

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Modelování a simulace  
2020/2021

Modely přírodních a ekologických katastrof  
Celulární automat modelující únik ropy

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
1.1	Zdroje . . . . .	2
1.2	Ověření validity . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Rozbor tématu a použitých metod</b>	<b>2</b>
2.1	Použité postupy . . . . .	3
2.2	Původ použitých metod . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Koncepce</b>	<b>3</b>
3.1	Způsob vyjádření konceptuálního modelu . . . . .	3
3.2	Formy konceptuálního modelu . . . . .	3
<b>4</b>	<b>Architektura</b>	<b>4</b>
4.1	Args . . . . .	4
4.2	Automata . . . . .	4
<b>5</b>	<b>Podstata simulačních experimentů a jejich průběh</b>	<b>5</b>
5.1	Postup experimentování . . . . .	5
5.2	Dokumentace experimentů . . . . .	5
5.3	Závěry experimentů . . . . .	7
<b>6</b>	<b>Shrnutí simulačních experimentů a závěr</b>	<b>7</b>

# 1 Úvod

Úniky ropy do moře jsou v dnešní době velmi časté a mají devastující účinky na životní prostředí. Znečištěna bývá nejen voda a její obyvatelé, ale pokud ropná skvrna zasáhne pobřeží, stává se smrtelnou i pro velké množství dalších živočichů. [5] Kromě mediálně známých úniků, jako byla například havárie plošiny Deepwater Horizon v Mexikém zálivu [1], se každý rok odehrávají i další. Například tento rok (2020) už došlo ke dvou větším únikům, a to v okolí Sri Lanky a Japonska [2]. Dále pak musíme připočítat i další drobné úniky při získání a přepravě ropy.

Tato studie je zaměřená na simulaci úniku ropy v malých oblastech pomocí celulárního automatu (CA) [6]. Cílem této studie je pak vytvoření nástroje na předpověď šíření těchto úniků.

Simulace šíření v CA je ovlivněna směrem větru a výparem ropy.

## 1.1 Zdroje

Autoři této práce jsou Daša Nosková a Kateřina Mušková.

Práce čerpá především ze studií MODELING OIL SPILL IN COASTAL WATERS USING CELL-DEVS [4] a A MODEL FOR THE PREDICTION OF OIL SLICK MOVEMENT AND SPREADING USING CELLULAR AUTOMATA [3]. Obě studie implementují podobný typ CA. Z první studie byl převzat obecný model šíření ropy bez dalších vlivů, ze druhé vliv větru a odpařování. Jako základ k nastudování Celulárních automatů byly použity přednášky z předmětu IMS [6].

## 1.2 Ověření validity

Jelikož se malé úniky běžně nedokumentují, nebyla možnost srovnat výsledky s reálným pozorováním. Byly proto provedeny experimenty popsané v předešlých studiích a srovnány s uvedenými výsledky.

# 2 Rozbor tématu a použitých metod

Ropa v moři je přemísťující se hmota, která zachovává svůj objem. Pokud odebereme, nebo přidáme hmotu v nějaké oblasti, musí být dodržen zákon zachování hmotnosti.

Konečná hmotnost = Počáteční hmotnost + Přidaná hmotnost – Odebraná hmotnost

Hmotnosti ropy v buňkách jsou odlišné, a proto se ropa bude přesouvat z buněk s větší hmotností do buněk s menší hmotností. Pokud v čase  $t$   $M_{i,j}^t > M_{i-1,j}^t$ , pak v čase  $+1$  se přemístí část ropy z buňky  $(i, j)$  do buňky  $(i-1, j)$ . Přemístěná hmotnost musí být poměrná k rozdílu těchto dvou buněk.

Střední hustota ropy se pohybuje okolo  $790 \text{ kg m}^{-3}$ . Na  $1 \text{ m}^3$  se tedy může vyskytovat maximálně  $790 \text{ kg}$ .

V celulárním automatu je ropa obsažena v souřadnicové síti. Přenos v diagonálním směru ale musí být menší než ve směru přímých sousedů. Je tedy nutné určit konstanty pro tyto dva případy. V každé ze studií byly tyto koeficienty určovány experimentálně. Nám se osvědčily konstanty  $0.098$  pro sousední směr a  $0.0176$  pro diagonální směr.

Na pohyb ropy může mít vliv i vítr. Pokud ho bereme v potaz, tak se ropa bude šířit více ve směru větru. V našem automatu byl vítr zjednodušen a pokud fouká, šíří se vítr pouze daným směrem.

Objem ropy na hladině je snižován postupným vypařováním. To je závislé především na teplotě a je vyjádřeno jako:

$$m * T * \ln t$$

kde,  $m$  je hmotnost  $t$ ,  $T$  je teplota v  $^{\circ}\text{C}$  a  $t$  je délka kroku v  $[\text{s}]$ .

## 2.1 Použité postupy

Jako model byl zvolen celulární automat([6], 299). Jelikož modelujeme pouze povrch hladiny na malém prostoru, je pole buněk v CA dvoudimenzionální a konečné. Za typ okolí bylo zvoleno Mooreovo okolí([6], 299), bere totiž v potaz nejen sousední, ale i diagonální buňky. Pokud okolí některé buňky zasahuje mimo pole, ropa se nevykládá do prázdna, ale zůstává v systému. Toto zaručuje adiabatická okrajová podmínka ([6], 302). Každá buňka v automatu je uložena zvlášť a obsahuje hodnotu.

Pro implementaci byl použit jazyk C++, jelikož usnadňuje práci s polem.

## 2.2 Původ použitých metod

Zákon zachování hmotnosti je zmíněn v podstatě v každé studii zkoumající pohyb ropy jako pohyb hmoty. Z námi použitých studií to byly: [4], [3], [7]. Maximální hmotnost buňky je přebrána z [3]. Přenos v diagonálním směru opět řeší všechny tři studie, pro naše účely nejvíce vyhovovaly ty použité ve studii [3]. Implementace větru je dělána dle publikace [3] a výpar podle [4].

## 3 Koncepce

Uniklá ropa na povrchu je sdružena do buněk. Z buněk se může pohybovat diagonálním, horizontálním, nebo vertikálním směrem. Na pohyb může působit i vítr, na celkovou hmotnost ropy odpařování. V CA se vyskytuje také pevnina, která celou dobu zůstává neměnná.

### 3.1 Způsob vyjádření konceptuálního modelu

V našem celulárním automatu představuje jedna buňka plochu o velikosti 1 m a může představovat:

- ropu: maximální hodnota (790)
- směs ropy a vody: (0, 790)
- voda: 0
- pevninu: -1

Jak už bylo řečeno, typem okolí je Moorovo osmiokolí. Tato tabulka zobrazuje okolí pro buňku na pozici  $i$ ,  $j$  v čase  $t$ .

$M_{i-1,j-1}$	$M_{i-1,j}$	$M_{i-1,j+1}$
$M_{i,j-1}$	$M_{i,j}$	$M_{i,j+1}$
$M_{i+1,j-1}$	$M_{i+1,j}$	$M_{i+1,j+1}$

Tabulka 1: Moorovo okolí

### 3.2 Formy konceptuálního modelu

Ropa se pak přesouvá mezi buňkami, ale pevnina zůstává neměnná.

Z předchozí části víme, že ropa se přesouvá z plnějších buněk do prázdnějších a zároveň musí splňovat zákon zachování hmotnosti.

Přesun ropy v jednom sousedním směru je vyjádřen tedy jako:

$$M_{i,j}^{t+1} = M_{i,j}^t + m * [(M_{i-1,j}^t - M_{i,j}^t)] \quad (1)$$

kde  $M_y^x$  je hmotnost ropy v čase x v buňce y.

A v jednom diagonálním směru:

$$M_{i,j}^{t+1} = M_{i,j}^t + m * d[(M_{i-1,j-1}^t - M_{i,j}^t)] \quad (2)$$

Konstanty m a d jsou koeficienty pro sousední a diagonální směr popsané v předchozí kapitole.

Při pohybu ropy ve všech osmy směrech zkombinujeme předchozí rovnice:

$$\begin{aligned} M_{i,j}^{t+1} = & M_{i,j}^t + m * [(M_{i-1,j}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i+1,j}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i,j+1}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i,j-1}^t - M_{i,j}^t)] \\ & + m * d * [(M_{i-1,j+1}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i+1,j+1}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i-1,j-1}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i+1,j-1}^t - M_{i,j}^t)] \end{aligned} \quad (3)$$

Tímto dostaneme celkovou hmotnost ropy nacházející se na pozici i, j v čase t+1.

Pokud na povrch vody působí i vítr, pak pro olej platí, že se posouvá stejným směrem jako je směr větru. U větru plynoucím z jihu na sever bude rovnice následující:

$$\begin{aligned} M_{i,j}^{t+1} = & M_{i,j}^t + m * [(M_{i+1,j}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i,j+1}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i,j-1}^t - M_{i,j}^t)] \\ & + m * d * [(M_{i+1,j+1}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i+1,j-1}^t - M_{i,j}^t)] \end{aligned} \quad (4)$$

Jak bylo zmíněno výše, do výsledné hmotnosti se promítá i odpařování:

$$\begin{aligned} M_{i,j}^{t+1} = & M_{i,j}^t + m * [(M_{i-1,j}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i+1,j}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i,j+1}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i,j-1}^t - M_{i,j}^t)] \\ & + m * d * [(M_{i-1,j+1}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i+1,j+1}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i-1,j-1}^t - M_{i,j}^t) + (M_{i+1,j-1}^t - M_{i,j}^t)] \\ & - [M_{i,j}^t * T * \ln t] \end{aligned} \quad (5)$$

Toto je konečná rovnice popisující přesun hmotnosti ropy mezi buňkami a platí pro okolí složené z vody, nebo z ropy. Pokud je v okolí buňka představující pevninu, je vyloučena ze vzorce podobně jako u větru. Pro pevninu také platí, že zůstává konstantní celou dobu běhu.

## 4 Architektura

Celý program je rozdělen do čtyř modulů: Args, Automata, Map a Borders. Args slouží pouze pro zpracování vstupních parametrů, Borders generuje okraje ostruvů, Map se stará o vykreslení a Automata implementuje samotný celulární automat.

### 4.1 Args

Nejdříve jsou zpracovány argumenty. Volitelné argumenty jsou: velikost pole, počet generací, maximální hmotnost ropy v jedné buňce, souřadnice ropy, souřadnice pevniny, teplotu a vítr.

### 4.2 Automata

#### Implementace buňky

Buňka je vyjádřena jako položka 2D vektoru obsahující hodnotu -1, nebo o až maximum.

#### Běh simulace

Konfigurace automatu je dána nastavením z Args. Simulace probíhá v N krocích a poté se zastavuje. Po dokončení se vytiskne výsledek do konzole.

### Simulační krok

Na začátku je zkopírováno předešlé pole pole buněk, aby se postupně při výpočtech nepřepisovali buňky v čase  $t$ . V každém kroku se prochází jednotlivé buňky pole, které nejsou pevninou, a následně se na ně a jejich okolí aplikují pravidla popsaná rovnicí 5.

## 5 Podstata simulačních experimentů a jejich průběh

Celkovým cílem studie je predikce šíření ropy při úniku. Tato znalost pak může být využita k efektivnímu zabránění dalšímu šíření.

Experimenty zkoumají, jak se ropa chová za různých podmínek a jaké mají na její šíření vliv.

### 5.1 Postup experimentování

Z dostupných parametrů byl vždy vybrán jeden, jehož dopad se zkoumal sérií experimentů.

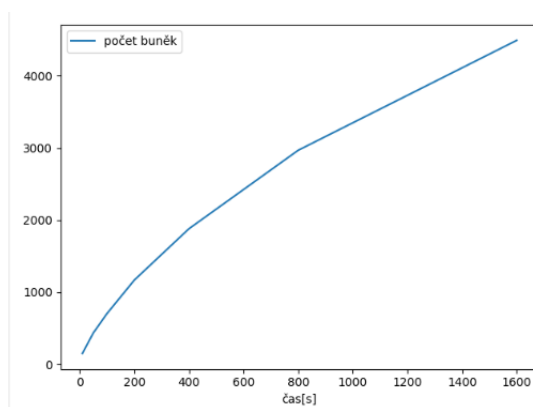
### 5.2 Dokumentace experimentů

#### Rychlost šíření v závislosti na čase bez dalších vlivů

Tento experiment zkoumá, jak se rozšiřuje znečištění v závislosti na čase. Počáteční počet buněk obsahující ropu byl 8, každá o 790 kg.

čas	počet zasažených buněk
10	152
50	436
100	704
200	1168
400	1880
800	2968
1600	4492

Tabulka 2: Šíření v závislosti na čase



Obrázek 1: Šíření v závislosti na čase

Z výsledků by se mohlo zdát, že velikost plochy znečištění je lineární. Z grafu ale vyplývá, že při vyšším čase je plocha znečištění menší než by se podle linearity očekávalo. Je to způsobeno tím, že některé okrajové

buňky v pokročilém čase mají hodnotu velmi blízkou nule - ropa v buňce je tedy už zanedbatelná.

### Výpar ropy v závislosti na čase

Zde jsme zkoumali, jaký vliv má vypařování při konstantní teplotě v závislosti na čase. Počáteční počet buněk obsahující ropu byl 8, každá o 790 kg. Teplota byla nastavena na 20 °C.

čas	hmotnost bez výparu	hmotnost s výparem
400	6319.99637	6319.54642
800	6319.99601	6318.54855

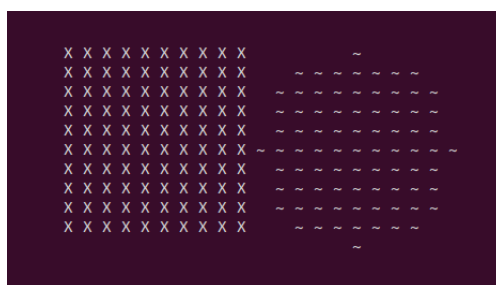
Tabulka 3: Výpar ropy v závislosti na čase

Jelikož se ropa se skládá z i látek, které se lehce odpařují, a navíc je plocha na povrchu moře poměrově velká k celkového objemu, není výpar zanedbatelný.

### Šíření ropy v závislosti na okolí

Předmětem experimentu bylo zjistit, jestli a jak moc je šíření ropy ovlivněno pevninou. Počáteční počet buněk obsahující ropu byl 100, každá o 790 kg. Čas simulace byl 35.

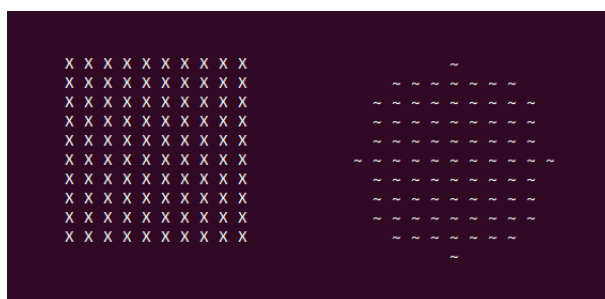
Jako příklad pevniny byl vybrán ostrov nacházející se v těsné blízkosti ropy. Tento stav popisuje následující obrázek, kde X značí ropu a ~ pevninu.



Obrázek 2: Ropa v těsné blízkosti ostrova

Bez přítomnosti ostrova se ropa rozšířila do 706 buněk, s přítomností ostrova jen do 634 buněk, co je o 10.12 % méně.

Pokud byl ostrov posunut do vzdálenosti 5 m od ropy, jeho účinnost se snížila. Ropa se rozšířila do 690, ostrov tedy pomohl zmírnit šíření o 2.26 %.



Obrázek 3: Ropa 5 m od ostrova

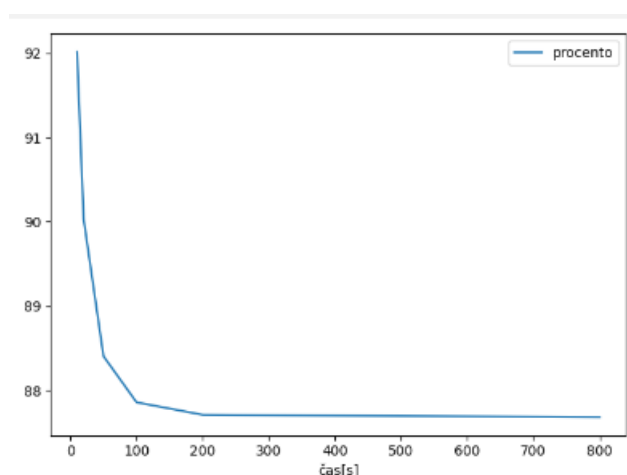
### Šíření ropy v těsné blízkosti ostrova v závislosti na čase

V předchozím experimentu jsme zjistily, že na šíření ropy má zásadní překážka v šíření - pevnina. Tento experiment zkoumá, jak se mění jeho dopad v čase.

K experimentu byl opět použit příklad těsné sousedícího ostrova s počátečním počtem 100 buněk obsahující ropu s objemem 790 kg.

čas	počet buněk bez ostrova	počet buněk s ostrovem	poměr v procentech
10	476	438	92.016807
20	612	551	90.032680
50	940	831	88.404255
100	1400	1230	87.857143
200	2156	1891	87.708720
800	5804	5089	87.680910

Tabulka 4: Šíření ropy v čase s ostrovem vs bez ostrova



Obrázek 4: Procento šíření ropy šíření ropy s ostrovem z šíření bez ostrova

Jak lze vidět v tabulce i v grafu, ostrov má zásadní vliv na šíření hlavně v okamžiku, kdy se k němu dostane. S plynoucím časem však význam ostrova v šíření klesá.

### 5.3 Závěry experimentů

Bylo provedeno několik experimentů. Z nich můžeme usuzovat, že:

- Ropa se šíří menší než lineární rychlostí
- Na šíření má nezanedbatelný vliv výpar, který musí být v potaz
- Ostrovy mají také velký vliv na šíření
- Ale pokud jsou malé, tak jen v počátečních fázích šíření

## 6 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

Závěrem dokumentace se rozumí zhodnocení simulační studie a zhodnocení experimentů (např. Z výsledků experimentů vyplývá, že ... při předpokladu, že ... Validita modelu byla ověřena ... V rámci projektu vznikl



nástroj ..., který vychází z ... a byl implementován v ...).

do závěru se nehodí psát poznámky osobního charakteru (např. práce na projektu mě bavila/nebavila, ...). Technická zpráva není osobní příběh autora. absolutně nikoho nezajímá, kolik úsilí jste projektu věnovali, důležitá je pouze kvalita zpracování simulátoru/modelu a obsažnost simulační studie (rozhodně ne např.: projekt jsem dělal ... hodin, což je víc než zadání předpokládalo. Program má ... řádků kódu). Pokud zdůrazňujete, že jste práci dělali významně déle než se čekalo, pak tím pouze demonstrujete vlastní neschopnost (to platí zejména v profesním životě). do závěru se velmi nehodí psát "auto-zhodnocení" kvality práce, to je výhradně na recenzentovi/hodnotiteli (např. v projektu jsem zcela splnil zadání a domnívám se, že můj model je bezchybný a výsledky taktéž). Statisticky častý je pravý opak autorova auto-zhodnocení. Pokud přesto chcete vyzdvihnout kvalitu svého díla (což je dobře), tak vaše výroky musí být naprosto nepopíratelně zdůvodněny a prokázány (např. pomocí jiného referenčního přístupu, matematického důkazu, analýzy, ...).

## Zdroje

- [1] [online]. Dostupné na: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Hav>
- [2] [online]. Dostupné na: <https://safety4sea.com/1978-2020-list-of-major-oil-spills/>.
- [3] BOI UKEME, J. *MODELING OIL SPILL IN COASTAL WATERS USING CELL-DEVS* [online]. 2018. Dostupné na: [www.researchgate.net/publication/335126340\\_MODELING\\_OIL\\_SPILL\\_IN\\_COASTAL\\_WATERS\\_USING\\_CELL-DEVS](http://www.researchgate.net/publication/335126340_MODELING_OIL_SPILL_IN_COASTAL_WATERS_USING_CELL-DEVS).
- [4] KARAFYLLIDIS, I. *A MODEL FOR THE PREDICTION OF OIL SLICK MOVEMENT AND SPREADING USING CELLULAR AUTOMATA* [online]. 1977. Dostupné na: [www.researchgate.net/publication/222757828\\_A\\_model\\_for\\_the\\_prediction\\_of\\_oil\\_slick\\_movement\\_and\\_spreading\\_using\\_Cellular\\_Automata](http://www.researchgate.net/publication/222757828_A_model_for_the_prediction_of_oil_slick_movement_and_spreading_using_Cellular_Automata).
- [5] LEBDUŠKOVÁ, H. *ROPNÉ HAVÁRIE A JEJICH VLIV NA KVALITU VOD* [online]. 2011. Dostupné na: [is.cuni.cz/webapps/zzp/download/130033581](http://is.cuni.cz/webapps/zzp/download/130033581).
- [6] PETR PERINGER, M. H. [online]. Dostupné na: <https://wis.fit.vutbr.cz/FIT/st/cfs.php.cs?file=>
- [7] SHYUE, S. wern. *Oil Spill Modeling Using 3D Cellular Automata for Coastal Waters* [online]. 2007. Dostupné na: [www.researchgate.net/publication/286804292\\_Oil\\_spill\\_modeling\\_using\\_3D\\_cellular\\_automata\\_for\\_coastal\\_waters](http://www.researchgate.net/publication/286804292_Oil_spill_modeling_using_3D_cellular_automata_for_coastal_waters).