POLITECHNIKA MORSKA W SZCZECINIE



Remigiusz Dzikowski

MODEL RYZYKA USZKODZEŃ INFRASTRUKTURY PODWODNEJ OFFSHORE

/autoreferat rozprawy doktorskiej/

Promotor: dr hab. inż. st. of. Maciej Gucma, prof. PM Promotor pomocniczy: dr inż. of. wacht. Krzysztof Marcjan

Szczecin 2024

Spis treści

Spis treści
Wstęp
 Problematyka oceny ryzyka uszkodzeń infrastruktury podwodnej w morskim przemyśle wydobywczym
1.1. Geneza problemu7
1.2. Cel i zakres pracy9
1.3. Istniejące modele ryzyka instalacji podwodnej na podstawie analizy literatury12
1.4 Koncepcja budowy modelu ryzyka infrastruktury offshore13
2. Model uszkodzenia infrastruktury podwodnej na morzu otwartym 17
2.1. Model awaryjnego zrzutu kotwic nad instalacją podwodną 18
2.2. Model prawdopodobieństwa niezamierzonego zrzutu kotwic – wleczenia 18
2.3. Kryterium wymiarów kotwic i rurociągu20
2.4. Model ryzyka uszkodzenia instalacji podwodnej podczas procesu trałowania przez statki rybackie
2.5. Zestawienie prawdopodobieństw innych przyczyn uszkodzenia infrastruktury podwodnej
2.6. Model gęstości ruchu statków nad rurociągiem
3. Model uszkodzeń rurociągów w obszarze chronionym platformy
3.1. Operacje przeładunkowe na platformie32
3.2. Analiza częstości ryzyka uderzenia rurociągu podwodnego w obszarze chronionym platformy w trakcie przeładunku
3.3. Model sieci Bayesa do oceny prawdopodobieństwa i skutków uszkodzeń rurociągów w obszarze chronionym platformy
4. Model oceny stopnia uszkodzeń infrastruktury podwodnej wskutek zrzutu kotwicy 40
4.2. Wpływ korozji na awarie rurociągu podwodnego 42
4.3. Model oszacowania skutków uszkodzeń rurociągu zagłębionego w grunt 43
4.4. Model oceny uszkodzeń infrastruktury podwodnej wskutek uszkodzenia wleczoną kotwicą

5. V	Weryfikacja i walidacja modelu	47
	5.1. Weryfikacja modelu na podstawie korelacji z innymi dostępnymi modelami	47
	5.2. Analiza czułości	50
	5.3. Analiza "wartości informacji"	53
Wn	ioski	54
Bib	liografia (wybrane pozycje)	57

Wstęp

Podwodne rurociągi offshore odgrywają kluczową rolę w przemyśle wydobywczym ropy naftowej i gazu ziemnego, umożliwiając transport surowców z morskich platform wydobywczych do instalacji na lądzie. Podobnie jak rurociągi, także sieć kabli i światłowodów podwodnych tworzy infrastrukturę narażoną na uszkodzenia. Złożoność i skala tych systemów sprawiają, że mogą być dotknięte różnorodnymi zagrożeniami, które mogą prowadzić do poważnych awarii i katastrof ekologicznych.

Przykładem katastrofy ekologicznej jest wypadek rozszczelnienia rurociągów na platformie Piper Alpha w 1988 roku. Piper Alpha była platformą wiertniczą na Morzu Północnym. 6 lipca 1988 roku doszło do katastrofy, która rozpoczęła się od rozszczelnienia się rurociągu gazowego i stacji pomp kondensatu na platformie. Spowodowało to serię eksplozji i pożarów. W katastrofie zginęło 167 osób.

Innym zdarzeniem związanym bezpośrednio z infrastrukturą podwodną było uszkodzenie gazociągu na Morzu Północnym. W 2017 roku podwodny gazociąg Langeled, który transportuje gaz z Norwegii do Wielkiej Brytanii, został uszkodzony przez kotwicę statku w pobliżu wybrzeża Szkocji. Statek przypadkowo rzucił kotwicę na rurociąg, powodując znaczne uszkodzenia. W wyniku tego incydentu doszło do wycieku gazu i przerwania dostaw, co wymagało kosztownych i długotrwałych operacji naprawczych.

Te i inne wypadki opisane w dalszej części pracy potwierdzają, że ocena ryzyka i opracowanie skutecznych strategii zarządzania ryzykiem stanowią istotne elementy planowania, projektowania i eksploatacji infrastruktury podwodnej. Do infrastruktury podwodnej należy także sieć przesyłowa energii z morskich farm wiatrowych. Budowa morskich farm wiatrowych znacznie zwiększy podwodną sieć energetyczną, która będzie, podobnie jak sieć rurociągów, narażona na uszkodzenia.

Geneza tematu pracy doktorskiej wynika z rosnącego zapotrzebowania na zrównoważone i bezpieczne metody eksploatacji zasobów morskich. W miarę jak światowy popyt na energię i eksploatację obszarów morskich wciąż rośnie, przemysł offshore staje się kluczowy dla globalnej gospodarki. Wzrost liczby instalacji podwodnych oraz intensyfikacja ruchu morskiego w pobliżu platform wydobywczych, farm wiatrowych oraz innych morskich instalacji energetycznych wpływa na wzrost prawdopodobieństwa zaistnienia ryzyka wypadków, które mogą prowadzić do znacznych strat finansowych oraz poważnych konsekwencji dla środowiska.

Celem niniejszej pracy doktorskiej jest opracowanie modelu ryzyka infrastruktury podwodnej, a mianowicie rurociągów podwodnych, zlokalizowanych w obszarze ochronnym morskiej platformy wydobywczej oraz na odcinku łączącym platformę z kolektorem lądowym. Model ten oparty jest na sieciach Bayesa i umożliwia probabilistyczną analizę zagrożeń oraz

ocenę ich wpływu na bezpieczeństwo całej instalacji. W pracy uwzględniono różne czynniki wpływające na prawdopodobieństwo awarii, w tym:

- ruch statków nad rurociągami i ryzyko awaryjnego lub niezamierzonego zrzutu kotwic,
- trałowanie włokiem dennym przez jednostki rybackie nad instalacją podwodną,
- zrzut ładunku przeładowywanego na morskie platformy wydobywcze,
- zrzut ładunku kontenerowego ze statków przepływających nad rurociągiem,
- zatonięcie statków nad instalacją i uderzenie w rurociąg,
- zderzenie jednostek obsługi platformy podczas operacji podejściowych do instalacji platformy.

Analiza ryzyka została przeprowadzona na podstawie danych z dwóch kluczowych baz danych wypadków w przemyśle offshore: PARLOC (ang. *Pipeline and Riser Loss of Containment* oraz WOAD (ang. *World Offshore Accident Database*), które zawierają kompleksowe dane o awariach i wypadkach w przemyśle offshore. Obie bazy zawierają dane z okresu kilkudziesięciu lat.

W pracy omówione zostaną aspekty związane z modelowaniem ryzyka, w tym identyfikacja i kwantyfikacja prawdopodobieństw i skutków zagrożeń, struktura sieci Bayesa oraz metody oceny i interpretacji wyników. Przedstawiony zostanie również matematyczny model redukcji ryzyka uszkodzeń rurociągów i kabli uzyskany poprzez osłonę rurociągów.

Dzięki zastosowaniu metod probabilistycznych oraz wykorzystaniu bogatych zbiorów danych uzyskanych z baz systemów AIS i VMS, niniejsza praca stanowi kompleksowe podejście do analizy ryzyka rurociągów podwodnych, mającego na celu zwiększenie bezpieczeństwa i niezawodności infrastruktury podwodnej offshore. Rezultaty badań mogą stanowić cenne narzędzie dla inżynierów, projektantów oraz osób zarządzających ryzykiem, co wpłynie na bardziej efektywne projektowanie i eksploatację podwodnych systemów transportowych.

Rozdział 1 zawiera genezę tematu oraz przegląd literatury. Na podstawie zebranych statystyk oraz przykładów wypadków z udziałem statków podczas manewrów lub niezamierzonego użycia kotwic, które doprowadziły do poważnych uszkodzeń infrastruktury podwodnej, uzasadniono ważność podjętej tematyki. Określono cele pracy, problemy badawcze i hipotezę badawczą. Przedstawiono również metody badawcze.

W rozdziale 2 przeanalizowano kluczowe przyczyny uszkodzeń infrastruktury podwodnej na obszarze pomiędzy platformą a instalacją lądową oraz ich prawdopodobieństwa. Określono gęstość ruchu jednostek handlowych i rybackich nad instalacją offshore na podstawie systemów AIS i VMS oraz przedstawiono zbudowany model ryzyka oparty na sieciach Bayesa.

W rozdziale 3 wskazano główne przyczyny uszkodzeń infrastruktury podwodnej na obszarze chronionym morskiej platformy wydobywczej, określono ich prawdopodobieństwa i przedstawiono model do oceny ryzyka infrastruktury podwodnej.

W rozdziale 4 zaprezentowano badania oparte na metodzie MES, służące do oceny skutków uderzenia kotwicy lub trału w instalację, oraz metodę ich ochrony poprzez zagłębienie w grunt.

W rozdziale 5 dokonano weryfikacji i walidacji zaproponowanego modelu ryzyka. Praca kończy się wnioskami oraz rekomendacjami do dalszych badań.

1. Problematyka oceny ryzyka uszkodzeń infrastruktury podwodnej w morskim przemyśle wydobywczym

1.1. Geneza problemu

Wzrastające zapotrzebowanie na surowce naturalne, przy jednoczesnym wyczerpywaniu złóż lądowych, przyczynia się do intensyfikacji procesów eksploracji i wydobycia węglowodorów w obszarach morskich. Pomimo inwestycji w odnawialne źródła energii, wydobycie węglowodorów wzrasta, co potwierdzają raporty takich instytucji jak BP Statistical Review of World Energy, Health and Safety Executive (HSE) oraz Międzynarodowej Agencji Energetycznej (IEA). Powstają morskie platformy wiertnicze oraz eksploatacyjne, jak również farmy wiatrowe i farmy konwerterów fal morskich.

Eksploatacja złóż podmorskich wymaga budowy systemu transportu węglowodorów na ląd. Transport odbywa się przy użyciu zbiornikowców transportujących ropę bezpośrednio z instalacji platform, jednostek typu FPSO (ang. *Floating Production, Storage and Offloading Unit*), boi przeładunkowych oraz rurociągów podmorskich.

Rurociągi podmorskie dzielą się na rurociągi do transportu ropy lub gazu z obszarów wydobycia do terminali na wybrzeżu oraz rurociągi tranzytowe do transportu surowca ze złóż lądowych do terminali odbiorczych. Intensyfikacja poszukiwań i wydobycia surowców na morzu oraz rozwój technologiczny, pozwalający na układanie rurociągów na coraz większych głębokościach, spowodowały znaczący wzrost infrastruktury podwodnej. Na przykład, Chiny posiadają 3000 km rurociągów podwodnych, a w kolejnej dekadzie planują trzykrotnie zwiększyć długość tej sieci. Wiąże się to z rosnącym ryzykiem uszkodzeń oraz szkód materialnych i środowiskowych.

W obszarze polskiej strefy ekonomicznej planowane są następujące inwestycje: Gazociąg Bałtycki, zwany Baltic Pipe, podmorski gazociąg firmy LOTOS (przejętej 1 sierpnia 2022 roku przez PKN Orlen SA.), gazociąg PGNiG, rurociąg do złóż Słupsk E i W, rurociągi do złóż B6 i B8, rurociąg gazowy w Zatoce Puckiej, morska infrastruktura przesyłowa energii elektrycznej część zachodnia MIP-E, MIP-W oraz infrastruktura przyłączeniowa zewnętrznych farm wia-trowych Baltica 2, Baltica 3, Bałtyk 2 i 3 oraz Baltic Power. Coraz gęstsza infrastruktura podwodna wymaga opracowania metod oceny ryzyka oraz analizy i wyboru jej optymalnego zabezpieczenia, czemu poświęcona jest niniejsza praca.

Gwałtowny rozwój technologii podmorskich implikuje zarówno problem bezpieczeństwa tych konstrukcji, jak i bezpieczeństwa środowiska morskiego zagrożonego ich awarią bądź uszkodzeniem.

Dane statystyczne wskazują, że istotnym zagrożeniem dla bezpieczeństwa technicznego rurociągów podwodnych jest ruch statków na akwenie, który stwarza ryzyko uszkodzenia poprzez przypadkowy zrzut ładunku, bezpośrednio uderzeniem kadłuba lub użyciem kotwic czy trałów łodzi rybackich. Istotnym czynnikiem powodującym uszkodzenia i nieszczelności rurociągu jest także proces korozji. Na rysunku 1.1 zestawiono statystykę przyczyn uszkodzeń rurociągów w strefie offshore.



Rys. 1.1. Zestawienie przyczyn uszkodzenia rurociągów podwodnych według bazy danych PARLOC 2012

Dane pochodzą z bazy danych PARLOC 2012 i dotyczą rurociągów znajdujących się na Morzu Północnym. Baza obejmuje informacje o awariach 1567 rurociągów o łącznej długości 24 837 km. Dostarcza szczegółowych informacji na temat przypadków utraty szczelności rurociągów i riserów (pionowych rurociągów lub zespołów rurociągów łączących podwodną instalację produkcyjną z urządzeniami na powierzchni platformy wydobywczej). Na uszkodzenia podatne są także kable i światłowody podwodne. Statystyki uszkodzeń podano na rysunku1.2.(

U.S. Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management (BOEM) (2014) Report: "Submarine Cable Damage Assessment: A Review of the 2004–2014 Damage In-cidents").



Rys. 1.2. Statystyka przyczyn uszkodzeń kabli podwodnych

Założeniem autora koncepcji rozprawy było stworzenie modelu oceny ryzyka infrastruktury podwodnej o charakterze holistycznym, tj. takiego, który obejmuje ocenę ryzyka sieci podwodnej począwszy od morskiej instalacji wydobywczej lub eksploatacyjnej, gdzie infrastruktura rozpoczyna funkcjonowanie, poprzez odcinek wiodący przez obszar morski do miejsca włączenia jej w sieć lądową. Model ma uwzględniać szereg czynników mających wpływ na jego zagrożenie, określonych na podstawie dostępnej literatury i dokonanej analizy statystyk. Całościowe podejście w metodyce oceny ryzyka w przemyśle offshore przedstawia np. J.E. Vinnem. Ocenę ryzyka infrastruktury podwodnej ogranicza do obszaru chronionego instalacji, dla którego analizuje kompleksowo zagrożenia instalacji, kryteria oceny oraz ryzyka akceptowalne.

1.2. Cel i zakres pracy

Przedmiot badań

Przedmiotem badań jest ocena ryzyka oraz skutków uszkodzeń instalacji podwodnej w obszarze morskiej platformy wydobywczej, zarówno w obszarze ochronnym platformy, jak i na akwenie otwartym. Na podstawie literatury oraz analizy baz danych, w których zebrano informacje o wypadkach w przemyśle offshore, stwierdzono, że tematyka jest aktualna i wymaga opracowania holistycznej metody szacowania ryzyka. Modele, które można znaleźć w literaturze to najczęściej modele FSA, które nie obejmują szeregu czynników stanowiących ryzyko dla infrastruktury podwodnej, w szczególności wiarygodnej oceny gęstości ruchu statków handlowych i rybackich nad instalacjami, a także wpływu takich czynników jak korozja instalacji przy ocenie jej uszkodzeń. Zastosowana metoda, tj. oparta na sieci Bayesa, daje możliwość

integracji danych z różnych źródeł, ich analizy, radzenia sobie z niepewnością oraz umożliwia aktualizację oceny ryzyka w miarę pojawiania się nowych informacji. Sieć Bayesa można w skuteczny sposób aktualizować i rozbudowywać.

Problem badawczy

Główny problem badawczy sformułowano w postaci pytania:

W jakim zakresie holistyczny model ryzyka uszkodzeń infrastruktury podwodnej pozwoli na ocenę ryzyka instalacji oraz będzie narzędziem do zwiększenia jej bezpieczeństwa?

Szczegółowe problemy badawcze określono następująco:

- 1. Czy model oparty na sieci Bayesa pozwoli na estymację poziomu zagrożenia infrastruktury podwodnej offshore (rurociągi podwodne, kable podwodne, systemy riserów)?
- 2. W jaki sposób można poprawić zabezpieczenie rurociągu bądź kabla podwodnego poprzez wykorzystanie danych z opracowanego modelu na etapie projektowym?

Cel główny pracy

Budowa probabilistycznego modelu ryzyka uszkodzeń infrastruktury podwodnej, umożliwiającego ocenę bezpieczeństwa w oparciu o sieci bayesowskie.

Cele cząstkowe pracy

Cele cząstkowe prowadzące do realizacji celu głównego sformułowano następująco:

- 1. Określenie czynników i prawdopodobieństw wpływających na uszkodzenia infrastruktury podwodnej.
- 2. Określenie wzajemnych zależności pomiędzy zdarzeniami wpływającymi na bezpieczeństwo infrastruktury podwodnej.
- 3. Budowa sieci Bayesa do identyfikacji ryzyka uszkodzeń infrastruktury podwodnej oraz oceny ich skutków.
- 4. Weryfikacja i walidacja zbudowanego modelu.

Hipotezy badawcze

Przyjęto następujące hipotezy:

- 1. Model ryzyka uszkodzenia infrastruktury podwodnej pozwoli na wykorzystanie go jako systemu doradczego przy ustaleniu stopnia i skutków uszkodzeń oraz najbardziej prawdopodobnych miejsc awarii.
- 2. Proponowany model ryzyka uszkodzeń infrastruktury podwodnej pozwoli, przy założonych kryteriach bezpieczeństwa, zaplanować zabezpieczenie infrastruktury na etapie projektowym bądź, opierając się na uaktualnionych danych wejściowych modelu, ocenić zasadność modernizacji.

Metody badawcze

Do realizacji celów rozprawy zastosowane zostaną następujące metody badawcze:

- 1. Statystyczne analiza przyczyn uszkodzeń rurociągów i kabli podwodnych i ich prawdopodobieństw.
- 2. Analityczna modelowanie matematyczne do stworzenia modelu oceny ryzyka uszkodzenia infrastruktury podwodnej.
- 3. Eksperckie wyznaczenie współczynnika korygującego prawdopodobieństwo niezamierzonego zrzutu kotwic na rurociąg lub kabel podwodny.
- 4. Symulacyjna wyznaczenie współczynnika korygującego prawdopodobieństwo niezamierzonego zrzutu kotwic na rurociąg.

Elementy nowości

Do osiągnięcia głównego celu pracy zrealizowano następujące zadania badawcze, stanowiące nowatorskie elementy i indywidualny wkład autora:

- 1. Budowa holistycznego modelu ryzyka uszkodzenia infrastruktury podwodnej przez statki, jednostki rybackie oraz jednostki obsługi pola wydobywczego offshore opartego na sieciach bayesowskich.
- 2. Budowa modelu pozyskania danych z systemu VMS (ang. *Vessel Monitoring System*) w celu implementacji gęstości ruchu statków rybackich zagrażających infrastrukturze podwodnej w aspekcie używanych narzędzi połowowych.
- 3. Analiza stopnia uszkodzeń infrastruktury podwodnej metodą elementów skończonych.
- 4. Symulacyjna metoda określenia współczynnika prawdopodobieństwa zagrożenia infrastruktury podwodnej podczas niezamierzonego zrzutu kotwic.

Zakres pracy

Zgodnie z przyjętym celem pracy badaniami objęto infrastrukturę offshore znajdującą się w południowej części Morza Bałtyckiego. Założony akwen badawczy to akwen, gdzie przebiega morski odcinek rurociągu rozciągający się od obszaru chronionego platformy Baltic Beta do przyłącza lądowego w Władysławowie.

Analiza ryzyka prowadzona była w oparciu o dane dotyczące gęstości ruchu nad rurociągiem gazowym biegnącym od platformy, która przesyła sprężony gaz ziemny do elektrowni. Częścią akwenu badawczego był także obszar bezpośredniego usadowienia platformy Baltic Beta. Jest to pole wydobywcze B-3, na którym znajdują się platforma Baltic Beta z systemem rurociągów i riserów, zbiornikowiec do przeładunku węglowodorów zacumowany do boi przeładunkowej oraz bezobsługowa platforma PG-1. Pole wydobywcze stanowi obszar ochronny platformy, na którym znajduje się gęsta sieć infrastruktury podwodnej. Analiza ruchu statków obsługi i ochrony platformy, przeładunków na platformę oraz operacji przeładunku węglowodorów na zbiornikowiec pozwoliła na ocenę bezpieczeństwa tej sieci i budowę modelu ryzyka infrastruktury podwodnej w obszarze chronionym instalacji.

1.3. Istniejące modele ryzyka instalacji podwodnej na podstawie analizy literatury

Poniżej przedstawiono modele matematyczne, które posłużyły do weryfikacji proponowanej sieci Bayesa. Przedstawione poniżej modele opierają się na współczynnikach i prawdopodobieństwach proponowanych przez autorów, bazujących na danych literaturowych oraz raportach towarzystw klasyfikacyjnych takich jak DNV, GL, Lloyd Register, P&A Club. Część współczynników została przyjęta deterministycznie (uznaniowo lub empirycznie) i obliczana jest na podstawie proponowanej punktacji przypisanej do zdarzenia, tak jak np. w modelu DNV, GL. W modelu np. dla obszaru, gdzie występuje ruch statków rybackich, przypisuje się współczynnik od 0 do 10, wskazujący na stopień zagrożenia rurociągu uszkodzeniem trałem. W modelu autora precyzyjnie określa się liczbę jednostek rybackich trałujących nad rurociągiem z baz danych systemów nadzoru ruchu. Poniżej przedstawiono modele literaturowe pozwalające na obliczenie prawdopodobieństw uszkodzenia infrastruktury podwodnej.

1. Model opracowany dla Morza Bałtyckiego przez dr Clausa F. Christensena, 2006 w celu identyfikacji prawdopodobieństwa uszkodzenia kabli lub rurociągów podwodnych:

$$P_{\text{strike}} = P_{\text{traffic}} P_{wd} \sum_{i=1}^{n} \frac{D_{\text{ship},i}}{v_{\text{ship},i} 8760 \text{ godz./rok}} P_{\text{incident}}$$
(1.1)

gdzie:

- Pstrike prawdopodobieństwo uderzenia w instalację podwodną,
- Ptraffic współczynnik zależny od mas kotwic na statku,
- P_{wd} współczynnik zależny od głębokości akwenu i ograniczeń akwenu,
- v_{ship,i} średnia prędkość *i*-tej jednostki w strumieniu ruchu nad instalacją podwodną,
- D_{ship,i} odległość wyznaczająca strefę zagrożenia wokół instalacji *i*-tej jednostki,
- P_{incident} prawdopodobieństwo zdarzenia sprzyjającego zrzutowi kotwic np. awaria siłowni, awaria zasilania itd.
- 2. Model Vitali et al., 2012

Model służy do analizy ryzyka uszkodzeń instalacji podwodnej przez kotwice statków pogrupowanych na klasy. Za pomocą modelu można określić prawdopodobieństwo uszkodzenia instalacji przez statki przepływające w pasie nad instalacją.

$$F = \sum_{j=1}^{n} \left[1 - \left(1 - P_{SC,j} P_{m,j} \right) \right]^{N_j} \left[\frac{\text{zdarzenie}}{\text{km} \cdot \text{rok}} \right]$$
(1.2)

- *j j*-ta klasa statku/typ obiektu mogącego uszkodzić rurociąg,
- *n* liczba jednostek objętych analizą,
- N_j liczba statków danej *j*-tej klasy przepływających nad rurociągiem,
- $P_{SC,j}$ prawdopodobieństwo zdarzenia na statku mające skutkować możliwością uszkodzenia instalacji podwodnej,
- $P_{m,j}$ prawdopodobieństwo geometryczne znalezienia się statku w obszarze instalacji.
- 3. Model towarzystwa klasyfikacyjnego DNV

Model został rekomendowany w "Recommended Failure Rates for Pipelines", wydanym przez towarzystwo klasyfikacyjne DNV AS i posłużył jako model do weryfikacji zaproponowanego modelu opartego na sieci Bayesa. Wzór (1.3) służy do obliczenia częstości uszkodzenia rurociągu podwodnego w oparciu o rodzaj zagrożenia i przypisanej punktacji jego stopnia.

$$F = f_{\rm km} \cdot \text{PipelineLeanth} + f_{\rm score} \cdot \text{PipelineCharacteristic} + f_{\rm draggedAnchor}$$
(1.3)

gdzie:

- F częstość uszkodzeń rurociągu podwodnego,
- $f_{\rm km}$ współczynnik częstości uszkodzenia rurociągu podwodnego na długości km, Pipeline _{Lenght} – długość analizowanego rurociągu podwodnego,
- PipelineCharacteristic charakterystyka związana ze średnicą, materiałem, z którego zbudowany jest rurociąg, zagrożeniem spowodowanym gęstością ruchu statków i jednostek rybackich,
- fscore współczynnik częstości uszkodzenia zależny od długości rurociągu,
- fdraggedanchor współczynnik częstości niezamierzonego zrzutu kotwic.
- 4. Model zbudowany na potrzeby analizy ryzyka rurociągu North Stream 2.

Model został opracowany przez Di Pandova, C. Zuliani, F. Tallone. W modelu wzięto pod uwagę następujące zdarzenia zagrażające instalacji podwodnej:

- zatonięcie statku nad instalacją,
- zrzut kotwicy,
- wleczenie kotwicy,
- wejście statku na mieliznę, gdzie występuje instalacja podwodna,
- zrzut ładunku.

1.4 Koncepcja budowy modelu ryzyka infrastruktury offshore

W rozprawie zaproponowano autorską koncepcję oceny bezpieczeństwa infrastruktury podwodnej – ryzyka uszkodzenia instalacji przez przepływające nad nią statki – przy pomocy sieci Bayesa, w oparciu o informacje o gęstości ruchu nad rurociągiem uzyskane z baz AIS i VMS oraz obserwacje własne podczas pracy na platformie Baltic Beta.

Probabilistyczne kryteria bezpieczeństwa nawigacji pozwalają oceniać poziom bezpieczeństwa systemów. Podstawowym kryterium jest prawdopodobieństwo bezawaryjnego przejścia statku P_{BW} , zależne od prawdopodobieństwa wypadku P_w zgodnie z zależnością $P_{BW} = 1 - P_w$.

Prawdopodobieństwo to zależy od liczby *M* przejść statków i daje liczbę *n* wypadków $P_w(X=n)$ przy założonym prawdopodobieństwie wypadku w jednym przejściu wynoszącym P_A . Zakładając niezależność wypadków w poszczególnych przejściach oraz, że $P_{w1} = P_{w2} = P_{w3}$ = ... = $P_w \ll 1$ prawdopodobieństwo wystąpienia *n* wypadków zwykle w literaturze określane jest rozkładem Poissona jako:

$$P_{P(\lambda)}(X=n) = \frac{(MP_w)^n e^{-MP_w}}{n!}$$
(1.4)

gdzie:

 MP_w – wartość oczekiwana liczby wypadków w M przejściach statku,

n – liczba wypadków.

Obszarami morskimi, w których istnieje duże ryzyko wypadków, są szlaki żeglugowe, gdzie gęstość ruchu jest znaczna. W rozprawie, w ocenie bezpieczeństwa rurociągu lub kabla podwodnego, wykonano analizę gęstości ruchu nie tylko w obszarach o największych gęstościach ruchu, ale wzdłuż krzywej obejmującej całą długość rurociągu, począwszy od morskiej instalacji do przyłącza lądowego. W algorytmie proponowanej metody, przedstawionym na rysunku 1.4, kluczowym blokiem jest blok do obliczenia prawdopodobieństwa, oparty na sieci Bayesa. Analiza ryzyka dokonywana jest na sekcjach rurociągu bądź kabla podwodnego, na które zostały podzielone. Każda sekcja analizowana jest osobno z możliwością weryfikacji w oparciu o kryteria akceptowalnego ryzyka. Daje to możliwość weryfikacji sekcji o ryzyku przekraczającym wartość akceptowalną, a następnie analizy sposobów zabezpieczenia rurociągu. Całkowite prawdopodobieństwo uszkodzenia infrastruktury podwodnej jest sumą prawdopodobieństw uszkodzeń, spowodowanych poszczególnymi przyczynami:

$$R_{hd} = R_{inst} + R^k_{\ hd} + R^Z + R^L + R^M + R^P_{\ HD}$$
(1.5)

gdzie:

 R_{hd} – ryzyko uszkodzenia rurociągu/kabla o średnicy d, zagłębionego na h_r ;

- *R*_{inst} uszkodzenie rurociągu/kabla w obszarze chronionym instalacji;
- R^{k}_{hd} uszkodzenie rurociągu/kabla poprzez kotwiczące statki o średnicy *d*, zagłębionego na h_r ;
- R^Z uszkodzenie rurociągu/kabla spowodowane zatonięciem na nim statku;
- R^{L} uszkodzenie rurociągu/kabla zrzuconym ładunkiem na rurociąg;
- *R^M* uszkodzenie rurociągu/kabla wejściem na mieliznę w miejscu ułożenia instalacji;
- R^{P}_{HD} uszkodzenie rurociągu/kabla poprzez trałujące statki rybackie.

Narzędziem zastosowanym do wyznaczenia prawdopodobieństwa uszkodzeń infrastruktury podwodnej są sieci Bayesa. W modelu przedstawionym na rysunku 1.3 stosuje się tę metodę do wyznaczenia częstości uszkodzeń, a także do określenia ich skutków i stopnia uszkodzeń. Sieć Bayesa jest przyczynową siecią probabilistyczną, która w sposób graficzny reprezentuje probabilistyczne zależności przyczynowo-skutkowe pomiędzy różnymi zmiennymi losowymi. Zmienne odpowiadają zdarzeniom lub uzyskanym informacjom eksperckim, co ułatwia wnioskowanie w warunkach niepewności. Podejście takie nazywane jest często bayesowskim. Zakładając, że posiadane informacje pozwalają wyprowadzić postać rozkładu *a priori* szacowanego parametru θ jako $g(\theta)$, otrzymując w doświadczeniu nowe dane *x*, możemy określić rozkład *a posteriori* $h(\theta|x)$, stosując funkcję wiarygodności $l(\theta; x)$:

. . .

$$h(\theta|x) = \frac{g(\theta)l(\theta;x)}{\int\limits_{\theta} g(\theta)l(\theta;x)\,d\mu(\theta)}$$
(1.6)

gdzie:

- $l(\theta; x)$ funkcja wiarygodności,
- $h(\theta|x)$ rozkład *a posteriori*.

Na rys. 1.3 przedstawiono algorytm modelu ryzyka infrastruktury podwodnej offshore.



Rys. 1.3. Algorytm modelu ryzyka uszkodzeń infrastruktury podwodnej

Sieci Bayesa, która stanowi w modelu blok oceny prawdopodobieństwa i stopnia uszkodzenia infrastruktury podwodnej to probabilistyczny model graficzny, w którym elementy grafu reprezentowane są przez zmienne losowe, natomiast relacje między zmiennymi reprezentowane są połączeniami o określonym kierunku. Zmienne nazywane są węzłami, natomiast połączenia krawędziami. Skierowanie krawędzi określa typ i kierunek relacji między zmiennymi. Zmienne w modelu mają charakter probabilistyczny, mogą być zmiennymi niezależnymi lub zależnymi. Zmienne niezależne definiowane są w postaci prawdopodobieństw i są nazywane także "rodzicami" zmiennych zależnych.

W strukturze grafu (*G*) zakodowana jest informacja o wzajemnych zależnościach między poszczególnymi zmiennymi $X = \{X_1, ..., X_N\}$, którą reprezentują krawędzie grafu (*E*) oraz węzły (*V*). W sensie znaczeniowym sieć Bayesa przedstawia łączny rozkład prawdopodobieństwa nad zbiorem zmiennych losowych *X*, który można opisać jako:

$$P(X|G,\theta) = \prod_{k=1}^{d} P(x_i|\Pi_{xi},\theta_{xi})$$
(1.7)

gdzie:

G = G(X, E, V) – struktura acyklicznego grafu skierowanego,

 $X = \{x_1, \dots, x_n\}$ – zbiór wszystkich zmiennych występujących w węzłach grafu,

 $X = \{x_i^{(1)}, \dots, x_i^{(ki)}\} - \text{stany } i\text{-tej zmiennej},\$

- E zbiór wszystkich krawędzi,
- V zbiór wszystkich węzłów,
- $\Pi_{xi} = \{x_i^{(q1)}, \dots, x_i^{(qi)}\} zbiór rodziców, czyli wszystkich węzłów grafu warunkujących stan węzła <math>X_i$,
- $\theta = \{\theta_{xi}, \dots, \theta_{xn}\}$ zbiór wszystkich parametrów relacji warunkowych między poszczególnymi węzłami X_i , a zbiorem ich rodziców Π_{Xi} .

W przypadku zmiennych dyskretnych parametry modelu $\theta_{Xj} = \{\theta_{ijk}\}$ są reprezentowane w postaci wielonominalnej tablicy prawdopodobieństwa warunkowego, której elementy wyraża się jako:

$$\theta_{ijk} = P\left(X_j = x_j^{(i)} \middle| \Pi_i = \pi_j^{(k)}\right)$$
(1.8)

Łączny rozkład $P(X|G, \theta)$ podlega dekompozycji w oparciu o warunkowe rozkłady lokalne $P(X_i|\Pi_{xi}, \theta_{xi})$ opisane nad każdą zmienną losową X_i względem odpowiadającego jej zbioru zmiennych warunkujących, tzw. rodziców Π_{xi} . Wartości zmiennych zależnych definiowane są w oparciu o wartości prawdopodobieństw warunkowych (CPT, ang. *Conditional Probability Tables*) (rys. 1.5), łączących ze sobą ,rodziców' danej zmiennej zależnej. Można zatem stwierdzić, że klasyfikacja bayesowska, to metoda budowy systemu ekspertowego, w której wiedza przedstawiona jest *á priori z* warunkowymi prawdopodobieństwami, a wnioskowanie polega na liczeniu następnych prawdopodobieństw.

W niniejszej pracy użyto Naive Bayes – naiwnego klasyfikatora Bayesa (NBC, ang. *Naive Bayes Classifier*). To koncepcja zakładająca niezależność cech w zadaniu. Naiwny klasyfikator Bayesa zakłada, że wpływ wartości danej cechy (atrybutu) na klasę jest niezależny od wartości innych cech.

2. Model uszkodzenia infrastruktury podwodnej na morzu otwartym

Analizując ryzyko uszkodzenia infrastruktury podwodnej w celu opracowania modelu matematycznego, podzielono przebieg infrastruktury na dwa obszary (rys. 2.1). Pierwszy obszar obejmuje od strefy ochronnej instalacji do kolektora lądowego, a drugi znajduje się w obszarze ochronnym instalacji. Dla obu obszarów zbudowano odrębne sieci bayesowskie do oceny ryzyka uszkodzeń, w modelu przedstawionym na rysunku 1.3.



Rys. 2.1. Podział analizowanych obszarów ryzyka uszkodzenia infrastruktury podwodnej

Podstawową informacją do oceny ryzyka infrastruktury podwodnej jest analiza gęstości ruchu jednostek nad infrastrukturą i wynikające zagrożenia, takie jak:

- 1) awaryjny zrzut kotwicy,
- 2) niezamierzone wleczenie kotwicy,
- 3) wypadek zrzutu ładunku na instalację,
- 4) korozja instalacji,
- 5) uszkodzenie spowodowane przez jednostki rybackie przez trałowanie.

Na podstawie danych literaturowych można również rozważyć uszkodzenia spowodowane zatonięciem jednostki. Aczkolwiek na obszarze prowadzonych badań jest to prawdopodobieństwo pomijalnie niskie, ze względu na małe prawdopodobieństwo jednostkowe zdarzenia wynoszące 3,25 E-6 i małą gęstość ruchu jednostek. Zostało ono uwzględnione sumarycznie wraz z prawdopodobieństwem zrzutu ładunku na instalację. W modelu uwzględnia się dwa aspekty wleczenia kotwic:

- 1) awaryjne w celu utrzymania jednostki w pozycji lub spowolnienia;
- 2) niezamierzone wleczenie kotwic, które znalazły się w wodzie najczęściej z powodów technicznych bądź błędu ludzkiego.

Przyczyny utraty kotwic	Udział procentowy przyczyn
Awaria zasilania (ang. <i>black-out</i>)	6 %
Uszkodzenie windy kotwicznej	25 %
Uszkodzenie stoperów łańcucha	3,5 %
Nieprawidłowa obsługa windy kotwicznej	22 %
Prądy morskie	6 %
Złe warunki pogodowe	34 %
Głębokość kotwiczenia	3,5 %

Tabela 2.1. Statystyki utraty kotwic

Źródło: Swedish Club, Gard

2.1. Model awaryjnego zrzutu kotwic nad instalacją podwodną

Częstość awaryjnego zrzutu kotwic może wynikać z następujących zdarzeń:

- 1. kolizji statków,
- 2. awarii mechanicznych,
- 3. innych zdarzeń takich jak krytyczne warunki pogodowe, pożar, awaria zasilania.

2.2. Model prawdopodobieństwa niezamierzonego zrzutu kotwic – wleczenia

Na potrzeby pracy badawczej przeprowadzony został eksperyment w środowisku symulacyjnym, którego celem było określenie współczynnika wykrycia niezamierzonego zrzutu kotwic w oparciu o badania symulacyjne.

Podstawowymi zadaniami dla uczestników eksperymentu wskazanymi przez prowadzącego było pełnienie podstawowych czynności nawigacyjnych:

- poprawne ustawienie mapy elektronicznej ENC w systemie ECDIS dla żeglugi na wodach przybrzeżnych,
- obserwacja wzrokowa i radarowa w trakcie prowadzenia wachty nawigacyjnej (zadanie: obserwacja),
- monitorowanie sytuacji nawigacyjnej związanej z wystąpieniem sytuacji kolizyjnych.

Podczas wykonywania przez biorących udział w symulacji rutynowych czynności, w odległości 1 mili morskiej od rurociągu instruktor nie informując uczestników wykonał zrzut kotwicy statku ze stanowiska instruktorskiego. Na każdym ze stanowisk modele statków zmniejszyły prędkość. Zweryfikowano jaka liczba biorących udział zauważyła zmianę parametrów ruchu jednostki i wskazała przyczyny. Badania symulacyjne przeprowadzono na

symulatorze nawigacyjno-manewrowym ECDIS firmy Wartsila NT5000 z systemem ECDIS NS4000, przedstawionym na rysunku 2.2. Symulator posiada panel manewrowy, w którym symulowane są: kanał wizualizacji, panel radaru, panel urządzeń nawigacyjnych, takich jak: autopilot, ster, echosonda, log, DGPS, AIS, panel obsługi kotwic oraz urządzeń cumowniczych, a także panel systemu ECDIS z mapami ENC.

Założenia scenariusza eksperymentu:

- statek zbliża się do obszaru, gdzie występują platformy wiertnicze oraz infrastruktura podwodna;
- statek znajduje się na stałym kursie;
- w zasięgu 6 mil morskich występują trzy inne jednostki handlowe oraz dwa statki rybackie rutynowo absorbujące uwagę nawigatora;
- statek zbliża się i płynie kursem przecinającym linie rurociągu biegnącego z platformy Baltic Beta do przyłącza lądowego we Władysławowie;
- pogoda: stan morza 8;
- czas trwania 20 minut.

Eksperyment pozwolił na przeprowadzenie analizy danych – jakościowej i ilościowej. W trakcie eksperymentu zweryfikowano, ile osób wykryło zmianę parametrów ruchu, tj. prędkości statku, w jakim przedziale czasowym zostało to wykryte oraz jaką potencjalną przyczynę podał uczestnik.

Podczas wleczenia kotwicy może nastąpić zahaczenie rurociągu. Aby to się stało, długość łańcucha i jego ułożenie w toni wodnej muszą spełniać warunek $Y_w \ge G$, gdzie Y_w to pionowa odległość wleczonej kotwicy od lustra wody, a G to głębokość akwenu. Do weryfikacji tego warunku należy ustalić, w jaki sposób łańcuch oraz kotwica są ułożone w wodzie podczas wleczenia, jaka jest wartość Y_w i porównać ją z głębokością akwenu. Rysunek 2.2 przedstawia schematycznie rozkład sił wzdłuż łańcucha wleczonego w wodzie. Za pomocą równań (2.6), (2.2) oraz zbudowanej aplikacji zweryfikowano trajektorię unoszenia się łańcucha i kotwicy w toni wodnej. To posłużyło do zredukowania liczby jednostek, które nie zahaczą kotwicy z powodu ich długości łańcucha, trajektorii dryfowania kotwicy za statkiem oraz głębokości akwenu w miejscu, gdzie ułożony jest rurociąg.



Rys. 2.5. Rozkład sił działających na kotwicę wleczoną w wodzie

Krzywą wleczenia kotwicy za statkiem w funkcji prędkości jednostki można wyznaczyć za pomocą formuł (2.6) i (2.7):

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}(l,T) = \vec{0} \tag{2.1}$$

$$m \vec{a}(l,T) = \frac{\partial}{\partial x} (T \vec{t}) + f_n \vec{n} + f_t \vec{t} + m g \vec{k}$$
(2.2)

gdzie:

 \vec{F} – siła wypadkowa,

m – masa łańcucha w kilogramach,

g – przyspieszenie ziemskie,

 $\vec{a}(l,T)$ – przyspieszenie łańcucha,

T – siła naprężenia łańcucha przypadająca na jednostkę długości łańcucha,

$$f_n$$
 – składowa normalna siły wleczenia na jednostkę długości łańcucha,

$$f_t$$
 – składowa styczna siły wleczenia na jednostkę długości łańcucha,

 \vec{n} – jednostkowy wektor normalny,

- \vec{t} jednostkowy wektor styczny,
- \vec{k} jednostkowy wektor siły grawitacji.

2.3. Kryterium wymiarów kotwic i rurociągu

Zależność między średnicą rurociągu a wymiarem kotwicy, która może go zaczepić, jest złożonym zagadnieniem, które zależy od kilku czynników, w tym rodzaju i konstrukcji

kotwicy, kąta jej wpadania, rodzaju dna morskiego oraz charakterystyki samego rurociągu. Niemniej jednak, kryterium możliwości uszkodzenia rurociągu kotwicą wleczoną za statkiem są wymiary kotwic danej jednostki, która przechodzi nad rurociągiem i stanowi ryzyko zahaczenia w porównaniu ze średnicą rurociągu. W celu weryfikacji tego kryterium należy określić maksymalną średnicę rurociągu, która może zostać zahaczona, i porównać ją z wymiarami kotwic statków nad nią przepływających. Maksymalną średnicę rurociągu D_{max} w funkcji długości pazura kotwicy L, która jest w stanie ją zaczepić, można zapisać równaniem (2.3):

$$D_{\max} = \frac{2L(1 - \cos \alpha)}{\sin \alpha}$$
(2.3)

gdzie:

- D_{max} maksymalna średnica rurociągu,
- *L* całkowita długość pazura kotwicy,
- α kąt pomiędzy trzonem a pazurem kotwicy.

Wartość obliczonej średnicy maksymalnej oznacza, że rurociągi o średnicach mniejszych mogą zostać zahaczone przez kotwice statków przepływających nad nimi. Rurociągi o większych średnicach nie są narażone na zahaczenie, ponieważ kotwica ześliźnie się z rurociągu, nie podrywając go.

2.4. Model ryzyka uszkodzenia instalacji podwodnej podczas procesu trałowania przez statki rybackie

Ryzyko szczególnie dotyczy kabli podwodnych i uzależnione jest od następujących czynników:

- typ i parametry poławiającego statku rybackiego,
- stosowana technika połowów,
- rodzaj sprzętu połowowego,
- częstotliwości połowów,
- taktyka połowów,
- wyposażenie nawigacyjne statku rybackiego oraz systemów określania pozycji.

Wizualizację ruchu jednostek rybackich na akwenie, w obszarze występowania infrastruktury podwodnej, przedstawiono na rysunku 2.3. Największą liczbę jednostek poławiających w obszarze wydobywczym platformy Baltic Beta stanowią statki rybackie wychodzące z Władysławowa, Gdańska i Gdyni.

Liczbę jednostek trałujących na akwenie, gdzie występuje infrastruktura podwodna, uzyskano na podstawie baz danych AIS oraz VMS. Pomimo, że statki rybackie wyposażone są w system AIS, system ten nie wskazuje techniki połowu. Z informacji AIS uzyskujemy informacje o liczbie statków rybackich nad rurociągiem, ale nie pozwala na weryfikację narzędzia połowu, co jest kluczową informacją pozwalającą określić ryzyko uszkodzeń. Dodatkowo, po weryfikacji



Rys. 2.3. Wizualizacja ruchu statków rybackich na podstawie danych AIS - aplikacja IWRAP

liczby statków rybackich z baz danych obu systemów, uzyskano różnice w gęstościach ruchu.

$$P_R = n_D \cdot I \cdot V \cdot \alpha \cdot \cos\varphi_R \tag{2.4}$$

gdzie:

- P_R prawdopodobieństwo uszkodzenia infrastruktury podwodnej przez statki rybackie w okresie roku,
- n_D liczba używanych rozpornic,
- *I* gęstość jednostek rybackich na przyjętą powierzchnię [km²/rok],
- V prędkość trałowania [km/h],
- α współczynnik narażonej długości rurociągu lub kabla,
- φ_R kąt pomiędzy dominującymi kursami statków rybackich w stosunku do kierunku ułożenia rurociągu/kabla.

Na rysunku 2.4 wskazano podział jednostek rybackich w funkcji użycia metody połowu na poszczególnych sekcjach rurociągu. Bazę danych z systemu VMS uzyskano z Wydziału Centrum Monitorowania Rybołówstwa Departamentu Rybołówstwa. Baza danych zawiera współrzędne jednostek, ich parametry ruchu oraz narzędzia połowów. Dane te są kluczowe do określenia liczby przejść statków rybackich, ale tylko tych, które narzędziem połowu mogą go uszkodzić, czyli trałujących. Pozostałe jednostki mogą uszkodzić rurociąg jedynie zrzutem kotwic.



Rys. 2.4. Podział liczby statków rybackich przepływających nad rurociągiem w funkcji narzędzia połowu (opracowano na podstawie danych VMS)

Energię uderzenia narzędziem połowu – trałem dennym można obliczyć z zależności:

$$E_t = R_d \frac{1}{2} m_t (C_h \cdot v)^2$$
(2.4)

gdzie:

 R_d – współczynnik zależny od średnicy rurociągu,

- m_t masa narzędzia połowu,
- Ch współczynnik funkcji wysokości rurociągu liczony od poziomu dna morskiego,
- v prędkość jednostki rybackiej.

Masa belki trałowej [kg]	Energia uderzenia [kJ]	Deformacja rurociągu [%]
200 kg	0,31	0,1
400 kg	0,62	0,3
800 kg	1,24	0,5
1000	1,55	1,05
2000	3,1	1,3
4000	6,2	2,5

Tabela 2.2. Masy belek trałowych, energia uderzenia i skutki

2.5. Zestawienie prawdopodobieństw innych przyczyn uszkodzenia infrastruktury podwodnej

Uszkodzenia infrastruktury podwodnej spowodowane wymienionymi przyczynami tj. poprzez uderzenia kotwicami oraz trałami rybackimi, mogą być również spowodowane innymi czynnikami. Towarzystwa klasyfikacyjne wskazują zrzut ładunku ze statku jako częstą przyczynę uszkodzeń. Ten rodzaj ryzyka najczęściej spowodowany jest incydentami wypadania kontenerów do morza w wyniku złych warunków pogodowych, złego zabezpieczenia ładunku lub utraty kontenerów wskutek kolizji statków. Na podstawie źródeł literaturowych przyjęto prawdopodobieństwo 3,3E-06 [kontenerowiec/mila morska]. Innymi odnotowanymi przyczynami uszkodzenia to są zatonięci lub wejście statku na mieliznę w obszarze występowania infrastruktury podwodnej. Przyjęto prawdopodobieństwo na podstawie jako 2,05E-5.

Zestawienie częstości uszkodzeń rurociągów podwodnych z powodu działania czynników zewnętrznych na podstawie bazy danych PARLOC przedstawiono w tabeli 2.3.

Przyczyna uszkodzenia	Średnica rurociągu [cale]	Średnia wartość częstości uszkodzenia [km/rok]
	0, 6	1,75E-4
Uszkodzenia kotwicami	6, 40	3,66E-6
	Powyżej 40	2,28E-5
	0, 12	1,5E-4
Uszkodzenie przez statki rybackie przez trałowanie	12, 40	4,16E-6
Tybuckie przez traiowanie	Powyżej 40	3,6E-5
Uszkodzenia poprzez zatopienie statku nad infrastrukturą	Wszystkie średnice	2,05E-5
Uszkodzenie przez zrzut ładunku na rurociąg	Wszystkie średnice	Kontenery ze statków przewożących taki ładunek 3,3E-06 [kontenerowiec/mila morska]

Tabela 2.3. Zestawienie prawdopodobieństw uszkodzeń rurociągów podwodnych na podstawie danych PARLOC

2.6. Model gęstości ruchu statków nad rurociągiem

W celu określenia gęstości ruchu, typu jednostek przechodzących nad infrastrukturą podwodną, prędkości i kursów jednostek, rozkodowano dane z systemu automatycznej identyfikacji statku AIS (ang. *Automatic Identification System*). Wizualizację danych przedstawiono na rysunku 2.5. Lewa część rysunku przedstawia symbole przypisane do jednostek znajdujących się na akwenie obejmującym obszar w pobliżu platformy Baltic Beta. Prawa część to wizualizacja gęstości ruchu jednostek na podstawie danych AIS. Przykładowy zestaw danych uzyskanych po rozkodowaniu informacji AIS przedstawia tabela 2.4.

Dane uzyskane z systemu AIS pogrupowano na liczbę jednostek przechodzących nad rurociągiem, ich typ oraz długość. Określono także liczbę jednostek dla każdej sekcji rurociągu, które spełniają kryterium głębokości wleczenia kotwicy i stanowią zagrożenie dla rurociągu.



Rys. 2.5. Wizualizacja gęstości ruchu na analizowanym akwenie

	time timestamp without time	mmsi integer	nav_stat smallint	latitude real	longitude real	sog real	cog real	hdg real
1	2011-07-01 00:00:36	304877000	0	55.2173	13.3748	12.5	95	511
2	2011-07-01 00:00:38	211274670	0	55.1903	13.3078	13.9	98.5	101
3	2011-07-01 00:00:55	210230000	0	55.2332	13.9812	8.6	271.3	276
4	2011-07-01 00:01:05	276161000	0	55.2278	13.9101	11.9	273.9	274
5	2011-07-01 00:01:19	245114000	0	55.1853	13.782	10.3	97	94
6	2011-07-01 00:10:35	304877000	0	55.2142	13.4357	12.6	96	511
7	2011-07-01 00:02:34	304950000	0	55.264	12.9662	14.2	276	274

Tabela 2.4. Dane z systemu AIS

W celu weryfikacji liczby, typu, wielkości i parametrów ruchu na danych rzeczywistych systemu AIS utworzono bazę danych wykorzystując PostgreSQL, który umożliwia zarzadzanie relacyjnymi bazami danych.

Jednostki, na podstawie danych AIS, zostały skategoryzowane pod kątem typu oraz długości. W celu przyporządkowania statków do posiadanego wyposażenia kotwicznego dokonano podziału jednostek na klasy w funkcji ich długości. Podział przedstawiono w tabeli 2.5. Dane dotyczące mas kotwic zostały użyte w modelu do określenia energii uderzenia w rurociąg oraz do określenia stopnia uszkodzenia.

Na podstawie analizy wytrzymałościowej metodą MES (rozdział 4), ponownie wyznaczono klasy statków do określenia klasyfikacji uszkodzeń rurociągów (tabela 4.2) w celu zaimplementowania do sieci Bayesa. Nowy podział pozwolił na kategoryzację energii i stopnia uszkodzenia rurociągu. Podział statków na klasy długości w formie graficznej, na każdej sekcji rurociągu przedstawiono na rysunku 2.8 dla roku 2018. Na badanym akwenie klasy statków powyżej czwartej posiadają takie długości łańcucha, które przy prędkościach uzyskanych z danych AIS zawsze zagrażają infrastrukturze podwodnej (ich łańcuch jest na tyle długi, że przy odnotowanej prędkości statku z AIS zetknie się z dnem).



Rys. 2.6. Graficzna prezentacja liczby statków przechodzących nad rurociągiem w obszarze od platformy Baltic Beta do Władysławowa z profilem batymetrycznym

Klasa statku	Długość statku [m]	Długość łańcucha [m]	Masa kotwicy [kg]
1	30–60	247	360
2	60-80	330	765
3	80–93	360	900
4	93–123	470	2200
5	123–160	550	4500
6	160–193,5	630	8300
7	193,5–213,5	660	9300
8	213,5–250	660	15400
9	250–292	742	17800
10	292–	770	23000

Tabela 2.5. Podział statków na klasy	długości
--------------------------------------	----------

Źródło: Opracowano na podstawie danych instytucji klasyfikacyjnych LRS, ABS, DNV, GL







Rys. 2.8. Liczba statków nad sekcjami rurociągu z podziałem na klasy długości. Dane z systemu AIS z roku 2018

Budowa modelu ryzyka dla obszaru otwartego

Proponowana architektura sieci Bayesa opracowana dla obszaru otwartego, tj. od obszaru chronionego platformy do linii brzegowej, została przedstawiona na rysunku 2.9. Sieć zawiera elementy:

- 1) prawdopodobieństwa przejść statków handlowych, rybackich oraz obsługi pola wydobywczego;
- prawdopodobieństwa przejść statków handlowych, rybackich oraz obsługi pola wydobywczego oznaczone cyframi 1 – są to prawdopodobieństwa przejść jednostek, które mogą uszkodzić infrastrukturę przez wleczenie kotwic;
- 3) prawdopodobieństwo trałowania;
- 4) prawdopodobieństwo awarii technicznej jednostek;
- 5) prawdopodobieństwo wpływu warunków pogodowych;
- 6) prawdopodobieństwo utraty ładunku i uszkodzenia rurociągu przez zatopioną jednostkę;
- 7) prawdopodobieństwo uszkodzenia w wyniku korozji rurociągu.

Aby zapisać wzór Bayesa na prawdopodobieństwo uszkodzenia rurociągu podwodnego (oznaczone jako D) w wyniku różnych czynników ryzyka (oznaczonych jako E), można skorzystać z następującej ogólnej postaci wzoru Bayesa:

$$P(D|E) = \frac{P(E|D)P(D)}{P(E)}$$
(2.5)

gdzie:

- P(D|E) prawdopodobieństwo uszkodzenia rurociągu pod warunkiem wystąpienia zdarzenia E;
- P(E|D) prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia E pod warunkiem, że rurociąg został uszkodzony;
- P(D) aprioryczne prawdopodobieństwo uszkodzenia rurociągu;
- P(E) całkowite prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia E.

Zakładając, że mamy wiele czynników ryzyka (zdarzeń *E_i*), takich jak:

 E_1 : zrzut kotwicy,

E₂: wleczenie kotwicy,

- *E*₃: zahaczenie trałem rybackim,
- E4: wpływ warunków pogodowych na wleczenie kotwic,

*E*₅: zrzut ładunku,

E6: zatopienie statku nad rurociągiem,

E7: korozja

Za pomocą wzoru 2.5 możemy określić całkowite prawdopodobieństwo uszkodzenia rurociągu uwzględniając wszystkie powyższe zdarzenia. Zakładamy, że zdarzenia są niezależne od siebie. Wzór Bayesa dla każdego zdarzenia E_i będzie wyglądał następująco:

W celu zaprojektowania sieci Bayesa dla obszaru otwartego zbudowano drzewo błędów FTA (ang. *Fault Tree Analysis*). Drzewo wskazuje wpływ zdarzeń podstawowych i pośrednich na zdarzenie końcowe. Jest to metoda systematyczna i graficzna, która pomaga zrozumieć, jak różne elementy systemu mogą prowadzić do niepożądanego zdarzenia.



Rys. 2.9. Sieć Bayesa dla obszaru poza polem ochronnym platformy

Prawdopodobieństwa uzyskane z wykorzystaniem modelu przedstawiono w tabeli 2.6.

Sekcja ruro- ciągu	<i>A priori</i> – rok 2018	A posteriori – rok 2018	<i>A priori</i> – rok 2013	A posteriori – rok 2013	
1	2,3436E-5	3,7819E-5	8,316E-6	3,701E-5	
2	2,1978E-5	2,32895E-5	1,863E-5	2,327E-5	
3	3,6801E-5	5,71489E-5	4,3848E-5	5,715E-5	
4	3,8421E-5	4,63677E-5	2,6487E-5	2,137E-5	
5	9,234E-6	9,731E-6	1,4526E-5	9,731E-6	
6	5,157E-6	1,39566E-5	6,48E-6	1,306E-5	
7	1,0638E-5	2,59915E-5	8,073E-6	1,579E-5	
8	3,78E-6	9,9449E-6	2,997E-6	4,965E-6	
9	1,62E-6	1,586E-5	1,62E-6	1,107E-5	
10	3,186E-6	6,49449E-6	1,782E-6	2,492E-6	
11	3,672E-6	8,2395E-6	4,941E-6	6,208E-6	
12	9,612E-6	2,86663E-5	1,647E-5	2,264E-5	
13	4,833E-6	1,759E-5	3,591E-6	9,79E-6	

Tabela 2.6. Zestawienie prawdopodobieństw a priori i posteriori uszkodzeń rurociągu



Rys. 2.10. Diagram sieci Bayesa w aplikacji GeNIe dla obszaru otwartego

Zaprojektowana sieć Bayesa, przedstawiona na rysunku 2.20 daje możliwość określenia prawdopodobieństwa uszkodzenia rurociągu, energii uszkodzenia oraz skategoryzowanego stopnia uszkodzenia rurociągu. Dane wejściowe to przede wszystkim prawdopodobieństwa przejść jednostek nad rurociągiem, ich typów oraz parametrów urządzeń kotwicznych. Istotną cechą modelu jest możliwość ustawienia prawdopodobieństwa końcowego w celu uzyskania prawdopodobieństw podstawowych.

Na podstawie danych uzyskano wartości ryzyka. Wyniki umieszczono w tabeli 2.7.

Sekcja rurociągu	Ryzyko(USD)
1	567,285
2	349,34175
3	857,233125
4	695,5154625
5	145,965
6	209,349
7	389,8725
8	149,1735
9	237,9
10	97,41735
11	123,5925
12	429,99435
13	263,85

Tabela 2.7. Wyniki analizy ryzyka dla sekcji rurociągu na podstawie modelu Bayesa – dane z roku 2018

Ocena ryzyka obejmuje kalkulację przede wszystkim kosztów napraw i przestojów instalacji. Szkody środowiskowe to emisja gazu do atmosfery, która na otwartym morzu nie powoduje istotnych zanieczyszczeń lub degradacji środowiska naturalnego. Przykładowe projekty, takie jak Bukom SBM, pokazują, że typowe koszty wymiany rurociągów mogą wynosić od 5 do 20 milionów USD za kilometr, a analiza ryzyka dla sekcji rurociągu na podstawie modelu Bayesa wskazuje na różne poziomy ryzyka dla poszczególnych sekcji.

3. Model uszkodzeń rurociągów w obszarze chronionym platformy

Obszar wokół platformy wydobywczej jest obszarem chronionym. Zwykle promień takiego obszaru to 500 metrów, ale w przypadku platformy Baltic Beta wynosi 3700 metrów. Na polu wydobywczym oprócz platformy znajduje się tam gęsta infrastruktura podwodna biegnąca pomiędzy platformą Baltic Beta, platformą bezobsługową PG1 oraz superboją przeładunkową, przy której znajduje się zbiornikowiec przewożący ropę do portu. Obszar dozorowany jest przez jednostkę dozoru (ang. *standby vessel*) lub jednostkę dozoru z funkcjami ratowniczymi (ERRV, ang. *Emergency Response and Rescue Vessel*). Na obszarze prowadzone są prace przeładunkowe, prace konserwacyjne, podmiany załóg platformy, prace podwodne itd. Czynności te są źródłem ryzyka dla infrastruktury podwodnej.

3.1. Operacje przeładunkowe na platformie

W celu określenia prawdopodobieństwa oraz stopnia uszkodzenia rurociągów podwodnych sklasyfikowano typowe obiekty przeładowywane w trakcie eksploatacji platformy (tabela 3.1).

Charakterystyka obiektu	Masa [t]	Typowe obiekty
Płaskie/ podłużne	< 2	Świdry, głowice wiertnicze, drobny osprzęt
	2-8	Klucze wiertnicze
	> 8	Bomy, rurociągi, Elementy zestawów wiertniczych
Kontenery, obiekty obłe	< 2	Kontenery z zaopatrzeniem
	2-8	Kontenery, kosze
	> 8	Kontenery z częściami eksploatacyjnymi
Kontenery, obiekty obłe	>> 8	Wiązki rurociągów, głowice, prewentory

Tabela 3.1. Klasyfikacja ładunku transportowanego na lub z platform

Informacje niezbędne do określenia prawdopodobieństwa uderzenia w rurociąg podczas przeładunku to:

- częstość operacji przeładunkowych;
- informacje dotyczące dźwigów, takie jak: ich liczba, położenie na platformie i zasięg ramion w stosunku do przebiegu podwodnych rurociągów, pozycje statków zaopatrzenia w momencie przeładunku, sposób i forma przeładunku.

Klasyfikacja stopnia uszkodzenia rurociągów podczas przeładunku

W celu klasyfikacji uszkodzeń podzielono je na następujące kategorie:

- D1 uszkodzenia małe, nie powodujące wycieku ani nie wymagające naprawy, o deformacji mniejszej niż 5 % średnicy rurociągu;
- D2 uszkodzenia umiarkowane, wymagające napraw, ale niepowodujące wycieku, zazwyczaj deformacja powyżej 5 % średnicy;
- D3 uszkodzenia powodujące wyciek. Operacje transportu węglowodorów muszą być natychmiastowo zatrzymane.

Uszkodzenia w funkcji wycieku węglowodorów sklasyfikowano na:

- R0 brak wycieku;
- R1 mały wyciek a uszkodzenie rurociągu (< 80 mm średnicy), uszkodzenie może być zlokalizowane wizualnie, bądź przez zmiany w ciśnieniu w systemie;
- R3 poważne uszkodzenie. Poważna zmiana ciśnienia w systemie.

Zależność energii uderzenia i deformacji rurociągu przedstawia wzór:

$$E_r = 16 \left(\frac{2\pi}{9}\right)^{\frac{1}{2}} m_p \left(\frac{D}{t}\right)^{\frac{1}{2}} D\left(\frac{\delta}{D}\right)^{\frac{1}{2}}$$
(3.1)

gdzie:

- E_r energia uderzenia obiektu w rurociąg,
- m_p moment plastyczny ściany rurociągu,
- δ deformacja rurociągu [mm],
- *t* grubość ścianki rurociągu,
- D zewnętrzna średnica rurociągu.

3.2. Analiza częstości ryzyka uderzenia rurociągu podwodnego w obszarze chronionym platformy w trakcie przeładunku

Częstości uderzeń przeładowywanego ładunku w rurociąg podwodny określono na podstawie danych publikowanych przez UK Department of Energy. Dane o wypadkach uzyskano z analizy operacji dźwigami w liczbie $3,7 \times 10^6$, która odpowiadała 4500 operacjom przeładunku z jednostek dowozowych na dźwig na rok. Na podstawie wymienionych danych ustalono prawdopodobieństwo upadku ładunku na $2,2 \times 10^{-5}$ na operację przeładunkową. Dla ładunków o masie powyżej 20 ton prawdopodobieństwo to wynosi 3×10^{-5} na operację przeładunkową. Zestawienie prawdopodobieństw przedstawiono w tabeli 3.2.

Typ przeładunku	Częstość zrzutu ładunku na operację dźwigiem
Zwykły przeładunek ze statku dostawczego o masie poniżej 20 ton	$1,2 \times 10^{-5}$
Przeładunek ze statku dostawczego o masie powyżej 20 ton	1,6×10 ⁻⁵
Przeładunek ze statku dostawczego o masie poniżej 100 ton	2,2×10 ⁻⁵
Zwykły przeładunek ze statku dostawczego o masie powyżej 100 ton	1,5×10 ⁻⁵

Tabela 3.2. Częstości zrzutu ładunku w funkcji operacji dźwigu

Dużym zagrożeniem w tym obszarze jest uszkodzenie zwykle niezabezpieczonych sieci rurociągów w trakcie operacji przeładunkowych. Badania prowadzone będą na obiekcie rzeczywistym – polu wydobywczym B3 platformy Baltic Beta.

Prawdopodobieństwo zrzucenia unosu podczas przeładunku, który uderzy w dno w odległości *x* od pionowej linii zawiesia dźwigu, obliczono z zależności dla rozkładu normalnego:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x}{\sigma}\right)^2}$$
(3.2)

gdzie:

- P(x) prawdopodobieństwo uderzenia w dno zrzuconego przedmiotu/ładunku w odległości x od linii pionowej zawiesia dźwigu,
- x pozioma odległość liczona po dnie [m],
- σ odchylenie kątowe zrzuconego unosu w wodzie, zależne od kształtu zrzuconego ładunku (tabela 3.4).

Nr	Opis kształtu ładunku	Masa [t]	Odchylenie kątowe zrzutu w stopniach	
1		< 2	15	
2	Płaski/długi kształt	2-8	9	
3		> 8	5	
4		< 2	10	
5	Kontener/zaokrąglony kształt	2-8	5	
6		> 8	3	
7	Kontener/zaokrąglony kształt	>> 8	2	

Tabela 3.4. Odchylenia kątowe zrzuconego ładunku w wodzie

Źródło: [10].

Prawdopodobieństwo uderzenia w dno w odległości r od linii pionu zawiesia dźwigu można wyznaczyć za pomocą wzoru:

$$P_r(-r \le x \le r) = \int_{-r}^{r} P(x) dx$$
(3.3)

Na rysunku 3.1 schematycznie przedstawiono obszar prawdopodobieństwa uderzenia obiektu zrzuconego podczas przeładunku dźwigiem.



Rys. 3.1. Obszar prawdopodobieństwa uderzenia obiektu zruconego podczas przeładunku dźwigiem

Wartości r_0 i r_1 to promienie okręgów, których środek to pozycja dźwigu na platformie. Promienie wyznaczono co 10 metrów od pozycji dźwigu.

Prawdopodobieństwo uderzenia w przedziale promieni r_0 i r_1 można określić jako:

$$P_{\text{uderz.},r} = P(r_1 < x \le r_0) = P(x \le r_0) - P(x \le r_1)$$
(3.4)

Przedział każdego badanego obszaru przyjęto w 10-metrowych odstępach. Dla każdego tak przyjętego przedziału można obliczyć prawdopodobieństwo upadku ładunku o różnym kształcie, z uwzględnieniem odchylenia upadku od linii pionu na dno oraz na różnych głębo-kościach.

Prawdopodobieństwo uderzenia rurociągu w zakładanych obszarach można obliczyć na podstawie zależność:

$$P_{\left(\frac{\mathrm{ud/rur}}{r}\right)} = P_{\mathrm{uderz},r} \cdot \frac{L_{sl} \cdot (D+B)}{A_r}$$
(3.5)

- $P_{(ud/rur/r)}$ prawdopodobieństwo uderzenia linii rurociągu (*sl*) wewnątrz obszaru ograniczonego promieniami r_0, r_1 ;
- $P_{uderz,r}$ prawdopodobieństwo zrzutu ładunku wewnątrz obszaru ograniczonego promieniami r_0, r_1 ;

- L_{sl} długość rurociągu wewnątrz obszaru ograniczonego promieniami $r_0, r_1;$
- D średnica rurociągu;
- *B* szerokość spadającego obiektu;
- A_r obszar wewnątrz okręgów o promieniach r_0 , r_1 [m²].

Najczęściej szerokość obiektu to wymiary kontenera, jeśli zakładamy jego zrzut bądź długość lub średnica rur wiertniczych, jeśli zakładamy ich zrzut przy przeładunku.

Wyznaczenie prawdopodobieństwa uderzenia unosu w infrastrukturę podwodną podczas przeładunku z uwzględnieniem rocznej liczby przeładunków można obliczyć za pomocą wzoru:

$$P_U = N_i f_U P_{\left(\frac{\mathrm{ud/rur}}{r}\right)}$$
(3.6)

gdzie:

- P_U prawdopodobieństwo uderzenia unosu w infrastrukturę podwodną [rok⁻¹],
- N_i liczba przeładunków w ciągu roku,
- f_U prawdopodobieństwo zrzutu na unos,
- $P_{(ud/rur/r)}$ prawdopodobieństwo uderzenia rurociągu podwodnego przez zrzucony ładunek w zakresie promienia r.

Kolejnym czynnikiem, który może prowadzić do uszkodzenia infrastruktury podwodnej w obszarze chronionym platformy, jest kolizja jednostek obsługujących platformę z rurociągami – jednostek dozoru pola wydobywczego oraz jednostek zaopatrzeniowych. Wyznaczenie prawdopodobieństwa uszkodzenia instalacji przez statki obsługi pola wydobywczego określono zależnościami (3.10)–(3.12):

$$f_{\text{kol}}(\text{dozoru}) = N \cdot P_P \cdot (P_2 \cdot t) \cdot P_{\text{riser}}$$
(3.7)

gdzie:

fkol(dozoru) – częstość uderzenia jednostki dozoru platformy z rurociągiem/riserem,

- N liczba jednostek dozoru przy platformie,
- P_P prawdopodobieństwo geometryczne uderzenia w platformę, $D_p/(2\pi R)$,
- D_P średnica platformy wraz z szerokością i długością jednostki dozoru,
- *R* promień obszaru dozoru (dla platformy Baltic Beta 3,6 kilometra),
- P_2 częstość niesprawności napędu statku dozoru na godzinę (zwykle 1,4·10⁻⁵ na godz.),
- T czas w godzinach na rok dozoru przez jednostkę (8760 godzin rocznie),
- *P*_{riser} prawdopodobieństwo uderzenia w obszar, gdzie znajdują się rurociągi platformy [11].

$$P_{\text{riser}} = \frac{\left(L_p + B_{\text{vessel}}\right) \cdot \alpha}{W_A + B_{\text{vessel}}}$$
(3.8)

- *L_P* eksponowana część platformy, gdzie przebiegają rurociągi,
- W_A szerokość platformy w miejscu ekspozycji rurociągów,
- α współczynnik redukcji zależny od konstrukcji statku zaopatrzenia,

B_{vessel} – szerokość jednostki.

Jeśli chodzi o prawdopodobieństwo uderzenia instalacji przez jednostki zaopatrzeniowe, można je obliczyć za pomocą wzoru:

$$f_{\rm kol}(\text{zaopatrzenia}) = N \cdot P_1 P_2 \cdot P_{\rm riser}$$
(3.9)

Na podstawie literatury uzyskano wartości prawdopodobieństw uderzenia jednostki zaopatrzeniowej w instalację platformy. Za prawdopodobieństwo P_1 (prawdopodobieństwo utrzymywania kursu jednostki na instalację) przyjęto 0,1. Na podstawie źródeł literaturowych prawdopodobieństwo P_2 błędów manewrowych jednostki na każde jej przybycie pod platformę to $6 \cdot 10^{-4}$. Prawdopodobieństwo postoju i przeładunku statku zaopatrzeniowego w okolicach instalacji dla miejsc wskazanych do przeładunku statków zaopatrzenia P_{riser} przyjmuje się jako 0,11. Prawdopodobieństwo uderzenia rurociągu przez statki dostawcze można określić jako $6.6 \cdot 10^{-6}$.

3.3. Model sieci Bayesa do oceny prawdopodobieństwa i skutków uszkodzeń rurociągów w obszarze chronionym platformy

Model sieci Bayesa do określenia prawdopodobieństwa uszkodzenia infrastruktury podwodnej oraz ich skutków w obszarze chronionym platformy przedstawiono na rysunku 3.2. Proponowana architektura sieci Bayesa opracowana dla obszaru chronionego platformy zawiera następujące elementy:

- prawdopodobieństwa przejść jednostek zaopatrzenia i ochrony pola oraz zbiornikowców odbiorczych i zrzut kotwic,
- 2) prawdopodobieństwa zrzutu 6 klas ładunków,
- 3) prawdopodobieństwo uderzenia trałem rybackim,
- 4) prawdopodobieństwo kolizji jednostki obsługi z instalacją platformy,
- 5) prawdopodobieństwo korozji rurociągu.

W obszarze ochronnym platform mogą przebywać jedynie jednostki, które otrzymują pozwolenie wejścia przez OIM (ang. *Offshore Installation Manager*). Są to statki dozoru, zaopatrzeniowe, zbiornikowce przeładunkowe, statki specjalnego przeznaczenia, takie jak statki sejsmiczne i nurkowe. Zdarza się, że w obszar chroniony wpływają statki rybackie co stanowi dodatkowe zagrożenie. Aby zapisać wzór Bayesa na prawdopodobieństwo uszkodzenia rurociągu podwodnego (oznaczone jako *D*) w wyniku różnych czynników ryzyka, można skorzystać z następującej ogólnej postaci wzoru Bayesa:

$$P(D|E) = \frac{P(E|D)P(D)}{P(E)}$$
(3.10)

- P(D|E) prawdopodobieństwo uszkodzenia rurociągu pod warunkiem wystąpienia zdarzenia E,
- P(E|D) prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia E pod warunkiem, że rurociąg został uszkodzony,

- P(D) aprioryczne prawdopodobieństwo uszkodzenia rurociągu,
- P(E) całkowite prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia E.



Rys. 3.2. Proponowana sieć Bayesa dla obszaru ochronnego platformy

Zakładając, że mamy wiele czynników ryzyka (zdarzeń E'_i), takich jak:

 E'_1 : zrzut kotwicy ze statku obsługi bądź zbiornikowca przeładunkowego,

E'2: zrzut ładunku przeładowywanego z lub na platformę,

E'3: zahaczenie trałem rybackim,

- E'4: prawdopodobieństwo awarii statku obsługi i uderzenia w instalację platformy,
- E'5: zrzut ładunku,
- E'6: korozja.

Zakładamy, że zdarzenia są niezależne od siebie. Wzór Bayesa dla każdego zdarzenia E_i będzie wyglądał następująco:

$$P(D|E) = \frac{P(E|D)P(D)}{P(E_i)}$$
(3.11)

W celu wykonania sieci Bayesa dla obszaru chronionego platformy zbudowano drzewo błędów w celu określenia wpływu zdarzeń podstawowych i pośrednich na zdarzenie końcowe. Jest to metoda systematyczna i graficzna, która pomaga zrozumieć, jak różne elementy systemu mogą prowadzić do niepożądanego zdarzenia.



4. Model oceny stopnia uszkodzeń infrastruktury podwodnej wskutek zrzutu kotwicy

Dane dotyczące stopnia uszkodzenia infrastruktury podwodnej w modelu sieci Bayesa uzyskano na podstawie badań metodą elementów skończonych (MES). MES polega na dyskretyzacji fizycznej badanego obiektu. Idea metody opiera się na podziale kontinuum na skończoną liczbę elementów o podobnym kształcie, wymiarach, sposobie połączenia elementów, podobnym przyjęciu parametrów węzłowych oraz funkcji interpolacyjnych opisujących badany element. Dzięki zastosowaniu takiego zabiegu, metoda opisuje zachowanie się całego układu, łącząc jego poszczególne elementy w jedną całość. Obliczenia z wykorzystaniem elementów skończonych można wykonywać zarówno w przestrzeni dwuwymiarowej, jak i trójwymiarowej. Proces analizy wytrzymałościowej podzielony jest na etapy:

- podział analizowanego rurociągu na n elementów skończonych,
- numeracja elementów oraz oznaczenie reakcji w węzłach,
- wyznaczenie liczby stopni swobody elementu oraz konstrukcji,
- budowa macierzy topologii.

Na podstawie uzyskanych wartości sił uderzenia kotwic w rurociąg za pomocą metody elementów skończonych wykonano analizę zniekształceń oraz naprężenia rurociągu. Do analizy wykorzystano informacje o parametrach technicznych rurociągu gazowego z platformy Baltic Beta do elektrowni Władysławowo przedstawione w tabeli 4.1.

Parametr	Wartość	
Materiał	Stal rurowa X-65-C	
Średnica wewnętrzna	101,6 mm	
Średnica zewnętrzna	114,3 mm	
Grubość ścianki	6,35 mm	
Ciśnienie robocze	130–135 bar	
Maksymalne ciśnienie robocze	342 bar	
Wytrzymałość na rozciągnie	531 MPa	
Granica plastyczności	448 MPa	
Moduł Yunga	182 GPa	
Ciśnienie słupa wody	0,34 MPa	

Tabela 4.1. Parametry techniczne rurociągu gazowego

Na rysunku 4.4 przedstawiono wizualizację wyników symulacji uszkodzeń rurociągu (odkształcenie pionowe).



Rys. 4.1. Analiza odkształceń pionowych dla rurociągu. Stal rurowa X-65-C

Rysunek 4.1 przedstawia wyniki badań wytrzymałościowych. Na rysunku 4.1 przedstawiono uzyskany wykres pionowego odkształcenia rurociągu spowodowanego uderzeniem kotwic o różnych masach. Rozpoczyna się od wgniecenia o głębokości 0,2 mm dla kotwic o wadze 3,7 tony oraz 1,5 mm dla kotwic o wadze 8,5 tony. Dodatkowo przeprowadzono testy naprężenia. Rysunek 4.2 przedstawia wyniki tych testów. Dla kotwicy o wadze 3,7 tony naprężenie wynosi 28,4 N/mm², a dla kotwicy o wadze 8,5 tony wynosi 55 N/mm².



Rys. 4.2. Naprężenia plastyczne rurociągu w zależności od mas kotwic

Zgodnie z normami technicznymi DNV, pierwszy poziom odkształcenia, który wymaga natychmiastowej inspekcji, wynosi 5 % średnicy. Dla testowanego rurociągu wynosi to 5,7 mm. Kolejny poziom odkształcenia to 15 %. W przypadku testowanego rurociągu wynosi to 17,1 mm. Zgodnie z badaniami, kotwice o wadze powyżej 16 ton mogą spowodować pionowe odkształcenie rurociągu przekraczające 15 % ich średnicy, co skutkuje natychmiastowym przerwaniem przesyłu gazu. W takim wypadku niezbędna jest naprawa techniczna. Kotwice o masie 16 ton są wyposażeniem statków handlowych o długości ponad 250 metrów. Oznacza to, że jednostki o długościach powyżej 250 metrów są poważnym zagrożeniem dla infrastruktury podwodnej w przypadku zrzutu kotwic.

Według norm DNV-RP-F107 podzielono uszkodzenia rurociągu w zależności od deformacji pionowej:

- D1 małe uszkodzenia, odkształcenie < 5 % średnicy;
- D2 średnie odkształcenie pomiędzy 5 % a 15 % średnicy;
- D3 poważne, skutkujące wyciekiem odkształcenie powyżej 15% średnicy.

Na podstawie prezentowanych badań sklasyfikowano masy kotwic, a tym samym jednostki przepływające nad rurociągiem w funkcji ewentualnych uszkodzeń instalacji po zrzuceniu kotwicy (tabela 4.2). Taką klasyfikację przyjęto w modelu sieci Bayesa.

Masa kotwicy	Stopień uszkodzenia	
do 3 ton	brak	
3–12 ton	małe	
12–16 ton	średnie	
Powyżej 16 ton	poważne	

Tabela 4.2. Podział mas kotwic w funkcji stopnia uszkodzeń

4.2. Wpływ korozji na awarie rurociągu podwodnego

Model uszkodzeń rurociągów podwodnych z powodu korozji

Częstość wewnętrznej korozji rurociągów podwodnych można zapisać:

$$F_{\rm kor,w} = F_{\rm kor} \cdot P_{\rm gr} \cdot P_{\rm ins} \tag{4.1}$$

gdzie:

- $F_{kor,w}$ częstość awarii z powodu korozji zależna od rodzaju przesyłanego węglowodoru [km/rok],
- Pgr współczynnik modyfikujący zależny od grubości ścianek rurociągu,
- *P*_{ins} współczynnik modyfikujący zależny od częstości przeprowadzanych inspekcji rurociągu.

W tabeli 4.3 przedstawiono wartości F_{kor} na podstawie danych ERCB (ang. *Energy Resources Conservation Board*), EGIG (ang. *European Gas Pipeline Incident Data Group*).

Częstość zewnętrznej korozji można zapisać na podstawie zależności:

$$F_{\text{kor},z} = F_{\text{kor},z} \cdot P_{\text{gr}} \cdot P_{\text{ins}}$$

$$(4.2)$$

- F_{kor} częstość awarii z powodu korozji zależna od rodzaju przesyłanego węglowodoru [km/rok],
- *P*_o współczynnik modyfikujący zależny od pokrycia powłokami antykorozyjnymi z polietylenu,

P_{ins} – współczynnik modyfikujący zależny od częstości przeprowadzanych inspekcji rurociągu.

Prawdopodobieństwa zostały uwzględnione w sieci Bayesa jako dodatkowe prawdopodobieństwo mające wpływ na stopień uszkodzenia.

4.3. Model oszacowania skutków uszkodzeń rurociągu zagłębionego w grunt

Do określenia tłumienia skutków uszkodzeń rurociągu zagłębionego w gruncie użyto zależność – Model Terzaghiego

$$E_P = 0.5 \ \gamma' \cdot D_k \cdot N_{\gamma'} \cdot A_P \cdot Z + \gamma' \cdot Z^2 \cdot N_Q \cdot A_P \tag{4.3}$$

gdzie:

- E_P energia pochłaniana przez grunt w funkcji głębokości gruntu [J],
- Υ' obiektywny ciężar objętościowy gruntu [kN/m²],
- D_k szerokość podstawy kotwicy,
- A_P efektywny nacisk nakładu gruntu w najbliższym sąsiedztwie rurociągu [J/m²],

 N_{Υ} , N_Q – bezwymiarowe współczynniki nośności, zależne od kąta tarcia wewnętrznego gruntu,

Z – głębokość wytłumienia energii (zagłębienie).

Na rysunkach 4.3 i 4.4 przedstawiono głębokości tłumienia energii pochodzącej od uderzenia kotwicy w rurociąg. Wykres przedstawia tłumienie energii w funkcji mas kotwic dla rurociągu zagłębionego w żwir. Porównując materiał, w którym zakopany jest rurociąg, dla kotwic o masie 5 ton, warstwa ochronna dla gruntu miękkiego to 3 metry (rys. 4.3), zaś dla żwiru to tylko metr (rys. 4.4). Zakopywanie rurociągu to częsta metoda ochrony przed uszkodzeniami. Na podstawie modelu częstości uszkodzeń oraz ich stopnia można na etapie projektowym zoptymalizować długość i sekcje rurociągu, które mają zostać zabezpieczone.



Rys. 4.3. Wykres tłumienia energii uderzenia kotwic dla rurociągu zagłębionego w grunt miękki



Rys. 4.4. Wykres tłumienia energii uderzenia kotwic dla rurociągu zagłębionego w żwir

4.4. Model oceny uszkodzeń infrastruktury podwodnej wskutek uszkodzenia wleczoną kotwicą

Statek, który niezamierzenie wlecze kotwicę nad rurociągiem, naraża instalację na zahaczenie. W celu określenia energii oddziaływania kotwicy statku na rurociąg w momencie uszkodzenia wleczoną kotwicą wykorzystano normy DNV-RP-F111. Całkowita energia oddziaływania kotwicy na rurociąg może być wyrażona wzorem:

$$E_{\text{całkowita}} = E_u + E_p + E_z \tag{4.4}$$

gdzie:

Ecałkowita – całkowita energia oddziaływania kotwicy na rurociąg,

 E_u – energia uderzenia w rurociąg,

 E_p – energia poderwania rurociągu,

 E_z – energia uszkodzenia wleczoną kotwicą rurociągu.



Rys. 4.5. Rozkład energii na poszczególnych sekcjach rurociągu z sieci Bayesa

Na rysunku 4.5 przedstawiono rozkład energii uderzenia kotwic w rurociąg na kolejnych sekcjach rurociągu. Najwyższe energie występują w sekcjach 3, 4, 5. Są to sekcje przebiegające w obszarze stref rozgraniczenia ruchu statków handlowych. Najwyższe energie uderzenia, powyżej 800 kJ, występują w sekcji 3 – stanowią 12 % spośród wszystkich grup energii, oraz w sekcji 5, gdzie wynoszą 10 %. W sekcji 5, 16 % energii stanowi przedział 400–800 kJ podczas gdy w sekcji 4 energia ta stanowi 15 %. Energia w przedziale 400–800 kJ pojawia się także w sekcji 12, a jej udział procentowy to 10 %. Występowanie prawdopodobieństwa uderzenia rurociągów taką energią przekłada się na skategoryzowany poziom uszkodzeń (rys. 4.6).



Rys. 4.6. Prawdopodobieństwo uszkodzeń rurociągu w sekcjach

Dane uzyskane z sieci Bayesa wskazują, że prawdopodobieństwo poważnego uszkodzenia w sekcjach 3, 4 i 5 rurociągu jest znaczące. Są to obszary, gdzie znajdują się trasy statków handlowych. Prawdopodobieństwo poważnych uszkodzeń wynosi 6,9E-06 dla sekcji 5, 5,9E-06 dla sekcji 4 oraz 7,3E-06 dla sekcji 3. Uszkodzenia średnie w sekcji 5 występują z prawdopodobieństwem 9,8E-06, 9,3E-06 dla sekcji 3 i 5,5 E-06 dla sekcji 4.

5. Weryfikacja i walidacja modelu

Weryfikacja modelu sieci Bayesa została przeprowadzona w oparciu o metodę zaproponowaną przez towarzystwo klasyfikacyjne DNV. Nadzoruje ono bezpieczeństwo oraz określa ryzyko dla jednostek floty handlowej i przemysłu offshore. DNV, stosując swoją metodologię, opracowało ocenę ryzyka uszkodzeń rurociągu Nord Stream w 2008 roku. Analizę ryzyka Nord Stream 2 wykonano metodą zaproponowaną przez Di Pandova, C. Zuliani, F. Tallone. Wyniki porównania metody autora oraz metody DNV przedstawiono na rysunku 5.1. Metoda DNV uwzględnia ryzyko uszkodzenia sieci podwodnej, biorąc pod uwagę domyślne współczynniki związane z gęstością ruchu statków rybackich, zabezpieczeniem rurociągu oraz przewidywanym stopniem korozji w zależności od stosowanej metody zabezpieczenia. W proponowanej metodzie odziaływanie gęstości ruchu jednostek obliczane jest na podstawie danych AIS uzupełnionych informacjami z systemu VMS. Dodatkowo weryfikowana jest głębokość akwenu oraz parametry wyposażenia kotwicznego jednostek. Po weryfikacji wykluczane są statki, które mimo niezamierzonego zrzucenia kotwicy i wleczenia jej nie zagrażają instalacji podwodnej.

5.1. Weryfikacja modelu na podstawie korelacji z innymi dostępnymi modelami

Do weryfikacji zaproponowanego modelu obliczono prawdopodobieństwa uszkodzenia rurociągu za pomocą metodologii DNV oraz modelu zaproponowanego w literaturze dla Morza Bałtyckiego. Dokonano porównania i za pomocą aplikacji Statistica określono macierz korelacji parami dla modelu Bayesa i DNV oraz modelu Bayesa i Morza Bałtyckiego.

Na rysunkach 5.1 i 5.2 przedstawiono porównanie prawdopodobieństw uszkodzenia rurociągu obliczonych na podstawie trzech modeli, tj. modelu opartego na sieci Bayesa autora doktoratu, modelu DNV oraz modelu dla Morza Bałtyckiego. Analizę dokładności przeprowadzono w oparciu o macierze korelacji parami przedstawionych serii danych. Przeanalizowano korelację modelu ryzyka autora z modelem DNV oraz modelu autora i modelu Morza Bałtyckiego zbudowanych na podstawie danych z lat 2013 i 2018.

Wykonano analizę porównawczą modelu autora oraz modelu DNV i Morza Bałtyckiego. Uzyskane wyniki oparte są na danych zebranych z roku 2013 oraz 2018 (tabela 5.1). Maksymalne prawdopodobieństwa uszkodzenia rurociągu występują w sekcjach 3 i 4.



Rys. 5.1. Wyniki analizy prawdopodobieństw uszkodzenia rurociągu - dane z roku 2013



Rys. 5.2. Wyniki analizy prawdopodobieństw uszkodzenia rurociągu - dane z roku 2018

Sekcja rurociągu	Model DNV 2013	Sieć Bayesa 2013	Model DNV 2018	Sieć Bayesa 2018
1	1,363E-05	3,701E-05	3,1742E-05	3,7819E-05
2	2,526E-05	2,327E-05	3,0176E-05	2,3289E-05
3	5,148E-05	5,715E-05	4,6097E-05	5,7149E-05
4	3,436E-05	2,137E-05	4,7837E-05	4,6368E-05
5	2,182E-05	9,731E-06	1,6488E-05	9,731E-06
6	1,336E-05	1,306E-05	1,2109E-05	1,3957E-05
7	1,478E-05	1,579E-05	1,7996E-05	2,5992E-05
8	9,557E-06	4,965E-06	0,00001063	9,9449E-06
9	8,056E-06	1,107E-05	0,00000831	0,00001586
10	8,209E-06	2,492E-06	9,992E-06	6,4945E-06
11	1,128E-05	6,208E-06	1,0514E-05	8,2395E-06
12	2,306E-05	2,264E-05	1,6894E-05	2,8666E-05
13	9,151E-06	9,79E-06	1,1761E-05	0,00001759

Tabela 5.1. Prawdopodobieństwa uderzenia w rurociąg w latach 2013 oraz 2018 – proponowany model oraz model DNV

Na rysunkach 5.3, 5.4 przedstawiono wyniki korelacji modeli parami. Wszystkie wskazują na bardzo silną dodatnią korelację statystyczną między dwiema seriami danych, o czym świadczy współczynnik Pearsona. Na diagramach podane są funkcje regresji oraz pasy ufności. Podane są także maksymalne odchylenia dla zmiennych obu serii danych.



Rys. 5.3. Wyniki macierzy korelacji rok 2018 - model DNV oraz sieci Bayesa



Rys. 5.4. Wyniki macierzy korelacji rok 2013 - model DNV oraz sieci Bayesa

5.2. Analiza czułości

Analiza czułości umożliwia zbadanie, jak czułe są wyniki uzyskane z modelu ryzyka. Analiza czułości w sieciach Bayesa jest kluczowym narzędziem, które pozwala zrozumieć wpływ różnych zmiennych na wyniki modelu, ocenić stabilność i wiarygodność modelu. Analiza czułości pomaga określić, które zmienne wejściowe mają największy wpływ na zmienną wyjściową. Może to być przydatne w identyfikacji kluczowych czynników ryzyka lub istotnych zmiennych decyzyjnych. W celu analizy czułości wyznacza się funkcję czułości dla każdego pojedynczego węzła w sieci:

$$f(t) = \frac{(c_1 t + c_2)}{(c_3 t + c_4)}$$
(5.1)

gdzie f jest wyjściowym prawdopodobieństwem dla danych obserwacji, a c_1 , c_2 , c_3 , c_4 są stałymi.

Siła wpływu w sieciach bayesowskich jest istotnym narzędziem, które pomaga badaczom i analitykom oceniać, jak zmiany lub zdarzenia w jednej części systemu mogą wpływać na inne części systemu, uwzględniając niepewności i zależności między zmiennymi. Jest to kluczowy element analizy ryzyka, zarządzania operacyjnego oraz przewidywania zdarzeń.



Rys. 5.5. Analiza siły wpływu modelu uszkodzenia rurociągu na morzu otwartym



5.3. Analiza "wartości informacji"

W kontekście sieci Bayesa, analiza wartości informacji pomaga zidentyfikować, które zmienne mają największy potencjalny wpływ na redukcję niepewności i poprawę decyzji. Do weryfikacji przewidywalności modelu określono wartości entropii Shannona. Entropia Shannona, zwana również entropią informacyjną, jest miarą niepewności związanej ze zmienną losową. Dla skończonego zbioru zdarzeń $X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$ z przypisanymi prawdopodobieństwami $P(X) = \{p_1, p_2, ..., p_n\}$ entropia Shannona H(X) jest zdefiniowana jako:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^{n} p(x_i) \log_2 p(x_i)$$
(5.2)

gdzie:

H(X) – entropia Shannona,

 p_i – prawdopodobieństwo zdarzenia x_i .

Zerowa entropia oznacza, że wyniki modelu są w pełni przewidywalne. W celu weryfikacji niezależności zmiennych określono entropię warunkową obliczaną dla dwóch zmiennych *Y* i *X*:

$$H(X|Y) = -\sum_{i=1}^{n} p(x_i, y_i) \log_2 \frac{p(x_i)}{p(x_i, y_i)}$$
(5.3)

gdzie $p(x_i, y_i)$ jest prawdopodobieństwem, że zmienne X i Y są odpowiednio w stanie x_i oraz y_i . Do weryfikacji jakości sieci służy współczynnik zysku informacji. Aby ocenić jakość sieci Bayesa za pomocą entropii warunkowej i współczynnika zysku informacji (ang. *gain ratio*), należy przeanalizować, jak dobrze zmienne węzłów predykcyjnych redukują niepewność zmiennej docelowej. Interpretacja wartości zysku informacji (ang. *Information Gain*) dla sieci Bayesa polega na ocenie, jak dobrze jedna zmienna redukuje niepewność innej zmiennej. Aby określić współczynnik *IG*, należy wykonać następujące kroki:

1. Obliczenie entropii warunkowej:

$$X(Y|X) = -\sum_{i=1}^{k} \sum_{i=1}^{r} P(Y = y_i, X = x_i) \log_2 \frac{P(Y = y_i, X = x_i)}{P(X = x_i)}$$
(5.4)

2. Zysk informacji (IG, ang. *Information Gain*) zdefiniowano jako zmiana entropii uzyskana w wyniku rozbudowy sieci:

$$IG(X_i) = H(Y) - H(Y|X_i)$$
 (5.5)

Wyniki uzyskane wskazują na wysokie predyktory sieci. Szczególnie statki handlowe $IG_{\text{max}} = 0,382$ oraz statki obsługi pola $IG_{\text{max}} = 0,53$ mają duży wpływ na wynik prawdopodobieństwa uszkodzenia infrastruktury podwodnej.

Zysk informacji (*IG*) pozwala ocenić, które zmienne w sieci Bayesa są najbardziej informatywne i jak dobrze redukują niepewność zmiennej docelowej. Wysokie wartości *IG* sugerują silne predyktory, co pozwala na budowę bardziej efektywnych i dokładnych modeli probabilistycznych.

Wnioski

W rozprawie doktorskiej przedstawiono autorski model analizy ryzyka uszkodzeń infrastruktury podwodnej offshore ze szczególnym uwzględnieniem rurociągów. Kluczowym elementem modelu jest zbudowana przez autora sieć Bayesa, która wykorzystuje zebrane dane statystyczne na temat prawdopodobieństw zdarzeń mających wpływ na uszkodzenia infrastruktury podwodnej oraz dane rzeczywiste o ruchu i parametrach jednostek przepływających nad rurociągiem. Uzyskane wyniki dostarczyły szeregu istotnych wniosków, które mogą przyczynić się do poprawy zarządzania bezpieczeństwem i minimalizacji prawdopodobieństwa uszkodzenia infrastruktury w morskich strefach wydobywczych. Za pomocą opracowanego modelu obliczono kluczowe informacje dotyczące ryzyka infrastruktury podwodnej, takie jak:

- prawdopodobieństwo uszkodzeń,
- energia uderzeń w instalacje,
- skategoryzowany stopień uszkodzenia dla wyodrębnionych sekcji rurociągu.

Poniżej przedstawiono najważniejsze wnioski wynikające z przeprowadzonych analiz:

- Efektywność modelu ryzyka: Zaproponowany model ryzyka infrastruktury offshore okazał się efektywnym i skutecznym narzędziem do modelowania i oceny ryzyka uszkodzeń infrastruktury podwodnej. Umożliwia integrację różnorodnych źródeł danych oraz uwzględnianie niepewności w analizach. Zaproponowana metoda przekształcenia drzew zdarzeń i implementacja do modelu ryzyka, włączenie badań symulacyjnych oraz integracje danych z dwóch systemów AIS i VMS pozwoliła na dokładne odwzorowanie zależności między różnymi czynnikami ryzyka.
- 2. Ocena ryzyka z podziałem na sekcje rurociągu: Na podstawie autorskiego modelu analizy ryzyka można ocenić ryzyko z podziałem na sekcje rurociągu podwodnego. Unikalną cechą modelu jest możliwość oceny skutków uszkodzeń, co pozwala na zaplanowanie odpowiedniego zabezpieczenia rurociągu w celu uniknięcia lub zminimalizowania strat materialnych i środowiskowych w trakcie jego eksploatacji. Model jest narzędziem, które może być wykorzystane przy pracach projektowych.
- 3. Aktualizacja danych: Autorski model ryzyka infrastruktury podwodnej jest narzędziem, do którego można implementować aktualne dane, co podnosi jego wartość. Wyniki są bezpośrednio zależne od jakości danych wejściowych. W pracy wskazano zmiany w strukturze gęstości ruchu statków nad infrastrukturą podwodną na przykładzie zestawów danych z lat 2013 i 2018. Aktualizacja danych, a w szczególności liczby jednostek oraz rodzaju ich wyposażenia kotwicznego, ma kluczowy wpływ na prawdopodobieństwo uszkodzenia infrastruktury podwodnej. Aktualizacja danych jest kluczowa w kontekście zmieniających się warunków operacyjnych i środowiskowych.

- 4. Metoda symulacyjna: Zaletą modelu jest wykorzystanie danych uzyskanych metodą symulacyjną. Metoda pozwala na uzupełnienie informacji, których nie można uzyskać na podstawie danych rzeczywistych bądź literaturowych. Użycie metody symulacyjnej podnosi dokładność i wiarygodność uzyskanych wyników.
- 5. Holistyczny i uniwersalny model: Stworzony przez autora model ryzyka posiada cechy modelu holistycznego oraz uniwersalnego. Integruje szereg czynników mających wpływ na ryzyko infrastruktury podwodnej i może być stosowany na każdym akwenie po wprowadzeniu aktualnych danych wejściowych.
- 6. Ocena ryzyka infrastruktury energetycznej: Przedstawiony model ryzyka może być użyty także przy ocenie ryzyka podwodnej infrastruktury energetycznej, w szczególności w pobliżu morskich farm wiatrowych. Okablowanie podwodne jest szczególnie narażone na uszkodzenia trałami rybackimi. Model dokładnie analizuje prawdopodobieństwo uszkodzeń infrastruktury podwodnej przy użyciu takiego narzędzia połowu.

Zaproponowany model pozwala to na bardziej skuteczne zarządzanie ryzykiem i podejmowanie decyzji dotyczących działań prewencyjnych i reakcji na incydenty. Praca miała na celu wkład w dziedzinę zarządzania ryzykiem, a w szczególności w ocenę ryzyka infrastruktury podwodnej offshore.

Zrealizowane zadania badawcze:

- 1. Na podstawie literatury oraz baz danych PARLOC, WOAD określono zdarzenia jakie wpływające na uszkodzenia infrastruktury podwodnej.
- 2. Określono prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzeń rzutujących na bezpieczeństwo infrastruktury podwodnej, które zaimplementowano do sieci Bayesa.
- 3. Określono wzajemne relacje pomiędzy zdarzeniami wpływającymi na bezpieczeństwo infrastruktury podwodnej.
- 4. Zbudowano aplikację do analizy gęstości ruchu jednostek nad infrastrukturą podwodną na podstawie danych AIS.
- 5. Zbudowano aplikację do analizy głębokości wleczenia kotwic.
- 6. Zweryfikowano gęstość statków rybackich nad rurociągiem w oparciu o dane AIS oraz użyte narzędzia połowu w oparciu o dane systemu VMS.
- 7. Określono za pomocą metody elementów skończonych skutki uszkodzeń rurociągów zrzuconymi kotwicami.
- 8. Zbudowano sieci Bayesa do identyfikacji ryzyka uszkodzeń oraz oceny ich skutków dla obszaru otwartego i chronionego morskiej platformy wydobywczej.
- 9. Zweryfikowano model. Określono czułość sieci Bayesa i oceniono kryterium "wartości informacji".

Realizacja powyższych zadań pozwoliła na osiągnięcie głównego celu pracy, którym było stworzenie i weryfikacja probabilistycznego modelu ryzyka infrastruktury podwodnej offshore.

Do osiągnięć autora należą:

1. Opracowanie probabilistycznego modelu integrującego szereg danych mających wpływ na analizę poruszonego problemu badawczego.

- Opracowanie aplikacji do rozkodowania oraz stworzenia bazy danych jednostek przepływających nad poszczególnymi sekcjami rurociągu oraz operujących wewnątrz obszaru ochronnego morskiej platformy wydobywczej.
- Implementacja danych z bazy danych VMS, do weryfikacji narzędzi połowu, co pozwoliło na bardziej szczegółową analizę prawdopodobieństwa uszkodzeń infrastruktury podwodnej.
- 4. Wykorzystanie metody elementów skończonych do analizy wytrzymałościowej uszkodzeń.
- 5. Opracowanie modelu integrującego obliczenia prawdopodobieństw uszkodzeń oraz ich skutków wraz z ich kategoryzacją.

Kierunki przyszłych badań:

W świetle uzyskanych wyników oraz przeprowadzonych analiz zaproponowany model ryzyka infrastruktury offshore może służyć jako podstawa do dalszych badań i rozwoju bardziej zaawansowanych narzędzi oceny ryzyka. Proponuje się kontynuowanie badań nad modelem ryzyka infrastruktury podwodnej z wykorzystaniem sieci Bayesa, uczenia maszynowego oraz sztucznej inteligencji. Dalsze prace badawcze mogą skupić się na integracji dodatkowych danych oraz na rozwijaniu metod predykcyjnych, aby jeszcze bardziej zwiększyć dokładność i efektywność zarządzania ryzykiem w sektorze offshore.

Przyszłe badania powinny skupić się na integracji danych z różnych źródeł, w tym danych geologicznych, meteorologicznych oraz operacyjnych, aby zwiększyć dokładność prognoz ryzyka. Ponadto, rozwój adaptacyjnych algorytmów uczenia maszynowego, które mogą dynamicznie aktualizować modele ryzyka w oparciu o najnowsze dane, może znacząco poprawić responsywność i skuteczność systemów zarządzania ryzykiem. Istotnym kierunkiem jest również eksploracja możliwości wykorzystania zaawansowanych technik AI, takich jak głębokie sieci neuronowe, sieci neuronowe rekurencyjne czy uczenie przez wzmacnianie w celu wykrywania nieliniowych zależności oraz przewidywania rzadkich, ale krytycznych zdarzeń. Proponuje się prowadzenie badań w kontekście realnych zastosowań przemysłowych, co pozwoli na praktyczne przetestowanie i weryfikację proponowanych rozwiązań, a także na ich dalsze udoskonalenie w odpowiedzi na specyficzne wyzwania branży offshore. Ocena ryzyka infrastruktury podwodnej powinna być także rozwijana w aspekcie działań wojennych i narażenia infrastruktury krytycznej na ataki sabotażowe, działania celowe i terrorystyczne.

Bibliografia (wybrane pozycje)

- Aven T., E. Zio, (January 2011), Some considerations on the treatment of uncertainties in risk assessment for practical decision making, Reliability Engineering & System Safety 96, no. 164–74.
- Artana K.B., Ariana I., Dinariyana A., Dhimas W., Prativi E., (2016), Subsea Gas Pipeline Risk Assessment during Hot Tapping Installation, IPTEK, The Journal of Technology and Science.
- 3. Aulia R., (2019), *Dynamic Reliability Model for Subsea Pipeline Risk Assessment due to Third Party Damage*, 29th European Safety and Reliability Conference (ESREL).
- 4. Bai Y., Bai Q., (2014), Subsea pipeline integrity and risk management, Elsevier.
- 5. Carr P., Stefani V., (2010), *A model to Estimate the Failure Rates of Offshore Pipelines*, 8th International Pipeline Conference, Calgary Alberta, Canada.
- 6. Cherian H., (2021), *Failure Analysis of a 30-in Subsea Oil Pipeline*, MDPI, Basel, Switzerland, Journal of Marine Science and Engineering, 9(12), 1448.
- 7. Dinis D., Teixeira A.P., Soares C., (2020), *Probabilistic approach for characteristic the static risk of ships using Bayesian networks*, Journal of Reliability Engineering and Systems Safety.
- 8. DNV, DNV-OS-301, (2010), Offshore Standard, Position Mooring.
- 9. DNV, DNV-RP-F111, (2010), Interference between trawl gear and pipelines.
- 10. DNV, DNV-OS-F101, (2010), Submarine Pipeline Systems.
- 11. DNV-RP-F107 (2010), Risk Assessment of Pipeline Protection.
- 12. Duan J., (2010), *Risk assessment of submarine pipelines under the impact of dropped objects*, Journal of Loss Prevention in the Process Industries.
- 13. Det Norske Veritas AS, (2009), Energy Report, Recommended Failure Rates for Pipelines.
- 14. Dzikowski R., Ślączka W., (2014), Analysis of IWRAP mk2 application for oil and gas operations in the area of the Baltic Sea in view of fishing vessel traffic, Scientific Journals of The Maritime University of Szczecin.
- 15. Fuad F., Rahman M., Said M., Mohd M., (2020), *Risk assessment of Fishing Trawl Activities to Subsea Pipelines of Sabah and Labuan Waters*, The Scientific World Journal.
- 16. Gerigk M., (2010), Kompleksowa metoda oceny bezpieczeństwa statku w stanie uszkodzonym z uwzględnieniem analizy ryzyka, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- 17. Grabski F., Jaźwiński J., (2001), *Metody Bayesowskie w niezawodności i diagnostyce*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- 18. *Guaidance on risk assessment for offshore Installations* (2006), HSE information sheet No. 3/2006.
- 19. Gucma L., Zalewski P., (2003), *Safety assessment of offshore pipelines anchor damage by means of simulation method*, Marine Technology IV Wit Press. C. Brebbia (ed.). South-ampton-Boston.

- 20. Gucma L., (2009), *Wytyczne do zarządzania ryzykiem morskim*, Wydawnictwo Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie.
- 21. Gucma S., (2001), Optymalizacja zagłębienia podmorskiego rurociągu uwzględniająca ryzyko uszkodzenia przez żeglugę i rybołówstwo, Inżynieria Ruchu Morskiego, Okrętownictwo i Żegluga, Gdańsk.
- 22. Gucma S., Gucma L., Zalewski P., (2008), *Symulacyjne metody badań w inżynierii ruchu morskiego*, Akademia Morska w Szczecinie.
- 23. Gucma, L., (2007), Modelowanie czynników ryzyka zderzenia jednostek pływających z konstrukcjami portowymi i pełnomorskimi, Akademia Morska w Szczecinie.
- 24. Hassel M., Utne I., Vinnen J.E., (2021), *An allision risk model for passing vessels and offshore oil and gas installations on the Norwegian Continental Shelf*, Journal of Risk and Reliability.
- 25. HSE, (2009), Guidelines for Pipeline Operators on Pipeline Anchor Hazards.
- 26. Kavsar Md., Youssef S., Faisal M., Kumar A., Seo J., Paik J., (2015), Assessment of dropped object risk on corroded subsea pipeline, Ocean Engineering.
- 27. Koto J., Putrawidjaja M., (2018), *Subsea Pipeline Damaged in Balikpapan Bay Caused by Anchor Load*, Journal of Subsea and Offshore Science and Engineering.
- 28. Król A., (2014), Sieci bayesowskie jako narzędzie wspomagające proces podejmowania decyzji, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej.
- 29. Liu Y., Hu H., Zhang D., (2013), Probability Analysis of Damage to Offshore Pipelines by Ship Factors, TRB.
- 30. MacDonal M., (2003), "PARLOC 2001" The update of loss of containment data for offshore pipeline", Prepared for The Health and Safety Executive, The UK Offshore Operators Association and The Institute of Petroleum, 12 June 2003.
- 31. Magda W., (2007), Nośność graniczna spoistego podłoża gruntowego pod podstawą szczudła platformy podnoszonej, Inżynieria Morska/Geotechnika.
- 32. Montewka J., Goerlandt F., Kujala P., (April 2014), On a Systematic Perspective on Risk for Formal Safety Assessment (FSA), Reliability Engineering & System Safety 1–33.
- 33. Montewka J., Goerlandt F., Kujala P., Lensu M., (2014), *Towards Probabilistic Models for the Prediction of a Ship Performance in Dynamic Ice*, Cold Regions Science and Technology.
- Montewka J., Hinz T., Kujala P., Matusiak J., (February 2010), *Probability Modelling of Vessel Collisions*, Reliability Engineering & System Safety 95, no. 5, 573–589.
- 35. Montewka J., Krata P., Goerlandt F., Kujala P., (2010), *A model for risk analysis of oil tankers*, Archives of Transport 22, no. 4, 423–445.
- 36. Montewka J., Krata P., Goerlandt F., Mazaheri A., Kujala P., (2011), Marine traffic risk modelling – an innovative approach and a case study, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability 225, no. 3, 307–322.