



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI,
INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ**

KATEDRA INFORMATYKI STOSOWANEJ

Projekt zaliczeniowy z przedmiotu Studio Projektowe 1

Symulacja rozprzestrzeniania się ropy na powierzchni morza
Modeling of oil spill spreading disasters

Autor:

Zuzanna Śmiech, Mikołaj Ogarek

Kierunek studiów:

Informatyka

Opiekun pracy:

dr hab. inż. Jarosław Wąs

Kraków, 2020

Uprzedzony o odpowiedzialności karnej na podstawie art. 115 ust. 1 i 2 ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.): „Kto przywłaszcza sobie autorstwo albo wprowadza w błąd co do autorstwa całości lub części cudzego utworu albo artystycznego wykonania, podlega grzywnie, karze ograniczenia wolności albo pozbawienia wolności do lat 3. Tej samej karze podlega, kto rozpowszechnia bez podania nazwiska lub pseudonimu twórcy cudzy utwór w wersji oryginalnej albo w postaci opracowania, artystycznego wykonania albo publicznie zniekształca taki utwór, artystyczne wykonanie, fonogram, wideogram lub nadanie.”, a także uprzedzony o odpowiedzialności dyscyplinarnej na podstawie art. 211 ust. 1 ustawy z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym (t.j. Dz. U. z 2012 r. poz. 572, z późn. zm.): „Za naruszenie przepisów obowiązujących w uczelni oraz za czyny uchybiające godności studenta student ponosi odpowiedzialność dyscyplinarną przed komisją dyscyplinarną albo przed sądem koleżeńskim samorządu studenckiego, zwanym dalej «sądem koleżeńskim».”, oświadczam, że niniejszą pracę dyplomową wykonałem(-am) osobiście i samodzielnie i że nie korzystałem(-am) ze źródeł innych niż wymienione w pracy.

*Serdeczne podziękowania dla Akademii
Górnictwo-Hutniczej za możliwość realizacji
projektu.*

Spis treści

1. Wprowadzenie	7
1.1. Zarys historyczny	7
1.1.1. Katastrofa Deepwater Horizon	7
1.1.2. Podjęte działania i skutki	8
1.2. Cele projektu	8
2. Przegląd literatury	9
2.1. „Modeling of oil spill spreading disasters using combination of Lagrangian discrete particle algorithm with Cellular Automata approach”	9
2.2. „Simulation of the Landfall of the Deepwater Horizon Oil on the Shorelines of the Gulf of Mexico”	9
2.3. „Detection and dispersion of oil spills from satellite optical images in a coastal bay”	10
2.4. „Modelling Possible Oil Spills in the Barents Sea and their Consequences”	10
3. Model zjawiska	13
3.1. Założenia modelu	13
3.1.1. Sposób reprezentacji	14
3.1.2. Czynniki kształtujące zmianę zachowania ropy na morzu	14
3.2. Przyjęte dodatkowe założenia	17
4. Aplikacja oraz wyniki symulacji	19
4.1. Wybór języka programowania	19
4.2. Opis implementacji	19
4.3. Opis aplikacji	19
4.4. Symulacja katastrofy Deepwater Horizon	19
5. Podsumowanie	21
5.1. Wnioski	21
5.2. Future Works	21

1. Wprowadzenie

Stając w obliczu nieoczekiwanych zdarzeń w naszym życiu, człowiek zaczyna zadawać sobie podstawowe pytania „co będzie dalej?”, „jak zmieni się moje życie?” oraz „jakie będą skutki tych wydarzeń?”. Te pytania zadajemy sobie zatem zawsze w sytuacjach wszelkiego rodzaju katastrof na różne skale.

W przypadku katastrof na dużą skalę (tj. obejmujących duży obszar, bądź mających wpływ na znaczną część danej społeczności) bardzo pomocne w odpowiedzi na postawione pytania są wszelkiego rodzaju symulacje komputerowe. Dzięki nim, możemy przewidzieć rozwój wydarzeń oraz potencjalne skutki danego zdarzenia. W razie katastrofy w środowisku naturalnym należy wziąć pod uwagę wiele czynników i oszacować ich wpływ na rozwój sytuacji po katastrofie. Mając do dyspozycji symulację komputerową, możemy w bezpiecznym, wirtualnym środowisku sprawdzić jak wydarzenia, w zależności od naszych działań, będą się rozwijać. W skutek czego, podejmowane przez nas działania będą bardziej precyzyjne i przynoszące znaczące efekty.

Działanie w trakcie nieprzewidzianych zdarzeń powinno być szybkie i skuteczne. Przekonali się o tym właściciele platformy wiertniczej Deepwater Horizon oraz rząd Stanów Zjednoczonych Ameryki podczas katastrofy tejże platformy wiertniczej 20 kwietnia 2010 roku. Ta katastrofa, jej destruktywny wpływ na środowisko oraz wpływ działań podjętych przez osoby zarządzające akcją ratunkową, zainspirowały twórców tej publikacji do podjęcia tematu symulacji rozprzestrzeniania się ropy na morzu w nadziei, iż program powstały w wyniku prac projektowych przyczyni się do podjęcia lepszych działań na wypadek zaistnienia podobnej sytuacji w przyszłości.

1.1. Zarys historyczny

1.1.1. Katastrofa Deepwater Horizon

20 kwietnia 2010 roku, o godzinie 22:00 czasu lokalnego wyciek ropy naftowej z platformy wiertniczej Deepwater Horizon w Zatoce Meksykańskiej spowodował wybuch oraz pożar. W wyniku zajścia 11 pracowników uważa się za zaginionych lub zmarłych w rezultacie eksplozji, a 17 osób zostało ciężko rannych. Platforma Deepwater Horizon należąca do koncernu BP zatonięła 2 dni po wybuchu. Wyciek ropy trwający 87 dni, skutkowało uwolnieniem 4.9 mln baryłek ropy do Zatoki Meksykańskiej. To wydarzenie uznane zostało za największą katastrofę ekologiczną w historii Stanów Zjednoczonych Ameryki.

Na podstawie [1].



Rys. 1.1. Wyciek ropy po katastrofie platformy Deepwater Horizon, 6 maj 2010. Zdjęcie wykonane przez United States Navy.

1.1.2. Podjęte działania i skutki

Z początkiem maja 2010 roku plama ropy na powierzchni Zatoki Meksykańskiej zajmowała około 6.5 tysiąca km². Pracownicy koncernu BP próbowali bezskutecznie zatamować wyciek przy pomocy dużej, stalowej kopuły, jednakże pod nią zaczęły zbierać się klatraty metanu, które zaczęły unosić kopułę i zatkały otwór, przez który ropa miała wypływać. 16 maja z powodzeniem zamontowano rurociąg transportujący ropę i gaz do tankowca, dzięki czemu emisja zanieczyszczeń do Zatoki Meksykańskiej została zredukowana. 12 lipca 2010 na dno Zatoki Meksykańskiej opuszczono kopułę ważącą 75 ton, która umożliwiła zahamowanie wycieku. Podjęto również próbę utworzenia wysp barierowych u wybrzeży stanu Louisiana, jednakże ze względu na czasochłonność oraz kosztowność przedsięwzięcia, nie zostało ono zrealizowane.

Na podstawie [1].

1.2. Cele projektu

Celem projektu z przedmiotu Studio Projektowe 1 jest stworzenie aplikacji umożliwiającej symulację rozprzestrzeniania się ropy na morzu. Dodatkowo celem pomocniczym jest zidentyfikowanie parametrów mających wpływ na rozprzestrzenianie się ropy. Ponadto aplikacja umożliwiająca symulację katastrofy, będzie responsywna na zmiany wynikające z ustawiania tamy/bariery na morzu.

2. Przegląd literatury

Ze względu na historyczne wydarzenia oraz skalę problemu, tematyka symulacji rozprzestrzeniania się ropy na powierzchni morza jest poruszana w wielu publikacjach. Poniżej poddano analizie kilka publikacji na ten temat i streszczono najważniejsze informacje, które wpłynęły na implementację aplikacji.

2.1. „Modeling of oil spill spreading disasters using combination of Lagrangian discrete particle algorithm with Cellular Automata approach”

Artykuł opisuje abstrakcyjny model rozprzestrzeniania się ropy po powierzchni morza, biorąc pod uwagę czynniki takie jak: wpływ wiatru, prądów morskich oraz sąsiedztwa z brzegiem morza, jak również parowanie, dyspersję i emulgację. Model oparty jest na metodologii cząstek dyskretnych, co umożliwia przewidzenie (globalnie i lokalnie), gdzie obecnie znajduje się ropa oraz charakteryzuje jej własności fizyko-chemiczne takie jak: gęstość, lepkość, itp.

Idea modelu polega na podzieleniu obszaru (morze i ląd) na kwadratowe komórki, z których każda będzie miała przypisany wektor prędkości (wynikowa prądu morskiego i wiatru). Całość masy ropy zostanie podzielona na małe cząstki, z których każda będzie miała przypisane masę, gęstość, skład itd. Każda z cząstek ropy będzie mogła zostać poddana procesowi parowania, emulgacji i dyspersji.

Model korzysta z teorii rozprzestrzeniania się Fay’a.

Na podstawie [2].

2.2. „Simulation of the Landfall of the Deepwater Horizon Oil on the Shorelines of the Gulf of Mexico”

W artykule przeprowadzono symulację transportu ropy naftowej dla odwiertu Macondo Well (Deepwater Horizon) na powierzchni wody w Zatoce Meksykańskiej, w tym dyspozycji na linii brzegowej. Wykorzystano model USA National Oceanic Atmospheric Administration (NOAA) General NOAA Operation Modelling Environment (GNOME) oraz te same wartości parametrów i dane wejściowe przyjęte przez NOAA po katastrofie Deepwater Horizon. Stwierdzono, iż wskaźnik znikania ropy z powierzchni wody wynosił najprawdopodobniej około 20% dziennie na podstawie satelitarnych obserwacji

szybkości znikania ropy wykrytej na powierzchni morza po uszczelnieniu wycieku ropy. Symulacje i szacunki masy ropy naftowej sugerują, że masa ropy naftowej, która dotarła do lini brzegowych, wynosiła od 10 do 30 tysięcy ton, przy oczekiwanej wartości 22 tysięcy. Ponad 90% rozłożenia ropy wystąpiło na lini brzegowej stanu Louisiana i miało miejsce w dwóch falach. Symulacje ujawniły, że uszczelnienie wycieku po 2 tygodniach spowodowałoby jedynie 30% zanieczyszczenie środowiska w odniesieniu do rzeczywistego stanu rzeczy, natomiast uszczelnienie po 3 tygodniach spowodowałoby ograniczenie do 60%.

Na podstawie [3].

2.3. „Detection and dispersion of oil spills from satellite optical images in a coastal bay”

Artykuł opisuje symulację procesu rozprzestrzeniania się ropy naftowej oraz proces zmiany jej właściwości pod wpływem czynników zewnętrznych. Symulacja została przeprowadzona w oparciu o dane pochodzące z prawdziwego incydentu - zderzenia tankowca WuYiSan z ropnym terminalem w Yeosu (Korea) 31 Stycznia 2014.

W tworzeniu symulacji naukowcy oparli się na:

- zdjęciach satelitarnych z Landsat-8 Operational Land Imager oraz Dubaisat-2
- pomiarach w terenie: pomiary spektrometryczne oraz klasyfikacja właściwości ropy w danym punkcie na morzu
- zastosowaniu modelu płynów o nazwie Environmental Fluid Dynamics Code (EFDC)
- dane meteorologiczne: siła i kierunek wiatru, dostarczane przez najbliższą stację meteorologiczną co godzinę

Na podstawie [4].

2.4. „Modelling Possible Oil Spills in the Barents Sea and their Consequences”

Model przyjęty w powyższym artykule zakłada wykorzystanie modelu propagacji zanieczyszczeń powietrza. Według tego podejścia ilość cząsteczek zanieczyszczonych w danym obszarze jest proporcjonalna do gęstości zanieczyszczeń w danym obszarze, intensywności wiatru i różnicy wysokości. Różnica w podejściu w artykule to obliczenie kombinacji liniowej prędkości wiatru i przepływu wody. Należy wziąć pod uwagę fakt, iż istnieją pewne obszary wód, gdzie istnieją prądy o różnych mocach i kierunkach. Na model dystrybucji cząsteczek ropy wpływa znacząco temperatura. W wypadku niskiej temperatury, procesy dystrybucji zachodzą wolniej. W przypadku Morza Barentsa (w artykule symulowano

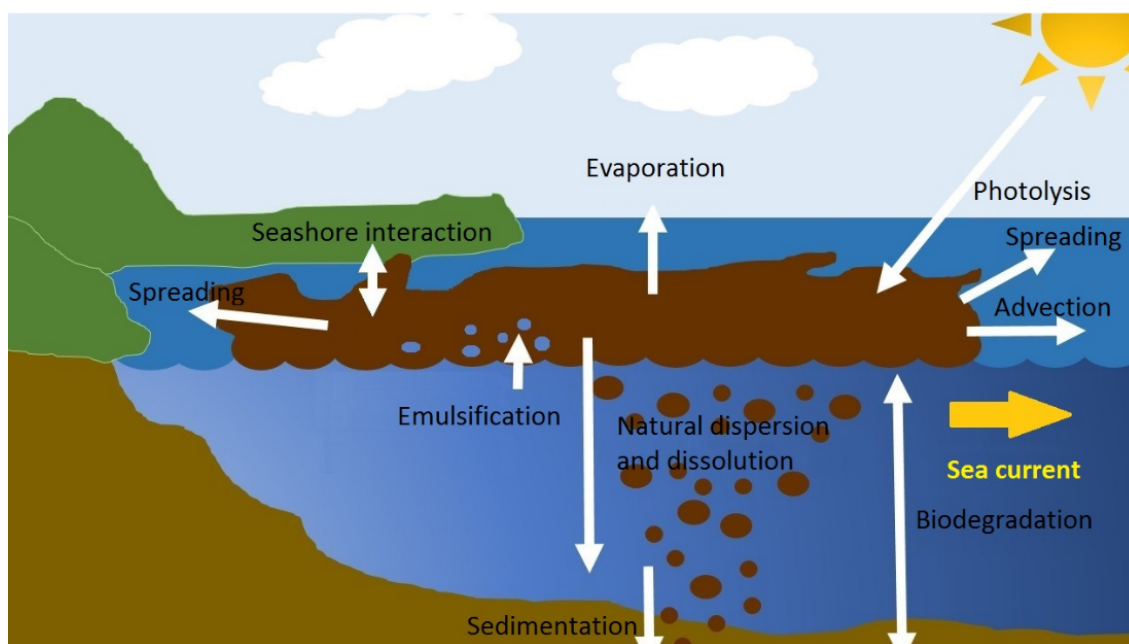
rozprzestrzenianie się ropy na tym morzu) należy również wziąć pod uwagę obszary morza, na których znajdują się góry lodowe, które blokują rozprzestrzenianie się zanieczyszczeń. Schemat symulacji zakłada:

1. podzielenie obszaru na mniejsze fragmenty (należy odpowiednio dobrać rozmiar pojedynczego fragmentu)
2. ustalenie początkowej ilości ropy w każdym z nich
3. obliczenie ilości ropy przetransportowanej do sąsiadujących obszarów
4. powrót do kroku pierwszego

Na podstawie [5].

3. Model zjawiska

Podjmując tematykę modelowania należy zastanowić się jakie czynniki mogą wpływać na zachowanie, rozmiar oraz skutki symulowanego zjawiska. Powinno się przeanalizować procesy zachodzące w przyrodzie oraz wpływ zewnętrznych czynników na przebieg eksperymentu. Mając na uwadze powyższe, poniższy model został oparty na 2 filarach- początkowych wartościach uwolnionej ropy oraz procesach fizycznych kształtujących zachowanie ropy na morzu.



Rys. 3.1. Czynniki wpływające na rozprzestrzenianie się ropy po powierzchni wody.
Źródło [2].

3.1. Założenia modelu

Modelowanie zjawiska można podzielić na 2 części. W pierwszej dość intuicyjnie wprowadzamy podstawowe dane jak masa substancji rozprzestrzeniającej się, jej rodzaj oraz miejsce. Druga część odnosi się do przestrzeni, w której substancja jest uwolniona oraz jej interakcji z otoczeniem (brany jest pod

uwagę wpływ prądów morskich, kierunek wiatru, parowanie bądź interakcja z brzegiem). Należy wziąć pod uwagę również sposób w jaki będziemy reprezentować substancję rozprzestrzenianą - ropę naftową.

3.1.1. Sposób reprezentacji

Reprezentacja ropy naftowej w przedstawionej symulacji oparta będzie o ideę dyskretyzacji, czyli przeliczalności substancji, a dokładniej jej podziału na identyczne sobie (o jednakowej masie) cząsteczki oleju. Każda cząsteczka oleju posiada swoje własne współrzędne, które umożliwiają jej przydzielenie do dyskretyzowanej tablicy reprezentującej obszar symulacji. Zaś dana komórka mapy może być identyfikowana jako ląd, morze lub olej (komórka, która wcześniej była uznana za morze lecz w wyniku obecności cząsteczek ropy jest obecnie „zainfekowana” ropą). Zmiana położenia poszczególnych cząsteczek ropy wywołana jest przez jej stan początkowy nadany przed rozpoczęciem symulacji oraz czynniki wpływające na jej przemieszczanie się. Nieustannie dokonujące się przemieszczanie cząsteczek ropy, powoduje zmianę klasyfikacji komórek mapy, a w konsekwencji zmianę koloru komórki wyświetlanej na ekranie - użytkownik obserwuje symulację zachowania się cieczy.

3.1.2. Czynniki kształtujące zmianę zachowania ropy na morzu

Zidentyfikowano szereg czynników mających wpływ na zmianę położenia poszczególnych cząsteczek ropy.

3.1.2.1. Adwekcja

Adwekcja jest to pojęcie z zakresu mechaniki płynów oznaczające unoszenie substancji spowodowane przez przepływający płyn, w taki sposób, iż prędkość unoszonej substancji jest równa prędkości przepływającego płynu. W przypadku wycieków ropy, adwekcja jest powodowana przez prądy morskie oraz wiatr. W modelu przyjęto prędkość w danej komórce będącą liniową kombinacją wiatru i prądu:

$$\Delta r_k = \alpha v_k^{current}(ij) + \beta v_k^{wind}(ij) \Delta t_k$$

gdzie:

$v_k^{current}(ij)$, $v_k^{wind}(ij)$ to wektory wiatru i prądu morskiego dla k-tej iteracji symulacji, w komórce i,j
 t_k to krok czasu symulacji

α , β to parametry przyjęte jako 1.1 oraz 0.03 oznaczające relację oraz wagę tych dwóch czynników.

Na podstawie [6] oraz [2].

3.1.2.2. Rozprzestrzenianie(ang. spreading)

Proces rozprzestrzeniania będzie modelowany jako zwiększanie się powierzchni ropy naftowej kosztem spadku grubości warstwy. W przypadku zdyskretyzowanej ropy, symulowanie zjawiska będzie opierać się na odpowiednim przemieszczaniu się cząsteczek ropy. Należy rozważyć korelację rozmieszczenia poszczególnych cząsteczek i ich odpowiednie przypisywanie do poszczególnych komórek mapy. Poniższa implementacja oparta jest o ideę automatów komórkowych, a mianowicie interakcję poszczególnych

komórek ze sobą - przepływ masy, który obliczany jest dla każdej pary sąsiednich komórek przy pomocy wzoru:

$$\Delta m = \frac{1}{2}(m_{i+1} - m_i)(1 - \exp(-2\frac{D}{\Delta x^2}\Delta t))$$

gdzie Δx to długość komórki, Δt to krok czasu symulacji, m_i to masa i-tej komórki

W każdej iteracji symulacji obliczany jest ten przepływ masy dla każdej sąsiadującej ze sobą pary komórek (sąsiedztwo von Neumann'a). Cały proces rozprzestrzeniania można opisać za pomocą algorytmu: Dla każdej pary komórek $(u_{ij}, u_{i(j+1)})$:

1. Obliczana jest masa ropy w $u_{ij}, u_{i(j+1)}$ jako $m_{ij}, m_{i(j+1)}$
2. Używając powyższego wzoru obliczana jest Δm
3. Dla komórki źródłowej obliczane jest $r = |\Delta m|/m$
4. Losowo wybierane θ z zakresu $(0, 1]$. Jeśli $\theta < r$ wówczas cząsteczki ropy z danej komórki przenoszone są do sąsiedniej.

Na podstawie [7] oraz [2].

3.1.2.3. Parowanie (ang. evaporation)

Jak powszechnie wiadomo, parowanie jest to proces zmiany stanu skupienia, przechodzenia z fazy ciekłej danej substancji w fazę gazową (parę) zachodzący z reguły na powierzchni cieczy. Może odbywać się w całym zakresie ciśnień i temperatur, w których mogą współistnieć z sobą obie fazy. Modelowanie procesu parowania jest wymagane w celu ustalenia utrzymywania się wycieku, w tym zmian właściwości fizycznych i chemicznych oleju. Masa każdej frakcji (Δm_I), która zostanie odparowana w czasie Δt w obszarze A , można obliczyć jako:

$$\Delta m_I = \frac{K M_I P_{0I} x_I}{RT} A \Delta t$$

gdzie:

T to temperatura w danej komórce

R to stała gazowa

K to współczynnik przenikania masy równy $1.25 * 10^3 [\frac{m}{s}]$

M_I to masa molekularna

P_{0I} to ciśnienie pary nasyconej

x_I to ułamek molowy cząstki I

Na podstawie [8] oraz [2].

3.1.2.4. Emulsyfikacja

Krople wody pod wpływem fal mogą zmieszać się z rozprzestrzeniającą się ropą naftową. Proces ten prowadzi to tworzenia się emulsji wody z olejem. W celu modelowania tego zjawiska, mającego wpływ

na rozprzestrzenianie ropy naftowej na morzu, możemy użyć równania:

$$\Delta Y_k = 2.0 * 10^{-6} (v^{wind} + 1)^2 (1 - \frac{Y_k}{C}) \Delta t$$

gdzie:

v^{wind} to prędkość wiatru w danej komórce do której konkretna cząsteczka ropy jest przypisana

C to maksymalna zawartość wody w emulsji

Δt to krok czasu symulacji

Na podstawie [2].

3.1.2.5. Zmiana gęstości oleju w oparciu o parowanie i emulsyfikację

Rozważając proces emulsyfikacji, gęstość emulsji symulowanej można obliczyć poprzez średnią ważoną gęstości ropy naftowej oraz wody w morzu. Biorąc pod uwagę efekt parowania $\rho = (0.6\rho_0 - 340)F + \rho_0$, można pokazać relację opisującą gęstość emulsji jako funkcję parowania oraz emulsyfikacji, która aplikowana jest do każdej cząsteczki oleju z każdym krokiem symulacji, jednocześnie utrzymując aktualny stan gęstości emulsji:

$$\rho_e = (1 - Y)((0.6\rho_0 - 340)F + \rho_0) + Y\rho_w$$

ρ_0 oraz ρ_w to wartości zależne od temperatury.

Na podstawie [2].

3.1.2.6. Dyspersja

Rozważając zjawisko dyspersji należy mieć na uwadze układ dyspersyjny, zwykle koidalny, który jest złożony z co najmniej dwóch faz, z których jedną stanowi silnie rozdrobniony materiał, który jest rozproszony w drugiej fazie o charakterze ciągłym, zwanej ośrodkiem dyspersyjnym. Obie fazy mają pewną dowolność, jednakże muszą się różnić ze sobą składem, bądź stanem skupienia. Dyspersja jest nazywana również procesem rozprzestrzeniania. W przedstawionym modelu obok parowania jest to jeden z głównych czynników usuwania oleju z powierzchni morza. Forma zmiany rozprzestrzeniającej się masy ropy ma postać:

$$\Delta m_{dysp} = \frac{m\dot{D}_a D_b}{3600\dot{\Delta}t}$$

gdzie:

D_a to część oleju rozprzestrzenionego na godzinę

D_b to część oleju nie powracającego na powierzchnię

Δt to krok czasu symulacji

Na podstawie [9] oraz [2].

3.1.2.7. Lepkość (ang. viscosity)

Lepkość to miara oporu wewnętrznego ośrodka w czasie przepływu. Im wyższa lepkość, tym gęstszy jest ośrodek oraz im niższa jest lepkość, tym rzadszy ośrodek. Z uwagi na parowanie oraz proces emulsyfikacji lepkość ropy zwiększa się. Ostatecznie równanie opisujące jej zmianę ma postać:

$$\Delta\mu = C_2\mu\Delta F + \frac{2.5\mu\Delta Y}{(1 - CY)^2}$$

gdzie:

C_2 to specyficzny dla danego typu ropy parametr (przyjmujemy 10)

ΔF , ΔY to zmiana frakcji parowania oraz zawartości wody w danym kroku

Y to zawartość wody w emulsji

C to maksymalna zawartość wody w emulsji

F to część odparowanej ropy

Na podstawie [10] oraz [2].

3.1.2.8. Interakcja z brzegiem (ang. seashore interaction)

Z uwagi na adwekcję oraz rozprzestrzenianie się ropy, część z niej może dotrzeć do linii brzegowej morza. Oczywiście część ropy zanieczyści linię brzegową oraz na niej pozostanie, jednak część powróci, co obliczamy:

$$\Delta m = -\frac{\ln(2)}{t_{1/2}} m \Delta t$$

gdzie:

$t_{1/2}$ to uśredniony czas powrotu cząsteczek ropy do morza, dla różnych typów brzegu

m to masa cząsteczki ropy

Δt to krok symulacji

Po dotarciu komórek oleju do lądu, prawdopodobieństwo przejścia cząsteczek oleju z powrotem z lądu obliczamy jako $\Delta m/m$. Jeżeli komórka lądu na mapie graniczy z więcej niż jedną komórką mapy morza, wówczas z takim prawdopodobieństwem wraca do niej Δm cząsteczek ropy.

Na podstawie [2].

3.2. Przyjęte dodatkowe założenia

in progress....

4. Aplikacja oraz wyniki symulacji

Rozdział dotyczący aplikacji i możliwości symulacji.

4.1. Wybór języka programowania

Wybór języka programowania.

4.2. Opis implementacji

Opis implementacji.

4.3. Opis aplikacji

Tutaj znajdzie się opis aplikacji.

4.4. Symulacja katastrofy Deepwater Horizon

Tutaj znajdzie się symulacja katastrofy Deepwater Horizon.

5. Podsumowanie

Podsumowanie

5.1. Wnioski

Wnioski...

5.2. Future Works

Future works...

Bibliografia

- [1] „Eksploracja platformy wiertniczej *Deepwater Horizon*” - *Wikipedia, wolna encyklopedia*. Ostatnia edycja 1 marzec 2020, Michał Sobkowski. 2010.
- [2] J. Wąs M. Gług. „Modeling of oil spill spreading disasters using combination of Lagrangian discrete particle algorithm with Cellular Automata approach”. W: *Ocean Eng.* (2018).
- [3] Xiaolong Geng Jerry Galt-Jagadish Torlapati Michel C. Boufadel Ali Abdollahi-Nasab. „Simulation of the Landfall of the Deepwater Horizon Oil on the Shorelines of the Gulf of Mexico”. W: *Environmental Science Technology* (2014).
- [4] Hyung-Rae Lee Jae-Jin Park Chang-Keun Kang Moonjin Lee Min-Sun Lee Kyung-Ae Park. „Detection and dispersion of oil spills from satellite optical images in a coastal bay”. W: *IEEE* (2016).
- [5] Sergey Demin Fuad Aleskerov. „Modelling Possible Oil Spills in the Barents Sea and their Consequences”. W: (2018).
- [6] *Adwekcja | w meteorologii, definicja adwekcji | ENENC*. 2020.
- [7] Georgios Ch. Sirakoulis Jarosław Wąs. „Special issue on Simulation with Cellular Automata”. W: (2016).
- [8] *Pary i parowanie - Tom II - Multimedialny podręcznik fizyki*. 2017.
- [9] *Dyspersja (chemia fizyczna)” - Wikipedia, wolna encyklopedia*. Ostatnia edycja 15 styczeń 2018, Paweł Ziemian. 2005.
- [10] *Lepkość - Encyklopedia PWN - źródło wiarygodnej i rzetelnej wiedzy*”. 2014.