

Ing. Pavel Šenovský, Ph.D.

Modelování následků mimořádných událostí

Návody do cvičení
skripta



Modelování následků mimořádných událostí: návody pro cvičení

tento text neprošel jazykovou úpravou

©Pavel Šenovský, Ostrava, 2023

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství

Obsah

Seznam obrázků	5
Seznam tabulek	7
Výpisy kódů	9
Úvod	11
1 Situace	13
1.1 Definice lokace	13
1.2 Meteorologická situace	14
1.2.1 Přepočtení rychlosti větru z km/h na m/s	15
1.2.2 Dlouhodobá meteo situace	15
2 Zásobníky	21
2.1 Cisternový návěs	21
2.2 Potrubí	22
3 Nebezpečné látky	27
3.1 Stanovení objemu látky v zásobníku	27
3.2 Přepočtení tlaků	28
3.3 Zadávání nových chemických látek do ALOHA	28
4 Rozptýlení nebezpečných látek	31
4.1 Limity koncentrací	31
4.2 Převody	32
4.2.1 Koncentrace	32
4.2.2 Objem	32
4.3 Model plynů těžších než vzduch	33
5 BLEVE	39
6 Jet Fire	41
7 Zbývající scénáře s účastí tepla	45
7.1 Flash fire	45
7.2 Poolfire	46
8 Požáry - některé z hlediska bezpečnosti zajímavé vlastnosti	47
9 Cvičení - úkoly	49
9.1 Cvičení 1	49
9.2 Cvičení 2	49
9.3 Cvičení 3	50
9.4 Cvičení 4	50
9.5 Cvičení 5	50
9.6 Cvičení 6	50

9.7 Cvičení ... samostudium	51
Literatura	54
Seznam zkratek	55
Rejstřík	56

Seznam obrázků

Situace	13
1.1 Profil směru větru Ostrava - Zábřeh (data [28])	17
1.2 Profil rychlostí větru Ostrava - Zábřeh (data [28])	17
1.3 Větrná růžice směru větru v Ostrava - Zábřeh (data [28])	18
1.4 Větrná růžice směru větru v třídách rychlosti Ostrava - Zábřeh (data [28])	18
Zásobníky	21
2.1 Cisternový návěs 36 m ³ (převzato z [23])	22
Rozptyl nebezpečných látek	31
4.1 Probitová funkce chlor	34
4.2 Probitová funkce Chlor generováno v MS Excel	35
4.3 Probitová funkce chloru přepočtená na procenta, koncentrace v mg/m ³	36
4.4 Probitová funkce chloru přepočtená na procenta, koncentrace v ppm	36
Jet Fire	41
6.1 Bezpečné odstupové vzdálenosti pro tepelný tok $I = 1,6 \text{ kW/m}^2$ (převzato z [14])	42
6.2 Popáleniny jako funkce závislosti expoziční dávky na čase (převzato z [14])	43

Seznam tabulek

Situace	13
1.1 Průměrné teploty v jednotlivých měsících roku 2022 v ČR a krajích a jejich porovnání s dlouhodobým průměrem (data ČHMÚ [27])	16
1.2 Větrná růžice Ostrava - Zábřeh (data [28])	16
Zásobníky	21
2.1 Hrubé rozměry, objem a množství LPG v cisternách (adaptováno z [23])	21
2.2 Rozměry potrubí používaných pro „běžné“ rozvody plynu (převzato z [19])	23
2.3 Koeficient podélného kloubu E (Longitudinal joint factor) (převzato z DOT 192 [1])	24
2.4 Faktor teplotní degradace T (převzato z DOT 192 [1])	24
2.5 Populární rozměry potrubí a předpokládaný mezní tlak (převzato z [25])	25
Požáry - některé z hlediska bezpečnosti zajímavé vlastnosti	47
8.1 Vybrané hraniční hodnoty tepelného toku a očekávané dopady (převzato z [4])	47

Seznam výpisů kódů

Rozptyl nebezpečných látek	31
4.1 Probitová funkce chloru v R	33
4.2 Přepočet na probitů na procenta	34
4.3 Výpočet probitů pro chlor v MS Excel	35
4.4 Přepočet probitů na procenta příklad MS Excel	35
4.5 Přepočet koncentrací chloru na ppm v MS Excel	35

Úvod

Vítejte u prozatímních studijních materiálů pro podporu cvičení v předmětu Modelování následků mimořádných událostí. Tento materiál přirozeně doplňuje základní skripta předmětu [30].

Zatímco skripta se zaměřují na vysvětlení teorie, tento studijní materiál se zaměřuje na některé praktické otázky spojené s modelováním a poskytuje další dodatečné informace, které by Vám měly usnadnit návrh reprezentativních scénářů mimořádných událostí a poskytnout také některá vodítka pro jejich vyhodnocování.

Tento materiál je v současnosti v pracovní verzi - to znamená, že se postupně vyvíjí. I části, které v tomto naleznete prošly pouze omezeným procesem editace a tak mohou působit v jistých ohledech nekompletně, popř. docela neuspořádaně. Jsem ale přesvědčen, že toto nepohodlí bude vyváжено množstvím informací, které v těchto skriptech naleznete a zároveň zveřejnění otevře možnosti pro diskuzi jednak nad obsahem skript samotných, jednak také nad obsahem předmětu, pro který jsou tato skripta napsána.

Z tohoto důvodu je pro mě cenná jakákoliv zpětná vazba od upozornění na existující chyby až po nejasnosti ve výkladu, popř. nějaké problémy, na které jste během čtení skript nebo studia předmětu narazili a bylo by potřeba je ve skriptech lépe vyřešit.

Jak byste měli při studiu postupovat? Tento materiál je **komplementární** vůči základním skriptům tohoto předmětu. To znamená, že pro každé téma byste měli nejprve prostudovat patřičnou kapitolu ve skriptech a ideálně jí také porozumět. Teprve poté začněte pracovat s tímto studijním materiálem.

Vzhledem k tomu, že tento materiál je prakticky zaměřen připravte si počítač (nebo jiné zařízení) s připojením k Internetu. Pro modelování úniků nebezpečných látek budete potřebovat software ALOHA [10]. Pro odhady následků v území doporučujeme použití běžných tabulkových procesorů jako je MS Excel, LibreOffice Calc a další.

Pro některé dílčí výpočty se může hodit také tužka a papír.

Text je do jisté míry doplněn ikonami, pro zpřehlednění.



Průvodce studiem

Slouží pro seznámení studentů s látkou, která bude v kapitole probírána.



Čas nutný ke studiu

Představuje odhad doby, který budete potřebovat k prostudování celé kapitoly. Jedná se pouze o orientační odhad, neznepokojte se proto, pokud Vám studium bude trvat o něco déle nebo budete hotovi rychleji.

Přeji produktivně strávený čas s tímto materiálem.

Pavel Šenovský

**Vysvětlení, definice, poznámka**

U této ikony najdete vysvětlující text, poznámku k probíranému tématu, která problém uvede do širších souvislostí, popřípadě důležitou definice.

**Kontrolní otázky**

Na závěr každé kapitoly je zařazeno několik otázek, které prověří, zda jste problematice kapitoly dostatečně porozuměli. Pokud nebudete vědět odpověď na některou otázku, je to signál pro Vás, abyste se ke kapitole vrátili.

**Příklad**

Příklady obsahují praktické demonstrace diskutovaného problému.

**Přestávka**

Po obtížné části textu, nebo prostě občas jenom tak je nutné si udělat krátkou přestávku, načerpat síly k novému studiu.

PS: pokud najdete chybu, nebo nejasnost nenechávejte si to pro sebe, dejte mi vědět (na e-mail: pavel.senovsky@vsb.cz, případně pošlete zprávu přes MS Teams) :-)

Kapitola 1

Situace



Náhled kapitoly

V této kapitole nadefinujeme základní vlastnosti místa, kde budeme modelovat mimořádné události.

Po přečtení této kapitoly budete umět

- pracovat se souřadnými systémy
- hledat informace o dlouhodobé meteorologické situaci
- připravovat grafické výstupy výše uvedené informace využívající



Čas pro studium

Pro prostudování kapitoly budete potřebovat přibližně hodinu až dvě, v závislosti na tom, nakolik jste si jistí v přepočtech souřadných systémů, orientaci v mapě a zda budete zkoušet jednotlivé postupy, pro Vámi vybranou lokalitu.

Prvním krokem v modelování úniků nebezpečných látek je definice situace. Situaci rozumíme především:

- lokaci události (místo, kde se stala ... alespoň přibližně)
- meteorologická situace

Z hlediska modelování má na výsledek větší vliv meteorologická situace. Lokaci proto není potřeba specifikovat příliš přesně, alespoň v systému ALOHA.

Naopak je tomu ale při psaní reportů, kde je obvykle vyžadovaná poměrně přesná informace o lokalitě, se kterou pracujeme jako základního východiska, které nám posléze umožní interpretovat výsledky modelování.

1.1 Definice lokace

Naši práci obvykle začínáme stanovením lokality, kde budeme modelovat únik látky. Zajímají nás především souřadnice lokality. Např. Ostrava má souřadnice 49°50'8"s. š., 18°17'33"v. d., kde s. š. znamená severní šířky a v. d. východní délky.

Bezpečně můžete předpokládat, že všechny lokality v České republice budou s. š. a v. d. Z hlediska finálního zákresu polygonů dopadu potřebujeme znát přesnou lokalitu. ALOHA ale není schopna takový finální zákres realizovat. Ten je proto nutné udělat buďto ručně pomocí běžného grafického programu jako je InkScape [6] a řada dalších.

ALOHA generuje pouze základní polygon, který exportujeme ... a děle s ním pracujeme. Z tohoto důvodu ALOHA vlastně nepotřebuje úplně přesně definovanou lokalitu. Proto ALOHA podporuje

zadávaní souřadnic pouze jako stupně a minuty. Sekundy pak pomíjíme, nebo je přepočítáme na minuty. Pozor ALOHA umožňuje u minut evidovat pouze jedno desetinné místo, proto bude potřeba přepočtený výsledek zaokrouhlit.

Pro představu přikládáme přibližný rozměr jednotek koordinátů na metrický systém:

- stupně: $1^\circ = 111 \text{ km}$
- minuty: $1' = 1,85 \text{ km}$
- sekundy: $1'' = 30 \text{ m}$

Pro přepočty platí, že $60 \text{ minut} = 1 \text{ stupeň}$ (1.1), $60 \text{ sekund} = 1 \text{ minuta}$ (1.1).

Vzorce pro přepočty proto jsou:

$$m = \frac{s}{60} \quad (1.1)$$

$$st = \frac{m}{60} \quad (1.2)$$

kde st ... stupně, m ... minuty, s ... sekundy.

Přepočet pro souřadnice je proto:

- na minuty: Ostrava $49^\circ 50,133' \text{ s. š.}, 18^\circ 17,55' \text{ v. d.}$
- na stupně: Ostrava $49,83555^\circ \text{ s. š.}, 18,2925^\circ \text{ v. d.}$

Přitom převod na stupně pro použití v systému ALOHA není nutný. Dále při zadávání údajů do ALOHA pamatujte, že program používá americký způsob zápisu čísel, tedy že místo desetinné čárky se používá desetinná tečka.

Ze stejného důvodu také implicitně pracuje s imperiálními jednotkami (míle, libry, stupně Fahrenheita) místo jednotek SI (km, kg, °C). Předvolené jednotky je ale možné změnit v menu *Display* → *Display Options* a nastavte *Metric unit* (moužití metrického systému).

Procvičení - souřadnice, převody a definování lokace v ALOHA



- zjistěte polohu svého rodiště.
- proveďte přepočet zjištěných souřadnic na minuty a na stupně
- zjistěte nadmořskou výšku svého rodiště
- nadefinujte polohu svého rodiště do systému ALOHA
- přenastavte ALOHA, aby používal metrický systém.

1.2 Meteorologická situace

Pro účely modelování potřebujeme obvykle také nadefinovat základní parametry meteorologické situace v době realizace scénáře úniku látky. Rozlišujeme přitom obvykle účel, za kterým modelujeme:

- rychlý model pro řešení akutní havarijní situace (ve smyslu děje se teď) - bereme v úvahu aktuální (současnou) meteorologickou situaci v místě
- modelování pro účely plánování - zajímá nás identifikace typické situace v místě jako podkladu pro nastavení reprezentativních scénářů.

Mimořadně, mezi těmito režimy rozlišuje také ALOHA. Program rozlišuje režim odezvy (response) a plánování (planning). Volba mezi oběma režimy je ale přístupná pouze při načítání uložených modelů. Režimy se liší drobně v nastaveních, s trochou úsilí, ale mohou oba režimy práce poskytnout totožný výsledek (totožné nastavení vlastností modelu).

Řešení obou přístupů je relativně intuitivní, proto níže přikládáme jenom jisté poznámky, třeba pro opakování.

1.2.1 Přepočítání rychlosti větru z km/h na m/s

Rychlost větru často v aplikacích poskytována v km/h, ALOHA ale tuto jednotku rychlosti nepodporuje. Z tohoto důvodu musíme provést přepočítání na m/s.

Přepočítání je triviální jelikož 1 km = 1000 m a 1 hod = 60 min = (60 · 60) s = 3600 s. Tedy lze zobecnit do jednoduchého vzorce (1.3):

$$y = x \cdot \frac{1000}{3600} = x \cdot 0.27778 = \frac{x}{3.6} \quad (1.3)$$

kde y ... je rychlost v m/s, x ... rychlost v km/hod.

Ostatní hodnoty povětrnostní situace je možno prostě odečíst z meteostanice nebo jiného zdroje meteorologických údajů.

1.2.2 Dlouhodobá meteo situace

Dlouhodobá situace vyžaduje trochu práce, jelikož nás zajímá několik veličin, z nichž některé se mění časově, zatímco jiné se mění místně.

Typickou časovou veličinou je teplota, která se mění v průběhu dne a také v průběhu roku. Z tohoto pohledu obvykle volíme hodnoty typické pro určité časové úseky, např. roční období. Informace tohoto typu je možno získat např. z ČHMÚ, viz [26].

Aktuální data za rok 2022 jsou přiložena v tab. 1.1. Data jsou dostupná jednak pro Českou republiku jako celek, jednak pro jednotlivé kraje. Pro případy, kdy lze předpokládat, že v lokalitě jsou typicky odlišné hodnoty, je nutné získávat data z jiných zdrojů. Jako vhodné se jeví jednotlivé meteostanice v okolí.

Kde T ... teplota vzduchu [°C], N ... dlouhodobý normál teploty vzduchu [°C], O ... odchylka od normálu [°C].

Z hlediska směru větru nás obvykle zajímá tzv. *větrná růžice*. Tu je možné získat také z ČHMÚ [29].

Profil směru větru se výrazně liší místně, je proto nutné najít meteostanici, která je nejbližší zájmové lokalitě a použít údaje z ní. Např. pro Ostravu - Zábřeh jsou data zobrazena v tab. 1.2.

Pro zprávy má smysl data reprezentovat také v grafické podobě. K tomuto účelu se obzvláště hodí sloupcové grafy a paprskový graf. Pro sloupcové grafy má smysl vytvářet profily směru větru (viz obr. 1.1) a rychlosti větru (viz obr. 1.2). Pro paprskové grafy pak má spíše smysl pouze směr větru.

V tomto případě ale doporučujeme udělat samostatný graf pro agregované hodnoty směrů (viz obr. 1.3) a jednotlivé třídy rychlosti větru (viz obr. 1.4). Důvodem je lepší čitelnost výsledných grafů.

Zde pouze upozornění. Pokud používáte Excel, jeho nové verze nenabízejí paprskový graf pro přímé vytvoření z dat. Poslední verze, která tuto funkcionalitu obsahovala byl Excel 2016. V novějších verzích je potřeba nejprve vytvořit jiný typ grafu a teprve následně pak změnit jeho typ. Paprskový graf je dostupný mezi „vodopádovými“.

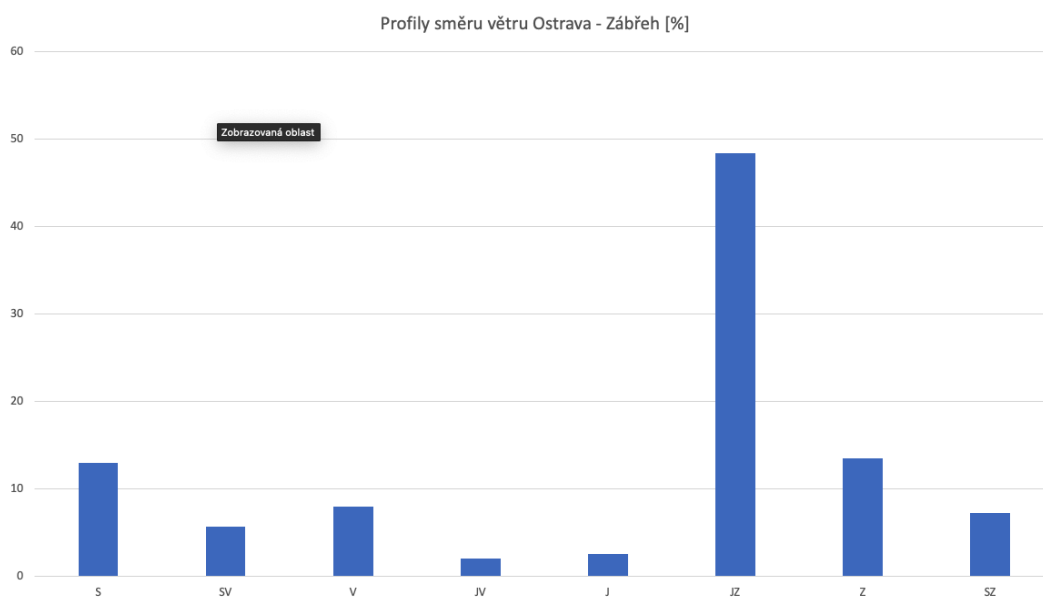
Jak je patrné z obrázku, lze jako reprezentativní zvolit jihozápadní směr větru o síle 2,5 - 7,5 m/s. Naopak rychlost menší než 0,5 m/s nebo větší než 10 m/s jsou pro tuto lokalitu silně atypické.

Tabulka 1.1: Průměrné teploty v jednotlivých měsících roku 2022 v ČR a krajích a jejich porovnání s dlouhodobým průměrem (data ČHMÚ [27])

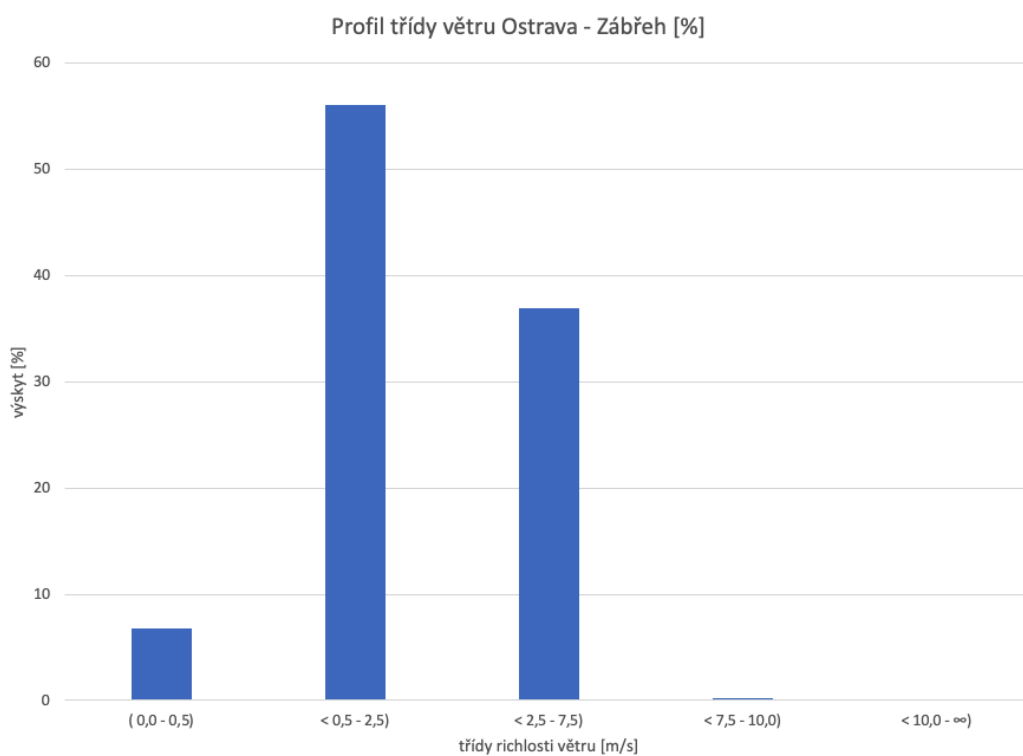
kraj	řada	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	rok
Česká republika	T	0,6	2,8	3,1	6,4	14,3	18,7	18,6	19,1	12	10,7	4,1	0,3	9,2
	N	-1,4	-0,4	3,2	8,5	13,1	16,5	18,3	17,9	13	8,2	3,5	-0,4	8,3
	O	2	3,2	-0,1	-2,1	1,2	2,2	0,3	1,2	-1	2,5	0,6	0,7	0,9
Praha a Středočeský	T	1,6	3,9	4	7,1	15,1	19,5	19,2	19,7	12,7	11,1	4,5	1,1	10
	N	-0,6	0,4	4	9,2	13,8	17,2	19	18,6	13,7	8,7	4	0,4	9
	O	2,2	3,5	0	-2,1	1,3	2,3	0,2	1,1	-1	2,4	0,5	0,7	1
Jihočeský	T	0,4	2,4	2,4	5,8	13,7	18	18	18	11,4	10,5	3,8	0,1	8,7
	N	-1,6	-0,7	2,8	7,8	12,4	16	17,6	17,2	12,4	7,6	2,9	-0,7	7,8
	O	2	3,1	-0,4	-2	1,3	2	0,4	0,8	-1	2,9	0,9	0,8	0,9
Plzeňský	T	0,7	2,6	3	6,2	14,2	18,6	18,7	18,7	11,6	10,7	3,9	0,4	9,1
	N	-1,2	-0,4	3,1	8	12,6	16,1	17,8	17,3	12,5	7,7	3	-0,3	8
	O	1,9	3	-0,1	-1,8	1,6	2,5	0,9	1,4	-0,9	3	0,9	0,7	1,1
Karlovarský	T	0,1	1,6	2,2	5,1	13,3	17,8	17,6	18	10,8	9,9	3,5	-0,4	8,3
	N	-1,9	-1,2	2,2	7,1	11,6	15	16,8	16,3	11,7	7	2,5	-0,9	7,3
	O	2	2,8	0	-2	1,7	2,8	0,8	1,7	-0,9	2,9	1	0,5	1
Ústecký	T	1,5	3,3	3,7	6,6	14,7	19	18,8	19,6	12,4	10,4	3,9	0,5	9,6
	N	-0,9	0,1	3,5	8,7	13,1	16,5	18,4	17,9	13,2	8,2	3,5	0,1	8,6
	O	2,4	3,2	0,2	-2,1	1,6	2,5	0,4	1,7	-0,8	2,2	0,4	0,4	1
Liberecký	T	0,2	2,3	2,7	5,4	13,3	17,9	17,4	18,4	11,2	10,1	3,6	0,1	8,6
	N	-1,7	-0,8	2,4	7,6	12,3	15,6	17,4	16,9	12,3	7,8	3,3	-0,5	7,7
	O	1,9	3,1	0,3	-2,2	1	2,3	0	1,5	-1,1	2,3	0,3	0,6	0,9
Královehradecký	T	0,1	2,6	3	6,1	13,9	18,5	18,2	19,4	11,8	10,5	3,8	0,2	9
	N	-1,6	-0,5	3	8,4	13,1	16,4	18,2	17,8	13	8,1	3,6	-0,5	8,2
	O	1,7	3,1	0	-2,3	0,8	2,1	0	1,6	-1,2	2,4	0,2	0,7	0,8
Pardubický	T	0,4	2,9	3,1	6,4	14,1	18,7	18,4	19,3	11,9	10,8	4,2	0,1	9,2
	N	-1,6	-0,5	3,1	8,5	13,2	16,6	18,3	18	13,2	8,3	3,7	-0,5	8,4
	O	2	3,4	0	-2,1	0,9	2,1	0,1	1,3	-1,3	2,5	0,5	0,6	0,8
Vysočina	T	0	2,3	3,1	6	13,9	18,4	18,2	18,9	11,6	10,4	4	-0,3	8,9
	N	-2	-0,9	2,7	8,1	12,7	16,2	17,9	17,7	12,8	7,8	3	-1	7,9
	O	2	3,2	0,4	-2,1	1,2	2,2	0,3	1,2	-1,2	2,6	1	0,7	1
Jihomoravský	T	1,1	3,7	3,8	7,9	15,6	20	20,3	20,7	13,2	11,2	5	0,6	10,2
	N	-1,1	0,3	4,2	9,9	14,4	18	19,8	19,4	14,3	9,1	4,3	-0,2	9,4
	O	2,2	3,4	-0,4	-2	1,2	2	0,5	1,3	-1,1	2,1	0,7	0,8	0,8
Olomoucký	T	-0,1	2,5	2,8	6,3	14	18,4	18,6	19,3	11,9	10,5	4	-0,3	8,9
	N	-2	-0,7	2,9	8,5	13,1	16,5	18,3	18,1	13,1	8,2	3,7	-0,8	8,2
	O	1,9	3,2	-0,1	-2,2	0,9	1,9	0,3	1,2	-1,2	2,3	0,3	0,5	0,7
Zlínský	T	0	2,8	2,8	6,6	14,3	18,9	19,1	19,7	12,3	10,9	4,8	0,5	9,4
	N	-1,6	-0,3	3,2	8,7	13,3	17	18,6	18,2	13,3	8,7	4,3	-0,4	8,6
	O	1,6	3,1	-0,4	-2,1	1	1,9	0,5	1,5	-1	2,2	0,5	0,9	0,8
Moravskoslezský	T	0	2,5	2,4	5,8	13,6	18,2	18,3	18,7	11,6	10,7	4,1	-0,1	8,8
	N	-1,8	-0,7	2,7	8,2	12,8	16,4	18,2	17,8	12,9	8,2	3,8	-0,7	8,2
	O	1,8	3,2	-0,3	-2,4	0,8	1,8	0,1	0,9	-1,3	2,5	0,3	0,6	0,6

Tabulka 1.2: Větrná růžice Ostrava - Zábřeh (data [28])

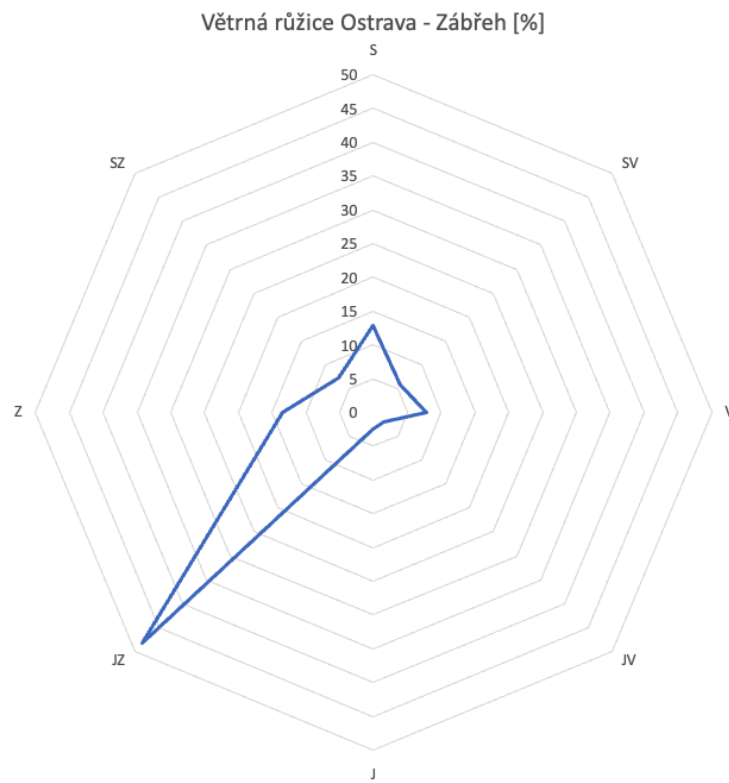
Třídy rychlosti	Rychlost v m/s	S	SV	V	JV	J	JZ	Z	SZ	Bezvětří	Součet
1	(0,0 – 0,5)	0,35	0,46	0,35	0,58	1,04	2,13	1,12	0,72	0,06	6,81
2	< 0,5 – 2,5)	11,07	4,63	6,35	1,41	1,46	18,47	7,31	5,34	0	56,03
3	< 2,5 – 7,5)	1,47	0,54	1,19	0,03	0	27,62	4,93	1,18	0	36,96
4	< 7,5 – 10,0)	0	0	0	0	0	0,14	0,06	0	0	0,19
5	< 10,0 – ∞)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		12,9	5,62	7,89	2,02	2,5	48,36	13,41	7,24	0,06	100



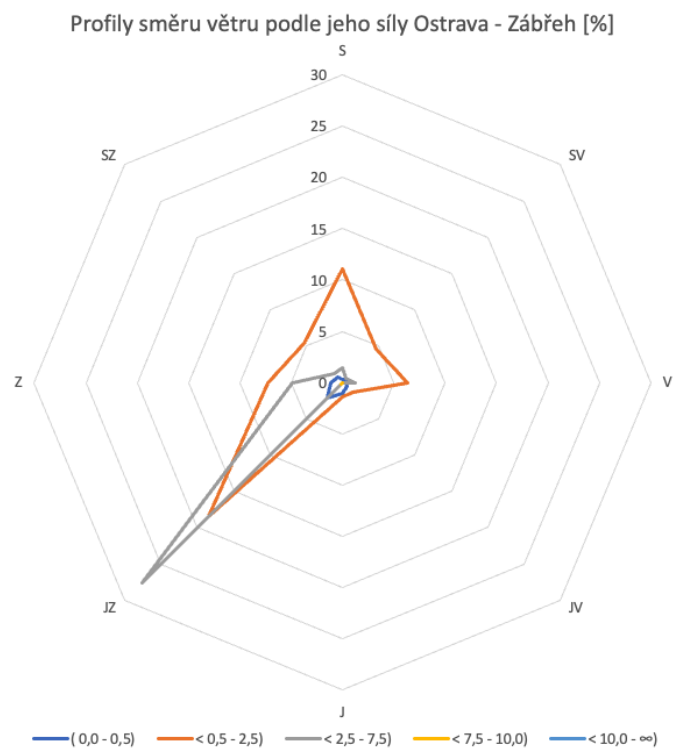
Obrázek 1.1: Profil směru větru Ostrava - Zábřeh (data [28])



Obrázek 1.2: Profil rychlostí větru Ostrava - Zábřeh (data [28])



Obrázek 1.3: Větrná růžice směru větru v Ostrava - Zábřeh (data [28])



Obrázek 1.4: Větrná růžice směru větru v třídách rychlosti Ostrava - Zábřeh (data [28])



Procvičení - profily větru a větrné růžice

- vyberte reprezentativní teploty pro jednotlivá roční období s pomocí tab. 1.1
- vytvořte profily směru a síly větru, podobně jako na obr. 1.1 - 1.4 pro vaši rodnou obec (lokalitu specifikovanou v předchozím kroku)
- data zobrazte v tabelární i grafické podobě

Kapitola 2

Zásobníky



Náhled kapitoly

Scénář mimořádné látky s účastí nebezpečné látky obvykle začíná modelem zásobníků. Ze zásobníku může látka uniknout nebo třeba může dojít ke katastrofálnímu selhání v BLEVE efektu. V této kapitole se podíváme na dva zdroje a to cisternový návěs a potrubí. Informace, které v kapitole získáte jsou ale přímo aplikovatelné na další typy zásobníků.



Čas pro studium

Pečlivé prostudování kapitoly budete potřebovat přibližně 2 hodiny. Důvodem je zejména úvahy o uniku látky z potrubí, které má řadu specifik, které může být komplikovanější zachytit v modelu.

2.1 Cisternový návěs

Zjednodušeně cisterna. Cisterny se do jisté míry liší svými vlastnostmi podle toho pro přepravu jaké látky jsou určeny. Z hlediska modelování zásobníku lze ale mezi nimi najít paralely, zejména z pohledu objemu uskladněné látky. Proto jako základ použijeme cisterny pro přepravu LPG, abychom získali rámcovou představu o rozměrech těchto zařízení, viz obr. 2.1.

Hrubé rozměry, objemy a množství LPG jsou dostupné v tab. 2.1.

Tabulka 2.1: Hrubé rozměry, objem a množství LPG v cisternách (adaptováno z [23])

objem (m ³)	kapacita (t)	průměr	délka
26	11	2,4	5,75
36	19	2,4	7,96
42	23,5	2,4	9,29

Pro určení charakteristik zásobníku je ale přepravované množství irelevantní, důležitý je pouze objem cisterny (zásobníku) a tlak, pod kterým je v něm látka uskladněna. Z vlastností cisteren (a způsobu modelování) vyplývá, že není potřeba rozměry zásobníku zadávat příliš přesně. Tedy alespoň v případě, že pro modelování využíváme ALOHA.

Pozor: klíčovým údajem je objem - ten by naopak měl být přesný. Průměr u cisteren bývá okolo 2,4 - 2,5 m, délku pak ALOHA dopočítá automaticky.

Tento způsob odpovídá v zásadě realitě, jelikož jednotlivé návěsy různých kapacit (od jednoho výrobce) se obvykle liší svou délkou.



Obrázek 2.1: Cisternový návěs 36 m³ (převzato z [23])

Z hlediska úniku má definice rozměrů svůj význam, proto např. je model úniku z potrubí realizován samostatným modelem a nikoliv pomocí běžného válcovitého zásobníku. Rozdíly ve výsledcích v rozměrech cisteren, za předpokladu, že jejich objem je nastaven správně, je ale zanedbatelný.

Odtud vyplývá požadavek na pouze přibližné hodnoty výšky.

2.2 Potrubí

ALOHA má pro potrubí samostatný model zdroje úniku. Je to dáno tím, že potrubí má některá specifika:

- může fungovat (alespoň částečně) jako tzv. nekonečný zásobník
- délka částí potrubí, které jsme schopni izolovat v plynovodní síti je obvykle tak dlouhá, že délka potrubí samotného ovlivní průběh úniku, jelikož plyn bude muset urazit značnou vzdálenost, než se dostane do místa úniku.

Podívejme se na některé charakteristiky plynovodů. Nejprve rozměry potrubí pro rozvod plynu v běžné zástavbě.

Kde d_n je průměr potrubí vnější (tedy včetně tloušťky stěny), e_n jsou tloušťky stěny a konečně **Standard Dimensio Ratio (SDR)** znamená standardní podíl rozměrů potrubí. Pro určení poloměru r tak platí (2.1):

$$r = \frac{d_n - 2e_n}{2} \quad (2.1)$$

Maximální provozní tlak pro potrubí tohoto typu závisí na charakteristikách potrubí. Tyto charakteristiky jsou normalizované pro různé řady **SDR** (2.2):

$$SDR = \frac{d_n}{e_n} \quad (2.2)$$

Potrubí jsou označována také někdy jako tzv. série S (2.3):

Tabulka 2.2: Rozměry potrubí používaných pro „běžné“ rozvody plynu (převzato z [19])

SDR	d_n [mm]	Tloušťka stěny e_n [mm]	Plocha S [mm ²]	Svař. síla [N/mm ²]
SDR 11	25	3	207	31
	32	3	273	41
	40	3,7	422	63
	50	4,6	656	98
	63	5,8	1042	156
SDR 17.6	90	5,2	1385	208
	110	6,3	2051	308
	125	7,1	2628	395
	160	9,1	4312	646
	225	12,8	8529	1280
	250	14,2	10514	1577
	315	17,9	16700	2505
	400	22,8	27005	4051

$$S = \frac{d_n - e_n}{2e_n} = \frac{SDR - 1}{2} \quad (2.3)$$

Konečně maximální provozní tlak **Maximal Operating Pressure (MOP)** [MPa] (2.4):

$$MOP = \frac{2 \cdot MRS}{(SDR - 1) \cdot C} \quad (2.4)$$

Kde MRS ... pevnostní modul plastu použitého pro potrubí pro 50 let jeho předpokládaného života při teplotě 20 °C a C ... je koeficient bezpečnosti. Pro zemní plyn se obvykle udává $C \geq 2,5$.

Pro plynovody jako je třeba Gazela se ale používá jiný typ potrubí konkrétně DN 1400. To znamená, že průměr potrubí je v takovém případě 1,4 m. Toto potrubí je ale už kovové. Pro srovnání běžné rozvody zemního plynu jsou v plastu. Vlastnost pevnosti jsou tak pro tyto velké liniové stavby výrazně odlišná.

Využít je možno také tzv. Barlowův vzorec pro výpočet **MOP**, viz [7].

Existuje také varianta výpočtu, která bere v úvahu bezpečnostní faktor (2.5):

$$P = \frac{2 \cdot S \cdot e_n}{d_n} \cdot SF \cdot E \cdot T \quad (2.5)$$

Kde P ... maximální provozní tlak [kPa], S ... pevnost v librách na čtvereční palec (kPa), SF ... bezpečnostní faktor (design factor), E ... koeficient podélného kloubu (Longitudinal joint factor), T ... faktor snížení teploty (Temperature derating factor), ostatní veličiny jako v předchozím výpočtu. Pro vypočtený tlak P předpokládáme, že při jeho překročení může dojít roztržení potrubí.

Bezpečnostní faktor SF je notmalizován v DOT 192 [1] podle tříd lokace, kterou potrubí prochází:

- Třída 1: 0,72 - oblast mimo pevninu nebo s 10 nebo méně obytnými budovami
- Třída 2: 0,6 - obytných budov: 10 - 46
- Třída 3: 0,5 - 46 nebo více obytných budov, nebo v oblastech ve vzdálenosti 91 m k potrubí k objektům jako jsou hřiště, venkovní kino/divadlo nebo veřejný shromažďovací prostor. Rozlišovací podmínka je 20+ osob, minimálně 5 dní v týdnu, pro deset týdnů v roce (týdny nemusí jít za sebou)
- Třída 4: 0,4 - pro oblasti, kde převažují budovy se 4-me nebo více podlažími

Hodnota S se udává samostatně pro každé potrubí, resp. každého výrobce. Pokud hodnota není známa, pak se bere dle DOT 192 [1] hodnota 165 MPa (24 000 psi), pro ocelová potrubí.

Vysvětlení: faktor E souvisí se způsobem, jakým bylo potrubí svařeno.

DOT 192 [1] je americká norma - důvod, proč ji používáme při výkladu je, že je volně dostupná a vysvětluje dobře základní principy bezpečnosti potrubních systémů. Jenom upozornění - DOT 192 je určena pouze pro potrubí přepravující zemní plyn.

Tab. 2.3 a 2.4 tak poskytuje dobré východisko pro pochopení základních bezpečnostních principů přepravy nebezpečných látek v potrubních systémech. Pokud by ale cílem modelování bylo získání

Tabulka 2.3: Koeficient podélného kloubu E (Longitudinal joint factor) (převzato z DOT 192 [1])

Specifikace	Třída potrubí	koeficient podélného kloubu (E)
ASTM A 53/A53M	bezešvé	1,00
	elektrické podélné svařování	1,00
	svařeno na tupo v peci	0,60
ASTM A 106	bezešvé	1,00
ASTM A 333/A 333M	bezešvé	1,00
	elektrické podélné svařování	1,00
ASTM A 381	svařeno dvojitým ponorným obloukem	1,00
ASTM A 671	elektricky svařované	1,00
ASTM A 672	elektricky svařované	1,00
ASTM A 691	elektricky svařované	1,00
API Spec 5L	bezešvé	1,00
	elektrické odporové svařování	1,00
	elektricky svařované	1,00
	svařeno dvojitým ponorným obloukem	1,00
	svařeno na tupo v peci	0,60
jiné	potrubí více než 4 palce (102 milimetrů)	0,80
jiné	potrubí 4 palce (102 milimetrů) nebo méně	0,60

Tabulka 2.4: Faktor teplotní degradace T (převzato z DOT 192 [1])

Teplota plynu ve °F (°C)	Faktor teplotní degradace (T)
250 °F (121 °C) nebo méně	1,000
300 °F (149 °C)	0,967
350 °F (177 °C)	0,933
400 °F (204 °C)	0,900
450 °F (232 °C)	0,867

podkladů pro projektování takových systémů v Evropě, bylo by samozřejmě nutné použití Evropských norem.

Existují také předpočítané tabelární hodnoty pro populární rozměry potrubí, viz tab. 2.5.

V tab. 2.5 znamenají $S=75,000$ psi fiber stress, T =nominal wall, D =nominal O.D.=outside diameter, I.P.S.=inside pipe size.

Příklad pro potrubí DN 1400:

- Průměr (d): 1420 mm
- tloušťka (e_n): 6,3 mm
- pro zjednodušení $E = T = 1$ (zanedbáváme)
- lokace mimo hustou zástavbu, proto třída 2, tedy $SF = 0,6$
- S nestanoveno, proto $S = 165MPa = 165000kPa$

$$MOP = \frac{2 \cdot 165000 \cdot 6,3}{1420} \cdot 0,6 = 1464kPa = 1,5MPa \quad (2.6)$$

Alternativně $S = 75\,000$ psi = 517 MPa

$$MOP = \frac{2 \cdot 517 \cdot 6,3}{1420} \cdot 0,6 = 2,75MPa \quad (2.7)$$

Procvičení výpočtů potrubí



- Spočítejte MOP pro ocelové potrubí DN 900, předpokládejte $e_n = 6,3$ mm jako v případě potrubí DN 1400 a $S = 75000$ psi. Výpočet realizujte v MPa.

Tabulka 2.5: Populární rozměry potrubí a předpokládaný mezní tlak (převzato z [25])

Nominal I.P.S. (in)	sch. 5S		sch. 10S		sch. 40S		sch. 80S		FIELD9	
	Nominal O.D. (in)	Wall (in)	Pressure (psi)	Wall (in)	Pressure (psi)	Wall (in)	Pressure (psi)	Wall (in)	Pressure (psi)	
1/8	0.405			0.049	18150	0.068	25175	0.095	35175	
1/4	0.54			0.065	18050	0.088	24450	0.119	33050	
3/8	0.675			0.065	14450	0.091	20225	0.126	28000	
1/2	0.84	0.065	11600	0.083	14825	0.109	19475	0.147	26250	
3/4	1.05	0.065	9275	0.083	11850	0.113	16150	0.154	2200	
1	1.315	0.065	7425	0.109	12450	0.133	15175	0.179	20425	
1 1/4	1.66	0.065	5875	0.109	9850	0.14	12650	0.191	17250	
1 1/2	1.9	0.065	5125	0.109	8600	0.145	11450	0.2	15800	
2	2.375	0.065	4100	0.109	6875	0.154	9750	0.218	13775	
2 1/2	2.875	0.083	4325	0.12	6250	0.203	10600	0.276	14400	
3	3.5	0.083	3550	0.12	5150	0.216	9250			
3 1/2	4	0.083	3100	0.12	4500	0.226	8475			
4	4.5	0.083	2750	0.12	4000	0.237	7900			
5	5.563	0.109	2950	0.134	3625	0.258	6950			
6	6.625	0.109	2475	0.134	3050	0.28	6350			
8	8.625	0.109	1900	0.148	2575	0.322	5600			
10	1.75	0.134	1875	0.165	2300	0.365	5100			
12	12.75	0.156	1825	0.18	2125	0.375	4400			
14	14	0.156	1675	0.188	2025					
16	16	0.165	1550	0.188	1775					
18	18	0.165	1375	0.188	1575					
20	20	0.188	1400	0.218	1625					
24	24	0.218	1375	0.25	1550					
30	30	0.25	1250	0.312	1550					

Kapitola 3

Nebezpečné látky



Náhled kapitoly

V této kapitole se podíváme na některé podstatné vlastnosti nebezpečných látek.

Zaměříme se především na:

- stanovení objemu látky v zásobníku
- použití různých jednotek tlaků a přepočty mezi nimi a
- některá specifika zadávání nových látek do systému ALOHA



Čas pro studium

Pro prostudování kapitoly budete potřebovat půl hodiny. Pokud ale budete zadávat vlastní novou látku do systému ALOHA podle postupu načrtnutého v kapitole, připravte se na to, že tato doba se výrazně prodlouží, jelikož budete muset nalézt zájmové hodnoty v odborné literatuře.

3.1 Stanovení objemu látky v zásobníku

Je determinováno rozměry zásobníku a tlakem nebo množstvím látky, který obsahuje. Jinými slovy je nutno zadat buďto tlak, nebo hmotnost látky obsažené v zásobníku.

Dokonce i některé potrubní systémy pro zachycení v ALOHA mohou vyžadovat „transformaci“, v případě, že potrubí je z hlediska programu neúnosně dlouhé. V takovém případě je nutno buďto použít aproximaci potrubí válcovým zásobníkem nebo modelovat potrubí v režimu nekonečného zásobníku.

Pro transformaci na válcový zásobník obvykle bereme objem potrubí jako konstantní (neměnný) a zvětšujeme výšku zásobníku, při snižování jeho délky.

Touto transformací umožníme, aby výpočet v ALOHA proběhl. Je přitom ale potřeba mít na paměti, že existuje důvod proč výpočetní programy rozlišují válcový zásobník a potrubí. V případě potrubí totiž jeho délka výrazně ovlivní charakteristiky úniku látky. Zjednodušeně látka musí urazit v potrubí poměrně dlouhou vzdálenost, než může uniknout trhlinou nebo jiným otvorem.

Transformací do podoby zásobníku se tato vlastnost ztrácí. Dalším rozdílem je to, že potrubí může být modelováno jako nekonečný zdroj. Zásobník má ale vždy definovaný (konstantní objem). Scénáře pro nekonečný zásobník je ale možné zkoumat pomocí přímých úniků.

Přepočet vychází ze všeobecně známého vzorce pro výpočet objemu válce:

$$V = \pi r^2 v \quad (3.1)$$

Kde V ... objem, r ... poloměr, v ... výška (popř. délka válce, podle jeho orientace).

Všimněte si také, že z hlediska výpočtu záleží na orientaci zásobníku a to v okamžiku, kdy látku skladujeme v kapalném skupenství, nebo předpokládáme, že by např. v důsledku úniku látky mohl

vzniknout tzv. *dvoufázový tok*. V takovém případě se v zásobníku bude nacházet částečně zkapalněný plyn, který se bude chovat výrazně odlišně od látky v čistě plynném skupenství.

Zdůvodnění je jednoduché. V plynném skupenství je skladována látka v zásobníku ve všech jeho částech ve stejném tlaku. V případě kapaliny, ale kapalina samotná vytváří tlak směrem dolů a tak u „stojícího“ zásobníku bude takový tlak podstatně vyšší než když zásobník leží. Z hlediska úniku látky je tak také vysoce relevantní údaj, kde přesně vznikl otvor, kterým látka bude unikat.

3.2 Přepočet tlaků

ALOHA podporuje tlak v následujících jednotkách:

- mmHg (milimetry rtuti)
- atm (atmosféry)
- psia (pounds per square inch absolute)
- Pa (Pascal)

Existuje ale řada dalších jednotek tlaku. Poměrně často se např. používá jednotka bar. Tato jednotka třeba byla použita pro zadání skladovacího tlaku v cisternách LPG, popsanych výše. Bar, ale není podporován v programu ALOHA, je jej proto nutné přepočítat na některou z výše uvedených jednotek.

Logickou volbou je Pa, jelikož se jedná o jednotku SI.

Pro úplnost přikládáme konverze mezi jednotkami.

- 1 mmHg = 133,322 Pa
- 1 atm = 101 325 Pa
- 1 psia = 6894,76 Pa (psi = pound per square inch, a = absolute)
- 1 psig = 108219,757412 Pa (psi = pound per square inch, g = gauge)
- 1 psig = 1 psia + 1 atm
- 1 bar = 100 000 Pa

Z výše uvedeného vyplývá že maximalní provozní přetlak podporovaný cisternami je 27 bar, proto 2 700 000 Pa.

Z hlediska množství skladované látky je tento údaj irelevantní, jelikož provozní přetlak je charakteristika výpustního ventilu nikoliv charakteristikou stavu látky tak, jak je uskladněna v cisterně (zásobníku).

Poznámka: pokud je známo množství (hmotnost) látky uskladněné v zásobníku, je jednodušší nastavit, že nevíme, v jakém skupenství se látka nachází, naspecifikujeme hmotnost a vše necháme spočítat ALOHu. Tím se zároveň vyhneme zadání tlaku látky v zásobníku.

Poznámka: ALOHA, zde je podporován tlak max. 68 mil Pa.

3.3 Zadávání nových chemických látek do ALOHA

Prosím berte v úvahu, že zadání nové látky do ALOHA by měl být až ten poslední možný krok. Tedy nebezpečnou látku bychom do ALOHA měli zadávat až v případě, že jsme si opravdu jisti, že se v integrované databázi CAMEO nenachází, např. pod jiným názvem, a že nejsou známé substituty, které lze místo této látky použít.

Jiný název může být problematický, protože jedna látka může být evidována až pod desítkami různých názvů. Při ověřování přítomnosti látky v databázi se zaměřte především na chemické názvy, obchodní názvy můžete bezpečně ignorovat, ALOHA je prakticky nikdy nepoužívá. Teprve, až toto ověříte, můžete začít s definicí látky pomocí tlačítka Add na obrazovce seznamu látek.

Postup budeme demonstrovat na látce formaldehyd - anglicky formadehyde. Níže následuje seznam vlastností v angličtině a jejich hodnot tak, jak je vyžaduje ALOHA

- chemical name: formaldehyde
- molecular weight: 30 g/mol
- AEGL-1 (60-ti minutová hodnota): 0,9 ppm
- AEGL-2 (60-ti minutová hodnota): 14 ppm
- AEGL-3 (60-ti minutová hodnota): 56 ppm
- boiling point (normal): 253,85 °K

- critical pressure: 6788780 Pa
- critical temperature: 413,15 °K
- Default LOC * - zde vyberte hodronu AEGL, ERPG nebo PAC, v tomto pořadí, podle toho, co je pro látku dostupné
- density (gas): hodnota 1,2639 kg/m³, při 293,15 °K a tlaku 101325 Pa
- ERPG-1: 1 ppm
- ERPG-2: 10 ppm
- ERPG-3: 40 ppm
- flash point: 323,15 °K
- freezing point (normal): 180,93 °K
- heat capacity (GCP - gass constant pressure): hodnota 1108,7 J/(kg°K) při teplotě 50 °K, tlak 100000 Pa
- heat capacity (LCP - liquid constant pressure): tato hodnota často není dostupná, použijte hodnotu GCP, alternativně pro LCP použijte hodnoty s teplotami pod borem varu a pro GCP hodnoty nad bodem varu
- heat of combustion: 18833000 J/kg
- IDLH: 20 ppm
- lower explosive limit: 70000 ppm
- PAC-1: 0,9 ppm
- PAC-2: 14 ppm
- PAC-3: 56 ppm
- upper explosive limit
- vapor pressure: 455,081 Pa při teplotě 293,15 °K

Jak je vidět z přehledu evidovaných vlastností, není jich právě málo, ale na druhou stranu jich také není extrémně mnoho. Přitom nemusí být nutné vyplnit všechny vlastnosti nebezpečné látky. Vynechání některých vlastností ale zabrání výpočtu některých scénářů s účastí takové látky. To může být žádoucí - např. když látka nemůže vybuchnout, proto je správné, když hodnoty spodního a horního limitu koncentrace výbušnosti není nastaven. Ve většině případů, se ale snažíme vyplnit všechny údaje, pokud je to jen možné.

V případě, že v záznamu látky chybí vlastnost potřebná pro výpočet, ALOHA uživatele na tuto skutečnost upozorní, včetně identifikace vlastnosti látky, která je k provedení výpočtu potřebná.

Ze základních informací dostupných v různých databázích nebezpečných látek je obvykle dostupna informace o tom, které scénáře lze očekávat (které bychom pravděpodobně chtěli modelovat).

Základním zdrojem informací by vždy měla být databáze CAMEO Chemicals [9], konkrétně její elektronická verze. ALOHA má určitý výběr látek z této databáze k dispozici přímo v předinstalované databázi látek. Tato databáze je ale poplatná stáří instalátoru. V době psaní těchto skript (V 2023) byla poslední verze ALOHA z půlky roku 2016 a databáze nebezpečných látek bude pravděpodobně také z této doby. Databáze CAMEO Chemicals je ale proti tomu udržovaná pravidelných intervalech. To se projevuje jednak lepší nabídkou evidovaných nebezpečných látek, jednak záznamy existujících látek jsou aktualizovány dle stavu poznání vlastností takových látek.

Stránka pro formaldehyd v CAMEO Chemicals je dostupná na adrese: <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/22034>. Zde nalezneme poměrně dost informací o látce. V tomto případě se jedná o název, molekulovou hmotnost, dolní a horní mez výbušnosti, bod tání, tlak par, hustota par, **Immediately Dangerous to Life or Health (IDLH)**, **Acute Exposure Guideline Levels (AEGL)**, **Emergency Response Planning Guidelines (ERPG)** a **Protective Action Criteria (PAC)**.

Hodnoty mohou být uvedeny v jiných jednotkách, než vidíme na seznamu. ALOHA podporuje zadávání hodnot v řadě jednotek, následně ale provádí automaticky přepočty na svou základní jednotku. V případě teploty jsou to Kelviny (°K), apod.

Toto ale rozhodně nejsou všechny potřebné vlastnosti látky. Zbývající vlastnosti je potřeba hledat v alternativních zdrojích, jako např. http://www.microkat.gr/indexed7b.html?option=com_content&task=view&id=136&Itemid=115, Pro formaldehyd je přímý odkaz: <http://www.microkat.gr/msds/formaldehyde.html>.

Z výše uvedeného odkazu můžeme doplnit kritický tlak a teplotu, teplotu vzplanutí.

Zbývají koeficienty GCP/LCP a teplo hoření... které jsou ale z hlediska dostupnosti údajů bohužel nejproblematictější. Zkusme veličinou GCP. Dobrým zdrojem pro alespoň některé látky jsou stránky NIST [16], pro formaldehyd: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C50000&Units=SI&Mask=>

1F. Jedná se o webovou aplikaci, která velké množství látek. Látky, u kterých je tato veličina změřena obvykle mají celou sekci popisující závislost GPC na teplotě. ALOHA ale umožňuje specifikovat pouze jeden takový bod.

Dalším problémem je, že webbook eviduje v jednotce $[J/(mol \cdot K)]$, ALOHA ale tuto jednotku nepodporuje. Je proto nutné provést přepočítání na nějakou jinou. Nejbližší podporovanou jednotkou je $[J/(kg \cdot K)]$. Přepočítání je triviální, pokud si uvědomíme, co vlastně počítáme (3.2):

$$C = \frac{Q}{M \cdot \Delta T} = \frac{[J]}{[mol] \cdot [K]} \quad (3.2)$$

Pro formaldehyd víme, že molekulová hmotnost je 30 mol/g, tedy 30 molů na gram, z čehož lze odvodit, že (3.3)

$$C = \frac{[J]}{[K] \cdot 30 \cdot [g]} = \frac{[J]}{[K] \cdot 30/1000 \cdot [kg]} \quad (3.3)$$

Z výše uvedeného vyplývá, že (3.4)

$$C_{p,plyn} = 33,26 \frac{J}{mol \cdot K} = \frac{33,26}{0,03} \frac{J}{kg \cdot K} = 1108,7 \frac{J}{kg \cdot K} \quad (3.4)$$

Poslední zájmovou veličinu najdeme často také pod názvem enthalpy of combustion, se značkou $\Delta_c H$. Jako zdroj je možno opět použít NIST webbook. Jednotka je v tomto případě $[kJ/mol]$ s cílovou jednotkou v ALOHA $[J/kg]$. Přepočítání lze provést následovně (3.5):

$$\Delta_c H = \frac{kJ}{mol} = \frac{1000 \cdot J}{30 \cdot g} = \frac{1000 \cdot J}{kg \cdot 30/1000} = \frac{100000 \cdot J}{3 \cdot kg} \quad (3.5)$$



Příklad - navedení nebezpečné látky do ALOHA

- navedte formaldehyd do databáze ALOHA podle informací výše
- zkuste realizovat ruční přepočítání podle vzorců výše ... ověřte, že jsou vzorce navrženy správně
- najděte zájmovou látku, která není v databázi látek ALOHA a dohledejte k ní potřebné údaje pro její navedení

Kapitola 4

Rozptyl nebezpečných látek



Náhled kapitoly

Jedním z nejčastějších zájmových scénářů, respektive scénářem, kterým často začínáme modelovat je model rozptylu látky v prostředí. Z něj lze pak dále pokračovat na další scénáře jako je např. VCE a flashfire. Rozptyl látky samotné je pro nás také významný z pohledu možných toxikologických účinků na člověka. V této kapitole se proto seznámíme:

- s používanými jednotkami pro měření koncentrace látky v ovzduší a způsob převodu mezi nimi
- používanými limity koncentrací pro odhad následků vystavení se účinkům nebezpečných látek
- probitovým funkcím používaným pro odhad pravděpodobnosti nástupu určitého následku



Čas pro studium

Kapitola není komplikovaná, připravte si půl až tři čtvrtě hodiny volného času na experimentování, pokud ale neovládáte dobře MS Excel (nebo jiný tabulkový procesor) bude pro Vás část věnovaná probitovým funkcím komplikovanější a budete tak potřebovat více času pro nastudování této problematiky.

Jako prvotní veličina, která nás zajímá z hlediska případných toxických účinků je koncentrace látky v ovzduší.

4.1 Limity koncentrací

Existují tři základní zdroje informací, které obsahují zkompileované informace o prokázaných mezních hodnotách koncentrací a jejich účinků na člověka a to konkrétně:

- **AEGL**, udržováno **Environmental Protection Agency (EPA)**, 265 nebezpečných látek, poslední aktualizace VI. 2018, zkompileované hodnoty jsou dostupné v PDF [11] (volně dostupné)
- **ERPG**, vyvíjí AIHA, poslední aktualizace z roku 2019, obsahuje 150 látek, dostupné komerčně
- **Temporary Emergency Exposure Limits (TEEL)**, udržované Ministerstvem energetiky USA, eviduje 3149 nebezpečných látek, poslední aktualizace V. 2016, dostupné ve formě **PAC** (popis viz níže) na [2]

Z hlediska použití je preferována určitá hierarchie zdrojů. Toto je využíváno pro tzv. **PAC**. PACs se určují na základě výše uvedených zdrojů v následujícím pořadí:

- schválená látka, 60-minut **AEGL** (preferováno)
- dočasná (látka je stále ve schvalovacím řízení), 60-minut **AEGL**
- **ERPG** hodnoty
- **TEEL** hodnoty

Nutnost brát v úvahu všechny výše uvedené zdroje je způsobena tím, že každý z nich bere v úvahu trochu jinou sadu nebezpečných látek. Teprve překryvem datasetů se získá ucelený dataset.

Preference **AEGL** a **ERPG** je dána tím, že jejich tvůrci provádějí zařazování látek a určení jejich expozičních limitů na bázi tvrdých vědeckých dat, tedy pozorovaných účincích na lidech a testech prováděných na zvířatech. **TEEL** oproti tomu používá spíše výpočty a odhady. Všimněte si také T v názvu, které znamená Temporal, tedy dočasné. Míjí se tím, určeno k použití dokud nebudou k dispozici lepší údaje.

I v takovém případě se však můžeme v praxi setkat s látkami, která takovým způsobem dohledat nelze.

Pokud k tomu dojde je potřeba využívat obecnější zdroje informací, popř. získat podrobnější informace od výrobce nebezpečné látky.



Zjištění expozičního limitu

- Vyhledejte vybrané nebezpečné látky (např. metan, propan, chlor, amoniak) a zjistěte pro ně zájmové AEGL a PAC koncentrace a porovnejte je

4.2 Převody

4.2.1 Koncentrace

Koncentrace se udává v řadě jednotek, je proto užitečné naučit se provádět převody mezi těmito jednotkami.

- **parts per milion (ppm)** (částic na milión)
- mg/m^3 - miligramy na metr krychlový

$$C_{ppm} = \frac{24,45 \cdot C_{mg/m^3}}{M} \quad (4.1)$$

Z výše uvedeného lze jednoduše reverzně odvodit opačný přepočít (4.2):

$$C_{mg/m^3} = 0,0409 \cdot C_{ppm} \cdot M \quad (4.2)$$

Kde C ... koncentrace, M ... molekulová hmotnost [g/mol].

Pro některé druhy koncentrací se používá také jiná jednotka - procento (%). Typicky se v procentech uvádějí spodní a horní mez výbušnosti. Přepočít je na ppm provedeme rovnicí (4.3) a zpět pak rovnicí (4.4).

$$C_{ppm} = 10000 \cdot C_{\%} \quad (4.3)$$

$$C_{\%} = \frac{C_{ppm}}{10000} \quad (4.4)$$

Výše uvedené vzorečky byste měli být schopni odvodit bez potřeby výše uvedených vzorců, stačí si uvědomit, co jednotlivé symboly znamenají. ppm je počet částic na milion, zatímco % je počet částic na 100, tedy 1 % = 1/100, oproti tomu 1 ppm = 1/1 000 000, což znamená že 1 % = 10 000 ppm a tím pádem 1 ppm = 0,0001 %.

4.2.2 Objem

Z hlediska objemu je častá otázka na převod mezi litry (l) a metry krychlovými (m^3). Platí, že 1 m^3 = 1000 l.



Přepočty koncentrací

- přepočtete 10, 33, 50 ppm (a také mg/m³) pro následující látky
 - amoniak (M = 17 g/mol)
 - chlor (M = 70,9 g/mol)
 - metan (M = 16.04 g/mol)

4.3 Model plynů těžších než vzduch

Příkladem je chlor (v angličtině chlorine).

Uvažujme reprezentativní scénář havárie cisterny převážející chlor [13]. Chlor je převážen v teplotě -3,3 °C, pod tlakem 46 psig. Při havárii vznikl otvor ve výšce 1 m, s povrchem 294 cm². (bonusový úkol - pokuste se namodelovat zásobník, všimněte si, že rozměry cisterny nejsou specifikovány)

Počasí: částečně zataženo, třída stability počasí E, rychlost větru 1 - 3 m/s, směr SSW, drsnost terénu 100 mm. Teplota v době úniku byla 12,8 °C.

Informace pro modelování úniku na přímo: rychlost 523 kg/s, po dobu 105 s, uniklo 54,9 t.



Únik chloru

Namodelujte výše uvedený únik chlóru ALOHA.

Namodelování způsobu jakým se látka rozšíří v území je ale často pouze prvním krokem modelovacího procesu. Následně často potřebujeme zjistit jaký následek namodelovaný scénář vlastně bude mít. K tomuto účelu využíváme často *probitové funkce*. Jedná se o funkci, která byla odvozena pro určení pravděpodobnosti vzniku určitého následku v důsledku sledované veličiny.

V případě rozptylu nebezpečných látek v ovzduší může být hodnocena např. pravděpodobnost úmrtí při vystavení určité koncentraci nebezpečné látky po určitou dobu.

Pro nejčastěji používané nebezpečné látky jsou tyto funkce již odvozeny a dostupné v odborné literatuře. Pro chlor je např. uváděna následující probitová funkce pro šanci na úmrtí v důsledku vystavení se účinkům látky [15].

$$Y = -13.7 + 1.93 \ln(C^{1.04} \cdot T) \quad (4.5)$$

Kde C ... koncentrace v ppm, T je čas v min. Vzhledem ke způsobu výpočtu podkladů pomocí ALOHA můžeme počítat, že $T = 60$ minut. Všimněte si, že vzorec je novější než ten, který je přístupný ve skriptech.

Dobrym zdrojem pro probitové funkce je např. [21]. Informace jsou v tomto případě dostupné bezplatně ze stránek RIVM <https://www.rivm.nl/probitrelaties/statusoverzicht-probitrelaties>.

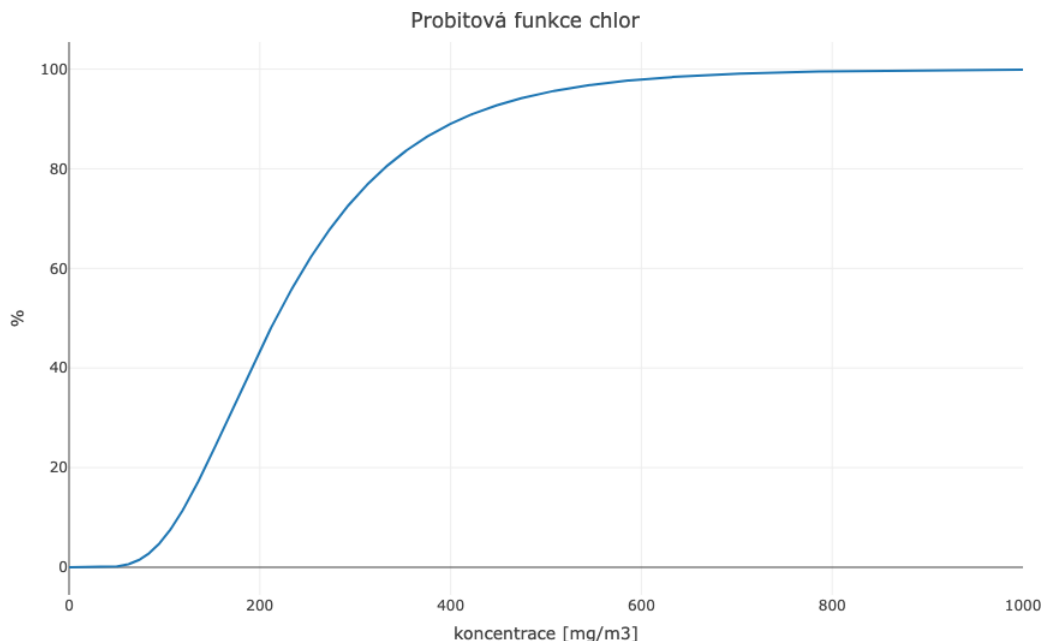
Text webového sídla je sice ve Vlámštině, stejně jako jména látek, ale je v zásadě pochopitelný pro prostudování reportů k jednotlivým látkám. Reporty samotné jsou v angličtině. Látky samotné je lepší pro jistotu dohledat pomocí CAS čísel.

Pro lepší pochopení je obvykle potřeba si probitovou funkci namodelovat. K tomuto účelu lze použít třeba R nebo také Excel, popř. jiný výpočetní program podle vlastního výběru.

Výpočet v R je dostupný zde:

Výpis 4.1: Probitová funkce chloru v R

```
1 library(dplyr)
2 library(plotly)
3 library(ecotoxicology)
4
5 t <- 60
6 C <- 0:1000
7 y <- -13.7 + 1.93 * log(C^1.04 * t)
8 perc <- ProbitToPercentage(y)
9 data <- data.frame(C, perc)
```



Obrázek 4.1: Probitová funkce chlor

```

10 fig <- plot_ly(data, x = ~C, y = ~perc, type = 'scatter', mode = 'lines') %>%
11   layout(title = 'Probitova funkce chlor',
12   xaxis = list(title = 'koncentrace [mg/m3]'),
13   yaxis = list(title = 'smrtnost %'))
14 fig

```

Pro realizaci výpočtu jsou v tomto případě potřeba dvě knihovny a to Plotly [5], Ecotoxicology [12], Dplyr [24].

Plotly je využíváno pro vykreslování interaktivních grafů, které výrazně zjednodušují odečet hodnot. Knihovna Ecotoxicology pak přepočítává hodnotu probitové funkce na procenta. To je nutné pro odhad smrtnosti. Knihovna Dplyr je používána pro operátor roury (`%>%`). Výstup grafu je dostupný v obr. 4.1.

V MS Excel je výpočet také poměrně schůdný v okamžiku, kdy si uvědomíme některé charakteristiky probitů, konkrétně průměr $\mu = 5$, standardní odchylka $\sigma = 1$. Probit hodnotu na procenta převedeme jednoduše pomocí:

Výpis 4.2: Přepočet na probitů na procenta

```
1 =NORM.DIST(probit;5;1;PRAVDA)
```

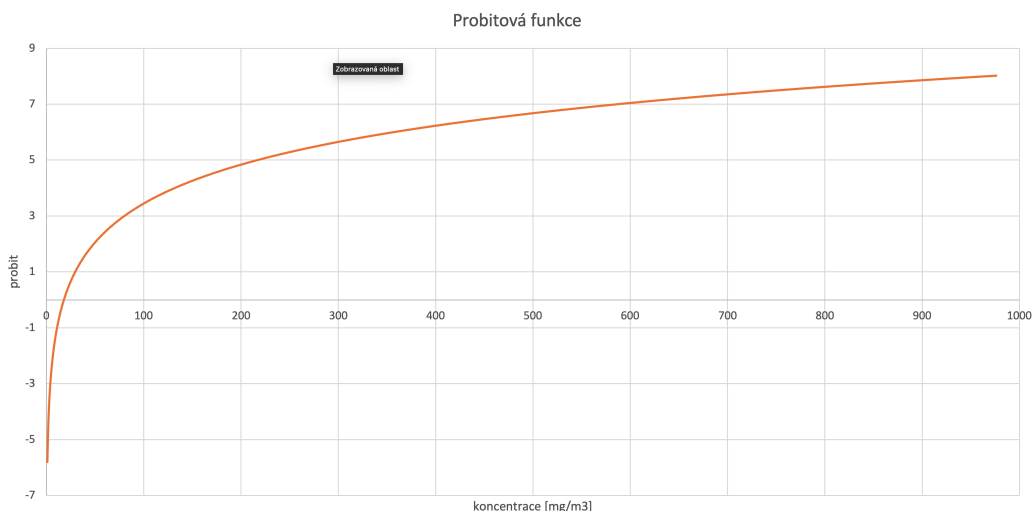
Technicky počítáme plochu pod normalizovanou křivkou se středem v 5 a směrodatnou odchylkou 1. Poslední parametr specifikuje, že počítáme kumulativní funkci.

Podrobnosti výpočtu v MS Excel ... nebo jiném tabulkovém procesoru.

Vytvoříme jednoduchou tabulku se čtyřmi sloupci:

- koncentrace v mg/m^3 (sloupec A)
- probit (sloupec B)
- procenta (sloupec C)
- koncentrace v ppm (sloupec D)

Začneme koncentracemi v mg/m^3 . Tento údaj potřebujeme, protože většina v současnosti používaných probitových funkcí pracuje s koncentrací v těchto jednotkách. Koncentraci zadáme jako řadu od 0 do zvolené hladiny, např. 1000 pro chlor. Koncentraci zvyšujeme postupně až k cílové hranici. V počátku není důležité, jakou hranici zvolíte, až provedete vykreslení grafů zjistíte, zda zvolená hranice byla dostatečně velká nebo ne.



Obrázek 4.2: Probitová funkce Chlor generováno v MS Excel

Důležité je abychom na grafu jasně viděli, jak funkce konverguje k hranici 100 %. Pokud toto není viditelné na grafu, jsme např. zastropováni na hranici nějakých 75 %, pak je potřeba rozšířit hranici pro koncentrace. Naopak, pokud je na grafu viditelná dlouhá čára na úrovni 100 %, pak naše měřítko pro koncentrace je pravděpodobně příliš veliké a je proto potřeba jej zkrátit.

Do druhého sloupce vkládáme hodnotu probitu. Vzoreček probitové funkce uvedený výše v (4.5) prostě přepíšeme do podoby vzorce Excelu. Výpočet má smysl od koncentrace 1, proto je přeskočen řádek 2 (s koncentrací 0).

Výpis 4.3: Výpočet probitů pro chlor v MS Excel

```
1 =-13,7+1,93 * LN(60 * (A3^1,04))
```

Probitovou funkci přepočteme jednoduše na procenta pomocí:

Výpis 4.4: Přepočet probitů na procenta příklad MS Excel

```
1 =NORM.DIST(B3;5;1;PRAVDA)
```

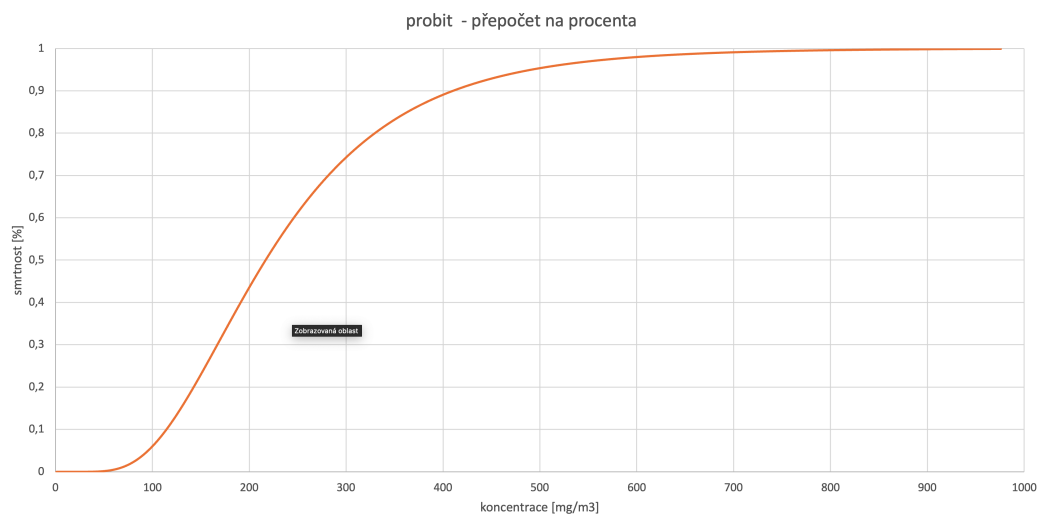
Použitá probitová funkce používá pro výpočet probitů koncentraci v mg/m^3 , z hlediska interpretace je přece jenom jednodušší použití jednotky ppm. Proto provedeme ještě přepočet na tuto jednotku s použitím molekulové hmotnosti chloru $M = 35,453$, kterou dosadíme do vzorce uvedeném v kapitole 5.2.1. Excelovský vzorec vypadá následovně:

Výpis 4.5: Přepočet koncentrací chloru na ppm v MS Excel

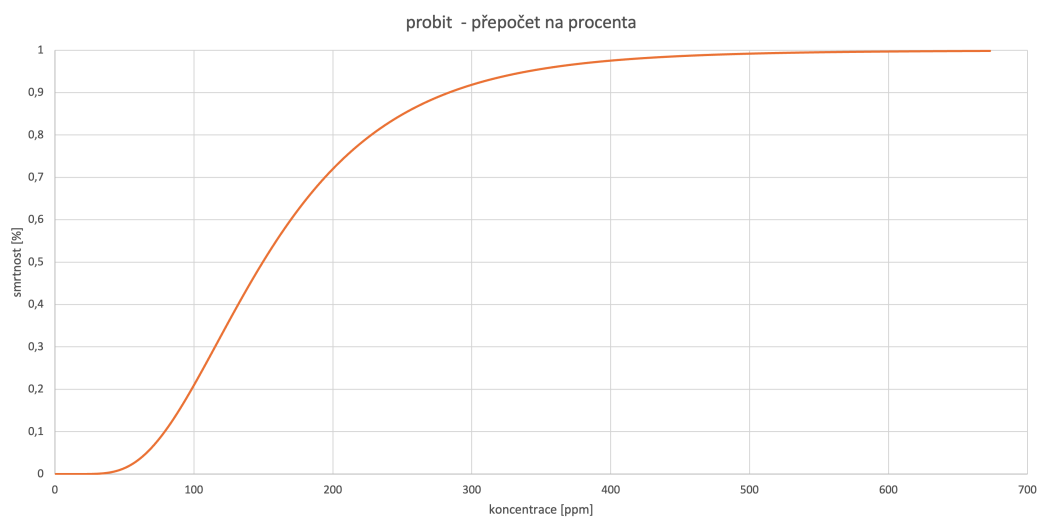
```
1 =(24,45*A3)/35,453
```

Dosažené výsledky lze vizualizovat pomocí grafů, viz obr. 4.2 - 4.4.

Pro úplnost je výše uvedený postup dostupný také přímo v MS Excel souboru již v dopracované podobě. Soubor je dostupný ze stránek kurzu na <https://lms.vsb.cz>.



Obrázek 4.3: Probitová funkce chloru přepočtená na procenta, koncentrace v mg/m^3



Obrázek 4.4: Probitová funkce chloru přepočtená na procenta, koncentrace v ppm



Probit - výpočet

- vykreslete probitovou funkci v R nebo MS Excel (dle vlastního výběru) pro látku chlor.
- dopočtete a vykreslete tuto funkci v koncentraci v ppm
- v <https://www.rivm.nl/probitrelaties/statusoverzicht-probitrelaties> naleznete parametry probitové funkce kyseliny chlorovodíkové (jinak řešené chlorovodík, HCl) ... doporučuji vyhledat podle CAS čísla a vykreslete ji stejným způsobem jako v předchozím případě.
- zkuste odhadnout počty obětí zvoleného havarijního scénáře (např. s chlorem) aplikací toho, co víte o probitových funkcích

Kapitola 5

BLEVE



Náhled kapitoly

Tato kapitola je velmi krátká, spíše je proto potřeba ji vnímat jako procvičení toho, co jsme probrali a vyzkoušeli v předchozích kapitolách, zejména pak kapitole věnované zásobníkům. V této kapitole pokryjeme scénáře, kdy takový zásobník vybuchne v důsledku přehřátí kapaliny v něm skladované. Typickou látkou pro tento typ scénářů je propan skladovaný ve formě LPG.



Čas pro studium

Pro namodelování příkladu budete potřebovat 15 - 30 minut, doporučujeme ale předem také shlédnout dokumentární film popisující jednu z největších nehod v historii, pro získání lepší představy o způsobu jakým BLEVE efekt vzniká a jak jej zařazujeme do širšího portfolia havarijních scénářů. Dokumentární film má přibližně 45 minut.

Jedna z nejhorších případů **Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion (BLEVE)** je nehoda terminálu pro zpracování **Liquidified Propane Gas (LPG)** společnosti PEMEX v Mexiku v roce 1984. V literatuře se tato havárie objevuje také pod názvem San Juanico disaster.

V důsledku závady na jednom ze zásobníků, došlo k uniku LPG (nejprve rozlité do kaluže s následným odparem látky do ovzduší), čímž vznikl oblak propanu. Tento oblak byl iniciován, čímž došlo k explozi tohoto mraku (scénář **Vapour Cloud Explosion (VCE)**). Výbuch způsobil mohutný požár v terminálu a poškodil další zásobníky LPG (předpokládaný scénář jet fire). V důsledku působení žáru došlo k přehřátí jednoho ze zásobníků LPG a jeho explozi BLEVE efektem. Následně podobně postupně explodovaly také zbývající zásobníky.

Celkové škody byly gigantické. Odhaduje se 5 000 - 7 000 mrtvých a desítky tisíc osob z těžkými popáleninami, totální ztráta veškerého vybavení terminálu LPG a zničení přilehlé blízké obytné zóny (ze které pocházela většina obětí).

Možná Vás napadne, jak je možné, že celkový počet obětí je pouze odhadován - jedná se o logický důsledek toho, jakým způsobem oběti počítáme. U osob, které okamžitě zemřou nejsou žádné pochyby. K úmrtí došlo jednoznačně v důsledku nehody. Pokud ale osoba sice přežije, ale je těžce zraněna a v průběhu času dojde k jejímu úmrtí není toto rozlišení úplně jisté. Hraniční dobou se často udávají 3 dny (ne však vždy). Pokud dojde k úmrtí osoby až po uplynutí této doby, nemusí být započítána do oficiální statistiky úmrtí.

BLEVE efekt obvykle způsobuje těžké popáleniny a ty jsou z hlediska prognózy pacientů zrádné.

Pro podrobnější informace o této události doporučujeme shlédnutí dokumentárního filmu <https://www.youtube.com/watch?v=UHKFLg5e2yE>.

Shrnutí základních informací pro modelování

- Základní skladovací kapacita byla 16 000 m³
- 6 kulových (2x 2400 m³ - naplněnost 90 %, 4x 1600 m³, naplněnost 50 %) + 48 horizontálních válcových nádrží

- prvotní únik o délce 5-10 min s následným výbuchem
- parametry mraku (prvotní únik): rozměr 200 x 150 m
- ten inicioval BLEVE efekt jednoho z menších kulových zásobníků
- dosah ohnivé koule okolo 300 m



Modelování havárie San Juanico disaster

- Procvičení úniku
 - zkuste namodelovat parametry prvotního úniku LPG - věnujte pozornost tomu, že máme k dispozici pouze omezené údaje o charakteristikách scénáře. Cílem je aby nastavení parametrů úniku vedlo přibližně k pozorované velikosti mraku
 - uložte model (a zazálohujte si ho, budeme s ním pracovat v dalším cvičení)
 - jaké množství látky takto uniklo?
- Namodelujte malý kruhový zásobník na základě parametrů uvedených výše a iniciujte BLEVE efekt.
 - jaké jsou vypočtené parametry - porovnejte s pozorovanými
 - experimentujte s modelem, aby se vypočtené parametry více přiblížily

Kapitola 6

Jet Fire



Náhled kapitoly

Scénářem Jet Fire navážeme na problematiku BLEVE efektu. Jet fire poměrně často iniciuje právě BLEVE efekt. Využijeme také možnosti, abychom lépe pochopili způsob, jakým působí teplo na člověka a použijeme probitové funkce, abychom byli schopni tyto efekty modelovat.



Čas pro studium

K prostudování kapitoly budete potřebovat přibližně hodinu, pokud jste tedy pochopili způsob fungování probitových funkcí z kapitoly 4.3. Pokud ne doporučujeme před započítáním studia této pasáže skript se vrátit a znovu (pečlivěji) prostudovat kapitolu 5.

Podobně jako v případě BLEVE efektu z předchozí kapitoly, použijeme pro úvahy o jet fire také scénář reálné události, konkrétně nehoda reaktoru pro výrobu vodíku v Richmondu, Californie, USA z roku 1989.

Databáze nehod v průmyslu [3] říká o nehodě následující¹: *Na potrubí o průměru dva palce, kterým se přiváděl plynný vodík o tlaku 3 000 psi, došlo k poruše svaru a následnému požáru vysokotlakého vodíku. Požár měl za následek zasažení plamenem izolace z křemičitanu vápenatého pro 100 stop vysoký reaktor v hydrokrakovací jednotce. Ocelový kryt tohoto reaktoru, který měl průměr 10 až 12 stop a tloušťku stěny sedm palců, následně selhal. Pád reaktoru poškodil vzduchové chladiče a další technologické zařízení, čímž značně zvýšil velikost ztráty. V době incidentu byla jednotka hydrokrakování odstavena kvůli údržbě a reaktor byl v cyklu proplachování vodíkem.*

Pro modelování dopadů na člověka je potřeba nejprve vypočítat intenzitu tepelné radiace na člověka I [W/m^2] k odvození dávky D [$(W/m^2)^{\frac{4}{3}}s$]. Nejpoužívanější je vzorec (6.1) z tzv. „zelené knihy“ [22].

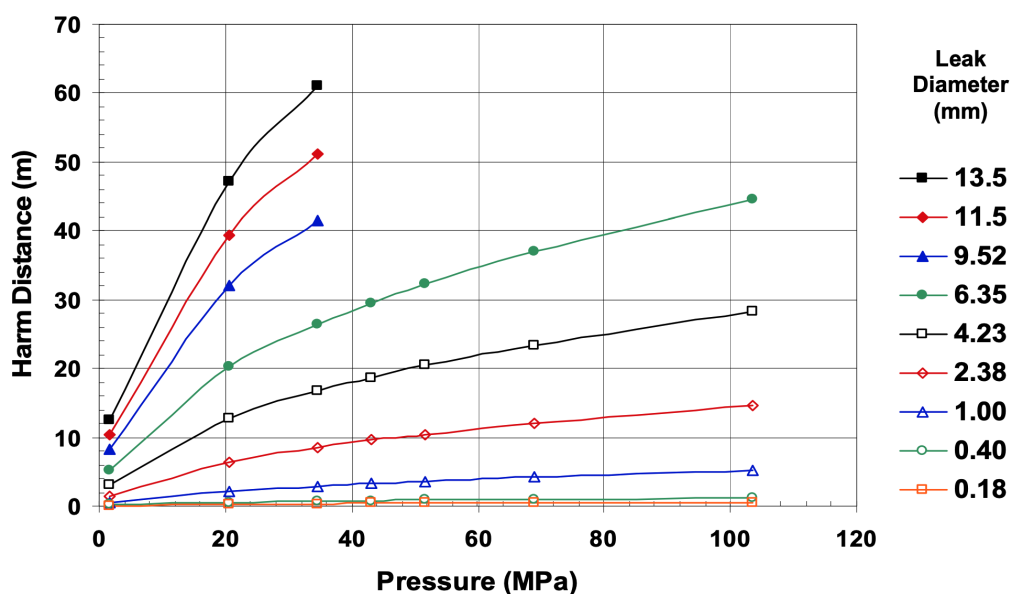
$$D = I^{\frac{4}{3}} \cdot t_e \quad (6.1)$$

Kde $D \dots$ je dávka [$(W/m^2)^{\frac{4}{3}}s$] tepelné radiace I [W/m^2], které je člověk vystaven po dobu t_e [s].

Zelená kniha [22] obsahuje také probitové funkce pro popáleniny prvního až třetího stupně. Je ale potřeba poznamenat, že tyto funkce TNO odvodila z dat z jaderných testů. Přitom je známo, že sáláním způsobeným běžnými požáry a jadernými výbuchy jsou signifikantní rozdíly. Výhodou tohoto datasetu ale je to, že je dostupný. Je přitom potřeba poznamenat, že získávání dat tohoto typu je eticky velmi problematické a tak použité datové sady jsou někdy z 60. let minulého století a novější, v plnohodnotné formě už dostupné nejsou a nejspíše ani nebudou.

Popáleniny prvního stupně (6.2):

¹https://processsafetyintegrity.com/events/1989-04-10_richmond/



Obrázek 6.1: Bezpečné odstupové vzdálenosti pro tepelný tok $I = 1,6 \text{ kW/m}^2$ (převzato z [14])

$$Y = -39,83 + 3,0186 \ln(D) \quad (6.2)$$

Popáleniny druhého stupně (6.3):

$$Y = -43,14 + 3,0186 \ln(D) \quad (6.3)$$

Popáleniny třetího stupně (6.4):

$$Y = -36,38 + 2,56 \ln(D) \quad (6.4)$$

Z praktického pohledu je ale potřeba poznamenat, že o popáleninách třetího stupně se v literatuře uvažuje také jako o přibližném ekvivalentu pro úmrtí. Lze totiž předpokládat, že osoby vystavené tepelnému toku o takové intenzitě nebudou schopni uniknout z ohroženého prostoru a tudíž tam také zahynou. Dále popáleniny třetího stupně jsou samy o sobě život ohrožujícím zranění i v případě, že daná osoba z ohroženého prostoru unikne a dostane se jí včasné lékařské pomoci.

Existují ale také jiné datasety. Např. Péréz a kol. [20] odvodili následující probitové funkce pro jednotlivé stupně popálenin, ovšem s tím, že pro popáleniny třetího stupně nejsou dostupná data:

Popáleniny prvního stupně (6.5):

$$Y = -11,65 + 6,95 \log(D) \quad (6.5)$$

Popáleniny druhého stupně (6.6):

$$Y = -13,87 + 6,95 \log(D) \quad (6.6)$$

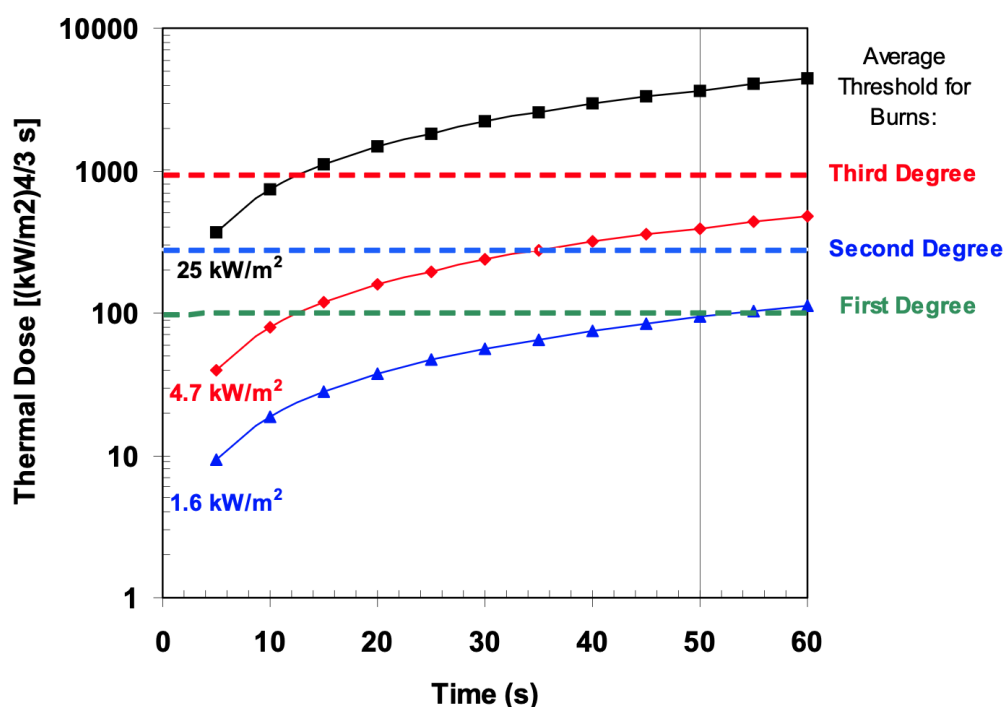
Výhodou výše uvedených dvou rovnic je, že lépe odpovídají reálným požárům, než rovnice TNO. Zaznamenaný rozdíl ale není až tak extrémní, aby známější rovnice TNO bylo možné označit za nepoužitelné.

Zajímavá je také probitová funkce, kterou navrhl Lee [18] (6.7):

$$Y = -10,7 + 1,99 \ln(D') \quad (6.7)$$

Kde D' je alternativní pohled na dávku vypočítaný následovně: $D' = F \cdot I^{\frac{4}{3}} t$. Tento alternativní pohled bere v úvahu koeficient oblečení F . Pro normálně oblečenou osobu se uvádí $F = 0,5$.

Alternativní pohled poskytuje Ministerstvo energetiky USA [14], které uvádí následující grafy odstupových vzdáleností pro tepelný tok $1,6 \text{ kW/m}^2$, viz obr. 6.1.



Obrázek 6.2: Popáleniny jako funkce závislosti expoziční dávky na čase (převzato z [14])

Výše uvedený přístup je výrazně jiný, protože umožňuje rychlé odečtení vzdálenosti, které je potřeba dosáhnout (od plamene), tak, aby se předešlo zranění osob. Vzdálenost je zde přitom brána jako funkce tlaku přepravovaného média a otvoru, kterým uniká do prostředí. Hodnota $I = 1,6 [kW/m^2]$ je považována za bezpečnou i pokud je člověk dlouhodobě vystaven jejímu působení.

Tato bezpečná vzdálenost (z obr. 6.1), ale často bývá větší než reálná odstupová vzdálenost k ostatním objektům, evakuačním trasám apod. Z tohoto důvodu může být potřebné zjištění také jiných hranic hustoty tepelného toku.

Z hlediska vzniku popálenin je jednou z podstatných veličin, která rozhodne o následku čas. Ostatně je to patrné z výpočtu dávky D i probitových funkcí, které s ní pracují. Na obr. 6.2 je dostupný model nástupu jednotlivých stupňů popálenin jako závislosti přijaté dávky na čase.

Jednotlivé křivky na obr. 11 odpovídají hraničním hustotám tepelných toků tedy $1,6 kW/m^2$, $4,7 kW/m^2$ a $25 kW/m^2$. Všimněte si člověk musí být takového tepelnému toku vystaven po určitou dobu, aby dosáhl expoziční dávky potřebné pro vznik popálenin.

Pro úmrtí pak lze spočítat pravděpodobnost následujícím způsobem [14]:

$$P(smrt) = 50 \cdot \left(1 + \frac{Y - 5}{|Y - 5|} \cdot erf\left(\frac{|Y - 5|}{\sqrt{2}}\right)\right) \quad (6.8)$$

Kde P ... pravděpodobnost, Y ... zvolená probitová funkce, erf ... chybová funkce. $erf(x)$ je představuje pravděpodobnost, že určitá normálně rozdělená náhodná veličina se nachází v intervalu $[-x, x]$. Podrobnosti o fungování funkce erf je možno nalézt např. v [8].

Pro podrobnější zhodnocení může být potřeba podrobněji zkoumat dávku radiace, které byla (nebo může být pokud je model používán pro účely plánování) daná osoba být vystavena. Výpočet vychází z obecného vzorce výpočtu D a předpokládá, že osoba vystavená účinkům tepelné radiace bude se snažit uniknout přímou cestou od plamene (do bezpečí), viz [4].

$$D = I_0^{4/3} \cdot t_{eff} = I_0^{4/3} \cdot t_r + \int_{t_r}^t I(t)^{4/3} dt = I_0^{4/3} \left[t_r + \frac{3}{5} \frac{d_0}{u} \left[1 - \left(1 + \frac{u}{d_0} (t_{exp} - t_r)\right)^{-5/3} \right] \right] \quad (6.9)$$

Kde I_0 ... je hustota tepelného toku v počáteční lokaci osoby $[W/m^2]$ d_0 ... je vzdálenost jedince od plamene v původní lokaci $[m]$, t_{eff} ... je efektivní délka expozice, t_{exp} ... celková doba expozice $[s]$, t_r ... reakční čas $[s]$, u ... rychlost, kterou bude jedinec utíkat $[m/s]$.

Casal a kol. [4] uvádí, že průměrná doba reakce $t_r = 5$ s, a rychlost úniku $u = 4 - 6$ m/s. Hodnota $u = 4$ je považována za vysoce konzervativní.

Z hlediska možného vznícení dalších objektů lze považovat [4] za hraniční hodnotu $I = 35 \text{ kW/m}^2$. Není to zcela přesná hodnota, protože reálně záleží na typu budovy, ale základní hranice tuto hodnotu lze použít. Dale lze předpokládat, že pokud budova bude takovému tepelnému toku vystavena, všichni lidé v ní zemřou (při nižší hladině tepelné radiace naopak předpokládáme, přežití ukrytých obyvatel). Opět je ale potřeba podotknout, že i v tomto případě se jedná pouze o orientační hranici.

Jet Fire



- modelujte scénář jet fire popsaný v kapitole 7
- analyzujte výsledky - zaměřte se především na délku (čas) celého procesu. (Tedy jak dlouho lze očekávat trvání jet fire)
- analyzujte délku možné expozice osob, které se budou snažit z prostoru odejít. Jaké lze očekávat následky?
- vyberte umístění osoby a pokuste se spočítat dávku tepelné radiace, kterou bude zasažena než se jí podaří uniknout.
- porovnejte výsledek s křivkami na obr. 11 a odhadněte následky

Kapitola 7

Zbývající scénáře s účastí tepla



Náhled kapitoly

V této kapitole probereme zbývající scénáře, v rámci kterých hraje roli tepelný tok. Navážeme tak na předchozí dvě kapitoly a tuto problematiku dokončíme. Tentokrát nás čeká:

- flash fire
- pool fire



Čas pro studium

Pro prostudování kapitoly budete potřebovat přibližně půl hodiny.

7.1 Flash fire

Jedná se o scénář, v rámci kterého je iniciován oblak hořlavé nebezpečné látky, která se v místě iniciace nenachází ve výbušných koncentracích. Scénář lze také označit jako prošlehnutí oblaku.

Modelování obvykle vychází z modelu úniku plynné látky do ovzduší a to buďto přímo ze zásobníku, nebo odparem zkapalněné látky z kaluže. Tedy nejprve je nutno namodelovat samotný mrak. Teprve následně jej iniciujeme a vypočítáváme samotný scénář „prošlehnutí“.

Z hlediska interpretace výsledků je situace jednoduchá. Předpokládáme, že osoby uvnitř mraku zemřou, ve smyslu lidí kteří se nacházejí v části mraku, která prošlehně. Tento předpoklad je opět zjednodušující. Je to dáno tím, že tito lidé budou těžce popáleni, a v důsledku flash fire dojde ke vznícení také přímo jejich oblečení, které bude svého nositele dále zraňovat i při odeznění samotného flash fire.

Naopak u osob, které se nacházejí mimo mrak se předpokládá, že přežijí a vyhnou se také zranění. Tento předpoklad je založen na tom, že délka trvání flash fire je extrémně krátká a tyto osoby take nebudou vystaveny přímému působení plamene. Opět se ale jedná o zjednodušující předpoklad, protože flash fire má potenciál iniciovat sekundární požáry, které budou dále působit na své okolí. U v minulosti zaznamenaných případů flash fire byly dokumentovány případy zranění způsobených tepelnou radiací, kde zraněný prokazatelně nebyl vystaven přímému působení flash fire.

Ochranný faktor budov ... je problematický. Technicky je možno říci, že budovy poskytují určitý typ ochrany proti působení flash fire. Z hlediska účinnosti záleží na tom, zda v důsledku flash fire došlo ke vzniku sekundárních požárů v zasazené budově. Pokud ano, lze předpokládat, že osoby v budově nepřežijí. Pro to, zda k takové iniciaci sekundárních požárů dojde nebo ne ale neexistují jednoduchá vodítka, která bychom mohli použít. Lze postupovat např. tak, že budeme počítat s nejhorší možnou, zároveň ale realistickou, variantou - tedy s tím, že k takové iniciaci dojde.

K opačnému závěru lze dospět, pokud je stavba projektovaná tak, aby byla schopna podobným účinkům efektivně odolávat.



Příklad flash fire:

- implementujte model zásobníku cisterny (2.4 m průměr, $V = 36 \text{ m}^3$), ve kterém je skladováno 19 tun LPG (látka propan).
- modelujte scénáře rozptylu látky v ovzduší a zaznamenejte výsledky
- modelujte scénář flash fire (a zaznamenejte výsledky)
- porovnejte zóny ohrožení v rámci scénáře rozptylu látky v ovzduší a flash fire

7.2 Poolfire

Z hlediska modelování dopadů jsou scénáře poolfire velmi podobné jako předchozí scénáře, se kterými jsme v předchozích kapitolách experimentovali. Existují dva základní scénáře pro poolfire:

- v důsledku poškození zásobníku dojde k úniku kapaliny nebo zkapalněného plynu to prostředí, vytvoří se kaluž, která je iniciována.
- dojde k iniciaci otevřené nádrže ve které se nachází hořlavá kapalina

S oběma výše uvedeným variantami se v praxi setkáváme.

Uvažujme scénář (převzato z [17]):

V malé průmyslové zóně v blízkosti Baton Rouge, Loisinana došlo 20. června 2016 v 22:30 lokálního času k nehodě na vertikálním zásobníku zkapalněného benzenu o objemu 500 galonů a průměru 4 stopy. Ostraha objektu objevila, že ze zásobníku uniká látka otvorem o průměru 6 palců lokalizovaným 10 palců nad dnem zásobníku. Látka uniká do vybetonované části průmyslové zóny. Pracovník ostrahy si vzpomíná, že zásobník byl večer naplněn.

Povětrnostní podmínky v místě: 80 °F, jihovýchodní vítr o rychlosti 7 mil/hod. Nebe je více než z poloviny zakryto mraky a vlhkost je okolo 75 %.



Příklad poolfire

- modelujte scénář
 - nejprve únik látky
 - následně pool fire
- porovnejte výsledky s informacemi z tutoriálu dostupném v https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/ALOHA_Examples.pdf

Kapitola 8

Požáry - některé z hlediska bezpečnosti zajímavé vlastnosti



Náhled kapitoly

Tato kapitola je spíše doplňkovou pro zachycení některých dalších z hlediska bezpečnosti významných vlastností požárů.



Čas pro studium

Pečlivé prostudování kapitoly budete potřebovat přibližně 20 minut.

V rámci jet fire byly představeny některé probitové funkce umožňující zkoumání účinků tepelného toku na člověka. Zajímavé ale také jsou obecné účinky, které lze očekávat také na další vybavení, popř. odpověď na otázky jaké jsou hraniční hodnoty tepelného toku, kdy lze třeba očekávat okamžité úmrtí osob, které mu budou vystaveny.

Tabulka 8.1: Vybrané hraniční hodnoty tepelného toku a očekávané dopady (převzato z [4])

intenzita sálání [kW/m^2]	dopady
1,2	dávka získaná ze Slunce v létě
1,6	minimální dávka, kterou vnímáme jako bolest
4,7	bolest za 15-20 s, popáleniny 2. stupně za 30 s
12,6	30%-ní šance na úmrtí při vystavení účinkům po delší dobu minimální úroveň sálání pro tavení plastového potrubí
23	100%-ní šance na úmrtí při vystavení účinkům po delší dobu 10%-ní šance v okamžiku vystavení
35	25%-ní šance na okamžité úmrtí poškození vybavení
60	100%-ní šance na úmrtí při vystavení účinkům

Pravděpodobnosti pro popáleniny, popř. úmrtí je možno spočítat také pomocí probitových funkcí uvedených v předchozí kapitole. Výše uvedená tabulka ale nabízí předpočítané některé zajímavé hodnoty. Naznačuje také některé typy otázek, které v oblasti působení tepelného sálání můžeme mít.

Tabulka nám tedy umožňuje jednoduše najít nějaké výchozí orientační hodnoty, ze kterých lze vycházet.

Použití probitových funkcí je ale relativně jednoduché a tak bychom se jejich použití neměli vzdávat. Právě tímto směrem je směřován níže položený úkol.



Příklad popáleniny:

- spočtete hodnotu tepelného toku pro popáleniny 2. stupně za 30 sekund pomocí probitových funkcí a porovnejte je s hodnotou z tab. 8.1.
 - jaký postup jste zvolili?
 - (bonusový úkol/úkol pro samostudium) odvoďte obecné analytické řešení tohoto problému

Kapitola 9

Cvičení - úkoly



Náhled kapitoly

Tato kapitola obsahuje shrnutí úkolů pro jednotlivé části textu. Lze jej proto použít jako zpětnovazební prvek pro to, abyste sami sebe otestovali z pohledu jak vám problematika modelování jde, bez nutnosti hledat úkoly v záplavě okolního textu.

9.1 Cvičení 1

- Lokace
 - Zjistěte polohu svého rodiště.
 - proveďte přepočty zjištěných souřadnic na minuty a na stupně
 - zjistěte nadmořskou výšku svého rodiště
 - nadefinujte polohu svého rodiště do systému ALOHA
- vyberte reprezentativní teploty pro jednotlivá roční období s pomocí tab. 1.1
- profil směru větru
 - vytvořte profily směru a síly větru, podobně jako na obr. 1.1 - 1.4 pro vaši rodnou obec (lokalitu specifikovanou v předchozím kroku)
 - data zobrazte v tabelární i grafické podobě

9.2 Cvičení 2

- implementujte model zásobníku cisterny (2.4 m průměr, $V = 36 \text{ m}^3$), ve kterém je skladováno 19 tun **LPG** (látka propan).
- proveďte výpočet rozptylu látky v ovzduší a zaznamenejte vypočtené vzdálenosti k zájmovým koncentracím
 - podívejte se také na způsob, jakým látka uniká ze zásobníku (jak rychle)
 - udělejte screenshoty výsledků pro pozdější použití.
 - experimentujte se změnou jednotlivých rozměrů, pozor - zachovejte **objem** zásobníku
 - proveďte opětovné výpočty a porovnejte dosažené výsledky - liší se, pokud ano pak o kolik?
 - Změňte charakteristiky počasí a sledujte, jaký vliv to bude mít na vzdálenosti k zájmovým hranicím koncentrace a na způsob, jakým látka uniká ze zásobníku
 - zkuste změnit také prostředí, ve kterém došlo k úniku - otevřená planina vs zastavěné území. Změnily se hodnoty, jak?
- Vyhledejte vybrané nebezpečné látky (např. metan, propan, chlor, amoniak) a zjistěte pro ně zájmové **AEGL** a **PAC** koncentrace a porovnejte je
- přepočítejte 10, 33, 50 ppm (a také mg/m^3) pro následující látky
 - amoniak ($M = 17 \text{ g/mol}$)
 - chlor ($M = 70,9 \text{ g/mol}$)

- metan ($M = 16.04$ g/mol)

9.3 Cvičení 3

- Spočítejte MOP pro ocelové potrubí DN 900, předpokládejte $e_n = 6,3$ mm jako v případě potrubí DN 1400 a $S = 75000$ psi. Výpočet realizujte v MPa.
- Namodelujte únik nebezpečné látky pomocí ALOHA, scénář popsán v 5.3.
- probit
 - vykreslete probitovou funkci v R nebo MS Excel (dle vlastního výběru) pro látku chlor.
 - dopočítejte a vykreslete tuto funkci v koncentraci v ppm
 - v <https://www.rivm.nl/probitrelaties/statusoverzicht-probitrelaties> naleznete parametry probitové funkce kyseliny chlorovodíkové (jinak řešené chlorovodík, HCl) ... doporučuji vyhledat podle CAS čísla a vykreslete ji stejným způsobem jako v předchozím případě.
 - zkuste odhadnout počty obětí zvoleného havarijního scénáře (např. s chlorem) aplikací toho, co víte o probitových funkcích

9.4 Cvičení 4

- Procvičení úniku
 - zkuste namodelovat parametry prvotního úniku LPG - věnujte pozornost tomu, že máme k dispozici pouze omezené údaje o charakteristikách scénáře. Cílem je aby nastavení parametrů úniku vedlo přibližně k pozorované velikosti mraku
 - uložte model (a zazálohujte si ho, budeme s ním pracovat v dalším cvičení)
 - jaké množství látky takto uniklo?
- Namodelujte malý kruhový zásobník na základě parametrů uvedených výše (kap. 6) a iniciujte BLEVE efekt.
 - jaké jsou vypočtené parametry - porovnejte s pozorovanými
 - experimentujte s modelem, aby se vypočtené parametry více přiblížily

9.5 Cvičení 5

- modelujte scénář jet fire popsáný v kapitole 7
- analyzujte výsledky - zaměřte se především na délku (čas) celého procesu. (Tedy jak dlouho lze očekávat trvání jet fire)
- analyzujte délku možné expozice osob, které se budou snažit z prostoru odejít. Jaké lze očekávat následky?
- vyberte umístění osoby a pokuste se spočítat dávku tepelné radiace, kterou bude zasažena než se jí podaří uniknout.
- porovnejte výsledek s křivkami na obr. 11 a odhadněte následky

9.6 Cvičení 6

- flashfire
 - implementujte model zásobníku cisterny (2.4 m průměr, $V = 36$ m³), ve kterém je skladováno 19 tun LPG (látko propan).
 - modelujte scénáře rozptylu látky v ovzduší a zaznamenejte výsledky
 - modelujte scénář flash fire (a zaznamenejte výsledky)
 - porovnejte zóny ohrožení v rámci scénáře rozptylu látky v ovzduší a flash fire
- spočítejte hodnotu tepelného toku pro popáleniny 2. stupně za 30 sekund pomocí probitových funkcí a porovnejte je s hodnotou z tab. 8.1.
 - jaký postup jste zvolili?
 - (bonusový úkol/úkol pro samostudium) odvoďte obecné analytické řešení tohoto problému
- poolfire - modelujte scénář z kap. 8.2 (Poolfire)
 - nejprve rozptyl

- následně pool fire
- porovnejte výsledky s informacemi z tutoriálu dostupném v https://response.restoration.noaa.gov/sites/default/files/ALOHA_Examples.pdf

9.7 Cvičení ... samostudium

- navádění nových látek do ALOHA
 - naved'te formaldehyd do databáze ALOHa podle informací v kapitole zadávání nových chemických látek do ALOHA (kap. 4.3)
 - zkuste realizovat ruční přepoččet podle vzorců uvedených v kapitole 4.3 ... ověřte, že jsou vzorce navrženy správně
 - najděte nebezpečnou látku (jinou než formaldehyd), která není v databázi látek ALOHa a dohledejte k ní potřebné údaje pro její navedení

Literatura

- [1] 49 CFR Part 192 – Transportation of Natural and Other Gas by Pipeline: Minimum Federal Safety Standards.
- [2] Chemical Safety Program: PACs for Chemicals of Concern - Index.
- [3] Chevron (Richmond) Refinery Fire 1989.
- [4] Chapter 7 Vulnerability. In Joaquim Casal, editor, *Industrial Safety Series*, volume 8 of *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants*, pages 249–290. Elsevier, January 2008.
- [5] Plotly R Graphing Library, 2020. Library Catalog: plotly.com.
- [6] Inkscape | Draw Freely, 2023.
- [7] AMERPipe. Barlow’s Formula.
- [8] S. Chevillard. The functions erf and erfc computed with arbitrary precision and explicit error bounds. *Information and Computation*, 216:72–95, July 2012.
- [9] EPA. CAMEO Chemicals, 2014.
- [10] EPA. ALOHA, 2016.
- [11] EPA. Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs) Values, 2018.
- [12] Jose Gama. ecotoxicology: Methods for Ecotoxicology version 1.0.1 from CRAN, 2019.
- [13] Dev D. Jani, David Reed, Charles E. Feigley, and Erik R. Svendsen. MODELING AN IRRITANT GAS PLUME FOR EPIDEMIOLOGIC STUDY. *International journal of environmental health research*, 26(1):58–74, February 2016.
- [14] Jeffrey L. LaChance, William G. Houf, Larry Fluer, and Bobby Middleton. Analyses to support development of risk-informed separation distances for hydrogen codes and standards. Technical Report SAND2009-0874, Sandia National Laboratories (SNL), Albuquerque, NM, and Livermore, CA (United States), March 2009.
- [15] National Institute for Public Health and Environment. 20180315-chlorine-INTERIM Probit function technical support document. 2018.
- [16] NIST. Vítejte v NIST WebBook Chemie, 2023. Publisher: National Institute of Standards and Technology.
- [17] NOAA and EPA. *ALOHA Example Scenarios*. NOAA, Washington, 2016.
- [18] Lees F. P. The Assessment of Major Hazards: A Model for Fatal Injury from Burns. *Process Safety and Environmental Protection*, 72(3):127–134, 1994.
- [19] PIPELIFE. *PLYNOVODNÍ POTRUBÍ PE 100RC GASLINE*. 2022.
- [20] Juan Francisco Sánchez Pérez, Enrique González Ferradás, Fernando Díaz Alonso, Daniel Palacios García, María Victoria Mínguez Cano, and José Ángel Bautista Cotorruelo. New Probit equations for the calculation of thermal effects on humans. *Process Safety and Environmental Protection*, 88(2):109–113, March 2010.

-
- [21] RIVM. Statusoverzicht probitrelaties, 2023.
- [22] TNO. *CPR-16E Methods for the determination of possible damage to people and objects resulting from releases of hazardous materials (Green Book)*. TNO, Voorburg, 1989. Publisher: Committee for the Prevention of Disasters.
- [23] VPS. Cisternový návěs 36m³, 2023.
- [24] Hadley Wickham, Romain François, Lionel Henry, Kirill Müller, Davis Vaughan, Posit, and PBC. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*, January 2023.
- [25] Worldwide Pipe & Supply. Barlow's Formula Calculator - Internal Pipe Pressure Capacity.
- [26] ČHMÚ. Portál ČHMÚ : Historická data : Počasí : Územní teploty, 2023.
- [27] ČHMÚ. Teploty v roce 2022 v ČR a krajích, 2023.
- [28] ČHMÚ. Větrná růžice Ostrava-Zábřeh, rok 2018, 2019.
- [29] ČHMÚ. Větrné růžice na imisních stanicích, 2023.
- [30] Pavel Šenovský. *Modelování následků mimořádných událostí*. VŠB-TU Ostrava, Fakulta bezpečnostního inženýrství, Ostrava, 2020.

Slovník

AEGL Acute Exposure Guideline Levels.

BLEVE Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion.

EPA Environmental Protection Agency.

ERPG Emergency Response Planning Guidelines.

IDLH Immediately Dangerous to Life or Health.

LPG Liquefied Propane Gas.

MOP Maximal Operating Pressure.

PAC Protective Action Criteria.

ppm parts per milion.

SDR Standard Dimensio Ratio.

TEEL Temporary Emergency Exposure Limits.

VCE Vapour Cloud Explosion.

Rejstřík

- ALOHA, 28
- BLEVE, 39
- CAMEO Chemicals, 29
- dvoufázový tok, 27
- flash fire, 45
- koncentrace
 - mg/m^3 , 32
 - ppm, 32
 - procenta, 32
- limity koncentrací
 - AEGL, 31
 - ERPG, 31
 - PAC, 31
 - TEEL, 31
- LPG, 39
- meteosituace, 15
- objem, 27
- poolfire, 46
- probitová funkce, 33
- souřadnice, 14
- větrná růžice, 15
- zásobník
 - potrubí, 27
- zásobníky
 - cisterna, 21
 - rozměr, 21
 - portubí, 22
 - MOP, 23
 - provozní tlak, 23
 - rozměry, 22
 - SDR, 22