela být použita metoda inverzní transformace. Vše bylo opět vloženo do kódu, který byl vytvořen v programovacím jazyce Python [2], kde byly generovány náhodné hodnoty vstupních parametrů $q_{t,d}$, O a b v předepsaných rozsazích, na základě kterých byly vykresleny následující parametrické teplotní křivky:



Obr. 26 - Výsledky metody Monte Carlo s rovnoměrným rozdělením vstupních parametrů

Výše uvedené grafy ukazují, že je v PÚ hotelového pokoje opět dosaženo výrazně odlišných teplot v porovnání s maximální teplotou, která byla stanovena na základě Eurokódu 1 [1]. Dále je zde patrný rozdíl v extrémech maximálních teplot. Zatímco v prvním případě, kdy bylo uvažováno, že mají vstupní parametry tzv. useknuté exponenciální rozdělení, a tudíž, že každý parametr v intervalu má jinou pravděpodobnost výskytu, dosahovaly maximální teploty přes 650 °C. Nyní, kdy je uvažováno rovnoměrné rozdělení vstupních parametrů, kde je každý parametr v intervalu stejně pravděpodobný, je dosaženo teploty přes 800 °C. To ukazuje, jak výrazný vliv může mít pravděpodobnostní rozdělení na průběh modelovaného požáru. Také je vidět, že změnou pravděpodobnostního rozdělení byl výrazně ovlivněn tvar křivek, resp. oblast, která jimi byla vyplněna.

4.4.4 Kombinace parametrů pomocí metody Latin Hypercubes Sampling

Teorie metody Latin Hypercubes Sampling je detailněji popsána v části 2.4.2. Pro tento konkrétní příklad se při kombinaci vstupních parametrů touto metodou vycházelo z následujícího postupu:

- 1) Interval (0; 1) s rovnoměrným rozdělením byl rozdělen na N menších podintervalů, u nichž bylo nutné najít vždy střed podintervalu pomocí rovnice:

$$Y_i = \frac{1}{2N} + \frac{1}{N} \cdot (i - 1) \quad (1.31)$$

kde N je počet podintervalů a $i = 1, \dots, N$

- 2) Následně bylo ke středům intervalů Y_i přičteno náhodné číslo z rovnoměrného rozdělení na intervalu:

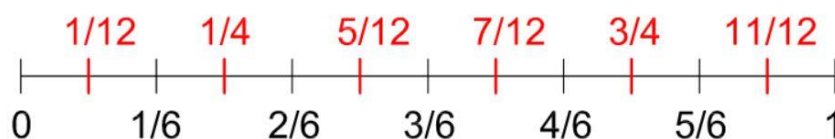
$$\left\langle -\frac{1}{2N}, \frac{1}{2N} \right\rangle \quad (1.32)$$

- 3) Tato náhodná čísla byla poté vkládána do inverzní funkce k distribučním funkcím jednotlivých proměnných a pomocí permutací celých čísel byly tvořeny konkrétní kombinace pro parametrickou teplotní křivku.

4.4.4.1 Konkrétní postup

Parametrická teplotní křivka byla i v případě použití metody LHS opět brána jako funkce tří proměnných $q_{t,d}$, O a b (rychlost rozvoje požáru byla opět fixní). Byly zde uvažovány stejné rozsahy vstupních parametrů, jako v případě metody Monte Carlo viz 4.4.1.

Nejprve se interval (0; 1) rozdělil v tomto případě na 6 podintervalů, kdy byl u každého podintervalu zjištěn jeho střed pomocí výše zmíněné rovnice (1.31).



Obr. 27 - Zjištění středů pro 6 podintervalů

K těmto středům Y_i byla přičtena náhodná čísla z intervalu $\langle -\frac{1}{12}; \frac{1}{12} \rangle$, která byla vygenerována v programu Python [2] pomocí funkce `np.random.uniform` a vypadala následovně:

[-0,0367195; -0,02404077; -0,04113591; -0,07659089; -0,08303657; 0,00719862]

Součtem čísel Y_i a čísel randomizovaných vznikla následující sada čísel s_i :

[0,04661384; 0,22595923; 0,37553076; 0,50674244; 0,66696343; 0,92386529]

Tato čísla pak byla vkládána do inverzních distribučních funkcí a generovala tyto vstupní parametry:

$$q_{t,d} = -\ln\left(1 - s_i + s_i \cdot e^{-\frac{(B_1 - A_1)}{\delta_1}}\right) \cdot \delta_1 + A_1 \quad (1.33)$$

$$q_{t,d} \in [68,150; 72,948; 77,802; 83,008; 91,315; 116,299]$$

$$O = -\ln\left(1 - s_i + s_i \cdot e^{-\frac{(B_2 - A_2)}{\delta_2}}\right) \cdot \delta_2 + A_2 \quad (1.34)$$

$$O \in [0,030; 0,053; 0,064; 0,071; 0,078; 0,087]$$

$$b = -\ln\left(1 - s_i + s_i \cdot e^{-\frac{(B_3 - A_3)}{\delta_3}}\right) \cdot \delta_3 + A_3 \quad (1.35)$$

$$b \in [1864,416; 1948,874; 1994,893; 2026,160; 2057,183; 2096,488]$$

kde hodnoty $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$ jsou krajní hodnoty zmíněných intervalů a δ_1, δ_2 a δ_3 jsou parametry, které ovlivňují tvar pravděpodobnostních funkcí. Veškeré tyto vstupní hodnoty jsou podrobněji popsány v částech 4.4.2.3 a 4.4.2.4 této práce.

Z každého takto vzniklého souboru hodnot bylo nutné vybrat vždy jednu konkrétní hodnotu pro $q_{t,d}$, O a b . Proto byly použity náhodné permutace čísel:

$q_{t,d}$	O	b
1	2	3
2	5	6
3	6	5
4	1	4
5	4	1
6	3	2

Protože bylo použito 6 podintervalů a vznikl tak pro každou proměnnou soubor šesti čísel, byly použity náhodné permutace čísel {1,2,3,4,5,6}. Celá čísla obsažená v permutacích udávala, která konkrétní hodnota bude z výše zmíněných souborů vybrána.

Pro názornost:

První kombinace vstupních parametrů pro parametrickou teplotní křivku byla vybrána tak, jak ukazuje červený ovál ve výše zmíněných permutacích. To znamená, že bylo vybráno první číslo ze souboru hodnot pro proměnnou $q_{t,d}$, druhé číslo ze souboru hodnot pro faktor otvorů O a třetí číslo ze souboru hodnot pro součinitel b , tímto způsobem byly stanoveny všechny kombinace:

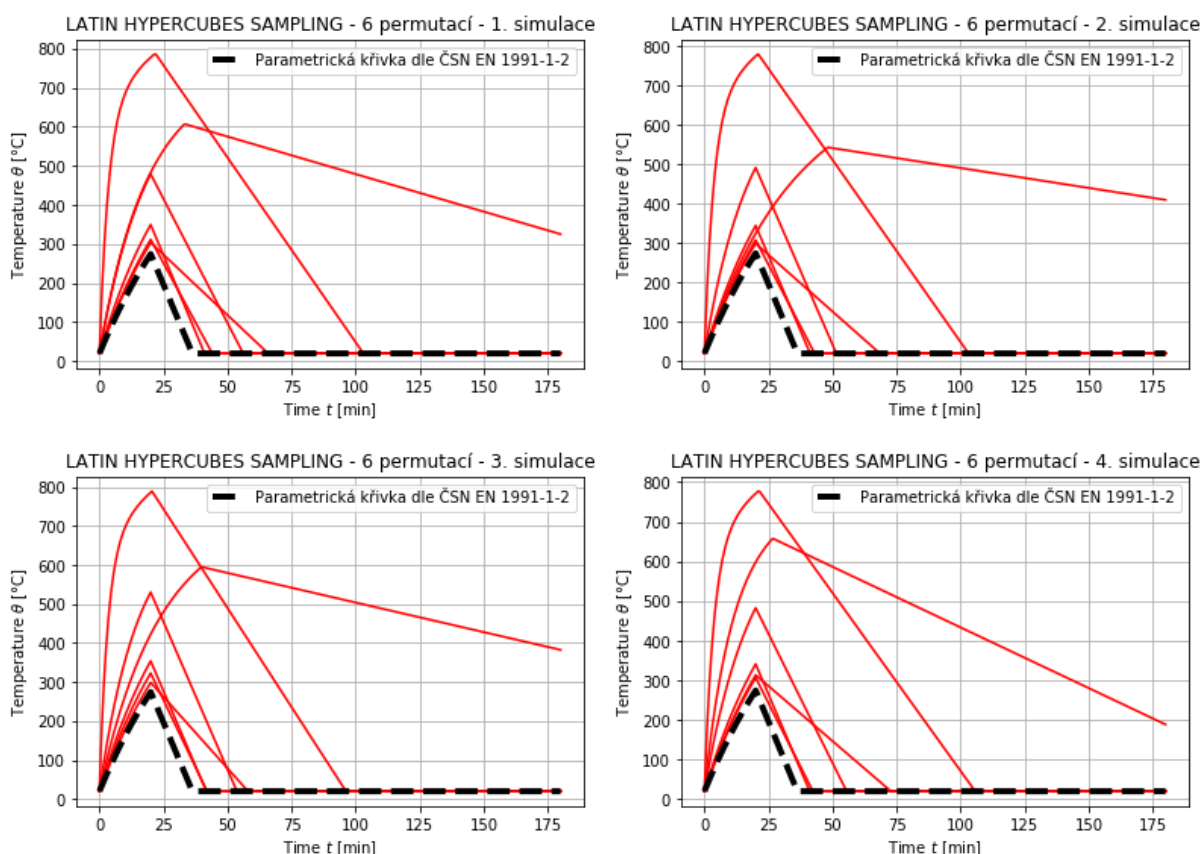
$q_{t,d}$	O	b	RRP
68,15	0,053	1994,893	2
72,948	0,078	2096,488	2
77,802	0,087	2057,183	2
83,008	0,03	2026,16	2
91,315	0,071	1864,416	2
116,299	0,064	1948,874	2

kde RRP = 2 znamená střední rychlost rozvoje požáru, která byla stanovena na základě Eurokódu 1 [1] viz (Tab. 2).

4.4.4.2 Výsledky kombinace parametrů pomocí metody LHS

Takto stanovené kombinace vstupních parametrů byly opět vloženy do kódu v programovacím jazyce Python [2]. Protože ale funkce `np.random.uniform` generuje při každém opětovném spuštění kódu jiná randomizovaná čísla, jsou výsledky vždy mírně odlišné.

Pro zajímavost byl výpočet spuštěn čtyřikrát po sobě. Tomuto opětovnému spuštění odpovídají následující parametrické teplotní křivky (výše uvedený postup odpovídá 1. simulaci):



Obr. 28 - Výsledky metody LHS pro 6 simulací, kdy byl výpočet spuštěn čtyřikrát po sobě

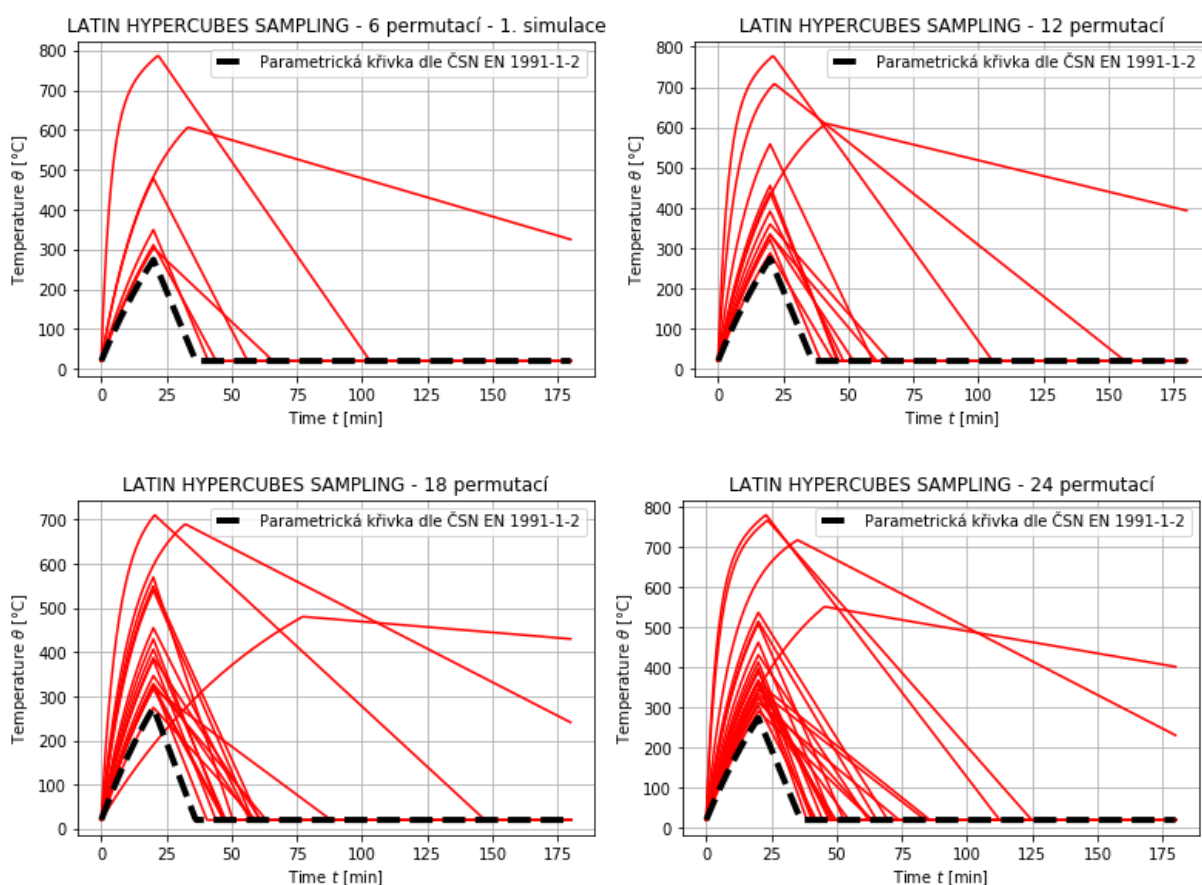
Výsledky ukazují, že v PÚ hotelového pokoje dochází díky kombinaci vstupních parametrů metodou LHS stejně jako u metody Monte Carlo k výrazně odlišným teplotám než v případě Eurokódu 1 [1]. Maximální teploty, kterých bylo dosaženo jsou následující:

1. simulace → [303,688 °C; 311,665 °C; 349,520 °C; 606,539 °C; 478,953 °C; 785,853 °C]
2. simulace → [299,099 °C; 307,880 °C; 344,580 °C; 542,832 °C; 491,785 °C; 779,953 °C]
3. simulace → [298,600 °C; 322,546 °C; 353,732 °C; 594,554 °C; 529,991 °C; 788,761 °C]
4. simulace → [313,305 °C; 306,671 °C; 341,038 °C; 656,891 °C; 482,732 °C; 777,113 °C]

Dosažené teploty ukazují, jak náhodně generovaná randomizovaná čísla ovlivňují průběhy parametrických teplotních křivek. Ve všech čtyřech simulacích je dosaženo teplot přes 770 °C, což je téměř trojnásobek oproti hodnotě stanovené na základě Eurokódu 1 [1]. Tato skutečnost může výrazně ovlivnit požární odolnost konstrukce.

Dále byl zkoumán průběh parametrických teplotních křivek i pro více než 6 simulací. Účelem porovnání většího množství simulací bylo stejně jako v případě metody Monte Carlo nalézt další nové kombinace vstupních parametrů a lépe tak postihnout množinu možných průběhů požáru.

Výše zmíněným postupem tak byly vygenerovány křivky pro 12, 18 a 24 permutací, výsledky znázorňuje následující obrázek:



Obr. 29 - Výsledky metody LHS pro různý počet permutací

Výsledné průběhy parametrických teplotních křivek viz Obr. 29 ukazují, že navýšením počtu permutací nebyl nalezen výrazně odlišný průběh v porovnání s 6 simulacemi. Extrémní teploty se i v těchto případech pohybovaly stejně jako v případě 6 simulací kolem 780 °C, pouze v případě 18 permutací bylo dosaženo maximální teploty 710,048 °C.

4.4.4.3 Porovnání výsledků pravděpodobnostních metod Monte Carlo a LHS

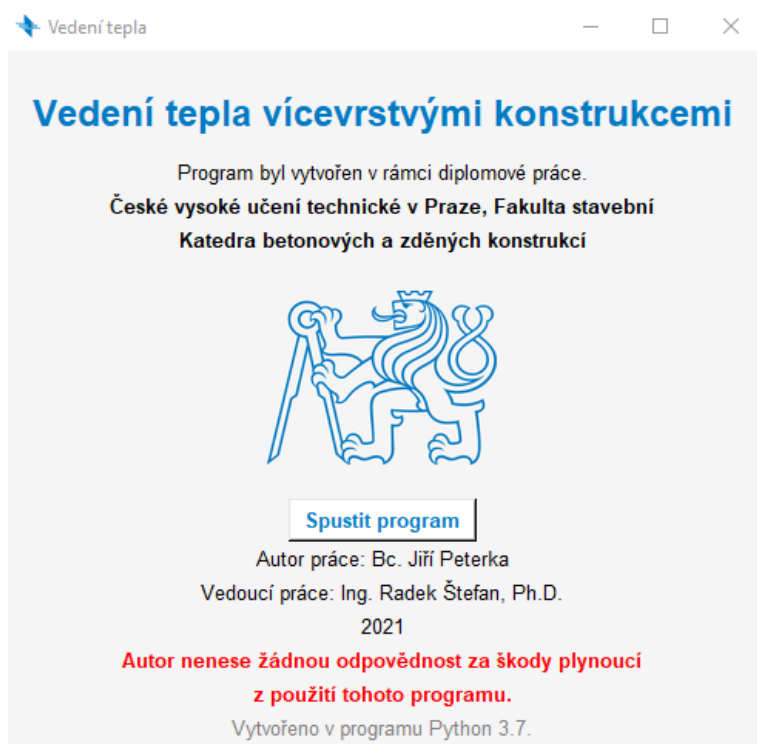
Kombinacemi vstupních parametrů pomocí metod Monte Carlo a LHS bylo v PÚ hotelového pokoje dosaženo výrazně vyšších teplot než v případě Eurokódu 1 [1]. Obě metody se lišily extrémními hodnotami, kterých bylo dosaženo. Metodou Monte Carlo bylo dosaženo maximální teploty v PÚ kolem 650 °C v případě useknutého exponenciálního rozdělení a přes 800 °C v případě rovnoměrného rozdělení vstupních parametrů. Metodou LHS bylo dosaženo maximálních teplot přibližně 780 °C.

Těchto teplot bylo ale dosaženo při výrazně rozdílném počtu simulací. Zatímco v případě metody LHS šlo o maximálně 24 simulací, u metody Monte Carlo to bylo až 1000 simulací. To dokazuje v literatuře mnohokrát zmíněný fakt, že metoda LHS je schopná generovat správné výsledky i při velmi malém počtu simulací.

4.4.4.4 Vliv pravděpodobnostního přístupu na požární odolnost konstrukce

Pro zjištění vlivu pravděpodobnostního přístupu na požární odolnost konstrukce byla v řešeném PÚ hotelového pokoje posouzena železobetonová stropní konstrukce. Stropní konstrukce byla uvažována jako monolitická, prostě podepřená, jednosměrně pnutá deska tloušťky 200 mm. Detailní návrh a posouzení ohybové výztuže desky lze nalézt v Příloze 1 této práce.

Jako předpoklad pro vyhovění konstrukce za požáru bylo stanoveno dosažení maximální teploty v ose výztuže do 500 °C. Pro stanovení maximální teploty v ose výztuže byl využit program, který je součástí diplomové práce na téma Modelování transportu tepla ve vícevrstvých prvcích vystavených požáru s využitím metody konečných diferencí a různých metod časové diskretizace [28].



Obr. 30 - Program použitý za účelem stanovení teploty v ose výztuže

Pro spuštění programu bylo nutné znát tyto vstupní parametry:

- 1) Materiálové charakteristiky železobetonové stropní desky:
 - $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$
 - $c = 1020 \text{ J/kg K}$
 - $\lambda = 1,74 \text{ W/mK}$
- 2) Tloušťku desky:
 - 200 mm
- 3) Osovou vzdálenost betonářské výztuže:
 - $a = 20 \text{ mm}$
- 4) Průběhy parametrických teplotních křivek získaných na základě kombinací vstupních parametrů pomocí pravděpodobnostních metod Monte Carlo a LHS viz výše.

Na základě těchto vstupních parametrů program generoval absolutní maximální teploty, kterých bylo dosaženo v ose výztuže a k nim odpovídající časy. Dále byly generovány teploty v ose výztuže v časech 15, 30, 45, 60, 120 a 180 minut viz následující tabulku:

Tab. 3 – Přehled výsledných teplot [28]

Čas dosažení maximální teploty ve výztuži [s]	Maximální teplota ve výztuži	t = 15 min	t = 30 min	t = 45 min	t = 60 min	t = 120 min	t = 180 min
2775	125,431	50,684	110,246	125,362	119,402	55,675	38,616
1990	173,432	77,916	171,126	155,078	108,597	50,661	37,512
2000	156,051	70,380	153,750	139,714	97,792	47,032	35,443
2350	119,415	52,127	111,861	117,368	98,999	44,646	33,660
2085	126,554	57,547	123,302	117,046	84,760	42,018	32,512
2115	123,910	56,213	120,249	115,755	85,082	41,870	32,400
2025	140,200	63,634	137,720	126,543	89,214	44,001	33,698
2000	160,601	72,328	158,309	143,675	100,517	47,960	35,973
3605	343,797	119,079	279,463	332,828	343,796	278,574	174,953
5290	329,886	72,282	194,077	281,025	314,266	319,776	273,772
1995	170,604	76,670	168,305	152,541	106,773	50,057	37,168
2125	123,088	55,767	119,248	115,440	85,427	41,870	32,388
2005	155,793	70,270	153,491	139,491	97,640	46,980	35,413
7040	308,301	51,628	130,715	220,447	268,045	308,260	292,208
2115	123,701	56,101	119,998	115,670	85,154	41,867	32,395
2010	149,298	67,506	146,957	133,956	93,929	45,695	34,676
2410	119,871	51,741	111,258	118,563	102,526	45,837	34,224
1980	205,585	92,910	203,184	184,385	130,700	57,801	41,562

4.4.4.5 Zhodnocení PO konstrukce

Výše uvedená tabulka ukazuje pouze část vyexportovaných výsledků. Veškeré vyexportované výsledky ale ukazují, že i když bylo v PÚ hotelového pokoje dosaženo díky kombinaci vstupních parametrů metodami Monte Carlo a LHS téměř trojnásobných teplot oproti Eurokódu 1 [1], za dobu 180 minut nebylo ani v jednom případě dosaženo kritické teploty 500 °C nebo větší. To znamená, že předpoklad pro vyhovění konstrukce za požáru byl splněn a požární odolnost použité železobetonové stropní konstrukce nebyla v tomto případě pravděpodobnostním přístupem ovlivněna.

Tento fakt ale platí pouze pro tento konkrétní příklad a za zmíněných předpokladů. Pro jiné PÚ nebo za jinak stanovených předpokladů by požární odolnost konstrukce mohla být pravděpodobnostním přístupem značně ovlivněna.

5 Závěr

Diplomovou práci lze rozdělit na teoretickou a praktickou část. Teoretická část práce se zabývala požárními modely, kde byla podrobněji řešena parametrická teplotní křivka. U tohoto typu modelu byla vypracována citlivostní analýza vstupních parametrů. Dále byly popsány dvě pravděpodobnostní metody Monte Carlo a Latin Hypercubes Sampling. Závěr teoretické části se zabýval pravděpodobnostním přístupem k navrhování konstrukcí na účinky požáru. Detailněji zde byl vysvětlen pojem nejistota a jak tento pojem souvisí s požárním inženýrstvím.

Pro účely vypracování praktické části práce byl v programu Python sestaven funkční kód sloužící ke generování náhodných vstupních parametrů na základě, kterých pak byly generovány odpovídající parametrické teplotní křivky. Díky takto sestavenému kódu mohl být porovnán preskriptivní (normativní) přístup a pravděpodobnostní přístup k navrhování konstrukcí na účinky požáru. Oba tyto přístupy byly aplikovány na konkrétní požární úsek hotelového pokoje, kde byl požár simulován pomocí parametrické teplotní křivky. Nejprve byl průběh požáru stanoven na základě přílohy A normy ČSN EN 1991-1-2, poté byly vstupní parametry pro parametrickou teplotní křivku kombinovány pomocí výše zmíněných pravděpodobnostních metod. U metody Monte Carlo byly porovnány průběhy parametrických teplotních křivek pro dvě odlišná pravděpodobnostní rozdělení vstupních parametrů (rovnoměrné rozdělení a useknuté exponenciální rozdělení). U metody LHS byly zkoumány průběhy parametrické teplotní křivky pouze pro useknuté exponenciální rozdělení. V závěru práce byl ukázán vliv pravděpodobnostního přístupu na požární odolnost konstrukce.

Z výsledků vyplývá, že pravděpodobnostní přístup velmi ovlivňuje průběh modelovaného požáru. Kombinacemi vstupních parametrů metodami Monte Carlo a LHS bylo v PÚ hotelového pokoje dosaženo v některých případech téměř trojnásobných teplot oproti deterministickému (normativnímu) přístupu.

Důležitý je také fakt, že těchto teplot bylo dosaženo při výrazně odlišném počtu simulací. Zatímco metodou LHS bylo provedeno maximálně 24 simulací u metody Monte Carlo to bylo až 1000 simulací. I když jsou dosažené maximální teploty mírně odlišné, lze říct, že metoda LHS je schopná generovat podobné výsledky jako metoda Monte Carlo, a to při výrazně nižším počtu simulací, což může být při výběru pravděpodobnostní metody rozhodujícím faktorem.

Dále je patrné, že přes vysoké teploty, kterých bylo v PÚ dosaženo, nebyla pravděpodobnostním přístupem ovlivněna požární odolnost konstrukce. Za dobu požáru nebyla dosažena kritická teplota v ose výztuže 500 °C, při které by konstrukce byla považována za nevyhovující.

Tento fakt platí pouze pro zvolený požární úsek. Pokud by byl posuzován jiný PÚ, nebo by byly stanovené jiné předpoklady pro vyhovění konstrukce za požáru, je možné, že by požární odolnost konstrukce ovlivněna byla.

O pravděpodobnostním přístupu lze v každém případě říct, že zahrnuje značné množství nejistot, které jsou s požárem spojené a více přibližuje průběh reálného požáru. Díky tomu lze přizpůsobit návrh konstrukce na účinky požáru nebo požárně bezpečnostních zařízení. Je to přístup, který by neměl být opomíjen a který představuje možnou budoucnost v oblasti navrhování nosných konstrukcí na účinky požáru.

Seznam obrázků

Obr. 1 - Fáze požáru, převzato z [5]	3
Obr. 2 - Nominální teplotní křivky, převzato z [1]	4
Obr. 3 - Parametrická teplotní křivka, převzato z [1]	5
Obr. 4 - Model lokálního požáru, a) plameny nezasahují strop, b) plameny zasahují strop, převzato z [5]	5
Obr. 5 - Rozdělení 3D objemů pro modelaci, vlevo – dvouzónový model, vpravo – CFD model, převzato z [5]	6
Obr. 6 - Výsledné křivky pro kombinaci vstupních parametrů č. 1	9
Obr. 7 - Výsledné křivky pro kombinaci vstupních parametrů č. 2	10
Obr. 8 - Výsledné křivky pro kombinaci vstupních parametrů č. 3	11
Obr. 9 - Výsledné křivky pro kombinaci vstupních parametrů č. 4	12
Obr. 10 - Rozdělení definičního oboru distribuční funkce spojité náhodné veličiny při výpočtu metodou LHS – převzato z [10]	16
Obr. 11 - šíření nejistoty při simulaci požáru konstrukce – převzato z [13]	22
Obr. 12 - Použité programy, převzato z [21, 22]	24
Obr.13 - Ukázka kódu parametrické teplotní křivky odpovídající příloze A normy ČSN EN 1991-1-2 [1]	26
Obr. 14 - Ukázka kódu v programovacím jazyce Python [2]	26
Obr. 15 - Požáry dle místa vzniku, převzato z [23]	27
Obr. 16 - Půdorys řešeného PÚ	27
Obr. 17 - Výsledná parametrická křivka řešeného PÚ	29
Obr. 18 – Hustoty pravděpodobnosti jednotlivých pravděpodobnostních rozdělení	32
Obr. 19 - Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce useknutého exponenciálního rozdělení v intervalu $\langle 67,04; 134,07 \rangle$ MJ/m ²	33
Obr. 20 - Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce useknutého exponenciálního rozdělení v intervalu $\langle 0,02; 0,089 \rangle$ m ^{1/2}	34
Obr. 21 - Hustota pravděpodobnosti a distribuční funkce useknutého exponenciálního rozdělení v intervalu $\langle 1831,606; 2106,419 \rangle$ J/m ² s ^{1/2} K	35
Obr. 22 - Ukázka kódu v programu Python [2]	36
Obr. 23 - Princip metody inverzní transformace, převzato z [26]	37
Obr. 24 - Výsledky metody Monte Carlo pro různý počet simulací	38
Obr. 25 - Pravděpodobnostní funkce rovnoměrného rozdělení vstupních parametrů $q_{t,d}$, θ a b	40
Obr. 26 - Výsledky metody Monte Carlo s rovnoměrným rozdělením vstupních parametrů	41

Obr. 27 - Zjištění středů pro 6 podintervalů	42
Obr. 28 - Výsledky metody LHS pro 6 simulací, kdy byl výpočet spuštěn čtyřikrát po sobě.....	45
Obr. 29 - Výsledky metody LHS pro různý počet permutací	46
Obr. 30 - Program použitý za účelem stanovení teploty v ose výztuže	47

Seznam tabulek

Tab. 1 - Hustoty požárního zatížení q_{fk} [MJ/m ²] – převzato z ČSN EN 1991-1-2 [1].....	28
Tab. 2 - Rychlost rozvoje požáru a RHR _f pro různé provozy – převzato z ČSN EN 1991-1-2 [1].....	28
Tab. 3 – Přehled výsledných teplot [28].....	48

Literatura

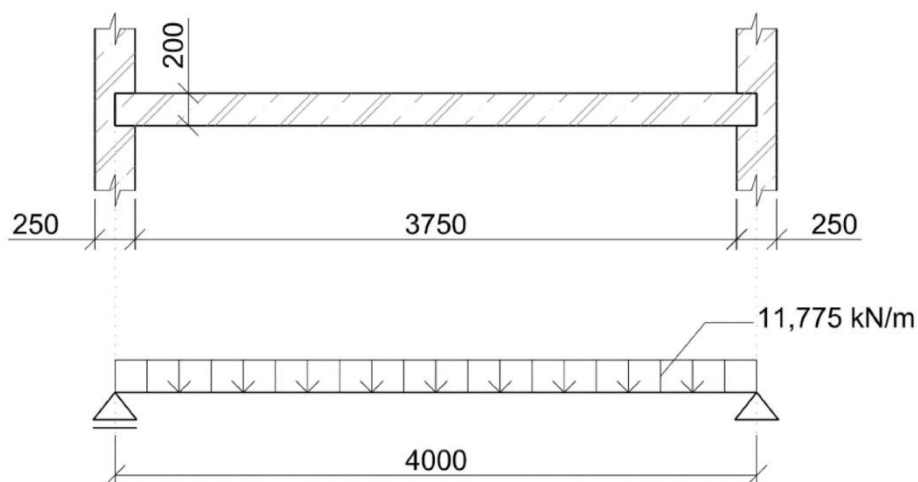
- [1] ČSN EN 1991-1-2: Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2004, 56 s. Třídící znak 73 0035
- [2] VAN ROSSUM, Guido. Python 3.7.4 [online]. Python. 2019. Dostupné z: <https://www.python.org/downloads/release/python-374/>
- [3] OTIPKA, Petr, Vladislav ŠMAJSTRLA, a EVROPSKÝ SOCIÁLNÍ FOND. Pravděpodobnost a statistika. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2006. ISBN 978-80-248-1194-9.
- [4] TEPLÝ, Břetislav, Drahomír NOVÁK, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, a STAVEBNÍ FAKULTA. Spolehlivost stavebních konstrukcí: teorie, numerické metody, navrhování, software : skriptum FAST VUT. Brno: CERM, 2004. ISBN 978-80-214-2577-4.
- [5] WALD, František. Výpočet požární odolnosti stavebních konstrukcí. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. ISBN 978-80-01-03157-5.
- [6] KUČERA, Jaroslav a Kamila CÁBOVÁ. Parametrické modely požáru pro EN 1991-1-2:2021. KONSTRUKCE, ODBORNÝ ČASOPIS PRO STAVEBNICTVÍ A STROJÍRENSTVÍ [online]. 2018, **2018**(4). ISSN 1803-8433. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/parametricke-modely-pozaru-pro-en-1991-1-2-2021/>
- [7] FABIAN, František a Zdeněk KLUIBER. Metoda Monte Carlo a možnosti jejího uplatnění. Praha: Prospektrum, 1998. ISBN 978-80-7175-058-1.
- [8] DŘÍMAL, Jiří, David TRUNEC a Antonín BRABLEC. ÚVOD DO METODY MONTE CARLO [online]. B.m.: Masarykova univerzita, přírodovědecká fakulta, katedra fyzikální elektrotechniky. 2006. Dostupné z: <https://www.physics.muni.cz/~trunec/mc.pdf>
- [9] SPOLEHLIVOST KONSTRUKCÍ, ed. Spolehlivost konstrukcí: téma: Rozvoj koncepcí posudku spolehlivosti stavebních konstrukcí : sborník referátů z konference : Ostrava, březen 2000. Ostrava: Dům techniky, 2000. ISBN 978-80-02-01344-0.
- [10] KREJSA, Martin a Petr KONEČNÝ. 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
- [11] PROBLÉMY MODELOVÁNÍ, Jiří BROŽOVSKÝ, VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, KATEDRA KONSTRUKCÍ, VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, a ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY, ed. Problémy modelování: sborník příspěvků komorního semináře : Ostrava, 16.1.2002. Ostrava; Brno: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Vysoké učení technické., 2002. ISBN 978-80-214-2017-5.
- [12] TOMÁŠ SVOBODA a MATOUŠ HILAR. PRAVDĚPODOBNOSTNÍ ANALÝZA METODOU LATIN HYPERCUBE SAMPLING. TUNEL. 2012, **21**(4), 80–89.
- [13] GUO, Qianru, Kaihang SHI, Zili JIA a Ann E. JEFFERS. Probabilistic Evaluation of Structural Fire Resistance. Fire Technology [online]. 2013, **49**(3), 793–811. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: [doi:10.1007/s10694-012-0293-6](https://doi.org/10.1007/s10694-012-0293-6)

-
- [14] HEIDARI, Mohammad, Fabienne ROBERT, David LANGE a Guillermo REIN. Probabilistic Study of the Resistance of a Simply-Supported Reinforced Concrete Slab According to Eurocode Parametric Fire. *Fire Technology* [online]. 2019, **55**(4), 1377–1404. ISSN 0015-2684, 1572-8099. Dostupné z: doi:10.1007/s10694-018-0704-4
- [15] SHRIVASTAVA, Mayank, Anthony ABU, Rajesh DHAKAL a Peter MOSS. State-of-the-art of probabilistic performance based structural fire engineering. *Journal of Structural Fire Engineering* [online]. 2019, JSFE-02-2018-0005. ISSN 2040-2317. Dostupné z: doi:10.1108/JSFE-02-2018-0005
- [16] HURLEY, Morgan J., ed. *SFPE handbook of fire protection engineering*. Fifth edition. New York: Springer, 2016. ISBN 978-1-4939-2564-3.
- [17] GUO, Qianru a Ann E. JEFFERS. Finite-Element Reliability Analysis of Structures Subjected to Fire. *Journal of Structural Engineering* [online]. 2015, **141**(4), 04014129. ISSN 0733-9445, 1943-541X. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001082
- [18] Benýšek, M.; Štefan, R.; Procházka, J. Effect of Fire Model Parameter Variability on Determination of Fire Resistance of Concrete Structural Members In: *26th Concrete Days 2019*. Curich: Trans Tech Publications, 2020. Solid State Phenomena. ISBN 978-3-0357-1668-9_320. nedatováno.
- [19] Programovací jazyk Python [online]. 2005. Dostupné z: <https://www.py.cz/FrontPage>
- [20] Co je to Python? - Úvod [online]. B.m.: Microsoft 2020. 2020. Dostupné z: <https://docs.microsoft.com/cs-cz/learn/modules/python-introduction/1-introduction>
- [21] SPYDER The Scientific Python Development Environment [online]. 2020. Dostupné z: <https://www.spyder-ide.org/>
- [22] CRANDALL, Tom. PYTHON | BEGINNERS GUIDE [online]. 2019. Dostupné z: <https://hangtenseo.com/python-beginners-guide/>
- [23] KPT. ING. HANA NEDĚLNÍKOVÁ A KOLEKTIV. Statistická ročenka 2019. B.m.: MV - generální ředitelství HZS ČR jako přílohu časopisu 112 číslo 3/2020. 2020
- [24] BROWNLIE, Jason. How to Generate Random Numbers in Python. In: *Machine Learning Mastery* [online]. červenec 2020. Dostupné z: <https://machinelearningmastery.com/how-to-generate-random-numbers-in-python/>
- [25] Mersenne Twister [online]. 2020. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Mersenne_Twister
- [26] PRAVEC, Luboš. Generování náhodných čísel - Pseudonáhodná čísla. In: [online]. B.m. 2015. Dostupné z: <https://docplayer.cz/3016230-Generovani-nahodnych-cisel-pseudonahodna-cisla.html>
- [27] DORDA, Michal. Generování pseudonáhodných čísel při simulaci. In: [online]. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~dor028/Aplikace_4.pdf
- [28] PETERKA, Jiří. MODELOVÁNÍ TRANSPORTU TEPLA VE VÍCEVRSTVÝCH PRVCÍCH VYSTAVENÝCH POŽÁRU S VYUŽITÍM METODY KONEČNÝCH DIFERENCÍ A RŮZNÝCH METOD ČASOVÉ DISKRETIZACE. Praha, 2021. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
-

Příloha 1

NÁVRH A POSOUZENÍ OHYBOVÉ VÝZTUŽE DESKY

1) VÝPOČET ZATÍŽENÍ:



ROZMĚRY: $h = 0,2 \text{ m}$ pozn. OBJEMOVÁ HMOTNOST BETONU SE UVAŽUJE 2500
 $b = 1,0 \text{ m}$ kg/m^3

VLASTNÍ TÍHA: $g_k = 0,2 * 25$

$$g_k = 5,0 \text{ kN/m}^2$$

ZATÍŽENÍ (dle 6.10):

STÁLÉ:	g_k [kN/m ²]	součinitel	g_d [kN/m ²]
podlaha	1,5	1,35	2,025
deska	5	1,35	6,75
Σ			8,775
UŽITNÉ	q_k [kN/m ²]	součinitel	q_d [kN/m ²]
ložnice hotelu	2	1,5	3
$\Sigma (g_d+q_d)$			11,775

pozn. odhad

pozn. viz ČSN EN 1991 - 1 - 1,
TAB.1, kategorie A

2) VÝPOČET OHYBOVÉHO MOMENTU:

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} * f * l^2$$

$$M_{Ed} = \frac{1}{8} * 11,775 * 4^2$$

$$M_{Ed} = 23,55 \text{ kNm}$$

BETON: C 35 / 45 $f_{ctm} = 3,2$ MPa
 OCEL: B 500 B

3) VÝPOČET KRYTÍ:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

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

Třída konstrukce							
Kritérium	Stupeň vlivu prostředí podle tabulky 4.1						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1	XD2 / XS1	XD3 / XS2 / XS3
návrhová životnost 100 let	zvětšit třídu o 2	zvětšit třídu o 2	zvětšit třídu o 2	zvětšit třídu o 2	zvětšit třídu o 2	zvětšit třídu o 2	zvětšit třídu o 2
pevnostní třída ^{1) 2)}	≥ C30/37 zmenšit třídu o 1	≥ C30/37 zmenšit třídu o 1	≥ C35/45 zmenšit třídu o 1	≥ C40/50 zmenšit třídu o 1	≥ C40/50 zmenšit třídu o 1	≥ C40/50 zmenšit třídu o 1	≥ C45/55 zmenšit třídu o 1
deskové konstrukce (poloha výztuže není ovlivněna výrobním postupem)	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	Zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1
zajištěna zvláštní kontrola kvality výroby betonu	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1	Zmenšit třídu o 1	zmenšit třídu o 1

Pozn. Stupeň vlivu prostředí je uvažován jako XC1.

Požadavek $c_{min, dur}$ [mm]							
K-ční třída	Stupeň prostředí						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Doporučená třída konstrukce je S4 pro návrhovou životnost 50 let.

$$c_{min} = \max. (10 ; 10 + 0 - 0 - 0 ; 10)$$

$$c_{min} = 10 \text{ mm}$$

$$c_{nom} = 15 \text{ mm} \rightarrow \text{UVAŽOVÁNO}$$

$$c_{nom} = 15 \text{ mm}$$

4) NÁVRH OHYBOVÉ VÝZTUŽE:

NÁVRHOVÉ PEVNOSTI MATERIÁLŮ:

BETON:

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_M}$$

$$f_{cd} = \frac{35}{1,5}$$

$$f_{cd} = 23,3333 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_M}$$

$$f_{yd} = \frac{500}{1,15}$$

$$f_{yd} = 434,783 \text{ MPa}$$

$$\gamma_{M,\text{beton}} = 1,5$$

$$\gamma_{M,\text{ocel}} = 1,15$$

ODHAD VÝZTUŽE: 10 mm

$$d = h - c - \frac{\Phi}{2}$$

$$d = 0,2 - 0,02 - \frac{0,01}{2}$$

$$d = 0,180 \text{ m}$$

ODHAD RAMENE VNITŘNÍCH SIL:

$$z = 0,9 * d$$

$$z = 0,9 * 0,180$$

$$z = 0,162 \text{ m}$$

PLOCHA VÝZTUŽE:

$$A_{s,\text{req}} = \frac{M_{Ed}}{f_{yd} * z}$$

$$A_{s,\text{req}} = \frac{23,55}{434782,6 * 0,162}$$

$$A_{s,\text{req}} = 0,0003344 \text{ m}^2$$

PLOCHA JEDNOHO PRUHU:

$$a_{s1} = \frac{\pi * \Phi^2}{4}$$

$$a_{s1} = \frac{3,14159 * 0,01^2}{4}$$

$$a_{s1} = 7,854E-05 \text{ m}^2$$

$$\text{NÁVRH } \Phi 10 \text{ mm a } 200 \text{ mm } A_{s,\text{prov}} = 392,699 \text{ mm}^2$$

5) POSOUZENÍ OHYBOVÉ VÝZTUŽE

$$z = d - 0,4 * x$$

$$z = 0,180 - (0,4 * 0,00915)$$

$$z = 0,176 \text{ m}$$

$$x = \frac{A_{s,\text{prov}} * f_{yd}}{0,8 * b * f_{cd}}$$

$$x = \frac{392,699 * 434,783}{0,8 * 1000 * 23,3}$$

$$x = 9,147 \text{ mm}$$

$$M_{Rd} = A_{s,prov} * f_{yd} * z$$

$$M_{Rd} = 392,699 * 434,783 * 176,341$$

$$\xi = \frac{x}{d}$$

$$\xi = \frac{9,147}{180,0}$$

$$M_{Rd} = 30,108 \text{ kNm}$$

$$\xi = 0,05082 < 0,1$$

$$M_{Rd} \geq M_{Ed}$$

$$30,108 \text{ kNm} \geq 23,55 \text{ kNm} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

$$\text{VYUŽITELNOST: } 78,22\%$$

6) KONSTRUKČNÍ ZÁSADY:

$$A_{s,prov} \geq A_{s,min} = \min. \left(0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b * d ; 0,0013 * b * d \right)$$

$$A_{s,prov} \geq A_{s,min} = \min. \left(0,26 * \frac{3,2}{500} * 1000 * 180 ; 0,0013 * 1000 * 180 \right)$$

$$A_{s,prov} \geq A_{s,min} = \min. \left(299,52 ; 234 \right)$$

$$A_{s,prov} \geq A_{s,min} = 234 \text{ mm}^2$$

$$392,699 \geq 234 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

$$A_{s,prov} \leq A_{s,max.}$$

$$A_{s,prov} \leq 0,04 * b * d$$

$$A_{s,prov} \leq 0,04 * 1000 * 180$$

$$A_{s,prov} \leq 7200 \text{ mm}^2$$

$$392,699 \text{ mm}^2 \leq 7200 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

$$s \leq \min. \left(2 * h ; 250 \text{ mm} \right)$$

$$s \leq \min. \left(2 * 200 ; 250 \text{ mm} \right)$$

$$s \leq \min. \left(400 ; 250 \right)$$

$$200 \text{ mm} \leq 250 \text{ mm} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

$$s_l \geq \max. \left(20 \text{ mm} ; 1,2 * \Phi_s ; D_{max.} + 5 \text{ mm} \right)$$

$$s_l \geq \max. \left(20 ; 1,2 * 10 ; 16 + 5 \text{ mm} \right)$$

$$s_l \geq \max. \left(20 ; 12 ; 21 \text{ mm} \right)$$

$$190 \text{ mm} \geq 21 \text{ mm} \rightarrow \text{VYHOVUJE} \rightarrow \text{KONSTRUKČNÍ ZÁSADY VYHOVUJÍ}$$