



„Probabilistyczny model oceny bezpieczeństwa na akwenach przybrzeżnych”

Marcin Przywarty

Szczecin, 2010



**INNOWACYJNA
GOSPODARKA**
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

UNIA EUROPEJSKA
EUROPEJSKI FUNDUSZ
ROZWOJU REGIONALNEGO



Probabilistyczny model oceny bezpieczeństwa na akwenach przybrzeżnych

W związku z rozwojem floty i towarzyszącą mu zwiększoną liczbą awarii nawigacyjnych takich jak wejścia na mieliznę, kolizje czy pożary na statkach, zaistniała potrzeba opracowania narzędzia pozwalającego na ocenę bezpieczeństwa nawigacyjnego kompleksowych systemów inżynierii ruchu morskiego. Po analizie literatury stwierdzono, że jednym z najodpowiedniejszych podejść do tego problemu jest zastosowanie stochastycznych modeli symulacyjnych.

Aby model pozwalał na pełną ocenę bezpieczeństwa nawigacyjnego powinien uwzględniać możliwie dużo czynników mających wpływ na bezpieczeństwo nawigacyjne. Proponowany model opracowany w Akademii Morskiej w Szczecinie zawiera moduły odpowiedzialne za modelowanie m.in. zachowania się nawigatora, dynamiki ruchu statku, strumieni ruchu statków, warunków zewnętrznych. Pozwala on również na badanie wpływu zmian tych parametrów na bezpieczeństwo nawigacyjne. Model uwzględnia wszystkie podstawowe typy awarii nawigacyjnych tj. kolizje, wejścia na mieliznę oraz pożary. Pozwala również na określenie skutków awarii, na przykład rozlewów olejowych. Model pracuje w czasie przyspieszonym, co pozwala na uzyskanie dużej liczby scenariuszy oraz na uzyskanie stabilnych statystycznie wyników.

Budowa wszystkich modułów oparta jest na odpowiednio szerokiej analizie danych statystycznych, co pozwala na uzyskanie wiarygodnych wyników. Jako obszar badań wybrano rejon południowego Bałtyku. Spowodowane to było bardzo dużą i stale wzrastającą intensywnością ruchu statków, katastrofalnymi skutkami potencjalnej awarii oraz dostępnością danych statystycznych. Dane niezbędne do opisu strumieni ruchu statków pozyskane są z analizy rzeczywistego ruchu statków (analiza zapisów z systemu AIS) oraz z analizy ilości zawinięć statków do poszczególnych portów. Parametry rozkładów opisujących warunki zewnętrzne określone zostały na podstawie analizy danych ze stacji meteorologicznych oraz locji.

Wynikiem symulacji są współrzędne wypadków nawigacyjnych, typy statków, jakie brały udział w wypadku, wielkość ewentualnego rozlewu olejowego. Pozwala to na określenie miejsc o szczególnie wysokim ryzyku nawigacyjnym. Model pozwala również na wybór optymalnego usytuowania nowych tras żeglugowych oraz na badanie wpływu, jaki ma zmiana charakterystyk ruchu na bezpieczeństwo nawigacyjne.

Problematyka badawcza

Najczęściej stosowane podejście, oparte na pracach, których autorami są Fujii [1] i Macduff [2], definiuje prawdopodobieństwo wypadku jako:

$$P = P_g \cdot P_c$$

gdzie:

P - prawdopodobieństwo wypadku

P_g - prawdopodobieństwo geometryczne, prawdopodobieństwo znalezienia się na kursie prowadzącym do wypadku

P_c - prawdopodobieństwo braku manewru lub wykonania manewru niewystarczającego

Problematyką określania bezpieczeństwa nawigacyjnego zajmuje się wiele ośrodków naukowo - badawczych. Wśród przykładowych modeli wyróżnić możemy wspomniany już model opracowany przez Macduffa [2]. Pozwala on na obliczenie prawdopodobieństw podstawowych typów wypadków nawigacyjnych (kolizji, wejść na mieliznę czy zderzeń z obiektami hydrotechnicznymi). Kolizje statków modelowane są w oparciu o teorię zderzeń cząsteczek. W modelu dokonano wielu uproszczeń, założono np. że wszystkie statki nawigują z taką samą prędkością. Model ten stał się podstawą do późniejszych, bardziej złożonych modeli oceny bezpieczeństwa nawigacyjnego.

Innym, bardziej złożonym narzędziem jest aplikacja GRACAT [3]. Jest to program napisany przez pracowników Duńskiego Uniwersytetu Technicznego (Technical University of Denmark), pozwala on na badania związane z kolizjami statków i wejściami na mieliznę. Składa się on z trzech podstawowych modułów oraz modułu związanego z określaniem ryzyka. Analiza kończy się uzyskaniem danych dotyczących ilości mielizn, kolizji oraz pozycji symulowanych wypadków.

Kolejnym przykładem aplikacji pozwalającej na ocenę bezpieczeństwa nawigacyjnego jest program opracowany przez pracowników Uniwersytetu Bogazici i Uniwersytetu Koc (Turcja) [4]. Model składa się z trzech bloków. Pierwszy z nich to model hydrodynamiczny. Jest on odpowiedzialny za modelowanie sił działających na kadłub statku. Drugi blok odpowiedzialny jest za modelowanie prawdopodobieństwa zdryfowania statku. Trzeci blok określa prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku. Wynikiem z prowadzonych badań jest mapa ryzyka opisująca prawdopodobieństwo wypadku na badanym akwenie.

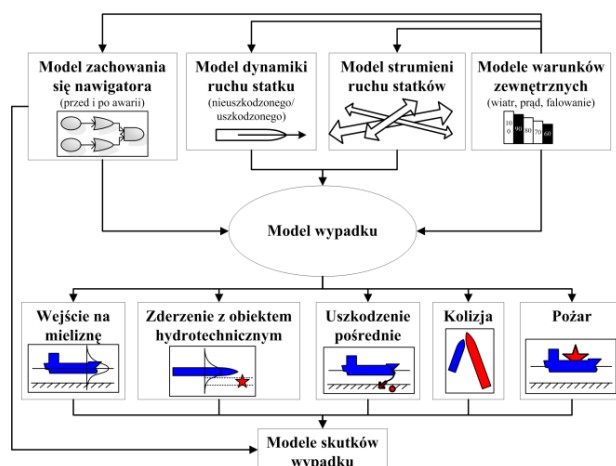
Ograniczenia zaprezentowanych, przykładowych modeli sprawiają, że zastosowanie ich do kompleksowej oceny złożonych systemów inżynierii ruchu morskiego jest niemożliwe lub bardzo utrudnione. Fakt ten doprowadził do podjęcia decyzji o budowie nowego stochastycznego modelu oceny bezpieczeństwa nawigacyjnego na akwenach otwartych.

Model opracowany w Instytucie Inżynierii Ruchu Morskiego

Przyjęta koncepcja realizacji budowy modelu składała się z trzech etapów:

- W pierwszym etapie zbudowany został mikroskopowy model ruchu statków, który jest bazą do budowy modeli wypadków.
- Drugi etap polega na budowie uproszczonych modeli wybranych wypadków morskich w celu sprawdzenia możliwości wykorzystania modeli symulacyjnych do oceny bezpieczeństwa nawigacyjnego na akwenie południowego Bałtyku.
- W trzecim, końcowym etapie zostaną zbudowane szczegółowe modele wypadków morskich oraz modele ich skutków.

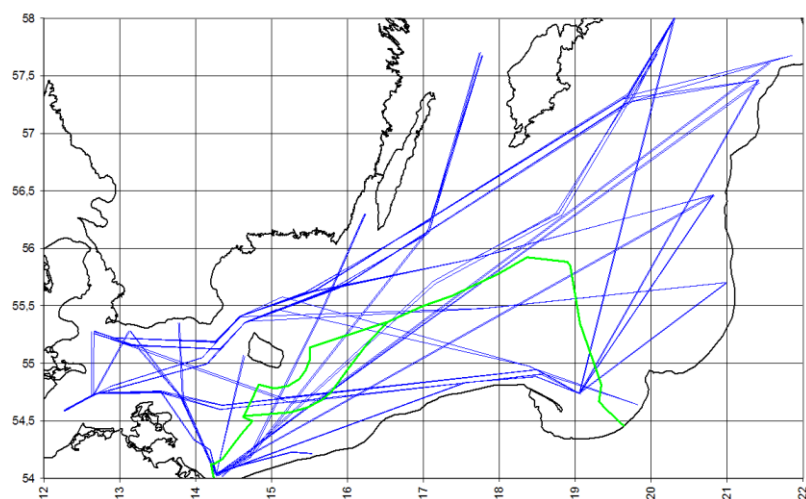
Proponowany model uwzględnia takie czynniki jak: zachowanie się nawigatora, dynamikę statku, parametry strumieni ruchu statków, zewnętrzne warunki hydrometeorologiczne. Pozwala również na badanie wpływu zmian poszczególnych czynników na bezpieczeństwo nawigacyjne. Schemat w pełni rozwiniętego modelu przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat w pełni rozwiniętego modelu oceny bezpieczeństwa nawigacyjnego.

Etap I

Ruch statków opisany został na podstawie analizy danych z systemu AIS oraz danych o wejściach i wyjściach do głównych portów. Dane nawigacyjne pochodzą z map nawigacyjnych i własnego doświadczenia morskiego. Jako obszar badań wybrano rejon południowego Bałtyku, wybór ten podyktowany był dużą intensywnością ruchu, katastrofalnymi potencjalnymi skutkami wypadku morskiego oraz dostępnością danych. W celu opisanego ruchu statków na badanym akwenie wyznaczone zostały główne trasy żeglugowe. Trasy te przedstawione są na rysunku 2.



Rys. 2. Badany akwen i wyznaczone główne trasy żeglugowe

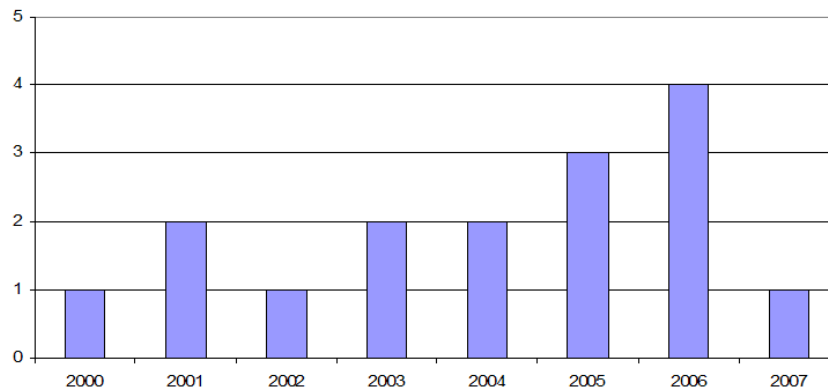
Zmienność tras uzyskano poprzez zastosowanie dwuwymiarowych rozkładów normalnych, których parametry oszacowane zostały na podstawie danych statystycznych i własnego doświadczenia. Ruch statków na poszczególnych trasach traktowany jest jako proces Poissona, jego intensywność określona została na podstawie danych z systemu AIS. Zgromadzone dane z systemu AIS wykorzystane zostały również do określenia parametrów rozkładów typów, długości, prędkości i zanurzenia statków. Planuje się dalsze opracowywanie bardziej szczegółowych modeli ruchu statków.

Do budowy modelu warunków hydrometeorologicznych wykorzystane zostały dane z polskich stacji meteorologicznych, uwzględniono jednak różnice, jakie występują pomiędzy warunkami panującymi w rejonach stacji meteorologicznych, a warunkami panującymi na akwenach otwartych. Na podstawie zgromadzonych danych zbudowano rozkłady opisujące czynniki zewnętrzne mające wpływ na bezpieczeństwo nawigacyjne (m.in. siła i kierunek wiatru, występowanie zamglenia)

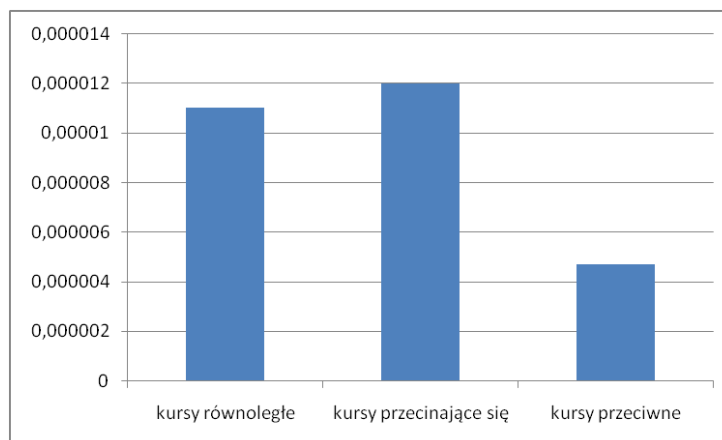
Etap II

Uproszczony model kolizji statków

W celu budowy modelu kolizji statków zastosowano uproszczony model statystyczny. Pomija on szereg zależności, ale ponieważ oparty jest na danych statystycznych uzyskiwane wyniki są bardzo bliskie danym rzeczywistym. Najtrudniejszym do oszacowania parametrem koniecznym do obliczenia prawdopodobieństwa kolizji statków jest liczba spotkań statków. Została ona określona za pomocą przedstawionego modelu symulacyjnego i wynosi około 2500000 rocznie, z czego około 24% stanowiły spotkania na kursach równoległych, 21% spotkania na kursach przecinających się i pozostałe 55% to spotkania na kursach przeciwnych. Odległości, dla których określono liczbę spotkań przyjęte zostały na podstawie opinii nawigatorów-ekspertów. W kolejnym kroku uwzględniając liczbę spotkań oraz liczbę rzeczywistych kolizji (rys. 3) obliczono prawdopodobieństwo kolizji (rys. 4). Pod uwagę wzięto tylko kolizje, do których doszło na akwenach otwartych.



Rys. 3. Liczba kolizji w rejonie południowego Bałtyku



Rys. 4 Prawdopodobieństwo kolizji statków dla poszczególnych typów spotkań

Uproszczony model wejścia na mieliznę

Model wejścia na mieliznę opracowany został przy założeniu, że prawdopodobieństwo wejścia na mieliznę zależy od odległości do izobaty bezpiecznej (lub brzegu). Prawdopodobieństwo to może być wyrażone wzorem:

$$P = P_g \cdot P_c$$

gdzie:

P - prawdopodobieństwo wejścia na mieliznę

P_g - prawdopodobieństwo geometryczne

P_c - prawdopodobieństwo braku manewru lub wykonania manewru niewystarczającego

Prawdopodobieństwo geometryczne obliczone może być na podstawie analizy rzeczywistego ruchu statków. Aby opisać ruch statków w pobliżu niebezpieczeństw zastosowany został specjalny rozkład kombinowany (rys. 5). Jest on złożeniem dwóch rozkładów normalnych o średniej równej zero i różnych odchyleniach standardowych:

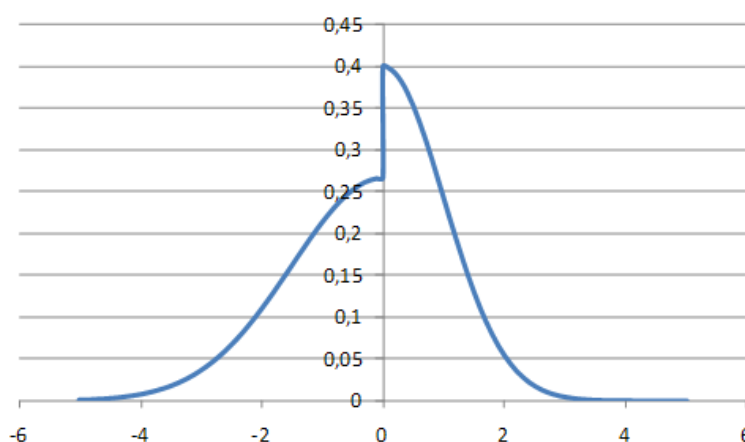
$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{\sigma} \right)^2$$

gdzie:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_r & \text{if } x \geq 0 \\ \sigma_l & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

σ_r - odchylenie standardowe prawej strony rozkładu

σ_l - odchylenie standardowe lewej strony rozkładu



Rys. 5. Przykładowy rozkład ruchu statków (rozkład kombinowany)

Analizując ruch statków w południowej części Bałtyku stwierdzono, że odchylenie standardowe zależy przede wszystkim od odległości od niebezpieczeństwa i od wielkości statku. Odchylenie standardowe może być obliczone przy użyciu zależności:

$$\sigma = aD + b$$

gdzie:

σ - odchylenie standardowe

a, b - współczynniki regresji

D - odległość do izobaty bezpiecznej (lub brzegu)

Wartość współczynnika a zależy przede wszystkim od wielkości statku, może być ona obliczona za pomocą następującej formuły:

$$a = -0.0002L + 0.12$$

gdzie:

L - długość statku

Współczynnik b przyjmuje wartości od 450 do 550, w dalszych badaniach przyjęto wartość średnią 500.

Prawdopodobieństwo błędu człowieka określone zostało na poziomie $1 \cdot 10^{-4}$, jest to typowa wartość przyjmowana w badaniach dotyczących błędów człowieka, potwierdzona w szeregu badań dotyczących wejść statków na mielizny. Ostatecznie prawdopodobieństwo wejścia na mieliznę obliczane może być przy użyciu wzoru:

$$P_{Gr} = P_{GrL} + P_{GrR}$$

gdzie:

P_{Gr} - prawdopodobieństwo wejścia na mieliznę

P_{GrL} - prawdopodobieństwo wejścia na mieliznę po lewej stronie

P_{GrR} - prawdopodobieństwo wejścia na mieliznę po prawej stronie

Uproszczony model pożarów na statkach

Kolejnym typem wypadków uwzględnionym w modelu są pożary na statkach. Na podstawie analizy szeregu baz danych założono, że prawdopodobieństwo wystąpienia pożaru na statku handlowym zależne jest od przebytej przez statek drogi. Podczas podróży morskiej średnie prawdopodobieństwo wystąpienia pożaru wynosi $5.18 \cdot 10^{-5}$ na kilometr przebytej drogi.

Etap III

Prace w tym etapie skupione były na weryfikacji oraz rozwoju zbudowanych modeli wypadków morskich oraz modelu ruchu statków. Zbudowany został również model skutków tych wypadków.

Wynikiem kolizji, wejść na mieliznę oraz pożarów mogą być rozlewy olejowe. W przypadku, gdy wypadek dotyczy statku innego niż załadowany tankowiec istnieje możliwość wycieku paliwa (bunkru). Do obliczenia prawdopodobieństwa powstania rozlewu olejowego zastosowane może być następujące równanie:

$$P_R = P_W P_{R/W}$$

gdzie:

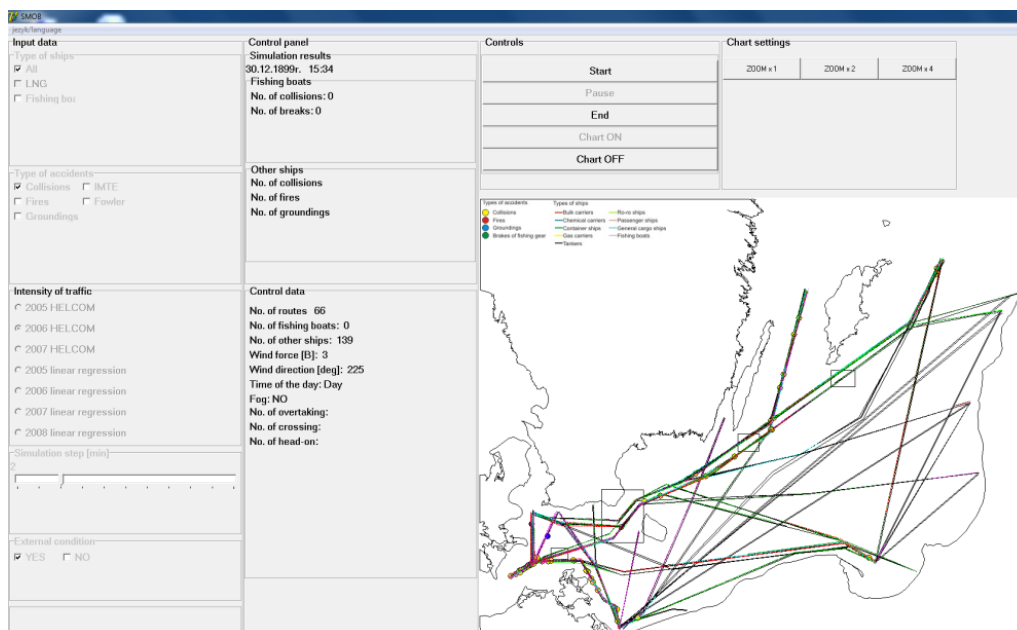
P_R - prawdopodobieństwo powstania rozlewu olejowego,

P_W - prawdopodobieństwo wypadku

$P_{R/W}$ - warunkowe prawdopodobieństwo wystąpienia rozlewu

Warunkowe prawdopodobieństwa wystąpienia rozlewu olejowego dla różnych typów wypadków opisane zostały za pomocą rozkładów uzależniających wielkość rozlewu od wielkości statku. Parametry tych rozkładów określone zostały na podstawie analizy szeregu baz danych np. MEHRA 1999, ITOPF 1998, LMIS 2004. Również wielkości rozlewów mogą być obliczone na podstawie rozkładów, których parametry określone zostały na podstawie analizy danych statystycznych.

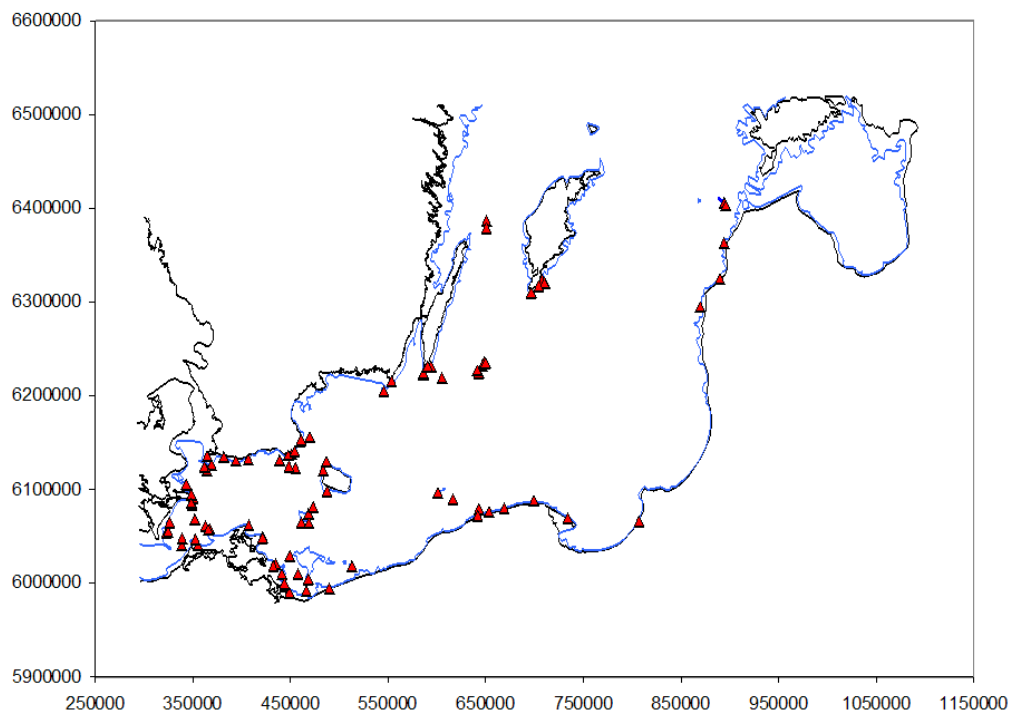
Wygląd interfejsu modelu przedstawiony został na rysunku 6, pozwala on na wprowadzenie ustawień początkowych symulacji oraz na śledzenie wyników.



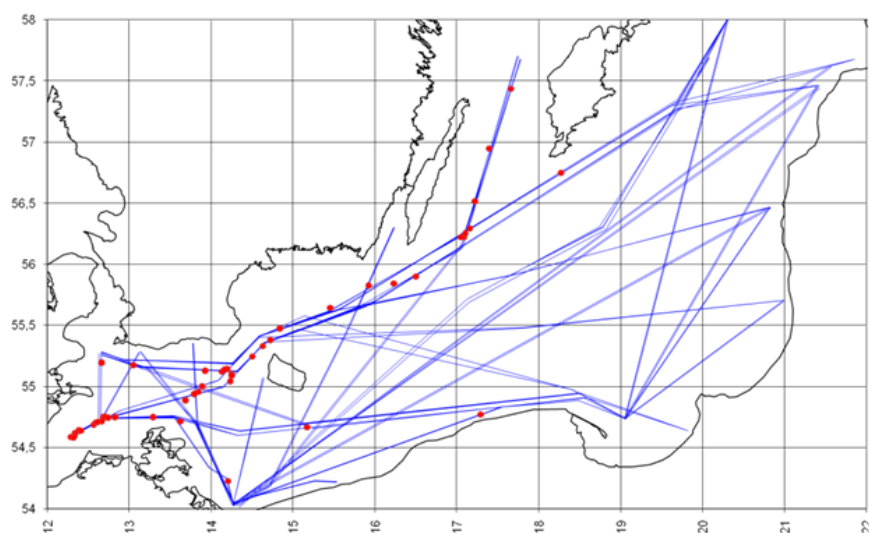
Rys. 6. Aktualny wygląd interfejsu

Wyniki

Wynikiem badań są pozycje symulowanych kolizji statków, wejść na mielizny oraz pożarów na statkach. Kolejnym możliwym do uzyskania wynikiem są pozycje i wielkości rozlewów olejowych, do których doszło na skutek wypadków morskich. Wyniki te pozwalają na budowę map, na których zaznaczone są obszary o najwyższym prawdopodobieństwie wypadków morskich. Przykładowe mapy z zaznaczonymi pozycjami symulowanych wejść na mieliznę i kolizji przedstawiono na rysunkach 7 i 8.



Rys. 7. Pozycje symulowanych wejść na mieliznę (700 lat obliczeniowych)



Rys. 8. Pozycje symulowanych kolizji (25 lat obliczeniowych)

Bibliografia:

- [1] Fujii, Y. Yamanouchi, H. & Mizuki, N. Some Factors Affecting the Frequency of Accidents in Marine Traffic. II – The Probability of Stranding and III – The Effect of Darkness on the Probability of Collision and Stranding. *Journal of Navigation* 27(1974)2, pp. 239-247.
- [2] Macduff, T. The probability of vessel collisions. *Ocean Industry* 1974, pp. 144-148.
- [3] Friis-Hansen, P. Simonsen, B.C. GRACAT: Software for Grounding and Collision Risk Analysis. *Collision and Grounding of Ships; Proc. Intern. Conf. Copenhagen, 2000.*
- [4] Otay, E. Tan, B. Stochastic Modeling of Tanker Traffic Through Narrow Waterways. *Proc. Of Intern. Conf. on Oil Spills in the Mediterranean and Black Sea Regions. 1998.*