

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Studijní program: Integrovaná bezpečnost staveb

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**ANALÝZA A PARAMETRICKÁ STUDIE
RŮZNÝCH CFD MODELŮ POŽÁRU PŘI
NÁVRHU KONSTRUKCÍ**

**ANALYSIS AND PARAMETRIC STUDIES OF VARIOUS CFD
FIRE MODELS IN STRUCTURAL DESIGN**

Bc. Monika Borůvková

vedoucí práce: Ing. Martin Benýšek, Ph.D.

2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Borůvková	Jméno: Monika	Osobní číslo: 478653
Zadávací katedra: K 133 Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: N36IQ - Integrovaná bezpečnost staveb		
Studijní obor/specializace: N36IQ - Integrovaná bezpečnost staveb		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Analýza a parametrická studie různých CFD modelů požáru při návrhu konstrukcí	
Název diplomové práce anglicky: Analysis and parametric studies of various CFD fire models in structural design	
Pokyny pro vypracování: Rešerše literatury Parametrická studie CFD modelů požáru Výpočty Vyhodnocení Závěr	
Seznam doporučené literatury: YEOH, Guan Heng a Kwok Kit YUEN, ed. Computational fluid dynamics in fire engineering: theory, modelling and practice. Amsterdam ; Boston: Elsevier, 2009. ISBN 978-0-7506-8589-4 HURLEY, Morgan J., Daniel T. GOTTUK, John R. HALL JR., Kazunori HARADA, Erica D. KULI-GOWSKI, Milosh PUCHOVSKY, Jose' L. TORERO, John M. WATTS JR. a CHRISTOPHER J. WIECZOREK, ed. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering [online]. 5th ed. 2016. New York, NY: Springer New York : Imprint: Springer, 2016. ISBN 978-1-4939-2565-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4939-2565-0 CÁBOVÁ, Kamila. Ověřování modelů v požární bezpečnosti. 2019. ISBN 978-80-01-06616-4.	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Martin Benýšek, Ph.D.	
Datum zadání diplomové práce: 29.9.2022	Termín odevzdání DP v IS KOS: 9.1.2023 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

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

V Praze dne 9.1.2023

Podpis.....

Bc. Monika Borůvková

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Martinu Benýškovi Ph.D., za ochotu, cenné rady a doporučení, které mi pomohly při zpracování této práce.

Dále bych ráda poděkovala mé rodině za podporu nejen při psaní diplomové práce, ale i během celého mého studia na vysoké škole.

Obsah

Prohlášení	3
Poděkování	5
Obsah	7
Abstrakt	9
Abstract	11
Seznam použitých symbolů a zkratk	13
Seznam použitých programů	18
1 Úvod	19
1.1 Motivace	19
1.2 Cíle práce.....	20
2 Současný stav poznání	21
2.1 Model požáru	22
2.1.1 Hoření.....	22
Požární inženýrství	24
2.2 Rozdělení modelů požáru	24
2.3 Modely CFD	26
2.3.1 Historie	26
2.3.2 Popis CFD modelů	26
2.3.3 Výpočetní síť	27
2.3.4 Okrajové a počáteční podmínky	28
2.3.5 Výpočetní princip CFD modelů.....	29
2.3.6 Využití v požární bezpečnosti staveb.....	32
2.3.7 Limity CFD modelování.....	33
3 CFD programy pro modelování požáru	34
3.1 in:Flux.....	36
3.2 FDS.....	39
3.3 CFX a Fluent.....	41
3.4 SMARTFIRE	43
3.5 Kameleon FireEx KFX.....	47
3.6 SimFlow.....	48
3.8 Phoenix/FLAIR.....	50
3.9 Fluidyn-PANFIRE	51
3.10 FLACS-CFD	52
3.11 KOBRA-3D.....	54

3.12	Flow-3D	55
3.13	Autodesk CFD	56
4	Porovnání CFD programů z hlediska funkcí.....	60
5	Analýza vybraných CFD programů při modelování požáru	63
5.1	Řešený příklad.....	63
5.2	Model řešeného příkladu	63
5.2.1	Program FDS.....	67
5.2.3	Program Phoenics.....	71
5.2.4	Program Ansys Fluent	76
5.2.5	Program Autodesk CFD	81
5.3	Přehled zkoumaných parametrů.....	85
5.4	Zhodnocení analýzy modelování požáru v CFD programech	89
5.4.1	Zhodnocení sledovaných parametrů.....	89
5.4.2	Zhodnocení vybraných CFD programů.....	90
6	Analýza požární odolnosti konstrukce.....	97
6.1	Metody stanovení teplotního zatížení konstrukcí.....	97
6.2	Stanovení teploty konstrukce	98
6.3	Teplotní analýza stropní konstrukce.....	98
6.4	Zhodnocení teplotní analýzy	101
6.5	Analýza únosnosti stropní desky za požáru	102
6.6	Zhodnocení analýzy únosnosti	103
7	Závěr	104
	Seznam obrázků	107
	Seznam tabulek.....	110
	Literatura.....	111
	Příloha 1 – Ukázka modelování v programech SMARTFIRE a in:Flux.....	117
	Program SMARTFIRE.....	117
	Program in:Flux	119
	Příloha 2 – Návrh železobetonové stropní desky	125

Abstrakt

Tato práce v teoretické části pojednává o využitelnosti dostupných CFD programů pro modelování požáru a jejich následném porovnání z hlediska obsáhlosti funkcí a uživatelského rozhraní. V této části práce je uvedeno rozdělení modelů požáru na dvě základní skupiny, z nichž stěžejní skupinou této práce jsou matematické modely, především CFD modely. Je zde popsána historie a rozvoj CFD modelů, matematický základ CFD programů, základní submodely (např. hoření) pro simulaci požáru v CFD modelech a limity modelování. Co se týče CFD programů pro modelování požáru, jsou zde zmíněny aktuálně dostupné programy. Popis programů je zaměřen především na možnosti a funkce modelování, uživatelské rozhraní a jejich využitelnost. Pro přehlednost jsou vypracovány tabulky se zjištěnými funkcemi a uživatelským rozhraním. Následně jsou uvedené CFD programy porovnány a vyhodnoceny na základě obsáhlosti funkcí.

V praktické části práce je provedena analýza vybraných CFD programů na konkrétním řešeném příkladu. Ve vybraných programech jsou modelované dvě varianty řešeného modelu, tj. místnost s odvětráním a místnost bez odvětrání. Zdroj požáru je dřevěný stůl s předepsanou rychlostí uvolňování tepla, jenž slouží jako hlavní vstup do vybraných programů. Cílem analýzy je namodelovat ve všech vybraných CFD programech obě varianty příkladu a následně porovnat zvolené výstupní parametry. Zkoumanými parametry jsou rychlost uvolňování tepla, teplota u stropní konstrukce a koncentrace toxických plynů v návaznosti na viditelnost. Pro získání parametru viditelnosti je u některých programů proveden analytický výpočet viditelnosti a rychlosti uvolňování kouře. Výstupní hodnoty všech zkoumaných parametrů jsou následně převedeny do grafů a porovnány z hlediska matematického základu. Vybrané CFD programy jsou nakonec zhodnoceny z hlediska ovladatelnosti, funkčnosti, obsáhlosti funkcí a dostupnosti. Pro analýzu únosnosti železobetonové stropní desky za požáru jsou z průběhů teplot u stropní konstrukce (výstup z CFD programů) stanoveny teploty na povrchu desky dle ČSN EN 1991-1-2 a v místě výztuže. Následně jsou porovnány grafy výsledných průběhů teplot. Únosnost stropní desky je zhodnocena na základě dosažených teplot v místě výztuže.

Klíčová slova

CFD (Computational Fluid Dynamics) modely; CFD programy pro modelování požáru; Modely požáru; Požár; Požární inženýrství; Betonové konstrukce; Únosnost konstrukce za požáru

Abstract

In the theoretical part, this thesis discusses the usability of available CFD software for fire modelling and their subsequent comparison in terms of the comprehensiveness of functions and user interface. In this part of the thesis, the division of fire models into two basic groups is presented, of which the core group of this thesis are mathematical models, especially CFD models. The history and development of CFD models, and the mathematical basis of CFD software, the basic submodels (e.g. burning) for fire simulation in CFD models and modeling limits are described here. Regarding CFD software for fire modeling, currently available software are mentioned here. The description of the software is mainly focused on modeling possibilities and functions, the user interface and their usability. For clarity, overview tables are prepared with the identified functions and user interface. Subsequently, the mentioned CFD software are compared and evaluated based on the comprehensiveness of functions.

In the practical part of the thesis, an analysis of selected CFD software is carried out on a specific solved example. In the selected software, two variants of the solved model are created, i.e. a room with ventilation and a room without ventilation. The source of the fire is a wooden table with a prescribed heat release rate, which serves as the main input to the selected software. The analysis aims to model both variants of the example in all selected CFD software and then compare the selected output parameters. The investigated parameters are the heat release rate, the temperature of the ceiling structure and the concentration of toxic gases in relation to visibility. To obtain the visibility parameter, an analytical calculation of the visibility and the speed of smoke release is performed for some software. The output values of all investigated parameters are subsequently converted into graphs and compared in terms of the mathematical basis. The selected CFD software are finally evaluated in terms of controllability, functionality, comprehensiveness of functions and availability. For the analysis of the load-bearing capacity of a reinforced concrete ceiling slab during a fire, the temperatures on the surface of the slab according to ČSN EN 1991-1-2 and at the point of reinforcement are determined from the temperature curves of the ceiling structure (output from CFD programs). Subsequently, the graphs of the resulting temperature are compared. The bearing capacity of the ceiling board is evaluated based on the temperatures reached at the point of reinforcement.

Keywords

CFD (Computational Fluid Dynamics) models; CFD software for fire modeling; Fire models; Fire; Fire engineering; Concrete structures; Fire resistance of the structure

Seznam použitých symbolů a zkratk

Latinské symboly

ΔH_c	Výhřevnost	J/kg
\vec{V}	Vektor rychlosti	m/s
p	Tlak	Pa
\vec{g}	Gravitační vektor	m/s ²
\overline{F}_m	Vnější síly	N
\dot{q}''	Rychlost uvolňování tepla na jednotku objemu	W/m ³
\dot{m}''_α	Hromadná produkce na jednotku objemu druhu α chemické reakce	kg/s
$\Delta h_{f,\alpha}$	Výhřevnost druhu α	J/kg
\dot{m}''_f	Hmotnostní tok	kg/s
\dot{q}''_{user}	Požadovaná rychlost uvolňování tepla na plochu	W/m ²
\overline{p}_m	Tlak pozadí	Pa
T	Teplota	°C (K)
R	Univerzální plynová konstanta	J/K mol
W	Molekulová hmotnost plynné směsi	mol
$Z_{\alpha,ijk}$	Směs druhů	mol/m ² , mol/m ³
W_α	Molekulová hmotnost plynných látek α	kg/mol
K	Extinkční koeficient; konstanta pro viditelnost světelné značky	m ⁻¹
K_m	Hmotnostně specifický extinkční koeficient	m ² /g
m_s	Koncentrace kouře	g/m ³
C	Empirický koeficient	-
V	Objem	m ³
A	Plocha	m ²

t	Čas	s
Δt	Časový rozdíl	s
$J_{i,j,k}$	Difuzní tok přes všechny stěny buňky	mol / m ² s
S_V	Tepelný zdroj na jednotku objemu	W/m ³
$SLEN, S$	Viditelnost	m
$C_{s,p}$	Hmotnostní koncentrace kouře	g/m ³
Y_s	Výtěžek částic kouře	kg/kg
C_s	Hmotnostní podíl produktů spalování	kg _{kouř} /kg _{palivo}
R_{ox}	Stechiometrický poměr	kg _{kyslík} /kg _{palivo}
D_{max}	Koeficient viditelnosti	m
SRR	Rychlost uvolňování kouře	kg/s
HRR	Rychlost uvolňování tepla	kW
\bar{F}	Vnější tělesné síly	N
T_u	Nejnižší teplota spalné směsi	K; °C
T_{ad}	Nejvyšší adiabatická teplota	K; °C
h	Součinitel přestupu tepla	W/m ² K
k	Konstanta reakční rychlosti	J/kg
S_c	Normalizovaná průměrná rychlost tvorby produktů	kg/s
H_{comb}	Spalné teplo	J/kg
p_{fuel}	Parciální tlak paliv	Pa
S_{DR}	Distribuovaný odpor	Ω
c_p	Mechanické měrné teplo	J/kg K
R_{gas}	Plynová konstanta pro daný plyn	J/K mol
m_p	Hmotnostní koncentrace částic	kg/m ³
M_p	Množství produkovaných částic	kg; g

M_f	Hmotnost spotřebovaného paliva	kg; G
Q_t	Rychlost uvolňování tepla v čase	W/s
ΔH_{ch}	Chemické spalné teplo	J/kg
h_{net}	Čistý tepelný tok	W/m ²
$h_{net,c}$	Složka čistého konvekčního tepelného toku	W/m ²
$h_{net,r}$	Složka čistého sálavého tepelného toku	W/m ²
Řecké symboly		
∇	Gradient	-
ρ	Hustota	kg/m ³
μ	Molekulární viskozita	m ² /s
$\overline{\overline{\Phi}}_{Re}$	Reynoldsův tenzor stresu	
ρ_{ijk}	Hustota plynné fáze v buňkách	kg/m ³
α_m	Hmotnostně specifický extinkční koeficient	m ² /g
ρ_s	Koncentrace kouře	g/m ³
Φ	Variabilní proměnná	-
Γ	Koeficient difuzní výměny pro Φ	m ² /s
δ	Viditelnost	m
$\overline{\overline{\tau}}$	Tenzor napětí	Pa
σ_{soot}	Turbulentní Prandtlovo číslo pro transport sazí	-
V_{soot}, V_{fuel}	Hmotnostní stechiometrie pro spalování sazí a paliva	-
ω	Rychlost otáčení	ot/min
α_c	Součinitel přestupu tepla prouděním	W/mK
Θ_g	Teplota plynů	K; °C
Θ_m	Povrchová teplota	K; °C
Θ_r	Teplota sálání prostředí požáru	K; °C

\emptyset	Polohový faktor	-
ϵ_m	Emisivita prvku	-
ϵ_f	Emisivita požáru	-
σ	Stephan-Boltzmannova konstanta	W/m^2K^4

Zkratky

CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator
KFX	Kameleon FireEx
DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes
RNG	Re-Normalisation Group
SST	Shear Stress Transport
DES	Detached eddy simulation
HRR	Heat Release Rate
UDF	Uživatelsky definovaná funkce
ŽB	Železobeton
PISO	Pressure Implicit with Splitting of Operator
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
PIMPLE	Kombinace PISO a SIMPLE (combination of PISO and SIMPLE)
CAD	Computer-aided design
NIST	National Institute of Standard and Technology
KBS	Knowledge Based System
OBST	Skupina jmenného seznamu programu FDS
SBI	Single Burning Item

DXB	Drawing interchange Binary
DXF	Drawing Exchange Format
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
STEP	Standard for the Exchange of Product model data
OBJ	Formát souboru s definicí geometrie
STL	Standard Triangle Language, Standard Tessellation Language
NWD	Navisworks Document
DWF	Design Web Format
DGN	Design - souborový formát pro CAD
DWG	Drawing - nativní formát souborů (výkresů) programu AutoCAD
BREP	Boundary Representation
3DS	3D Studio Scene
WRL	Virtual Reality Modeling Language
DW	DesignWorkshop
AC	Autoconf Script
IV	Open Inventor Scene Graph File
RVM	PDMS review/exchange formát souborů
JPEG	Joint Photographic Experts Group
SAS	Scale Adaptive Simulation
EDC	Eddy dissipation concept
LVEL	Model turbulence programu PHOENICS, který je zvláště užitečný pro problémy s konjugovaným přenosem tepla
DIPPR	Design Institute for Physical Properties

Seznam použitých programů

- Microsoft office 2013 – Word, Excel
- Zotero [57]
- ArchiCad 20 [58]
- Autodesk CFD 2023 [59]
- PyroSim 2021 [60]
- Phoenix [61]
- Ansys Fluent [62]
- SAMRTFIRE [63]
- in:Flux [64]
- TempAnalysis 1.2 [65]

1 Úvod

Pro navrhování požární bezpečnosti staveb se v požární praxi využívají už po dobu několika let tradiční postupy, tj. navrhování podle požárních norem, ručních výpočtů a zjednodušených výpočetních modelů. Tyto postupy jsou v určitém rozsahu použití přesné, avšak s postupným projektováním složitějších objektů ztrácejí tradiční způsoby svou efektivitu. Rozvojem výpočetní techniky a vlivem velkých katastrofických požárů se začala využívat alternativní metoda navrhování tzv. požárně inženýrský přístup. Tato metoda využívá poznatky z praxe, jak z experimentálních zkoušek, tak právě ze zmiňovaných katastrofických požárů. Nástrojem alternativní metody jsou počítačové modely. V oblasti požárního inženýrství je metoda výpočtů pomocí pokročilých modelů jednou z nejsložitějších. Nejvíce užívanými modely jsou modely založené na principu dynamiky proudění tekutin, tzv. CFD modely.

Tato práce je zaměřena na analýzu a porovnání vybraných programů pro modelování požáru, které jsou založeny na principu dynamiky proudění tekutin, tzv. CFD modely. CFD programy jsou obecně založeny na řešení rovnic proudění tekutin, ale jen některé z nich obsahují doplňující modely pro řešení požární problematiky. Práce je zaměřena nejen na funkčnost a využitelnost CFD programů, ale také na vliv konstrukcí.

1.1 Motivace

Pokročilé výpočetní modely jsou důležitou složkou v oblasti řešení požární problematiky. Pro navrhování požární bezpečnosti staveb se využívají především matematické modely, jimž jsou zónové modely nebo CFD modely. Tato práce je zaměřena na CFD programy, jejichž řešení je založené na dynamice proudění tekutin (CFD modelech).

V současné době se v oblasti CFD modelování požáru nejvíce využívá program FDS (Fire Dynamics Simulator). Motivací této práce je poukázat i na jiné aktuálně dostupné CFD programy, které lze využít v oblasti řešení požární bezpečnosti staveb. Další motivací je zjistit využitelnost těchto CFD programů a porovnat, který program dokáže nejrealněji simulovat požár a je možné ho využít pro různé druhy požárních problémů.

1.2 Cíle práce

Hlavní cíle práce jsou následující:

1. Analýza dostupných CFD programů.
2. Analýza dostupnosti CFD programů.
3. Analýza funkčnosti, využitelnost a limitů jednotlivých CFD programů.
4. Porovnání a vyhodnocení vybraných CFD programů.
5. Analýza vlivu vybraných CFD programů na konstrukci.

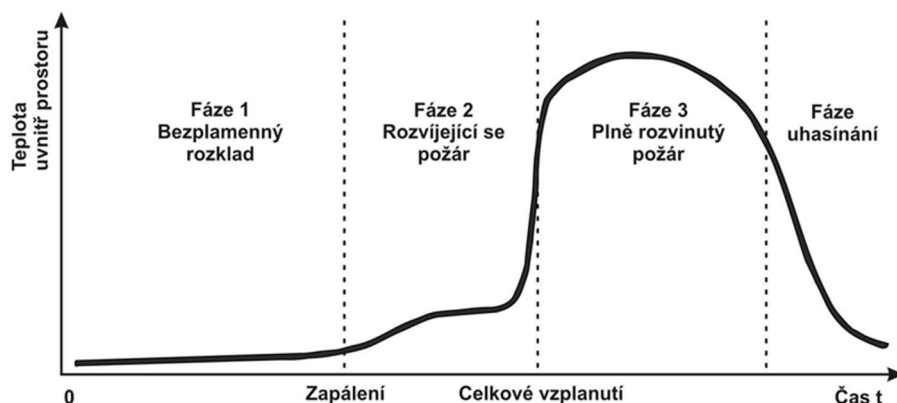
2 Současný stav poznání

V oblasti požárního inženýrství je hlavním úkolem navrhnout takové požárně bezpečnostní řešení staveb, ve kterých bude omezeno riziko vzniku požáru a jeho případné následky na zdraví osob a zvířat, majetku a životním prostředí budou minimální. Po dobu několika let se pro návrh požárně bezpečnostního řešení využívají normy požární bezpečnosti, ruční výpočty nebo zjednodušené výpočetní modely. Jelikož se v současné době navrhují stále složitější stavební objekty, ať jsou složité svou dispozicí nebo konstrukčním či provozním řešením, tak tyto osvědčené postupy založené na předpisech začínají být neefektivní. Pro navrhování požární bezpečnosti ve složitě navrhovaných stavbách mohou být tyto normativní postupy velmi finančně nákladné, neproveditelné nebo nekonkurenceschopné. U rekonstrukcí staveb může dojít například k nemožnosti zachování historických konstrukcí, na které jsou dle norem kladeny vysoké požadavky. Důsledkem tohoto poznání je možné provádět návrh staveb pomocí alternativního přístupu (tzv. požárně inženýrský přístup). Alternativní přístup využívá poznatky z požární vědy a požární praxe. Nástrojem jsou počítačové modely zabývající se modelováním průběhu požáru uvnitř objektu, zjišťováním množství odvodu kouře a tepla, studiem interakce požáru se systémy detekce a účinností stabilního hasicího zařízení, vlivem požáru na konstrukce a dalším. Motivací vytvořit a dále vyvíjet počítačové modely, které by uměly simulovat požární scénáře, byly velké požární katastrofy v historii, jako například požár v londýnském metru Kings Cross, ke kterému došlo 18. listopadu 1987, nebo zřícení věží World Trade Center Towers v New Yorku dne 11. září 2001. Pro modelování požáru se v průběhu desetiletí vyvinulo velké množství různých softwarových nástrojů, z nichž se nejvíce využívají programy založené na principu dynamického proudění tekutin, tzv. CFD modely (Computational Fluid Dynamics).[1–4]

Následující kapitoly pojednávají o CFD modelech, jejich vývoji, matematickém základu, limitech, aplikaci a využití v požární bezpečnosti. Dále jsou zmíněny dostupné CFD programy, které jsou jednotlivě popsány a následně porovnány. V praktické části práce jsou aplikovány vybrané CFD programy na řešení daného příkladu, na kterém je provedena jejich analýza zaměřená na ovladatelnost, funkčnost, dostupnost a vliv na konstrukce.

2.1 Model požáru

V požárním inženýrství je potřeba znát fáze požáru, a především porozumět fázi požáru před vzplanutím, aby mohly být správně navrženy funkční systémy požární ochrany. Fáze požáru se dělí na čtyři charakteristické fáze, a to fázi iniciační, fázi rozvoje, fázi plně rozvinutého požáru a fázi dohořívání, viz obr. 1. [3, 5]



Obr. 1: Fáze požáru [6]

Klíčem k návrhu požární bezpečnosti je navrhnout preventivní opatření tak, aby nedošlo k plně rozvinutému požáru, který by mohl zapříčinit vážné poškození konstrukcí budovy a ohrozit její obyvatele. [3, 5]

Model požáru je jedním ze složek polního modelování dynamiky požáru, který obsahuje podrobnou specifikaci popisu požáru. [3] Je zapotřebí znát geometrii, tepelný výkon a produkty spalování zdroje hoření. Model požáru je složen z modelu pyrolýzy a modelu hoření. Model pyrolýzy představuje model pro pevnou fázi a výstupem je rychlost uvolňování hořlavých plynů. Rychlost uvolňování hořlavých plynů je závislá na teplotě, při které dochází k rozkladu látky a rychlosti dosažení této teploty v materiálu. Model hoření představuje model pro plynnou fázi a výstupem je rychlost uvolňování tepla a spalných produktů v podobě sazí. [7]

2.1.1 Hoření

Pro modelování požárů a jejich simulaci rozvoje je zapotřebí porozumět plamennému chování všech požárů. Jelikož je spalování a sálání typickým znakem požárů, je nutné do modelování zahrnout charakteristiky hoření a záření. [3]

Proces hoření nastává ve chvíli, když jsou přítomny všechny základní prvky trojúhelníku hoření. Základními činiteli hoření jsou hořlavá látka, oxidační činidlo a iniciační zdroj. Hořlavými látkami mohou být látky v pevném, kapalném či plynném skupenství. Oxidační činidlo je nejčastější v podobě vzdušného kyslíku, ale mohou to být i látky, které kyslík uvolňují (např. některé kyseliny nebo chlór). Iniciačním zdrojem se rozumí tepelná energie ve formě jiskry, plamene nebo zdroje přeměňujícího jinou energii na tepelnou. Pokud by chyběl jeden ze základních prvků trojúhelníku hoření, potom není možné, aby k požáru došlo. [8]



Obr. 2: Trojúhelník hoření [9]

Hoření je projev chemické reakce. Jedná se o vysoce exotermickou reakci, jejímž produktem je plamen, který je tvořen reagujícími plyny a jemnými uhlíkatými částicemi v podobě sazí. Z hlediska kapalin nedochází k hoření samotné kapaliny, ale jejím hořlavým plynům, které se při zahřívání odpařují a tvoří tak hořlavé plyny. Podobné je to u pevných látek. Vlivem uvolňovaného tepla, látky na povrchu degradují a uvolňují tak hořlavé plyny. Tento proces se nazývá pyrolýza. [7]

Proces spalování je exotermickou reakcí, při které se uvolňuje teplo. Každá látka uvolňuje různé množství tepla, které je vyjádřeno výhřevností ΔH_c . Výhřevnost udává, kolik množství tepla se uvolní při dokonalém spálení jednotkového množství tepla a ovlivňuje tak teplotní pole v modelu požáru. Do modelu požáru je nutné kromě výhřevnosti látek také zahrnout spalné reakce. Ty jsou snadno definovatelné u plynů či některých kapalných látek, a proto se mohou do modelu požáru nadefinovat na základě skutečného složení hořlavých par, které jsou uvolňovány při tepelné degradaci. Obtížné je to u pevných látek a složitých směsí. V tomto případě se v modelu požáru popisuje spalná reakce obecně, tak aby se co nejvíce blížila ke skutečné spalné reakci. [7]

U většiny reálných požárů dochází k vysokým rychlostem plamene, který je charakterizován turbulentním prouděním. Při turbulentním spalování dochází k vířivému promíchávání, který ovlivňuje proud horkých spalin nasáváním čerstvého vzduchu z okolí. Dále turbulence ovlivňují chemické reakce plynné fáze. Příčinou tohoto ovlivnění je, že u turbulentního proudění je převládající mísení hořlavých plynů s kyslíkem, než je tomu u difúzních procesů. [2, 3]

Jak už bylo řečeno, většina požárů je charakteristická turbulentním tokem plynů, kromě zvláštních případů, kdy se jedná o laminární plamen. Laminární plamen si lze představit v podobě hořící svíčky, kde plameny dosahují nízké rychlosti, a dalo by se tak říci, že plamen je klidný a konstantní. [2, 3]

Požární inženýrství

Jak už bylo zmíněno v kapitole 2, v současnosti začíná být trendem navrhovat požárně bezpečnostní řešení pomocí alternativních postupů. Alternativním postupem se rozumí odlišný postup, který se neřídí českými technickými normami nebo jinými technickými dokumenty upravující podmínky požární ochrany. Součástí těchto odlišných postupů je právě požární inženýrství, které tvoří jejich dílčí kategorii. Požární inženýrství je jednou z dílčích kategorií alternativního postupu. Další kategorie alternativního přístupu tvoří zahraniční normy a technické dokumenty, jak je uvedeno na obr. 3. [10]



Obr. 3: Možnosti návrhu požární bezpečnosti a jejich vztah [10]

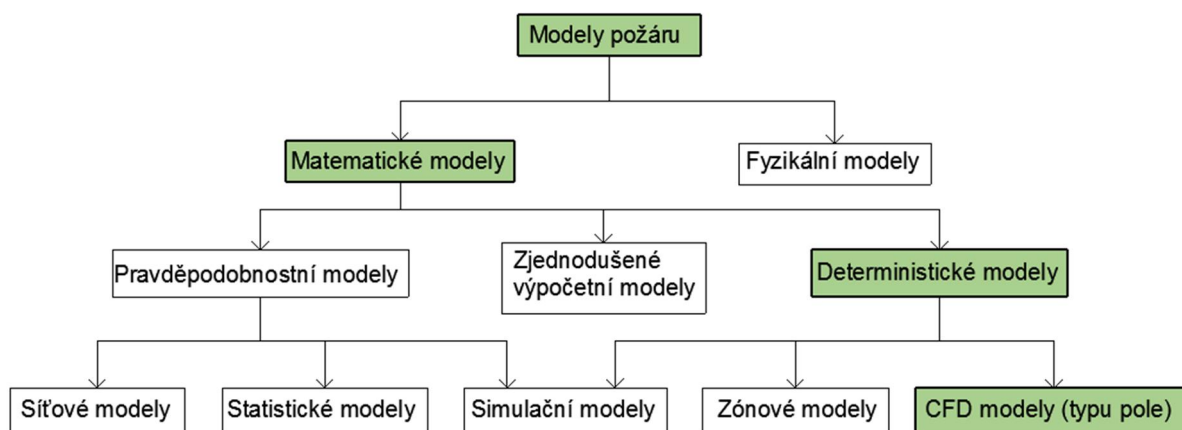
Požární inženýrství je soubor postupů a zásad určených k posouzení požární bezpečnosti u složitých objektů s cílem nalezení efektivního řešení na základě stanovených kritérií přijatelnosti (přijatelné míry rizika). Pro provedení analýzy a nalezení efektivního řešení se využívají aktuální poznatky z oblasti přírodních a aplikovaných věd. Požární inženýrství je možné uplatnit nejen v oblasti posuzování staveb, ale také v oblasti zjišťování příčin vzniku požáru, ochrany obyvatelstva, krizovém řízení nebo v oblasti plnění úkolů jednotek požární ochrany. [10]

2.2 Rozdělení modelů požáru

Dynamika požáru je souborem složitých fyzikálních a chemických interakcí, zahrnujících dynamiku tekutin, termodynamiku, spalování, záření, ale také vícefázové efekty. Z počátku zkoumání vývoje požáru v uzavřeném prostoru se ubírala velká pozornost na pochopení chování požáru. Zkoumání bylo prováděno pomocí experimentálních technik a teoretických přístupů. Co se týče experimentů, ty poskytují užitečná pozorování a měření procesu hoření. Kdežto teoretické modely využívají matematický popis fyzikálních jevů na základě experimentálních dat. Plná využitelnost experimentů a teoretických přístupů nemusí být vždy efektivní. Využití experimentálních technik může být dosti nákladné, ať už z pohledu nákladů na výstavbu požárního zařízení nebo na přístrojové či technické vybavení. Teoretické přístupy sice mají nízké výpočetní náklady, ale jejich modely velmi závisí na experimentálních datech, ze kterých jsou korelovány. Použití numerických metod v oblasti modelování požáru nabízí flexibilitu při simulaci

chování požáru v různých podmínkách, a tím překonává omezení v experimentálních technikách a teoretických přístupech. [3, 4, 11]

V oblasti požárního inženýrství jsou zastoupeny základní dvě skupiny modelů požáru. První skupinou jsou fyzikální modely a druhou skupinou matematické modely, jak je uvedeno na obr. 4. [1, 4, 11]



Obr. 4: Rozdělení modelů požáru [4]

Fyzikální modely se zabývají napodobením reálného požáru převážně ve zmenšeném měřítku. Velkorozměrové požární zkoušky sice vystihují reálný průběh požáru, avšak jejich provedení je značně složité a finančně nákladné. Jedná se tedy spíše o zjednodušené experimenty malých měřítek, a proto nelze zcela vystihnout reálné chování požáru. Tyto modely však převážně slouží k pozorování fyzikálních jevů, získávání užitečných poznatků a validačním procesům. [1, 3, 4, 11]

Matematické modely oproti fyzikálním popisují požár a jeho účinky pomocí matematického jazyka s využitím výpočetní techniky. V oblasti matematických modelů existují dvě hlavní kategorie pro analýzu vývoje požáru v uzavřeném prostoru. První kategorií jsou stochastické nebo pravděpodobnostní modely, které uvažují s růstem požáru jako s řadou po sobě jdoucích událostí nebo stavů. Přechod z jedné události na druhou je řízen podle stanovených matematických pravidel. Každému bodu přenosu jsou přiřazeny pravděpodobnosti získané z analýzy relevantních experimentálních dat, historických dat o požáru a výsledků počítačového modelu. Druhou kategorií zastupují deterministické modely. Tyto modely popisují procesy, ke kterým dochází při požáru, pomocí vzájemně souvisejících matematických výrazů založených na fyzikálních a chemických jevech. [3, 4, 11]

Pro modelování požáru jsou nejrozšířenějšími modely požáru zónové modely a CFD modely (modely typu pole), které jsou podskupinou deterministických modelů. Tyto modely provádějí výpočty na podobném principu. Výpočetní interakce probíhají mezi oblastmi, které si modely rozdělí do kontrolních objemů, zón či buněk. [1, 4, 11]

Zónové modely uvažují s rozdělením místnosti požáru na jednu nebo dvě samostatné vrstvy (tj. horní vrstva horkých plynů a spodní vrstva studených plynů (vzduch)). Pokud je místnost rozdělena na dvě vrstvy jedná se o dvouzónový model. Tento stav se týká počáteční fáze rozvoje požáru, kdy zplodiny požáru stoupají ke stropu, kde se kumulují a vzniká tak vrstva horkých plynů v horní části místnosti. Dolní částí místnosti je přiváděn vzduch z exteriéru, který ochlazuje tuto část místnosti. V případě zakouření celé místnosti a vzniku homogenní

vrstvy mluvíme o jednozónovém modelu. Tento jev nastává po dosažení flashover efektu. Rozdíl mezi CFD modely a zónovými modely je, že zónové modely neumí řešit rovnice zachování hybnosti a nejsou schopné odhadnout rychlosti proudících plynů. Toto omezení tak limituje řešení požární situace v prostorech tunelů, šachet nebo chodeb, tedy v prostorách s jedním převládajícím rozměrem. [1, 3, 4, 11]

CFD modely (modely typu pole) jsou podrobně popsány v následujících kapitolách.

2.3 Modely CFD

2.3.1 Historie

Výpočetní modely dynamiky tekutin vznikaly již na počátku 20. let minulého století, kdy Lewis Richardson jako první prokázal proveditelnost řešení řídicích rovnic proudění tekutin na základě numerických metod. Jeho první aplikace této metody byla na předpovědi počasí. Teprve až od druhé poloviny minulého století, kdy se začala rozvíjet výpočetní technologie, která uměla řešit tyto numerické metody a dále je rozšiřovala, začal rozvoj výpočetní dynamiky tekutin známý jako CFD. S postupným rozvojem a zvyšováním rychlosti počítačové techniky se stalo řešení průměrných Reynoldsových Navier-Stokesových rovnic běžnou záležitostí při navrhování a analýze různých technických problémů. Začali vznikat komerční softwary CFD pro různá odvětví, jako jsou automobilový, letecký, strojní a chemický průmysl, předpověď počasí, biomedicína, životní prostředí i sport. Pro každé odvětví se technologie CFD vyvíjela, testovala a ověřovala na poznatcích z praxe. Kdežto z hlediska požárního inženýrství se technologie CFD rozvíjela mimo hasičskou komunitu a později byla do ní importována. Je tedy možné využít nástroje určené k modelování přenosu tepla ve spalovacím motoru a demonstrovat tím zkoumání pohybu vzduchu v interiéru, včasnou detekci kouře a rozptyl spalin. Avšak mnoho problémů se týká pouze požáru, kde je nutné využít poznatky z hasičské komunity. Důsledkem toho bylo možné využít jen některé CFD softwary pro zkoumání určitých požárních problémů. S postupem času, kdy se začaly navrhovat složitější budovy, a došlo k mnoha požárním katastrofám, se začaly vyvíjet softwary CFD zaměřené pouze na modelování požárů, které využívali poznatky z hasičské komunity. [3, 5, 12–14]

2.3.2 Popis CFD modelů

CFD modely slouží jako nástroj pro simulaci proudění tekutiny, přenosu hmoty a tepla a vzájemného působení mezi plynou a pevnou látkou. CFD modely mají využití v mnoha odvětvích, ať už se jedná o průmysl, medicínu, sport, projektování staveb či předpověď počasí. [11, 13–16]

Všechny CFD modely obsahují kód, jehož jádrem je soustava parciálních diferenciálních rovnic vyjadřující zákon zachování hmoty, energie, chemických látek a hybnosti v prostoru požáru a jeho okolí. Parciální diferenciální rovnice popisují rovnováhu mezi konkurenčními vlivy neboli jak se spojitě mění tok tekutin v čase a prostoru. Tyto rovnice však není možné vyřešit analyticky se získáním přesných výsledků v daném bodě. Proto se k řešení těchto úloh využívají numerické metody, jejichž výsledky se přibližují přesnému řešení. Tato řešení probíhají v tzv. trojrozměrných kontrolních objemech. Každý CFD model obsahuje výpočetní oblast, která je rozdělena na daný počet právě zmiňovaných kontrolních objemů neboli buněk, které tvoří výpočetní síť. V každé buňce jsou při výpočtu řešeny stavové rovnice a rovnice zachování

hmoty, energie, chemických látek a hybnosti. Přesnost výsledků podávající informace o měnících se proměnných v čase a prostoru závisí na velikosti buněk, tedy hustotě výpočetní sítě. Čím jsou buňky výpočetní sítě menší, tím je výsledné řešení přesnější a dostáváme detailnější prostorové informace. S velikostí (hustotou) výpočetní sítě také souvisí čas řešení. Jelikož v každé buňce dochází k řešení parciálních diferenciálních rovnic, s nárůstem počtu buněk (husté výpočetní síti) bude také narůstat výpočetní čas. [2, 3, 11, 13]

Obecné CFD modely nezahrnují formulace pro proces hoření a specifické hraniční podmínky, které by dokázaly řešit komplexní problematiku požáru. CFD modely požáru obsahují kromě obecného matematického modelu, který je základem většiny CFD modelů, také tzv. „model požáru“. [11, 13, 15, 16]

Pro výpočetní techniku je velmi náročné řešit rovnice turbulentního spalování a chemických reakcí v ohni, jelikož je pro detailní zachycení těchto jevů zapotřebí velikost buněk pod 1 mm. Proto většina CFD modelů řeší tzv. zprůměrované Reynoldsovy Navier-Stokesovy rovnice (RANS). V rámci modelování požáru se jako zdroj hoření převážně uvažuje návrhový požár, který představuje plocha, ze které se uvolňuje předdefinované množství tepla a spalných produktů. Tato volba zjednodušení je kritická, jelikož matematický popis probíhajících dějů při hoření může být nepřesný (odchýlený od reality) a celkový model tak může být zatížen velkou chybou. [2, 3, 11, 13]

2.3.3 Výpočetní síť

Jak už bylo zmíněno v předchozí kapitole, výpočetní síť se skládá z buněk (kontrolních objemů), kde každá buňka řeší stavové rovnice a rovnice zachování hmoty, energie, chemických látek a hybnosti. Na přesnosti výsledného řešení závisí hustota výpočetní sítě (velikost buněk), ale také možnosti daného softwaru a výkon počítače. S narůstajícím počtem buněk se zvyšuje výpočetní čas a náročnost na software. Proto je hlavním úkolem v modelech CFD vytvořit vhodnou výpočetní síť, která bude poskytovat kvalitní výsledné hodnoty a CFD simulace.

Výpočetní síť může být tvořena různými druhy mnohostěnů, záleží na možnostech daného softwaru, složitosti geometrie a aplikace. Nejčastějšími druhy výpočetní sítě jsou šestistěny, pětistěny a čtyřstěny. Při vytváření sítě je možné užít stejné nebo různé druhy buněk, ale také volit různou jejich velikost. S volbou výpočetní sítě souvisí také možnosti vytváření geometrie v daném softwaru. V každém CFD modelu je nutné, aby všechny objekty zapadaly do výpočetní sítě neboli aby hrany objektů odpovídali hranám jednotlivých buněk. V softwarech CFD, které umožňují tvorbu výpočetní sítě pouze pomocí kvádrů či krychlí, je obtížné modelovat objekty se zakřivenou nebo jinak složitou geometrií. Například modelování šikmé roviny je možné provést pomocí kvádrů či krychlí namodelovaných vedle sebe s různou výškovou úrovní. Pro namodelování požáru v místnosti a zachycení detailních jevů spojených s procesem hoření v plynné fázi je nutné vytvořit výpočetní síť s velikostí buněk menší než 1 mm. Tato podmínka je velmi náročná na výpočetní techniku, neboť u rozsáhlejších objektů s takto hustou výpočetní sítí by si neporadil ani nejvýkonnější počítač. Proto je nutné volit velikost buněk výpočetní sítě na základě určení cíle simulace, tedy kritérií přijatelnosti. K posouzení vrstvy zakouření na únikových cestách je možné užít velikost buňky o hraně několika desítek centimetrů. Kdežto v případě posouzení tvaru a velikosti plamene a jeho přímých účincích na konstrukci je zapotřebí užít velikost buněk pouze v jednotkách centimetrů.

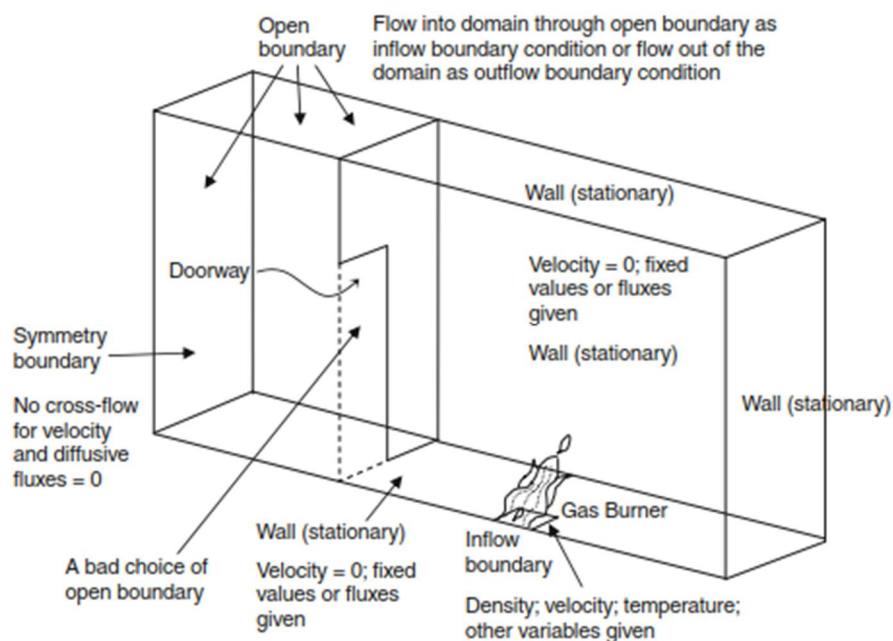
Některé CFD softwary umožňují tvorbu výpočetní sítě automaticky. Dochází ke korelaci, která váže danou velikost požáru k rozměru výpočetní buňky sítě, aby byl požár z hlediska prostorového měřítká co nejlépe numericky aproximován. Tyto korelace jsou odvozeny z empirických vztahů, a proto je nutné provést citlivostní analýzu výpočetní sítě. [2, 3, 11]

2.3.4 Okrajové a počáteční podmínky

CFD modelování je obecně založeno na stejném principu řešení, a proto ho lze aplikovat na široké spektrum problémů v různých odvětvích. Pro modelování konkrétní problematiky jsou modely CFD doplněny dodatečnými modely (tzv. submodely) popisující procesy specifické pro určitý druh odvětví. V případě CFD modelů požáru řešič obsahuje rovnice popisující hmotnost, hybnost a energii, které řídí tok a přenos tepla tekutiny v požárním systému. Tyto procesy jsou poměrně náročné, a proto je v mnoha případech jejich matematický zápis zjednodušen. Zjednodušení zápisu je z důvodu výpočetního času simulace, který závisí právě na velikosti domény, velikosti výpočetních buněk, použitých modelů a mnoha dalších faktorů. Může se stát, že kompletní CFD analýza bude trvat v rámci několika dní či týdnů.

Pro získání konkrétního řešení z řídicích rovnic se v modelu stanovují okrajové a počáteční podmínky. Okrajové podmínky uvádí specifické informace na hranicích výpočetní oblasti, tj. na vstupu, výstupu a stěnách, vyjádřené fyzikálními veličinami. Tyto podmínky se během výpočtu mohou měnit pouze za předpokladu, že jsou předem fixně nastaveny jako časově závislé funkce. Možností, jak zadat okrajové podmínky do modelu je několik. Mohou být zadány jako fyzikální konstanty nebo jako funkce prostorových souřadnic či funkce času ve tvaru lineární, kvadratické, periodické, exponenciální, logaritmické nebo polynomičké funkce.

Při zadávání okrajové podmínky je nutné zvolit optimální typ, jež vyjadřuje účel definované hranice výpočetní oblasti. Následující obrázek znázorňuje schématický popis okrajových podmínek. [2, 13, 14, 17–19]



Obr. 5: Okrajové podmínky pro místnost s požárem [3]

Pro stěny, které představují překážku v podobě pevné stěny, se definuje okrajová podmínka Wall. Pro tuto podmínku platí nulové rychlosti a hustota, teplota a další veličiny jsou stanoveny buď jako konstanty nebo funkce daného toku. Pro otevřené oblasti se definuje okrajová podmínka Open. V tomto případě jsou hustota, teplota a další veličiny obvykle nastaveny podle směru proudění. Je tedy nutné nastavit vstup (přítok) a výstup (odtok) pro proudící tekutinu. Hodnoty definující okolní podmínky se předepisují pro přítok, pro odtok se hodnoty následně extrapolují z protiproudu. Dále je také možné použít okrajovou podmínku symetrie, která urychluje a zpřesňuje výpočet. [3]

Při zadávání okrajové podmínky je možné definovat více typů okrajových podmínek pro jednu výpočetní oblast, avšak nesmí docházet k jejich vzájemnému rušení. Od správně zvoleného typu a kvality okrajové podmínky se odvíjí správnost a čas výpočtu.

Někdy pro upřesnění řešení se využívají kromě okrajových podmínek i počáteční podmínky. Počáteční podmínky charakterizují fyzikální veličiny na počátku řešení. Tyto podmínky plní funkci prvního odhadu výsledného řešení, od kterého se následně odvíjí iterační proces výpočtu. Příkladem toho mohou být hodnoty tlaků, rychlostí a teplot. V případě nezadání počátečních podmínek, model uvažuje s nulovými počátečními hodnotami. Počáteční podmínky se zadávají ve formě fyzikálních konstant. Může se jednat o odhadnuté konstanty na základě předběžných a testovacích výpočtů nebo na základě zkušeností. Rozdíl mezi okrajovými a počátečními podmínkami je, že počáteční podmínky se mění s každým krokem iterace výpočtu.[2, 13, 14, 17–19]

2.3.5 Výpočetní princip CFD modelů

Všechny CFD modely jsou obecně založeny na řešení rovnic proudění tekutin, které jsou tvořeny diferenciálními rovnicemi. Tyto rovnice jsou dále doplněny o algebraické vztahy jako je například stavová rovnice. Řeč je o základních rovnicích řídicí proudění tekutin, známe jako pohybové Navier-Stokesovy rovnice. Jedná se o parciální diferenciální rovnice, které popisují pohyb tekutin. Navier-Stokesovy rovnice jsou odvozeny z druhého Newtonova zákona a lze je uplatnit pro laminární i turbulentní proudění.[11, 13]

Základními rovnicemi řešící tok tekutiny jsou rovnice kontinuity, hybnosti a energie.

Rovnice kontinuity vyjadřuje zachování hmoty v každém bodě tekutiny. Vychází ze zákona o zachování hmoty, který říká, že *“hmota proudící dovnitř a ven za jednotku času se musí rovnat změně hmotnosti v důsledku změny hustoty za jednotku času.”* [13]

Rovnice kontinuity: [13]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = 0 \quad (2.1)$$

Rovnice zachování hybnosti nebo-li Navier-Stokesovy rovnice: [13]

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \\ = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + F_x \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \\ = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + F_y \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \\ = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + F_z \end{aligned} \quad (2.4)$$

Levá strana rovnice uvádí změny hybnosti prvku v prostoru. Pravá strana rovnice uvádí vnější síly, které působí proti elementu na levé straně rovnice. Vnějšími silami se rozumí tlakové síly, viskózní síly zpomalující tok a vnější vektorové síly.[13]

Rovnice zachování energie je odvozena z prvního termodynamického zákona, který říká, že „*rychlost změny energie se rovná čisté rychlosti dodávaného tepla, tepelné rychlosti vykonané práce a rychlosti tepla přidaného či odebraného zdrojem tepla.*“ [3]

Rovnice zachování energie:[13]

$$\begin{aligned} \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \\ = \phi + \frac{\partial}{\partial x} \left[k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k \frac{\partial T}{\partial z} \right] \\ + \left(u \frac{\partial p}{\partial x} + v \frac{\partial p}{\partial y} + w \frac{\partial p}{\partial z} \right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Výše uvedené rovnice představují základ pro řešení proudění tekutiny. Pro řešení dynamiky požáru však obecné rovnice řídící proudění tekutin nestačí a musí být doplněny dílčími modely tzv. submodely. Submodely jsou doplňkové modely, které řeší specifické úlohy v rámci požáru. Základními submodely řešící problematiku požáru jsou modely řešící hoření, přenos tepla a turbulenci. [1, 11]

2.3.5.1 Submodel hoření

Proces hoření je velice složitý děj, který se skládá z chemických a fyzikálních procesů probíhající s vysokou frekvencí. Jedná se o iniciaci, spalování a vyhořívání, které se dějí v prostoru, jehož velikost činí pár milimetrů. Submodely hoření se snaží popsat tyto procesy.

Submodely hoření se dělí na dvě kategorie. První kategorie označována jako „conserved scalar approach“ řeší zachování skalárních veličin v prostoru. Tím je například model zlomku směsi, který uvažuje nekonečnou reakci hoření. Tento model uvažuje pouze s nedokonalým hořením, kdy nejsou palivo a kyslík předem smíchány. Modelem zlomku směsi lze vyjádřit lokální koncentraci paliva, kyslíku a produktů hoření.

Druhou kategorií je model „flamelet combustion model“, který uvažuje s dokonalým hořením. Dokonalé hoření je děj, při kterém jsou palivo a kyslík předem smíchány a vznikají tak laminární difuzní plameny. Z tohoto modelu vychází konečné rychlosti chemických reakcí.

Předpokladem konečných rychlostí chemických reakcí je, že součástí turbulentního pole jsou tenké laminární plameny, kde lokálně nastává hoření. [1, 11]

2.3.5.2 Submodely přenosu tepla

Dalším důležitým submodelem pro popis požáru jsou submodely přenosu tepla, konkrétně přenos tepla sáláním. Sdílení tepla formou vedení a proudění není z matematického hlediska obtížné vyřešit, jelikož každý materiál má své charakteristické vlastnosti definované v závislosti na teplotě. Díky tomu je možné snadno vypočítat vedení v daném materiálu. Pro vyřešení sdílení tepla prouděním se vychází z teploty a tepelné kapacity látky. Nejsložitější formou sdílení tepla je sálání. [1]

Přenos tepla sáláním popisují integrální-diferenciální rovnice, jejichž řešení je obtížné už ve dvourozměrném prostředí. Proto pro řešení radiace se využívají zjednodušené postupy.

Řešení přenosu tepla sáláním je řešeno ve dvou krocích. Zaprvé je nutné vybrat vhodnou metodu pro řešení integrální-diferenciální rovnice. Je možné užít zónové, statistické, exaktní, hybridní modely či modely toků. Zadruhé je nutné stanovit radiační vlastnosti hořlavého systému, které se odvíjí od tlaku, optické hustoty, teploty, vlnové délky a složení. Radiační vlastnosti se mění na základě změny vlnových délek v elektromagnetickém spektru. Pro řešení radiačních vlastností se užívají totální absorpční – emisní modely, široko-pásmové modely a úzkopásmové modely. Přesnost řešení je závislá na šířce pásma. Čím je šířka pásma užší, tím je řešení přesnější. [11]

2.3.5.3 Submodely turbulence

Z hlediska modelování dynamiky požáru je turbulentní proudění další důležitou složkou, která zajišťuje přiblížení se reálnému chování požáru. Turbulentní proudění je v submodelu charakterizováno pomocí vírových struktur. Vírové struktury se v praxi rozdělují na dva typy, pomocí nichž se charakterizují turbulence. Jedná se o struktury v blízkosti stěn a uprostřed proudu. Pro řešení turbulentního proudění s vysokým Reynoldsovým číslem by bylo nutné užít velmi jemnou výpočetní síť s malým časovým krokem, což by vedlo k velice dlouhému výpočetnímu času. Proto je řešení turbulence v modelech zjednodušeno obdobně jako u submodelů přenosu tepla. Provádí se aproximace rovnic, aby se zabránilo přímému řešení každého víru v toku.[11]

K modelování turbulence existují tři způsoby. Prvním ze způsobů je metoda přímé numerické simulace DNS (Direct Numerical Simulation). Tato metoda se spíše využívá z hlediska požární problematiky v oblasti vědy a výzkumu. Vyžaduje rozlišení o velikosti buňky 1 mm, čímž lze zachytit i ty nejmenší procesy a struktury, které jsou přímo počítány. Druhou metodou je metoda velkých vírů LES (Large Eddy Simulation), kterou lze prakticky uplatnit v požárních úlohách CFD oproti první metodě. Metoda LES přímo počítá jen takové vírové struktury, které jsou větší, než je výpočetní síť. U menších vírových struktur je modelování řešeno různými korelacemi. Dá se říci, že je závislá na jemnosti výpočetní sítě. Pokud síť není dostatečně jemná, pak jsou toková pole a tím i dynamika požáru výrazně zkreslena. Poslední metodou numerické simulace je metoda středovaných Navierových-Stokesových rovnic RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes). U této metody nejsou přímo počítány vírové struktury, ale všechny turbulentní struktury jsou modelovány. Jelikož je turbulentní proudění proměnlivé a popisující hodnoty kolísají, metoda RANS pracuje s časově zprůměrovanými hodnotami. Výsledkem je celkový popis veličin v čase. Nevýhodou této metody je, že neumí zachytit okamžité výkyvy,

jako tomu je u metody LES. Metodu RANS lze tedy uplatit v případech, pokud chceme zjistit výšku plamene, ale nelze ji využít v případech, že nás zajímají plamenné výkyvy v čase. [2, 11, 12]

Užívanými modely turbulence v CFD modelech jsou modely k- ϵ , RE k- ϵ , RNG, SST a k- ω . Model k- ϵ je jedním z modelů metody RANS. Tento model je založen na řešení rovnic popisující rozdělení kinetické energie turbulence k a řešící rychlost rozptylování lokální turbulentní kinetické energie ϵ . [11] Model RE k- ϵ je upraveným modelem k- ϵ . Obsahuje upravenou rovnici pro řešení turbulentní viskozity a dále obsahuje novou rovnici popisující rychlost rozptylování, která je odvozena z rovnice fluktuace střední kvadratické vířivosti. [3] Model RNG je podobný modelu k- ϵ , kde transportní k-rovnice se nemění a do rovnice řešící rychlost rozptylování je vložen člen rychlostní deformace. Touto úpravou se model lépe přizpůsobí různým třídám proudění než model k- ϵ . [3] Model k- ω je založen na transportních rovnicích řešící kinetickou energii turbulence k a specifickou rychlost rozptylování ω uvažovanou jako poměr ϵ/k . Model SST je kombinací modelů k- ω a k- ϵ . [20]

2.3.6 Využití v požární bezpečnosti staveb

V požárním inženýrství lze využít CFD modely v oblasti požární bezpečnosti staveb, vyšetřování příčin vzniku požáru a ve vědě a výzkumu. V požární bezpečnosti staveb se CFD modelování využívá k analýze tepelných toků, koncentrace a šíření kouře v budovách pro modelování evakuace, k simulaci rozvoje požáru, vývoji teplot, vlivu požáru na konstrukce a vlivu požárně bezpečnostních zařízení na požár. Užití nemusí být pouze v budovách občanské vybavenosti, lze je využít také u dopravních staveb jako jsou silniční a železniční tunely nebo u průmyslových staveb či rafinérií.

V oblasti vyšetřování příčin vzniku požáru se CFD modely snaží rekonstruovat průběh rozvoje požáru a analyzovat příčiny, které rozvoj a šíření zapříčinily. K sestavení modelu požáru pro rekonstrukci a vyšetřování požáru lze snadněji definovat vstupní parametry oproti modelu pro návrh a posouzení bezpečnosti. Lze vycházet ze svědeckých výpovědí, zpráv ze zásahu či expertizních posudků. V této oblasti CFD modely slouží i jako prostředek k pochopení průběhu požáru, jelikož problematika hoření je vysoce komplexní děj. Je zapotřebí znát problematiku hoření v plynné a pevné fázi, modely musí zahrnovat velké množství materiálů a jejich vlastnosti, vzhled a chování při vystavení tepelným účinkům.

Rekonstrukcí požáru se zabývá instituce NIST (National Institute of Standard and Technology), tedy Národní institut pro normalizaci a technologii. Tato instituce také vyvinula a stále pracuje na zdokonalení CFD programu FDS. Institucí NIST byl rekonstruován například požár budovy na Watts street 62 v březnu 1994 nebo požár suterénního obchodu v červenci 2001.

V oblasti vývoje a výzkumu je možné CFD modely využít jako nástroj pro tvorbu modelů popisujících fyzikální a chemické procesy probíhající při hoření a také k pochopení základů dynamiky požáru. Dále je možné modely využít k přípravě velkorozměrových požárních zkoušek, které jsou velmi finančně nákladné, a zajistit tak menší počet prováděných zkoušek. Dalším využitím je nasimulování scénářů, které nelze experimentálně uskutečnit, ať už z důvodu finančního nebo z hlediska bezpečnosti.

Obecně lze říci, že modely CFD jsou užitečnými nástroji jak v požárním inženýrství, tak v požární vědě. Nutností v CFD modelování je brát zřetel na zadávání vstupních údajů

a matematický popis dějů. CFD model může být kvalitně nastaven, ale s nekvalitními vstupy vyústí v nekvalitní výslednou simulaci. Proto je důraz kladen na odbornou znalost CFD modelů. [2, 11, 21, 22]

2.3.7 Limity CFD modelování

Z hlediska omezení modelování mají své limity jak zónové modely, tak i modely CFD. Co se týče obecně CFD modelování, které je občas považováno za nejpřesnější, má i to své slabé stránky. U modelů CFD se především setkáváme s limity modelování v různých programech tohoto zaměření. Každý CFD program má různé možnosti a omezení z hlediska modelování.

Prvním a nejvýznamnějším limitem CFD modelování jsou požadavky na výpočetní techniku. Některé CFD programy jsou založeny na řešení složitých výpočtů a pro plynulé vykreslování vypočtených hodnot vyžadují výkonný systém, což je pro obvyčejnou výpočetní techniku velmi náročný proces.

Dalším limitem je tvorba výpočetní sítě. Některé CFD modely jsou omezeny tvarem výpočetní sítě, a tedy při řešení zakřivených či zaoblených tvarů dochází k nepřesnostem. Toto omezení limituje řešit například požár v tunelu. Užití těchto modelů pro řešení úloh se zakřivenými nebo zaoblenými tvary je možné pouze pro orientační a zjednodušené výpočty. Omezení v CFD modelech jsou také z hlediska modelování v daném programu, kdy nelze například simulovat výbuch, potlačení požáru nebo únik plynů a mnoho dalších aspektů. [1, 3, 11, 15, 16, 23]

Limitem jsou také komplexní jevy, které vyžadují individuální přístup a je obtížné je prozkoumat v obecné analýze. Omezením je modelování spalování ve větraných podmínkách. Tento jev umí lépe simulovat zónový model. Slabou stránkou je i modelování šíření požáru a vznícení. Pro přesnější výsledky je lepší využít laboratorní metody v plném či malém měřítku. Tato slabá stránka CFD modelování se dále váže k modelování simulace pyrolýzy ve velkém měřítku. Pyrolýza je právě prvním krokem při posuzování šíření požáru v prostoru. Limitem je dále také modelování potlačení požáru vodními nebo plynnými prostředky, které vyžadují použití specifických dílčích modelů, které jsou stále ve vývoji. Dalším limitním bodem je vyšetřování velkého množství scénářů nebo pravděpodobnostní analýzy. [23]

Složitostí CFD modelování jsou požadavky na vysokou pracovní morálku a velké znalosti uživatele, kvůli vysokým nákladům na metodu, dlouhému výpočetnímu času a obtížím při ověřování. U CFD modelování závisí znalosti uživatele na výsledku výpočtu. Chyba, kterou uživatel provede, může vést k opětovné chybě výsledku, která může být přehlédnuta, pokud není spojena s dalšími kroky. Dalším rizikem CFD modelování je používání studie CFD jako potvrzující a nikoli jako návrhová studie. Chyba v CFD modelu se tak přenesení do analýzy projektu, a to může vést ke špatnému výsledku celé analýzy. [23]

3 CFD programy pro modelování požáru

Od doby, kdy byla snaha porozumět a namodelovat průběh požáru, vznikala a dále se vyvíjela řada různých výpočetních programů. Některé programy se během let přestaly vyvíjet a některé úplně zanikly. Zde je v tabulce č. 1 uveden přehled aktuálně dostupných CFD programů pro modelování požáru.

Tab. 1: Přehled CFD programů

Název programu	Popis	Dostupnost	Odkaz
in:Flux	CFD program využitelný u průmyslových objektů a rafinérií. Simulace proudových požárů, požárů kapalin v nádobě. Definiuje koncentraci sazí, tepelné záření, koncentraci paliva a produktů a izoplochy.	Demo verze na 10 dnů po registraci	https://insightnumerics.com/fire-modeling/
FDS	CFD program zaměřený přímo na modelování požáru. Řeší dynamiku a proudění tekutin řízený ohněm. Modelování transportu tepla a kouře prouděním, sáláním a vedením, přestup tepla, pyrolýzy pevné nebo kapalné fáze, proces hoření plynných produktů, šíření plamene a rozvoj požáru, aktivaci tepelných a kouřových detektorů, sprinklerové skrápění a hašení vodou a další.	Dostupné zdarma	https://pages.nist.gov/fds-smv/
CFX – Ansys	CFD program pro všeobecné použití	Dostupné jako studentská verze nebo po získání licence	https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx
SMARTFIRE	CFD program zaměřený na modelování požáru. Lze zkoumat šíření a účinky ohně, kouře a další toxické jevy	Zkušební verze po registraci na 30 dní zdarma	https://fseg.gre.ac.uk/smartfire/
Kameleon FireEx KFX	CFD program pro modelování požáru u průmyslových objektů a rafinérií. Řeší rozptyl těžkých i lehkých plynů, ale i rozvoj požáru jak v uzavřených prostorách, tak i v otevřeném terénu.	Dostupnost pouze po kontaktování distributora	https://www.dnv.com/services/fire-simulation-software-cfd-simulation-kameleon-fireex-kfx-110598
SimFlow	CFD program pro všeobecné použití	Dostupný zdarma v omezené verzi	https://simflow.com/
Fluent – Ansys	CFD program pro všeobecné použití	Dostupné jako studentská verze nebo po získání licence	https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent
Chaos Phoenix	Simulace ohně a kouře	Zkušební verze na 30 dní zdarma	https://www.chaos.com/phoenix

Název programu	Popis	Dostupnost	Odkaz
PHOENICS	<i>CFD program využitelný ve více oblastech. Obsahuje aplikační programy pro různé druhy využití. Simuluje proudění tekutin, přenos tepla, spalování a chemické reakce probíhající v uzavřeném prostoru i ve volném okolí.</i>	<i>Dostupnost pouze po kontaktování distributora</i>	https://www.cham.co.uk/phoenics.php
Fluidyn - PANFIRE	<i>CFD program řešící modelování tepelného záření, následky požáru a zasažené oblasti</i>	<i>Dostupnost pouze po kontaktování distributora</i>	https://www.fluidyn.com/?page_id=1444
FLACS-CFD	<i>CFD program pro řešení požáru u průmyslových objektů a rafinérií. Simuluje rozptyl nebezpečných materiálů, požár a výbuch. Dále je vhodný pro navrhování pasivní ochrany.</i>	<i>Dostupnost po získání licence od distributora</i>	https://www.gexcon.com/2021/09/24/flacs-cfd-21-2-is-now-live/
Kobra-3D	<i>CFD program k obecnému využití modelování požáru. Zaměřený na požáry látek v nádržích, simulace šíření ohně a kouře ve složitých geometriích a více zdrojů požáru v propojených prostorech.</i>	<i>Dostupnost pouze po kontaktování distributora</i>	https://www.istnet.de/kobra-3d/
Flow-3D	<i>CFD program pro všeobecné použití</i>	<i>Dostupnost po kontaktování distributora a obdržení licenčního serveru</i>	https://www.flow3d.com/
Autodesk CFD	<i>CFD program pro všeobecné použití</i>	<i>Dostupné jako studentská verze nebo po získání licence</i>	https://www.autodesk.com/products/cfd/overview

3.1 in:Flux

Program in:Flux je jedním z programů, který umožňuje CFD modelování v oblasti požárního inženýrství. Program dokáže analyzovat scénáře ventilace, požáru a rozptylu plynů v rámci složitých geometrií. V knihovně se nachází databáze kapalin včetně těžkých uhlovodíků. Modelování v programu je z hlediska ovladatelnosti a odborných znalostí v oblasti CFD modelování poměrně snadné. Úkony vyžadující vysokou znalost CFD jsou prováděny automaticky, tj. nastavení výpočetní sítě, okrajové podmínky, kritéria konvergence, numerická nastavení a fyzikální model. Výpočet řešení probíhá automaticky a po dokončení je možné spustit simulaci. Program umožní uživateli provést více simulací, které jsou dostupné v uživatelském rozhraní. Všechny výsledky lze reportovat do obrázkových souborů. [24]

Dostupnost tohoto CFD programu je z webových stránek distributora, kde je možné po registraci si vyzkoušet demo verzi platnou po dobu 10 dnů. Program in:Flux je stále vyvíjen firmou Insight Numerics. [24]

Geometrie: V programu lze vytvářet geometrii modelu, nebo je možné importovat vytvořený model v podporovaném modelovacím programu. Program umožňuje vytvářet i zaoblené či zakřivené tvary. [24]

Knihovna materiálů: Pro definování materiálu in:Flux obsahuje knihovnu s databází různých chemických látek, tj. kapalin a těžkých uhlovodíků. V knihovně jsou popsány i charakteristiky těchto látek. [24]

Výpočetní síť: Pro CFD simulaci program in:Flux vytváří výpočetní síť automaticky na základě analýzy geometrie CAD. Výpočetní síť je tvořena podle geometrie, v některých oblastech může být síť postupně zjemněná. Tento proces program dělá sám bez nutnosti nastavení uživatelem. Dále je síť upravována při spuštění simulace. Tam, kde je oblast s vysokým gradientem, je síť automaticky zjemněná a v opačném případě, v oblasti s velkou jemností, je síť hrubší. Toto upravení hustoty sítě zajišťuje lepší a přesnější výsledky. [24]

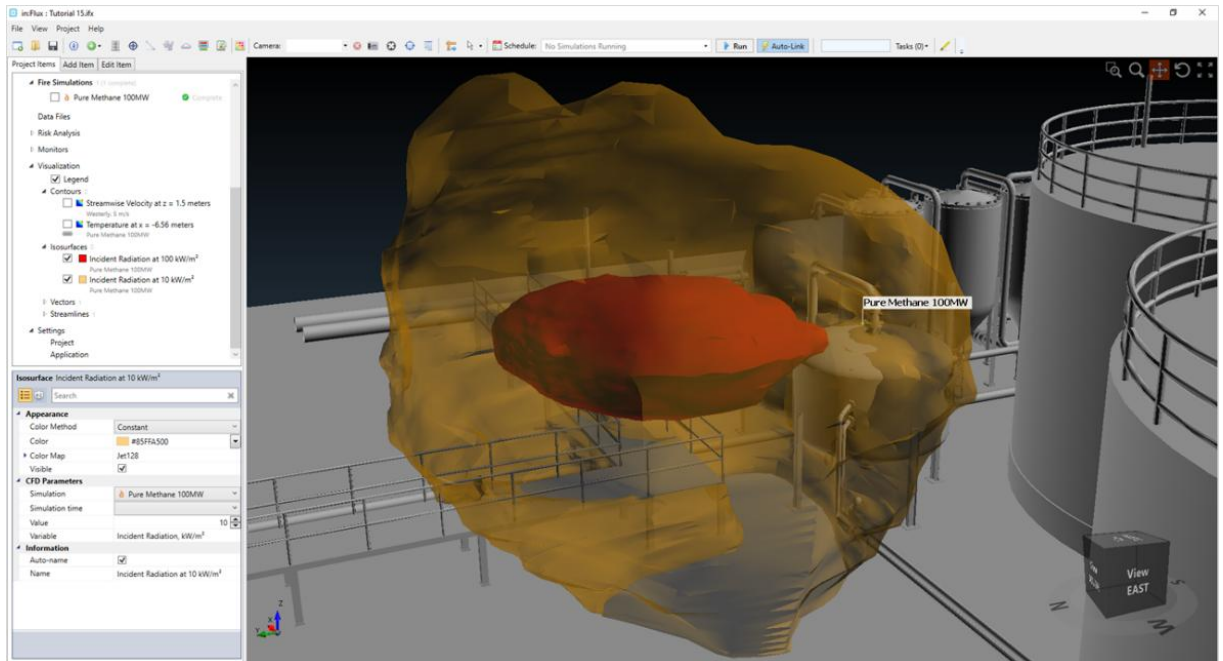
Okrajové podmínky: Okrajové podmínky jsou v programu in:Flux nastavovány automaticky, aby výsledné řešení mělo nejvyšší kvalitu. Veškerá nastavení týkající se okrajových podmínek jsou prováděna na pozadí a od uživatele se tak nic nevyžaduje. Uživatel je nucen pouze zadat požadované rychlosti a směry větru a bodové zdroje. [24]

Turbulence: Program in:Flux užívá pro řešení turbulence model SST (Shear Stress Transport), jenž je využíván v mnoha průmyslových odvětvích. Tento model je založený na konceptu vířivé viskozity. [24]

Výpočet: in:Flux je založený na Navier-Stokesových rovnicích, jež popisují zachování energie, hmoty a hybnosti ve viskózních tekutinách. Na těchto rovnicích jsou postaveny všechny CFD modely, ale liší se v technice řešení a její implementaci. [24]

Výsledné hodnoty: Pro výčet výsledných hodnot se do projektu zadávají monitorovací body a oblasti. Po provedení výpočtu lze zobrazit jakékoli proměnné všech monitorovacích bodů. Monitorovací body umí ukazovat koncentraci plynu pro každý krok simulace rozptylu. Dále poskytují informace o objemu a hmotnosti plynu a lze je využít i k dimenzování oblaku plynu pro explozi. Všechna výsledná data program umožňuje exportovat do Excelu k dalšímu zpracování. [24]

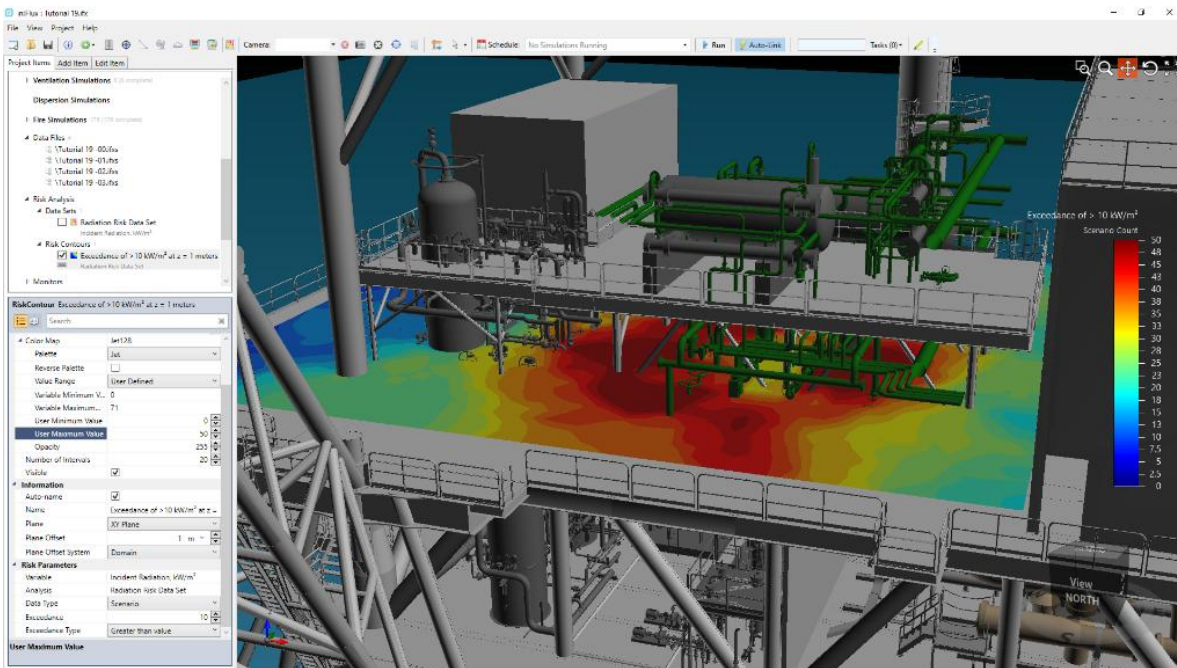
Z hlediska tepelného toku program umožňuje poskytnout údaje o sálavém a konvektivním teple, průměrném a maximálním tepelném toku a teplotě. Tyto informace je možné prohlížet pro definované povrchy. [24]



Obr. 6: Tepelné záření [24]

Podporované programy: Program in:Flux umožňuje propojení s formáty Autodesk AutoCAD® (DXB, DXF), IGES, STEP, OBJ, STL, Navisworks (NWD - přes soubor DWF) a Microstation® (DGN). Po převodu formátu program neprovádí žádné aproximace v geometrii. CAD objekty lze modelovat v programu pomocí 3D rozhraní nebo vytvořit z 2D CAD souborů a obrázků. [24]

Vizualizace: Po dokončení výpočtu program umožňuje vizualizaci výsledků na základě obrysů vytvořených pomocí barevných map Black Body a Kindlmann. Program také umožňuje zobrazovat aktuálně vypočtenou hodnotu. in:Flux zobrazuje dopadající záření, hmotnost, objemové podíly sazí, koncentrace paliva a produktů, obrysové grafy a proudnice. Dále lze v programu zobrazit izoplochy účinků sálání, které lze využít k posouzení tepelného záření na člověka. Program také umožňuje měnit kontury barev teplot v rámci izoploch. Izoplochy jsou také využívány pro objem sazí pomocí proměnné na objemový podíl oxidu uhličitého. Tyto výsledky je možné využít k posouzení dopadu na člověka v rámci evakuace. [24]



Obr. 7: Izoplochy sálání [24]



Obr. 8: Model požáru [24]

Požadavky na systém: [24]

- Microsoft .NET Framework 4.5
- Windows XP SP3 nebo novější (pouze x64)
- **Minimální hardware:** Procesor 2,0 GHz nebo vyšší s 8 GB RAM, integrovaná grafika, 2 GB volného místa na pevném disku.
- **Doporučený hardware:** Procesor 2,5 GHz a 4 procesorová jádra nebo více s 16 GB RAM, 2 GB vyhrazené grafiky, 2 GB volného místa na pevném disku.

3.2 FDS

Program FDS (Fire Dynamics Simulator) je jedním z výpočetních programů CFD, který řeší dynamiku a proudění kapalin řízený ohněm. Jak už vyplývá z názvu, tento program je zaměřený přímo na modelování požáru a dalo by se říci, že je reprezentantem v oblasti požárního CFD modelování. Program FDS je vyvíjen americkou organizací NIST (National Institute of Standards and Technology) už po několik desetiletí, kdy v roce 2000 byla vydána první verze tohoto programu. V dnešní době je dostupná již šestá verze programu. Dostupnost programu je na webových stránkách, kde lze najít instalační balíčky a manuály. Tento program je možné získat zdarma. [1]

V program FDS je možné modelovat transport tepla a kouře prouděním a sáláním, přestup tepla, transport tepla vedením uvnitř pevných povrchů, pyrolýzu pevné nebo kapalné fáze, proces hoření plynných produktů, šíření plamene a rozvoj požáru, aktivaci tepelných a kouřových detektorů, sprinklerové skrápění a hašení vodou a další. [1]

Geometrie: Vytvoření geometrie v FDS je možné pomocí zdrojového kódu, který si každý uživatel musí osvojit. Zdrojový kód obsahuje vstupní data, se kterými program dále pracuje. [1]

Podporované programy: Další možností vytvoření geometrie je převod geometrie s CADu do formátu fds. K tomu slouží nástroj acad2fds, který převede formát dwg na formát typu fds. Pokud jsou objekty v AutoCADu řešeny jako 3D pevné objekty, je možné využít doplňkový nástroj 3dsolid2fds, který tyto objekty převede na formát OBST. [1]

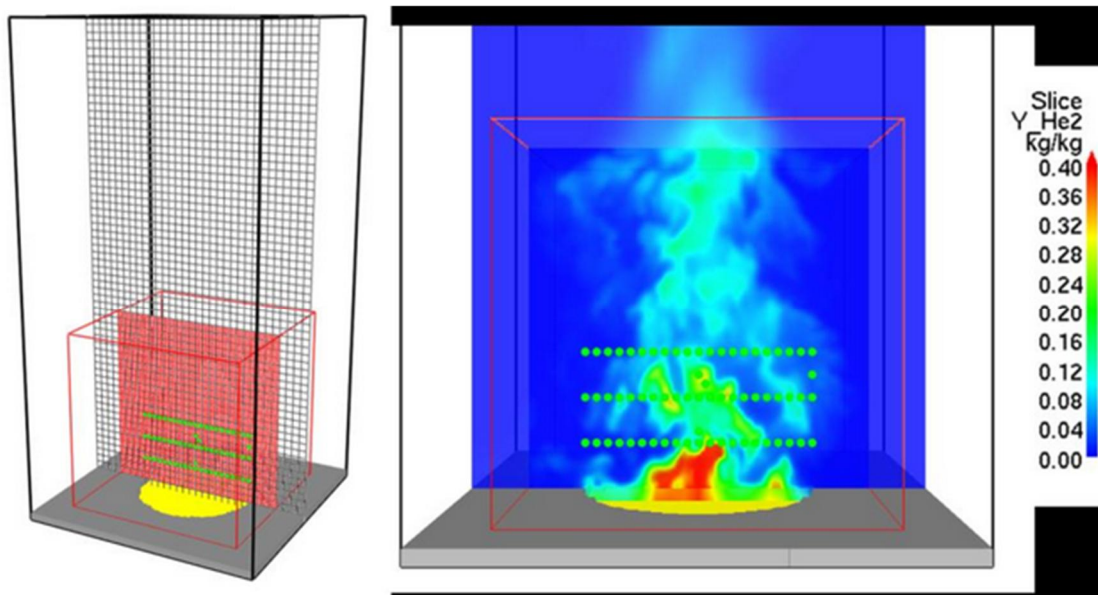
Okrajové podmínky: Okrajové podmínky je v programu nutné nastavit pomocí zdrojového kódu. [1]

Knihovna materiálů: Pro modelování je nutné definovat materiály jednotlivých povrchů v modelu. Samotné FDS neobsahuje knihovnu materiálů a je nutné materiály definovat pomocí tepelně a požárně technických vlastností na základě zdrojového kódu. [1]

Výpočet: Program FDS je založen na řešení Navier-Stokesových rovnic pro nízko rychlostní proudění tekutin způsobené tepelným účinkem. Převážně program řeší problematiku pohybu kouře a tepla. Řešič sloužící pro výpočet je v programu FDS rozdělen do nezávislých submodelů, který pro každou buňku numericky řeší jednotlivé veličiny a jevy, které jsou v něm matematicky popsány. Hlavními a nejdůležitějšími submodely jsou submodely hoření a sdílení tepla. Jelikož FDS řeší rovnice čtením vstupních dat z textového souboru, tzv. zdrojového kódu, je nutné spustit výpočet přes příkazový řádek. Na základě náročnosti výpočtu se odvíjí i čas řešení, který může trvat i několik hodin či dní. Program umožňuje spustit buď jednoduchý, nebo paralelní výpočet. Paralelní výpočet využívá více procesorů, do kterých je rozdělena výpočetní síť, a tím se v některých případech může zkrátit čas řešení. [1]

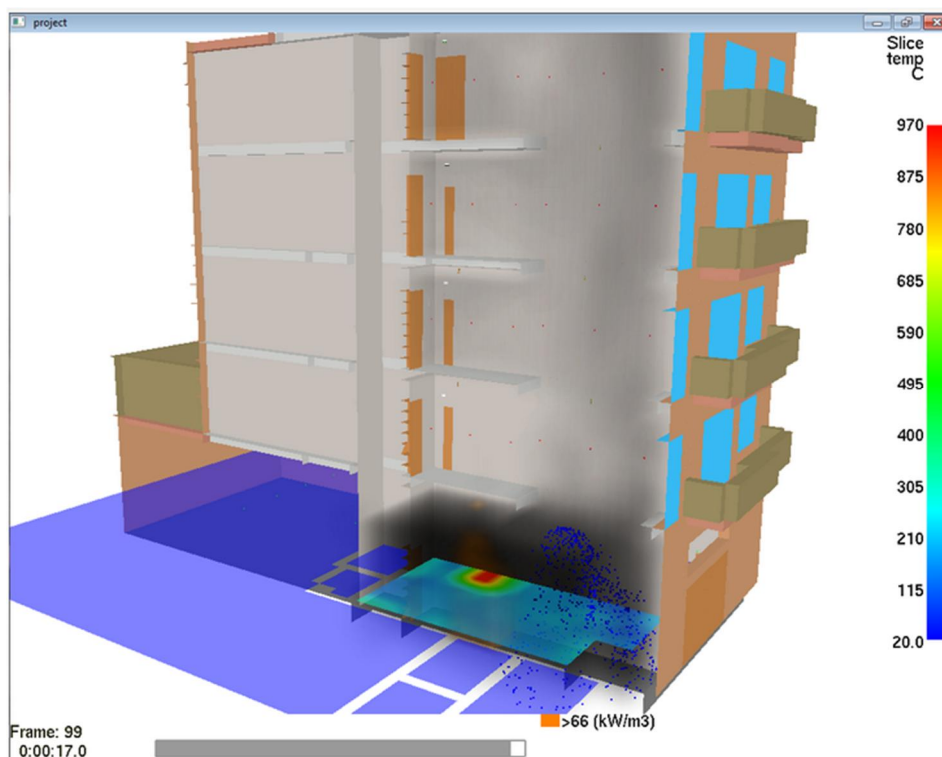
Turbulence: Turbulence je v programu řešena pomocí simulace velkých vírů LES (Large Eddy Simulation). V případě dostatečné jemnosti výpočetní sítě je možné využít pro řešení turbulence metodu přímé numerické simulace DNS (Direct Numerical Simulation). [1]

Výpočetní síť: Pro stanovení výpočetní oblasti je v programu FDS stěžejní nastavit výpočetní síť skládající se z jednotlivých buněk (objemů). Velikost a počet buněk si uživatel volí sám na základě povahy výpočetní úlohy. Výpočetní síť je v programu zadávána pomocí zdrojového kódu. Uživatel může nastavit síť, které se budou překrývat nebo na sebe navazovat či se vůbec nebudou dotýkat. Objekty mimo výpočetní síť program při výpočtu zanedbává. [1]



Obr. 9: Výpočetní síť a simulace [25]

Vizualizace: K simulaci a interpretaci dat výsledků slouží program Smokeview. Tento program je vizualizační a obsahuje jednoduché uživatelské rozhraní, které FDS nemá. Z FDS jsou generovány výsledky pouze v textových souborech. [1]



Obr. 10: Vizualizace kouře ve Smokeview [26]

Pro usnadnění je možné využít programy, které jsou grafickou nadstavbou programu FDS. Ty umožňují vytváření modelu v uživatelském rozhraní a zároveň vytváří zdrojový kód. Jedním z nadstavbových programů FDS je program PyroSim, který umožňuje uživateli tvorbu modelu, zdrojového kódu, spuštění výpočtu, vizualizaci výsledků ve Smokeview a tvorbu grafů.

V PyroSimu jsou předdefinovány knihovny obsahující materiály, povrchy a měřicí přístroje. Tato grafická nadstavba je dostupná pouze jako placená verze. [1]

Požadavky na systém:[1]

- Microsoft Windows, Mac OS, Linux
- **Minimální specifikace PC:** 1 GHz CPU a 1 GB RAM

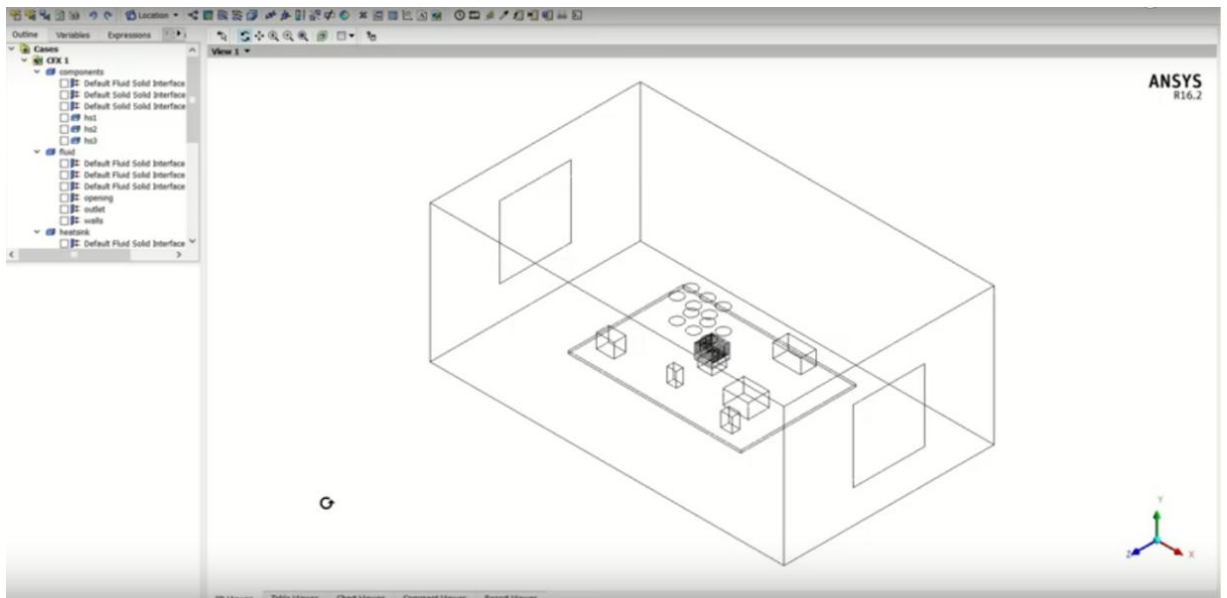
3.3 CFX a Fluent

Programy jsou jedny z aplikací programu Ansys, který umožňuje všeobecné využití v oblasti CFD modelování včetně požárního inženýrství. CFX a Fluent jsou pokročilou technologií s moderním uživatelským rozhraním. Program CFX je navržen tak, aby ho mohl užívat jak projektant s obecnými inženýrskými znalostmi, tak i specialista na dynamiku tekutin, který vyžaduje široké ovládání modelu a možnosti. CFX se využívá především v průmyslových odvětvích pro zlepšení životnosti produktů, zvýšení efektivity a optimalizaci procesů. Program lze využívat při návrhu požárně bezpečnostního řešení. [27]

Program ANSYS Fluent je dalším z aplikací softwaru ANSYS pro modelování proudění tekutin CFD. Využívá ověřeného fyzikálního modelování, které poskytuje spolehlivé a přesné výsledky v nejširším rozsahu CFD. Tak jako CFX obsahuje modely k modelování proudění, turbulence, přenosu tepla, chemických reakcí a spalování. [27]

Dostupnost: Společnost Ansys nabízí zkušební verze programů na dobu 30 dní a dále také poskytuje studentské verze programů. [27]

Geometrie: Programy využívají pro návrh geometrie všechny různé balíčky CAD a tím poskytují jednoduché vytváření modelů pro simulaci. Lze modelovat různé tvary geometrie. [27]



Obr. 11: Geometrie modelu [28]

Výpočetní síť: Výpočetní síť je v programech generována automaticky, ale uživatel si ji může následně změnit. ANSYS Meshing poskytuje spoustu možností pro síťování a uživatel si tam může vybrat tu nejlepší. V programech může mít každý díl různou hustotu výpočetní sítě. Lze také využít nástroj ANSYS ICEM CFD, který umožňuje neomezené úpravy výpočetní sítě a dále strukturované šestistěnné sítě. [27]

Okrajové podmínky: Okrajové podmínky jsou v menší míře u obou programů předdefinovány, ale pro konkrétní řešení se musí do programu zadat. V průběhu zpracování lze okrajové podmínky, ale i jiné parametry upravovat. [27]

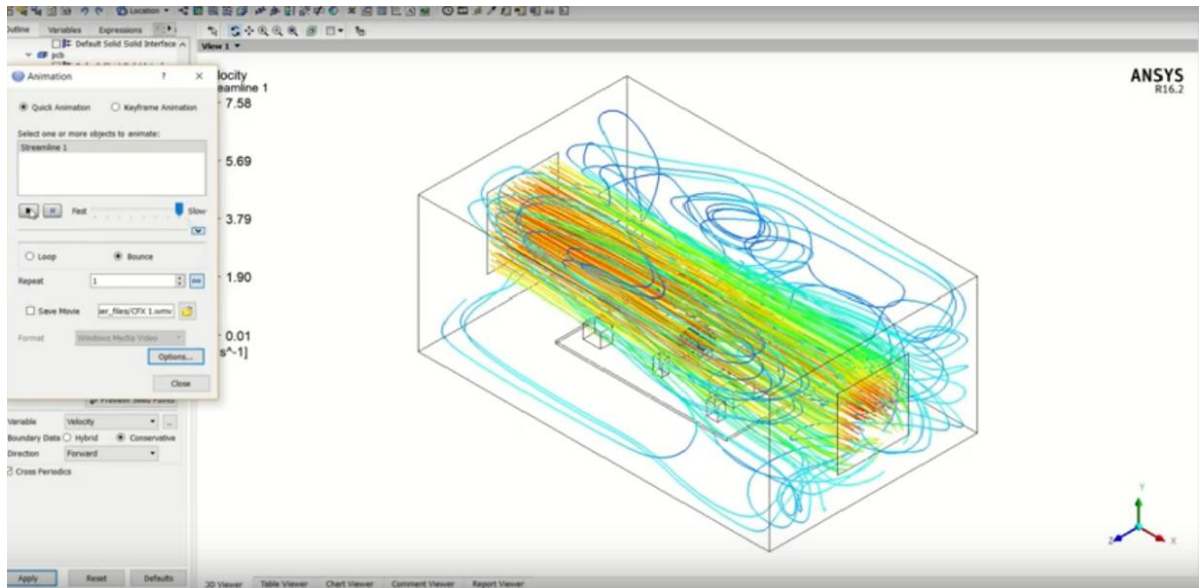
Knihovna materiálů: Oba programy obsahují knihovnu s různými druhy materiálů. V knihovnách jsou obsaženy jak pevné, tak i kapalně látky. V programech lze definovat materiály typu tekutiny, pevné látky, směsi, hořlavé či inertní částice. [27]

Turbulence: Program ANSYS CFX a Fluent využívají inovativní modely pro modelování turbulencí. Program využívá jak běžné modely, jako jsou RANS, SST, LES a DES, tak i rozšířené modely SST, které umí modelovat zakřivení proudění, přechod z laminárního proudění do turbulentního. Dále využívá nový model SAS (Scale-Adaptive Simulation) pro proudění rozlišující měřítko, ve kterém jsou modely turbulence v ustáleném stavu nedostatečné. [27]

Výpočet: Programy jsou založeny na řešení rovnice zachování hmoty a hybnosti, energetické a transportní rovnici. Všechny tyto rovnice jsou definovány pro různé druhy případů. Kromě přenosu energie prouděním tekutiny je v programech zahrnuta schopnost přenosu tepla vedením v pevných látkách. Dále zahrnuje množství modelů pro zachycení všech typů radiační výměny tepla v kapalinách a pevných látkách a mezi nimi. V programech CFX a Fluent jsou dále zahrnuty modely spalování, které slouží jak pro laminární, tak i turbulentní proudění, rychlou nebo pomalou chemickou kinetiku a předem smíšené reaktanty. V programu je pro uživatele dostupná knihovna předdefinovaných chemických reakcí, které lze snadno upravovat a rozšiřovat. Doplnkem jsou modely pro automatické a jiskrové zapalování, tvorbu škodlivin, zhášení plamene a další. [27]

Propojení programů: U programu Ansys je možné geometrii modelu importovat z programů CAD a Solidworks. [27]

Simulace: Oba programy slouží k modelování proudění zahrnující i turbulence, přenosu a vedení tepla, chemických reakcí a spalování. Rozdíl těchto programů je v řešení rovnic. Program CFX je založen na základě výpočtu konečných prvků, kdežto program Fluent řeší rovnice na základě konečných objemů. [27]



Obr. 12: Simulace tepelného proudění [28]

Vizualizace: Výsledné hodnoty je možné zobrazit pomocí iso-ploch a iso-objemů. Dále je možné zobrazit výsledky pro konkrétní bod. V programech je také možné zobrazit proudění, vývoj kouře a teploty. [27]

CFX a Fluent jsou rozšiřujícími balíčky CFD pro rozšíření schopností modelování požáru. Programy jsou určeny k simulaci matematických modelů, založené na principu mechaniky tekutin, termodynamiky, přenosu tepla a přenosu hmoty. [27]

Požadavky na systém: [27]

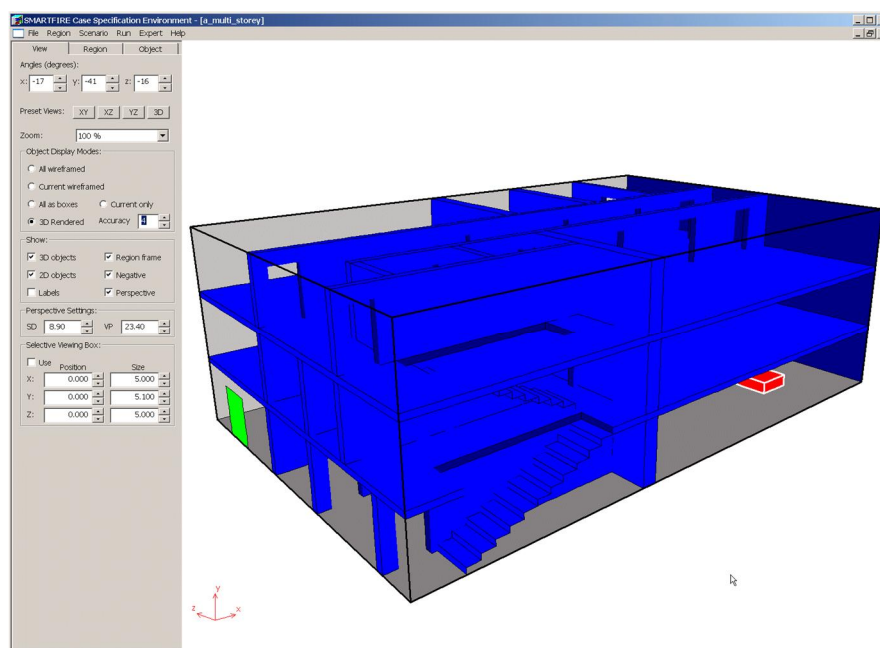
- Využívá 64bitový systém
- Microsoft Windows 10, Linux
- **Minimální specifikace PC:** 8 GB RAM

3.4 SMARTFIRE

Program SMARTFIRE je další z programů v rámci CFD modelování požáru. Byl vyvinut skupinou Fire Safety Engineering Group (FSEG) na univerzitě Greenwich. Program se skládá z pěti klíčových částí – návrhu scénářů, prostředí Case Specification, automatizovaného systému sítě, kódu CFD a prohlížeče dat. V programu jsou zabudovány modely s nakonfigurovanými vlastnostmi (např. materiály, požáry, okrajové podmínky, fyzikální modely), které usnadňují modelování požáru i uživatelům s omezenými znalostmi CFD. Hustotu výpočetní sítě program vhodně uživateli generuje a ten ji následně může měnit. Program podporuje import 2D půdorysů z CAD (DXF) pro vytvoření geometrie budovy. V programu SMARTFIRE lze zkoumat šíření a účinky požáru, kouře a další toxické jevy. Výsledky simulace jsou dostupné ve vizualizačním prostředí DataView. Dostupnost programu je z webových stránek FSEG. K dispozici je možné stáhnout demo verzi SMARTFIRE v 4.3 (2013) po vyplnění formuláře na webových stránkách programu a následném obdržení uživatelského ID a hesla e-mailem. [29, 30]

Knihovna: Pro vytvoření simulačního scénáře slouží model CSE (Case Specification Environment), který poskytuje 3D prostředí pro modelování. V modelu CSE jsou nakonfigurované primární objekty, které je možné využít k účelu vytvoření budov, místností, objektů, zdrojů tepla nebo paliva (požár), ventilace, ale také k vytvoření objektů pro spouštění událostí nebo sledování dat. [29, 30]

Geometrie: Modelová geometrie budovy umožňuje model Scenario Designer, jehož rozhraní je podobné CADu. Tento model umožňuje pracovat ve 2D prostředí ve vrstvách. Dále program obsahuje nástroj „místnost“, který pomáhá definovat v půdorysu jednotlivé místnosti. Po dokončení tvorby geometrie vytvoří SMARTFIRE soubor, který přejde do prostředí CSE, kde se do modelu přidávají další vlastnosti (fyzikální modely, přechodové efekty, detailní konfigurace objektů) a výpočetní síť. Program umožňuje tvorbu pouze pravoúhlých tvarů (síť). [29, 30]

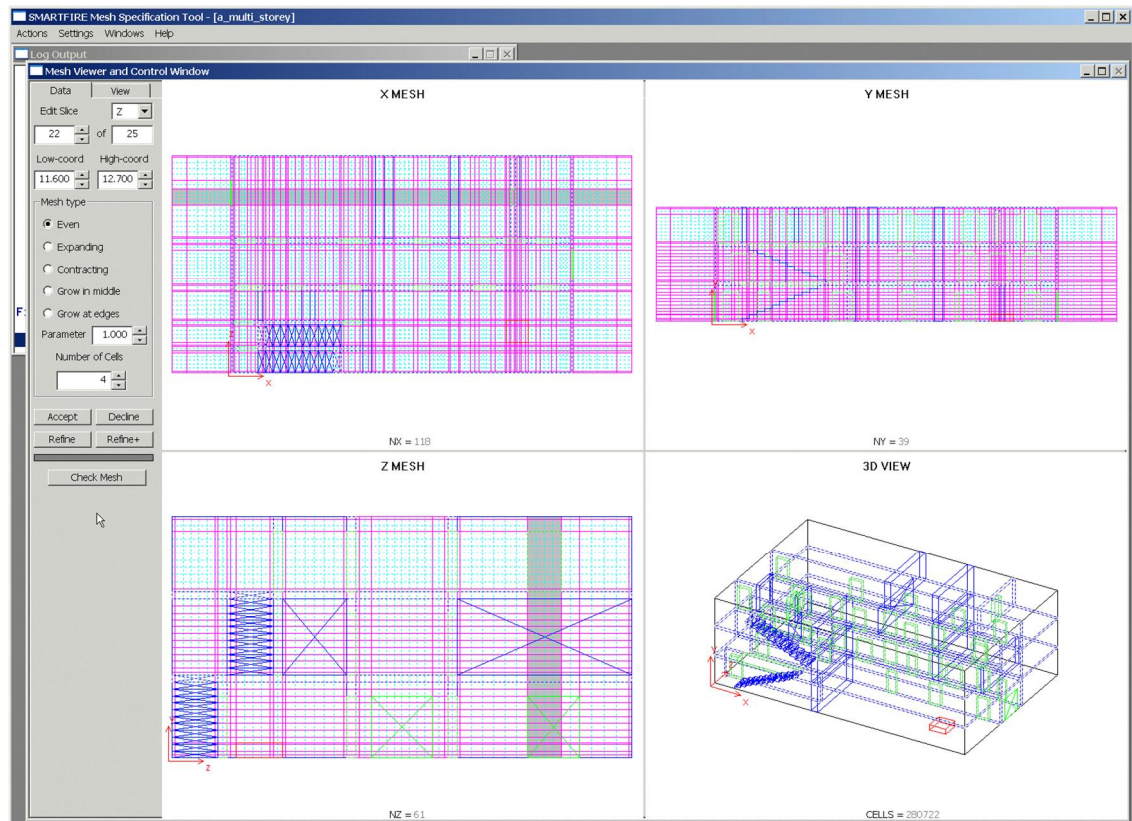


Obr. 13: Geometrie objektu [30]

Podporované programy: Pro tvorbu geometrie lze využít import půdorysů z programu CAD ve formát DXF. [29, 30]

Okrajové podmínky: V programu jsou automaticky nastaveny okrajové podmínky, avšak uživatel je může v případě potřeby upravit. [29, 30]

Výpočetní síť: Další modelem v programu je Interactive Mesh System, který zodpovídá za vytvoření výpočetní sítě na základě kontrolních objemů. Tento nástroj umožňuje generování automatické sítě nebo pro zkušené uživatele umožňuje vytvoření vlastní sítě či případné doladění automaticky vytvořené výpočetní sítě. SMARTFIRE využívá znalosti systému KBS, který analyzuje zadanou geometrii a snaží se propojit scénáře, aby odpovídali scénářům v reálném světě. To pomáhá k vytvoření vhodné výpočetní sítě. [29, 30]

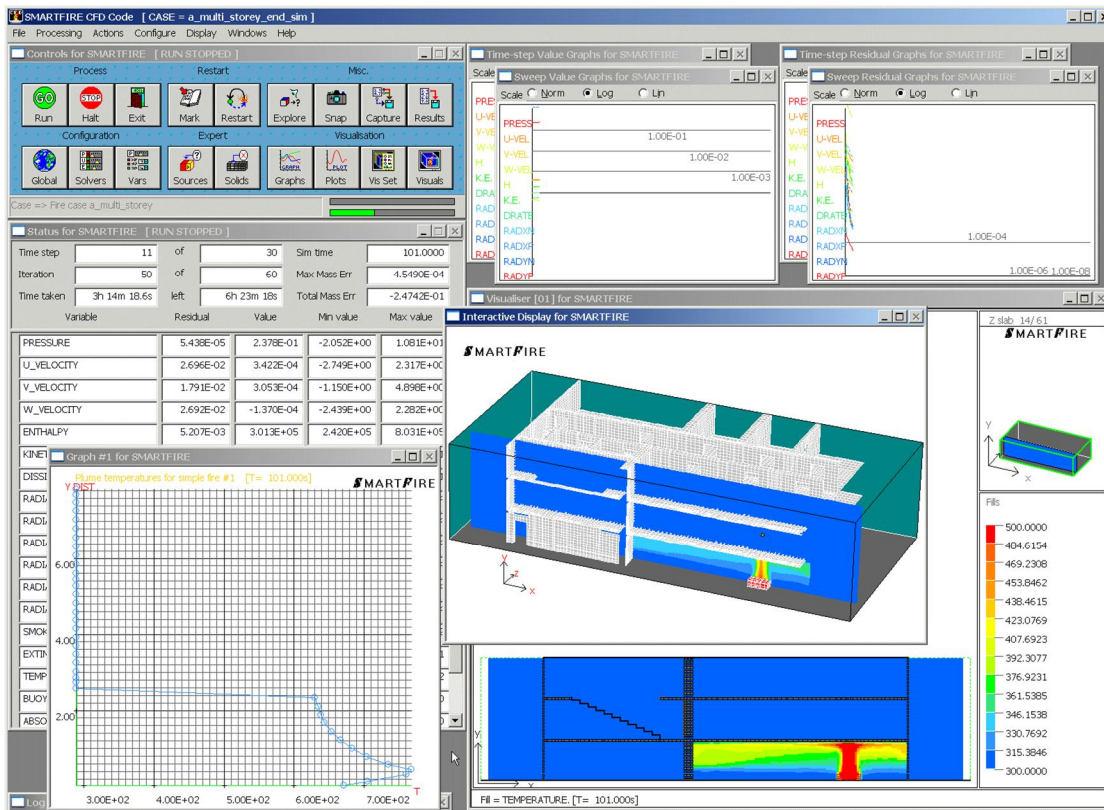


Obr. 14: Výpočetní síť [30]

Výpočet: Program SMARTFIRE k výpočtu využívá trojrozměrné sítě, které tak umožňují síťování složitých geometrií. SMARTFIRE obsahuje modely pro řešení tepelného záření, přenosu tepla stěnami, spalování plynů, modelování kouře, toxicity (CO a CO₂), uvolňování HCL a HCN. SMARTFIRE obsahuje CFD kód, který je založen na rovnicích RANS. [29, 30]

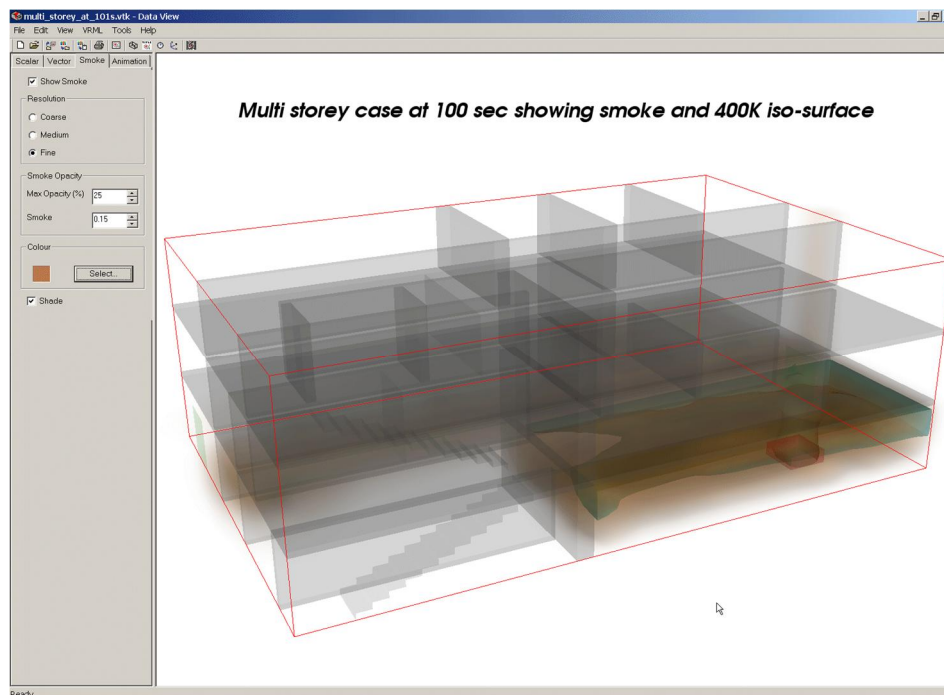
Turbulence: CFD kódu programu jsou turbulence řešeny modelem k-ε s modifikací vztlaku. [29, 30]

Vizualizace: Pro zobrazení simulace a výsledných dat SMARTFIRE využívá program Data-View. Prohlížeč poskytuje různé možnosti pro vizualizaci skalárních a vektorových dat, vizualizaci odhořívání povrchu a zobrazení povrchových teplot. Také je možné využít animaci v časovém úseku. Dále program DataView umožňuje vizualizace exportovat na grafy. [29, 30]



Obr. 15: Výsledné hodnoty [30]

SMARTFIRE dokáže modelovat přechodný a ustálený stav, turbulentní a vztlakové proudění s nucenou nebo přirozenou ventilací (pomocí rovnic k-e), přenos tepla plynným spalováním, tepelné záření, toxicitu, HCN, HCL a sprinklery. Dále umí posuzovat koncentraci kouře pro viditelnost s možností exportu do programu EXODUS sloužící k posouzení evakuace. Program neumí řešit hašení požáru, ale na zavedení této funkce již společnost pracuje. [29, 30]



Obr. 16: Výsledná simulace [30]

Požadavky na systém: [29]

- Využívá 32bitový nebo 64bitový systém
- Microsoft Windows (XP/XP Pro, Vista, 7, 8)
- **Minimální specifikace PC:** P4 3,0 GHz s 1024 MB RAM a 1024x768 XGA.
- **Doporučená minimální specifikace PC:** Intel Core i3 Dual 2,0 GHz (nebo podobný) se 4 GB RAM a 1024x768 XGA

3.5 Kameleon FireEx KFX

Program Kameleon FireEX KFX (zkráceně KFX) je průmyslový CFD model pro simulaci rozptylu těžkých i lehkých plynů, rozvoje požárů a výbuchů ve složitých geometriích (uzavřených prostorách) i v otevřeném terénu. Dále je možné simulovat potlačení požáru pomocí sprinklerových a vodních mlhových systémů. Tento program byl vytvořen norskou společností ComputIT, SINTEF, NTNU. Ve velké míře se program KFX využívá pro průmyslovou analýzu požáru a kouře ropných a plynových instalací. Dostupnost programu je pouze po kontaktování distributora. [31]

Geometrie: Program obsahuje formát CAD, který umožňuje vytváření geometrie v programu či úpravu importované geometrie. [31]

Podporované programy: KFX umožňuje import geometrie z CADu, která je následně automaticky převedena na pevné konstrukce nebo povrchové, popř. objemové pórovitosti, jež jsou využívány modelem KFX. [31]

Okrajové podmínky: Tento parametr není výrobcem zveřejněn.

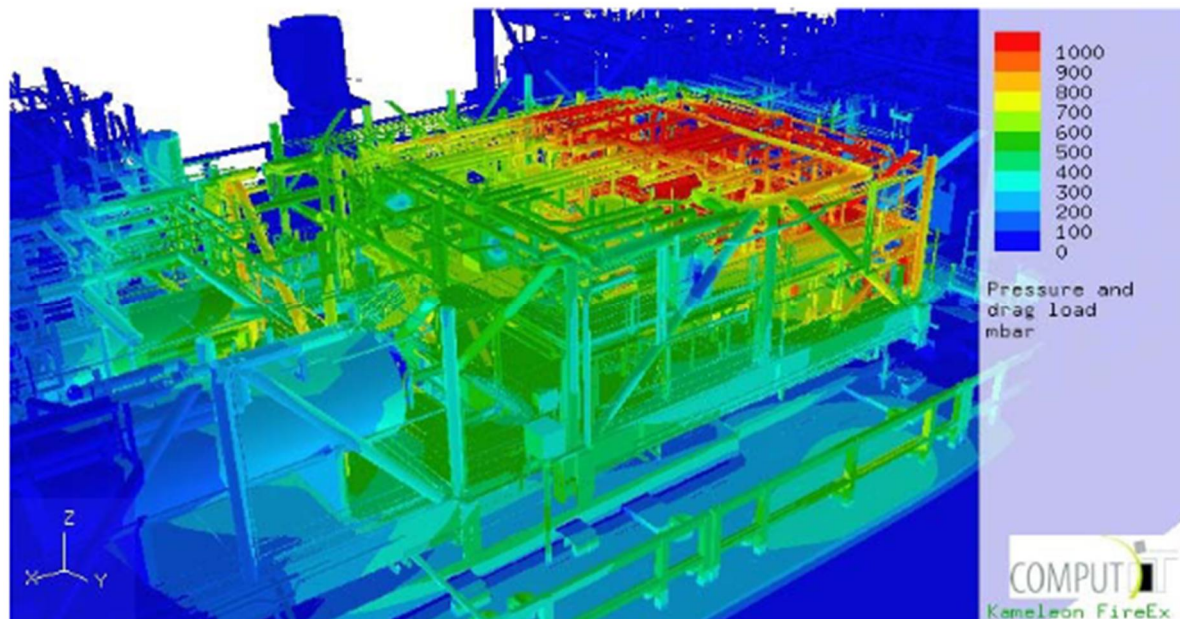
Výpočetní síť: Tento parametr není výrobcem zveřejněn.

Knihovna: Tento parametr není výrobcem zveřejněn.

Výpočet: Program KFX je založen na základě řešení Reynoldsových rovnic pomocí konečných objemů pro nejednotnou kartézskou výpočetní mřížku. Pomocí těchto rovnic lze modelovat trojrozměrné, přechodné, turbulentní proudění. Z výpočtu lze získat teploty, tepelné záření, saze, kouř a koncentraci plynů. KFX je jedním z programů CFD, který umí simulovat zmírňování požáru pomocí vodní mlhy, vodní clony, sprinklery a dalším. K tomu slouží kód konečných prvků FATHS (teplotní odezva) a USFOS (mechanická odezva), který podrobně analyzuje dynamické nelineární strukturální odezvy na požár včetně pasivní požární ochrany. [31]

Turbulence: V programu KFX je zahrnut model EDC, který řeší exotermickou přeměnu v turbulentním proudění. Tento model dále umí vznik a spalování sazí v turbulentním proudění. Turbulence jsou také popsány standardním modelem k- ϵ s rozšířením. [31]

Vizualizace: Program KFX zahrnuje simulaci všech druhů požárů s výpočtem teplot, radiace, koncentrace kouře a jiných toxických plynů. Dále zahrnuje dopad požáru na konstrukce, vyhodnocuje únikové cesty, simuluje a hodnotí potlačení požárů, rozptylu LNG a požáru, požár v podzemních prostorech a tunelech, rozvoj požáru a šíření kouře v budovách, disperzi plynů, spalování a ventilaci a výpočet velikosti výbušných mraků. Také pomáhá s umístěním a optimalizací systémů detekce plynu a požáru. Výsledné vizualizace jsou vykreslovány ve 3D v CAD geometriích. [31]



Obr. 17: Předpokládaný explozivní tlak a zatížení na konstrukci [32]

Požadavky na systém: [31]

- Pracovní systém Unix/Linux, včetně počítačů Intel s operačním systémem Linux
- **Doporučená specifikace:** RAM větší než 2 GB

3.6 SimFlow

Program SimFlow slouží k všeobecnému použití v oblasti CFD modelování. Vytvořila ho skupina inženýrů, jež první verzi SimFlow vydala v roce 2013. SimFlow umí simulovat proudění tekutin, turbulentní proudění, přenos tepla, vícefázové toky, chemické reakce, spalování a záření. V programu lze vytvářet i importovat výpočetní síť, definovat okrajové podmínky, parametrizovat případy a spouštět simulaci pomocí ParaView.. Program lze zdarma stáhnout na webových stránkách distributora nebo po kontaktování lze získat komerční verzi s licenci na rok. [33]

Geometrie: V programu je možné vytvářet či upravovat importovanou geometrii. [33]

Podporované programy: Program umožňuje import geometrie vytvořené v jiném modelovacím programu. Geometrii lze do programu SimFlow importovat ve formátu STL, OBJ, STEP, IGES, BREP. [33]

Výpočetní síť: Program umožňuje tvorbu vlastní sítě, případně automaticky vygeneruje výpočetní síť, kterou je možné následně upravit. Procesy lze modelovat pomocí stacionárních nebo rotačních referenčních soustavách nebo pomocí dynamické sítě. [33]

Okrajové podmínky: Okrajové podmínky je nutné v programu zadat. [33]

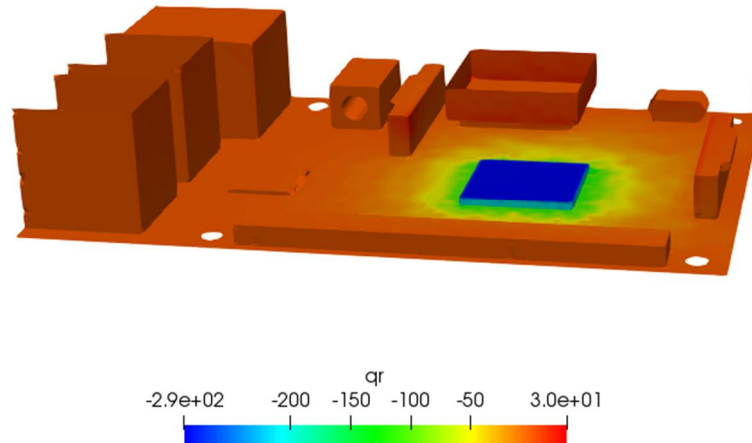
Knihovna materiálů: Při modelování je možné v programu využít knihovnu materiálů s definovanými vlastnostmi, které je možné následně upravovat. [33]

Výpočet: Pro výpočet SimFlow používá metodu PISO, metodu pro tlakově spojené rovnice SIMPLE či metodu kombinovaného algoritmu PIMPLE. Tyto algoritmy řeší rovnice zachování

hmoty a hybnosti. Pro ustálený stav se využívá metoda SIMPLE a pro přechodný stav metoda PISO a PIMPLE. [33]

Turbulence: Pro modelování turbulence jsou k dispozici modely laminární, LES a RANS, které jsou dále doplněny dalšími doplňujícími modely. [33]

Vizualizace: Simulaci je možné zobrazit pomocí ParaView nebo je nutné pro zobrazení výsledků použít jiný podporovaný program. Výsledky v ParaView jsou zobrazovány pomocí tepelných obrysů. [33]



Obr. 18: Radiační tepelný tok [33]

Požadavky na systém: [33]

- Využívá 64bitový systém
- Microsoft Windows (7-11, Server 2012, 2008, 2003), Linux (jádro 2.6.16, glibc 2.17, NPTL 2.4 nebo vyšší)
- **Minimální specifikace PC:** 2 GB RAM, místo na pevném disku 1 GB
- Připojení k internetu

3.8 Phoenics/FLAIR

Program PHOENICS spolu s programem FLAIR tvoří softwarový balík CFD pro modely požáru. Program je zaměřený na simulaci proudění tekutin, přenos tepla, spalování a chemické reakce probíhající v uzavřeném prostoru i ve volném okolí. Aplikace FLAIR umožňuje funkci importu a opravy CAD. V databázi knihovny lze najít předměty, jako jsou ventilátory, sprinklery a různé typy vybavení. Aplikace zahrnuje vytápění, větrání, klimatizaci, nebezpečí požáru a kouře, uvolňování chemikálií a šíření znečištění a zatížení konstrukcí větrem. Program PHOENICS vyvinula společnost CHAM, která byla založena už v roce 1974. Dostupnost tohoto programu je po kontaktování distributora. Je možné získat měsíční, roční nebo trvalou licenci. Program se stále vyvíjí. [34]

Geometrie: Pro tvorbu geometrie lze v programu využít objekty z předdefinované knihovny (jako např. ventilátory, osoby, bloky, otvory a další) nebo ji vytvořit pomocí sítě. [34]

Podporované programy: Geometrii lze i do programu importovat z CADu. Program podporuje různé formáty geometrie, jako jsou STL, 3DS, WRL, DW, AC, DXF a IV. [34]

Výpočetní síť: Program Phoenics obsahuje tři typy mřížek. Kartézská mřížka se skládá ze šestihranných obdélníkových prvků, kde všechny čáry jsou rovné. Válcovo-polární mřížka se skládá ze šestihranných prstencových prvků, kde ve směru x je úhel, ve směru y poloměr a ve směru z je osa. Poslední mřížka se nazývá Body-Fitted (BFC), která se skládá z topologicky šestihranných prvků s libovolně umístěnými rohy. Pro řešení příkladu si může uživatel vybrat, s jakou mřížkou bude pracovat. [34]

Výpočetní síť program generuje automaticky, avšak je vhodné síť zkontrolovat. Síť může být v některých místech příliš hrubá nebo naopak moc jemná a bude nutné ji upravit. Phoenics tuto možnost opravy umožňuje. [34]

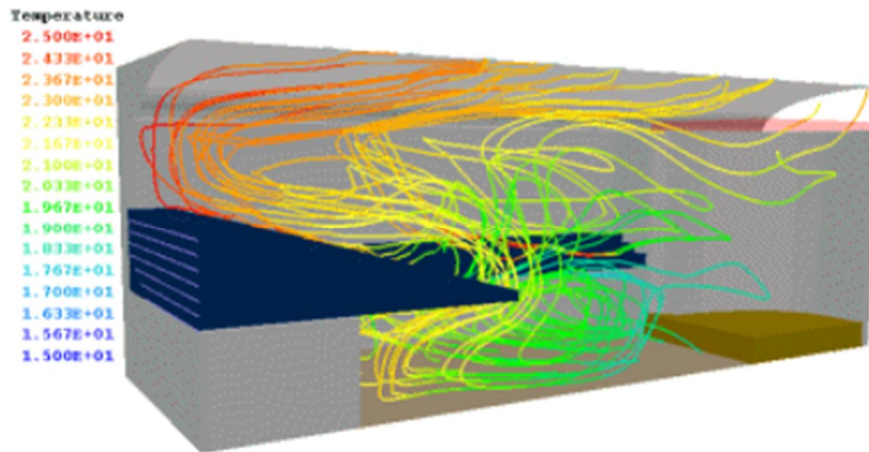
Knihovna materiálů: V databázi knihovny jsou předdefinované různé materiály, které lze použít na objekty, místnosti, budovy a vybavení. V případě že se v knihovně nenachází vhodný materiál pro daný příklad, lze do databáze přidat nový. [34]

Okrajové podmínky: Program obsahuje zdroje tepla, přívod, odvod a další okrajové podmínky. Některé geometrické prvky případně objekty mohou být spojeny s okrajovými podmínkami a tím jsou nezávislé na výpočetní síti. Pokud uživatel nenajde vhodné okrajové podmínky pro svůj scénář, je možné okrajové podmínky nastavit nebo je popsat matematickým vzorcem. [34]

Výpočet: Program Phoenics/Flair je založen na řešení rovnic rovnováhy, které zahrnují zachování hmoty, hybnosti v každé ose a uchování energie. Tyto rovnice program řeší na základě konečných objemů. [34]

Turbulence: Program Phoenics využívá k modelování turbulence velkou řadu modelů. Jedná se o modely DNS, LES, model $k-\epsilon$ a další. [34]

Vizualizace: Výsledkem řešení je makro pro animaci a možné grafické zobrazení výsledků, při kterých lze zobrazit izopovrchy, vektory rychlostí, proudnice, obrysy tlaku, teploty, koncentrace kouře, relativní vlhkosti a parametry tepelné pohody. Všechny výsledky lze z programu exportovat. [34]



Obr. 19: Vypočítané rozložení teplot v Hackney Town Hall [34]

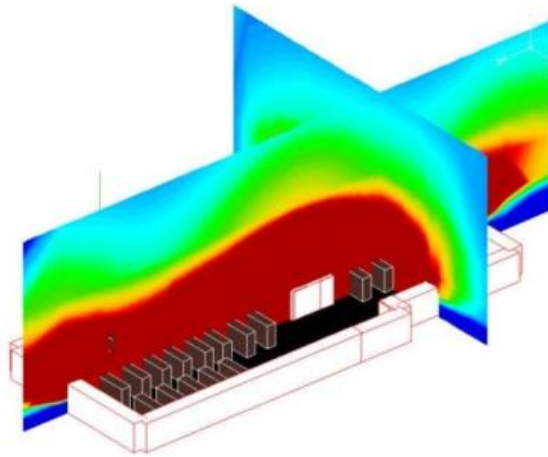
Požadavky na systém: [34]

- Využívá 32bitový nebo 64bitový systém
- Microsoft Windows (7-10, Server)
- **Minimální specifikace PC:** 8 GB RAM, místo na pevném disku 10 GB, 1024x768 pixelů

3.9 Fluidyn-PANFIRE

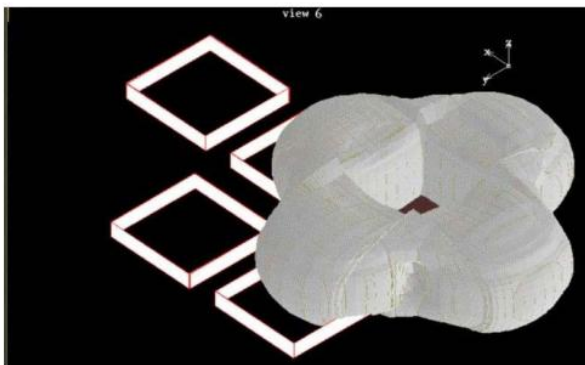
Program Fluidyn-PANFIRE je trojrozměrný simulační software zabývající se CFD modelování v oblasti požárního inženýrství. Program vyvinula společnost TRANSOFT International. Slouží k modelování tepelného záření a následnému vyhodnocení následků sálání požáru zasažených oblastí. Fluidyn-PANFIRE umí řešit havarijní scénáře ve složitých geometriích, tj. nádrže, regály, velkoobjemové požáry, sklady, parkoviště, požáry budov atd. Dále 3D model bere v úvahu skladovací charakteristiky, topografii, požární stěny, sprinklery a překážky. Výpočetní nástroj hodnotí geometrii plamene a rychlost uvolňování tepla. Program obsahuje několik modelů pro výpočet tepelných toků, aby bylo možné namodelovat různé požární scénáře. Výsledkem je simulace tepelného sálání, která poskytuje přesné vyhodnocení následků požáru v okolí. Dostupnost programu je pouze po kontaktování distributora. [35, 36]

Modelování v programu: Modelování požárního scénáře probíhá v jedné fázi. Je zapotřebí definovat umístění předmětů v daném prostoru (např. umístění skladů), charakteristiky materiálů (tj. uskladněných materiálů), dále nastavit vlastnost protipožárních stěn, které jsou požárně dělící a přítomnost sprinklerů, popř. i topografii. Pro nadefinování charakteristik materiálů je k dispozici knihovna obsahující databázi jednotlivých charakteristik materiálů, které lze upravovat. [35, 36]

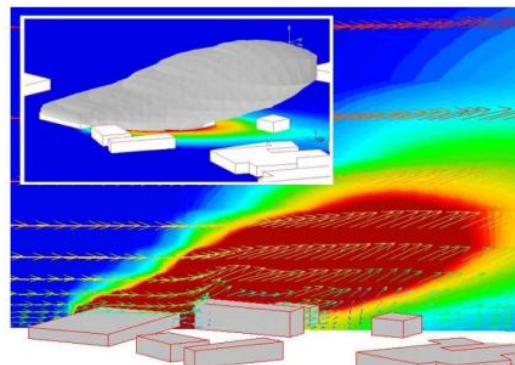


Obr. 20: 3D pohled na tepelné toky [36]

Vizualizace: Výsledkem je simulace tepelných toků, které jsou prezentovány v grafické podobě. Tepelné toky jsou vyobrazeny pomocí rizikových zón v podobě 5 kW/m^2 , 10 kW/m^2 , 15 kW/m^2 , $18,5 \text{ kW/m}^2$. Dále je možné zobrazit izoplochy, izokontury a řezy ve třech rovinách prostoru. Tyto funkce slouží pro možnost definování nebezpečných zón a jejich vyhodnocení. Výsledky je možné propojit s programem Fluidyn-PANACHE, který je další aplikací z řady programu Fluidyn, a využít v něm aplikaci PANEPR pro modelování rozptylu toxických, hořlavých plynů a produktů požáru. [35, 36]



Izoplocha tepelných toků v prostoru



Rozptyl spalin díky fluidyn-PANEPR

Obr. 21: Vizualizace výsledků [36]

3.10 FLACS-CFD

Program FLACS-CFD, jak už vyplývá z názvu, je nástroj pro výpočet dynamiky tekutin. Program simuluje rozptyl hořlavých nebo toxických plynů, výbuchy plynu a prachu, šíření tlakových a rázových vln a požáry. Tento program se především využívá v průmyslu pro hodnocení důsledků havarijních scénářů, ke kterým může dojít, a pro optimalizaci návrhu procesních zařízení a bezpečnostních opatření. FLACS-CFD umí pracovat se složitými, rozsáhlými a trojrozměrnými geometriemi. Výsledkem je 3D simulace ve vysoké kvalitě. Program je dostupný na webových stránkách společnosti GEXCON, jež program vyvíjí. [37]

Turbulence: Program FLACS-CFD využívá pro modelování turbulence modely založené na rovnicích Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) jako například model k- ϵ . Tyto modely jsou doplněny modely podsítě, které zohledňují vliv objektů. Dále jsou modely propojeny s modely pro chemické reakce, aby bylo možné modelovat reaktivní turbulentní proudění. [37]

Výpočet: Program je založen na trojrozměrném CFD kódu, který výpočet rovnic pro hmotnost, hybnost, entalpii, turbulentní kinetickou energii a její rychlosti provádí na kartézské mřížce pomocí konečných objemů. [37]

Geometrie: Program pro vytvoření geometrie využívá jednoduché geometrické tvary, které byly rozsáhle ověřeny. Geometrickými tvary jsou krychle, kvádr, válec, elipsoidy, obecný komolý kužel (GTC) a konvexní mnohostěny (PC8). [37]

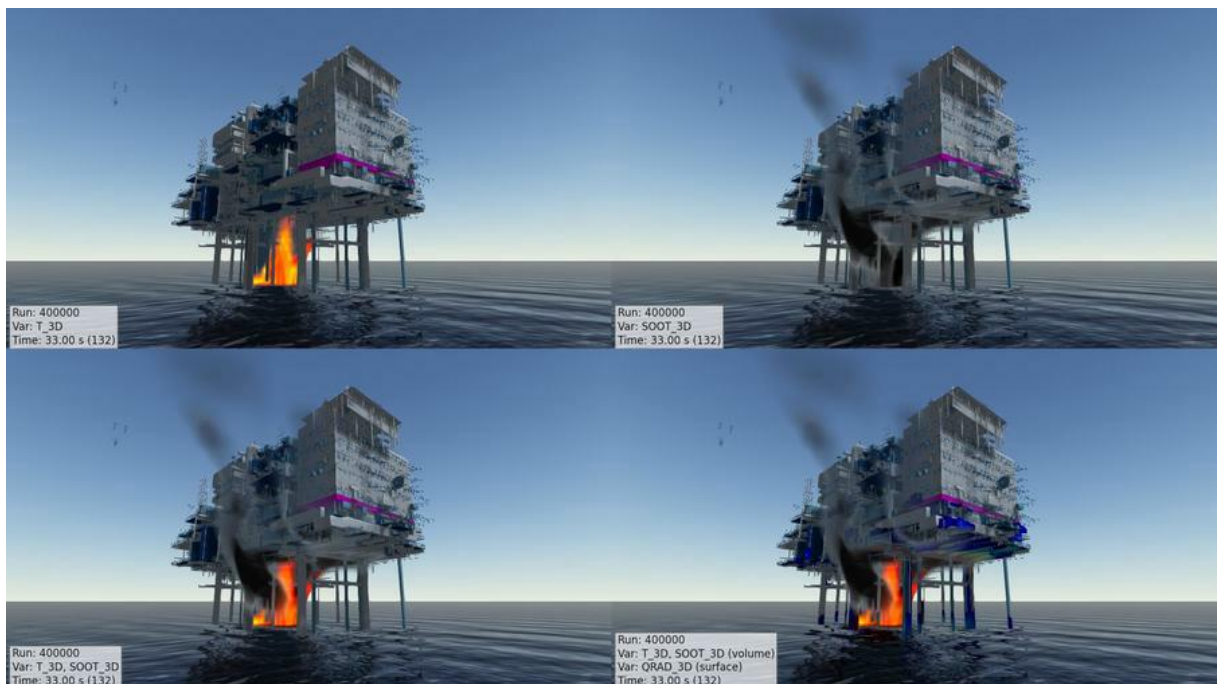
Podporované programy: Geometrii lze importovat z CAD ve formátu DWG, DGN a RVM. [37]

Okrajové podmínky: Okrajové podmínky je nutné v programu nastavit. [37]

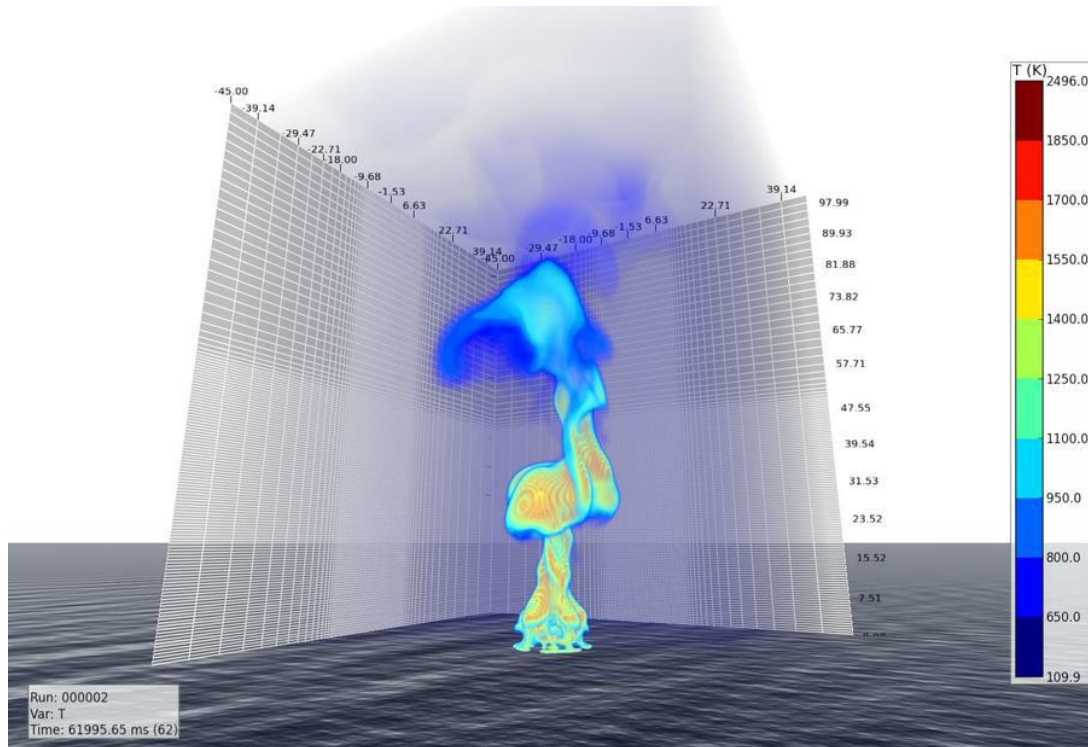
Knihovna materiálů: V programu jsou předdefinovány vlastnosti vybraných materiálů. V případě, že uživatel nenajde potřebný materiál, je nutné tento materiál vytvořit. [37]

Výpočetní síť: V programu FLACS-CFD se výpočetní síť skládá z krychlových či obdélníkových buněk mřížky. Využívána je kartézská mřížka, která neumožňuje použití sítě na zakřivené nebo nakloněné objekty. Zakřivené nebo nakloněné objekty je nutné modelovat pomocí stupňovitých stěn. Výpočetní síť je programem automaticky generována a lze její rozlišení měnit v kterémkoli směru. [37]

Vizualizace: Program FLACS-CFD obsahuje přídatný balíček FLACS-FIRE, který umožňuje simulaci proudových požárů a požárů kapalin v nádobách. Ten může sloužit k vyhodnocení dopadu záření, kouře a viditelnosti. Dále program umí simulovat rozptyl nebezpečných látek a výbuch. Na základě databáze DIPPR modeluje uvolňování hořlavých a toxických látek. [37]



Obr. 22: Simulace požáru plošiny na moři [37]



Obr. 23: Vizualizace teploty při hoření kapaliny [37]

Požadavky na systém: [37]

- Vyžaduje 64bitový systém
- Microsoft Windows (8.1,10), Linux
- **Minimální specifikace PC:** RAM 2 GB, HDD 100 GB, grafická karta 2 GB

3.11 KOBRA-3D

Program KOBRA-3D je další software CFD pro modelování požáru. Program byl vyvinut na základě německo-norského výzkumného projektu pro studium požárů v uzavřených uhlovodíkových nádržích. KOBRA-3D dále umí simulovat šíření ohně a kouře ve složitých geometriích i více zdrojů požáru v propojených prostorech. [38]

Geometrie: Tento parametr není výrobcem zveřejněn.

Podporované programy: Tento parametr není výrobcem zveřejněn.

Výpočetní síť: Program si výpočetní síť generuje automaticky. Ke snadnějšímu vygenerování sítě slouží pomocné funkce definované v materiálové databázi. [38]

Okrajové podmínky: Okrajové podmínky jsou součástí materiálové databáze. [38]

Knihovna: Program pro modelování scénářů využívá 2D a 3D vizualizační nástroje a materiálovou databázi s pomocnými funkcemi, které pomáhají s vygenerováním výpočetní sítě a definováním dalších požadovaných výpočetních parametrů. [38]

Výpočet: Program využívá algoritmus SIMPLE, analýzu přenosu tepla, modelování plamene, odezvu detektoru a interakci sprinkleru. Výpočet je založen na trojrozměrných

hydrodynamických diferenciálních rovnicích pro zachování hmoty, energie a hybnosti. Výpočet zohledňuje radiační účinky, šíření požáru, druhotné vznícení, časově závislé otevírání a zavírání dveří a oken, šíření zplodin hoření a kouře. Pro možnost druhotného vznícení instalovaných prvků (ocelové nosníky, sloupy, nábytek, skladovaný materiál atd.) jsou vypočteny povrchové teploty těchto prvků. Kobra-3D také počítá s rychlostí spalování a uvolňování tepla a tvorbou škodlivých produktů spalováním (oxidu uhelnatého, oxidu uhličitého nebo kouře). Dále program obsahuje model, který počítá s přenosem tepla ze zóny hoření a vrstvy hořlavých plynů. Tento výpočet umožňuje prezentovat ochlazování prostoru požáru, kterým jsou ovlivněny podmínky proudění a tím i použití sprinklerů. [38]

Turbulence: Pro řešení turbulence program Kobra-3D využívá model LES. [38]

Vizualizace: Výsledky řešení udávají rozložení teploty, tlaky, hustoty, složky rychlosti, optickou hustotu kouře a koncentraci kouře a látek, proudové pole a viditelnost. Tyto výsledky lze zobrazit graficky v podobě vrstevnic, barevných map nebo vektorových grafů. Výsledné hodnoty lze exportovat z programu pro další analýzu. Dostupnost tohoto programu je pouze po kontaktování distributora.[38]

Požadavky na systém: [38]

- Microsoft Windows (2000/NT/XP, Vista)
- **Doporučená minimální specifikace PC:** 10 MB místa na disku, 256 MB RAM

3.12 Flow-3D

Program Flow-3D je kompletní a všestrannou CFD simulační platformou pro zkoumání dynamického chování kapalin a plynů v široké řadě průmyslových aplikací a fyzikálních procesů. Tento software lze i využít pro modelování požáru. Program Flow-3D se využívá v různých průmyslových odvětvích ať už je to v oblasti biomedicínských zařízení, vodní infrastruktury, letectví, spotřebního zboží, laserového svařování, automobilového průmyslu a energetiky. Program umí řešit elasticko-plastické deformace, pórovitost materiálů, vývoj tepelného napětí na bázi konečných prvků v důsledku tepelných změn, spalování pevných částí a další. Dostupnost tohoto programu je po kontaktování distributora a obdržení licenčního serveru. [39]

Výpočetní síť: Výpočetní síť je založena na výpočtu konečných rozdílů nebo kontrolního objemu pro kapalně a tepelně roztoky. Pro analýzu lze využít síť konečných prvků v kartézských nebo cylindrických souřadnicích. Výpočetní síť se umí přizpůsobit libovolnému tvaru a lze ji upravovat. Program před spuštěním výpočtu provede kontrolu výpočetní sítě. [39]

Geometrie: Program Flow-3D obsahuje soubor Solids Modeler pro vytváření geometrie. Tento balíček umožňuje modelování trojrozměrné geometrie. Dále v programu lze využít kartézské nebo cylindrické souřadnice. [39]

Podporované programy: Program umožňuje import dat CAD a import nebo export sítí konečných prvků ve formátu Exodus-II. Mřížka a geometrie jsou nezávislé. [39]

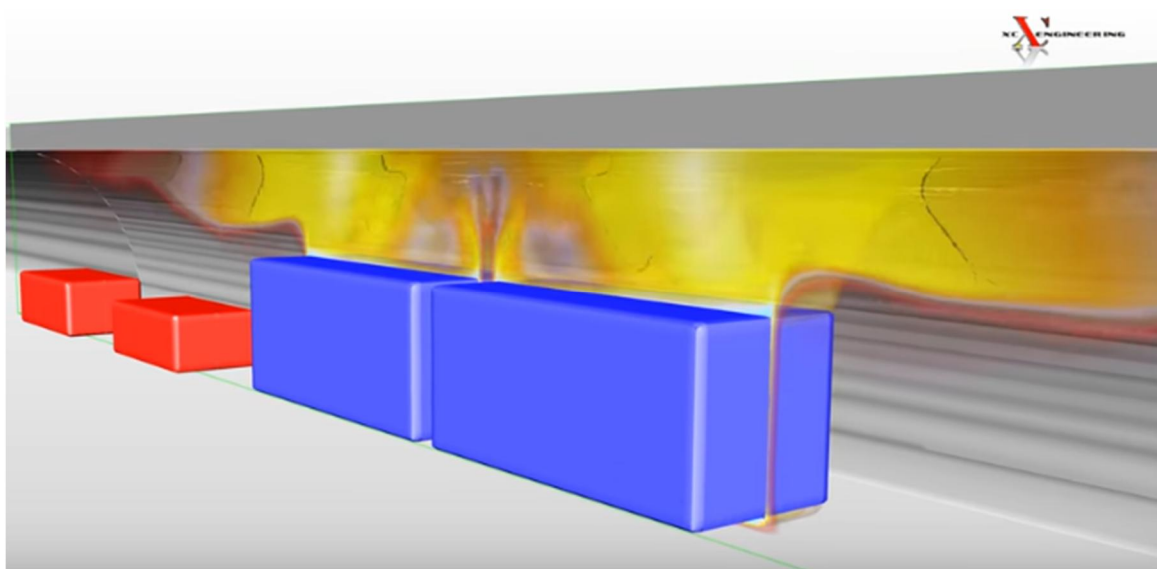
Knihovna: Program obsahuje knihovnu objektů, do které je možné vkládat další objekty. [39]

Okrajové podmínky: Okrajové podmínky je nutné v programu definovat. [39]

Výpočet: Řešení programu je založeno na nelineárních, přechodných diferenciálních rovnicích druhého řádu. Jako všechny CFD programy je i program Flow-3D popsán pohybovými rovnicemi. Flow-3D řeší různé typy toků v podobě vnitřních, vnějších a volných povrchových toků, které řeší ve 3D, 2D nebo 1D zobrazení. Počítá s dvoufázovými toky a přenosem tepla se změnou fáze. [39]

Turbulence a tepelné toky: Pro modelování turbulence program využívá RNG model, dvourovnicový model $k-\epsilon$ a $k-\omega$. Z hlediska proudění lze v programu modelovat nevazké, viskózní laminární nebo turbulentní proudění. [39]

Vizualizace: Pro zobrazení výsledků a simulace program využívá balíček Flow-3D Post. Pomocí tohoto balíčku lze zobrazit vizualizaci částic, rychlostní vektorová pole, iso-povrchy, údaje o historii, vyobrazit více dat a propojit více výsledků. Ke zpracování dat slouží nástroj FlowSight, který generuje zprávy, automaticky analyzuje výsledky, případně umožňuje uživateli provést vlastní analýzu výsledků. Vykresluje barevně či černobíle vektorové, obrysové, 3D grafy povrchu a částic. Výstupy lze uložit do formátu PostScript a JPEG. [39]



Obr. 24: Požár v tunelu [40]

Požadavky na systém: [39]

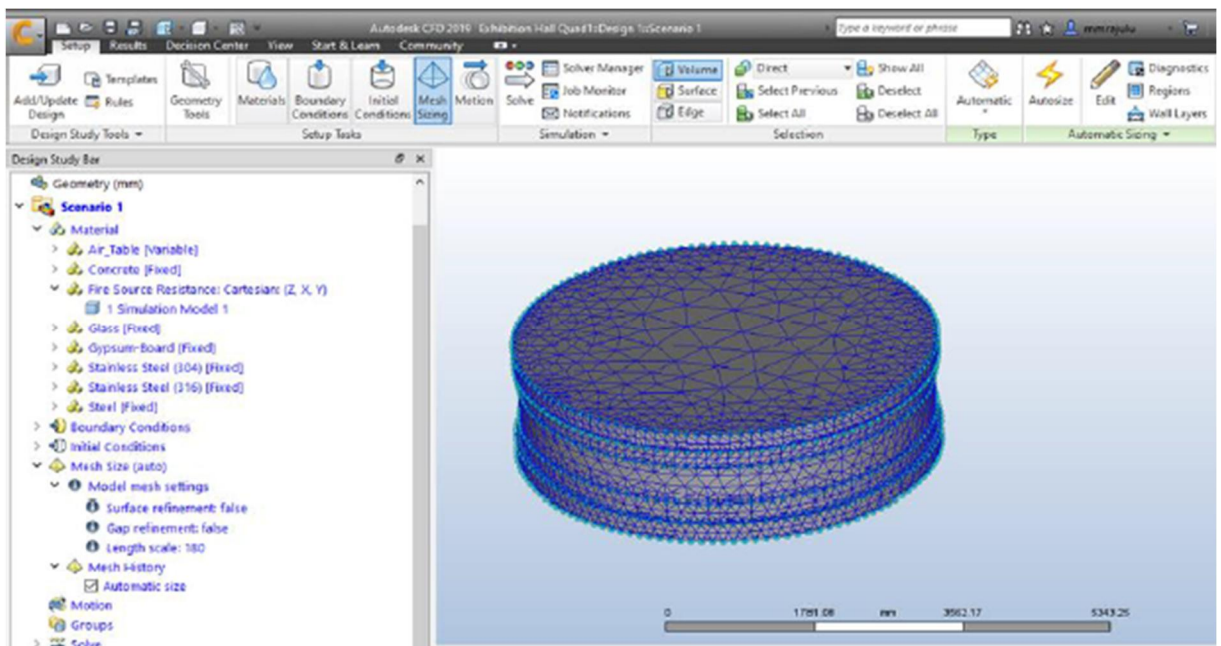
- Operační systém: Windows XP/Vista/7/8/8.1/10.
- Paměť (RAM): Vyžaduje 1 GB RAM.
- Místo na pevném disku: Požadováno 500 MB volného místa.
- Procesor: Procesor Intel Dual Core nebo vyšší.

3.13 Autodesk CFD

Program Autodesk CFD je dalším simulačním programem v oblasti výpočtu proudění tekutin. Jedná se o obecný CFD program, ve které je možné simulovat požár. Tento program vychází z aplikace CFdesign od společnosti Blue Ridge Numerics. Autodesk CFD je nástrojem k návrhu, posouzení a simulaci proudění tekutin s přenosem tepla v různých technických odvětvích. V programu lze simulovat proudění v hydraulických prvcích, magnetických agregátorech,

proudění plynných směsí, vícefázové proudění, proudění spalin s přestupem tepla, sdílení tepla při proudění a sdílení tepla radiací. [41]

Výpočetní síť: V programu CFD je možné vytvářet výpočetní síť automaticky a následně ji upravovat. Síť se dokáže přizpůsobit různým tvarům. V programu jsou zahrnuty různé druhy výpočetní sítě, které lze užít pro daný případ. Síť může být tvořena čtyřúhelníkovým, trojúhelníkovým, tetraedrálním, hexaedrickým, klínovým, pyramidovým prvkem. Tyto prvky obsahují různé stupně volnosti dle typu turbulence a mají omezené možnosti využití. Například trojúhelníkový prvek lze použít k modelování 2D kartézských geometrií a má 4 stupně volnosti pro laminární proudění a 6 stupňů volnosti pro turbulentní proudění. Stupně volnosti odpovídají počtu možných výsledných parametrů. [41]

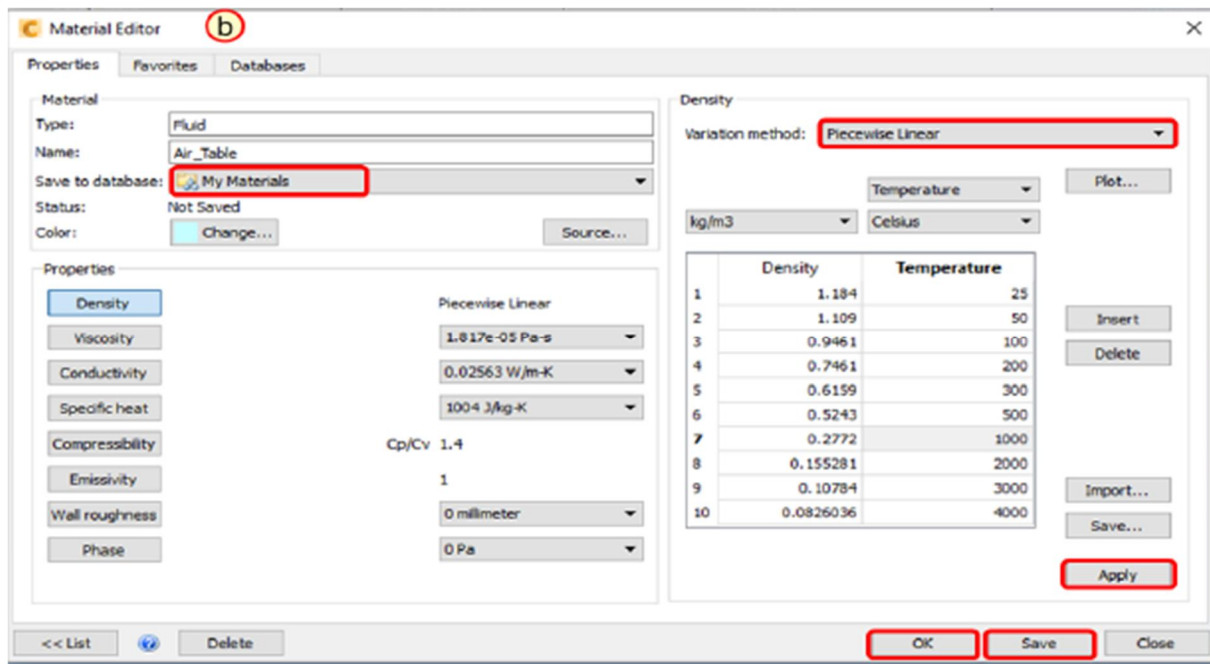


Obr. 25 : Generovaná výpočetní síť [42]

Geometrie: Samotný program CFD neumožňuje modelování geometrie. Je nutné doinstalovat cloudový modelářský program Fusion 360. [41]

Podporované programy: Program také podporuje vybrané formáty CAD (Revit, Inventor, Naviswork, AutoCad Architecture, SketchUp a další) pro import geometrie a modelářský program Fusion 360. [41]

Knihovna materiálů: Autodesk CFD obsahuje knihovnu materiálů pevných a kapalných látek. Je možné vlastnosti materiálů měnit a také je definovat jako přechodné, tedy měnící se v čase nebo s teplotou. Pokud knihovna neobsahuje potřebný materiál, je možné ho do databáze přidat a zadat požadované vlastnosti. Materiály lze přiřadit konstrukcím, objektům i vzduchu. [41]



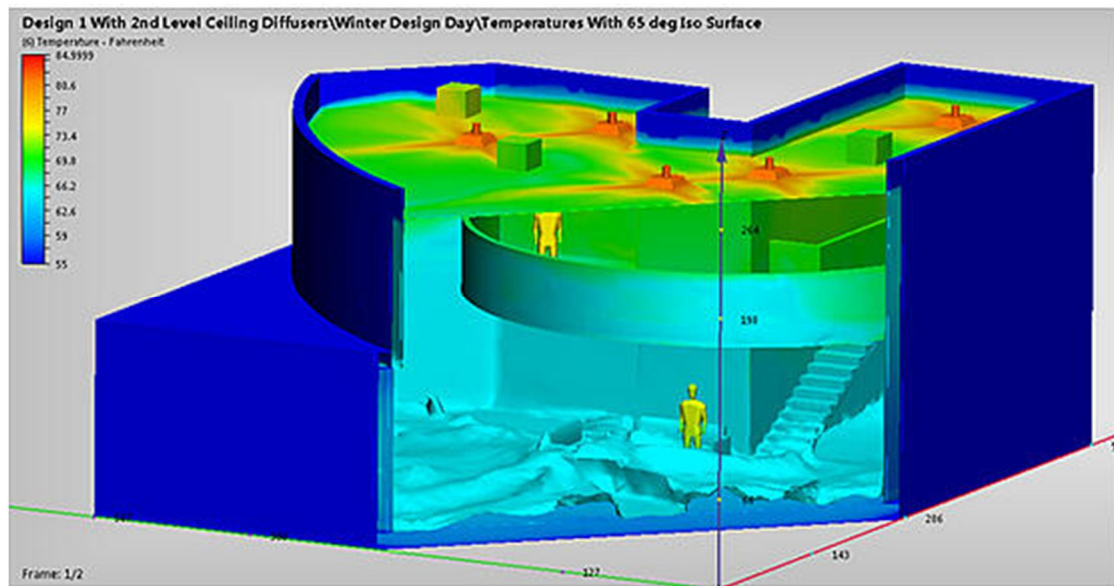
Obr. 26: Zadávání materiálových vlastností [42]

Okrajové a počáteční podmínky: Pro řešení a výpočet je nutné definovat počáteční a okrajové podmínky. Okrajové podmínky lze nastavit jako stálé nebo přechodné v závislosti na čase. V okrajových podmínkách lze nastavit tepelný tok, výměnu energie mezi modelem a okolím, objemový průtok, rychlost a další. [41]

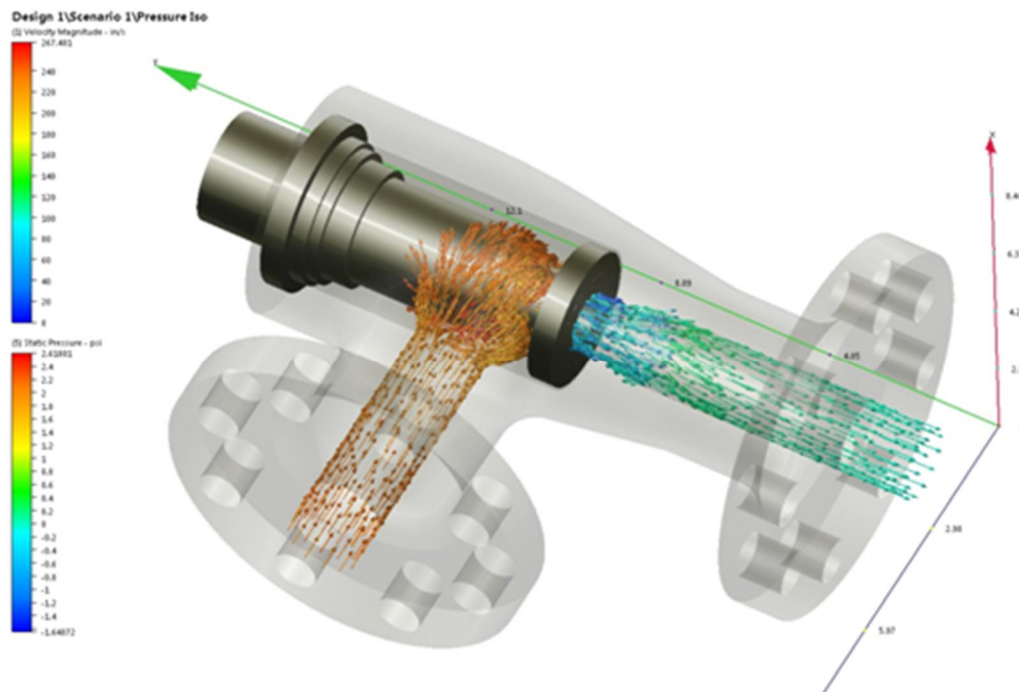
Výpočet: Program Autodesk CFD je založen na řešení Navier-Stokesovy rovnice hybnosti a energetické rovnici. [41]

Turbulence: Pro modelování turbulence jsou v programu dostupné modely turbulence k- ϵ , SST k- ω , RNG, RE k- ϵ . [41]

Vizualizace: Program Autodesk CFD prezentuje výsledky pomocí grafických obrázků, grafů a tabulkových datových souborů. Vizualizace grafických obrázků zobrazuje výsledky pomocí iso-ploch, iso-objemů, dále uvádí výsledky pro konkrétní body, zobrazuje proudění, vývoj kouře a teploty. Je možné zobrazit výsledky rychlostí, tlaku, hustoty, skaláru, viditelnosti kouře, teploty, viskozity a tepelného toku. [41]



Obr. 27: Simulace výtaku difusoru a zpětného toku vzduchu [43]



Obr. 28: Vizualizace proudění [43]

Požadavky na systém: [44]

- Operační systém: Windows 8/10 x64
- Paměť (RAM): Vyžaduje 32 GB RAM.
- Místo na pevném disku: Doporučeno 64 GB volného místa.

4 Porovnání CFD programů z hlediska funkcí

Cílem byla analýza CFD programů z hlediska simulace požáru. Pro porovnání byly vybrány aktuálně dostupné CFD programy. Z výběru byl sestaven žebříček programů, které dokážou nejlépe modelovat požár z hlediska obsáhlosti funkcí. Tabulka č. 2 uvádí přehled obsáhlosti funkcí a uživatelského rozhraní jednotlivých programů. Níže jsou popsány funkce, které byly v tabulce č. 2 hodnoceny.

Popis hodnocených funkcí:

Požár	- Simulace požáru či tepelného toku simulující požár
Rozptyl plynů	- Řešení úniku a rozptylu plynů do okolí
Koncentrace	- Řešení koncentrace různých chemických látek a produktů hoření
Přenos tepla	- Řešení přenosu tepla prouděním a sáláním
Vedení tepla uvnitř	- Vedení tepla uvnitř konstrukce, zjištění teploty konstrukce
Šíření kouře	- Simulace nebo předpověď, jak se bude kouř šířit po okolí
Výbuch	- Simulace výbuchu a případný dopad na konstrukce
Tepelné záření	- Vizualizace tepelného toku, zasažení konstrukcí či osob (10kW/m^2) tepelným tokem
Chemické reakce	- Řešení chemické reakce na základě spalování, nebo hoření chemické látky s následným uvolňováním látek následkem hoření
Potlačení požáru	- Hašení požáru skrápěním pomocí sprinklerů či jiným způsobem
Geometrie s CAD	- Podporování souborů CAD pro import geometrie do programu
Rozhraní	- Grafické uživatelské rozhraní

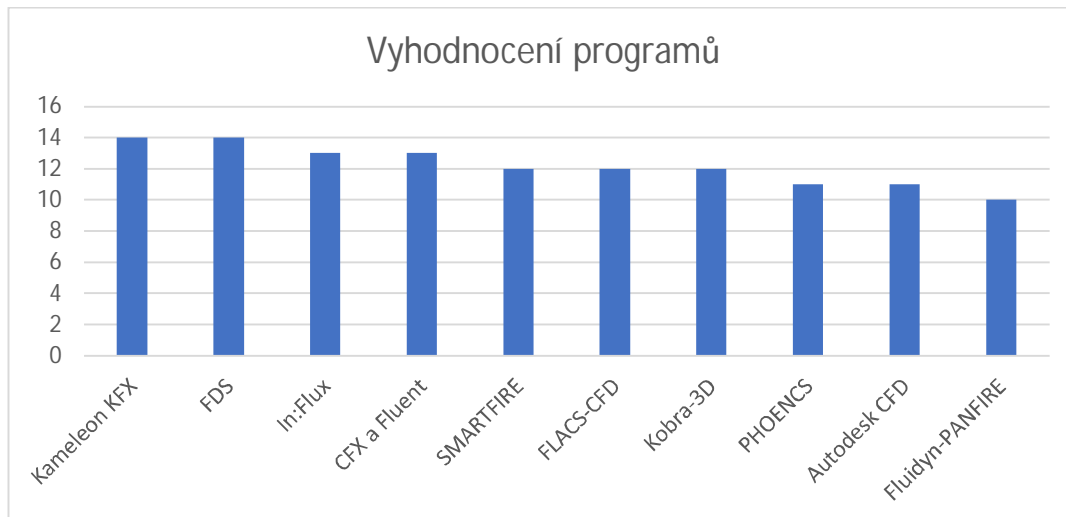
Tab. 2: Přehled funkcí jednotlivých programů

Název programu	Požár	Rozptyl plynů	Koncentrace	Přenos tepla	Proudění	Vedení tepla uvnitř	Šíření kouře	Výbuch	Tepelné záření	Chemické reakce	Počítání požáru
In:Flux	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✗
FDS	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
CFX - Ansys	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
SMARTFIRE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗
Kameleon FireEx- KFX	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
SimFlow	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗
Fluent -Ansys	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
PHOENICS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
Fluidyn-PANFIRE	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓
FLACS-CFD	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Kobra – 3D	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓
Flow-3D	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗
Autodesk CFD	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✗

Název programu	Autom.síť	Síť ručně	Kartézská síť	Cylindrická síť	Okraj. podm. Autom.	Geometrie s CAD	Rozhraní	Dostupnost
In:Flux	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	Demo verze na 10 dnů po registraci
FDS	✗	✓	✓	✗	✗	✓	*	Zdarma
CFX - Ansys	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	studentská verze / licence
SMARTFIRE	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	Demo verze po registraci na 30 dní zdarma
Kameleon FireEx- KFX	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	Po kontaktování distributora
SimFlow	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✓	Zdarma
Fluent -Ansys	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Studentská verze / licence
PHOENICS	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Po kontaktování distributora
Fluidyn-PANFIRE	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	Po kontaktování distributora
FLACS-CFD	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	Licence
Kobra – 3D	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✓	Po kontaktování distributora
Flow-3D	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓	Po kontaktování distributora
Autodesk CFD	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Studentská verze / licence

Poznámky:
 * - Program FDS nemá uživatelské rozhraní, ale lze využít grafickou nadstavbu – program PyroSim
 ✓ - Program danou funkci zahrnuje
 ✗ - Program danou funkci nezahrnuje

Pro přehlednější porovnání a vyhodnocení jednotlivých programů byl vytvořen graf, který vychází z tabulky č. 2. Graf zobrazuje obecné vyhodnocení CFD programů vzhledem k počtu využitelnosti jednotlivých funkcí. Z výsledného grafu vyplývá, že nejlepším programem z hlediska obsáhlosti funkcí jsou programy KFX a FDS. V případě řešení konkrétního příkladu se toto vyhodnocení může změnit.



Obr. 29: Graf vyhodnocení CFD programů

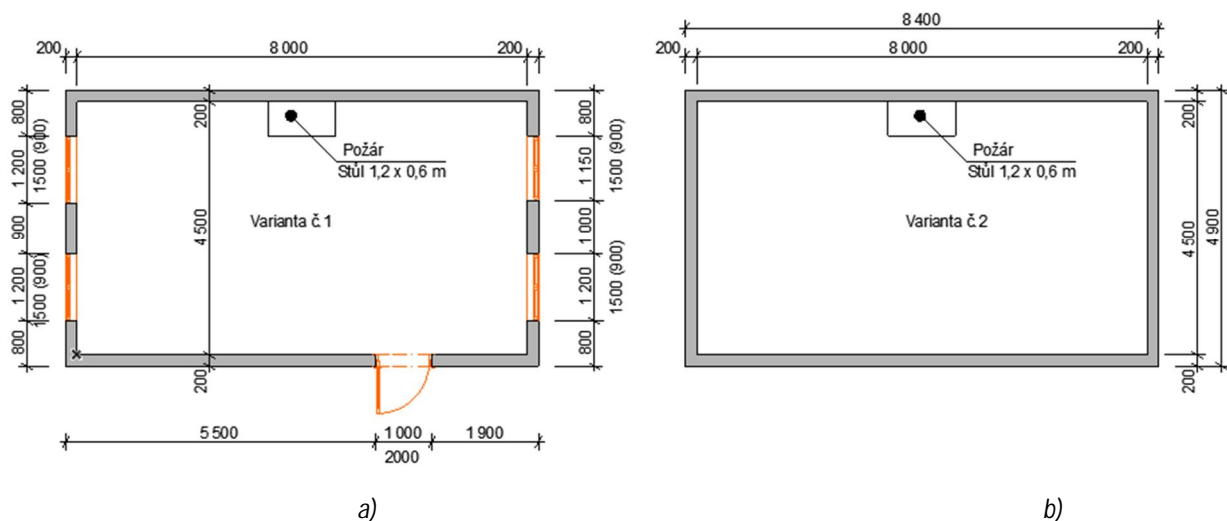
5 Analýza vybraných CFD programů při modelování požáru

Tato kapitola je zaměřena na porovnání vybraných CFD programů na konkrétním řešeném příkladu. Vybrané CFD programy jsou aplikovány pro řešení příkladu požáru dřevěného stolu, který se skládá ze dvou variant. Jedná se o místnost se stejnými rozměry, stejným zdrojem požáru, ale jinými podmínkami ventilace. První varianta je místnost odvětraná okny a dveřmi. Druhá varianta je místnost bez odvětrání. Výsledné hodnoty z programů jsou následně mezi sebou porovnány a zhodnoceny s ohledem na matematický základ těchto programů.

5.1 Řešený příklad

Pro porovnání a zhodnocení vybraných CFD programů byl zvolen příklad pro dvě varianty ventilace, tj. místnost odvětraná a neodvětraná. Byla zvolena místnost obdélníkového tvaru o rozměrech 8,0 x 4,5 m a světlou výškou 3 m. Pro odvětrání místnosti jsou navržena okna o rozměrech 1,2 x 1,5 m a dveře o rozměrech 1,0 x 2,0 m. Jako zdroj požáru je uvažován dřevěný pracovní stůl o půdorysných rozměrech 1,2 x 0,6 m. Materiálové řešení je u obou variant stejné. Stěny i stropní desky jsou železobetonové, tloušťky 200 mm.

Odlišnost řešených variant příkladu je v odvětrání místnosti. První varianta uvažuje s odvětráním pomocí dveří a oken, které jsou umístěny na protilehlých kratších stranách po dvou. Druhá varianta počítá s místností, která nemá žádné otvory a jedná se tedy o zcela neodvětranou místnost. Varianty řešení jsou názorně zobrazeny níže na obr. 30.



Obr. 30: Půdorysy řešeného příkladu: a) varianta č. 1, b) varianta č. 2

5.2 Model řešeného příkladu

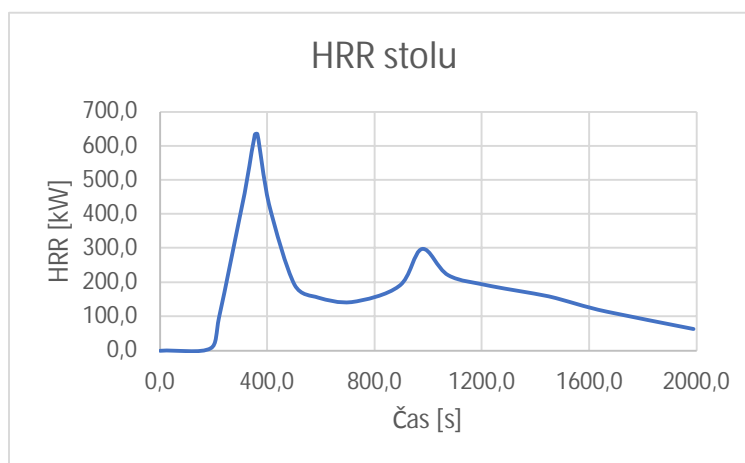
K řešení uvedeného příkladu byly vybrány CFD programy, které bylo možné volně stáhnout, nebo byla poskytnuta od distributora programu studentská licence. Těmito programy byly FDS (s grafickou nadstavbou Pyrosim), Ansys Fluent, Phoenics, SMARTFIRE a in:Flux. U programů SMARTFIRE a in:Flux byla provedena pouze studie funkčnosti z důvodu limitů

modelování v demo verzi. Z tohoto důvodu byly výsledky obou programů dány do přílohy této práce, viz příloha 1.

V každém programu bylo nutné vytvořit zadanou geometrii místnosti. Modelování místnosti se v každém programu nepatrně lišila. Podrobné zadávání geometrie je uvedeno v popisu konkrétního programu níže. Zdroj požáru je uvažován dřevěný pracovní stůl, který v programech představuje plocha s rozměry stolu a definovanými parametry. Požár stolu je definován pomocí křivky HRR, která představuje rychlost uvolňování tepla. Hodnoty vychází z požární zkoušky (SBI testu), které jsou součástí instalačního balíčku programu FDS a jsou uvedeny v tabulce níže. Výpočetní čas byl stanoven u každého programu na dobu 2000 s. V tabulce č. 3 jsou uvedeny hodnoty HRR a graf představuje jejich křivku.

Tab. 3: Hodnoty HRR dřevěného stolu

Čas [s]	HRR [kW]
0,0	0,0
189,9	7,0
220,4	96,7
315,0	461,6
342,4	583,2
354,6	634,4
363,8	634,4
406,9	429,9
502,1	193,5
591,0	155,4
713,5	143,0
891,1	188,4
976,7	297,4
1074,8	220,9
1234,1	189,4
1448,5	158,2
1666,0	114,1
1987,7	63,9

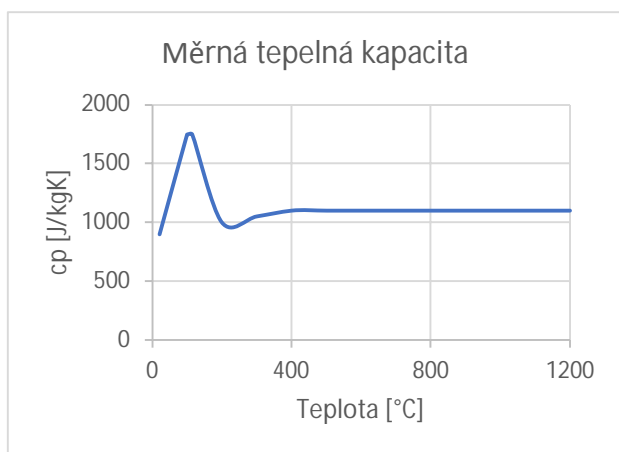


Obr. 31 Graf křivky HRR dřevěného stolu

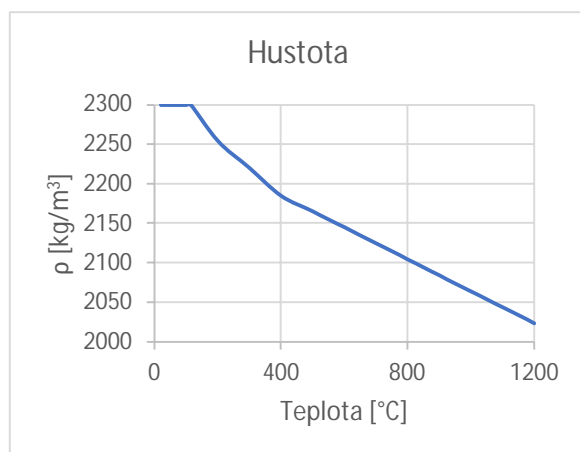
Místnost je řešena jako železobetonová konstrukce, tj. stěny, podlaha a stropní deska jsou ze železobetonu. U betonu se však s narůstající teplotou mění jeho materiálové vlastnosti. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty vlastností betonu v závislosti na teplotě, jež byly užity v některých programech pro modelování požáru. Dále na obrázcích č. 32-34 jsou uvedeny jejich grafy.

Tab. 4: Materiálové vlastnosti betonu

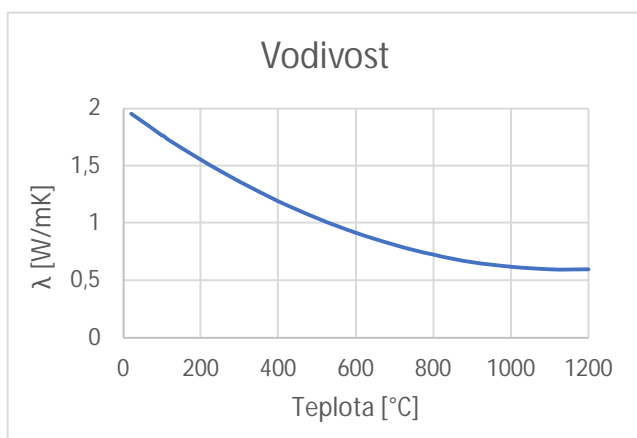
Teplota [°C]	Teplota [K]	Měrné teplo [J/kg · K]	Hustota [kg/m ³]	Vodivost [W/mK]
20	293	900	2300	1,95
100	373	900	2300	1,77
101	374	2020	2300	1,76
115	388	2020	2300	1,73
200	473	1000	2254	1,55
300	573	1050	2220	1,36
400	673	1100	2185	1,19
500	773	1100	2165	1,04
600	873	1100	2145	0,92
700	973	1100	2125	0,81
800	1073	1100	2105	0,72
900	1173	1100	2084	0,66
1000	1273	1100	2064	0,62
1100	1373	1100	2044	0,60
1200	1473	1100	2024	0,60



Obr. 32: Graf měrné tepelné kapacity betonu



Obr. 33: Graf hustoty betonu



Obr. 34: Graf vodivosti betonu

U každého programu se definování zadaného příkladu lišilo jak v modelování geometrie, které je popsáno v kapitole 5, tak i množstvím zadávaných parametrů. Níže uvedená tabulka představuje přehled parametrů, které bylo nutné v jednotlivých programech pro namodelování příkladu zadat.

Tab. 5: Zadávané parametry pro modelování požáru

<i>Vstupní parametry</i>	<i>FDS</i>	<i>Phoenics</i>	<i>Fluent</i>	<i>Autodesk CFD</i>
<i>Geometrie</i>	✓	✓	✓	✓
<i>Výpočetní síť</i>	✓	✓	✓	✓
<i>Materiál</i>	✓	x	✓	✓
<i>Přenos tepla</i>	x	x	✓	✓
<i>Turbulence</i>	x	✓	✓	✓
<i>Radiace</i>	x	✓	✓	✓
<i>Přenos hmoty</i>	x	x	✓	x
<i>HRR</i>	✓	✓	x	✓
<i>Tepelný tok</i>	x	x	✓	x
<i>Rychlost uvolňování kouře</i>	x	x	✓	x
<i>Kouř (koeficienty)</i>	x	✓	x	✓
<i>Teplota okolí</i>	✓	✓	✓	✓
<i>Def. přítok a odtok</i>	x	x	✓	✓
<i>Měřicí bod</i>	✓	✓	✓	✓
Poznámky: ✓ - Vstupní parametr bylo nutné do programu zadat x – Vstupní parametr nebylo nutné do programu zadávat				

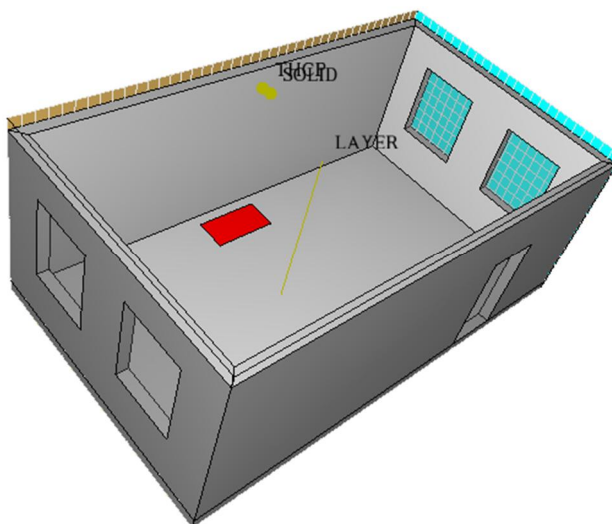
Z tabulky č. 5 je patrné, kolik vstupních údajů bylo nutné pro modelování konkrétního příkladu a získání výstupních hodnot zadat. Hodnoty, které nebylo nutné zadávat, jsou v programu předdefinovány nebo je program analyzuje sám. U některých programů je nemožnost definování vstupních údajů spojená s neschopností programu řešit určitou problematiku. V tabulce č. 8 jsou uvedeny základní výstupní parametry, které lze z jednotlivých programů získat.

Z výše uvedené tabulky vyplývá, že nejméně vstupních údajů pro modelování příkladu bylo v programu FDS. Na rozdíl program Fluent vyžadoval nejvíce vstupních údajů pro řešení příkladu. Důvodem rozdílu v počtu zadávaných hodnot je zaměření daného programu. Program

FDS je zaměřený na řešení požární problematiky, kdežto program Fluent je všeobecný program zaměřený převážně na průmysl a strojírenství.

5.2.1 Program FDS

Prvním programem pro řešení uvedeného příkladu byl program FDS, který je nejvíce užívaným programem v požárním odvětví. V programu byla geometrie místnosti modelována pomocí nástrojů „Obstruction“ (zdi a desky) a „Wall Hole“ (otvory). Výpočetní síť byla zvolena na základě výpočetního principu pomocí nástroje FDS Mesh Size Calculator [45] o velikosti jedné buňky 0,2 m, tj. v ose x byla geometrie rozdělena na 42 buněk, v ose y na 25 buněk a v ose z na 15 buněk. Celkem byla geometrie rozdělena na 15 750 buněk. Pro zdi, stropní desku a podlahu byl definován materiál v podobě betonu v tloušťce 200 mm. Materiálové vlastnosti betonu, tj. tepelná kapacita a vodivost, byly nastaveny v závislosti na teplotě, viz tabulka č. 4. Hustota v programu je konstantní, a tedy pro řešený příklad byla uvažována jako 2300 kg/m^3 . Počáteční podmínky byly ponechány výchozí, tj. teplota na povrchu konstrukce a teplota okolí je v programu uvažována jako $20 \text{ }^\circ\text{C}$, okolní tlak je 101325 Pa a gravitace v ose z je $-9,81 \text{ m/s}^2$.



Obr. 35: Model varianty 1 v programu FDS

Požár pracovního stolu byl simulován pomocí větracího otvoru (Vent) o rozměrech stolu $1,2 \times 0,6 \text{ m}$. Povrch byl volen jako hořák (burner) a reakční materiál byl zvolen polyuretan. U polyuretanu byla přednastavena hodnota výtěžku částic kouře na 0,02, která odpovídá hoření dřeva dle [46].

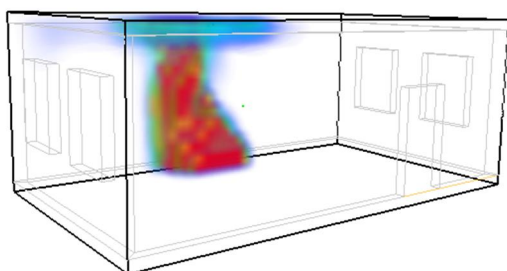
Vlastnosti hoření byly pro hořák stanoveny na základě hodnot rychlosti uvolněného tepla z tabulky č.3. Byla zadána rychlost uvolňování tepla připadající na plochu (HRRPUA) a hodnoty HRR v čase pomocí frakce, viz tabulka níže.

Tab. 6: Zadávané hodnoty frakce vycházející z HRR

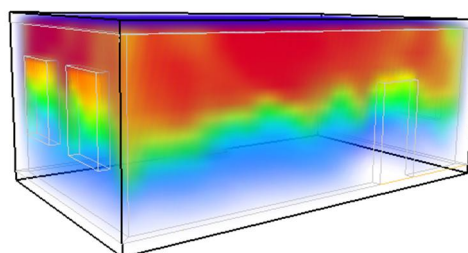
Čas [s]	HRR ¹⁾ [kW]	Frakce
0,0	0,0	0,00
189,9	7,0	0,01
220,4	96,7	0,15
315,0	461,6	0,73
342,4	583,2	0,92
354,6	634,4	1,00
363,8	634,4	1,00
406,9	429,9	0,68
502,1	193,5	0,31
591,0	155,4	0,24
713,5	143,0	0,23
891,1	188,4	0,30
976,7	297,4	0,47
1074,8	220,9	0,35
1234,1	189,4	0,30
1448,5	158,2	0,25
1666,0	114,1	0,18
1987,7	63,9	0,10

¹⁾ Hodnoty HRR stanovené požární zkouškou z knihovny FDS

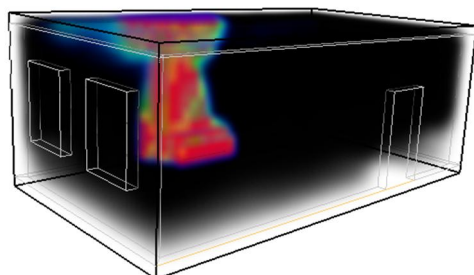
Dále byly v modelu nainstalovány zařízení pro měření teploty u stropní konstrukce, výšky kouřové vrstvy, teploty v horní a dolní hranici kouřové vrstvy a viditelnosti. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v kapitole 5.3.



Obr. 36: Vizualizace požáru pomocí HRR (320 s)



Obr. 37: Teplota kouře (320 s)



Obr. 38 Zakouření místnosti s vizualizací požáru (320 s)

5.2.1.1 Matematický základ

V této podkapitole je představen výňatek matematického principu programu FDS, kde jsou uvedeny základní rovnice pro řešení proudění tekutiny a dále jsou uvedeny rovnice řešící zvolené zkoumané parametry, tj. rychlost uvolňování tepla, teplota plynů a viditelnost. Kapitola 5.4 následně řeší porovnání výsledných hodnot v závislosti na matematickém základu jednotlivých programů.

Program FDS je založen na řešení Navier-Stokesových rovnic v souvislosti s Reynoldsovým průměrem. Jedná se o transformaci Navier-Stokesových rovnic na rovnice Reynoldsovy tzv. RANS. Pojmem RANS se rozumí Reynoldsův průměr Navier-Stokesovy rovnice. [47]

Rovnice kontinuity: [48]

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (5.1)$$

kde \vec{V} je vektor rychlosti [48]

Rovnice hybnosti: [48]

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (5.2)$$

kde p je tlak, ρ je hustota, \vec{g} je gravitační vektor a μ je molekulární viskozita [48]

Rovnice RANS: [49]

$$\rho \frac{D\overline{u_m}}{Dt} = -\nabla p_m + \mu \nabla^2 \overline{u_m} + \rho \overline{F_m} - \rho \overline{\Phi_{Re}} \quad (5.3)$$

kde $\overline{F_m}$ jsou vnější síly, $\overline{\Phi_{Re}}$ Reynoldsův tenzor stresu [49]

Vzhledem k tomu, že program FDS je navržen pro řešení dynamiky ohně, všechny jeho zdrojové kódy a okrajové podmínky jsou nastaveny pro řešení požárů uvnitř a vně budov. Nedílnou součástí pro popis požáru je spalování a záření, které je zahrnuto v řídicích rovnicích pro přenos energie. [47]

Model spalování je založen na reakci různých druhů směsí. Jedná se například o reakci paliva s kyslíkem, kdy kyslík je směs dusíku, kyslíku, voní páry a oxidu uhličitého. V dané buňce mřížky dochází k počítání reakce, která nemusí být hned okamžitá a úplná. Proto dochází k převodu druhů reaktantů na druhy produktu rychlostí určenou charakteristickou dobou míchání. Následně rychlost uvolňování tepla na jednotku objemu je definována jako součin součtu rychlostí hromadné produkce druhů směsí a jejich příslušné teplotní tvorby. [47]

$$\dot{q}'' = - \sum_{\alpha} \dot{m}_{\alpha}'' \Delta h_{f,\alpha} \quad (5.4)$$

kde \dot{m}_{α}'' je hromadná produkce na jednotku objemu druhu α chemické reakce a $\Delta h_{f,\alpha}$ je tvorba tepla druhu α [47]

Z toho vyplývá, že model FDS dokáže popisovat spalování na základě přístupu kyslíku.

V případě jako je řešený příklad v této práci, kdy je rychlost uvolňování tepla přímo zadána jako vstup, se HRR řeší následovně. Požadovaná rychlost uvolňování tepla se převede na hmotnostní tok paliva na daném povrchu představující hořák. [47]

$$\dot{m}_f = \frac{f(t) \dot{q}_{user}''}{\Delta H_c} \quad (5.5)$$

kde $f(t)$ je časové pásmo, \dot{q}_{user}'' je požadovaná rychlost uvolňování tepla na plochu a ΔH_c je spalné teplo plynné fáze [47]

Teplota plynů

Program FDS uvažuje teplotu ze stavové rovnice. Tato stavová rovnice je aproximována na základě rozkladu tlaků. Rozklad tlaků je proveden za účelem, kde lze předpokládat, že pro průtoky s nízkým Machovým číslem jsou teplota a hustota nepřímo úměrné. [47]

$$\bar{p}_m = \rho T R \sum_{\alpha} \frac{Z_{\alpha}}{W_{\alpha}} = \frac{\rho T R}{\bar{W}} \quad (5.6)$$

Teplota plynu ze stavové rovnice je následně odvozena z hustoty a hmotnostních zlomků. [47]

$$T_{ijk} = \frac{\bar{p}_m}{\rho_{ijk} R \sum_{\alpha=0}^{N_x} \left(\frac{Z_{\alpha,ijk}}{W_{\alpha}} \right)} \quad (5.7)$$

Kouř

Výpočet kouře vychází z jednoduchého chemického přístupu, který sleduje všechny hlavní produkty spalování. Každá výpočetní buňka v modelu obsahuje konkrétní údaje o hustotě kouře. Následný výpočet viditelnosti je řešen pomocí extinkčního koeficientu K. Tento klíčový parametr je vypočítán následovně: [47]

$$K = K_m \rho_s \quad (5.8)$$

kde K_m je hmotnostně specifický extinkční koeficient s hodnotou 8700 m²/kg. Pro doutnání se hodnota K_m pohybuje kolem 4000-5000 m²/kg. Tento koeficient je v programu FDS nastaven na hodnotu 8700 m²/kg. [47]

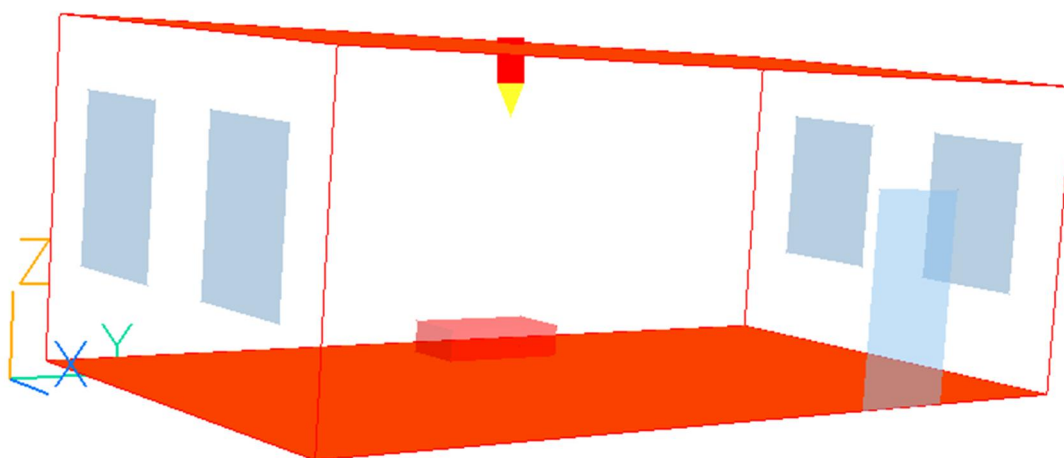
Výsledná viditelnost je v programu FDS následně řešena jako: [47]

$$S = C/K \quad (5.9)$$

kde C je rovno v FDS hodnotě 3 pro reflexní značky a K je extinkční koeficient [47]

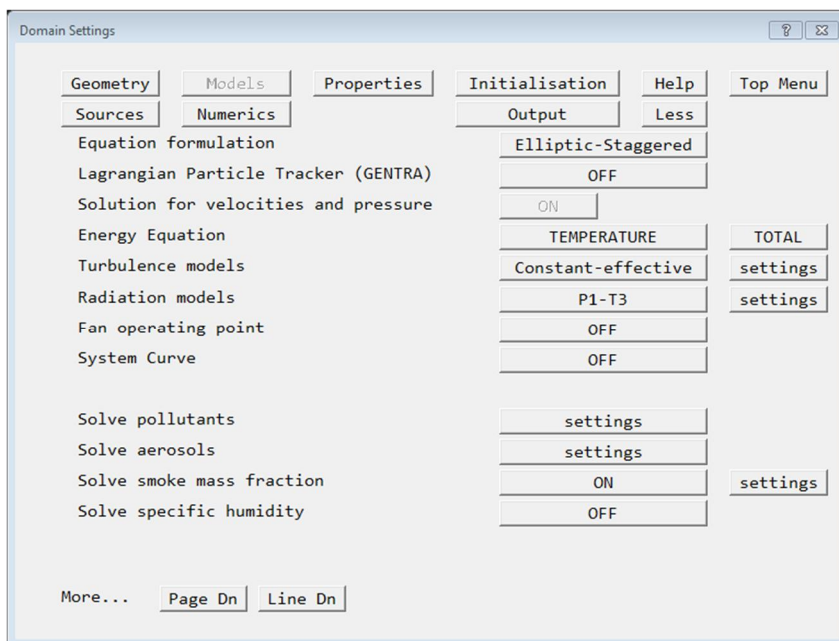
5.2.3 Program Phoenixics

Dalším programem pro řešení příkladu byl program Phoenixics/Flair 2021. Geometrie je zde řešena pomocí sítě. Stěny, stropní deska a podlaha jsou řešeny jako inertní plochy. Oproti programu FDS jsou ventilační otvory (okna a dveře) řešeny plochou s definicí opening. Tyto plochy představují otvory v pevné inertní ploše, přes kterou proudí kapaliny, konkrétně vzduch a produkty spalování. Pro plochy definované jako opening bylo nutné nastavit okolní teplotu 20°C. V programu FDS však byly okna a dveře modelovány nástrojem pro tvorbu otvorů ve stěně. Následně byla definována na dané stěny síť s otevřenými hranicemi s definicí opening. Počáteční podmínky, tj. teplota okolí (20 °C), tlak (101325 Pa) a gravitace (v ose z -9,81 m/s²) jsou v programu nastaveny jako výchozí hodnoty. Velikost výpočetní sítě je zde zadávána pomocí poměru a počtu buněk v jednotlivých osách.



Obr. 39: Model varianty 1 v programu Phoenixics

Dále bylo v programu nutné nastavit typ turbulence, radiace a zapnout výpočet zlomku hmotnosti kouře. Dále bylo nutné nastavit řešič kouře, kde se nastavuje spalné teplo H_{fu} , podíl sálavého tepla R_f , výtěžek částic kouře Y_s , stechiometrický poměr R_{ox} a hmotnostní specifický extinkční koeficient K_m . K výpočtu kouře stačilo nastavit spalné teplo a výtěžek kouře, ostatní členy si program následně dopočítal. Pro dřevo se uvažuje s hodnotou spalného tepla 13 MJ/kg a výtěžkem částic kouře 0,02 dle [46]. V případě podílu sálavého tepla program uvažuje hodnotu 0,333 pokud není zapnutý radiální model. Tato hodnota vychází z [46] a redukuje uvolňování tepla do domény. V programu FDS jsou tyto hodnoty automaticky nastaveny při definování reaktantu. Tyto hodnoty ovlivňují rychlost uvolňování tepla a kouře. Proto byla v programu Phoenixics hodnota spalného tepla změněna na 25 MJ/kg, jelikož výsledná křivka HRR dosahovala nižších výsledků než vstupní křivka HRR.



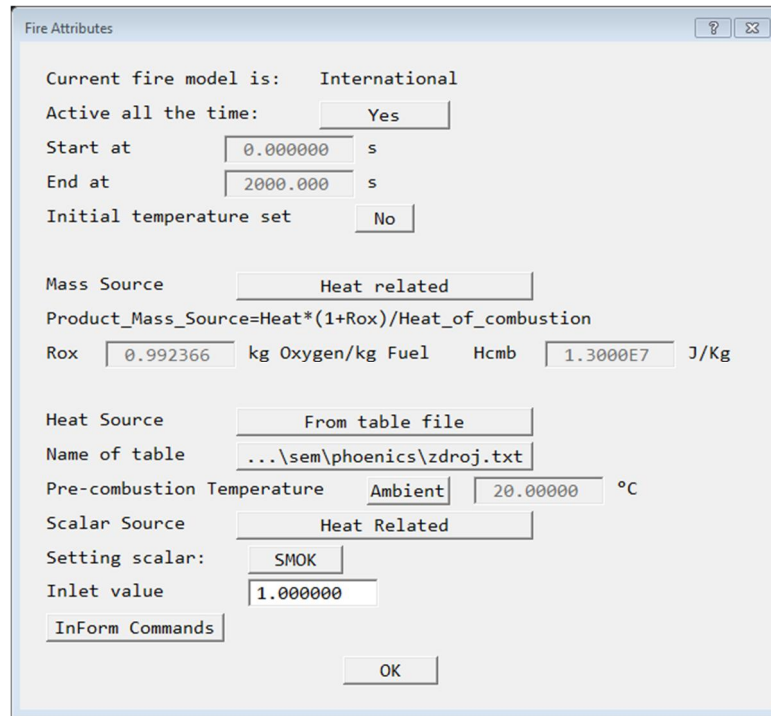
Obr. 40: Grafické rozhraní ve Phoenix

Zdroj požáru se zadával pomocí objektu požár („fire“). Vlastnosti hoření pro tepelný zdroj byly definovány textovým souborem, který obsahoval čas a hodnoty HRR pracovního stolu, viz obr. 41. Dále se definoval „Mass-source“, pro který byl v tomto případě nastaven jako „Heat related“. Dalším zdrojem pro nastavení požáru byl skalární zdroj, který byl též nastaven jako „Heat related“, kde je rychlost skalárního uvolňování tepla vázaná na rychlost uvolňování tepla.

```

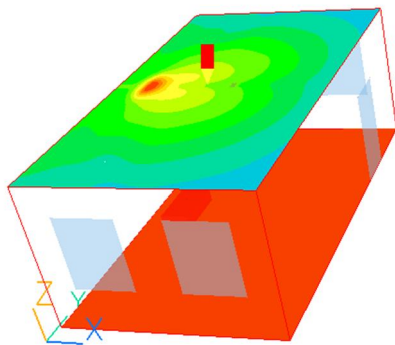
Time, Qt
0.0, 0.0
189.9, 7003.9
220.4, 96653.8
315.0, 461562.0
342.4, 583185.0
354.6, 634396.0
363.8, 634426.0
406.9, 429873.0
502.1, 193504.0
591.0, 155408.0
713.5, 143007.0
891.1, 188351.0
976.7, 297367.0
1074.8, 220922.0
1234.1, 189448.0
1448.5, 158151.0
1666.0, 114070.0
1987.7, 63926.5
    
```

Obr. 41: Textový soubor pro definování průběhu HRR

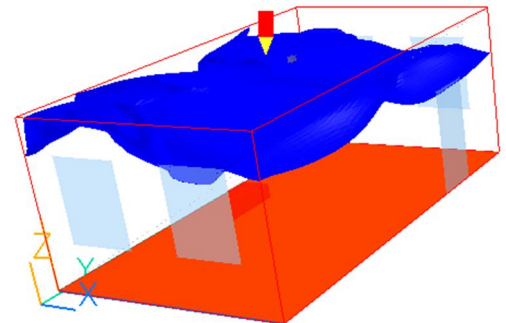


Obr. 42: Nastavení tepelného zdroje ve Phoenix

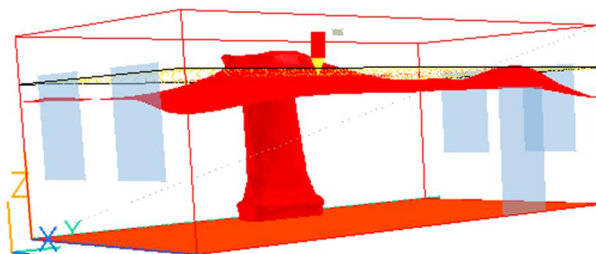
Pro měření hodnot byl instalován do místnosti měřák typu “point_history“, který měří teplotu, rychlost proudění, tlak, poměr kouře.



Obr. 43: Teplota u stropní desky (360 s)



Obr. 44: Vizualizace kouře (560 s)



Obr. 45: Viditelnost (560 s)

5.2.3.1 Matematický základ

V této podkapitole je představen výňatek matematického principu programu Phoenix/Flair, kde jsou uvedeny základní rovnice pro řešení proudění tekutiny a dále jsou uvedeny rovnice řešící zvolené zkoumané parametry, tj. rychlost uvolňování tepla, teplota plynů a viditelnost. Kapitola 5.4 následně řeší porovnání výsledných hodnot v závislosti na matematickém základu jednotlivých programů.

Program Phoenix/Flair je založen na řešení rovnic rovnováhy, které zahrnují zachování hmoty, hybnosti v každé ose a uchování energie. [50]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\Phi) + \nabla(\rho u\Phi) = \nabla(\rho\nabla\Phi) + S \quad (5.10)$$

Phoenix řeší tyto rovnice na základě převedení na rovnice konečného objemu pomocí integrací diferenciální rovnice přes objem buňky. [50]

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho\Phi dV + \oint_A \rho\Phi V \cdot dA = \oint_A \Gamma\nabla\Phi \cdot dA + \int_V S_\Phi dV \quad (5.11)$$

kde se podmínky hodnotí následovně: [50]

Přestup: $\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho\Phi dV = (\rho_{new}\Phi_{new} - \rho_{old}\Phi_{new}) \cdot V/\Delta t$

Proudění: $\oint_A \rho\Phi V \cdot dA = \sum_f \dot{m}_f \Phi_{i,j,k}$

Difúze: $\oint_A \Gamma\nabla\Phi \cdot dA = \sum J_{i,j,k}$

Zdroj: $\int_V S_\Phi dV = S_v \cdot V$

Pro simulaci hořícího plošného nebo objemového požáru se využívá objekt “fire“. Program nabízí tři metody, a to mezinárodní metodu, Nizozemská norma NEN6098 a Belgický standard NBN S 21-208-2/A1. U těchto metod je možné užít několik variant nastavení zdroje tepla, hmoty a kouře. Mezinárodní metoda je brána jako obecný model generování kouře a je možné ji využít pro různé typy požárů. Nizozemská a belgická norma je zaměřena na modelování požárů automobilů v garážích a nedoporučuje se ji užít pro jiné aplikace. [51]

U řešeného příkladu byl využit Mezinárodní model. Nastavení zdroje tepla, hmoty a kouře bylo řešeno následovně. Jelikož zdroj tepla je definován pomocí rychlosti uvolňování tepla (křivky HRR), byly ostatní zdroje nastaveny v závislosti na faktoru HRR.

Zdroj tepla vychází z uvedeného vztahu jako součet uvolněného tepla proudění a sálání: [51]

$$Q_t = Q_{konv} + Q_{rad} \quad (5.12)$$

Celkovou rychlost uvolňování tepla program řeší na základě součinu: [51]

$$Q_t = h \cdot M_f \cdot H_{fu} \quad (5.13)$$

kde h je účinnost spalování, M_f je hmotnostní spotřeba paliva a H_{fu} je spalné teplo. [51]

Následně se z uvedeného výrazu pro Q_t odvozuje rychlost tvorby produktů hoření: [51]

$$M_p = (1 + R_{ox}) \cdot M_f \quad (5.14)$$

kde R_{ox} je stechiometrický poměr (kg-kyslík/kg-palivo). [51]

V případě že zdroj hmoty (Mass source) je nastaven jako Heat Related, rychlost tvorby produktů hoření se určí z výrazu: [51]

$$M_p = Q_t \cdot (1 + R_{ox}) / H_{fu} \quad (5.15)$$

Zdroj tepla pro řešený příklad je zadán pomocí textové souboru, kde je rychlost uvolňování tepla předepsána v závislosti na čase. Čas je uveden v sekundách a HRR ve wattch, jak je zobrazeno na obr. 41. Při výpočtu program provádí lineární interpolaci mezi zadanými hodnotami. [51]

Zdroj hmoty (Mass source) je nastaven jako Heat Related. Toto nastavení následně řeší odečet hmotnostního zdroje od celkového zdroje vyděleného spalným teplem: [51]

$$m_p = Q_t \cdot (1 + R_{ox}) / H_{fu} \quad (5.16)$$

Skalární zdroj neboli zdroj kouře je nastaven stejně jako zdroj hmoty, tedy jako Heat Related. Rychlost uvolňování produktů hoření je závislá na rychlosti uvolňování tepla a vychází z hmotnostního zdroje: [51]

$$m_p = Q_t \cdot (1 + R_{ox}) / H_{fu} \quad (5.17)$$

Jak už bylo uvedeno výše, požár stolu je v programu definován jako objekt Fire, pro který jsou zadány hodnoty rychlosti uvolňování tepla v závislosti na čase. Phoenix řeší HRR pomocí funkce času, kde teplo je rovnoměrně distribuováno v objemu objektu Fire a nezahrnuje složku, která by zohledňovala podmínky ventilace. Proto jsou výsledky rychlosti uvolňování tepla pro obě varianty stejné. V případě zohlednění ventilačních podmínek z hlediska rychlosti hoření a výpočtu rychlosti uvolňování tepla by bylo nutné použít program Core Phoenix, který se zabývá spalováním. Zde by bylo nutné jako základní vstup zadat časovou odchylku rychlosti dodávky plynného paliva (kg/s) místo rychlosti uvolňovaného tepla v závislosti na čase. Tento program už však nebyl distributorem poskytnut.

Teplotu plynu program Phoenix řeší z energetické rovnice, která obsahuje členy proudění, difuze a zdrojovým členem je zdroj ohně. Oproti výpočtu rychlosti uvolňování tepla, odvětrání místnosti ovlivňuje rozložení teploty plynů. [50]

Co se týče výpočtu výšky kouřové vrstvy, tu program neumí počítat. Phoenix podává výsledky ohledně hmotnostního zlomku kouře a viditelnost. Určení výšky kouřové vrstvy je možné získat na základě simulace viditelnosti či hmotnostního zlomku kouře.

Viditelnost

Viditelnost je v programu Phoenix/Flair uvažována následovně: [51]

$$\delta = A / (K_m C_{s,p}) \quad (5.18)$$

kde A je empirický koeficient uvažující s hodnotou 3 (pro reflexní značky), K_m je hmotnostně specifický extinkční koeficient uvažující hodnotu $7600 \text{ m}^2/\text{kg}$ pro spalování dřeva a $C_{s,p}$ hmotnostní koncentrace kouře vycházející ze vztahu: [51]

$$C_{s,p} = \rho Y_s C_s / (1 + R_{ox}) \quad (5.19)$$

kde ρ je hustota směsí, Y_s je výtěžek částic kouře, C_s je hmotnostní podíl produktů spalování a R_{ox} je stechiometrický poměr [51]

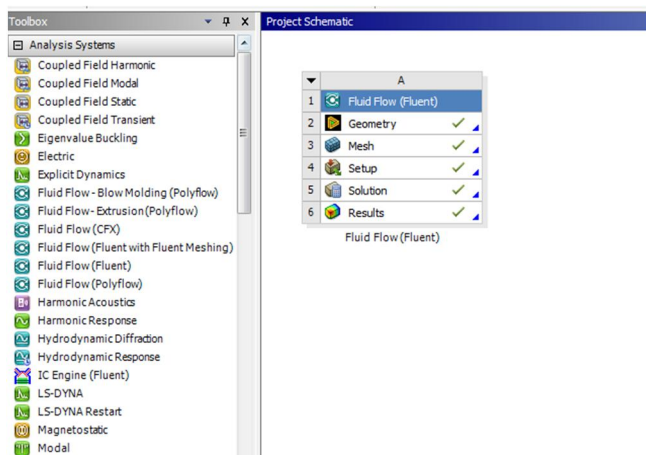
Viditelnost je následně počítána jako: [51]

$$SLEN = \min(D_{max}, \delta) \quad (5.20)$$

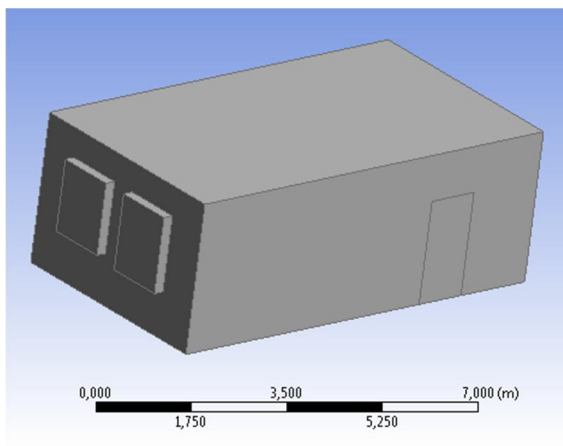
kde D_{max} je koeficient viditelnosti, který je v programu nastaven na 30 m [51]

5.2.4 Program Ansys Fluent

Dalším programem byl CFD program Ansys. Pro řešení daného příkladu bylo nutné vybrat z nabídky nástrojů vhodného řešitele. K řešení příkladu požáru pracovního stolu byl použit řešitel proudění tekutin Fluent. Zadávání geometrie se řeší pomocí hmoty, pro níž jsou specifikovány půdorysné rozměry, výška, otočení, směr.



Obr. 46: Grafické rozhraní programu Ansys



Obr. 47: Model varianty 1 v Ansysu

Vytvoření výpočetní sítě se provádí v dalším kroku Mesh. Zde se generuje výpočetní síť, která se následně může upravovat. Pro jednotlivé prvky se může zadat různá velikost výpočetní sítě. Zde je možné k jednotlivým konstrukcím modelu přiřadit funkci (inlet, outlet, source, wall). Nastavení vlastností, přiřazení materiálů konstrukcím, řešení proudění a radiace a další, se provádí v dalším kroku "Setup". V tomto kroku je již využit vybraný řešitel (Fluent). Pro definici materiálů byla využita databáze materiálů, jež řešitel obsahuje. Vlastnosti betonu jsou primárně nastaveny na konstantní. Pro řešení zadaného příkladu bylo nutné nastavit vlastnosti závislé na teplotě. Jednalo se o tepelnou kapacitu, vodivost a hustotu. V řešiteli Fluent

byly tyto vlastnosti definovány pomocí textového souboru. Charakteristické hodnoty betonu v závislosti na teplotě jsou uvedeny v tabulce č. 4.

Jelikož je Ansys obecným CFD programem, zdroj požáru byl definován jako „*heat source*“. Tedy zdroj tepla, pro který lze nastavit tepelný tok „*Heat flux*“ ve W/m^2 . Tepelný tok byl definován na plochu modelovaného zdroje tepla, tedy na objekt definující půdorysné rozměry stolu. Pro definování tepelného toku v závislosti na čase bylo nutné vytvořit textový soubor a zadat tak tepelný tok pomocí uživatelem definovanou funkcí (UDF). Následující tabulka uvádí přepočtené hodnoty HRR na tepelný tok.

Tab. 7: Přepočtené hodnoty HRR na tepelný tok

Čas [s]	HRR ¹⁾ [W]	Tepelný tok [W/m^2]
0,0	0,0	0
189,9	7003,9	9727,639
220,4	96653,8	134241,4
315,0	461562,0	641058,3
342,4	583185,0	809979,2
354,6	634396,0	881105,6
363,8	634426,0	881147,2
406,9	429873,0	597045,8
502,1	193504,0	268755,6
591,0	155408,0	215844,4
713,5	143007,0	198620,8
891,1	188351,0	261598,6
976,7	297367,0	413009,7
1074,8	220922,0	306836,1
1234,1	189448,0	263122,2
1448,5	158151,0	219654,2
1666,0	114070,0	158430,6
1987,7	63926,5	88786,81

¹⁾ Hodnoty HRR stanovené požární zkouškou z knihovny FDS

Dále bylo nutné pro tepelný zdroj předdefinovat tvorbu kouře. Tvorba kouře se zadávala obdobně jako tepelný tok, tedy pomocí uživatelem definovanou funkcí (UDF). Jelikož nebyl známý průběh rychlosti uvolňování kouře, bylo nutné tuto hodnotu dopočítat. Výpočet byl proveden pomocí aproximace z křivky HRR následovně:

$$SRR = (HRR / \Delta H_c) \cdot Y_s \quad [kg/s] \quad (5.21)$$

kde SRR je rychlost uvolňování kouře, HRR je rychlost uvolňování tepla, ΔH_c je spalné teplota a Y_s je výtěžek spalin

Výtěžek spalin pro dřevo je uvažován přibližně 0,02 kg/kg podle tabulky v publikaci [46]

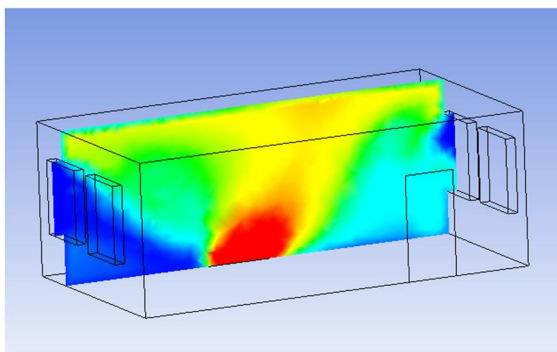
Následné výsledky kouře jsou uváděny jako frakce, tedy jako hmotnostní zlomek (kg kouřových částic/kg vzduchu). Pro získání viditelnosti bylo nutné tento parametr vypočítat. Pro získání viditelnosti v bodě umístěného 2 m nad podlahou, byly výsledky frakce z tohoto bodu přepočítány na koncentraci kouře (kg/m^3). Frakce kouře byla vynásobena hustotou

vzduchu odpovídající teplotě 20 °C. Tento výpočet je však konzervativní, protože s rostoucí teplotou hustota vzduchu klesá, a tedy koncentrace kouře by byla menší. Následně byla z koncentrace kouře stanovena viditelnost následovně:

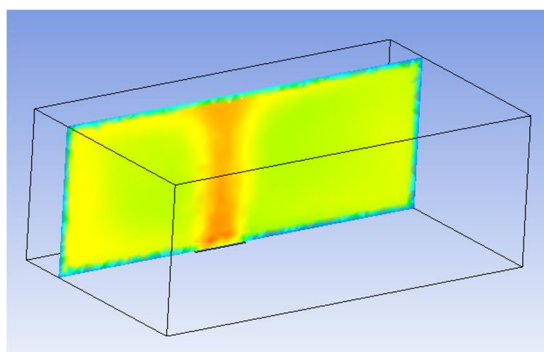
$$S = 8/(K \cdot m_s) \quad (5.22)$$

kde $8/K$ je viditelnost pro světelné značky a K je extinkční koeficient, který se pro dřevo uvažuje 7600 m²/kg, m_s je koncentrace kouře [46]

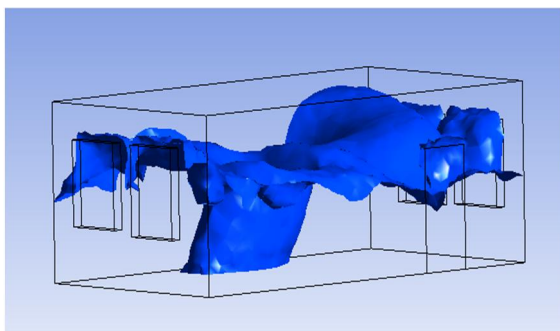
V neposlední řadě bylo nutné nastavit okrajové podmínky pro otvory a ohraničující konstrukce. Okenní otvory byly na jedné straně modelu definovány jako „inlet“, tj. přítok vzduchu do místnosti o teplotě 20 °C a na druhé straně modelu jako „outlet“, tj. odtok produktů hoření. Stěny, podlaha a strop byly definovány jako „Wall“ s povrchovou teplotou 20 °C, tloušťkou konstrukce 0,2 m a materiálem v podobě betonu. V programu se také musely nastavit počáteční podmínky. Okolní teplota byla uvažována 20 °C, tlak 101325 Pa a gravitace v ose z -9,81 m/s².



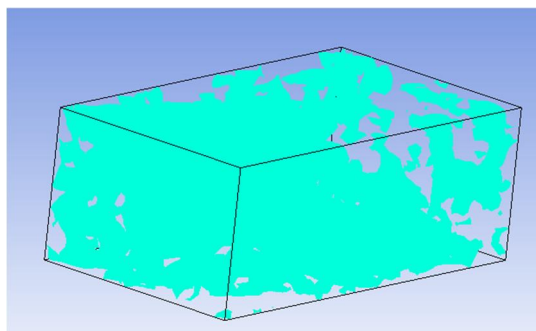
Obr. 48: Vizualizace požáru u varianty 1 (1200 s)



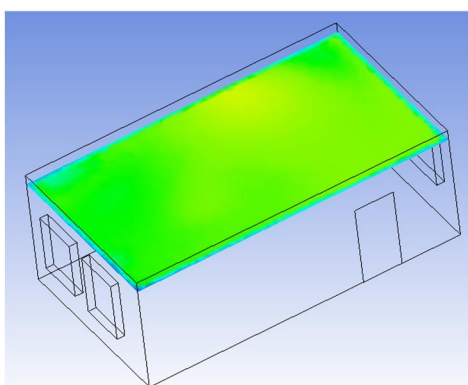
Obr. 49: Vizualizace požáru u varianty 2 (1200 s)



Obr. 50: Vizualizace kouře u varianty 1 (1200 s)



Obr. 51: Vizualizace kouře u varianty 2 (420 s)



Obr. 52: Teplota u stropní konstrukce u varianty 1 (1200 s)

5.2.4.1 Matematický základ

V této podkapitole je představen výňatek matematického principu programu Ansys Fluent, kde jsou uvedeny základní rovnice pro řešení proudění tekutiny a dále jsou uvedeny rovnice řešící zvolené zkoumané parametry, tj. rychlost uvolňování tepla, teplota plynů a viditelnost. Kapitola 5.4 následně řeší porovnání výsledných hodnot v závislosti na matematickém základu jednotlivých programů.

Program Ansys Fluent je založen na řešení rovnice zachování hmoty a hybnosti, energetické a transportní rovnici. Všechny tyto rovnice jsou definovány pro různé druhy případů. Pokud se jedná o laminární proudění jsou tyto rovnice řešeny následovně:[52]

Rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (5.23)$$

kde x je axiální souřadnice, r je radiální souřadnice a v_x je axiální rychlost, v_r je radiální rychlost [52]

Rovnice zachování hybnosti

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (5.24)$$

kde p je statický tlak, $\rho \vec{g}$ a \vec{F} jsou gravitační tělesná síla a vnější tělesná síla, $\bar{\bar{\tau}}$ je tenzor napětí definován: [52]

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (5.25)$$

kde μ je molekulární viskozita, I je jednotkový tenzor a druhý člen na pravé straně je účinek dilatace objemu [52]

Teplota

Teplota v programu Fluent je řešena dvěma způsoby. Pokud se jedná o adiabatický model, pak se předpokládá, že je teplota lineární funkcí postupné reakce: [52]

$$T = (1 - c) T_u + c T_{ad} \quad (5.26)$$

kde T_u je nejnižší teplota spalné směsi a T_{ad} je nejvyšší adiabatická teplota [52]

V případě neadiabatického modelu je teplota řešena z energetické rovnice, aby byly zohledněny tepelné ztráty nebo zisky v systému. Energetická rovnice řešená programem je následující: [52]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} h) = \nabla \cdot \left(\frac{k + k_t}{c_p} \nabla h \right) + S_{h,chem} + S_{h,rad} \quad (5.27)$$

kde $S_{h,chem}$ představuje tepelné zisky způsobené chemickou reakcí a $S_{h,rad}$ představuje tepelné ztráty způsobené sáláním [52]

$$S_{h,chem} = \rho S_c H_{comb} Y_{fuel} \quad (5.28)$$

kde S_c je normalizovaná průměrná rychlost tvorby produktů, H_{comb} je spalné teplo, Y_{fuel} palivový hmotnostní zlomek [52]

Kouř

Kouř je v programu řešen pomocí transportní rovnice pro hmotnostní podíl sazí následovně: [52]

$$\frac{\partial}{\partial t} (pY_{soot}) + \nabla \cdot (p\vec{v}Y_{soot}) = \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_{soot}} \nabla Y_{soot} \right) + R_{soot} \quad (5.29)$$

kde Y_{soot} je hmotnostní podíl sazí, σ_{soot} je turbulentní Prandtlovo číslo pro transport sazí a R_{soot} je čistá rychlost tvorby sazí [52]

Čistá míra tvorby sazí je uváděna jako rovnováha mezi tvorbou sazí a spalováním: [52]

$$R_{soot} = R_{soot,form} - R_{soot,comb} \quad (5.30)$$

kde rychlost tvorby sazí je definována empirickým vyjádřením: [52]

$$R_{soot,form} = C_s p_{fuel} \phi^r e^{-E/RT} \quad (5.31)$$

kde C_s je konstanta tvorby sazí, p_{fuel} je parciální tlak paliv, ϕ je poměr ekvivalence, r je exponent poměru ekvivalence a E/R je aktivační teplota [52]

Rychlost spalování je definována jako: [52]

$$R_{soot,comb} = \min[R_1, R_2] \quad (5.32)$$

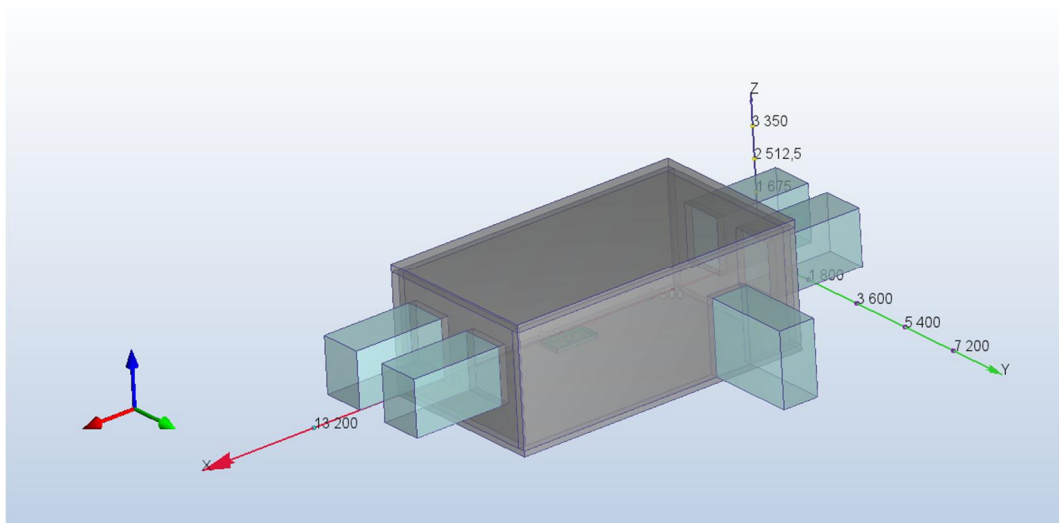
$$R_1 = A\rho Y_{soot} \frac{\epsilon}{k} \quad (5.33)$$

$$R_2 = A\rho \left(\frac{Y_{ox}}{v_{soot}} \right) \left(\frac{Y_{soot} v_{soot}}{Y_{soot} v_{soot} + Y_{fuel} v_{fuel}} \right) \frac{\epsilon}{k} \quad (5.34)$$

kde A je konstanta v Magnussenově modelu, Y_{ox} a Y_{fuel} jsou hmotnostní podíly oxidu uhličitého a paliva, v_{soot} a v_{fuel} je hmotnostní stechiometrie pro spalování sazí a paliva [52]

5.2.5 Program Autodesk CFD

Autodesk CFD je dalším z dostupných programů, ve kterém bylo možné řešit daný příklad. Samotný program neobsahuje modelovací část pro návrh geometrie. Geometrii lze vytvořit v modelovacím programu Fusion 360, který je nutný doinstalovat do programu Autodesk CFD nebo je možné geometrii importovat z jiného podporovaného modelovacího programu. Řešená geometrie byla namodelována v programu Revit a importována do programu Autodesk CFD. Obvodové konstrukce jsou řešené jako železobetonové konstrukce. Zdroj požáru je modelován jako obecný model, pro který budou následně v řešicím programu nastaveny dané parametry. Okna jsou řešena jako otvory s vysunutím 2500 mm mimo model. Toto nastavení je nutné pro řešící program.



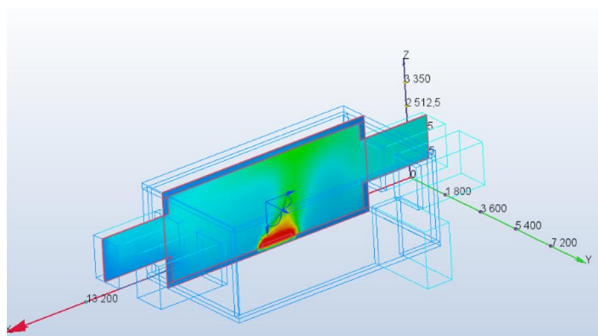
Obr. 53: Model varianty 1 v programu Autodesk CFD

V programu po importování geometrie byly nastaveny materiály. Pro zdi, strop a podlahu byl definován beton s vlastnostmi proměnnými s teplotou uvedené v tabulce 4. Také vlastnosti vzduchu byly nastaveny v závislosti na teplotě a zdroj požáru byl definován jako rezistentní materiál. Následně byly nastaveny okrajové podmínky. Pro tepelný zdroj byla nastavena rychlost uvolňování tepla dle tabulky č. 3 a skalár roven 1, který zohledňuje tvorbu kouře. Jelikož v programu nelze nastavit pro otvory podmínky pro odvod i přívod zároveň, byl pro okenní otvory na jedné straně modelu nastaven přívod vzduchu a pro protilehlé okenní otvory a dveře odvod vzduchu a produktů hoření.

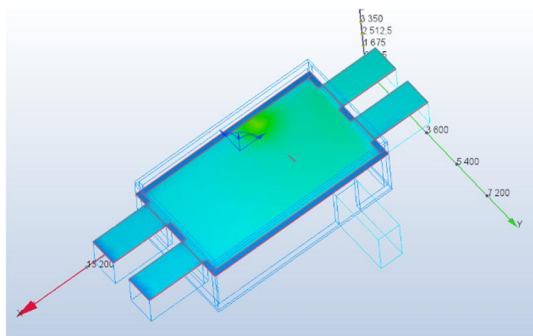
Počáteční podmínky byly nastaveny pro vzduch v místnosti a vzduch v otvorech. Definována byla teplota 20 °C.

Výpočetní síť byla vygenerována automaticky a nastavena na velikost buňky 0,2 m. Následně pro výpočet byly nastaveny časové kroky, fyzikální podmínky a také tvorba kouře. Parametry pro tvorbu kouře byly následovné:

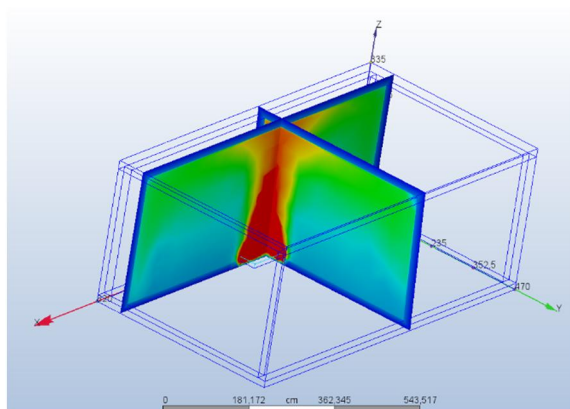
- Specifický extinkční koeficient = 7600 kg/m²
- Stálá viditelnost = 3
- Výtěžek částic ze spalování = 0,02 [46]



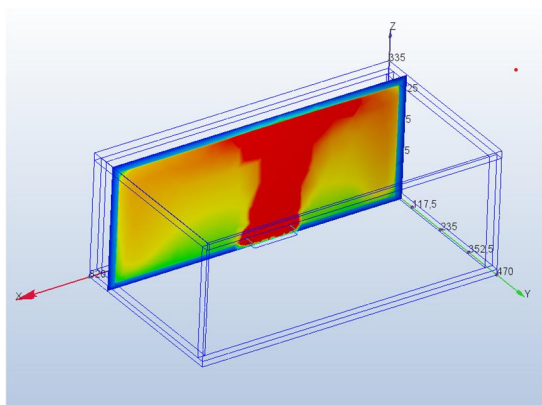
Obr. 54: Teplota u varianty 1 (1200 s)



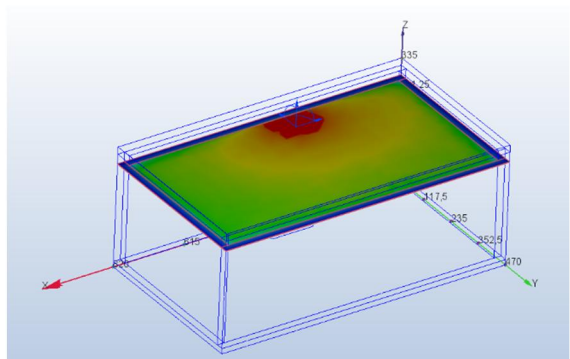
Obr. 55: Teplota u stropní desky (1200 s)



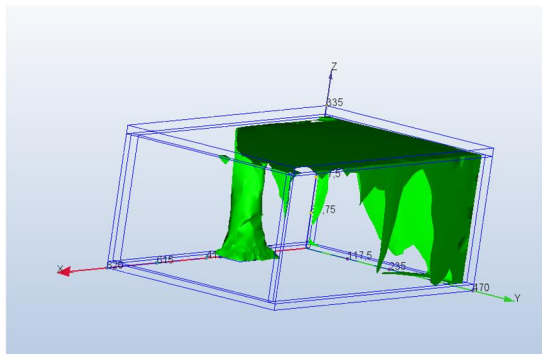
Obr. 56: Vizualizace požáru u varianty 2 (360 s)



Obr. 57: Vizualizace požáru u varianty 2 (1200 s)



Obr. 58: Teplota u stropní desky (480 s)



Obr. 59: Vizualizace tvorby kouře (420 s)

5.2.5.1 Matematický základ

V této podkapitole je představen výňatek matematického principu programu Autodesk CFD, kde jsou uvedeny základní rovnice pro řešení proudění tekutiny a dále jsou uvedeny rovnice řešící zvolené zkoumané parametry, tj. rychlost uvolňování tepla, teplota plynů a viditelnost. Kapitola 5.4 následně řeší porovnání výsledných hodnot v závislosti na matematickém základu jednotlivých programů.

Pro řešení proudění tekutiny a přenosu tepla se užívají parciální diferenciální rovnice zahrnující rovnici kontinuity, Navier-Stokesovy rovnice a energetickou rovnici. Tyto rovnice jsou však úzce propojené a nelineární, což neumožňuje obecné analytické řešení. Níže je částečně uvedena metoda, na které je program založen.[41]

Program Autodesk CFD je založen na řešení Navier-Stokesovy rovnice hybnosti a energetické rovnici (tzv. první zákon termodynamiky). [41]

Rovnice kontinuity jsou řešeny pro osy x , y , z následovně: [41]

V ose x :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} \\ = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + S_\omega + S_{DR} \end{aligned} \quad (5.35)$$

V ose y :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} \\ = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + S_\omega + S_{DR} \end{aligned} \quad (5.36)$$

V ose z :

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} \\ = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \right] + S_\omega + S_{DR} \end{aligned} \quad (5.37)$$

V rovnici kontinuity jsou obsaženy dva členy zahrnující rotační souřadnice a rozložení odporů. Prvním doplňujícím členem rovnice je člen řešící rotační tok, který je v programu řešen následovně: [41]

$$S_\omega = -2\rho\omega_i \cdot V_i \cdot \rho\omega_i \cdot \omega_i \cdot r_i \quad (5.38)$$

kde i značí globální směr souřadnice, ω je rychlost otáčení a r je vzdálenost od osy otáčení [41]

Druhým doplňujícím členem je člen distribuovaného odporu, který je řešen: [41]

$$S_{DR} = - \left(K_i + \frac{f}{D_H} \right) \frac{\rho V_i^2}{2} - c\mu v_i \quad (5.39)$$

kde i označuje směr globálních souřadnic (rovnice hybnosti u , v , w) [41]

Teplota

Výpočet teploty je v programu řešen pomocí energetické rovnice. Statická teplota vychází z energetické rovnice, která je pro adiabatické vlastnosti rovnicí konstantní celkové teploty. A tedy statická teplota pak může být určena následovně: [41]

$$T_{statická} = T_{celková} - T_{dynamická} \quad (5.40)$$

Z tohoto vztahu lze následně odvodit, že celková teplota je součtem teplot statických a dynamických. Výpočet dynamické teploty je následující: [41]

$$T_{dynamic} = \frac{v^2}{2c_p} \quad (5.41)$$

kde v je rychlost a c_p je mechanické měrné teplo řešené následovně: [41]

$$c_p = \frac{\gamma R_{gas}}{\gamma - 1} \quad (5.42)$$

kde γ je poměr měrného tepla konstantního tlaku k měrnému teple konstantního objemu a R_{gas} je plynová konstanta pro daný plyn. [41]

Celková teplota je tedy řešena: [41]

$$T_{total} = \frac{1}{2} \frac{V^2}{c_p} + T_{static} \quad (5.43)$$

Viditelnost

Program řeší viditelnost na základě výpočtu vzdálenosti, na kterou je možné vidět rozsvícenou značku v zakouřeném prostředí. Tento jev je vyhodnocen na základě výsledného prodění vzduchu, umístění požáru a vlastností požárního zatížení. [53]

Výpočet viditelnosti je uvažován v programu následovně: [53]

$$S = \frac{K}{\alpha_m m_p} \quad (5.44)$$

kde K je konstanta pro viditelnost světelné značky (8), α_m je extinkční koeficient a m_p je hmotnostní koncentrace částic. [53]

Hmotnostní koncentrace částic je řešena: [53]

$$m_p = \frac{M_p}{V_c} \quad (5.45)$$

kde V_c je objem kouře v prostoru a M_p množství produkovaných částic, které vychází ze vztahu: [53]

$$M_p = \gamma_p M_f \quad (5.46)$$

kde γ_p je výtěžek částic a M_f je hmotnost spotřebovaného paliva, která vychází ze vztahu: [53]

$$M_f = \frac{K_f Q_t}{\Delta H_{ch}} \quad (5.47)$$

kde K_f je konstanta (1 nebo 1000), Q_t rychlost uvolňování tepla a ΔH_{ch} chemické spalné teplo

5.3 Přehled zkoumaných parametrů

Zkoumanými parametry v CFD programech byly rychlost uvolňování tepla, teplota u stropní konstrukce a kouř. Hodnocené parametry jsou hlavními kritérii při posuzování požární bezpečnosti staveb. Prvním parametrem byla rychlost uvolňování tepla, ze které lze určit tepelný tok a dále se od toho odvíjí další dva hodnocené parametry. Jedním z těchto parametrů je teplota. Ve většině programů bylo možné zjistit teplotu plynů, což je uvedeno na obr. 62 a 63. Teplotu konstrukce bylo možné zjistit pouze ze dvou programů, a proto nebyla předmětem porovnání. Kapitola 6 se však zabývá tímto parametrem, jelikož je důležitým faktorem při návrhu a posuzování konstrukce za požáru. Posledním zkoumaným parametrem byla koncentrace toxických plynů v návaznosti na viditelnost. Pro hodnocení evakuace je tento faktor nejdůležitější. Pro evakuaci se hodnotí výška kouřové vrstvy, ta je důležitá pro návrh požárního odvětrání, a dále viditelnost. Vzhledem k faktu, že většina programů neuměla vypočítat výšku kouřové vrstvy, byla hodnotícím parametrem viditelnost. Viditelnost je důležitá z hlediska orientace v prostoru a viditelnosti únikových značek, pro zajištění rychlé a bezpečné evakuace.

Tabulka č. 8 uvádí další možné parametry, které lze z programů zjistit.

Tab. 8: Výstupní parametry z jednotlivých programů

Výstupní parametry	FDS	Phoenics	Fluent	Autodesk CFD
Tlak	✓	✓	✓	✓
Rychlost	✓	✓	✓	✓
Hustota	✓	✓	✓	✓
Teplota plynů	✓	✓	✓	✓
Teplota konstrukce	✓	x	✓	x
HRR	✓	✓*	x	x
Tepelný tok	✓	x	✓	✓
Viditelnost	✓	✓	x	✓
Hmotnostní podíl kouře	✓	✓	✓	✓
Výška kouřové vrstvy	✓	x	x	x
<p><i>Poznámky:</i></p> <p>* Program Phoenics /Flair nezahrnuje při výpočtu HRR podmínky odvětrání, tudíž jsou hodnoty HRR shodné se zadávanými hodnotami.</p> <p>✓ - Tento výstupní parametr program obsahuje</p> <p>x – Tento výstupní parametr program neobsahuje</p>				

Z výše uvedené tabulky je patrné, že nevíce možných výstupních parametrů týkajících se požáru je možné získat z programu FDS.

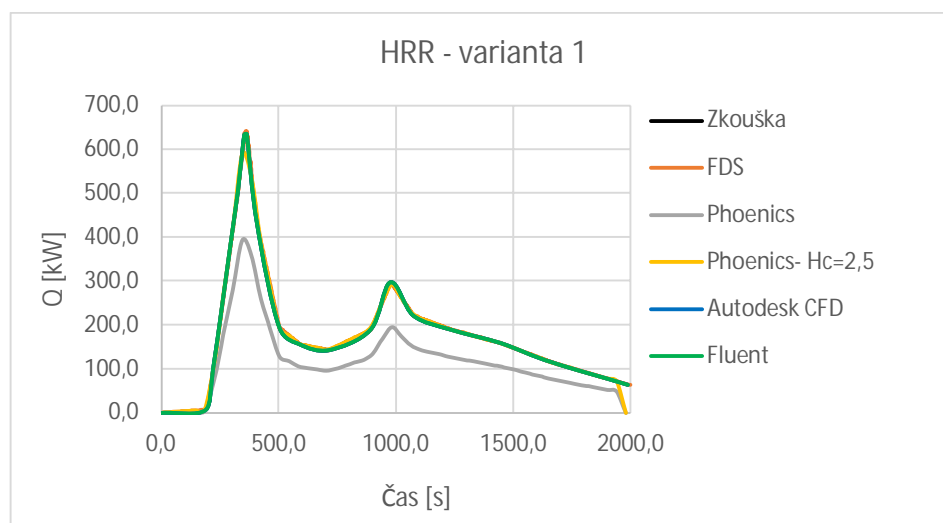
V následující tabulce jsou uvedeny souhrnné a výsledné hodnoty při řešení zadaného příkladu.

Tab. 9: Souhrnné a výsledné hodnoty

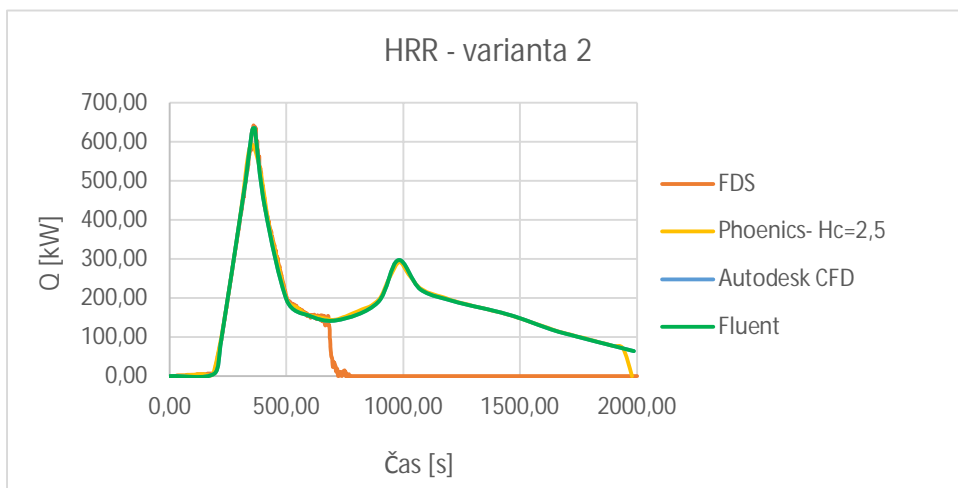
Program	Varianta	Výpočetní síť	Výpočetní čas [s]	Max. teplota u stropní desky [°C]
Pyrosim	Odvětraná	15 750	1h 53min	221,31
	Neodvětraná*		2h 32 min	407,79
Phoenixics	Odvětraná	21 816	2h 5min	356,56
	Neodvětraná		1h	575,05
Fluent	Odvětraná	12 830	3 h 12 min	204,45
	Neodvětraná		2 h 39 min	452,01
Autodesk CFD	Odvětraná	41 000	2h 27 min	185,86
	Neodvětraná	24 000	1h 55 min	394,94

*) Pro upřesnění výsledků byla použita jemnější síť (276 480)

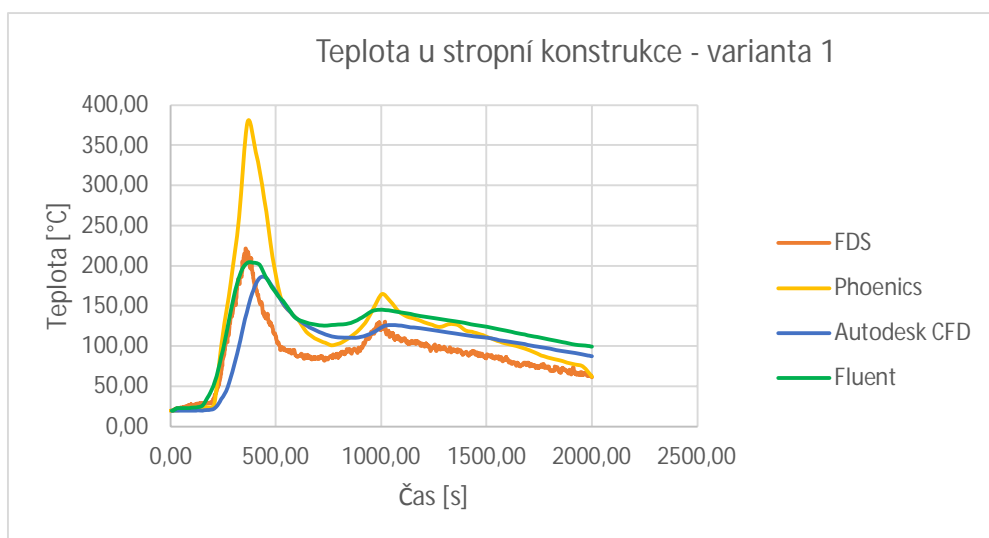
Získaná výsledná data z jednotlivých programů byla převedena na grafy, jež jsou uvedeny níže. Výsledné grafy představují řešení pro obě varianty, tj. varianta č. 1 (odvětraná místnost) a varianta č. 2 (neodvětraná místnost). Jsou zde porovnané zkoumané parametry, a to rychlost uvolňování tepla, teplota plynů u stropní konstrukce a viditelnost ve výšce 2 m nad podlahou.



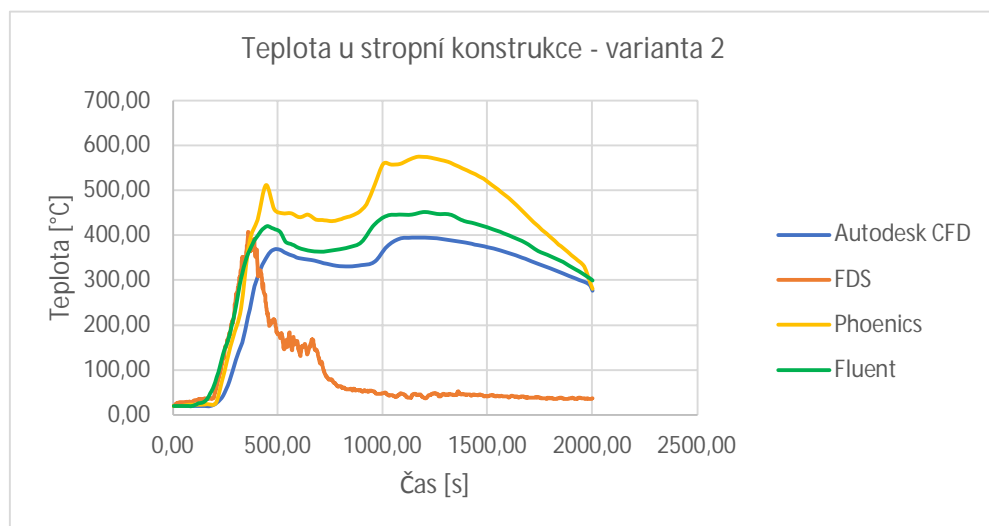
Obr. 60: Graf výsledné křivky HRR u varianty č. 1



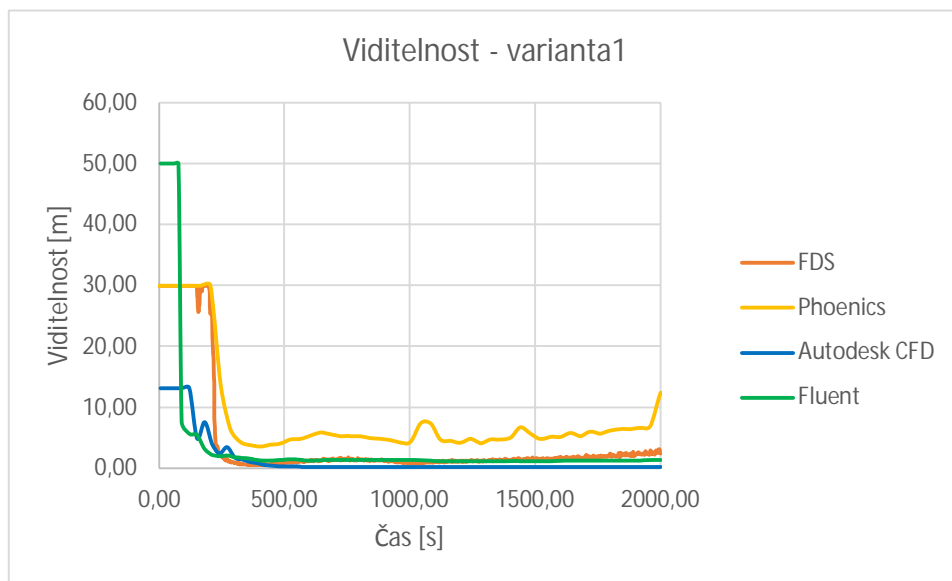
Obr. 61: Graf výsledné křivky HRR u varianty č. 2



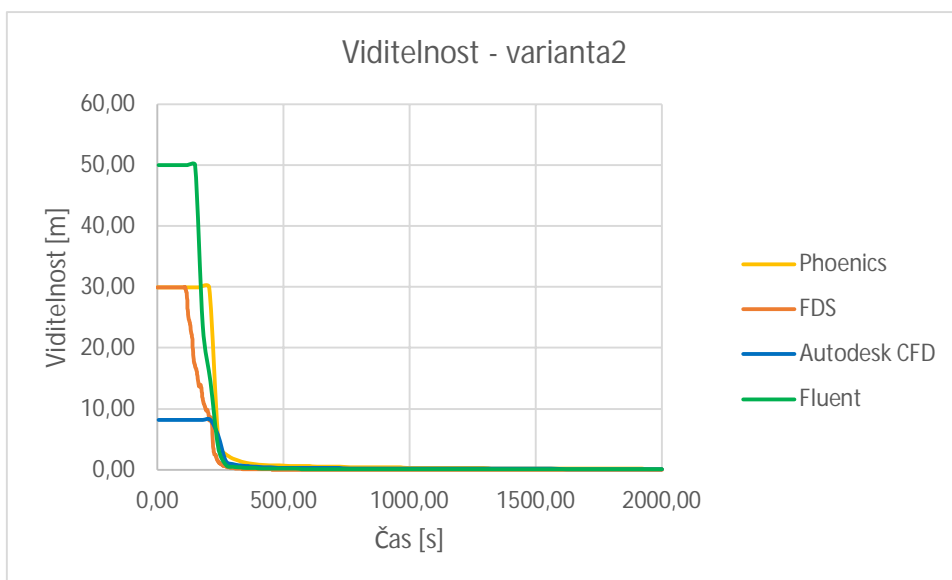
Obr. 62: Graf teploty u stropní konstrukce u varianty č. 1



Obr. 63: Graf teploty u stropní konstrukce u varianty č. 2



Obr. 64: Graf výsledné hodnoty viditelnosti v místnosti u varianty č. 1



Obr. 65 Graf výsledné hodnoty viditelnosti v místnosti u varianty č. 2

5.4 Zhodnocení analýzy modelování požáru v CFD programech

5.4.1 Zhodnocení sledovaných parametrů

Prvním zkoumaným parametrem byla rychlost uvolňování tepla. Nejnižší hodnoty HRR vycházely pro program Phoenix. Z matematického základu programu je patrné, že vztah (5.13) pro výpočet HRR obsahuje člen spalného tepla, který byl pro modelování požáru stolu roven 13 MJ/kg. Tato hodnota odpovídá spalnému teplu pro dřevo, avšak křivka HRR byla podstatně menší než vstupní křivka HRR určená požární zkouškou. Po změně hodnoty spalného tepla na hodnotu 25 MJ/kg, odpovídající hořícímu automobilu, byla křivka HRR shodná se vstupní křivkou HRR. U varianty č. 2 je patrné, že jsou křivky HRR většiny programů shodné s variantou č. 1, kromě programu FDS. Program FDS zahrnuje při výpočtu HRR podmínky ventilace, a proto je křivka HRR u varianty č. 2 odlišná. Začátek křivky HRR je stejný jako u varianty č. 1, jelikož je v místnosti dostatek kyslíku pro možnost hoření. V průběhu požáru se však kyslík spotřebovává a místnost se plní kouřem. To vede k utlumení případně k udušení požáru. Tento jev značí křivka HRR pro program FDS, kde jsou hodnoty od času 770 s nulové. Ostatní programy při výpočtu HRR nezahrnují podmínky ventilace, a tedy křivky jsou shodné s variantou č. 1. U programů Autodesk CFD a Fluent se tento jev dal očekávat, jelikož se jedná o programy všeobecné, kde zdroj požáru je modelován jako tepelný zdroj s předdefinovaným tepelným tokem nebo rychlostí uvolňování tepla. U programu Phoenix je tento výsledek překvapující, jelikož se jedná o program zaměřený na modelování požáru. Pro řešení HRR v programu Phoenix by bylo nutné využít jiný z nabízených produktů, který je zaměřený na spalování, a podmínky ventilace při výpočtu HRR jsou v něm zahrnuty. Tento produkt však nebyl poskytnut společností vyvíjející tento program.

Dalším poznatkem je zadávání HRR do jednotlivých programů. V programu FDS bylo nutné zadat maximální hodnotu HRR na plochu a následně definovat frakci HRR v daném čase. Následně si program dopočítal na základě zadaných dat a podmínkách ventilace výsledné HRR. V programu Phoenix stačilo zadat křivku HRR v závislosti na čase pomocí textového souboru. Výsledné HRR však nezahrnuje podmínky ventilace, jak je uvedeno výše. Ve Fluentu bylo nutné požár definovat pomocí tepelného zdroje s předepsaným tepelným tokem. Zadání tepelného toku bylo definováno do programu pomocí UDF (uživatelsky definovaná funkce). Výsledné HRR však program nezahrnuje. Tento případ je shodný s programem Autodesk CFD, kdy ale HRR je možné zadat přímo v závislosti na čase, ale výsledné HRR už program neřeší.

Druhým zkoumaným parametrem byla teplota. Všechny vybrané programy umí řešit teplotu plynů, ale teplotu konstrukce umí řešit pouze program FDS a Fluent. U varianty č. 1 jsou výsledné teploty plynů řešených programů podobné, kromě programu Phoenix, kde je teplota při maximální rychlosti uvolňování tepla mnohonásobně vyšší. Důsledek této odchylky se z časových důvodů nepodařilo zjistit, avšak program při výpočtu teploty uvažuje s podmínkami ventilace, a tedy teplota by měla být podobná jako u ostatních programů. U varianty č. 2 se liší program FDS od ostatních zkoumaných programů. Klesání teploty je důsledkem toho, že požár nemá dostatek kyslíku pro hoření a dusí se. Následkem toho vzniká velké množství kouře, ale teplota nestoupá. U ostatních programů má graf teploty plynů podobný průběh. Tento průběh je dán faktem, že tepelný zdroj („požár“) uvolňuje teplo dle definované křivky HRR bez zahrnutí ventilace. Teplo je tedy do místnosti uvolňováno po celou předepsanou dobu.

Následkem toho se horké plyny kumulují u stropní konstrukce a teplota při zvýšení rychlosti uvolňování tepla dále narůstá. Tento jev je však nepravděpodobný, jelikož bez přísunu kyslíku nemůže docházet ke spalování, a tedy k uvolňování tepla do okolí, jako tomu je u varianty č. 1.

Posledním zkoumaným parametrem byla výška kouřové vrstvy a viditelnost. Pro posouzení bezpečné evakuace je vhodným kritériem výška kouřové vrstvy, která nesmí být menší než 2 m nad podlahou dle ČSN 73 0802. Tento parametr nebyl posuzován, jelikož jediný program, který umí řešit výšku kouřové vrstvy je FDS. Ostatní programy umí hmotnostní zlomek kouře a u většiny programů lze zjistit viditelnost. Z tohoto důvodu byla zkoumaným parametrem stanovena viditelnost. Průběhy grafů viditelnosti byly u všech programů relativně podobné, jelikož z pohledu matematického základu řeší všechny zkoumané programy viditelnost na stejném výpočetním principu. Odlišnost viditelnosti však byla zaznamenána v počátku. Limitní hodnota pro maximální počáteční viditelnost je u programů FDS a Phoenics nastavena na 30 m. Kdežto u programů Fluent a Autodesk CFD není vůbec, nebo je jinak nastavena tato hodnota. Dalším poznatkem zkoumání je, že program Fluent neřeší viditelnost, ale pouze hmotnostní zlomek produktů hoření. Pro získání průběhu viditelnosti bylo nutné tento parametr dopočítat z výsledného hmotnostního zlomku. Počáteční viditelnost při přepočítání dosahovala neomezené viditelnosti, ale pro porovnání průběhů grafů byla omezena na 50 m. Trochu odlišný průběh viditelnosti má také program Phoenics u varianty č.1. Odlišnost může být přisuzována faktu, že výpočet produkce kouře vychází ze stechiometrického poměru, který udává poměr pro dokonalé spalování. Při dokonalém spalování je tvorba kouře menší a nedochází k tvorbě hustého kouře, jako tomu je u nedokonalého spalování. Z tohoto důvodu je viditelnost v místnosti větší a průběh se tak liší od ostatních programů, které uvažují s nedokonalým spalování.

Zadávání parametrů pro modelování kouře se v každém programu lišilo. V programu FDS se hodnoty pro tvorbu kouře samy předdefinovaly na základě výběru reaktantu. U programu Phoenics bylo nutné zadat spalné teplo, výtěžek produktů spalování a hmotnostní specifický extinkční koeficient. Výtěžek produktů spalování a hmotnostní specifický extinkční koeficient spolu se stálou viditelností bylo nutné zadat v programu Autodesk CFD. Nejvíce komplikované zadávání pro tvorbu kouře bylo v programu Fluent. Zde bylo nutné nejprve vypočítat rychlost uvolňování kouře na základě křivky HRR, viz (5.21). Zadávání rychlosti uvolňování kouře v závislosti na čase bylo stejné jako u rychlosti uvolňování tepla, pomocí funkce UDF.

5.4.2 Zhodnocení vybraných CFD programů

Program FDS

Pro řešení zadaného příkladu byla užita grafická nadstavba Pyrosim. Z hlediska ovladatelnosti je Pyrosim poměrně snadným programem pro řešení požárních scénářů. Na webových stránkách je snadné dohledat podrobný návod k ovládání programu a také výuková videa. Pokud program neumožňuje nastavení konkrétního řešení, je možné aktivovat textový soubor programu a konkrétní příklad zapsat pomocí zdrojového kódu. Manuál pro zadávání zdrojových kódů v programu FDS je volně dostupný na stránkách programu. Program umožňuje nastavit průběhy požáru na základě různého nastavení HRR nebo pomocí chemické reakce. V programu lze vytvářet geometrii nebo ji importovat z programu CAD, nastavovat vlastnosti materiálů v závislosti na teplotě, přidávat měřicí body pro zkoumání různých parametrů (tj. teplota plynů a konstrukce, výška kouřové vrstvy, koncentrace produktů spalování, HRR, rychlosti proudění, tlak a další). Je možné také simulovat potlačení požáru pomocí sprinklerů, ale tuto funkci v současné

době moc CFD programů nenabízí. Vizualizace výsledků je pro FDS možná v programu Smokeview. Program FDS lze propojit také s program Pathfinder, který slouží k modelování a posuzování evakuace.

Omezení má program FDS několik. Prvním omezením je řešení toku tekutin pouze s nízkou rychlostí, tedy Machovým číslem menším než 0,3 (rychlost cca 367,5 km/h). Toto omezení tak vylučuje používání modelu pro řešení scénáře zahrnujícího rychlosti toku, které se blíží rychlostem zvuku, tj. řešení explozí, detonace nebo proudových požárů pod vysokým tlakem. Tyto scénáře však umí řešit programy in:Flux, Flacs a Kameleon KFX.

Dalším omezením je tvorba výpočetní sítě. FDS umí modelovat pouze pravoúhlou síť, a tedy při řešení zakřivených nebo zaoblených tvarů dochází k nepřesnostem. Toto omezení limituje modelovat požární scénáře například v tunelech.

Předpověď růstu a šíření požáru je další omezená schopnost programu. Pokud je uvedena rychlost uvolňování tepla, přenos tepla a očekávaným výsledkem je tvorba produktů hoření, jsou výsledné hodnoty rychlosti toku a teploty přesné v rozmezí 10 % až 20 % v porovnání s experimenty. Pokud je však rychlost uvolňování tepla pouze předpovídána, dochází následně ve výsledcích k větším chybám. Důvodem jsou skutečné vlastnosti materiálů, které jsou neznámé nebo je obtížné je dohledat a dále pak fyzikální procesy spalování a přenosu tepla v pevné fázi jsou komplikovanější než v matematickém zápisu tohoto programu.

Dalším omezením je spalování. Program FDS uvažuje spalovací model založený na smíchaných druzích paliv. Předpokládá, že reakce paliva a kyslíku je nekonečně rychlá bez ohledu na teplotu. Pro velké a dobře větrané požáry je tento předpoklad správný. Pro požáry v neodvětraných podmínkách, nebo pokud je zavedeno potlačující činidlo, dochází v modelu k ukončení výpočtu po vyčerpání vzduchu, který obklopuje oheň a nemůže tak udržet spalování.

Co se týče využitelnosti, lze program využít pro řešení běžných požárních situací, návrhu nebo posouzení konstrukcí a požárně bezpečnostních zařízení. Je možné program využít k posouzení evakuace společně s programem Pathfinder. Z hlediska zakřivené nebo zaoblené geometrie lze program využít pro prvotní a zjednodušené výpočty.

Program Phoenix/Flair

Pro modelování požáru byl použit program Phoenix/Flair, který je jedním z více produktů Phoenix. Pro zjištění funkcí a zorientování se v programu slouží výukový příklad, který je na stránkách volně přístupný. Manuál programu obsahuje různé typy řešených příkladů, které pomohou uživateli s nastavením a modelováním určitého scénáře. Oproti předešlému programu FDS je ovladatelnost programu lehce složitější. Například zmíněné zadávání hodnot pro tvorbu kouře, které FDS řeší automaticky, vyžaduje znalosti v oblasti dynamiky požáru. Výhodou tohoto programu je komunikativnost s podporou programu. V případě nevědomosti nebo nemožnosti modelování je možné se obrátit na podporu programu. Tvůrci programu reagují okamžitě a snaží se uživateli pomoci s konkrétní problematikou. Tyto služby jsou však podmíněny koupením si podporované verze programu. Hlavní výhodou programu je možnost využití různých druhů výpočetních sítí. Síť se generují automaticky, ale je možné je upravovat. Další výhodou programu je knihovna s různými prvky, které lze využít pro tvorbu geometrie. Tyto prvky už obsahují i okrajové podmínky, ale je možné je nastavit nebo matematicky popsat. Další výhodou

programu je zahrnutí jevů, jako jsou vytápění, větrání, klimatizace, uvolňování chemikálií a zatížení konstrukce větrem, které mohou požár ovlivňovat.

Limitem je už zmiňovaná výška kouřové vrstvy. Tento parametr program neřeší, je možné zjistit pouze hmotnostní zlomek kouře a viditelnost. Dále program neumí simulovat vedení tepla uvnitř konstrukce, potlačení požáru, tepelné záření a výbuch.

Limitem je též už zmiňovaná rychlost uvolňování tepla. Phoenics/Flair ve výpočtu HRR neuvažuje s podmínkami ventilace, a tedy dochází k hoření i v případě nedostatečného přísunu kyslíku. Tento jev však neodpovídá skutečné situaci. Při nedostatečném přísunu kyslíku by se požár začal dusit až by došlo k jeho uhasnutí.

Využitelnost programu vzhledem k jeho možnostem modelování je především k zjišťování koncentrace toxických plynů, šíření kouře a předběžnému rozložení teplot v budově. Dále je možné program využít k návrhu větrání. Jelikož program umožňuje využít různé typy výpočetní sítě, lze požární scénáře řešit u modelů se zakřivenou nebo zaoblenou geometrií.

Program Ansys Fluent

Program Fluent patří mezi všeobecné CFD programy, které lze využít pro různá odvětví, tj. automobilový průmysl, letectví, chemický průmysl atd. Všeobecnost programu se odráží v jeho ovladatelnosti. Obsáhlost programu znemožňuje uživateli rychlé a snadné použití. Při modelování požáru je nutné nastavit pro každý objekt místnosti (okna, dveře, zdi, strop, podlaha a tepelný zdroj) počáteční a okrajové podmínky, fyzikální vlastnosti, materiály s vlastnostmi závislými na teplotě, tepelný tok a tvorbu kouře definovat pomocí uživatelsky definované funkce. Výhodou programu je možnost modelování jakýkoliv tvarů. Výpočetní síť se vytvoří automaticky a přizpůsobí se těmto tvarům. Další výhodou je možnost modelovat potlačení nebo detekci požáru a také vedení tepla v pevných látkách.

Omezením programu je nutnost nastavení přítoku a odtoku vzduchu pro otvory. Je možné nastavit pro otvor přítok a pro druhý otvor odtok, ale nelze obě vlastnosti přiřadit jednomu otvoru. Tímto nastavením se model odchyluje od skutečných podmínek. V reálné situaci by docházelo ve spodní části otvoru k přívodu vzduchu a v horní části otvoru k odvodu kouře. Dalším omezením je stejně jako u programu Phoenics hoření dle zadaného průběhu bez závislosti na přívodu kyslíku. I v tomto případě dochází k hoření i v případě nedostatečného přísunu kyslíku. Dalším limitem je nemožnost simulovat šíření požáru a výbuch. Požár v programu je uvažován jako objekt s předepsaným tepelným tokem.

Program Fluent je obecným programem a lze ho využít v různých odvětvích, převážně v průmyslu. Co se týče oblasti požárního inženýrství, je využitelnost programu malá. Program je možné využít k zjišťování rozložení teplot nebo šíření kouře, návrhu hasicích zařízení, případně návrhu zařízení pro detekci požáru nebo požárního odvětrání. Tento program je možné využít pro jakoukoli geometrii modelu.

Autodesk CFD

Stejně jako Ansys Fluent spadá program Autodesk CFD do skupiny CFD programů, jež mají všeobecné využití. Ovladatelnost programu je podobná jako v programu Fluent. Uživatel musí při modelování požáru nastavit pro každý objekt místnosti (okna, dveře, zdi, strop, podlaha a tepelný zdroj) počáteční a okrajové podmínky, fyzikální vlastnosti, materiály s vlastnostmi závislými na teplotě. Výhodou oproti Fluentu je možnost definování rychlosti uvolňování tepla v závislosti na teplotě přímou cestou v programu. Dále program umožňuje nastavit vlastnosti pro tvorbu kouře z hlediska spalování a viditelnosti. Oproti Fluentu je patrné, že Autodesk CFD obsahuje funkce pro posuzování požárních scénářů. Výhodou je také výpočetní síť, která se přizpůsobí jakýmkoliv tvarům. Nevýhodou tohoto programu je nemožnost modelování geometrie přímo v programu. Pro tvorbu geometrie je nutné doinstalování modelovacího programu nebo importovat geometrii z programu CAD. Autodesk CFD podporuje velké množství CAD formátů.

Omezení programu jsou stejná jako u Fluentu. Program umožňuje nastavení buď přítoku nebo odtoku vzduchu, ale není možné přiřadit obě funkce jednomu objektu. Dalším omezením je hoření dle zadaného průběhu HRR i za předpokladu vyčerpání kyslíku v místnosti. A dále nemožnost simulovat šíření a výbuch. Stejně jako u Fluentu má daný objekt představující požár předepsanou rychlost uvolňování tepla.

Využitelnost programu je podobná jako u programu Fluent. V oblasti požárního inženýrství je možné zkoumat rozložení teplot a šíření kouře v modelu, navrhovat požární odvětrání a posuzovat viditelnost v řešeném modelu. Stejně jako v programu Fluent lze řešit scénáře v jakkoliv složité geometrii.

SMARTFIRE

Dalším programem určeným k řešení požárních scénářů je program SMARTFIRE. Ovladatelnost programu je po prostudování výukového příkladu poměrně snadná. Geometrie se tvoří přímo v programu pomocí souřadnic. Vlastnosti materiálu lze upravit nebo přidat nový materiál. Pro řešení určitého scénáře je nutné nastavit geometrii, materiálové a fyzikální vlastnosti a definovat průběh rychlosti uvolňování tepla a kouře. Výpočetní síť se tvoří automaticky, ale je možné ji upravit.

Výhodou programu je možnost pozastavit výpočet a podívat se na výsledky v daném čase. Limitním prvkem programu je nemožnost modelování zaoblených a zakřivených tvarů. Program využívá pouze pravoúhlou síť. Dalším limitem je tvorba kouře. Uživatel musí znát průběh rychlosti uvolňování tepla nebo si ho zjednodušeně dopočítat, pokud tedy nevyužívá model spalování.

Využitelnost programu SMARTFIRE je velice podobná program FDS. Oba programy využívají pravoúhlou výpočetní síť, tudíž řešení složité geometrie v podobě zakřivených nebo zaoblených tvarů je pouze orientační a nelze ho považovat za přesné. Oproti FDS však program zatím neumí řešit potlačení požáru. V programu lze řešit jak požární bezpečnost staveb, tak evakuaci v propojení s programem Exodus.

in:Flux

Dalším programem pro modelování požárních scénářů je in:Flux. Tento program je spíše zaměřen na řešení požárů u průmyslových objektů a rafinérií. Dokáže řešit únik plynů a jeho rozptyl, proudové požáry pod vysokým tlakem, požáry kapalin, definovat oblak možného výbuchu a dále zobrazit dopady na konstrukce. Co se týče ovladatelnosti, patří in:Flux mezi snadno ovladatelné programy, kde není třeba mít znalosti v oblasti dynamiky požáru. Všechny okrajové a fyzikální podmínky včetně tvorby výpočetní sítě si program nastavuje na pozadí. Proto je práce v tomto programu snadná a rychlá oproti programům Fluent nebo Autodesk CFD. Geometrii lze v programu vytvořit nebo v importované geometrii něco upravit nebo přidat, avšak na velké modelování tento program není. Výhodou programu je už zmíněná ovladatelnost, která je velice snadná. Pro řešení různých scénářů jsou na stránkách programu výukové příklady. Další výhodou tohoto programu je možnost modelovat požáry unikajících plynů pod vysokým tlakem, rozptyl plynů, požáry unikajících kapalin, zobrazení oblaku tepelného toku různých hodnot nebo oblaku možného výbuchu. Tyto možnosti hodnocení nedokáže řešit například program FDS, který je nejvíce užívaným programem v požárním inženýrství. FDS umí řešit pouze tok tekutin s nízkou rychlostí, která nestačí pro řešení možného úniku plynu pod vysokým tlakem nebo řešení výbuchu.

Nevýhodou programu je nemožnost modelování scénářů, kde není modelován přívod a odvod vzduchu. Program je spíše přizpůsoben k modelování požárů ve venkovním prostředí. Dalším omezením programu jsou možnosti zadávaných hodnot. Například rychlost uvolňování tepla program nenabízí. Je zde možnost definovat teplotu proměnou v čase nebo tlak.

Využitelnost tohoto programu je především v oblasti průmyslových staveb. Tento program je vhodný pro řešení havárií v podobě úniků plynů nebo kapalin a následných dopadů na okolí. Program lze využít pro řešení požárů plynů nebo kapalin, výbuchu, posuzování rozptylu plynu a ohrožení okolí na základě tepelných toků.

Pro celkové zhodnocení analyzovaných programů bylo provedeno subjektivní hodnocení z hlediska ovladatelnosti, funkčnosti, obsáhlosti funkcí a dostupnosti. Hodnocení je uvedeno v tabulce č. 10 a řeší obtížnost z hlediska ovladatelnosti a funkčnosti programu, dobu výpočtu jednotlivých programů, kvalitu simulace požáru a hodnotí množství možných výstupů. Dále je uvedena cena těchto programů, ke které je při konečném vyhodnocení přihlédnuto. Číselné hodnocení jednotlivých kritérií je uvažováno od nejpříznivějšího (1) po nedostačující (5). Poslední řádek tabulky uvádí pořadí jednotlivých programů.

Tab. 10: Vyhodnocení analyzovaných CFD programů

<i>Kritéria</i>	<i>FDS</i>	<i>Phoenics</i>	<i>Ansys Fluent</i>	<i>Autodesk CFD</i>	<i>SMART-FIRE</i>	<i>in:Flux</i>
<i>Ovladatelnost</i>	<i>Střední</i> (3)	<i>Střední</i> (3)	<i>Náročná</i> (5)	<i>Náročná</i> (5)	<i>Poměrně snadná</i> (2)	<i>Snadná</i> (1)
<i>Zadávání geometrie</i>	<i>Střední</i> (3)	<i>Snadné</i> (3)	<i>Střední</i> (3)	<i>Střední*</i> (5)	<i>Snadné</i> (1)	<i>Obtížné</i> (4)
<i>Množství zadávaných vstupů</i>	<i>Střední</i> (3)	<i>Střední</i> (3)	<i>Vysoké</i> (5)	<i>Vysoké</i> (5)	<i>Střední</i> (3)	<i>Minimální</i> (1)
<i>Výpočetní síť</i>	<i>Snadná</i> (1)	<i>Obtížné</i> (4)	<i>Střední</i> (3)	<i>Obtížné</i> (4)	<i>Střední</i> (3)	<i>Snadné – řeší sám</i> (1)
<i>Doba výpočtu</i>	<i>Střední</i> (3)	<i>Střední</i> (3)	<i>Dlouhá</i> (4)	<i>Střední</i> (3)	<i>Střední</i> (3)	<i>Krátká</i> (1)
<i>Simulace požáru</i>	<i>Vynikající</i> (1)	<i>Dobrá</i> (3)	<i>Špatná</i> (5)	<i>Špatná</i> (5)	<i>Výborná</i> (2)	<i>Dobrá</i> (3)
<i>Množství výsledných hodnot</i>	<i>Chvalitebné</i> (2)	<i>Uspokojivé</i> (4)	<i>Uspokojivé</i> (4)	<i>Dobré</i> (3)	<i>Dobré</i> (3)	<i>Uspokojivé</i> (4)
<i>Cena</i>	<i>Zdarma</i>	<i>18 750/ 3 roky</i>	<i>336 045,33</i>	<i>61 842,5</i>	<i>47 373,94</i>	<i>Dle nabídky*</i>
<i>Hodnocení (pořadí)</i>	<i>1.</i>	<i>3.</i>	<i>5.</i>	<i>4.</i>	<i>2.</i>	<i>3.</i>
<i>Poznámky:</i>						
<i>*) Distributor nepodal bližší informace</i>						

Po zhodnocení všech uvedených kritérií v tabulce je patrné, že nejlepším programem pro simulování požáru je program FDS. Oproti tomu program Fluent vyšel na základě stanovených kritérií a ilustrovaného příkladu jako nejhorší. Tento výsledek lze přisoudit k faktu, že Fluent je všeobecný program a není zaměřen pouze na oblast požárního inženýrství jako program FDS. Program FDS se zabývá požární problematikou, kde všechny jeho funkce jsou zaměřeny na vlastnosti spojené s požárem. Proto ovladatelnost a modelování požáru v programu je poměrně snadné a výsledné hodnoty se zdají být podobné reálné situaci. Tomu například odpovídají výsledné hodnoty HRR, kdy program uvažuje při hoření s přísunem kyslíku, kdežto jiné programy simulují požár podle zadaných dat bez ohledu na podmínky ventilace. Druhým nejlépe hodnoceným programem je program SMARTFIRE. Tento program se svojí funkčností a vizualizací výsledků blíží programu FDS, avšak zatím nedisponuje takovým množstvím funkcí jako právě zmiňovaný program. Například funkce hašení požáru zatím v programu chybí. Dále je nutné pro užívání programu zakoupit roční licenci, což u FDS není zapotřebí. Dalšími programy v pořadí jsou in:Flux a Phoenix. Program in:Flux sice disponuje jednoduchou ovladatelností, avšak to má dopad na variabilitu zadávaných dat a simulaci různých požárních scénářů jako například v programu FDS. Na rozdíl od FDS program disponuje funkcemi jako je například řešení rozptylu plynů nebo výbuchu. Program Phoenix na rozdíl od FDS využívá různé druhy výpočetní sítě, ale množství výstupních hodnot je poměrně malé. Nevýhodou programu je, že pokud uživatel chce zjistit přesná výstupní data, která program prezentuje jen okrajově, musí využít jiný z programů řady Phoenix. Například pro stanovení HRR s uvažováním přísunu kyslíku je nutné použít program Core Phoenix. Předposledním programem je Autodesk CFD, který je všeobecným programem jako program Fluent. Ovladatelnost a množství zadávaných dat je podobné, avšak v Autodesku CFD oproti Fluentu jsou částečně zahrnuty funkce pro řešení požárních scénářů. Programu Fluent, který v tomto hodnocení je uvažován jako nejhorší, je na rozdíl od programů FDS a SMARTFIRE programem všeobecným. Tento program je vhodné využít pro průmysl nebo strojírenství než pro požární oblast. Z hlediska požáru lze zkoumat jen pár kritérií, které jsou uvedeny v podkapitole 5.4.2. Co se týče modelování v programu je nutné pro simulaci zadat větší počet vstupních údajů, požár je simulován pomocí tepelného zdroje, který nezahrnuje podmínky ventilace, výpočetní čas je delší a cena za roční licenci je vysoká.

Toto zhodnocení je však subjektivní a nemusí vykazovat skutečnou hodnotu. Vliv na hodnocení mohou mít předchozí zkušenosti uživatele s programy CFD, znalosti v této oblasti nebo preference uživatele.

6 Analýza požární odolnosti konstrukce

Součástí návrhu požární bezpečnosti staveb je posouzení navržených konstrukcí na účinky požáru. Pro posouzení požární odolnosti konstrukce je zapotřebí znát její teplotní zatížení. Tato kapitola je zaměřena na stanovení teploty konstrukce vycházející z teploty plynů v okolí. Výpočtem této problematiky se zabývá Eurokód ČSN EN 1991-1-2, kde jsou vztahy pro výpočet teploty konstrukce uvedeny. Dále je v kapitole řešena teplotní analýza stropní konstrukce místnosti, řešené v kapitole 5.

6.1 Metody stanovení teplotního zatížení konstrukcí

Pro stanovení teploty v požárním úseku je možné využít různé metody, které jsou uvedeny v eurokódu ČSN EN 1991-1-2.

První možností pro stanovení teploty je možné využití nominálních teplotních křivek. Může se jednat o normovou teplotní křivku, křivku vnějšího požáru nebo uhlovodíkovou křivku. Normovou teplotní křivku lze užít v případě požáru např. dřeva, křivka vnějšího požáru se využívá v případech požáru fasády a uhlovodíková křivka se užívá při požáru např. benzínu nebo nafty. Omezením těchto křivek je stálý nárůst a nezahrnutí fáze chladnutí. Tento fakt vede ke konzervativnímu stanovení teplotního zatížení.

Druhou možností je užití parametrické křivky. Tato křivka oproti nominálním teplotním křivkám zahrnuje fázi chladnutí a také uvažuje s podmínkami odvětrání. Avšak stejně jako u nominálních křivek vypočtené teplotní zatížení neodpovídá reálné situaci, jelikož tyto teplotní křivky nezahrnují fázi rozvoje požáru, ale uvažují s teplotním zatížením od fáze vzplanutí (flashover). Omezením parametrické křivky je užití do 500 m² podlahové plochy požárního úseku.

Další variantou určení teplotního zatížení je užití zónových modelů. Tyto modely se řadí do tzv. zdokonalených modelů požáru. Zónové modely se dělí na jednozónové a dvouzónové modely. Jednozónový model představuje požární úsek, který je v celé míře zakouřený horkými spalinami hoření. Teplota vychází z rovnice zachování hmoty a energie, výměny hmoty mezi vnitřním a vnějším plynem a ohněm a z výměny energie mezi ohněm, vnitřním plynem, stěnami a otvory.

Dvouzónový model představuje požární úsek, který je rozdělen na zónu horkých spalin, nacházející se v horní části místnosti, a zónu studenou, která neobsahuje produkty hoření a nachází se zde čerstvý vzduch. Dle Eurokódu je požární úsek definován horní a dolní vrstvou, ohněm a jeho oblakem hořících plynů, venkovními plyny a stěnami. Tento model představuje fázi před vzplanutím, tedy fázi rozvoje požáru.

Poslední možností určení teplotního zatížení požárního úseku je využití dynamických modelů kapalin a plynů tzv. CFD modelů. CFD modely se stejně jako zónové modely řadí do kategorie zdokonalených modelů požárů. Tyto modely zahrnují všechny fáze požáru a výsledné hodnoty se tak blíží reálným. CFD modely zahrnují ve výpočtu rovnice zachování hmoty, hybnosti a energie. [54]

6.2 Stanovení teploty konstrukce

Pro stanovení teploty konstrukce z okolní teploty je možné využít buď rovnice z Eurokódu ČSN EN 1991-1-2 nebo využít program, který je na těchto rovnicích založen. V ČSN EN 1991-1-2 je stanovení teploty konstrukce řešeno z následujících vztahů: [54]

$$h_{\text{net}} = h_{\text{net,c}} + h_{\text{net,r}} \quad (6.1)$$

kde $h_{\text{net,c}}$ je složka čistého konvekčního tepelného toku, který je dán vztahem: [54]

$$h_{\text{net,c}} = \alpha_c (\Theta_g - \Theta_m) \quad (6.2)$$

kde α_c je součinitel přestupu tepla prouděním, Θ_g je teplota plynů a Θ_m je povrchová teplota prvku [54]

$h_{\text{net,r}}$ je složka čistého sálavého tepelného toku, který je dán vztahem: [54]

$$h_{\text{net,r}} = \varnothing \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4] \quad (6.3)$$

kde \varnothing je polohový faktor, ε_m je emisivita prvku, ε_f je emisivita požáru, σ je Stephan-Boltzmanova konstanta a Θ_r je teplota sálání prostředí požáru [54]

6.3 Teplotní analýza stropní konstrukce

Teplotní analýza byla provedena pro stropní konstrukci nacházející se nad požárním úsekem řešené místnosti v kapitole 5. Ze zmíněné kapitoly byla také převzata geometrie, materiálové vlastnosti a výsledné hodnoty.

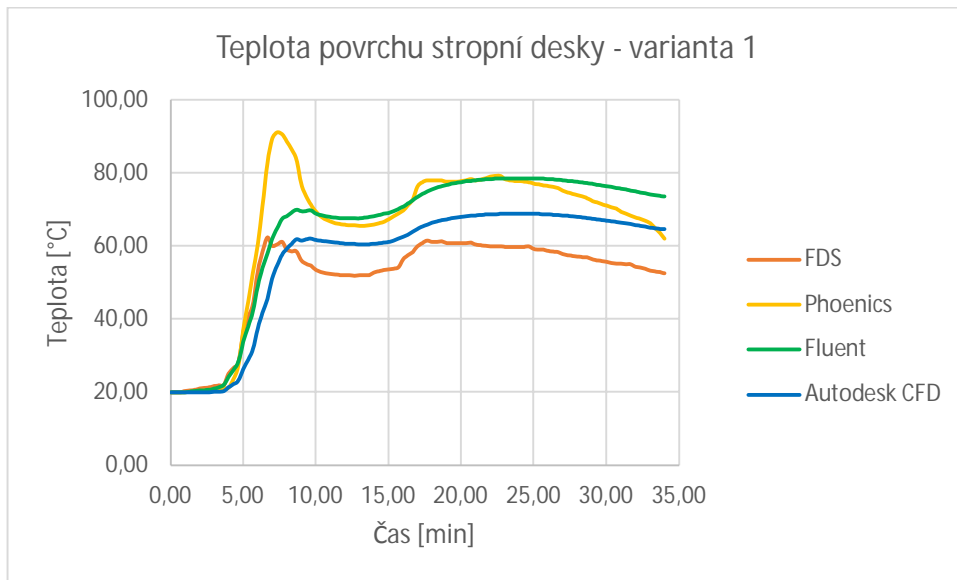
Jedná se o železobetonovou desku tloušťky 200 mm. Materiálové vlastnosti zůstaly stejné, jaké byly uvažovány v kapitole 5. Počáteční vlhkost betonu byla uvažována 2,25 % objemu betonu, počáteční objemová hmotnost betonu 2300 kg/m³ a dále byla uvažována horní mez tepelné vodivosti. Součinitel tepelné vodivosti byl uvažován dle ČSN EN 1991-1-2 jako $\alpha = 35 \text{ W/m}^2\text{K}$. Počáteční teplota byla uvažována 20°C.

Jelikož většina z programů neumožňovala zkoumat teplotu konstrukce, bylo nutné pro zkoumání povrchové teploty stropní desky použít program TempAnalysis_s. Tento program se využívá k teplotní analýze obdélníkových průřezů vystavených účinkům požáru. Řešení programu je založeno na vztazích vycházejících z ČSN EN 1991-1-2. TempAnalysis_s pracuje na základě dvou vstupních parametrů. První vstup je materiál, který se zadává pomocí materiálových charakteristik. To umožňuje v programu řešit průřezy libovolného materiálu. Druhým vstupem je teplotní zatížení. Teplotní zatížení může být definováno pomocí normové nebo parametrické teplotní křivky nebo pomocí průběhu teplot vygenerovaných jiným programem.

V tomto případě byly hodnoty průběhu teplot při požáru u stropní desky převzaty z výsledků posuzovaných CFD programů v kapitole 5. Materiálové vlastnosti definované v programu jsou uvedeny v odstavci výše a kapitole 5.2.

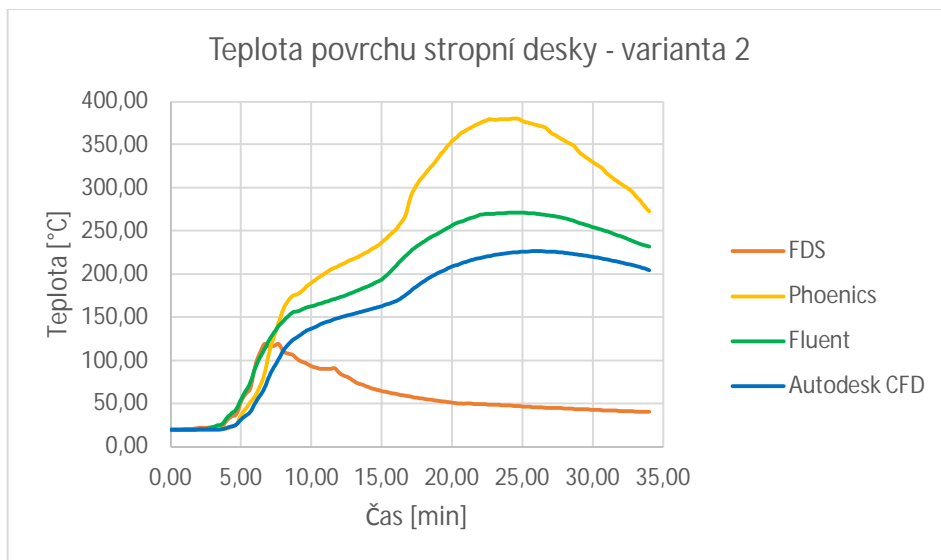
Na grafech níže jsou zobrazeny průběhy povrchových teplot stropní konstrukce pro variantu 1 a 2. Výsledné povrchové teploty vychází z průběhu teplot u konstrukce, které byly vyhodnoceny posuzovanými CFD programy.

Obr. č. 66 uvádí průběh povrchových teplot stropní konstrukce v případě, kdy je místnost odvětraná. Je zřejmé, že nejvyšší povrchová teplota je dosažena u programu Phoenics. Všechny výsledné průběhy teplot na povrchu desky se odvíjí od stanovených teplot plynů působící v okolí konstrukce. Důsledkem toho dochází k odchylkám u průběhů teplot na povrchu desky podobně jako u stanovených teplot plynů programy CFD.



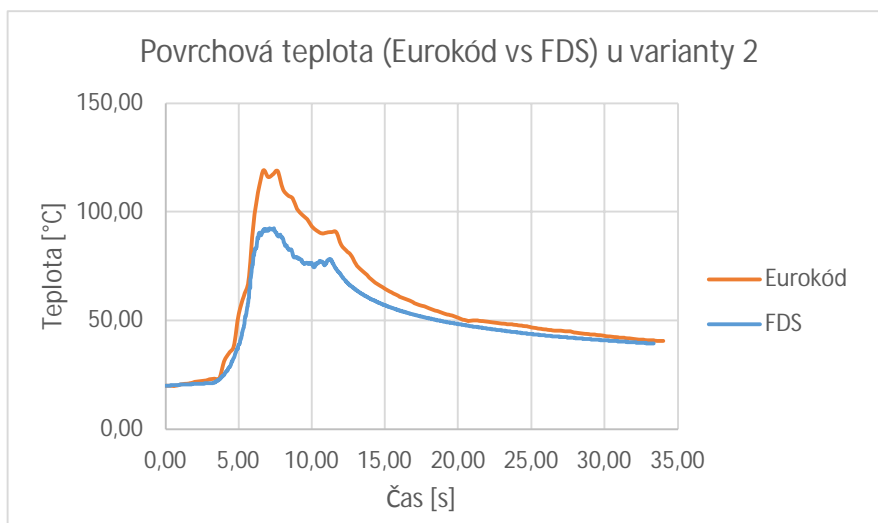
Obr. 66: Graf průběhů teplot u stropní konstrukce u varianty č. 1

Obr. č. 67 uvádí průběh povrchových teplot stropní konstrukce v případě, kdy je místnost neodvětraná. Stejně jako na obr. č. 66 jsou povrchové teploty ovlivněny teplotami u konstrukce stanovenými CFD programy. Pokles teplot u programu FDS je zapříčiněn uhasínajícím požárem, který nemá dostatek kyslíku pro hoření. Ostatní programy nezohledňovaly podmínky odvětrání pro hoření. Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, jednalo se o tepelné zdroje s definovaným tepelným tokem, které nezohledňovaly přísun vzduchu. Z tohoto důvodu povrchová teplota a teplota u konstrukce téměř celou dobu požáru vzrůstají.



Obr. 67: Graf průběhů teplot u stropní konstrukce u varianty č. 2

Následně byla provedena analýza pro stanovené teploty na povrchu konstrukce pomocí Eurokódu a programu FDS. Důvodem této analýzy bylo přezkoumání stanovení teplot na povrchu konstrukce pomocí různých metod (Eurokód a CFD program). Při porovnání výsledných průběhů teplot na povrchu konstrukce byly zaznamenány značné odchylky, viz obr. 68. Průběh teploty plynů v oblasti stropní desky, jež byl použit do výpočtu dle Eurokódu, vycházel z výsledků stanovených programem FDS. Materiálové charakteristiky betonu byly použity stejné v obou výpočetních metodách, avšak výsledné hodnoty se lišily. Důvodem je součinitel přestupu tepla. Eurokód [54] uvádí součinitele přestupu tepla pro normovou a parametrickou teplotní křivku. Pro normovou teplotní křivku (ISO- 834) je součinitel přestupu tepla roven 25 W/m²K. Pro parametrickou teplotní křivku je tento součinitel roven 35 W/m²K. Obě teplotní křivky však popisují plně rozvinutý požár (po flashoveru). V řešeném příkladu se ale jedná o lokální požár, a tedy nelze uvažovat součinitel přestupu tepla pro plně rozvinutý požár. [54]



Obr. 68: Graf porovnání povrchových teplot určených pomocí Eurokódu a programu FDS

Součinitel přestupu tepla je klíčovým parametrem pro stanovení tepelného toku vstupujícího do materiálu v podobě proudění. Tento součinitel je závislý na místní rychlosti, teplotě plynu a geometrii. Součinitele je možné vyjádřit pomocí následující rovnice: [5]

$$h = \frac{-k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)}{(T_s - T_\infty)} \quad (6.4)$$

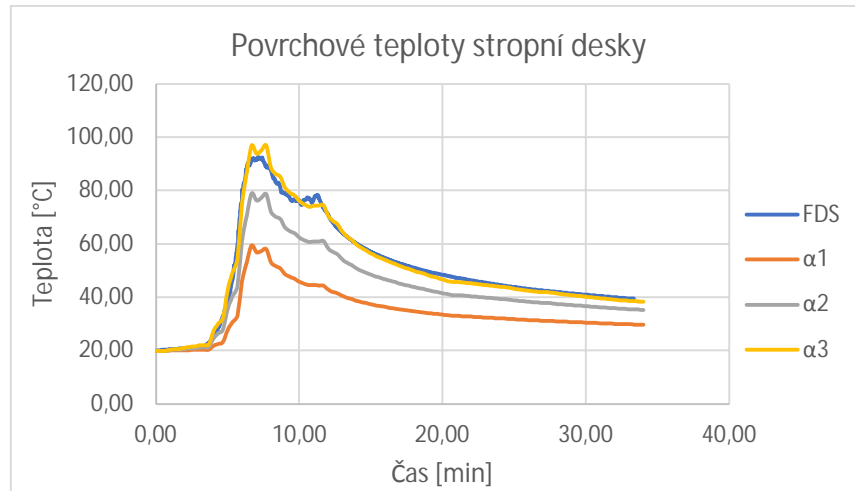
kde T je teplota, T_s je teplota povrchu [5]

Nebo ho lze získat pomocí experimentálních zkoušek (např. pomocí deskového senzoru). [5]

Program FDS stanovuje součinitel přestupu tepla na základě kombinace korelací přirozené a nucené konvekce, neboli teploty plynu a teploty stěny. Tento parametr však uživatel programu nemůže ovlivnit. [55]

Publikace [5] uvádí, že hodnota součinitele přestupu tepla pro zplodiny hoření v podobě plynů je uvažována 20 W/m²K. Tato hodnota je v publikaci použita pro výpočet odezvy sprinklerové hlavičky. Dále jsou tabulkově v publikaci [56] uvedeny hodnoty součinitele přestupu tepla pro plyny v rozmezí 2-25 W/m²K. Pro zjištění součinitele přestupu tepla, který byl uvažován programem FDS, byla provedena analýza. V první variantě byl součinitel uvažován

s hodnotou $35 \text{ W/m}^2\text{K}$, což odpovídá parametrické teplotní křivce, viz obr. 68. Následná analýza uvažovala s nižšími hodnotami součinitele přestupu tepla a to $\alpha_1 = 0 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_2 = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\alpha_3 = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$, viz obr. 69.



Obr. 69 Graf povrchových teplot stropní konstrukce s různými součiniteli přestupu tepla

Z uvedeného grafu je patrné, že při hodnotě $\alpha_3 = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$ je teplota povrchu stanovená Eurokódem shodná s teplotou povrchu stanovenou programem FDS. Z toho vyplývá, že program FDS uvažuje stejnou hodnotu součinitele přestupu tepla pro zplodiny hoření v podobě plynů, jako je uvedeno publikaci [5].

6.4 Zhodnocení teplotní analýzy

Pro stanovení povrchové teploty stropní konstrukce byl použit program TempAnalysis_s. Materiálové vlastnosti byly zadány stejné jako při modelování řešené místnosti v kapitole 5. Průběh teplotního zatížení u konstrukce byl převzatý z výsledků posuzovaných CFD programů.

Průběhy povrchových teplot posuzovaných programů jsou podobné jako průběhy teplot u konstrukce. Důvodem je závislost povrchové teploty na teplotě v okolí konstrukce. V obou případech, tj. u varianty 1 a 2 byla nejvyšší povrchová teplota dosažena u programu Phoenix. Nejnižší povrchová teplota byla dosažena u programu FDS, který zohledňuje v obou variantách podmínky odvětrání.

U varianty č. 2, kromě programu FDS, povrchové teploty téměř po celou dobu vzrůstají. Příčinou je tepelný zdroj, který nezohledňuje přísun kyslíku, a tedy uvolňuje stejný tepelný tok jako u varianty č. 1. Následkem toho dochází po celou dobu k produkci horkých plynů, které se kumulují u stropní konstrukce a tím konstrukci ohřívají. V případě FDS dochází k dušení požáru důsledkem nedostatku vzduchu v místnosti. Následkem toho nedochází k produkci tak horkých plynů jako u varianty č. 1, a proto průběh povrchové teploty klesá.

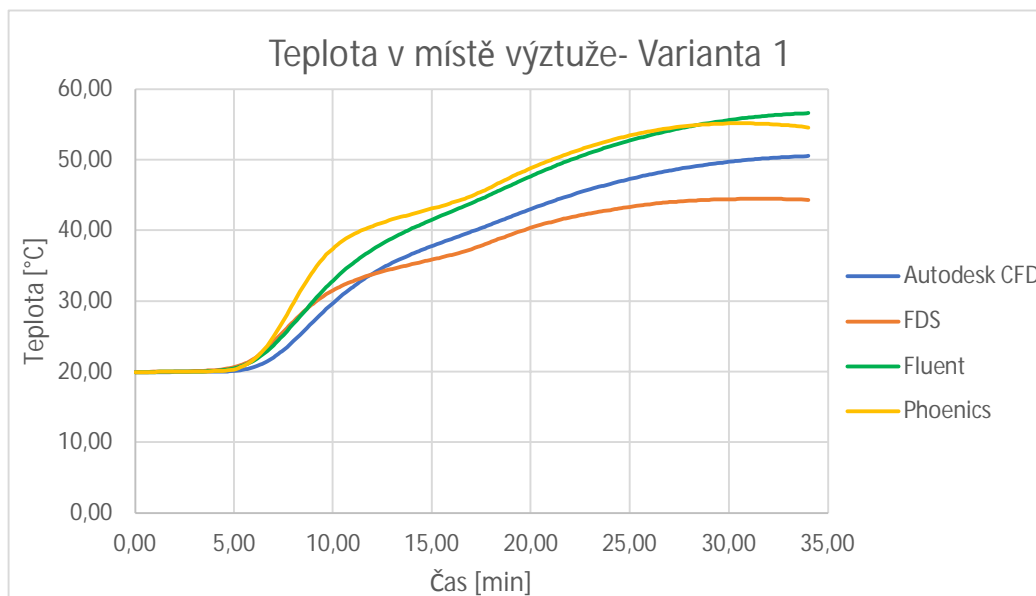
Pro porovnání stanovené teploty povrchu pomocí Eurokódu a CFD programu FDS byla provedena analýza. Při porovnání průběhů teplot stanovenými programem TempAnalysis_s a FDS byly zaznamenány značné odchylky. Důvodem byl součinitel přestupu tepla, který byl uvažován v programu TempAnalysis_s dle Eurokódu pro parametrickou teplotní křivku $35 \text{ W/m}^2\text{K}$. Následně při provedení analýzy bylo zjištěno, že při užití součinitele přestupu tepla s hodnotou $20 \text{ W/m}^2\text{K}$, která je uvedena v publikaci [5] při analýze odezvy sprinklerové

hlavice, se průběh teploty stanovené programem FDS téměř shoduje. Z tohoto poznatku vyplývá, že pro obecný požár je možné uvažovat s nižším součinitelem přestupu tepla, než je uveden pro parametrickou a normovou teplotní křivku.

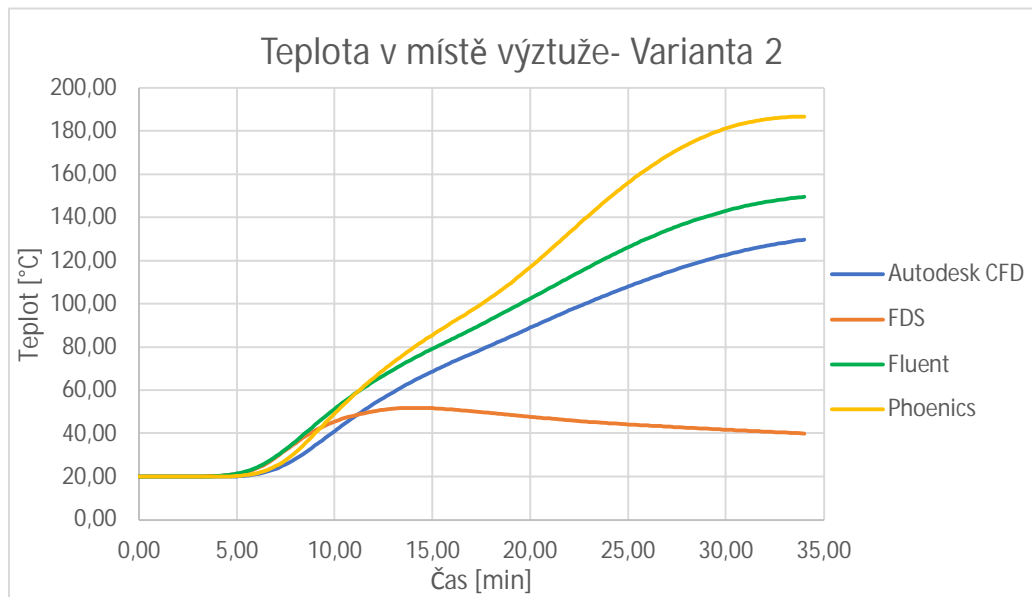
6.5 Analýza únosnosti stropní desky za požáru

Na základě průběhů teplot na povrchu konstrukce byla provedena analýza únosnosti ŽB stropní desky za požáru v posuzovaném požárním úseku. Cílem analýzy bylo prozkoumat, jak teploty u konstrukce ovlivní únosnost ŽB desky. Pro tuto analýzu byl proveden návrh železobetonové desky, který je uveden v příloze 2. Při stanovení teploty v místě výztuže byl využit, jako v předchozí podkapitole, program TempAnalysis_s. Materiálové vlastnosti betonu byly převzaty z kapitoly 5.

Grafy na obr. č. 70 a 71 zobrazují průběhy teplot v místě výztuže pro odvětranou a neodvětranou místnost. Tyto teploty byly stanoveny na základě teplotních průběhů u konstrukce vyhodnocenými CFD programy. Umístění výztuže vychází ze statického výpočtu v příloze 2, tj. ve vzdálenosti 25 mm od povrchu stropní desky do středu výztuže.



Obr. 70: Graf průběhů teplot v místě výztuže (25 mm od povrchu) u varianty č. 1



Obr. 71: Graf průběhů teplot v místě výztuže (25 mm od povrchu) u varianty č. 2

Z výše uvedených grafů je patrné, že teploty v místě výztuže dosahují relativně nízkých hodnot. Únosnost stropní desky po celou dobu požáru bude vyhovující i u modelu bez odvětrání, jelikož pevnost výztuže se při takto nízkých teplotách téměř nezmění. Důvody rozdílných průběhů teplot u jednotlivých programů je stejný jako v podkapitole 6.4

6.6 Zhodnocení analýzy únosnosti

Analýza únosnosti ŽB stropní desky byla řešena pro obě varianty. Pro analýzu byl proveden statický návrh ŽB stropní desky, který je uveden v příloze 2. Pro posouzení únosnosti byly stanoveny teploty v místě výztuže pomocí programu TempAnalysis_s. Materiálové vlastnosti betonu byly uvažovány z kapitoly 5. Následné posouzení únosnosti stropní desky bylo zhodnoceno na základě dosažených teplot v místě výztuže, tj. 25 mm od povrchu stropní desky. Jelikož teploty v místě výztuže u obou varianty dosahovaly poměrně nízkých teplot, které téměř neovlivní pevnost výztuže, je únosnost stropní desky vyhovující po celou dobu požáru.

Z výsledných průběhů teplot, jak v místě výztuže, tak na povrchu stropní desky vyplývá, že volba programu ovlivňuje nejen výstup stanovených teplot, ale zároveň i posouzení konstrukce na účinky požáru. Proto je důležité zvolit správný výpočetní program, detailně promyslet, co se bude počítat, jakou metodu výpočtu zvolit, jaké hodnoty pro výpočet lze použít.

7 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na výpočetní modely CFD pro modelování požáru, které jsou nejvíce využívaným nástrojem v požárním inženýrství a jsou budoucností pro navrhování požární bezpečnosti staveb. Cílem práce byla analýza a porovnání vybraných CFD programů v návaznosti na jejich funkčnost, ovladatelnost, použitelnost a na posouzení konstrukcí za požáru.

Teoretická část práce se zabývala modely požáru a jejich rozdělením, popisem CFD modelů a jejich vývojem, využitím v požární bezpečnosti staveb a limity. V této části byly také popsány stěžejní složky pro řešení požárního scénáře v CFD programech. Jednalo se o výpočetní síť, okrajové a počáteční podmínky a matematický základ. Dále se práce zabývala popisem aktuálně dostupných CFD programů pro modelování požáru a jejich vyhodnocení z hlediska zjištěných funkcí a uživatelského rozhraní. Popisovanými parametry u jednotlivých programů byly tvorba geometrie, podpora jiných programů pro import geometrie do programu, možnosti zadávání okrajových podmínek a výpočetní sítě, řešení výpočtu a turbulence v programu a vizualizace výsledků. Pro zhodnocení programů byly vybrány funkce související s požárem, tj. simulace požáru, koncentrace toxických plynů, šíření kouře, proudění, tepelné záření, chemické reakce, výbuch, a parametry z hlediska ovladatelnosti a uživatelského rozhraní. Následně byl sestaven žebříček popisovaných programů na základě obsáhlosti jejich funkcí.

Hodnocení CFD programů na základě obsáhlosti funkcí je zavádějící a může se změnit při řešení konkrétního scénáře. Proto pro porovnání programů byly v praktické části práce navrženy dva požární scénáře se zdrojem požáru s předepsanou rychlostí uvolňování tepla a zvolenými zkoumanými parametry.

Praktická část byla zaměřena na analýzu zvolených CFD programů. Ve vybraných CFD programech byly namodelovány dvě varianty místnosti, které se od sebe lišily způsobem odvětrání. První varianta byla místnost odvětraná okny a dveřmi. Druhá varianta místnosti byla zcela neodvětraná. Konstrukce místnosti byly tvořeny ze železobetonu, pro které v každém programu byly nastaveny jejich charakteristické vlastnosti v závislosti na teplotě. Zdrojem požáru v místnosti byl dřevěný stůl s předepsanou rychlostí uvolňování tepla stanovenou SBI zkouškou. Stanovené hodnoty rychlosti uvolňování tepla dřevěného stolu sloužily jako vstupní údaj pro zdroj požáru ve výpočetních programech. Následně se do modelů umístily měřící body pro sledování zvolených parametrů. Sledovanými parametry byly rychlost uvolňování tepla, teplota u stropní konstrukce a koncentrace toxických plynů v návaznosti na viditelnost. Tyto sledované parametry jsou hlavními kritérii při posuzování požární bezpečnosti staveb. Z dat simulace byly vytvořeny výsledné grafy, které sloužily pro porovnání a zhodnocení analyzovaných CFD programů. Poměrně značné odchylky byly zaznamenány ve výsledných grafech u varianty bez odvětrání. U rychlosti uvolňování tepla bylo patrné, který z programů uvažuje při výpočtu podmínky ventilace. Tento jev se následně projevil u sledovaného parametru, kterým byla teplota u stropní konstrukce. Zde se výsledky lišily u všech zkoumaných programů. Viditelnost se lišila především v počátku. U některých programů byla nastavena limitní počáteční viditelnost na 30 m nebo jiná a u některých nebylo nastaveno žádné limitní omezení. Tyto odchylky byly zhodnoceny na základě matematického základu jednotlivých programů.

Dále byla provedena analýza únosnosti stropní desky, jež byla stanovena na základě výsledných teplot plynů u stropní konstrukce. Nejprve byly určeny průběhy teplot na povrchu stropní desky pomocí programu TempAnalysis_s, do kterého byly vloženy teplotní průběhy

plynů stanovené jednotlivými CFD programy. Odchytky teplot na povrchu konstrukce byly důvodem různých výpočetních operací jednotlivých CFD programů. Následně bylo provedeno porovnání výsledných teplot na povrchu konstrukce stanovenými programy TempAnalysis_s a CFD programem FDS. Po zjištění značné odchylky v průbězích byla provedena analýza pro různé hodnoty součinitele přestupu tepla. Analýzou bylo zjištěno, že při užití součinitele přestupu tepla, který je uveden v publikaci [5] při výpočtu odezvy sprinklerových hlavíc ($20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$), je průběh teplot na povrchu konstrukce shodný s průběhem stanoveným programem FDS, který součinitel stanovuje na základě korelací konvekce. Součinitel přestupu tepla pro plyny je dán tabulkově v publikaci [56] v rozmezí $2\text{--}25 \text{ W/m}^2 \text{ K}$. Z těchto poznatků vyplývá, že pro obecný požár je možné uvažovat s nižším součinitelem přestupu tepla než v případě parametrické a normové teplotní křivky. Pro posouzení únosnosti stropní desky byly dále zjištěny teploty v místě výztuže. Následné posouzení stropní desky bylo zhodnoceno na základě dosažených teplot ve výztuži. Důsledkem nízkých teplot v místě výztuže je únosnost železobetonové stropní desky po celou dobu požáru u obou variant vyhovující.

Z uvedených výsledků a porovnání v této práci vyplývá, jak každý CFD program řeší problematiku požáru odlišně. Program FDS se zdá být svým řešením nejrelevantnější, jelikož při řešení rychlosti uvolňování tepla zahrnuje i přísun kyslíku, kdežto jiné programy simulují požár podle zadaných dat bez ohledu na podmínky ventilace. Tento jev je však nepravděpodobný, a tedy výstupy z ostatních programů například při zkoumání vlivu teplot na konstrukce jsou sice na straně bezpečné, ale při nutnosti dosažení přesných výsledků (k čemu se CFD nejvíce používají) se tyto programy nejeví jako vhodné řešení. Dále je nutné podotknout, že každý program má své limity a nároky na zadávání množství vstupních údajů. Z hlediska ovladatelnosti jednotlivých programů, nejsnáze ovladatelným programem byl in:Flux. Snadná ovladatelnost tohoto programu měla však dopad na variabilitu zadávaných dat a simulaci různých požárních scénářů. Obtížná ovladatelnost byla u programů Fluent a Autodesk CFD, jelikož se jedná o všeobecné programy a pro modelování požárního scénáře je potřeba zadat velké množství dat. Tyto programy společně s programem Phoenisc zahrnují různé druhy výpočetní sítě, což umožňuje řešit požární scénáře v různě složitých geometriích. S ohledem na funkce jednotlivých programů jich program FDS společně s programem Kameleon KFX zahrnují nejvíce. Program FDS oproti programu in:Flux neumí řešit požáry unikajícího plynu pod vysokým tlakem nebo požáry unikajících kapalin. Dále také nezahrnuje funkci modelování výbuchu, který umí řešit programy Kameleon KFX, Flacs a částečně in:Flux. Proto je nutné brát zřetel na výběr vhodných programů pro získání relevantních výstupů v oblasti požární problematiky. Volba programu by se měla odvíjet od možností daného programu a jeho limitů s ohledem na vlastnosti vstupních dat, podporu programu a jeho validaci.

Doporučením pro další výzkum v oblasti CFD modelování požáru je vytvoření více ilustrativních příkladů a porovnání těchto příkladů s experimenty. Dále by bylo možné se zaměřit na porovnání CFD modelů se zónovými modely, případně na podrobnější prozkoumání rozdílů v matematickém základu jednotlivých programů.

V praxi je možné CFD programy využít pro podrobnější analýzu, případně pokud nelze užít tradiční normové postupy. Je však nutné brát zřetel na funkčnost, využitelnost, kvalitu daného programu a hodnoty zadávaných dat. V případě chybného zadání nebo užití nevhodného programu dochází k chybným výstupním hodnotám.

Seznam obrázků

<i>Obr. 1: Fáze požáru [6]</i>	22
<i>Obr. 2: Trojúhelník hoření [9]</i>	23
<i>Obr. 3: Možnosti návrhu požární bezpečnosti a jejich vztah [10]</i>	24
<i>Obr. 4: Rozdělení modelů požáru [4]</i>	25
<i>Obr. 5: Okrajové podmínky pro místnost s požárem [3]</i>	28
<i>Obr. 6: Tepelné záření [24]</i>	37
<i>Obr. 7: Izoplochy sálání [24]</i>	38
<i>Obr. 8: Model požáru [24]</i>	38
<i>Obr. 9: Výpočetní síť a simulace [25]</i>	40
<i>Obr. 10: Vizualizace kouře ve Smokeview [26]</i>	40
<i>Obr. 11: Geometrie modelu [28]</i>	41
<i>Obr. 12: Simulace tepelného proudění [28]</i>	43
<i>Obr. 13: Geometrie objektu [30]</i>	44
<i>Obr. 14: Výpočetní síť [30]</i>	45
<i>Obr. 15: Výsledné hodnoty [30]</i>	46
<i>Obr. 16: Výsledná simulace [30]</i>	46
<i>Obr. 17: Předpokládaný explozivní tlak a zatížení na konstrukci [32]</i>	48
<i>Obr. 18: Radiační tepelný tok [33]</i>	49
<i>Obr. 19: Vypočítané rozložení teplot v Hackney Town Hall [34]</i>	51
<i>Obr. 20: 3D pohled na tepelné toky [36]</i>	52
<i>Obr. 21: Vizualizace výsledků [36]</i>	52
<i>Obr. 22: Simulace požáru plošiny na moři [37]</i>	53
<i>Obr. 23: Vizualizace teploty při hoření kapaliny [37]</i>	54
<i>Obr. 24: Požár v tunelu [40]</i>	56
<i>Obr. 25 : Generovaná výpočetní síť [42]</i>	57
<i>Obr. 26: Zadávání materiálových vlastností [42]</i>	58
<i>Obr. 27: Simulace výtlaku difusoru a zpětného toku vzduchu [43]</i>	59
<i>Obr. 28: Vizualizace proudění [43]</i>	59
<i>Obr. 29: Graf vyhodnocení CFD programů</i>	62
<i>Obr. 30: Půdorysy řešeného příkladu: a) varianty č. 1, b) varianta č. 2</i>	63
<i>Obr. 31 Graf křivky HRR dřevěného stolu</i>	64
<i>Obr. 32: Graf měrné tepelné kapacity betonu</i>	65
<i>Obr. 33: Graf hustoty betonu</i>	65
<i>Obr. 34: Graf vodivosti betonu</i>	65
<i>Obr. 35: Model varianty 1 v programu FDS</i>	67
<i>Obr. 36: Vizualizace požáru pomocí HRR (320 s)</i>	68

<i>Obr. 37: Teplota kouře (320 s)</i>	68
<i>Obr. 38 Zakouření místnosti s vizualizací požáru (320 s)</i>	68
<i>Obr. 39: Model varianty 1 v programu Phoenix</i>	71
<i>Obr. 40: Grafické rozhraní ve Phoenix</i>	72
<i>Obr. 41: Textový soubor pro definování průběhu HRR</i>	72
<i>Obr. 42: Nastavení tepelného zdroje ve Phoenix</i>	73
<i>Obr. 43: Teplota u stropní desky (360 s)</i>	73
<i>Obr. 44: Vizualizace kouře (560 s)</i>	73
<i>Obr. 45: Viditelnost (560 s)</i>	73
<i>Obr. 46: Grafické rozhraní programu Ansys</i>	76
<i>Obr. 47: Model varianty 1 v Ansysu</i>	76
<i>Obr. 48: Vizualizace požáru u varianty 1 (1200 s)</i>	78
<i>Obr. 49: Vizualizace požáru u varianty 2 (1200 s)</i>	78
<i>Obr. 50: Vizualizace kouře u varianty 1 (1200 s)</i>	78
<i>Obr. 51: Vizualizace kouře u varianty 2 (420 s)</i>	78
<i>Obr. 52: Teplota u stropní konstrukce u varianty 1 (1200 s)</i>	78
<i>Obr. 53: Model varianty 1 v programu Autodesk CFD</i>	81
<i>Obr. 54: Teplota u varianty 1 (1200 s)</i>	82
<i>Obr. 55: Teplota u stropní desky (1200 s)</i>	82
<i>Obr. 56: Vizualizace požáru u varianty 2 (360 s)</i>	82
<i>Obr. 57: Vizualizace požáru u varianty 2 (1200 s)</i>	82
<i>Obr. 58: Teplota u stropní desky (480 s)</i>	82
<i>Obr. 59: Vizualizace tvorby kouře (420 s)</i>	82
<i>Obr. 60: Graf výsledné křivky HRR u varianty č. 1</i>	86
<i>Obr. 61: Graf výsledné křivky HRR u varianty č. 2</i>	87
<i>Obr. 62: Graf teploty u stropní konstrukce u varianty č. 1</i>	87
<i>Obr. 63: Graf teploty u stropní konstrukce u varianty č. 2</i>	87
<i>Obr. 64: Graf výsledné hodnoty viditelnosti v místnosti u varianty č. 1</i>	88
<i>Obr. 65 Graf výsledné hodnoty viditelnosti v místnosti u varianty č. 2</i>	88
<i>Obr. 66: Graf průběhů teplot u stropní konstrukce u varianty č. 1</i>	99
<i>Obr. 67: Graf průběhů teplot u stropní konstrukce u varianty č. 2</i>	99
<i>Obr. 68: Graf porovnání povrchových teplot určených pomocí Eurokódu a programu FDS100</i>	
<i>Obr. 69 Graf povrchových teplot stropní konstrukce s různými součiniteli přestupu tepla ...</i>	101
<i>Obr. 70: Graf průběhů teplot v místě výztuže (25 mm od povrchu) u varianty č. 1</i>	102
<i>Obr. 71: Graf průběhů teplot v místě výztuže (25 mm od povrchu) u varianty č. 2</i>	103
<i>Obr. 72: Geometrie modelu s ventilací</i>	117
<i>Obr. 73: Geometrie modelu bez ventilace</i>	117
<i>Obr. 74: Definování průběhu hoření pomocí HRR</i>	118

<i>Obr. 75: Tvoření výpočetní sítě.....</i>	118
<i>Obr. 76: Vizualizace požáru u modelu s ventilací</i>	119
<i>Obr. 77: Vizualizace požáru u modelu bez ventilace</i>	119
<i>Obr. 78: Tvorba geometrie modelu</i>	120
<i>Obr. 79: Importovaná geometrie z tutoriálu</i>	120
<i>Obr. 80: Knihovna chemických látek</i>	121
<i>Obr. 81: Definování místa úniku plynu mezi přírubami.....</i>	121
<i>Obr. 82: Vizualizace rozptylu plynu při úniku mezi přírubami</i>	122
<i>Obr. 83: Definování tvaru uniklé kapaliny.....</i>	122
<i>Obr. 84: Vizualizace požáru kapaliny.....</i>	123
<i>Obr. 85: Vizualizace tepelného toku 10 kW/m² (žlutý obláček) a tvorby kouře (černý obláček)</i>	123

Seznam tabulek

<i>Tab. 1: Přehled CFD programů.....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 2: Přehled funkcí jednotlivých programů</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 3: Hodnoty HRR dřevěného stolu.....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 4: Materiálové vlastnosti betonu</i>	<i>65</i>
<i>Tab. 5: Zadávané parametry pro modelování požáru</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 6: Zadávané hodnoty frakce vycházející z HRR.....</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 7: Přepočtené hodnoty HRR na tepelný tok.....</i>	<i>77</i>
<i>Tab. 8: Výstupní parametry z jednotlivých programů</i>	<i>85</i>
<i>Tab. 9: Souhrnné a výsledné hodnoty.....</i>	<i>86</i>
<i>Tab. 10: Vyhodnocení analyzovaných CFD programů</i>	<i>95</i>

Literatura

- [1] WALD, František, Marek POKORNÝ, Kamila HOROVÁ, Petr HEJTMÁNEK, Hana NAJMANOVÁ, Martin BENÝŠEK, Marta KUREJKOVÁ a Ivo SCHWARZ. *Modelování dynamiky požáru*. B.m.: Vysoké učení technické v Praze, 2017. ISBN 978-80-01-05633-2.
- [2] CFD modelování v požární vědě a inženýrství. *HZSCR* [online]. c2021. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/casopis-112-rocnik-xvi-cislo-12-2017.aspx?q=Y2hudW09NA%3D%3D>
- [3] YEOH, Guan Heng a Kwok Kit YUEN, ed. *Computational fluid dynamics in fire engineering: theory, modelling and practice*. Amsterdam ; Boston: Elsevier, 2009. ISBN 978-0-7506-8589-4.
- [4] SVOBODOVÁ, Nicole. *Diplomová práce: Analýza zónových modelů požáru a jejich aplikace při posuzování požární odolnosti* [online]. B.m., 2021. ČVUT. Dostupné z: Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/92958>
- [5] HURLEY, Morgan J., Daniel T. GOTTUK, John R. HALL JR., Kazunori HARADA, Erica D. KULIGOWSKI, Milosh PUCHOVSKY, Jose' L. TORERO, John M. WATTS JR. a CHRISTOPHER J. WIECZOREK, ed. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering* [online]. 5th ed. 2016. New York, NY: Springer New York : Imprint: Springer, 2016. ISBN 978-1-4939-2565-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4939-2565-0
- [6] Fáze požáru. *TZB-info* [online]. c2001 2022. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/9636-sireni-plamene-po-vrstve-prachu-tvorene-drevni-biomassou>
- [7] CÁBOVÁ, Kamila. *Ověřování modelů v požární bezpečnosti*. 2019. ISBN 978-80-01-06616-4.
- [8] VOLF, Oldřich. *Základy požární taktiky - proces hoření* [online]. B.m.: Ředitelství hasičského záchranného sboru ČR. Dostupné z: <https://www.hzscr.cz/clanek/konspekty-odborne-pripravy-i.aspx?q=Y2hudW09NQ%3d%3d>
- [9] Trojúhelník hoření. *TZB-info* [online]. c2001 2022. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/9636-sireni-plamene-po-vrstve-prachu-tvorene-drevni-biomassou>
- [10] KUČERA, Petr, Jiří POKORNÝ a Mikuláš MONOŠI. Požární inženýrství jako prostředek k úsporám ve stavebnictví. *Sborník*. nedatováno, (3), 6.
- [11] KUČERA, Petr a Zdeňka PEZDOVÁ. *Základy matematického modelování požáru*. 1. vyd. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2010. ISBN 978-80-7385-095-1.
- [12] CHUNG, T. J. *Computational fluid dynamics*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 2002. ISBN 978-0-521-59416-5.

- [13] ABDULNASER, Sayma. *Computational Fluid Dynamics* [online]. c 2009. nedatováno. ISBN 978-87-681. Dostupné z: https://books.google.cz/books?hl=cs&lr=&id=Iyoqvsa-KrLoC&oi=fnd&pg=PA12&dq=computational+fluid+dynamics&ots=atAyOX7_R&sig=Hr4MMIUPZ7Nz6sDXOvCOZUdJMRU&redir_esc=y#v=one-page&q&f=true
- [14] WENDT, John F., John D. ANDERSON a VON KARMAN INSTITUTE FOR FLUID DYNAMICS, ed. *Computational fluid dynamics: an introduction*. 3rd ed. Berlin ; [London]: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-85055-7.
- [15] NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION a SOCIETY OF FIRE PROTECTION ENGINEERS, ed. *SFPE handbook of fire protection engineering*. 3rd ed. Quincy, Mass. : Bethesda, Md: National Fire Protection Association ; Society of Fire Protection Engineers, 2002. ISBN 978-0-87765-451-3.
- [16] KARLSSON, Björn a James G. QUINTIERE. *Enclosure fire dynamics*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000. Environmental and energy engineering series. ISBN 978-0-8493-1300-4.
- [17] ZAVILA, Ondřej, Petr KUČERA a Pavel ŠENOVSKÝ. *Matematické modelování v prostředí bezpečnostního inženýrství*. 1. vydání. V Ostravě: Sdružení požárního a bezpečnostního inženýrství, 2015. ISBN 978-80-7385-165-1.
- [18] HOPPENSTEADT, Frank. *Predator-Prey Model* [online]. Dostupné z: http://www.scholarpedia.org/article/Predator-prey_model
- [19] KOZUBKOVÁ, M. *Modelování proudění tekutin Fluent, CFX* [online]. Ostrava: VŠB - Technická Univerzita Ostrava, 2008. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Kozubkova-fluent.pdf>.
- [20] *Modelling Turbulence* [online]. B.m.: Fluent Inc. 2006. Dostupné z: <https://courses.washington.edu/mengr544/handouts-10/Fluent-k-epsilon.pdf>
- [21] ICOVE, David J. a John D. DEHAAN. *Forensic fire scene reconstruction*. 2nd ed. Upper Saddle River, N.J: Pearson/Prentice Hall, 2009. Brady fire. ISBN 978-0-13-222857-2.
- [22] NFPA 921. *Guide for Fire and Explosion Investigation*. 1. vyd. nedatováno. ISBN MA 02169-7471.
- [23] WĘGRZYŃSKI, Wojciech, Piotr TOFIŁO a Rafal POROWSKI. Hand calculations, zone models and CFD – areas of disagreement and limits of application in practical fire protection engineering [online]. 2016, 11. Dostupné z: doi:10.13140
- [24] In:Flux. *Insight Numerics* [online]. c2021. Dostupné z: <https://help.insightnumerics.com/inFlux/Overview.htm>
- [25] FIRE DYNAMICS SIMULATION (FDS) STUDY OF FIRE IN STRUCTURES WITH CURVED GEOMETRY. *Semantic scholar* [online]. Dostupné z: [https://www.semanticscholar.org/paper/FIRE-DYNAMICS-SIMULATION-\(FDS\)-STUDY-OF-FIRE-IN-Zhong/b0c5f690c7a0f94a7db7c412b287539b60f2f54a](https://www.semanticscholar.org/paper/FIRE-DYNAMICS-SIMULATION-(FDS)-STUDY-OF-FIRE-IN-Zhong/b0c5f690c7a0f94a7db7c412b287539b60f2f54a)

- [26] Dynamic fire simulation using the Fire Dynamics Simulator. *Cype* [online]. Dostupné z: <http://fds.en.cype.com/>
- [27] Ansys. *Ansys* [online]. c2022. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/fluids>
- [28] Thermal analysis. *YouTube* [online]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=Jx39uFHtHbs>
- [29] EWER, Josh, E. GALEA, M. PATEL, F. JIA, A. GRANDISON a Z. WANG. *SMART-FIRE-The fire field modelling environmen*. B.m.: ECCOMAS CFD. 2010
- [30] SMARTFIRE-CAPABILITIES. *FIRE SAFETY ENGINEERING GROUP* [online]. c2003 2022. Dostupné z: https://fseg.gre.ac.uk/smartfire/smartfire_capabilities.html#environment
- [31] KAMELEON FireEX. *Fire Model Survey* [online]. c2015. Dostupné z: <http://www.firemodelsurvey.com/FieldModels.html>
- [32] RIAN, KJELL ERIK, EVANGER, TROND, VEMBE, BJORN ERLING, LILLEHEIE, NILS INGE, LAKSA, BRYNJAR, HJERTAGER, BJORN H., a MAGNUSSEN, BJORN F. Coherent computational analysis of large-scale explosions and fires in complex geometries from combustion science to a safer oil and gas industry. *Chemical Engineering Transactions* [online]. 2016, **48**, 175–180. Dostupné z: doi:10.3303/CET1648030
- [33] SimFlow. *SimFlow* [online]. c2012 2021. Dostupné z: <https://sim-flow.com/download/cfd-simulation-software/>
- [34] PHOENICS/FLAIR. *Fire Model Survey* [online]. c2015. Dostupné z: <http://www.firemodelsurvey.com/FieldModels.html>
- [35] Fluidyn-PANFIRE. *Fluidyn: CFD software and services* [online]. 2021. Dostupné z: https://www.fluidyn.com/?page_id=1444
- [36] Fluidyn-PANFIRE - example. *Maine-et-loire* [online]. Dostupné z: http://www.maine-et-loire.gouv.fr/IMG/pdf/annexe_8_-_descriptif_du_logiciel_fluidyn_panfire.pdf
- [37] FLACS-CFD. *FLACS-CFD 21.3 User Manual* [online]. c2021. Dostupné z: <https://www3.gexcon.com/files/manual/flacs/html/index.html>
- [38] KOBRA-3D. *Fire Model Survey* [online]. c2015. Dostupné z: <http://www.firemodelsurvey.com/FieldModels.html>
- [39] FLOW-3D. *FLOW-3D* [online]. c2000 2022. Dostupné z: <https://www.flow3d.com/>
- [40] CFD simulation - fire in a tunnel. *YouTube* [online]. 2015. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=gojHqLPMICM>
- [41] AUTODESK INC. Autodek CFD 2023. *Autodesk* [online]. 2022. Dostupné z: <https://help.autodesk.com/view/SCDSE/2023/ENU/>

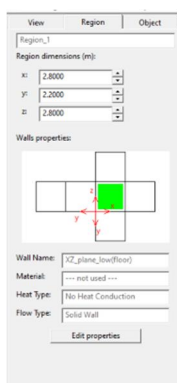
- [42] DR. MUNIRAJULU., M. Autodesk CFD- Fire and Smoke Simulation. In: [online]. India. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/autodesk-university/class/Learn-Autodesk-CFD-Fire-and-Smoke-Simulation-2020#presentation>
- [43] Autodesk® Simulation CFD 360. *Hagerman & Company* [online]. 2020. Dostupné z: <https://blog.hagerman.com/2013/10/28/send-your-productivity-sky-high-with-autodesk-simulation-cfd-360/>
- [44] AUTODESK INC. Autodesk CFD. *Autodesk* [online]. 2022. Dostupné z: <https://www.autodesk.eu/products/cfd/free-trial>
- [45] BENKORICHI, Salah. FDS Mesh. *Fire Safety Engineering* [online]. Dostupné z: <https://www.sbenkorichi.com/calculators/fds-mesh/>
- [46] BUTCHER, Ken a CHARTERED INSTITUTION OF BUILDING SERVICES ENGINEERS, ed. *Fire engineering*. Second edition. London: the Chartered Institution of Building Services Engineers, 2003. CIBSE guide, E. ISBN 978-1-903287-31-6.
- [47] MCGRATTAN, Kevin, Simo HOSTIKKA, Jason FLOYD, Randall MCDERMOTT a Marcos VANELLA. *Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model* [online]. B.m.: National Institute of Standards and Technology. 2013. Dostupné z: <https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html>
- [48] Navier-Stokes Equations. *Thermal Engineering* [online]. Copyright 2022. Dostupné z: <https://www.thermal-engineering.org/what-is-navier-stokes-equation-definition/>
- [49] Reynolds averaged Navier-Stokes equations. *Cantor's Paradise* [online]. Dostupné z: <https://www.cantorsparadise.com/the-navier-stokes-equations-461f7453d79e>
- [50] GLYNN, David. *Phoenics - Fundamentals*. In: . B.m.
- [51] CHAM Technical Report TR 313. *Flair User Guide* [online]. Dostupné z: http://www.cham.co.uk/phoenics/d_polis/d_docs/tr313/tr313.htm
- [52] ANSYS *Fluent Theory Guide* [online]. B.m.: ANSYS, Inc. 2013. Dostupné z: <http://www.pmt.usp.br/academic/martoran/notasmodelosgrad/ANSYS%20Fluent%20Theory%20Guide%2015.pdf>
- [53] KLOTE H., John a James MILKE A. *Principles of smoke management*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Inc., 2002. ISBN 1-883413-99-0.
- [54] ČSN EN 1991-1-2 - Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-2: Obecná zatížení - Zatížení konstrukcí vystavených účinkům požáru. 2013
- [55] THUNDERHEAD ENGINEERING. Radiation and Convection on Surfaces -PyroSim Tutorials. *Thunderheadeng* [online]. 2022 1998. Dostupné z: <https://support.thunderheadeng.com/tutorials/pyrosim/radiation-and-convection/>

-
- [56] KHANDEKAR, Sameer. *Modes of Heat Transfer – Part I* [online]. B.m.: Indian Institute of Technology Kanpur. Dostupné z: http://home.iitk.ac.in/~samkhan/ME340A/Lecture_5_Modes_of_Heat_Transfer_Part_1_OK.pdf
- [57] *Zotero* [online]. Roy Rosenzweig Center for History and New Media: George Mason University, nedatováno. Dostupné z: <https://www.zotero.org/>
- [58] *ArchiCad 20* [online]. B.m.: Autodesk, 2016. Dostupné z: <https://myarchicad.com/>
- [59] *Autodesk CFD* [online]. B.m.: Autodesk, 2022. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/>
- [60] *PyroSim* [online]. B.m.: Thunderhead Engineering Consultants, Inc., nedatováno. Dostupné z: <https://www.thunderheadeng.com/pyrosim>
- [61] *Phoenix* [online]. B.m.: Concentration, Heat And Momentum Limited, nedatováno. Dostupné z: <https://www.cham.co.uk/phoenics.php>
- [62] *Ansys Fluent* [online]. B.m.: ANSYS, Inc, nedatováno. Dostupné z: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>
- [63] *SMARTFIRE* [online]. University of Greenwich: FIRE SAFETY ENGINEERING GROUP, nedatováno. Dostupné z: <https://fseg.gre.ac.uk/smartfire/>
- [64] *in:Flux* [online]. Boston: Insight Numerics, LLC, nedatováno. Dostupné z: <https://insightnumerics.com/influx-overview/>
- [65] ŠTEFAN, Radek a Jaroslav PROCHÁZKA. *TempAnalysis* [online]. 2009. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/www/stefarad/vyzkum.html>

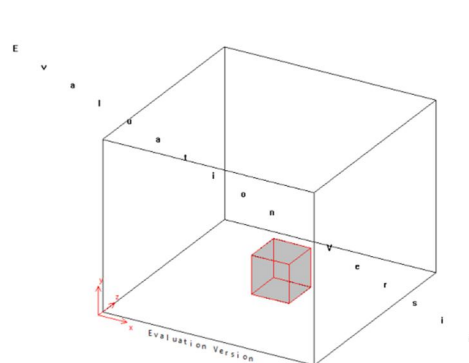
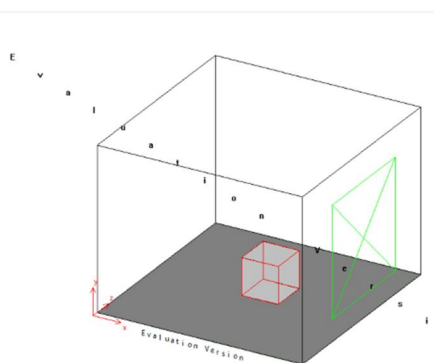
Příloha 1 – Ukázka modelování v programech SMARTFIRE a in:Flux

Program SMARTFIRE

Od společnosti Fire safty engineerig group (FSEG), která program vytváří, nebyla poskytnuta studentská licence, ale pouze demo verze s platností na 30 dní. Tato verze programu má však omezené možnosti modelování. Je možné namodelovat místnost o rozměrech 2,8x2,8x2,2 m. Dále je možné použít jeden zdroj požáru, jednu ventilaci a jeden měřicí bod. Z důvodu těchto omezení byl namodelován příklad, který je možný v programu vyřešit. Geometrie místnosti byla ponechána s rozměry, která demo verze umožňuje. Materiál konstrukcí je ve výchozím nastavení nastaven na beton.



Obr. 72: Geometrie modelu s ventilací



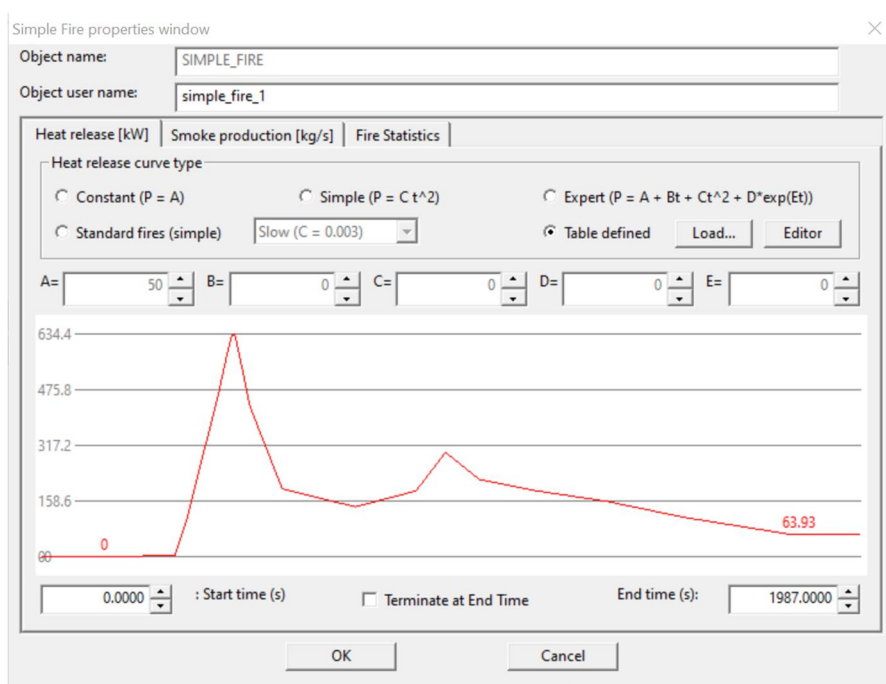
Obr. 73: Geometrie modelu bez ventilace

Zdroj tepla představuje v programu objekt s vlastnostmi hoření (simple fire). Vlastnosti hoření byly zadány pomocí rychlosti uvolňování tepla s hodnotami z tabulka č. 3. Dále bylo nutné zadat tvorbu kouře. Jelikož nebyla známá rychlost uvolňování kouře, byla tato hodnota stanovena aproximací z křivky HRR, spalného tepla a výtěžku částic ze spalování následovně:

$$S_{MRR} = Q \cdot Y_s / \Delta H_c$$

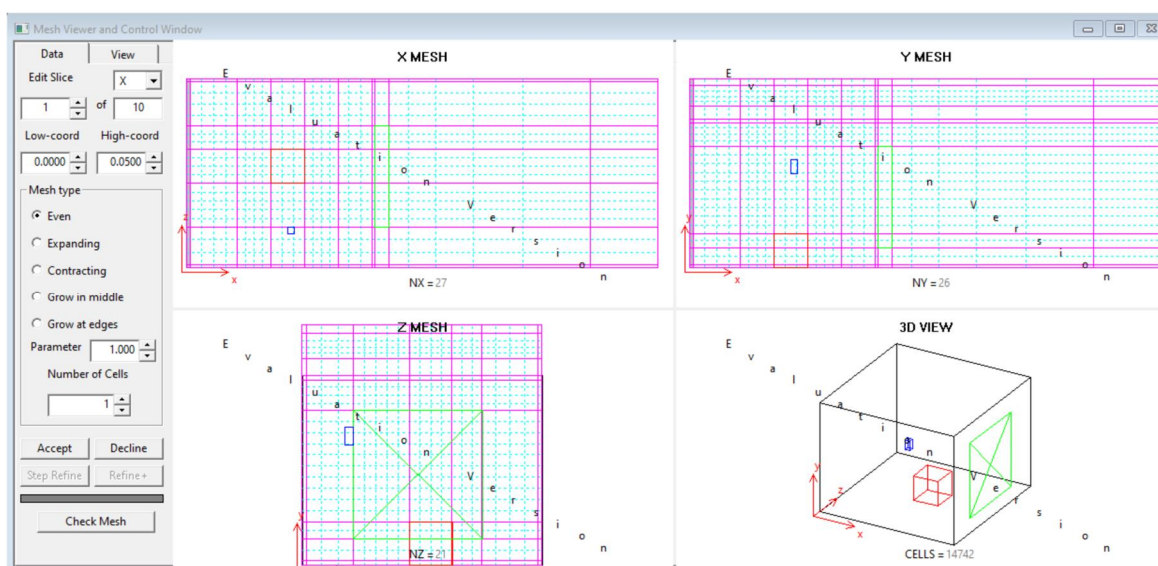
kde Q je rychlost uvolňování tepla [W], Y_s je výtěžek částic ze spalování [$\text{kg}_{\text{kouř}}/\text{kg}_{\text{palivo}}$] a ΔH_c je spalné teplo dřeva [J/kg]. Výtěžek částic spalování má hodnotu 0,02 $\text{kg}_{\text{kouř}}/\text{kg}_{\text{palivo}}$ dle tab. 1 v [46] a spalné teplo dřeva je 13 MJ/kg.

Oba parametry jak HRR, tak rychlost uvolňování kouře, byly zadány pomocí importu textového souboru.

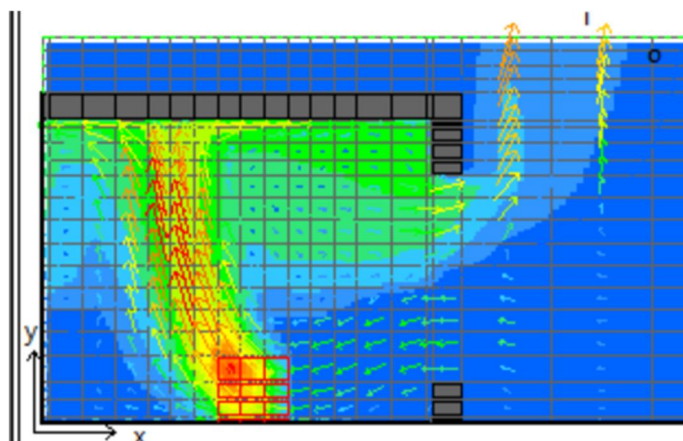


Obr. 74: Definování průběhu hoření pomocí HRR

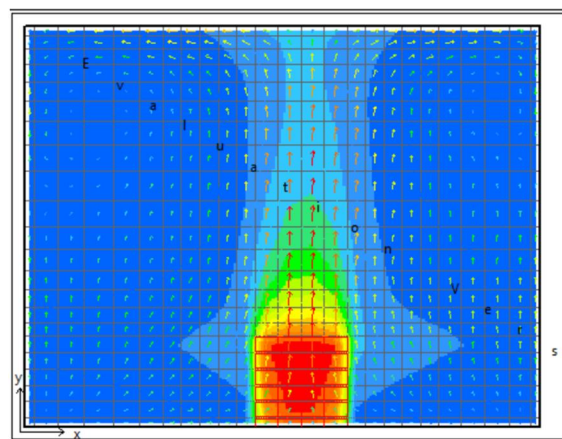
Výpočetní síť byla programem stanovena na 12 000 buněk. Následný výpočet probíhal v demo verzi podle stanoveného časového kroku. Byl stanoven časový krok na 60 s, a tedy program vypočítal právě 60 s z celkových 2000 s. Následně byl výpočet ukončen a bylo nutné výpočet obnovit.



Obr. 75: Tvoření výpočetní sítě



Obr. 76: Vizualizace požáru u modelu s ventilací



Obr. 77: Vizualizace požáru u modelu bez ventilace

Výsledek kouře značí jeho hmotnostní zlomek, tj. kg kouřových částic na kg vzduchu. Lze získat koncentraci kouře a to: $\text{smoke} \times \rho_{\text{vzduch}}$

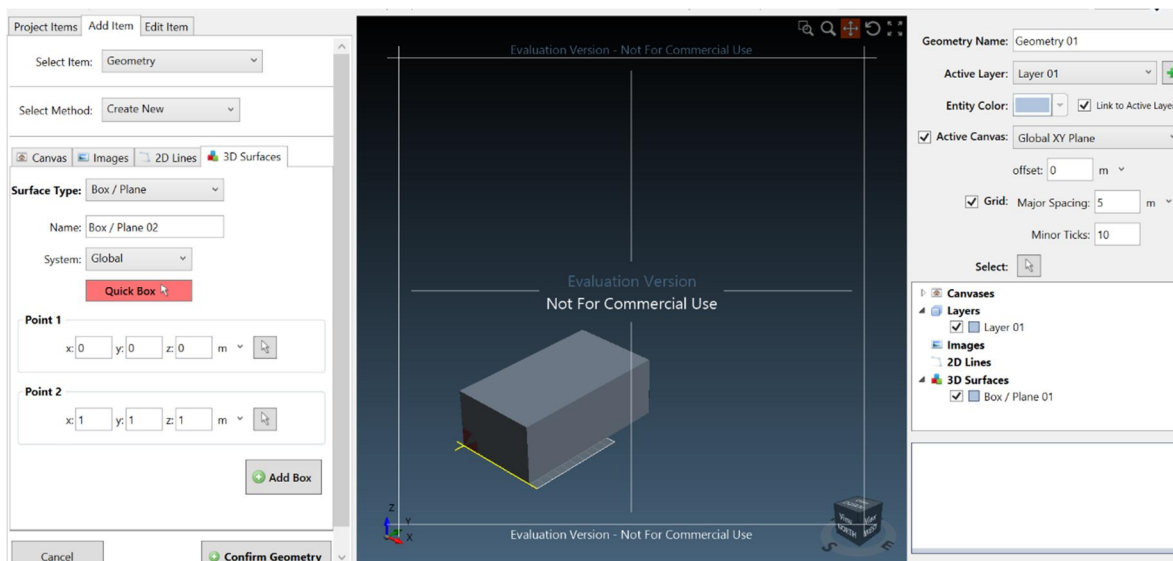
Lze také dopočítat frakci kouře a následně místní optickou viditelnost.

Program in:Flux

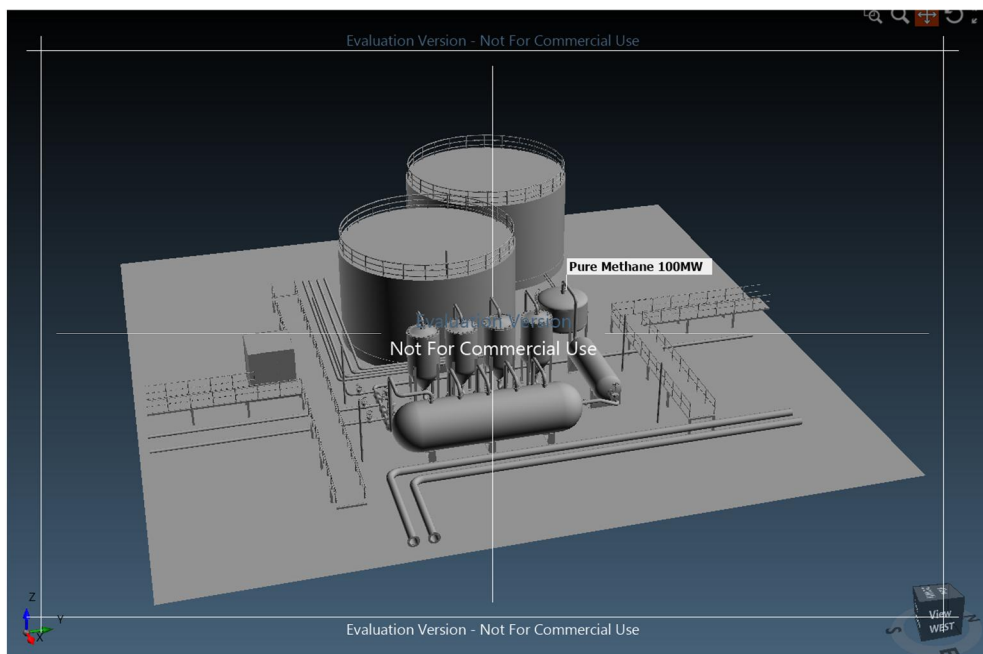
Posledním programem, který byl volně dostupný, byl CFD program in:Flux. Tento program byl poskytnut společností Insight Numerics pouze ve zkušební verzi. Demo verzi je možné požívat pouze 10 dní a dále je možné ji spustit pouze 10krát. in:Flux je převážně zaměřen na řešení požárů u průmyslových objektů. Jak je popsáno v kapitole 3, program řeší scénáře ventilace, požáru a rozptylu plynů v rámci složitých geometrií. Lze namodelovat požár unikající kapaliny nebo úniku plynu a jeho dopad na okolní objekty. Dále umí simulovat proudové požáry, kde plyn uniká pod vysokým tlakem, rozptyl plynů v závislosti na ventilaci neb směru proudění větru. Je možné využít informace o objemu a hmotnosti plynu k dimenzování oblaku plynu pro explozi.

Vzhledem ke krátké době užívání programu byly v programu vyzkoušeny různé jeho funkce. Pro modelování různých simulací byla užitá geometrie poskytovaná programem. Řešený příklad by nebyl možný v programu namodelovat, jelikož je program zaměřen na požáry kapalin a plynů, a dále umožňuje modelovat pouze větrané prostory (variantu č.2 by nebylo možné namodelovat). Řešené parametry programu in:Flux jsou popsány v kapitole 3. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny různé funkce programu.

V programu je možné si vytvořit geometrii nebo ji importovat z programů CAD. První obrázek uvádí tvorbu geometrie přímo v programu in:Flux. Druhý obrázek je importovaná geometrie.

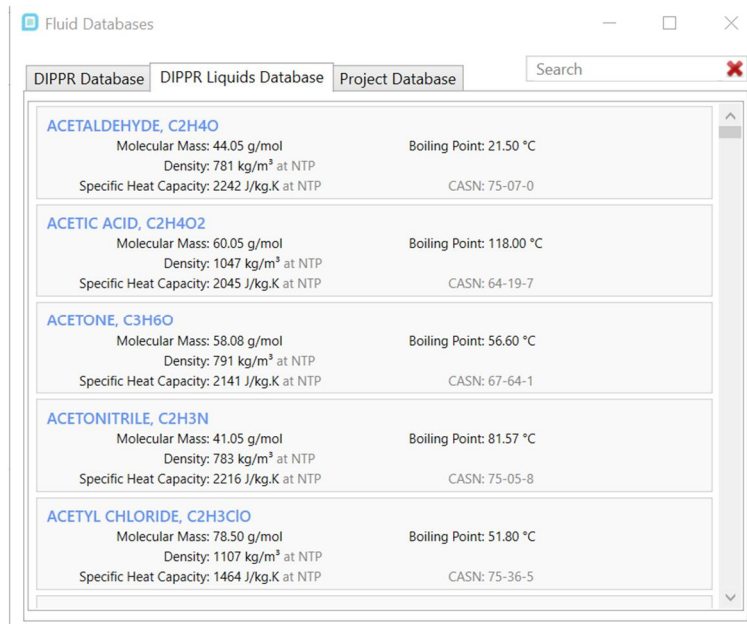


Obr. 78: Tvorba geometrie modelu



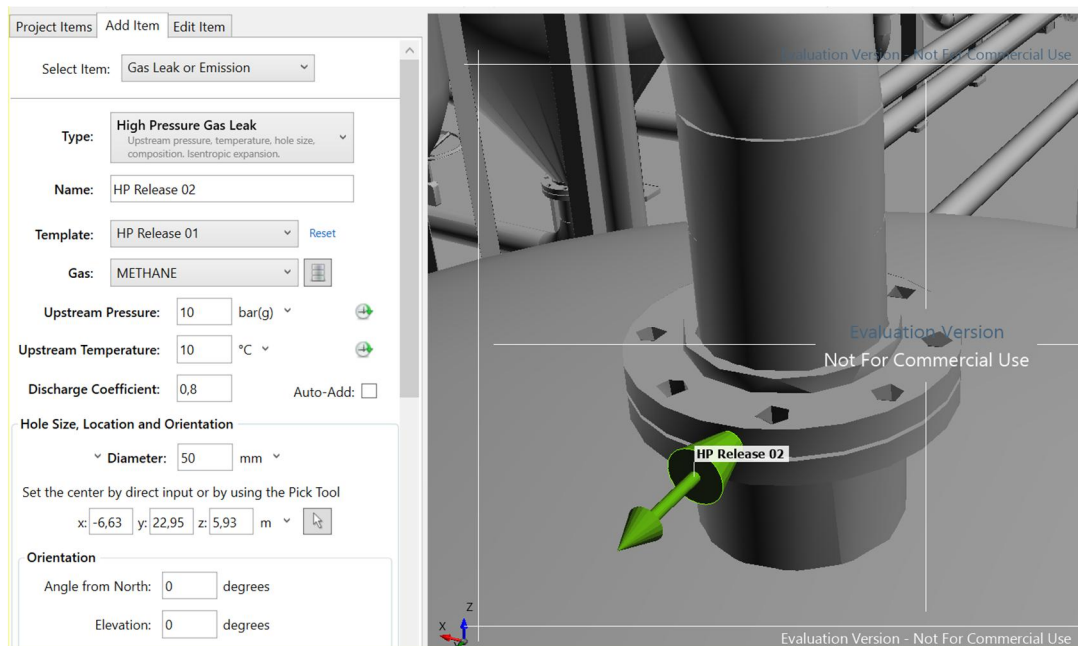
Obr. 79: Importovaná geometrie z tutoriálu

Program in:Flux obsahuje knihovnu s chemickými látkami. V této knihovně jsou popsány vlastnosti daných látek, tj. hustota, molární hmotnost, měrná kapacita, bod varu atd.

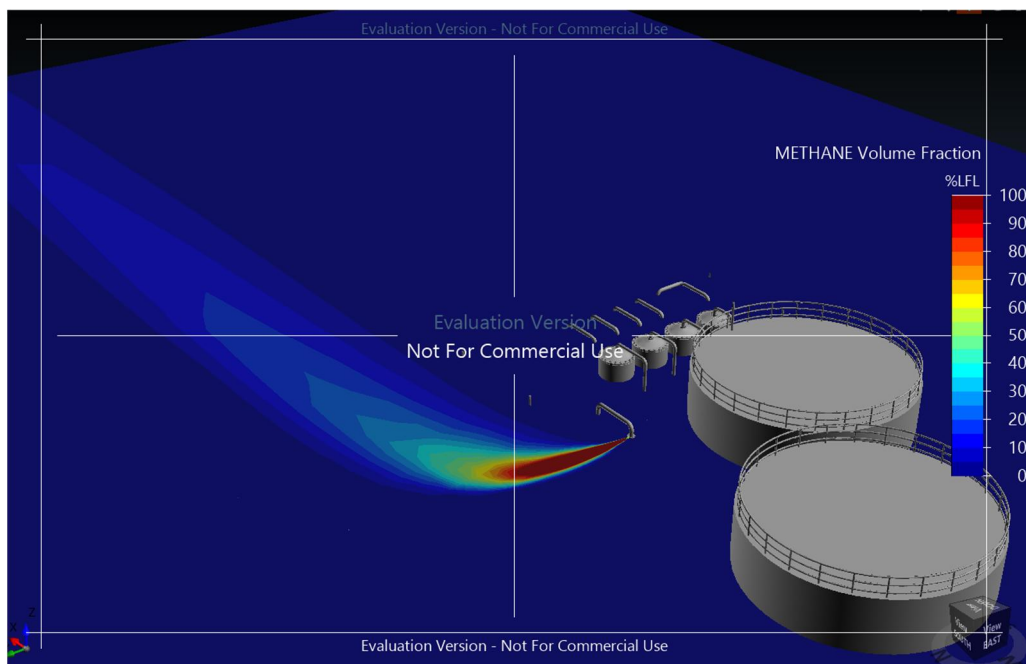


Obr. 80: Knihovna chemických látek

Prvním řešeným příkladem byl vyzkoušen únik a rozptyl plynu. Byla namodelována netěsnost mezi přírubami, jak je uvedeno na obrázku č. 81.

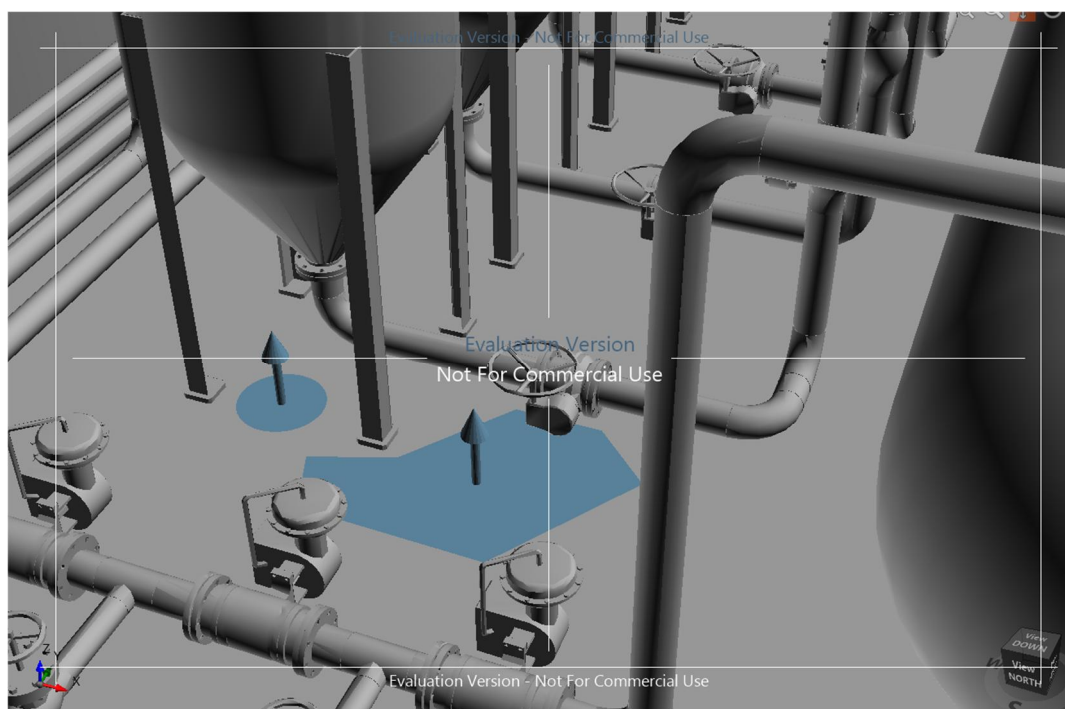


Obr. 81: Definování místa úniku plynu mezi přírubami

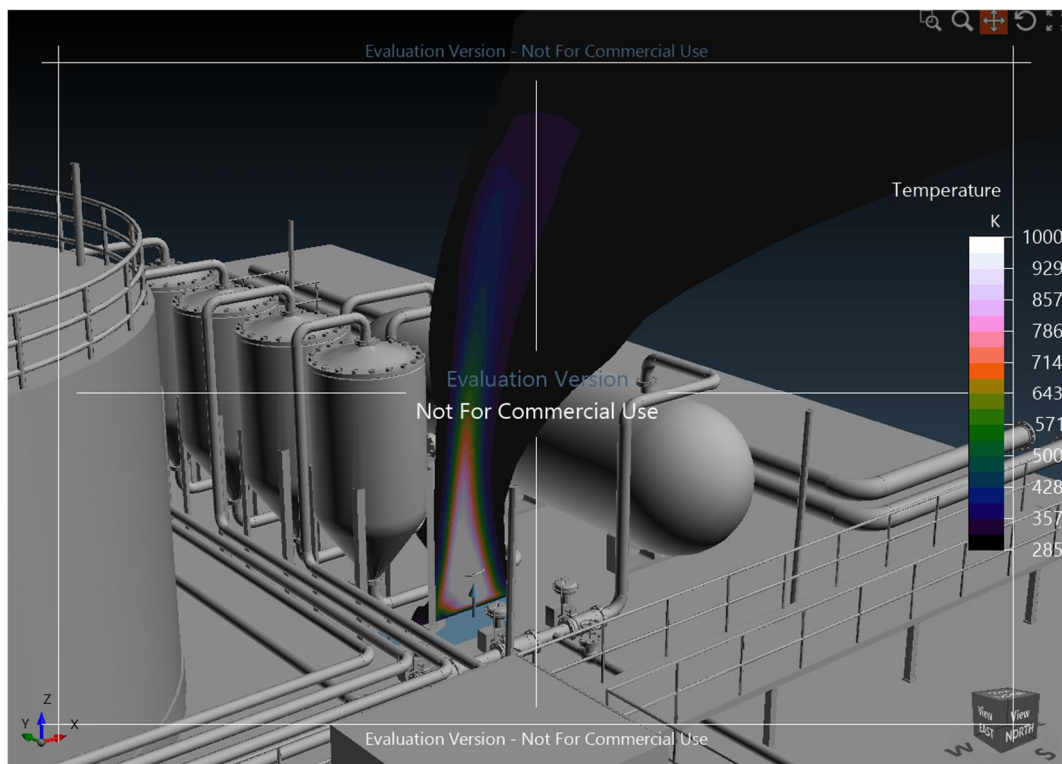


Obr. 82: Vizualizace rozptylu plynu při úniku mezi přírubami

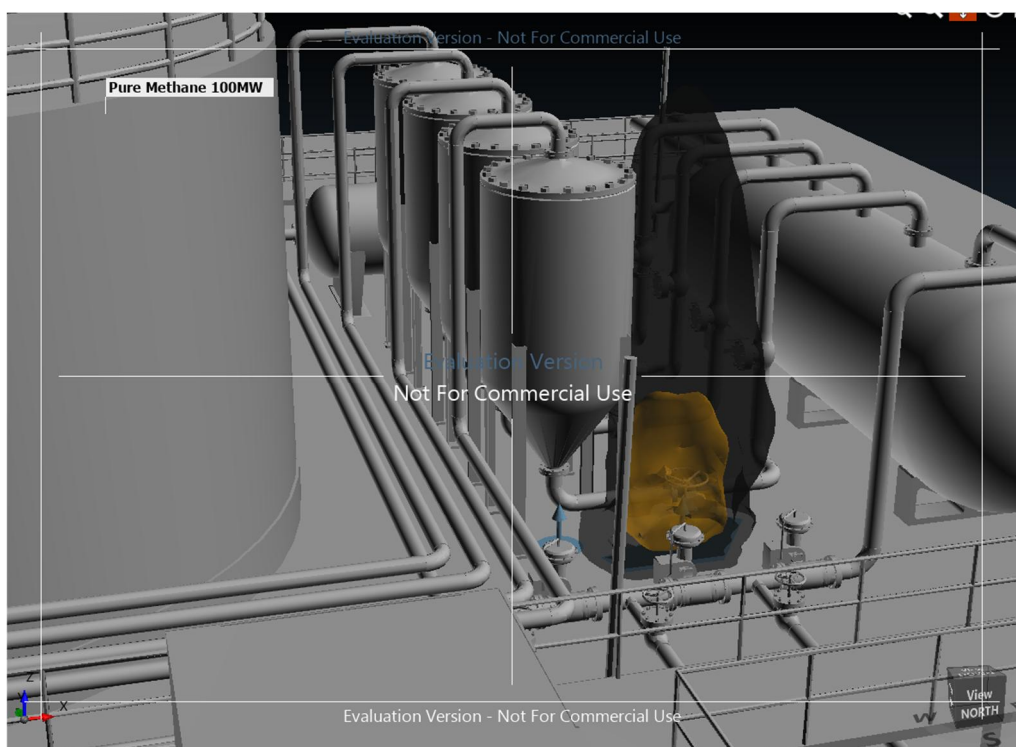
Dále byl řešen únik kapaliny z nádrže. V programu byl nakreslen tvar louže kapaliny, která vznikla následkem úniku a následně začala hořet.



Obr. 83: Definování tvaru uniklé kapaliny



Obr. 84: Vizualizace požáru kapaliny



Obr. 85: Vizualizace tepelného toku 10 kW/m² (žlutý obláček) a tvorby kouře (černý obláček)

Příloha 2 – Návrh železobetonové stropní desky

Pro posouzení únosnosti stropní konstrukce za požáru byl proveden návrh železobetonové stropní desky dle ČSN EN 1992-1-1. Stropní deska je prostě uložena na železobetonových stěnách řešené místnosti o rozměrech 4,5 x 8,0 m. Návrh stropní desky byl uvažován tak, aby krytí výztuže bylo minimální a využití desky co největší.

Stropní deska

Rozpětí (l) :	4500	mm
Beton :	C30/37	
Vliv prostředí:	XC2	
Životnost:	80	let
Konstrukční třída:	S4	

Krytí:

$$\text{Nominální krycí vrstva: } c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$\text{Minimální krycí vrstva: } c_{min} = \max(c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm})$$

$$c_{min,b} = \text{Profil výztuže uvažuje se 8 mm}$$

$$c_{min,dur} = \text{Stupeň prostředí - třída kce S2 (desková)}$$

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

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

$$c_{min} = \max(8; 10; 10) = 10 \text{ mm}$$

$$\text{Přídavek pro návrhovou odchylku: } \Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$$

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

Návrh tloušťky z emperických vzorců:

$$h_{dl} = (1/30 - 1/25) \cdot l$$

$$h_{dl} = (1/30 - 1/25) \cdot 4500 = 150 \text{ mm}$$

$$180 \text{ mm}$$

Návrh tloušťky desky dle ohybové štíhlosti:

$$d > l / (\kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \kappa_3 \cdot \lambda_{d,tab})$$

κ_1 = součinitel tvaru, uvažuje se rovno 1

κ_2 = součinitel rozpětí, pro $l \leq 7$ m $\kappa_2 = 1$

κ_3 = součinitel napětí tahové výztuže, uvažuje se 1,2

$\lambda_{d,tab}$ = tabulková hodnota vymezející ohybové štíhlosti, pro beton třídy C30/37 a stupněm využití uvažovaný jako $\rho = 0,5$ %

$$\begin{aligned}\kappa_1 &= 1 \\ \kappa_2 &= 1 \\ \kappa_3 &= 1,2 \\ \lambda_{d,tab} &= 20,5 \\ l &= 4500 \text{ mm}\end{aligned}$$

$$d > 125,42 \text{ mm}$$

$$h_{d2} = d+c+\varnothing_s/2 = 150,42 \text{ mm}$$

$$\varnothing_s = 10 \text{ mm}$$

Vyztuž je uvažována s průměrem 10 mm

Navrhují desku tloušťky $h_d = 160 \text{ mm}$ vyhovující ohybové štíhlosti

Návrh výztuže stropní desky

Zatížení desky:

Zatížení	Char.zat. [kN/m ²]	γ	Navrh.zat. [kN/m ²]
VI. tíha desky	4	1,35	5,4
Ostatní stálé	1,5		2,03
$g_{tot,k}$	5,5		7,43
Proměnné	3	1,5	4,5
$g+q$	8,5		11,93

$$\text{Moment v poli: } M_{Ed} = \frac{1}{8} \cdot f \cdot L^2 = \frac{1}{8} \cdot 11,93 \cdot 4,5^2 = 30,19 \text{ kNm}$$

Návrh ohybové výztuže:

$$A_{s,req} = \frac{M_{ed,pole}}{z \cdot f_{yd}} = \frac{30,19 \cdot 10^6}{121,5 \cdot 435} = 571,12069 \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$d = h-c-\varnothing_s/2 = 160 - 20 - 10/2 = 135 \text{ mm}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 135 = 121,5 \text{ mm}$$

$$A_s = 78,54 \text{ mm}^2$$

$$\varnothing_s = 10$$

$$ks/m = 8,00$$

$$A_{s,prov} = 628,32 \text{ mm}^2/\text{m} \quad \text{vzdálenost prutů po 120 mm}$$

Posouzení ohybové výztuže:

$$f_{ck} = 30 \quad [\text{MPa}] \quad f_{cd} = 20 \quad [\text{MPa}]$$

$$x = \frac{A_{s,prov} \cdot f_{yd}}{0,8 \cdot b \cdot f_{cd}} = \frac{628,32 \cdot 435}{0,8 \cdot 1000 \cdot 20} = 17,08 \quad \text{mm}$$

$$\xi = \frac{x}{d} = \frac{17,08}{135} = 0,13$$

$$z = d - 0,4 \cdot x = 128,17 \quad \text{mm}$$

$$M_{Rd} = A_{s,prov} \cdot f_{yd} \cdot z = 628,32 \cdot 435 \cdot 128,17 = 35,03 \quad \text{kNm}$$

$$M_{Rd} = 35,03 \text{ kNm} > M_{Ed} = 30,19 \text{ kNm} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Využití: $M_{Ed}/M_{Rd} = 0,86 \quad 86\%$

Posouzení konstrukčních zásad :

$$f_{yk} = 500 \quad \text{Mpa}$$

$$f_{ctm} = 2,6 \quad \text{Mpa}$$

$$D_{max} = 16 \quad \text{mm}$$

Minimální plocha vyztužení:

$$A_{s,min} = \max \left(0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b \cdot d ; 0,0013 \cdot b \cdot d \right)$$

$$A_{s,min} = \max \left(0,26 \cdot \frac{2,6}{500} \cdot 1000 \cdot 135 ; 0,0013 \cdot 1000 \cdot 135 \right)$$

$$A_{s,min} = \max \quad 182,52 \quad 175,5$$

$$A_{s,min} = 182,52 \quad \text{mm}^2$$

$$A_{s,prov} = 628,32 \text{ mm}^2 > A_{s,min} = 182,52 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Maximální plocha vyztužení:

$$A_{s,max} = 0,04 \cdot b \cdot h = 0,04 \cdot 1000 \cdot 160 = 6400 \text{ mm}^2$$

$$A_{s,prov} = 628,32 \text{ mm}^2 < A_{s,max} = 6400 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$

Vzdálenosti profilů výztuže:

$$s_{min} = \max (20; 1,2 \cdot \varnothing_s; D_{max} + 5 \text{ mm})$$

$$s_{min} = \max \quad 20 \quad 12 \quad 21$$

$$s_{min} = 21 \quad \text{mm}$$

$$s_{max} = \min (2 \cdot h ; 250 \text{ mm})$$

$$s_{max} = \min \quad 320 \quad 250$$

$$s_{max} = 250 \quad \text{mm}$$

$$s_{min} = 21 \text{ mm} < s_{max} = 250 \text{ mm} \rightarrow \text{VYHOVUJE}$$