

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

Modelování a simulace
2020/2021

Modely přírodních a ekologických katastrof
Celulární automat modelující únik ropy

Obsah

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

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 připočíst 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 simulaci 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.

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

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 ropa pouze daným směrem.

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

$$p * T * t$$

kde p je konstanta vypařování, T je teplota v $[\text{°C}]$ a t je délka kroku v $[\text{s}]$.

2.1 Použité postupy

Pro simulační 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 nevytláčí 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 naší 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 čtvercovou plochu o velikosti 1 m a může představovat:

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

Maximální hodnota vychází z předešlé kapitoly.

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 ropu 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, ropy nebo z jejich směsy. 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 ostrovů, 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, počáteční souřadnice ropy, souřadnice pevniny, hodnota teploty a směr větru.

4.2 Automata

Implementace buňky

Buňka je vyjádřena jako položka 2D vektoru obsahující hodnotu -1, nebo 0 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 každého simulačního kroku je zkopírováno předešlé pole buněk, aby se postupně při výpočtech nepřepisovali buňky v čase t . V každém kroku se prochází jednotlivé buňky v poli, 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 simulace šíření ropy při úniku.

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.

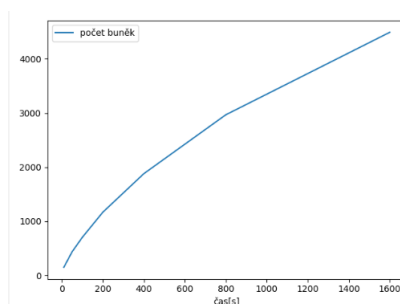
5.2 Dokumentace experimentů

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. Simuloval se tedy únik 6320 kg ropy, což odpovídá menšímu úniku.

čas[s]	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. Změna teploty v průběhu experimentu je zanedbatelná.

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

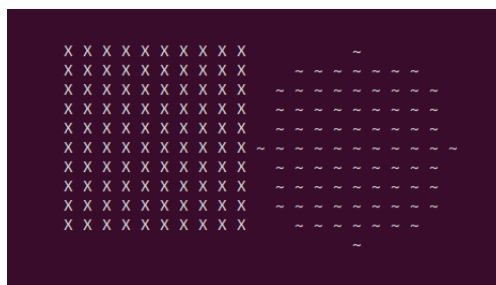
Tabulka 3: Výpar ropy v závislosti na čase

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 hmotnosti 790 kg. Délka simulace byla 35 s.

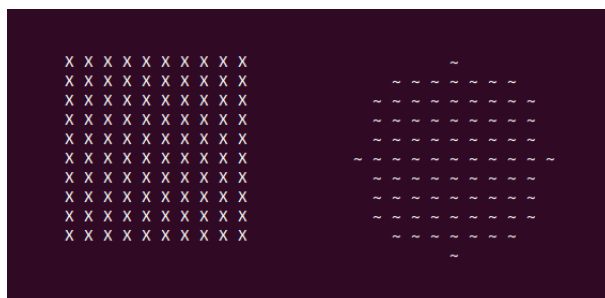
Jako příklad pevniny byl vytvořen ostrov nacházející se v těsné blízkosti ropy. Tento stav popisuje následující obrázek, kde X značí ropu a řevninu.



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

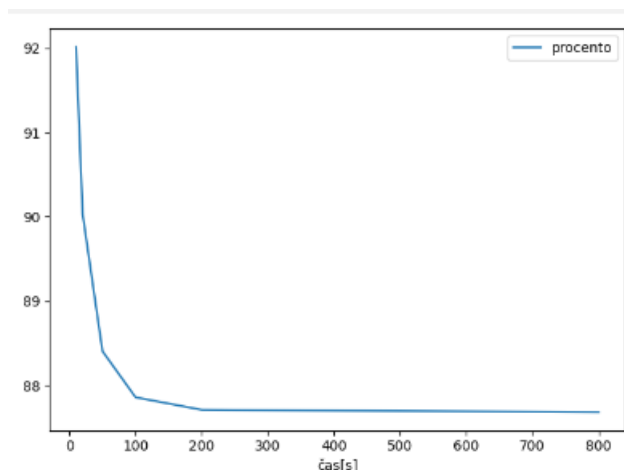
Šíření ropy v těsné blízkosti ostrova v závislosti na čase

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

K experimentu byl opět použit příklad těsné sousedícího ostrova s počátečním počtem 100 buněk, každá obsahující ropu o hmotnosti 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: Vliv blízkosti ostrova na šíření ropy

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 vzat v potaz
- Ostrovy mají také velký vliv na šíření
- Malá velikost ostrova zpomalí postup ropy jen v počátečních fázích šíření

6 Shrnutí simulačních experimentů a závěr

Výsledkem tohoto projektu je nástroj modelování šíření ropy za různých podmínek. Z experimentů vyplývá, že rychlost šíření ropy je menší než lineární, podstatný vliv má výpar a že pevnina zpomaluje postup ropy, přičemž malá pevnina jen v počátečních fázích. Z experimentů jasně vyplývá, jak důležitá je včasná reakce na únik ropy. Toto vše platí za zjednodušených podmínek a pro nasazení na větší ploše by bylo třeba vzít v potaz i další podmínky jako jsou mořské proudy, nebo fyzickochemické vlastnosti úniku dané ropy.

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.
- [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.
- [5] LEBDUŠKOVÁ, H. *ROPNÉ HAVÁRIE A JEJICH VLIV NA KVALITU VOD* [online]. 2011. Dostupné na: 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.