



Uniwersytet Morski w Gdyni
Wydział Nawigacyjny



mgr inż. Mateusz GIL

**Metoda wyznaczania dynamicznego granicznego obszaru manewrowego dla
statku morskiego w sytuacji kolizyjnej**

ROZPRAWA DOKTORSKA

Promotor: dr hab. inż. Jakub Montewka, prof. PG

Promotor pomocniczy: dr inż. Krzysztof Wróbel

GDYNIA, 2023



Gdynia Maritime University
Faculty of Navigation



Mateusz GIL, MSc. Eng.

**A method of determining dynamic critical maneuvering area for a ship in an
encounter situation**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor: Jakub Montewka, DSc. Eng.

Advisor: Krzysztof Wróbel, PhD. Eng.

GDYNIA, 2023

PODZIĘKOWANIE

Za pomoc w powstaniu niniejszej dysertacji pragnę szczególnie podziękować:

- Promotorowi *dr. hab. inż. Jakubowi Montewce, prof. PG* oraz promotorowi pomocniczemu *dr. inż. Krzysztofowi Wróblowi* za okazane wsparcie, ukierunkowanie, a także stworzenie twórczej i koleżeńskiej atmosfery pracy oraz warunków do rozwoju naukowego.
- *Dr. hab. Przemysławowi Kracie, prof. PG* za dyspozycyjność, życzliwość oraz merytoryczne dyskusje na temat proponowanych rozwiązań.
- *Prof. Jerzemu Matusiakowi* oraz *dr. inż. Tomaszowi Hinzowi* za możliwość wykorzystania modelu *LaiDyn* oraz przygotowanie plików wejściowych.
- Koledze *Pawłowi Koziolowi* za nieocenioną pomoc przy rozwiązywaniu problemów programistycznych podczas tworzenia oprogramowania symulacyjnego.

POTWIERDZENIE

Niniejszym chciałbym potwierdzić, że:

- Część prac koncepcyjnych przedstawionych w Rozdziale 3.1. rozprawy została zrealizowana w ramach projektu CADMUSS (*Collision Avoidance Domain-Method Used by Ships and aShore*) finansowanego przez *Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR)* w ramach programu ERA-NET Cofund MarTERA Call 2019.
- Badania symulacyjne przedstawione w Rozdziale 4 rozprawy zostały zrealizowane z wykorzystaniem *Komputerów Dużej Mocy (KDM) Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej (CI TASK)* w ramach przyznanego grantu obliczeniowego.

SPIS TREŚCI

Wykaz skrótów i oznaczeń.....	6
1. Wstęp.....	9
2. Metody i modele unikania zderzeń statków	14
2.1. Podstawy prawne	14
2.2. Rozwój systemów i wskaźników antykolizyjnych	16
2.3. Koncepcja obszaru zabronionego	18
2.4. Koncepcja domeny statku	21
2.5. Koncepcja obszaru granicznego	23
3. Metoda wyznaczania dynamicznego granicznego obszaru manewrowego statku.....	25
3.1. Oprogramowanie symulacyjne	27
3.1.1. Początkowe układy obiektów	29
3.1.2. Wskaźnik MDTC	31
3.1.3. Symulacyjne wyznaczanie MDTC	32
3.1.4. Wyznaczanie wartości parametru BCR.....	36
3.1.5. Modelowanie obwiedni opisującej kadłuby statków	38
3.2. Konstruowanie i prezentacja CADCA.....	40
3.2.1. Określenie warunków brzegowych i parametrów CADCA.....	40
3.2.2. Przygotowanie obwiedni obszarów składowych CADCA.....	41
3.2.3. Wyznaczanie końcowego obszaru CADCA	42
3.3. Przygotowanie trajektorii statku na fali nieregularnej.....	45
3.3.1. Wyznaczanie minimalnej liczebności trajektorii wejściowych.....	46
3.3.2. Wyznaczanie trajektorii reprezentatywnej	50
3.4. Model ruchu statku <i>LaiDyn</i> – opis działania i walidacja.....	52
3.4.1. Ogólna zasada działania modelu	52
3.4.2. <i>LaiDyn</i> - walidacja i zastosowanie modelu.....	55
4. Badania symulacyjne – scenariusze, wyniki, analiza.....	57
4.1. Zakres badań symulacyjnych.....	57
4.1.1. Charakterystyka wykorzystanych obiektów.....	58
4.1.2. Scenariusze symulacyjne.....	61
4.2. Wyniki i analiza badań symulacyjnych	65
4.2.1. Analiza wpływu sytuacji spotkaniowej na CADCA	65
4.2.2. Analiza wpływu manewru wymijającego na CADCA – wychylenie steru	69

4.2.3. Analiza wpływu manewru wymijającego na CADCA – prędkości statków.....	72
4.2.4. Analiza wpływu manewru wymijającego na CADCA – zmiana kursu	75
4.2.5. Analiza wpływu zakłóceń środowiskowych na CADCA	79
4.3. Porównanie CADCA z domeną statku	83
5. Dyskusja	87
5.1. Zidentyfikowane ograniczenia CADCA.....	87
5.2. Przyszłe prace i kierunki rozwoju.....	89
5.3. Perspektywiczne zastosowania CADCA	91
5.3.1. Zastosowania pokładowe	92
5.3.2. Zastosowania brzegowe	94
6. Podsumowanie i wnioski.....	96
Spis rysunków	99
Spis tabel	103
Bibliografia.....	104

WYKAZ SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

AIS	System automatycznej identyfikacji (ang. <i>Automatic Identification System</i>)
ARPA	Urządzenie do automatycznego prowadzenia nakresów radarowych (ang. <i>Automatic Radar Plotting Aid</i>)
BCR	Odległość przejścia przed dziobem (ang. <i>Bow Crossing Range</i>)
CADCA	Dynamiczny graniczny obszar manewrowy statku (ang. <i>Collision Avoidance Dynamic Critical Area</i>)
CAS	System ostrzegania o zderzeniu (ang. <i>Collision Alert System</i>)
COLREG	Międzynarodowe Przepisy o Zapobieganiu Zderzeniom na Morzu (ang. <i>International Regulations for Preventing Collisions at Sea</i>)
CD&R	Wykrywanie i rozwiązywanie konfliktów (ang. <i>Conflict Detection and Resolution</i>)
CI TASK	Centrum Informatyczne Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej
CPA	Odległość największego zbliżenia (ang. <i>Closest Point of Approach</i>)
DCPA	Odległość największego zbliżenia (ang. <i>Distance at the Closest Point of Approach</i>)
D-RoPax	Model promu pasażersko-samochodowego firmy NAPA wybranego do badań symulacyjnych
DoA	Stopień autonomiczności statku morskiego (ang. <i>Degree of Autonomy</i>)
DSS	Systemy wspomaganie decyzji (ang. <i>Decision Support Systems</i>)
ECDIS	System Obrazowania Elektronicznych Map i Informacji Nawigacyjnych (ang. <i>Electronic Chart Display and Information System</i>)
EMSA	Europejska Agencja Bezpieczeństwa Morskiego (ang. <i>European Maritime Safety Agency</i>)
FSA	Model wycieczkowca <i>Floodstand-A</i> wybranego do badań symulacyjnych
H_s	Wysokość fali znacznej (ang. <i>significant wave height</i>)

IMO	Międzynarodowa Organizacja Morska (ang. <i>International Maritime Organization</i>)
ITTC	Międzynarodowa Konferencja Basenów Holowniczych (ang. <i>International Towing Tank Conference</i>)
KDM	Komputery Dużej Mocy
KR	Kurs rzeczywisty (ang. <i>true course</i>)
LB	Lewa burta
LOA	Długość całkowita (ang. <i>Length overall</i>)
MASS	Morskie autonomiczne jednostki nawodne (ang. <i>Maritime Autonomous Surface Ships</i>)
MDTC	Najmniejsza odległość do zderzenia (ang. <i>Minimum Distance to Collision</i>)
MSC	Komitet Bezpieczeństwa Morskiego IMO (ang. <i>Maritime Safety Committee</i>)
NOAA	Narodowa Administracja Oceanu i Atmosfery (ang. <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>)
OOW	Oficer wachtowy (ang. <i>Officer of the Watch</i>)
OS	Statek własny (ang. <i>own ship</i>)
OZT	Strefa OZT (ang. <i>Obstacle Zone by Target</i>)
PAD	Przewidywany obszar zagrożenia (ang. <i>Predicted Area of Danger</i>)
PB	Prawa burta
PIANC	Światowe Stowarzyszenie Infrastruktury Transportu Wodnego (ang. <i>World Association for Waterborne Transport Infrastructure</i>)
PMM	Oscylator ruchu płaskiego (ang. <i>Planar Motion Mechanism</i>)
PPC	Miejsce możliwego zderzenia (ang. <i>Predicted Point of Collision; Point of Possible Collision</i>)
PCA	Planowana zmiana kursu (ang. <i>Planned Course Alteration</i>)
RCC	Zdalne centrum sterowania (ang. <i>Remote Control Center</i>)

Ro-Pax	Statek do przewozu pasażerów oraz ładunków tocznych (ang. <i>Roll-on/roll-off passenger ship</i>)
S12k	Model statku wiertniczego SAIPEM 12000 wybrany do badań symulacyjnych
SOD	Sektor niebezpieczeństwa (ang. <i>Sector of Danger</i>)
SOLAS	Międzynarodowa konwencja o bezpieczeństwie życia na morzu (ang. <i>International Convention for the Safety of Life at Sea</i>)
TCAS	System zapobiegania zderzeniom statków powietrznych (ang. <i>Traffic Collision Avoidance System</i>)
TT	Statek obcy, obiekt - przeszkoda (ang. <i>tracked target</i>)
VO	Przeszkoda w przestrzeni wektora prędkości (ang. <i>Velocity Obstacle</i>)
VTS	Służba kontroli ruchu (ang. <i>Vessel Traffic Service</i>)
Z-636	Model samopodnośnej platformy wiertniczej Z-636 firmy Zentech wybrany do badań symulacyjnych
$\angle K$	Kąt kursowy (ang. <i>relative bearing</i>)
ΔKR	Różnica pomiędzy kursem statku własnego i obcego
Δt	Krok czasowy trajektorii ruchu statku
μ	Względny kąt natarcia fali na kadłub (ang. <i>heading angle / angle of wave attack</i>)

1. WSTĘP

W ostatnich latach transport morski przechodzi prawdziwą rewolucję technologiczną. Wprowadzanie przez *Międzynarodową Organizację Morską* IMO (ang. *International Maritime Organization*) strategii *e-Navigation* (IMO, 2008), spowodowało zmianę podejścia przedstawicieli przemysłu, środowiska akademickiego, a także marynarzy do zapewnienia bezpieczeństwa procesu nawigacji. Zwiększenie poziomu bezpieczeństwa na morzu uzyskano poprzez postępującą cyfryzację, wymianę informacji nawigacyjnych, integrację danych pochodzących z różnych systemów oraz wprowadzanie do transportu morskiego nowych technologii (Weinrit, 2013, 2016).

Wdrażanie kolejnych rozwiązań miało na celu poprawę bezpieczeństwa morskiego, głównie poprzez redukcję występowania błędu ludzkiego, uchodzącego za główne źródło wypadków morskich (Celik & Cebi, 2009; Islam i in., 2017; Wróbel, 2021). Jedną z wykorzystywanych w tym celu metod jest przekształcanie i integracja danych nawigacyjnych, a następnie ich użycie w procesie decyzyjnym (Perera & Guedes Soares, 2015). Realizacja tego zadania następuje zazwyczaj w systemach wspomagania decyzji DSS (ang. *Decision Support Systems*). Są to interaktywne, pomocnicze narzędzia pozwalające odciążyc operatora (m.in. oficera wachtowego, ang. *Officer of the Watch* - OOW) poprzez automatyzację procesu decyzyjnego (Bolman i in., 2018; Pietrzykowski & Uriasz, 2010). Poza nawigacyjnymi DSS, używanymi głównie w celu zapewnienia bezpiecznego przejścia statku (unikania zderzeń), spotykane są również inne rodzaje systemów wspierających pracę oficera wachtowego. Mogą wspomóc one proces planowania (również pogodowego) podróży oraz optymalizację jej trasy, kontrolować i przeciwdziałać nadmiernym obciążeniom kadłuba, sugerować realizację konkretnego manewru, zarządzać ewakuacją pasażerów, itd. (Gil, Wróbel, i in., 2020).

Postęp technologiczny w zakresie zwiększania bezpieczeństwa transportu morskiego to także zdecydowany zwrot przemysłu i decydentów w kierunku wprowadzania morskich statków autonomicznych MASS (ang. *Maritime Autonomous Surface Ships*). Przyjmuje się, że jednostki te powinny zwiększyć poziom bezpieczeństwa na morzu lub być co najmniej tak samo bezpieczne jak statki eksploatowane obecnie (Fan i in., 2020; Thieme i in., 2018). Na 99. i 100. sesji *Komitetu Bezpieczeństwa Morskiego* IMO MSC (ang. *Maritime Safety Committee*) ustalono podstawowy zakres regulacji prawnych związanych z wdrażaniem MASS, w tym klasyfikację wynikającą ze stopnia ich autonomiczności DoA (ang. *Degree of Autonomy*)

(IMO, 2019). Zgodnie z zaproponowaną skalą, wyznaczono cztery stopnie autonomiczności MASS (IMO, 2019):

- DoA-1. Statek ze zautomatyzowanymi procesami oraz wspomaganie decyzji.
- DoA-2. Zdalnie sterowany statek z załogą na burcie.
- DoA-3. Zdalnie sterowany statek bez załogi na burcie.
- DoA-4. Statek w pełni autonomiczny.

W związku z przedstawioną klasyfikacją, za statek autonomiczny uznaje się zatem nie tylko jednostki w pełni zautomatyzowane, ale również zdalnie sterowane lub takie, które wyłącznie wspomagają procesy decyzyjne załogi. Co więcej, ponieważ trzeci stopień autonomiczności MASS zakłada zdalne sterowanie jednostką spoza jej pokładu (ang. *remote-controlled vessel*) (Wróbel i in., 2020), efekty wprowadzania koncepcji *e-Navigation*, w tym DSS, będą również wykorzystywane przez operatorów lądowych pracujących w zdalnych centrach sterowania RCC (ang. *Remote Control Center*). Przyjmuje się, że w przyszłości takimi operatorami powinny być osoby posiadające odpowiednie kwalifikacje (Abilio Ramos i in., 2019; Janßen i in., 2021) i doświadczenie morskie, nawet jeżeli nie będzie ono warunkiem wstępnym do pełnienia takiej funkcji (Bogusławski i in., 2022).

Pomimo powstawania udoskonalonych systemów wspomaganie decyzji nawigatora, wprowadzania statków autonomicznych, a także podejmowania międzynarodowych inicjatyw mających na celu podniesienie bezpieczeństwa żegluga, wypadki w transporcie morskim wciąż mają miejsce (Szubrycht, 2020). W ciągu ostatniej dekady z różnych przyczyn utracono na świecie łącznie 876 statków o pojemności brutto powyżej 100, a w samym 2020 roku - prawie 50 takich jednostek (Allianz Global Corporate & Specialty, 2021). Zgodnie z raportami EMSA (ang. *European Maritime Safety Agency*) zdarzenia nawigacyjne, do których zalicza się zderzenia statków, wejścia na mieliznę oraz kontakt z przeszkodą (pływającym lub stałym obiektem), są przyczyną prawie połowy (44%) wypadków z udziałem statków pasażerskich (EMSA, 2020). Biorąc pod uwagę rannych i poszkodowanych, ponad połowa przypadków (52%) była związana z wypadkami morskimi o charakterze nawigacyjnym. Pośród tych, kolizje oraz kontakt z przeszkodą stanowiły łącznie 49% takich zdarzeń (EMSA, 2020). Bazując na statystykach wypadków morskich, tendencje wskazują, że liczba zarówno tego typu zdarzeń, jak i osób poszkodowanych w ich skutek, utrzymuje się w ciągu ostatniej dekady na stosunkowo stałym poziomie. Sugeruje to, że pomimo dokładania starań służących podniesieniu poziomu bezpieczeństwa nawigacji, stale potrzebne są dodatkowe rozwiązania, w celu zminimalizowania zarówno liczby, jak i negatywnych konsekwencji wypadków.

W związku z powyższym, dalszy rozwój rozwiązań służących zapewnieniu bezpieczeństwa transportu morskiego, a w szczególności unikania zderzeń statków, jest koniecznością. Ze względu na postęp technologiczny, zaproponowane rozwiązania powinny mieć utylitarny charakter pozwalający na ich zastosowanie zarówno na konwencyjnych, jak i autonomicznych statkach morskich (Campbell i in., 2012) operujących w zmiennych warunkach środowiskowych. Jednakże, pomimo licznych rozwiązań zaproponowanych w literaturze przedmiotu w zakresie unikania zderzeń statków, większość z nich posiada pewne ograniczenia koncepcyjne bądź użytkowe (Huang i in., 2020). Przykładem takiej wady jest np. brak bezpośredniego powiązania wskaźnika bezpieczeństwa z realizacją manewru wymijającego w sytuacji nadmiernego zbliżenia, co powoduje znaczące ograniczenia w praktycznym wykorzystaniu danego rozwiązania. Równie często, w zaproponowanych modelach można spotkać pomijanie geometrii sytuacji spotkaniowej lub uwzględnianie jej w uproszczony sposób. Z tego powodu, często nie jest możliwe prawidłowe odwzorowanie dynamiki sytuacji nadmiernego zbliżenia, która powinna zostać wzięta pod uwagę podczas rzeczywistej eksploatacji statku (Polvara i in., 2018). Kolejnymi ograniczeniami istniejącymi w dotychczasowych rozwiązaniach, jest nieuwzględnianie zdolności manewrowych statku oraz wpływu warunków środowiskowych na realizację manewru antykolizyjnego (Polvara i in., 2018; Tam i in., 2009). Powoduje to, że zaproponowane dotychczas rozwiązania mogą okazać się niemożliwe do ich praktycznego wykorzystania w warunkach operacyjnych, bądź ich użycie przez nawigatora nie będzie w pełni efektywne.

Wymienione okoliczności obejmujące bieżący stan bezpieczeństwa na morzu, zmianę paradygmatu w przemyśle morskim poprzez postulowane wprowadzenie statków autonomicznych, a także ograniczenia istniejących rozwiązań w zakresie unikania zderzeń statków, stanowiły motywację badawczą i pozwoliły na zdefiniowanie celu niniejszej rozprawy: *Opracowanie metody pozwalającej na wyznaczenie dynamicznego granicznego obszaru manewrowego dla statku morskiego w sytuacji kolizyjnej, z możliwością jego zastosowania na jednostkach załogowych oraz autonomicznych.*

Aby osiągnąć cel założony w rozprawie, postawiono następującą tezę: *Uwzględnienie charakterystyki sytuacji spotkaniowej statku morskiego, opisującej wzajemne położenie oraz dynamikę ruchu obiektów w warunkach występowania zakłóceń środowiskowych, pozwala na wyznaczenie metodą symulacyjną zobiektywizowanego kryterium wykonalności manewru wymijającego, którym jest graniczny obszar manewrowy statku.*

Z założonego celu badawczego oraz postawionej tezy wynika przyjęta struktura rozprawy, na którą składają się cztery rozdziały zasadnicze oraz podsumowanie w formie wniosków.

W *Rozdziale 2* opisano obecny stan wiedzy w zakresie istniejących rozwiązań dotyczących unikania zderzeń statków – zarówno załogowych, jak i autonomicznych. Przedstawiono podział wykorzystywanych metod i scharakteryzowano najważniejsze z nich, odwołując się przy tym do literatury przedmiotu. Szczególną uwagę przywiązano do trzech rodzajów rozwiązań: koncepcji obszaru zabronionego, domeny statku, a także wywodzącej się z niej koncepcji obszaru granicznego, w której osadzone jest rozwiązanie zaproponowane w niniejszej rozprawie.

W *Rozdziale 3* przedstawiono autorską metodę wyznaczania dynamicznego granicznego obszaru manewrowego CADCA (ang. *Collision Avoidance Dynamic Critical Area*) dla statku morskiego w sytuacji kolizyjnej. W tym celu szczegółowo omówiono zasadę funkcjonowania autorskiego oprogramowania, służącego do symulacyjnego wyznaczenia CADCA, wraz ze sposobem obsługi niepewności i minimalizowania wpływu zidentyfikowanych ograniczeń. W związku z tym opisano wykorzystywany w metodzie symulacyjnej wskaźnik *najmniejszej odległości do zderzenia* MDTC (ang. *Minimum Distance to Collision*). Przedstawiono metodę początkowego pozycjonowania obiektów, symulacyjnego wyznaczenia wskaźnika MDTC dla pojedynczego scenariusza obliczeniowego, a także sposób końcowego konstruowania obwiedni CADCA na bazie obszernego zbioru wyników symulacyjnych. W rozdziale przedstawiono również metodę przygotowania danych wejściowych, na którą składa się wyznaczanie minimalnej liczby składowych trajektorii statku oraz wyznaczanie trajektorii reprezentatywnej, co pozwala na uwzględnienie stochastycznej realizacji falowania. Na koniec opisano przykładowy, zewnętrzny model ruchu statku *LaiDyn*, który został wykorzystany do dostarczenia danych wejściowych, służących symulacyjnemu wyznaczeniu CADCA.

W *Rozdziale 4* zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych wykonanych dla wybranych scenariuszy spotkaniowych statków. Przedstawiono zakres zrealizowanych prac, scharakteryzowano obiekty wykorzystane do symulowania sytuacji kolizyjnych dla dwóch statków w drodze oraz statku i różnych przeszkód stacjonarnych. Przeprowadzono analizę wpływu charakterystyki sytuacji spotkaniowej (rozmiar i kształt przeszkody, wzajemne położenie obiektów), wybranych parametrów manewru wymijającego (prędkość początkowa statku, kąt wychylenia płetwy sterowej, planowana zmiana kursu) oraz występujących

warunków środowiskowych (wysokość fali znacznej, kąt natarcia fali na kadłub) na wielkość i kształt uzyskanej obwiedni CADCA. Rozdział zamyka porównanie wyników CADCA z wybranymi koncepcjami domeny statku, funkcjonującymi w literaturze jako wskaźniki bezpieczeństwa nawigacyjnego.

W *Rozdziale 5* omówiono zidentyfikowane ograniczenia metody wyznaczania CADCA. Zaproponowano przyszłe możliwości zastosowania przedstawionej koncepcji, zarówno na statkach obsadzonych załogą, jak i przyszłych jednostkach autonomicznych. W rozdziale wskazano również dalsze kierunki prac badawczych dotyczących rozwoju i wykorzystania obszarów CADCA.

2. METODY I MODELE UNIKANIA ZDERZEŃ STATKÓW

Problematyka zapobiegania zderzeniom statków od dziesięcioleci zajmuje szerokie grono interesariuszy, wliczając w nie reprezentantów administracji i prawodawstwa, członków środowiska akademickiego, jak również przedstawicieli przemysłu i gospodarki morskiej. Wraz z rozwijaniem światowej floty oraz zwiększaniem liczby towarów przewożonych drogą morską, natężenie ruchu morskiego, a w efekcie ryzyko zderzenia statków stopniowo rosło (Crestelo Moreno i in., 2022; K. Liu i in., 2021). Powodowało to nieustanną potrzebę wyszukiwania nowych rozwiązań zarówno w zakresie legislacji, jak i nowych rozwiązań technicznych, pozwalających poprawić stan bezpieczeństwa na morzu.

2.1. Podstawy prawne

Od prawie pięciu dekad podstawę prawną w unikaniu zderzeń statków morskich stanowią przepisy załącznika konwencji COLREG (ang. *International Regulations for Preventing Collisions at Sea*) z 1972 roku wraz z późniejszymi zmianami (IMO, 2010). *Międzynarodowe Przepisy o Zapobieganiu Zderzeniom na Morzu*, w formie 41 prawideł wraz z załącznikami, określają szereg zasad postępowania służących zarówno ocenie sytuacji spotkaniowej dwóch jednostek (m.in. prowadzenia obserwacji, oceny ryzyka zderzenia) oraz realizacji manewrów unikania zderzeń (kolizji) zarówno w warunkach dobrej, jak i ograniczonej widzialności. Dodatkowo, COLREG określa m.in. wytyczne dotyczące oczekiwanego postępowania w zależności od statusu jednostki w sytuacji spotkaniowej (działanie statku mającego pierwszeństwo oraz statku mającego ustąpić z drogi), wzajemne obowiązki statków, a także zasady ich identyfikacji ze względu na noszone światła nawigacyjne, znaki dzienne oraz nadawane sygnały mgłowe.

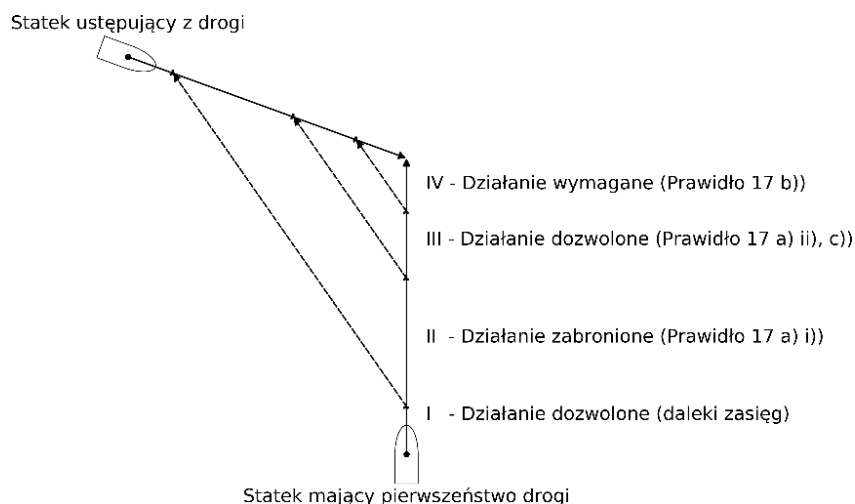
Do najważniejszych prawideł pozwalających określić potencjał sytuacji spotkaniowej dwóch statków o tym samym poziomie uprzywilejowania, a także zasady postępowania dwóch jednostek o napędzie mechanicznym, wliczając w to realizację ewentualnego manewru wymijającego dla statków wzajemnie widocznych, należą Prawidła 7, 8, 13-17. Dodatkowo, szczegółowe zasady działania w warunkach ograniczonej widzialności opisano w Prawidle 19. Prawidło 7 wprowadza zasady określania ryzyka kolizji. Jako podstawową zasadę wskazano utrzymywanie stałego namiaru kompasowego na statek obcy przy jednoczesnym zmniejszaniu się odległości pomiędzy jednostkami. Prawidło 8 określa działania mające na celu uniknięcie zderzenia. Należą do nich m.in. realizacja manewru w odpowiednim czasie, zgodnie z zasadami

dobrej praktyki morskiej oraz jeżeli to możliwe, wykonanie manewru poprzez znaczną zmianę kursu, ze względu na czytelność i efektywność tego manewru. Prawidła od 13 do 15 określają zasady postępowania w sytuacji zaistnienia ryzyka kolizji, uwzględniając przy tym wzajemne położenie katowe dwóch statków. Każda z tych sytuacji jest w praktyce określana na podstawie obserwowanych świateł nawigacyjnych statku obcego, które w zależności od ich rodzaju różnią się od siebie poziomymi sektorami widoczności. Do sytuacji opisanych w ww. prawidłach należą:

- wyprzedzanie się dwóch jednostek (Prawidło 13),
- spotkanie dwóch statków idących wprost na siebie (Prawidło 14),
- spotkanie dwóch statków leżących na kursach przecinających się (Prawidło 15).

W czasie wyprzedzania, statek realizujący manewr ma obowiązek ustąpić pierwszeństwa statkowi wyprzedzanemu, niezależnie od hierarchii jego uprzywilejowania ujętej w Prawidło 18. Nie może on również doprowadzić do zmiany sytuacji na taką, która spowoduje zmianę wzajemnych kursów na przecinające się. W przypadku dwóch statków o napędzie mechanicznym płynących wprost na siebie, statek powinien realizować manewr uniknięcia zderzenia poprzez zwrot na prawą burtę. Gdy dwie jednostki płyną kursami przecinającymi się, statek mający drugą jednostkę na prawej burcie, powinien ustąpić z drogi i unikać przechodzenia przed dziobem statkowi mającemu pierwszeństwo drogi.

Prawidło 16 określa zasady postępowania statku mającego ustąpić z drogi, wskazując przy tym na konieczność rozwiązania potencjalnej sytuacji nadmiernego zbliżenia możliwie wcześnie. W Prawidło 17 określono natomiast działanie statku mającego pierwszeństwo drogi. Procedura postępowania została podzielona na etapy przedstawione na Rysunku 1. Zakłada ona początkowe utrzymywanie kursu i prędkości; możliwość wykonania manewru przez statek mający pierwszeństwo drogi, jeżeli statek mający z niej ustąpić nie podejmuje odpowiednich działań; obowiązek realizacji manewru uniknięcia kolizji przez statek mający pierwszeństwo drogi, jeżeli uzna on, że samodzielny manewr jednostki mający z niej ustąpić nie pozwoli na uniknięcie zderzenia.



Rysunek 1. Etapy działania statku mającego pierwszeństwo drogi. Przetłumaczono na podstawie: (Gil, Montewka, i in., 2020b)

2.2. Rozwój systemów i wskaźników antykolizyjnych

Wprowadzenie konwencji COLREG unormowało i ujednoliciło kierunek rozwoju urządzeń nawigacyjnych wykorzystywanych na pokładach statków w celu unikania kolizji. Przyjęty przez przemysł morski kierunek rozwoju opierał się na umożliwieniu przedstawienia i monitorowania oficerowi wachtowemu wybranych wskaźników sytuacji spotkaniowej (w formie numerycznej i graficznej), a przez to ułatwienie jej interpretacji w myśl prawideł COLREG. Jako przykład można wskazać chociażby urządzenie do automatycznego prowadzenia nakresów radarowych ARPA (ang. *Automatic Radar Plotting Aid*). Poprzez udostępnienie na ekranie radaru wartości takich wskaźników jak odległość największego zbliżenia CPA (ang. *Closest Point of Approach*), odległość przejścia przed dziobem BCR (ang. *Bow Crossing Range*), a także wektorowej prezentacji parametrów ruchu statków, umożliwiono oficerowi wachtowemu przystępniejsze monitorowanie sytuacji spotkaniowej oraz ocenę ryzyka zderzenia. Należy nadmienić, że poza funkcjonalnościami wymaganymi Rezolucją A.823(19) (IMO, 1995), w tym obowiązkową, wektorową prezentacją danych nawigacyjnych, istnieją również inne wskaźniki, opcjonalnie dostępne w urządzeniach ARPA. Należą do nich choćby wyświetlanie przewidywanego obszaru zagrożenia PAD (ang. *Predicted Area of Danger*), sektora niebezpieczeństwa SOD (ang. *Sector of Danger*), czy miejsc możliwego zderzenia PPC (ang. *Predicted Point of Collision*), jednakże nie są one wymagane przepisami, m.in. ze względu na ich znane ograniczenia operacyjne (Bole i in., 2014; Galor, 2016).

Dalszy rozwój rozwiązań dotyczących unikania zderzeń statków był możliwy dzięki postępowi technologicznemu skutkującemu wprowadzaniem nowych systemów i urządzeń

nawigacyjnych, a następnie przepisów dotyczących ich wykorzystywania na pokładach statków. Miało to miejsce m.in. w przypadku systemu automatycznej identyfikacji statków AIS (ang. *Automatic Identification System*) oraz wymogu jego użycia międzynarodową konwencją o bezpieczeństwie życia na morzu SOLAS (ang. *International Convention for the Safety of Life at Sea*) (IMO, 2014). Pomimo, iż zgodnie z istniejącymi wytycznymi AIS nie jest dopuszczony do wykorzystania w procesie unikania zderzeń statków jako jedyne źródło informacji, to jego potencjał jako dodatkowego źródła danych w tym zakresie został dostrzeżony przez IMO (IMO, 2015). Dodatkowy wpływ na rozwój rozwiązań teoretycznych w zakresie unikania zderzeń statków miał również fakt, że depesze AIS pozwalają na przystępne pozyskanie i przetwarzanie znacznej liczby historycznych danych nawigacyjnych. Wprowadzenie do powszechnego użytku systemu AIS, umożliwiło zatem późniejsze pozyskanie, przetwarzanie i analizowanie informacji o rzeczywistym ruchu statków, nawet dla wieloletnich zbiorów danych o znacznych rozmiarach (ang. *big data*) (Gil i in., 2022; M. Zhang i in., 2021). Dzięki temu, na bazie historycznych danych AIS, możliwe było zaproponowanie nowych, bądź udoskonalenie i skalibrowanie empirycznie istniejących wskaźników, a przez to wpłynięcie na poprawę bezpieczeństwa transportu morskiego (Du, Goerlandt, & Kujala, 2020; Svanberg i in., 2019). Pomimo, iż wykorzystanie rozwiązań bazujących na analizie dużych zbiorów danych nie jest obecnie powszechnie stosowane na pokładach statków konwencyjnych, to stale przyczynia się do lepszego rozumienia problemu kolizji statków, np. poprzez wyznaczanie obszarów potencjalnie niebezpiecznych zlokalizowanych na akwenach morskich (Mazurek i in., 2022; Rong i in., 2021).

Kolejnym trendem obserwowanym obecnie w przemyśle morskim, jest rozwój narzędzi możliwych do wykorzystania nie tylko na pokładach statków handlowych, ale również na pokładach jednostek autonomicznych MASS. W światowej literaturze naukowej przedstawiono dotychczas znaczną liczbę koncepcji poświęconych zapobieganiu wypadkom morskim, a w szczególności unikaniu zderzeniom statków (Chen i in., 2019; Huang i in., 2020; Statheros i in., 2008; Tam i in., 2009). Część z zaproponowanych rozwiązań może z powodzeniem posłużyć zarówno wspomaganie załóg, jak również przyszłych operatorów RCC czy statków w pełni autonomicznych (DoA-4). W przypadku statków załogowych oraz operatorów lądowych, rozwiązania te mogą być stosowane zarówno jako oddzielnie wyświetlane wskaźniki bezpieczeństwa, jak również jako zintegrowane narzędzia zaimplementowane w oprogramowaniu istniejących obecnie urządzeń nawigacyjnych, takich jak np. ARPA. Mogą one znaleźć również zastosowanie jako część składowa DSS - systemów wspomaganie decyzji

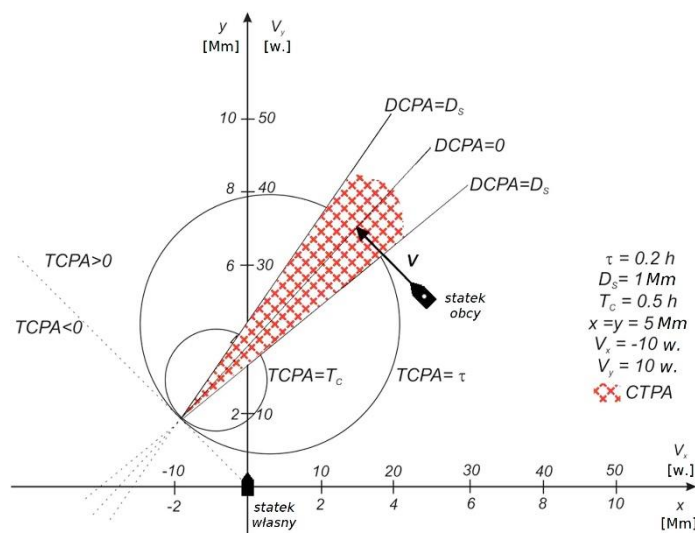
nawigatora. W przypadku statków w pełni autonomicznych, zaproponowane w literaturze rozwiązania mogą wchodzić w skład systemów odpowiedzialnych za bezpieczne prowadzenie jednostki m.in. w postaci algorytmu planowania bezkolizyjnego przejścia (ang. *path-planning algorithm*) (Lazarowska, 2017). Inną możliwością jest ich wykorzystanie jako wskaźników wyprzedzających, informujących system o konieczności podjęcia działań, mających zawczasu zapewnić bezpieczeństwo procesu nawigacji (ang. *leading safety indicators*) (Wróbel i in., 2021). Dotychczas, spośród przedstawionych w literaturze rozwiązań, dominują głównie rozwiązania geometryczne, algorytmy optymalizacyjne i bioniczne, metody wykorzystujące teorię pola potencjalnego lub wirtualny wektor prędkości, a także sztuczną inteligencję (Huang i in., 2020; X. Zhang i in., 2021).

Metody geometryczne, jak również te bazujące na wektorze prędkości ruchu statku lub teorii pola potencjalnego, można dodatkowo podzielić ze względu na ich zastosowanie, na dwie charakterystyczne koncepcje: obszaru zabronionego (ang. *no-go area*) (Ożoga & Montewka, 2018) oraz domeny statku (ang. *ship domain*) (Szlapczynski & Szlapczynska, 2017b). Pomimo mnogości algorytmów do planowania bezkolizyjnego przejścia (Vagale, Oucheikh, i in., 2021), większość z nich korzysta z jednego z wyżej wymienionych rozwiązań, w celu zapewnienia odpowiedniego marginesu bezpieczeństwa, pozwalającego na ustalenie bezpiecznej trajektorii statku (Lazarowska, 2020; Lisowski & Śmierzchalski, 1995a, 1995b; Vagale, Bye, i in., 2021).

2.3. Koncepcja obszaru zabronionego

Obszar zabroniony jest wskazywany nawigatorowi na ekranie urządzenia jako strefa, której statek powinien unikać, by zapewnić jednostce bezpieczne przejście. Istnieje wiele metod służących wyznaczaniu obszaru oraz jego późniejszego zastosowania. Pośród nich dominują teoretyczne rozwiązania analityczne, mogące zapewnić nawigatorowi wizualizację stref *no-go* na ekranie urządzeń nawigacyjnych (Ożoga & Montewka, 2018). Jednym z najbardziej popularnych przykładów takiego podejścia jest wspomniany uprzednio PAD, czyli przewidywany obszar zagrożenia. Przyjmuje on zazwyczaj formę wielokąta lub elipsy, których kształt i rozmiar są wyznaczone w oparciu o tzw. miejsca możliwego zderzenia PPC (Ravenna, 1980; Riggs, 1975; Riggs & O'Sullivan, 1980). Z biegiem czasu koncepcja była rozwijana, sugerując konieczność wprowadzenia zmian w kształcie obszaru (Lenart, 2015; Zhao-lin, 1988) oraz rozszerzając możliwości jej zastosowania w Systemie Obrazowania Elektronicznych Map i Informacji Nawigacyjnych (ang. *Electronic Chart Display and Information System – ECDIS*) (Tsou, 2016).

Kolejnym rodzajem obszaru zabronionego jest wizualizacja obszaru zagrożenia kolizyjnego CTPA (ang. *Collision Threat Parameters Area*) (Lenart, 1983). Metoda ta jest zbliżona do sektora niebezpieczeństwa SOD, jednak polega na rozmieszczeniu wektora ruchu statku własnego w sprzężonym układzie odniesienia, w ramach którego oś rzędnych i odciętych odpowiada zarówno za współrzędne płaskie jak i prędkość statku (Lenart, 2017; Szlarczyński & Szlarczyńska, 2017a). Takie rozwiązanie pozwala analitycznie określić zerową odległość największego zbliżenia CPA (oznacza również jako D_{min} lub DCPA ang. *Distance at the Closest Point of Approach*) dla danego wektora prędkości statku obcego (Szlarczyński, 2015). Na Rysunku 2 przedstawiono CTPA wraz z prostymi, dla których DCPA równa jest odległości przyjętej za bezpieczną (D_s). Powstały w ten sposób obszar, wskazuje możliwe kombinacje kursu i prędkości statku własnego prowadzące do zderzenia (Szlarczyński, 2015).

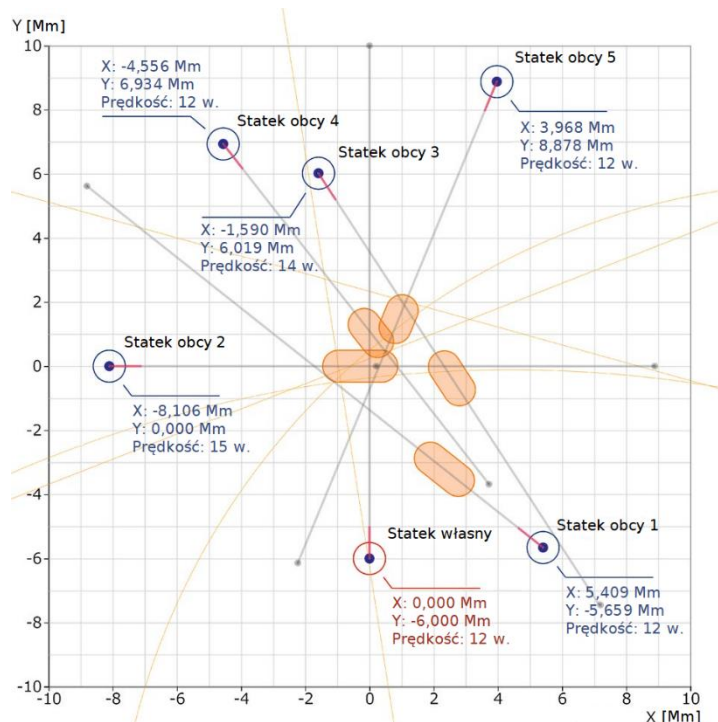


Rysunek 2. Obszar zagrożenia kolizyjnego CTPA. Przetłumaczono na podstawie: (Szlarczyński & Szlarczyńska, 2017a)

Jak każda metoda, CTPA była przez lata sukcesywnie rozwijana. W kolejnych badaniach autorzy weryfikowali wykorzystanie koncepcji w spotkaniach z wieloma obiektami oraz możliwość dodatkowego zastosowania domeny statku (Szlarczyński, 2008; Szlarczyński & Śmierzchalski, 2009; Śmierzchalski, 2005), w tym w wersji rozmytej (Szlarczyński, 2009). Następnie, wizualizacja obszaru zagrożenia kolizyjnego była udoskonalana poprzez częściowe uwzględnianie przepisów COLREG oraz warunków dobrej i złej widzialności (Szlarczyński & Szlarczyńska, 2015); żeglugi na akwenach ograniczonych oraz możliwego wejścia na mieliznę (Szlarczyński & Szlarczyńska, 2017a); a także zdolności manewrowych statku oraz powiązanych z nimi zagadnień statecznościowych (Szlarczyński & Krata, 2018).

W ostatnich latach rosnącą popularnością z zakresu wyznaczania obszarów zabronionych (w szczególności dla statków bezzałogowych), cieszą się rozwiązania zaadaptowane bezpośrednio z robotyki. Dotyczą one głównie wykorzystania teorii pola potencjalnego (Lazarowska, 2020; Liang i in., 2019; Pêtrès i in., 2012; Song i in., 2018), czy też algorytmów, pozwalających uwzględniać przeszkody w przestrzeni wektora prędkości (VO – ang. *Velocity Obstacle*) (Chen i in., 2018; Huang i in., 2019; Shaobo i in., 2020). Rozwiązania metodą VO pozwalają na wyznaczenie wszystkich prędkości statku prowadzących do zderzenia z drugim obiektem (Huang i in., 2019). Następuje to poprzez rzutowanie zależności czasoprzestrzennych istniejących pomiędzy dwoma jednostkami i ich wykorzystanie w funkcji prędkości statku własnego (Chen i in., 2018; Du, Goerlandt, Valdez Banda, i in., 2020). W zrealizowanych dotychczas badaniach dowiedziono, że liniowa wersja algorytmu VO odpowiada geometrycznemu obszarowi zagrożenia kolizyjnego CTPA (Chen i in., 2019). Jednakże, opracowanie znacznej liczby modyfikacji VO (np. wersji nieliniowej, uogólnionej, itd.) pozwoliło na uwzględnienie dynamicznej zmiany prędkości statku obcego (Huang i in., 2018), wybranych przepisów COLREG (Du, Goerlandt, Valdez Banda, i in., 2020; Kuwata i in., 2014), obsługi niepewności (Yuan i in., 2021), a także ułatwiło zaproponowanie hipotetycznych rozwiązań w sytuacjach kolizyjnych z wieloma statkami (Huang i in., 2018).

Kolejnym rozwiązaniem wskazującym nawigatorowi obszar zabroniony jest strefa OZT (ang. *Obstacle Zone by Target*) wraz z jej modyfikacjami (Fukuda & Shoji, 2017; Fukuto & Imazu, 2013; Sawada i in., 2021). Wyznacza ona regiony blokowane przez jednostki obce dla każdego z alternatywnych kursów statku własnego i jest wyświetlana na przewidywanej ścieżce ruchu celu (Fukuto & Imazu, 2013). Metoda ta posiada zidentyfikowane ograniczenie związane z nagłą zmianą położenia strefy, którego jednak można uniknąć, uwzględniając informację o punktach pośrednich planu podróży statków obcych (Kayano & Kumagai, 2017). Pomimo ograniczeń operacyjnych, OZT pozwala jednak na szybką ocenę sytuacji nawigacyjnej również podczas spotkań z wieloma statkami oraz w czasie żeglugi na akwenach o znacznym natężeniu ruchu (Imazu, 2017; Kayano i in., 2015; Kumagai i in., 2012). Przykładową wizualizację stref OZT, w sytuacji spotkaniowej z wieloma statkami obcymi przedstawiono na Rysunku 3.

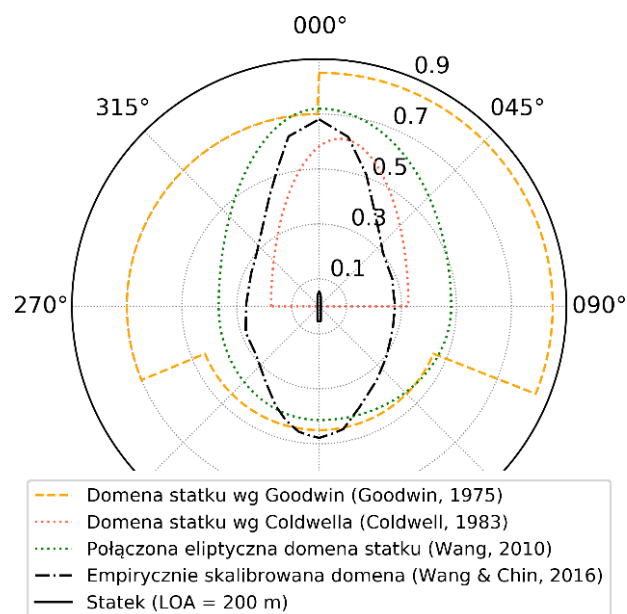


Rysunek 3. Rozlokowanie stref OZT dla przykładowego spotkania z pięcioma statkami obcymi. Przetłumaczono na podstawie: (Sawada i in., 2021)

2.4. Koncepcja domeny statku

Koncepcja domeny statku powstała w latach 70. XX wieku bazując na pomiarach radarowych i początkowo służyła określaniu przepustowości torów wodnych (Fujii & Tanaka, 1971). W kolejnych latach rozpoczęto badania skutkujące dalszym rozwojem pomysłu i jego adaptacją do innych zastosowań, w tym związanych bezpośrednio z bezpieczeństwem transportu i inżynierią morską (Goodwin, 1973). Uzyskane wyniki pozwoliły na zdefiniowanie domeny statku jako *efektywnego obszaru wokół statku, który nawigator chciałby zachować wolny od innych jednostek i obiektów stacjonarnych* (Goodwin, 1975). Rozwój koncepcji sprawił, że na przestrzeni lat zaproponowano znaczną liczbę domen statków, różniących się od siebie, np. kształtem, metodą wykorzystaną w celu ich wyznaczenia, a także uwzględnianymi parametrami operacyjnymi (Fiskin i in., 2020; Szlupczynski & Szlupczynska, 2017b). Nie tylko domeny statku potrafią znacznie różnić się od siebie, ale również metody ich późniejszego zastosowania jako kryterium bezpieczeństwa. W zależności od celu ich wykorzystania i zaproponowanego przez autorów podejścia, rozpatruje się np. naruszenie domeny wyłącznie jednego z dwóch statków, nakładanie się (lub nie) obu domen, a także wykorzystanie wskaźników weryfikujących stopień naruszenia domeny lub czas do jego nastąpienia (Szlupczynski & Szlupczynska, 2016, 2017b, 2021).

Pod względem kształtu, początkowo dominowały rozwiązania eliptyczne i koliste, zarówno regularne (Coldwell, 1983; Davis i in., 1980; Fujii & Tanaka, 1971) jak i nieregularne (Goodwin, 1975; N. Wang, 2010). Następnie, domeny zaczęły przybierać kształt wielokątny (Rawson i in., 2014; N. Wang, 2010) oraz całkowicie nieregularny (Hansen i in., 2013; Y. Wang & Chin, 2016). Każdy z kształtów jest wykorzystywany do dzisiaj i zależy w znacznej mierze od podejścia zastosowanego do wyznaczenia domeny. Pośród powszechnie używanych metod, spotykać można domeny empiryczne bazujące na wynikach statystycznej analizy ruchu morskiego uzyskane w oparciu o dane z pomiarów radarowych lub AIS (Du i in., 2021; Goodwin, 1975; Hörteborn i in., 2019). Równie popularne są rozwiązania analityczne wykorzystujące modele matematyczne (Dinh & Im, 2016; N. Wang, 2013), a także rozwiązania bazujące na doświadczeniu eksperckim (Lee i in., 2021), w tym używające logiki rozmytej (Fiskin i in., 2020; Pietrzykowski, 2008) oraz sztucznych sieci neuronowych (Pietrzykowski & Uriasz, 2009; Zhu i in., 2001). W literaturze spotkać można także domeny probabilistyczne (L. Zhang & Meng, 2019) oraz te skonstruowane w oparciu o wartość wskaźnika ryzyka zderzenia (Du i in., 2021; Im & Luong, 2019; Zhou i in., 2021). Niektóre z przykładowych koncepcji domen statków zaproponowane przez wybranych autorów przedstawiono na Rysunku 4.



Rysunek 4. Przykładowe domeny statków dla jednostki o długości 200 m. Przetłumaczono na podstawie: (Gil, 2021)

Popularność oraz mnogość proponowanych rozwiązań spowodowała, że część z nich została przyjęta krytycznie ze względu na ich niewłaściwe zastosowanie lub interpretację wskazań, szczególnie w celach związanych z oceną ryzyka zderzenia czy unikaniem kolizji (Montewka i in., 2020; Rawson & Brito, 2021).

Zgodnie z definicją domeny statku (Goodwin, 1975), wskazuje ona przede wszystkim obszar preferowany przez nawigatora i nie uwzględnia zazwyczaj strefy, która obligatoryjnie musi pozostać wolna od innych statków i obiektów. Niemniej jednak, w literaturze można spotkać także propozycje rozwiązań złożonych z dwóch części tzw. domeny deklarowanej (ang. *declarative domain*) i efektywnej (ang. *effective domain*) (Pietrzykowski & Wielgosz, 2021), lub inaczej obwiedni pożądanej (ang. *desired boundary*) oraz zabronionej (ang. *forbidden boundary*) (L. Zhang & Meng, 2019). Rozgraniczenie to związane jest głównie z praktycznym wykorzystywaniem obu części domeny i jest osadzone w koncepcji wykrycia (ang. *conflict detection*) oraz rozwiązania (ang. *conflict resolution*) konfliktu, jako dwóch odrębnych problemów, spotykanych w procesie unikania kolizji (Huang i in., 2020):

1. Problem wykrycia konfliktu weryfikuje, czy statek znajduje się w niebezpieczeństwie oraz kiedy należy rozpocząć działania mające na celu jego uniknięcie (Huang & van Gelder, 2020).
2. Problem rozwiązania konfliktu odpowiada na pytanie, jakiego rodzaju działania (np. manewry wymijające) należy zrealizować, aby efektywnie uniknąć wykrytego uprzednio niebezpieczeństwa (Huang i in., 2020).

Takie podejście jest wykorzystywane także w innych gałęziach transportu, w szczególności w lotnictwie (Dudoit i in., 2022; Kuchar & Yang, 2000; Rytter & Skorupski, 2017; Skorupski, 2015), skąd często rozwiązania są adaptowane do transportu morskiego (Baldauf i in., 2011, 2015). Algorytmy lub podsystemy wykrywania i rozwiązywania konfliktów (CD&R) są tam składową systemów TCAS (ang. *Traffic Collision Avoidance System*), mających zapobiegać zderzeniom statków powietrznych (Dudoit & Skorupski, 2020; Livadas i in., 1999).

2.5. Koncepcja obszaru granicznego

Pomysłem osadzonym w koncepcji rozwiązania konfliktu i pokrewnym do domeny statku (a w szczególności jej efektywnej/zabronionej części), jest obszar graniczny statku. Różni się on od szeroko pojętej domeny statku przede wszystkim jego praktycznym zastosowaniem w sytuacji nadmiernego zbliżenia. Obszar graniczny wyznacza bowiem *minimalną przestrzeń niezbędną do wykonania bezpiecznego i efektywnego manewru uniknięcia zderzenia* (Krata i in., 2016). W związku z tym, w przeciwieństwie do domeny statku, obszar graniczny nie wskazuje akwenu, który nawigator *chce* utrzymać wolny od innych jednostek i obiektów stacjonarnych, a na taki, który nawigator *musi* utrzymać wolny od

wszelkich przeszkód (Gil, 2021). Obwiednia obszaru granicznego wyznacza zatem miejsce realizacji *manewru wymijającego*, czyli tzw. *manewru ostatniej szansy* (ang. *last-minute maneuver*) wykonywanego dla zadanych parametrów brzegowych.

Pierwsze próby takiego podejścia pojawiły się w chwili, gdy rozpoczęto uwzględnianie prędkości statków podczas sytuacji spotkaniowych. Pozwoliło to w uproszczony sposób wyznaczać odległość, w której możliwe byłoby wykonanie manewru pozwalającego na uniknięcie zderzenia, w zastosowanej domenie statku (Colley i in., 1983). Kolejnym krokiem w rozwoju koncepcji obszaru krytycznego, było uwzględnianie właściwości manewrowych statku w ramach wprowadzonego wskaźnika MDTC (ang. *Minimum Distance to Collision*), wyznaczającego *najmniejszą odległość do zderzenia* (Montewka i in., 2012). Dalsze prace nad wskaźnikiem przedstawione w kolejnych badaniach (Krata i in., 2016; Krata & Montewka, 2015; Montewka & Krata, 2014), doprowadziły do weryfikacji różnych scenariuszy spotkaniowych oraz semi-automatycznej metody wyznaczania obszaru granicznego z wykorzystaniem symulatora manewrowego (Montewka & Krata, 2014). Jednakże, pomimo prób uwzględniania kolejnych parametrów operacyjnych statku, takich jak prędkość czy wielkość kąta wychylenia steru, zaproponowane podejście nie uwzględniało wpływu istniejących niepewności oraz ograniczeń wykorzystywanej metody na uzyskane wyniki. Dotyczyło to m.in. braku ciągłości obwiedni wyznaczanego obszaru, co wynikało z nieznaczącej liczby rozpatrywanych scenariuszy symulacyjnych oraz uproszczonej metody wyznaczania końcowego obszaru granicznego. Kolejnymi etapami rozwoju koncepcji była próba jego dynamizacji, poprzez uwzględnianie większej liczby scenariuszy spotkaniowych dla dwóch statków w warunkach pomijalnych zakłóceń hydro-meteorologicznych (Gil, Montewka, i in., 2020a). Późniejsze badania prowadziły do pełnego zautomatyzowania metody wyznaczania obszaru w warunkach pomijalnych zakłóceń zewnętrznych. Ich celem było coraz dokładniejsze odwzorowywanie obwiedni obszaru, a także skuteczniejsze uwzględnianie niepewności w scenariuszach spotkaniowych, zarówno dla dwóch statków w drodze, jak i statku napotykanego przeszkody stacjonarne (Gil, 2021; Gil, Montewka, i in., 2020b). Powyższe badania były fundamentem przedstawionej w rozprawie koncepcji dynamicznego granicznego obszaru manewrowego statku - CADCA (ang. *Collision Avoidance Dynamic Critical Area*), czyli obszaru zmieniającego granice swojej obwiedni, w zależności od parametrów operacyjnych statku z uwzględnieniem zdolności manewrowych jednostki. Koncepcję CADCA wraz z jej rozwinięciem i metodą wyznaczania, przedstawiono szczegółowo w Rozdziale 3.

3. METODA WYZNACZANIA DYNAMICZNEGO GRANICZNEGO OBSZARU MANEWROWEGO STATKU

Realizacja założonego w rozprawie celu badawczego, polegała na opracowaniu metody wyznaczania dynamicznego granicznego obszaru manewrowego statku (CADCA). By odzwierciedlić fizykę zjawiska, geometrię sytuacji spotkaniowej oraz zmienność CADCA, w procesie wyznaczania obszaru niezbędne było uwzględnienie parametrów wpływających na zmianę kształtu jego obwiedni. Dlatego też, w niniejszej dysertacji rozpatrzono trzy grupy parametrów symulacyjnych, pozwalających uzyskać odpowiedź na następujące pytania pomocnicze, charakteryzujące daną sytuację nadmiernego zbliżenia na morzu:

1. Charakterystyka sytuacji spotkaniowej:

- a. Rodzaj napotykanego przeszkody,
 - i. *Czy napotkana przeszkoda jest stacjonarna czy to statek w drodze?*
 - ii. *Z jaką prędkością płynie statek obcy?*
- b. Kształt i rozmiar przeszkody,
 - i. *Jakiego kształtu jest obiekt?*
 - ii. *Jaki jest rozmiar przeszkody?*
- c. Wzajemne położenie obiektów.
 - i. *Jakim kursem płynie statek własny, a jakim napotkany obiekt?*
 - ii. *Jak zorientowana jest przeszkoda stacjonarna?*
 - iii. *Na jakim kącie kursowym i w jakiej odległości znajduje się przeszkoda?*

2. Parametry manewru wymijającego:

- a. Prędkość początkowa statku,
- b. Kąt wychylenia płetwy sterowej,
 - i. *O jaki kąt zostanie wyłożona płetwa sterowa?*
 - ii. *Na którą burtę będzie realizowany zwrot?*
- c. Planowana zmiana kursu.

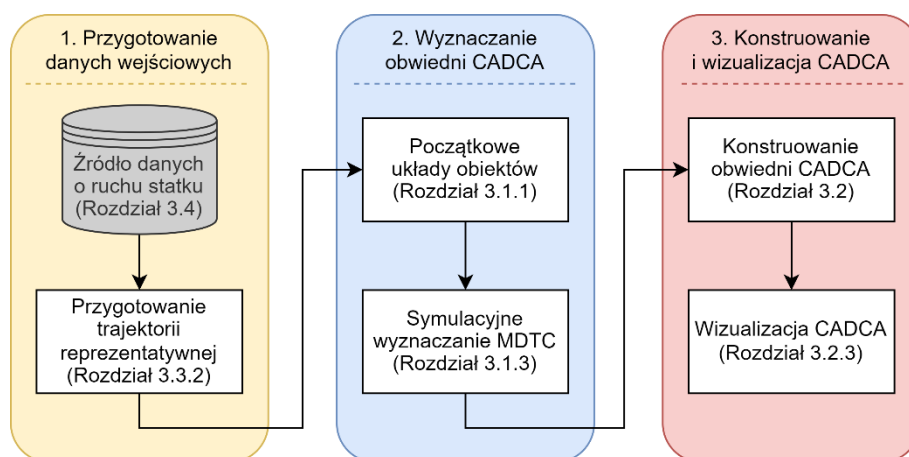
3. Występujące zakłócenia środowiskowe:

- a. Parametry falowania.
 - i. *Jaki jest stan morza (wysokość fali) na akwenu?*
 - ii. *Jaki jest kierunek fali na akwenu?*

W związku z koniecznością uwzględnienia powyższych parametrów symulacyjnych, zaproponowana metoda wyznaczania dynamicznego granicznego obszaru manewrowego statku (CADCA) opiera się na trzech etapach zasadniczych:

1. Przygotowaniu i wykorzystaniu trajektorii statków dostarczonych przez zewnętrzne źródło danych o ruchu jednostki na fali nieregularnej.
2. Symulacyjnemu wyznaczeniu zbioru wartości MDTC i przypisanych do nich kątów kursowych na przeszkodę dla zadanych parametrów brzegowych, tj. charakterystyki sytuacji spotkaniowej, parametrów manewru wymijającego oraz występujących warunków środowiskowych.
3. Skonstruowaniu i zwizualizowaniu obwiedni dynamicznego granicznego obszaru manewrowego, w oparciu o wyznaczone i pogrupowane wyniki MDTC oraz kątów kursowych.

Wysokopoziomową strukturę metody wyznaczania CADCA, obejmującą powyższe etapy przedstawiono na Rysunku 4 wraz z odniesieniami do właściwych rozdziałów niniejszej pracy. Kolorem szarym oznaczono blok „źródło danych o ruchu statku”, ponieważ nie dotyczy on bezpośrednio metody wyznaczania CADCA i stanowi jedynie zewnętrzne źródło informacji. Kolorem białym zaznaczono bloki stanowiące autorskie propozycje rozwiązania problemów badawczych.



Rysunek 5. Wysokopoziomowa procedura wyznaczania CADCA

W celu realizacji badań wykorzystano autorskie oprogramowanie symulacyjne, pozwalające na zadanie parametrów brzegowych, realizację obliczeń oraz końcowe opracowanie uzyskanych wyników. Danymi wejściowymi wykorzystywanymi w symulatorze CADCA są trajektorie statku dostarczone przez zewnętrzne źródło danych o ruchu jednostki na fali nieregularnej. W niniejszej pracy, jako przykładowe źródło danych opisujących

zachowanie statku wykorzystano model *LaiDyn* (Matusiak, 2021), pozwalający na zasymulowanie ruchu jednostki w sześciu stopniach swobody. Należy przy tym podkreślić, iż opracowana metoda nie determinuje konieczności użycia tego samego modelu ruchu statku. Metoda wyznaczania CADCA oraz oprogramowanie symulacyjne zostały zaprojektowane w taki sposób, by wyłącznie odczytywać i przetwarzać trajektorie statku wraz z uwzględnieniem zachowania jego kadłuba na fali. Dzięki temu, możliwe jest łatwe dostosowanie algorytmu i użycie do wyznaczania CADCA dowolnego, wiarygodnego źródła danych o ruchu jednostki na fali nieregularnej. Oznacza to, że możliwe jest wykorzystanie trajektorii statków pochodzących np. z innych modeli numerycznych, symulatora mostka nawigacyjnego, rzeczywistych prób morskich czy badań modelowych.

Ze względu na fakt, iż model ruchu statku nie stanowi istoty niniejszej rozprawy, w dalszych rozdziałach pracy opisano etapy wyznaczania CADCA w kolejności niechronologicznej, przedstawiając opis źródła danych wejściowych jako ostatni.

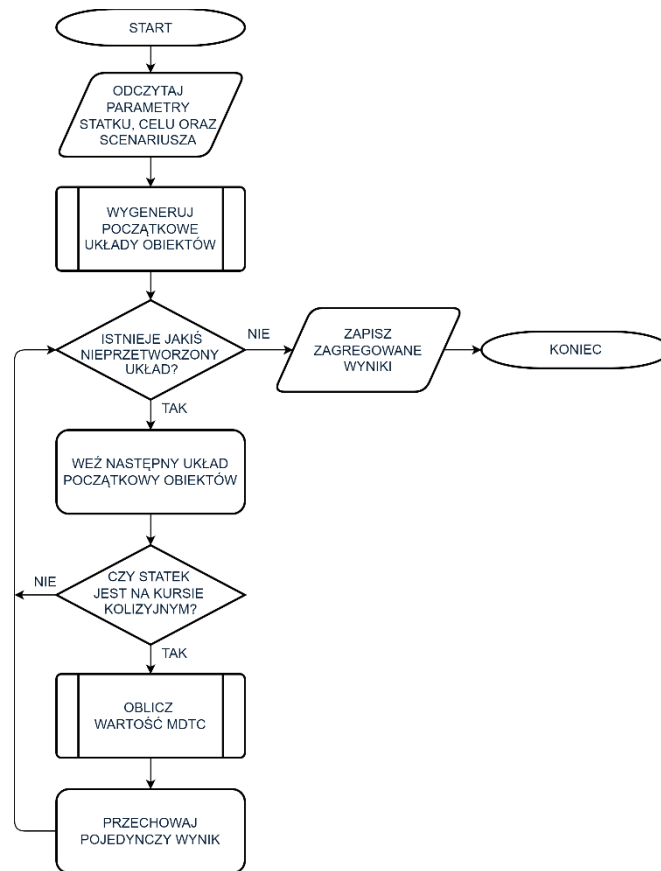
3.1. Oprogramowanie symulacyjne

W celu obliczenia CADCA (zarówno obszarów składowych, jak i utworzenia końcowej obwiedni), opracowano i wykorzystano autorskie oprogramowanie symulacyjne, pozwalające na automatyzację procesu wyznaczania CADCA. Symulator został opracowany z użyciem skryptowego języka programowania obiektowego *Python 3* (Van Rossum & Drake, 2009). Część z bloków algorytmu wykorzystuje zewnętrzne, oparte na zasadzie otwartych licencji biblioteki programistyczne, działające w ramach tego samego języka. Spośród najważniejszych z nich należy wskazać:

- *NumPy* (Harris i in., 2020) – do realizacji obliczeń numerycznych i obsługi N -wymiarowych macierzy;
- *SciPy* (Virtanen i in., 2020) – do realizacji obliczeń naukowych, w tym zagadnień związanych z optymalizacją, algebrą liniową i statystyką;
- *Shapely* (Gillies i in., 2007) – do analizy zagadnień z zakresu teorii mnogości, geometrii oraz manipulacji płaszczyznami;
- *Matplotlib* (Hunter, 2007) – do przygotowania wizualizacji danych.

Schemat blokowy przedstawiający algorytm na wysokim poziomie uogólnienia zaprezentowano na Rysunku 6. Zasada działania programu polega na symulacyjnym wyznaczeniu wartości wskaźnika MDTC (ang. *Minimum Distance to Collision*), a następnie

powtórzenie tej czynności dla obszernego zbioru parametrów brzegowych. Zapisanie zagregowanych wyników symulacji pozwala na dalszych etapach wyznaczania CADCA dokonać odpowiedniego grupowania wyników.



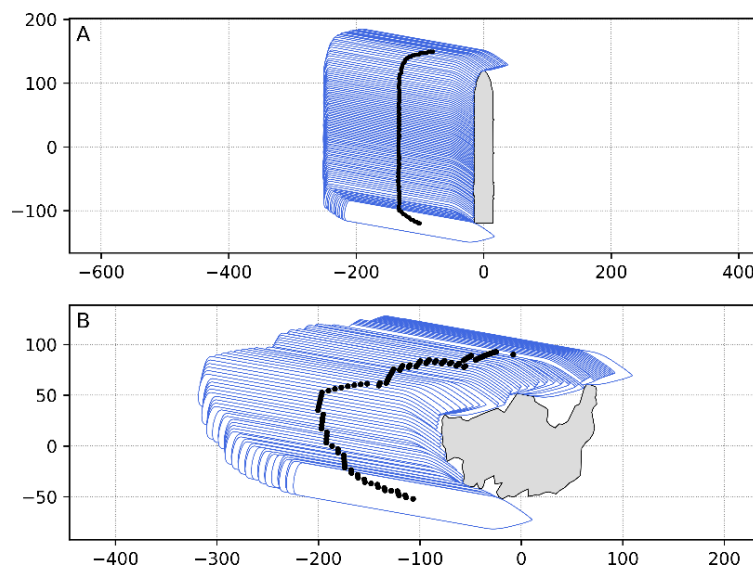
Rysunek 6. Wysokopoziomowy schemat blokowy oprogramowania symulacyjnego

Zasadnicze działanie programu rozpoczyna się od przygotowania scenariuszy obliczeniowych, zgodnie z zadanymi parametrami brzegowymi. Parametry te są ściśle powiązane z trajektoriami statku, stanowiącymi dane wejściowe do symulatora. Wynika to z faktu, że trajektorie ruchu jednostki różnią się w zależności od zadanych parametrów operacyjnych statku (prędkość postępową, kąt wychylenia steru, itd.) oraz zakłóceń hydro-meteorologicznych oddziałujących na kadłub. Do wprowadzanych parametrów początkowych należą m.in.:

- Model statku własnego i przeszkody (wymiary, obwódka kadłuba);
- Parametry operacyjne statku własnego i przeszkody (prędkości początkowe, wzniesienia środków ciężkości);
- Parametry manewru wymijającego (kąty wychylenia steru, planowana zmiana kursu statku własnego);
- Parametry środowiskowe (kąt natarcia fali na kadłub, spektrum fali).

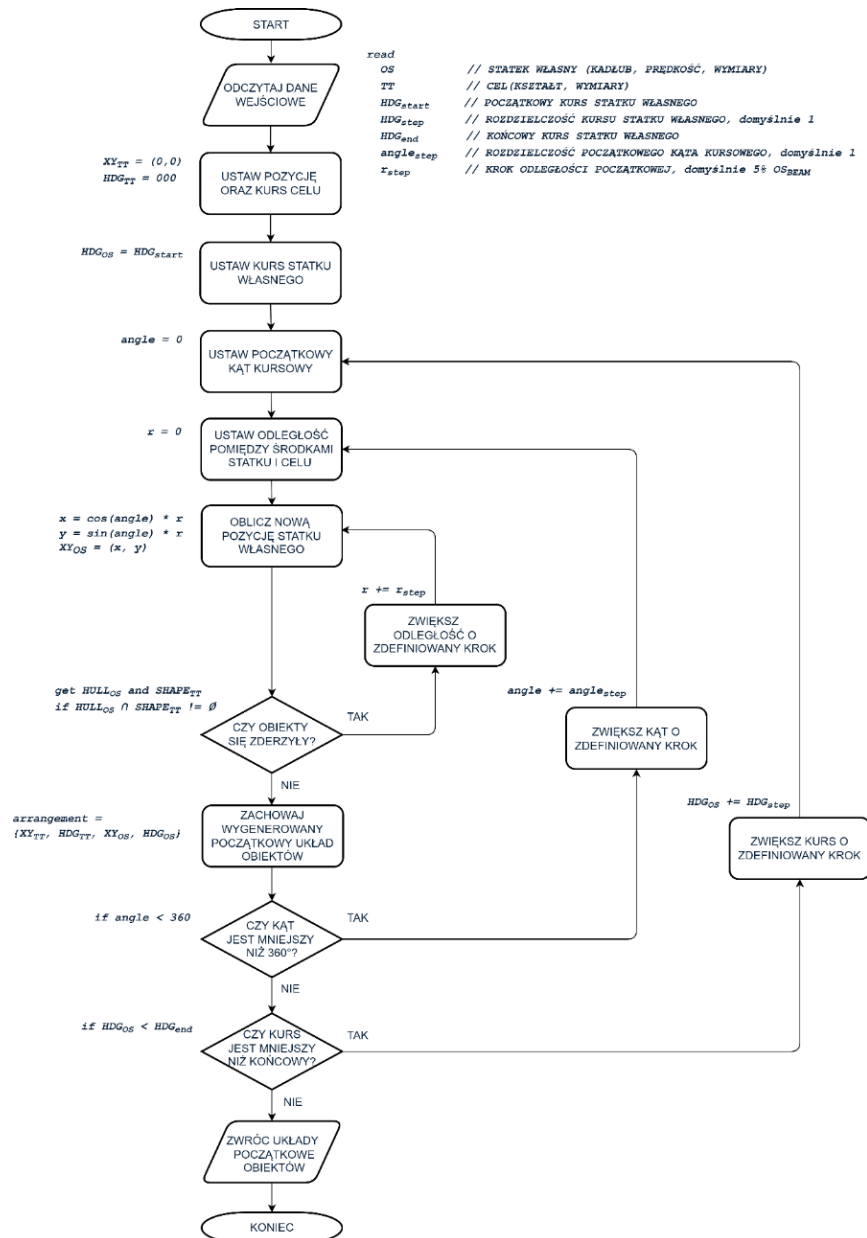
3.1.1. Początkowe układy obiektów

Po ustawieniu wszystkich parametrów początkowych, program dobiera odpowiedni zestaw trajektorii spełniający zadane kryteria symulacji i rozpoczyna proces początkowego pozycjonowania obiektów. Polega on na rozlokowaniu modelu statku własnego wokół przeszkody w taki sposób, by przemieszczenie statku w przód o najmniejszy przyjęty krok czasowy powodowało natychmiastową kolizję obiektów. Ma to na celu optymalizację obliczeń i redukcję czasu działania programu w trakcie realizacji dalszych bloków algorytmu, podczas których rzut kadłuba będzie przesuwany kolejno wstecz i naprzód w momencie wykrycia zderzenia. Początkowe ustawienie obiektów blisko siebie, skutkuje zatem brakiem konieczności nadmiarowego przemieszczania statku naprzód podczas początkowej tury symulacji. Na Rysunku 7 zaprezentowano pozycjonowanie obwiedni statku własnego wokół statku obcego (A) oraz nieregularnej przeszkody (B) dla jednego, wybranego kursu rzeczywistego.



Rysunek 7. Początkowe pozycjonowanie statku własnego oraz przeszkody (oznaczona kolorem szarym) dla wybranego kursu rzeczywistego (Montewka i in., 2022)

W celu zapewnienia dokładnego przebiegu obwiedni CADCA, wirtualne projekcje kadłuba statku własnego są rozmieszczane możliwie blisko siebie wokół przeszkody. Powoduje to zwiększenie dokładności otrzymanych wyników, gdyż przyjęta rozdzielczość kątowa zapewnia pełne pokrycie nawet najbardziej nieregularnych kształtów przeszkody. W kolejnych krokach algorytmu, statek własny jest obracany wokół własnej osi i obiektu o zadaną wartość w taki sposób, by uwzględnić kursy rzeczywiste jednostki, zgodnie z wejściowymi parametrami symulacji. Na Rysunku 8 przedstawiono schemat blokowy, demonstrujący działanie części programu odpowiedzialnej za generowanie początkowych, wzajemnych układów obiektów.



Rysunek 8. Schemat blokowy fragmentu algorytmu pozycjonujący obiekty na początku symulacji

Dla każdego, pojedynczego układu początkowego obiektów, realizowane są dalsze bloki algorytmu, w tym te, odpowiedzialne za wyliczanie wartości MDTC. Jednakże, gęstość początkowych rzutów kadłuba statku własnego, pomimo korzystnego zwiększania dokładności wyników, zwiększa jednocześnie czas obliczeń oraz liczbę istniejących kombinacji geometrycznych, niezbędnych do późniejszego uwzględnienia w procesie symulacyjnego wyznaczania MDTC.

Kolejne etapy realizacji programu polegają na zweryfikowaniu, czy istnieje jeszcze jakikolwiek nieprzetworzony początkowy układ statku i przeszkody. Jeżeli nie istnieje, oznacza to, że uwzględniono wszystkie zadane przypadki i tym samym zakończono cały cykl obliczeniowy. W takiej sytuacji, zbiorcze zestawienie wszystkich uzyskanych wyników MDTC

jest zapisywane, w celu ich późniejszego wykorzystania np. do wizualizacji lub dalszego przetwarzania danych.

Jeżeli jednak, jakkolwiek nieprzetworzony układ statku i przeszkody nadal istnieje (co może wynikać z rozpiętości kątowej początkowego pozycjonowania obiektów lub analizowanego zakresu kursów rzeczywistych) i nie został on jeszcze poddany symulacji, realizowane są kolejne etapy działania algorytmu. Należą do nich przede wszystkim bloki obliczeniowe, których zadaniem jest wyznaczenie wartości MDTC dla pojedynczej sytuacji spotkaniowej, a następnie ich realizacja w pętli dla wszystkich pozostałych, nieprzetworzonych początkowych układów statku i przeszkody. Blok decyzyjny przedstawiony na Rysunku 6, umieszczony pomiędzy etapami działania programu („czy statek jest na kursie kolizyjnym?”), jest dodatkowym rozwiązaniem optymalizacyjnym mającym na celu redukcję czasu obliczeń. Dzięki jego realizacji, statek własny pozycjonowany jest wyłącznie zgodnie z kierunkiem swojego ruchu i znajduje się jedynie z jednej strony przeszkody w taki sposób, jak ukazano to na Rysunku 7. Takie rozwiązanie pozwala na odrzucenie około połowy początkowych pozycji statku, których przetwarzanie byłoby bezcelowe i zakończone po realizacji pierwszego kroku przemieszczania kadłuba jednostki w przód.

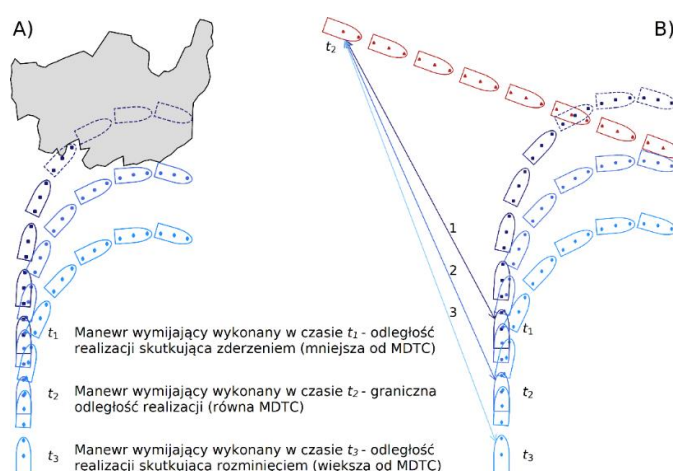
3.1.2. Wskaźnik MDTC

W celu określenia obwiedni CADCA, niezbędne jest wyznaczenie zbioru odległości pomiędzy statkiem własnym (OS – ang. *own ship*), a przeszkodą (TT – ang. *tracked target*), którym może być zarówno obiekt stacjonarny, jak i jednostka w drodze. Wskaźnikiem pozwalającym na wyznaczenie odległości realizacji manewru ostatniej szansy w sytuacji spotkaniowej jest MDTC, czyli tzw. *najmniejsza odległość do zderzenia*. Po raz pierwszy MDTC zostało użyte w pracy (Montewka i in., 2010). Następnie, koncepcja wskaźnika była sukcesywnie wykorzystywana i rozwijana w badaniach związanych z oceną ryzyka transportu morskiego (Montewka, Krata, i in., 2011; W. Zhang i in., 2019), szacowaniem prawdopodobieństwa wystąpienia kolizji (Montewka, Goerlandt, & Kujala, 2011; Montewka, Goerlandt, Lammi, i in., 2011; Montewka i in., 2012; W. Zhang i in., 2016), a także konstruowaniem obszaru granicznego statku (Gil, 2021; Gil, Montewka, i in., 2020b; Montewka & Krata, 2014).

Jak przedstawiono na Rysunku 9, określenie MDTC dla wzajemnego położenia statku i przeszkody pozwala na geometryczne, deterministyczne określenie ostatniego momentu ($t_{MDTC=0}$), w którym możliwe jest zrealizowanie skutecznego manewru wymijającego. Dla

każdego początkowego układu statek własny – obiekt obcy (pozycje, wzajemne kursy) oraz zadanych parametrów manewru wymijającego, istnieje wyłącznie jedno MDTC, które wyznacza się obliczając odległość pomiędzy jednostkami w czasie $t_{MDTC}=0$.

W procesie wyznaczania CADCA, do symulacyjnego określania wartości wskaźnika MDTC wykorzystywane są trajektorie ruchu statku dostarczone z zewnętrznego źródła danych (Rozdział 3.4). Trajektorie statku powinny być przygotowane dla zadanego zestawu parametrów wejściowych, wliczając w to parametry manewru wymijającego (prędkość początkowa statku, kąt wychylenia steru) i panujące na akwenie warunki hydro-meteorologiczne.



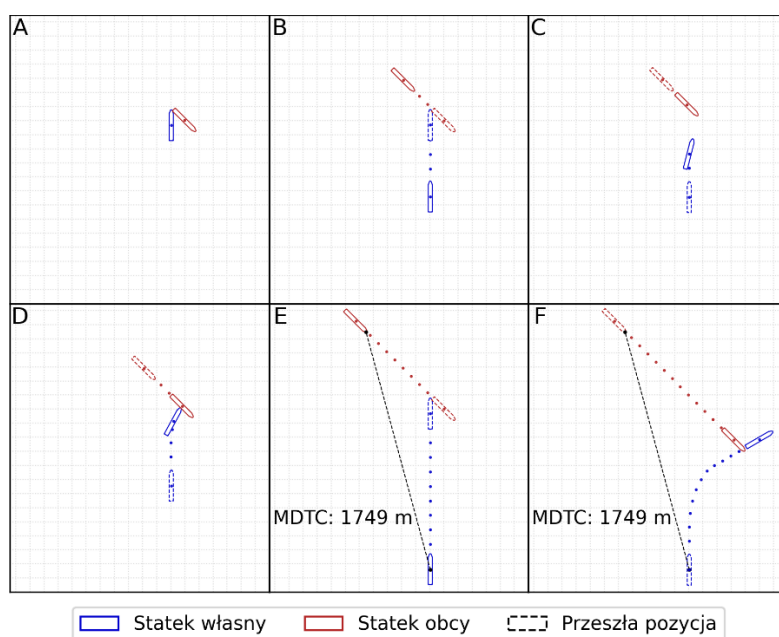
Rysunek 9. Graficzna reprezentacja wskaźnika MDTC podczas spotkania statku z przeszkodą stacjonarną (A) oraz inną jednostką w drodze (B)

3.1.3. Symulacyjne wyznaczanie MDTC

Blok odpowiadający za obliczanie wartości MDTC przedstawiony na Rysunku 6, stanowi istotę wyznaczania obwiedni CADCA. Cały proces można podzielić na etapy przedstawione na Rysunku 10 dla dwóch poruszających się obiektów - manewrującego statku własnego oraz biernego statku obcego utrzymującego swój kurs i prędkość. Takie podejście ma na celu zasymulowanie niekorzystnej nawigacyjnie sytuacji, w której konieczne jest zrealizowanie manewru własnego podyktowane zastosowaniem Prawidła 17 COLREG. Na potrzeby tej pracy, metoda zakłada realizację pojedynczego manewru wymijającego, pozwalającego na uniknięcie zderzenia i całkowite rozwiązanie sytuacji spotkaniowej (ang. *single action*).

Właściwa symulacja rozpoczyna się od wybrania pojedynczego układu początkowego statków, który nie został jeszcze przetworzony w ramach działania programu (Rys. 10-A). Kolejne kroki obejmują realizowaną w pętli sekwencję przemieszczania projekcji kadłubów

statków - wstecz (Rys. 10-B), naprzód (zgodnie z odpowiednią dla scenariusza trajektorią ruchu statku) (Rys. 10-C) oraz weryfikację, czy realizacja manewru w wyznaczonej odległości doprowadzi do zderzenia czy uniknięcia kolizji (Rys. 10-D). Następnie, etapy B-D są realizowane tak długo, aż zostanie wyznaczona pierwsza wzajemna pozycja obiektów, dla której sekwencja ruchu naprzód nie zakończy się zderzeniem (Rys. 10-E). Po symulacyjnym wyznaczeniu pozycji rozpoczęcia manewru wymijającego, obliczana jest odległość MDTC oraz kąt kursowy na przeszkodę (Rys. 10-F). Tak wyznaczony dystans jest najmniejszym pomiędzy jednostkami, który pozwala na uniknięcie zderzenia przy zadanych warunkach brzegowych danego scenariusza symulacyjnego. Po zakończeniu działania symulatora dla pojedynczego układu początkowego obiektów, cząstkowe wyniki są zapisywane, w celu ich późniejszego wykorzystania przy konstruowaniu obwiedni CADCA. Program rozpoczyna natomiast działanie od nowa, wyznaczając pojedynczą wartość MDTC dla kolejnego początkowego układu obiektów, do czasu przetworzenia wszystkich istniejących kombinacji.



Rysunek 10. Kolejne etapy symulacyjnego wyznaczania MDTC na przykładzie dwóch statków w drodze

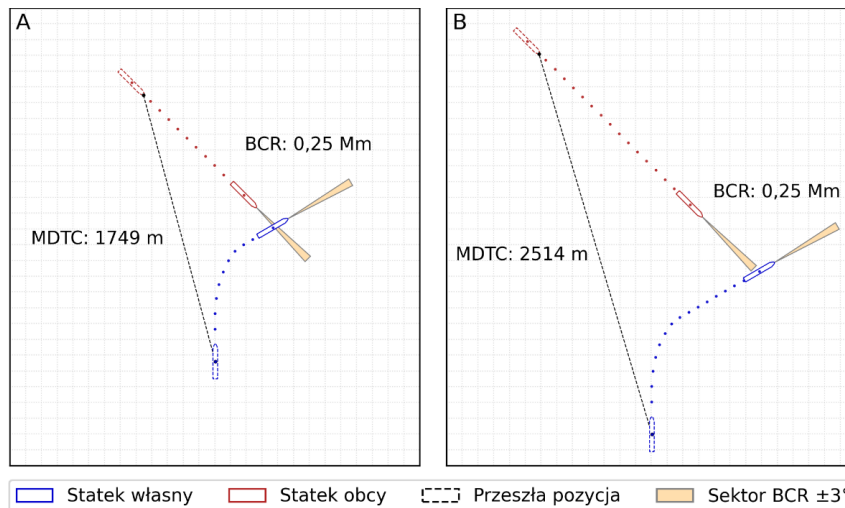
W celu skrócenia czasu symulacji, najdłuższa realizowana w pętli sekwencja polegająca na przemieszczaniu projekcji kadłubów jednostek, wykonywana jest iteracyjnie wykorzystując metodę bisekcji. Dzięki temu, zamiast czasochłonnego, liniowego przemieszczania jednostek o stały krok czasowy, statki cofane są o znaczną odległość i kolejno przesuwane skokowo dzieląc zadany odcinek na dwie równe części. Sekwencja realizowana jest do czasu, aż wyznaczona zostanie pierwsza pozycja, w której możliwe jest przemieszczenie kadłubów naprzód bez spowodowania zderzenia jednostek. Pozwala to na znalezienie pozycji, w której wyznaczana jest odległość MDTC po zrealizowaniu przeciętnie 14 przesunięć obwiedni

kadłubów w średnim czasie 0,6 s (dla próbki 5 200 symulacji). Dla porównania, wykorzystanie liniowej strategii przemieszczania projekcji kadłubów dla tej samej, reprezentatywnej próbki symulacji wymagało średnio 1 263 cofnięć co zrealizowano w czasie 74,1 s. Oznacza to zmniejszenie średniej liczby wymaganych przemieszczeń wirtualnych kadłubów statków o 98,9%, skutkując redukcją czasu niezbędnego do wyznaczenia MDTC o 99,2%.

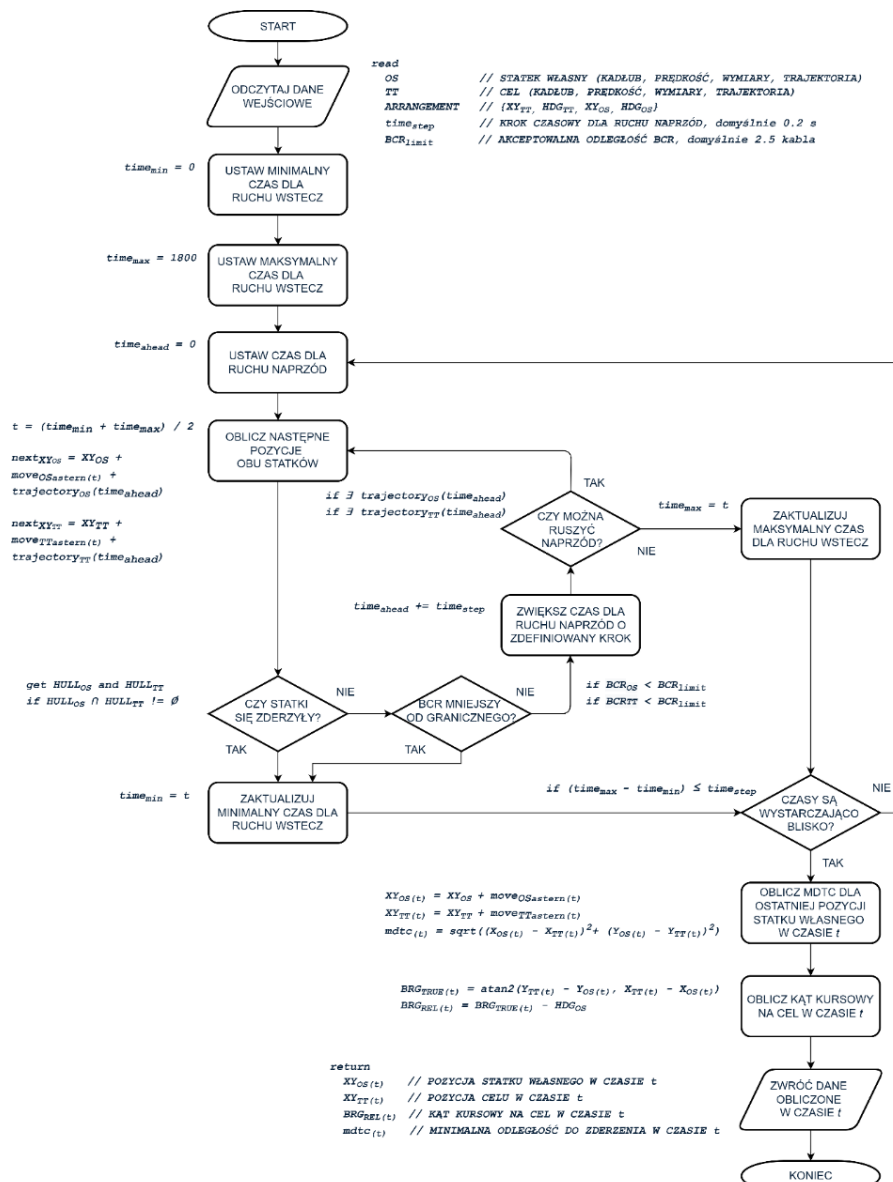
W chwili osiągnięcia pozycji, w której możliwe jest obliczenie wartości MDTC (Rysunek 10-F), wyznaczana jest odległość pomiędzy środkiem geometrycznym statku własnego, a najbliższym punktem na obwodni statku obcego. Wykorzystuje się w tym celu układ współrzędnych płaskich, a wartość MDTC obliczana jest z uwzględnieniem kąтового położenia obiektów. Dzięki temu, MDTC jest najmniejszą odległością do zderzenia, a zasada jej wyznaczania przypomina jednocześnie sposób określania odległości za pomocą statkowych urządzeń radarowych, tj. mierzona jest odległość od anteny (w dysertacji przyjęto środek geometryczny kadłuba) do skraju przeszkody.

Jak zaprezentowano na Rysunku 10-F, dla niektórych scenariuszy spotkaniowych możliwe jest wyznaczenie MDTC w sytuacji, w której statek własny przecina bezpośrednio linię dziobu statku obcego. Wynika to z faktu, że symulacyjna metoda wyznaczania obwodni obszaru krytycznego, opiera się wyłącznie na geometrii i fizyce ruchu obiektów. Oznacza to, że możliwe jest wyznaczenie odległości MDTC nawet w sytuacjach, których w praktyce nawigacyjnej należy unikać (np. przejście bezpośrednio przed dziobem innego statku). Z tego względu, konieczne było dostosowanie metody symulacyjnej w taki sposób, by możliwe było wyznaczanie CADCA z zachowaniem jej głównych założeń (wyznaczanie *minimalnej* odległości do zderzenia, uwzględnianie zdolności manewrowych statku, bezpośredni związek z realizacją manewru ostatniej szansy, itd.), przy jednoczesnym zapobieganiu przejścia któregokolwiek ze statków bezpośrednio przed dziobem drugiej jednostki.

Dlatego też, na ostatnim etapie wyznaczania MDTC, wprowadzono dodatkową weryfikację, pozwalającą na wykrycie, czy w zadanym sektorze przed dziobem statku własnego lub obcego znajduje się druga jednostka (Rysunek 11). Jeżeli którykolwiek z obiektów zostanie wykryty w odległości przejścia przed dziobem (BCR) mniejszej niż akceptowalna (Rysunek 11-A), symulacja jest kontynuowana tak, jak ma to miejsce w przypadku wykrycia zderzenia obiektów. Oznacza to, że w takim przypadku projekcje kadłubów są dalej przemieszczane w pętli, tj. realizowane są etapy B-D przedstawione na Rysunku 10. Schemat blokowy całego fragmentu programu odpowiedzialnego za symulacyjne wyznaczanie wartości MDTC dla dwóch statków w drodze przedstawiono na Rysunku 12.



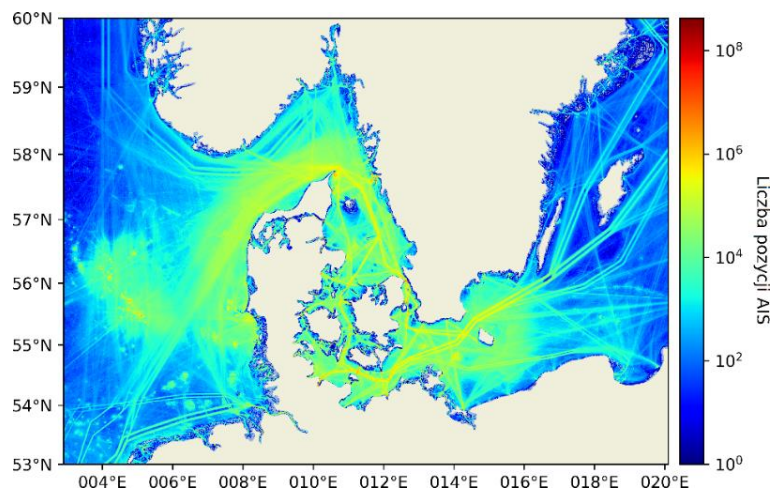
Rysunek 11. Przykładowy scenariusz symulacyjny przedstawiający wykrywanie akceptowalnego progu BCR podczas wyznaczania MDTC



Rysunek 12. Schemat blokowy fragmentu programu odpowiedzialnego za obliczenie pojedynczej wartości MDTC dla dwóch statków w drodze

3.1.4. Wyznaczanie wartości parametru BCR

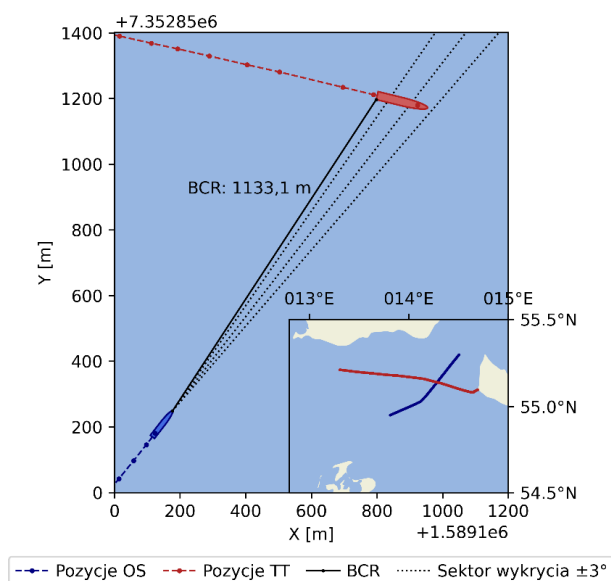
W celu dobrania odpowiedniej wartości progowej BCR, przeprowadzono analizę czasoprzestrzenną ruchu morskiego, wykorzystującą historyczne dane pochodzące z systemu automatycznej identyfikacji statków AIS (Gil i in., 2022). Jak przedstawiono na Rysunku 13, przeprowadzona analiza statystyczna dotyczyła danych zarejestrowanych w Cieśninach Duńskich oraz wodach do nich przyległych i obejmowała okres od początku 2011 do końca 2020 roku (10 lat). Tak duża próbka badawcza wymusiła zastosowanie rozwiązań związanych z przetwarzaniem i analizą zbiorów danych o znacznych rozmiarach (ang. *big data*).



Rysunek 13. Mapa gęstości ukazująca analizowane pozycje statków pochodzące z danych AIS (Gil i in., 2022)

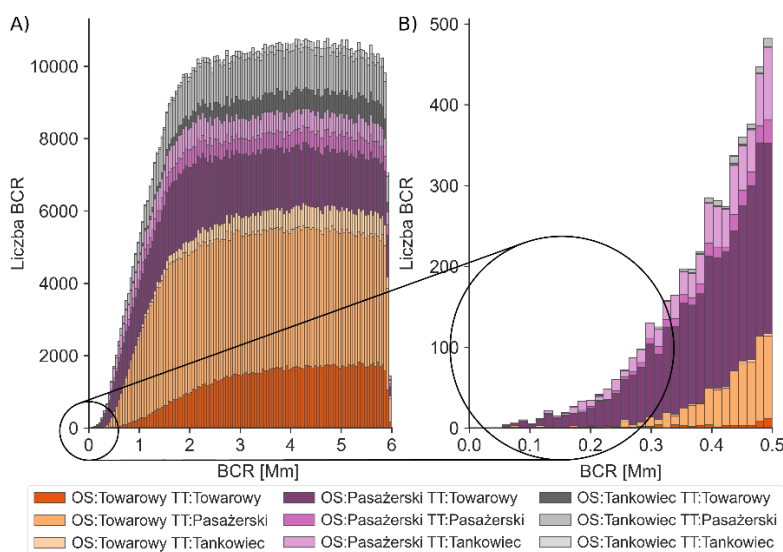
Wykorzystując analizę czasoprzestrzenną, odtworzono rzeczywiste trajektorie ruchu statków na badanym obszarze. Zachodzenie sytuacji przejścia jednostki przed dziobem wykrywano w zadanym sektorze kątowym i maksymalnej odległości sięgającej 6 Mm. W przypadku wystąpienia takiego zdarzenia obliczano wartość BCR, uwzględniając najkrótszy dystans pomiędzy dziobem statku a obwiednią kadłuba drugiej jednostki zaangażowanej w sytuację spotkaniową (Rysunek 14).

Jak zaprezentowano na Rysunku 15, analiza statystyczna wyników została przeprowadzona z podziałem na typy statków zaangażowanych w sytuację spotkaniową. Łącznie, z początkowych ponad 37 mld rekordów AIS, na ostatnim etapie przygotowania i filtracji danych wyznaczono ponad 1,1 mln BCR, które następnie dodatkowo pogrupowano w oparciu o wszystkie analizowane parametry. Bazując na rozkładach statystycznych odległości przejścia przed dziobem dla różnych typów statków i akwenów, do symulacyjnego wyznaczania MDTC wprowadzono progową odległość BCR wynoszącą 2,5 kabla, odpowiadającą percentylowi 0,1 (303 pomiary) z rozkładu wartości wyznaczonych dla statków pasażerskich operujących bezpośrednio w Cieśninach Duńskich (Gil i in., 2022).



Rysunek 14. Przykład sytuacji przejścia przed dziobem statku i wyznaczania wartości BCR. Przetłumaczono na podstawie: (Gil i in., 2022)

Należy podkreślić, że progowa wartość BCR wykorzystana na potrzeby niniejszej pracy (2,5 kabla), może być dowolnie zmieniona i dostosowana bez konieczności modyfikowania całej procedury wyznaczania CADCA. Dzięki zastosowaniu dodatkowej weryfikacji BCR w procesie symulowania MDTC, możliwe było uzyskanie obszaru granicznego, który pomimo bazowania na minimalnych odległościach realizacji manewru, uwzględnia także odległości przejścia przed dziobem odnotowywane w rzeczywistości w transporcie morskim. Weryfikacja progowej odległości BCR stanowi zatem formę uwzględniania praktyki nawigacyjnej w procesie symulacyjnego wyznaczania MDTC. Dzięki temu, CADCA skuteczniej odzwierciedla aspekt operacyjny, uwzględniając zarówno geometrię sytuacji spotkaniowej, fizykę ruchu obiektów, jak i elementy praktyki morskiej.



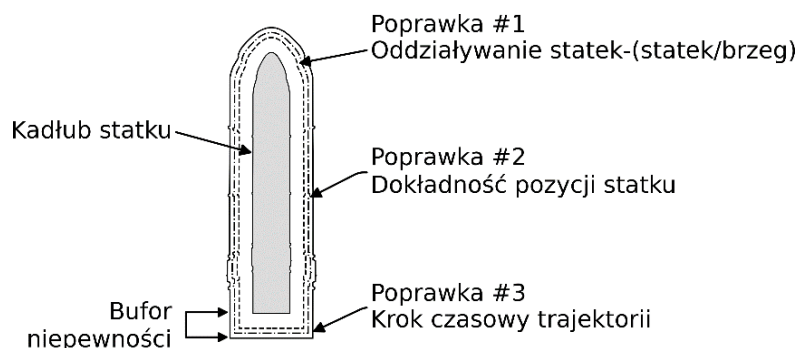
Rysunek 15. Rozkład statystyczny BCR z podziałem na typy statków zaangażowanych w spotkanie jednostek w Cieśninach Duńskich. Zmodyfikowano na podstawie: (Gil i in., 2022)

3.1.5. Modelowanie obwiedni opisującej kadłuby statków

Obrysy kadłubów jednostek używanych do symulacyjnego wyznaczania MDTC są dodatkowo powiększane o tzw. *bufor niepewności*. Pozwala to na częściowe uwzględnienie ograniczeń związanych z metodą wyznaczania CADCA, plikami wejściowymi zawierającymi trajektorie statków, jak również odwzorowania zjawisk hydrodynamicznych zachodzących w rzeczywistości pomiędzy mijającymi się statkami. Wykorzystanie *bufora niepewności* oznacza, że na każdym etapie wyznaczania CADCA, tj. od początkowego generowania układów obiektów po symulacyjne wyznaczanie wartości MDTC, zamiast rzeczywistych obrysów kształtów, wykorzystywane są ich odpowiednio powiększone odpowiedniki.

Jak przedstawiono na Rysunku 16, zaproponowany *bufor niepewności* jest sumą trzech wartości składowych, a jego wielkość różni się w zależności od scenariusza symulacyjnego i wybranego modelu statku. Do uwzględnianych w buforze niepewności składowych należą:

1. Poprawka na oddziaływanie hydrodynamiczne pomiędzy kadłubami statków lub statkiem i brzegiem (w przypadku przeszkód stacjonarnych),
2. Poprawka uwzględniająca dokładność pozycji statku,
3. Poprawka dotycząca kroku czasowego trajektorii ruchu statku.



Rysunek 16. Poprawki składowe bufora niepewności

Pierwsza składowa *bufora niepewności* ma na celu uwzględnienie zjawiska wzajemnego przyciągania się kadłubów statków lub statku do ściany kanału, w zależności od realizowanego scenariusza symulacyjnego. W rzeczywistości, zjawisko to występuje w przypadku zbyt małej odległości pomiędzy kadłubem statku, a ścianą kanału lub kadłubem innej jednostki, co powoduje asymetryczny przepływ wody, generujący powstanie sił hydrodynamicznych (PIANC, 2014). W celu uwzględnienia zjawiska, wykorzystywane są wytyczne Światowego Stowarzyszenia Infrastruktury Transportu Wodnego PIANC (ang. *World Association for Waterborne Transport Infrastructure*). Określają one wymagany prześwit poziomy dla 15 różnych typów jednostek w przypadku mijania ściany kanału (W_{BA0}),

innego statku (W_C) lub wyprzedzania jednostki (W_{ov}) (PIANC, 2014). Odległości powiązane są bezpośrednio z konstrukcją statku, charakterystyczną dla danego typu jednostki, a także z szerokością jego kadłuba (B). Z tego względu, w celu określenia pierwszej składowej *bufora niepewności*, spośród wytycznych PIANC dobierany jest typ statku odpowiadający wykorzystywanemu w symulacjach służącym wyznaczeniu CADCA. Następnie, po uwzględnieniu charakterystyki kątowej spotkania, korzystając z dostępnych wartości stosunków W_{BA0}/B , W_C/B lub W_{ov}/B (PIANC, 2014), wartość poprawki jest dostosowywana do danego scenariusza symulacyjnego oraz wymiarów i rodzaju wykorzystywanej jednostki.

Druga składowa *bufora niepewności* pozwala dodatkowo uwzględnić dokładność systemów radionawigacyjnych zgodnie ze standardami IMO dla wód przybrzeżnych i podejściach do portów (błąd nie większy niż 10 m z prawdopodobieństwem 95%) (IMO, 2011). Pomimo, że badania przeprowadzone w warunkach rzeczywistych wykazywały dokładniejsze wskazania pozycji statku w trakcie manewrów jednostki (Specht i in., 2019), w *buforze niepewności* druga składowa powiększa dodatkowo projekcję kadłuba o maksymalną, dopuszczalną standardami wartość błędu pozycji (10 m).

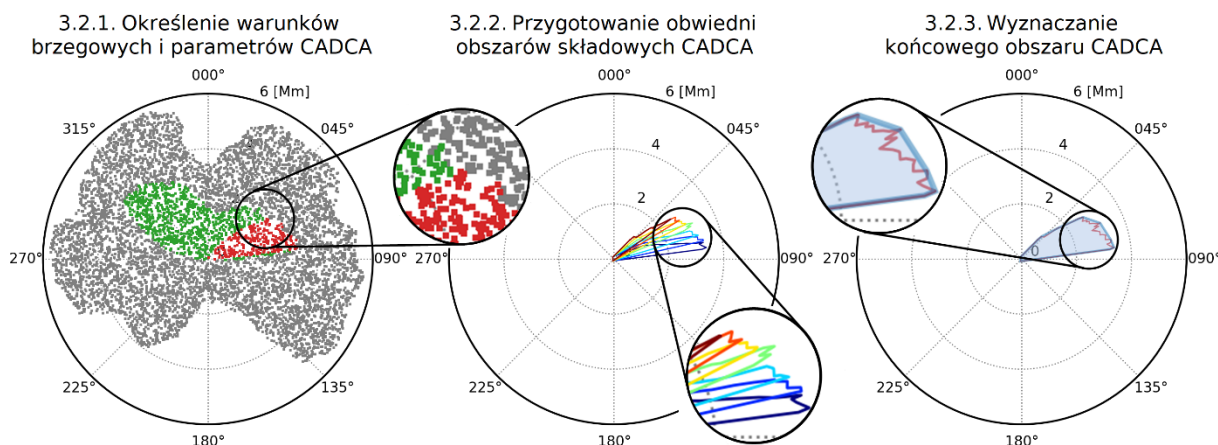
Ostatnia składowa *bufora* dotyczy kroku czasowego trajektorii statku, dostarczonych przez zewnętrzny model ruchu. Ze względu na fakt, że dane dotyczące pozycji oraz informacji o ruchu jednostki na fali są podawane w układzie dyskretnym czasowo, uwzględniono odległość, jaką statek przemierzy pomiędzy dwoma znanymi pozycjami. W tym celu, przyjmując ruch jednostajny oraz maksymalną dla danego scenariusza symulacyjnego prędkość statku, obliczana jest przebyta droga, która jest następnie uwzględniana w *buforze niepewności*. W wykorzystywanym na potrzeby pracy zewnętrznym modelu ruchu, trajektorie jednostki dostarczane są z krokiem czasowym wynoszącym $\Delta t = 0,2$ s. Zatem w przykładowym scenariuszu symulacyjnym, przyjęcie 20 w. jako początkowej prędkości statku, skutkuje powiększeniem *bufora niepewności* o dodatkowe 2,1 m.

Ze względu na fakt, że wartość *bufora* jest dostosowywana dynamicznie z uwzględnieniem geometrii sytuacji spotkaniowej, wykorzystywanego typu i wielkości statku, dokładności trajektorii wejściowych oraz rodzaju napotykannej przeszkody, określenie ujednoliconych wartości *bufora niepewności* nie jest możliwe. Jednakże, dla przykładowego scenariusza obliczeniowego, podczas którego symuluje się wyprzedzanie dwóch statków pasażerskich typu Ro-Pax (ang. *roll-on/roll-off passenger ship*) o długości 220 m oraz szerokości 30 m, płynących z prędkością 20 w., przy kroku czasowym trajektorii wynoszącym

0,2 s, całkowita wartość *bufora niepewności* każdego ze statków wynosi 60,4 m (~30% długości statku). W przypadku konieczności rozbudowania (lub zredukowania) poprawek składowych *bufora niepewności* w przyszłych pracach, możliwe jest dostosowanie ich wartości do potrzeb prowadzonych badań (a nawet całkowite pominięcie *bufora*), bez konieczności zmiany metody wyznaczania CADCA.

3.2. Konstruowanie i prezentacja CADCA

Zgodnie z przedstawionymi założeniami, CADCA wskazuje granicę obszaru, której przekroczenie przez przeszkodę (w ruchu względnym) dla zadanych parametrów brzegowych skutkuje nieuchronną kolizją statku. Proces uzyskiwania CADCA na bazie wyników badań symulacyjnych zrealizowanych zgodnie z procedurą opisaną w Rozdziale 3.1 można podzielić na trzy etapy, przedstawione schematycznie na Rysunku 17 i wyjaśnione w dalszej części niniejszego rozdziału.



Rysunek 17. Kolejne etapy konstruowania przykładowej obwiedni CADCA

3.2.1. Określenie warunków brzegowych i parametrów CADCA

Na tym etapie, działania obejmują wskazanie wartości brzegowych, dla których należy przygotować uzyskane uprzednio, cząstkowe wyniki MDTC. Dotyczy to wyboru przeszkody, parametrów manewru wymijającego oraz zakłóceń środowiskowych, dla których zrealizowano symulacje. Dodatkowo, należy określić oczekiwaną rozdzielczość (szerokość kątową) CADCA oraz precyzję wyznaczania obszaru, tj. wskazać zakres oraz liczbę rozpatrywanych pośrednich kursów rzeczywistych statku własnego. Jest to istotne ze względu na fakt, że większa liczba kursów pośrednich może implikować większą liczbę wartości MDTC przypisanych do danych kątów kursowych (ΔK). Może to skutkować dokładniejszym odwzorowaniem końcowej obwiedni CADCA, jednak przy jednoczesnej konieczności zrealizowania większej liczby

obliczeń. Dzięki zadaniu wszystkich wartości brzegowych, spośród wszystkich pojedynczych wyników (Rysunek 17 - lewo - kolor szary), możliwe jest wstępne wyselekcjonowanie par wartości MDTC i kąta kursowego dla wybranego scenariusza symulacyjnego (Rysunek 17 - lewo - kolor zielony i czerwony łącznie), a następnie wydzielenie spośród nich wyników wyznaczonych wyłącznie dla danego zakresu kursów rzeczywistych statku (Rysunek 17 - lewo - kolor czerwony).

3.2.2. Przygotowanie obwiedni obszarów składowych CADCA

Dla uprzednio wskazanych parametrów, w tym kroku przygotowywane są wszystkie uprzednio obliczone wartości MDTC. Uzyskane odległości MDTC są najpierw sortowane malejąco dla każdego kąta kursowego. Dzięki temu, możliwe jest znalezienie i przypisanie wartości $MDTC_{max}$ do danego αK niezależnie od rozpatrywanej sytuacji spotkaniowej, która została zasymulowana w zadanym zakresie kursów statku. Takie działanie pozwala na proaktywne podejście do rozwiązania sytuacji nadmiernego zbliżenia statków, poprzez uwzględnienie najgorszego możliwego pod względem bezpieczeństwa przypadku. Wynika to z faktu, że maksymalna wartość MDTC na danym kącie kursowym obliguje nawigatora do podjęcia działania wcześniej, niż w przypadku scenariuszy, dla których uzyskano mniejsze MDTC na tym kierunku.

Pogrupowane i posortowane wyniki MDTC tworzą punkty kolejnych obwiedni składowych końcowego obszaru granicznego. Składowe CADCA wyznaczone są dla danego kroku pośrednich kursów statku. Pozwala to na pokrycie całego docelowego sektora CADCA pojedynczymi obszarami składowymi, zbudowanymi dla każdego z początkowych kursów statku (Rysunek 17 - środek – różnokolorowe obszary graniczne skonstruowane w oparciu o pogrupowane, wyniki $MDTC_{max}$). Rozwiązanie oparte na kilku obszarach składowych, zamiast pojedynczego CADCA wyznaczonego dla pojedynczego kursu statku, pozwala na uwzględnienie dodatkowego marginesu na dokładność sterowania jednostki (co jest szczególnie istotne w warunkach występowania znacznych zakłóceń środowiskowych). Z tego względu, w rozprawie przyjęto wyznaczanie CADCA dla wyjściowego kursu rzeczywistego statku ($OS_{KR}) \pm 10^\circ$ oraz precyzji 1° , to jest łącznie dla 21 obszarów składowych.

Obwiednie obszarów składowych CADCA tworzone są w oparciu o układ współrzędnych biegunowych. Dla punktów znajdujących się na obwiedni, biegunem jest środek geometryczny statku własnego, promieniem wodzącym punktu jest maksymalna

wartość MDTC dla danego kursu rzeczywistego statku ($MDTC_{max}$), natomiast amplitudą punktu jest kąt kursowy na przeszkodę ($\angle K$).

Zgodnie z przedstawioną procedurą, pojedynczy obszar składowy można zdefiniować jako: *zbiór współrzędnych biegunowych taki, że dla wybranego kursu rzeczywistego statku własnego i kątów kursowych na przeszkodę, istnieją odpowiadające im odległości maksymalne MDTC i są wykorzystywane do wyznaczenia obwiedni obszaru składowego CADCA dla zadanych parametrów symulacyjnych*. Korzystając z notacji konstruktora zbiorów, pojedynczy obszar składowy CADCA można zgodnie z Równaniem 1 wyrazić wzorem:

$$CADCA(OS_{KR}) = \{(r, \varphi) \in \mathbb{R}^2 \mid (\exists \angle K \in \{\varphi \in \mathbb{R} \mid 0 \leq \varphi < 2\pi\}) \wedge (\exists MDTC_{max} \in \{r \in \mathbb{R} \mid r > 0\})\} \quad (1)$$

gdzie:

r, φ są współrzędnymi biegunowymi obwiedni obszaru składowego; $\angle K$ jest kątem kursowym (ang. *relative bearing*) ze statku własnego na przeszkodę; a $MDTC_{max}$ największą spośród minimalnych odległości do zderzenia, zawartą pomiędzy środkiem geometrycznym statku, a najbliższym punktem na obwiedni przeszkody dla wybranego kąta kursowego.

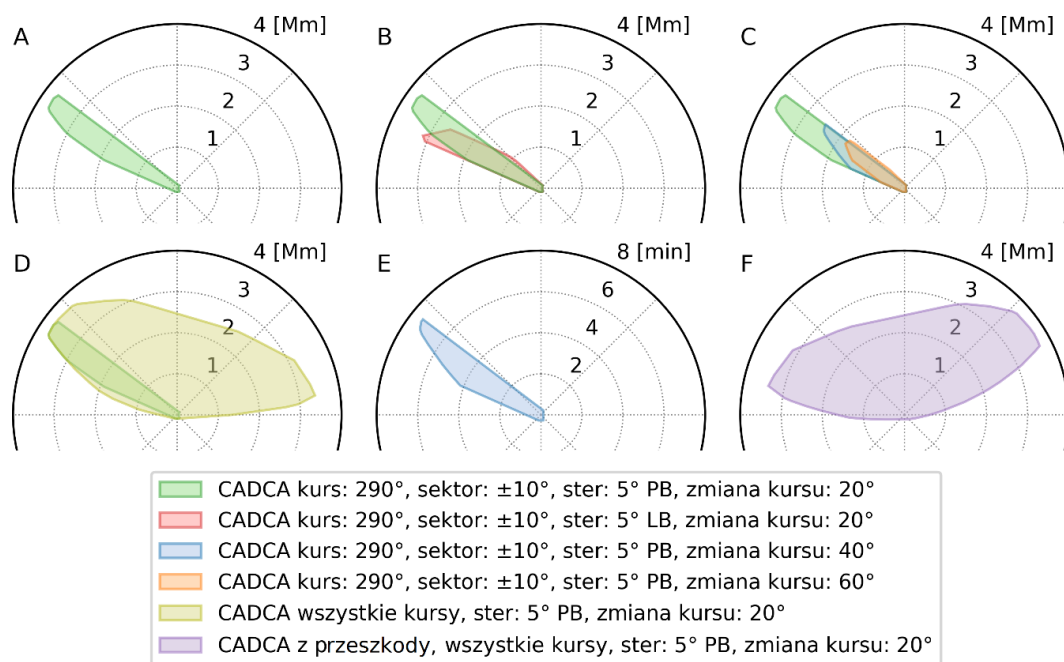
3.2.3. Wyznaczanie końcowego obszaru CADCA

Na ostatnim etapie tworzenia CADCA, uzyskane w poprzednim kroku obszary składowe scalane są w jeden obszar końcowy. Dzięki temu, ostatecznie CADCA pokrywa cały zadany sektor kątowy i zakres rozpatrywanych kursów statku. W tym celu, obliczana jest suma zbiorów zawierających współrzędne punktów, tworzących obwiednie uprzednio wyznaczonych obszarów składowych (Rysunek 17 – prawo - kolor czerwony). Ostatnim krokiem przygotowywania końcowego CADCA, jest zastosowanie algorytmu otoczki wypukłej dla otrzymanego zbioru punktów tworzących końcową obwiednię obszaru (Rysunek 17 - prawo - kolor niebieski). Uwypuklenie zbioru służy m.in.: i) dodatkowemu uwzględnieniu ewentualnych niepewności, poprzez częściowe powiększenie obszaru końcowego i wykorzystanie najbardziej odstających punktów; ii) wygładzeniu otrzymanej obwiedni obszaru końcowego; iii) ułatwieniu późniejszego wykorzystania CADCA w zastosowaniach aplikacyjnych, poprzez znaczne zredukowanie liczby punktów, wyznaczających końcowy obszar graniczny statku.

Zgodnie z powyższym, końcowy obszar CADCA można zgodnie z Równaniem 2 zdefiniować jako: *otoczkę wypukłą sumy zbiorów stanowiących obszary składowe CADCA*.

$$CADCA(OS_{KR}) = \text{conv} \left(\bigcup_{i=-10}^{10} CADCA(OS_{KR} + i) \right) \quad (2)$$

W niniejszej dysertacji, podstawowa wizualizacja dynamicznego granicznego obszaru manewrowego, przedstawia CADCA jako obwiednię otaczającą kadłub statku własnego, dla sektora o rozpiętości 21° (zadany kurs rzeczywisty powiększony o obustronny, 10-stopniowy margines) oraz manewru wymijającego realizowanego na prawą burtę. Domyślnie, obszar prezentowany jest na wykresie biegunowym, przypominającym nawigatorowi ekran znany z urządzeń radarowych z ustawionym zorientowaniem obrazu względem dziobu (ang. *head-up*). Dane prezentowane są w funkcji odległości MDTC [Mm] dla danych kątów kursowych (Rysunek 18-A). Jednakże, w zależności od planowanych zastosowań aplikacyjnych, możliwe jest dopasowanie wizualizacji CADCA tak, by w jak najbardziej przystępny sposób prezentować wyznaczone obszary graniczne. Możliwa jest zatem m.in. modyfikacja rozpiętości sektora CADCA, przedstawienie obszaru granicznego dla manewru wymijającego realizowanego na lewą burtę, zamiana prezentacji obwiedni CADCA z funkcji odległości MDTC na czas niezbędny do realizacji manewru ostatniej szansy, prezentacja (pogrupowanie wyników) z perspektywy przeszkody zamiast statku własnego, itd. Różne formy prezentacji CADCA dla przykładowych scenariuszy symulacyjnych zaprezentowano na Rysunku 18.



Rysunek 18. Różne możliwości wizualizacji obszaru CADCA

Jak przedstawiono w Rozdziale 3.1.3, posiadając odpowiednie trajektorie statku, możliwe jest geometryczne wyznaczenie CADCA zarówno dla zwrotu na lewą, jak i prawą

burtę. W myśl Prawidła 2 COLREG, realne jest wystąpienie sytuacji, w której należy odstąpić od przestrzegania przepisów w celu uniknięcia zderzenia (IMO, 2010). Z tego względu, poza podstawowym zobrazowaniem CADCA wskazującym granice wynikające z realizacji pojedynczego zwrotu na wybraną burtę (Rysunek 18-A), możliwe jest również jednoczesne nałożenie na siebie dwóch niezależnych obszarów krytycznych. Wyznaczają one granice manewru wymijającego dla zwrotu odpowiednio na lewą i prawą burtę w tym samym scenariuszu symulacyjnym (Rysunek 18-B).

Dostosowanie wizualizacji CADCA dotyczy również możliwości wybrania parametrów manewru wymijającego, które zostaną ukazane na wykresie jako oddzielne serie danych (niezależne obszary CADCA). Z tego względu, w zależności od intencji wykorzystania koncepcji czy wewnętrznych regulacji armatora, mogłyby to być np. obwiednie CADCA dla manewrów na dowolną z burt, zaprezentowane dla kolejnych wychyleń steru, różnych prędkości statku, czy planowanych zmian kursu (Rysunek 18-C).

Kolejną możliwością wizualizacji jest przedstawienie zmodyfikowanego rozmiaru sektora CADCA, pozwalającego na wskazanie obszaru granicznego uniezależnionego od bieżącego kursu rzeczywistego statku (Rysunek 18-D). Wynika to z możliwości użycia dowolnej liczby obszarów składowych CADCA, z których konstruowany jest obszar końcowy z użyciem otoczki wypukłej (Rysunek 17-III oraz Równanie 2). Toteż w przypadku wykorzystania 360 obszarów składowych o rozpiętości kątowej 1° zamiast domyślnych 21, możliwe jest uzyskanie obszaru końcowego CADCA wskazującego granicę realizacji manewru wymijającego dla danego scenariusza symulacyjnego niezależnie od kursu statku. Wynika to z uwzględniania w procesie wyznaczania obwiedni CADCA najgorszego scenariusza nawigacyjnego, tj. wykorzystywania maksymalnej wartości MDTC na danym kącie kursowym. Dzięki temu, możliwe jest wzięcie pod uwagę wszystkich możliwych konfiguracji dla zadanej precyzji CADCA i zrealizowanych scenariuszy symulacyjnych niezależnie od kursu statku. Taka forma prezentacji, mogłaby być szczególnie przydatna dla potencjalnych użytkowników lądowych np. służby kontroli ruchu statków VTS (ang. *Vessel Traffic Service*), w zastosowaniach związanych z szacowaniem ryzyka w transporcie morskim.

Jak przedstawiono, możliwe jest dostosowanie warstwy wizualizacyjnej CADCA w taki sposób, by uzyskać najlepsze efekty w zależności od zastosowania prezentowanej koncepcji. W przypadku zastosowań statkowych, możliwe jest (przy założeniu ruchu jednostajnego) zaprezentowanie granic obszaru w funkcji czasu zamiast odległości MDTC (Rysunek 18-E). Dzięki temu, nawigator może otrzymywać informację dotyczącą czasu potrzebnego do

rozpoczęcia realizacji wybranego manewru wymijającego, zamiast odległości, w której powinien taki manewr rozpocząć. Taka forma prezentacji mogłaby być bardziej intuicyjna, ponieważ nie wymaga dodatkowych przeliczeń i konwersji jednostek, dając nawigatorowi bezpośrednią informację o istniejącym horyzoncie czasowym.

Kolejną możliwością wizualizacji CADCA jest zaprezentowanie obwiedni z perspektywy przeszkody, zamiast statku własnego (Rysunek 18-F). Taka forma przedstawienia obszaru mogłaby być szczególnie przydatna w przypadku wykorzystania CADCA w algorytmach służących planowaniu bezkolizyjnego przejścia statku autonomicznego bądź do wyznaczania obszarów granicznych dla stacjonarnych obiektów typu *offshore*. W takim przypadku, CADCA konstruowana jest w sposób identyczny jak przedstawiono dotychczas, jednakże grupowanie maksymalnych wartości MDTC dla danego kąta kursowego realizowane jest odwrotnie (z perspektywy przeszkody, a nie statku własnego). Ostatecznie, ze względu na zmianę kierunku i kolejności grupowania MDTC, obwiednia CADCA otacza przeszkodę zamiast statku własnego.

3.3. Przygotowanie trajektorii statku na fali nieregularnej

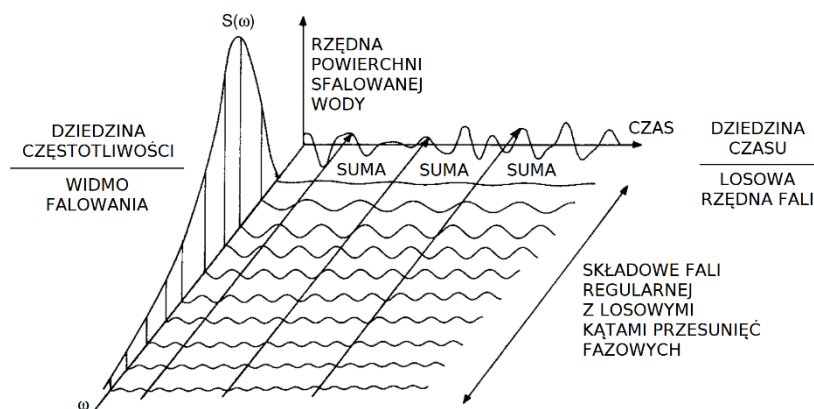
Matematyczna reprezentacja falowania morskiego zakłada, że dla danego stanu morza, można scharakteryzować je jako ergodyczny proces losowy Gaussa (Boccotti, 2000). Dzięki temu, że proces stochastyczny falowania jest jednocześnie stacjonarny i jednorodny, możliwe jest uzyskanie charakterystyki statystycznej całego procesu w oparciu o jego wybraną realizację czasową, niezależnie od miejsca jej wyznaczenia (Dudziak, 2008; Ochi, 2005; Warmowska, 2003). Dzięki tym założeniom, możliwe jest przedstawienie procesu falowania za pomocą charakterystyki widmowej. Lokalną rzędną powierzchni sfalowanej wody rozchodzącej się wzdłuż dodatniej osi odciętych, można zapisać jako sumę znacznej liczby fal składowych, zgodnie z zależnością przedstawioną w Równaniu 3 (Faltinsen, 1999):

$$\zeta = \sum_{j=1}^N A_j \sin(\omega_j t - k_j x + \varepsilon_j) \quad (3)$$

gdzie:

A_j oznacza amplitudę fali, ω_j częstotliwość kątową, k_j liczbę falową $k = 2\pi/\lambda$, gdzie λ oznacza długość fali (Matusiak, 2021), natomiast ε_j losowy kąt fazowy składowej j -tej fali (Faltinsen, 1999). Wartości kątów fazowych ε_j są stałe w czasie i równomiernie rozłożone pomiędzy 0 i 2π .

Na Rysunku 19 przedstawiono powiązanie realizacji falowania nieregularnego z jego widmem (Faltinsen, 2005). Jednakże, w zależności od wybranego spektrum, energia falowania może zmieniać się w inny sposób dla różnych częstotliwości. Z tego względu, konieczne jest sprawdzenie, czy zastosowane widmo dobrze opisuje rejestrowane w rzeczywistości historyczne zapisy falowania na danym akwenu.



Rysunek 19. Związek pomiędzy reprezentacjami fal w dziedzinie częstotliwości i w dziedzinie czasu dla krótkoterminowego ujęcia stanu morza dla ustalonego falowania rozwiniętego. Przetłumaczono na podstawie: (Faltinsen, 2005)

Dodatkowo, w trakcie symulowania oddziaływania fali na kadłub, największa amplituda w każdej symulacji (realizacji falowania), różni się od siebie ze względu na losowy dobór częstotliwości i kątów fazowych (Faltinsen, 2005; Ochi, 2005). W takim przypadku rozwiązaniem jest wykorzystanie odpowiednio długiej ekspozycji statku na falowanie, co pozwala wykorzystać właściwości zjawiska, a następnie opisać parametry falowania za pomocą miar statystycznych.

3.3.1. Wyznaczanie minimalnej liczebności trajektorii wejściowych

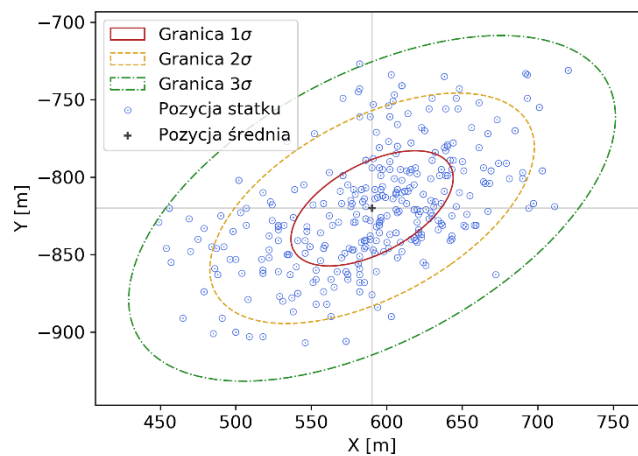
W celu należytego odwzorowania procesu falowania, czas ekspozycji kadłuba na działanie zakłóceń zewnętrznych (środowiskowych) musi być odpowiednio długi. W przypadku żeglugi na wprost, jest to zarówno możliwe do zrealizowania, jak i w pełni zasadne, co skutkuje uzyskaniem wystarczająco długiej symulacji pozwalającej na statystyczne ujęcie procesu falowania (w myśl kryteriów statecznościowych drugiej generacji IMO czas ten wynosi 3 godziny (IMO, 2020)). W przypadku cyrkulacji statku, takie działanie jest uzasadnione statystycznie, ale brak mu jakichkolwiek przesłanek operacyjnych, ze względu na całkowity czas trwania pełnej cyrkulacji statku wynoszący w warunkach rzeczywistych od kilku do kilkunastu minut. W związku z powyższym, koniecznym było zastosowanie odmiennego podejścia, pozwalającego na uchwycenie istoty obu wspomnianych aspektów.

Na potrzeby wyznaczenia CADCA, konieczne jest wykorzystanie trajektorii jednostki w czasie cyrkulacji, a nie podczas żeglugi na wprost. Jednakże, ze względu na czas trwania zwrotu statku, nie jest możliwe wykorzystanie odpowiednio długiej realizacji falowania, która pozwoliłaby w wiarygodny sposób statystycznie opisać położenie kadłuba w przestrzeni wraz z jego zachowaniem na fali (Hinz i in., 2021). Dlatego też, w procesie przygotowania trajektorii służących do wyznaczenia CADCA, wybrano metodę opartą na znacznej liczbie symulacji tego samego manewru, zamiast pozostawienia jednostki w stanie nierealistycznie długiego zwrotu z zaniżoną prędkością kątową, odpowiednią dla cyrkulacji ustalonej. Dzięki temu, możliwe było przedstawienie realizacji falowania przy zachowaniu wymogów operacyjnych stawianych statkom, jednocześnie uwzględniając zarówno istotę samego manewru, jak i stochastyczną naturę falowania. Jednakże, ze względu na wspomniane wcześniej różnice w rozkładzie energii, doborze częstotliwości i przesunięciach fazowych, trajektoria jednostki dla tych samych parametrów statku i falowania nigdy nie będzie jednakowa. Dlatego też konieczne było wyznaczenie minimalnej liczby trajektorii statku, które pozwalałyby, w ujęciu statystycznym, wiarygodnie odwzorować zachowanie jednostki na fali nieregularnej.

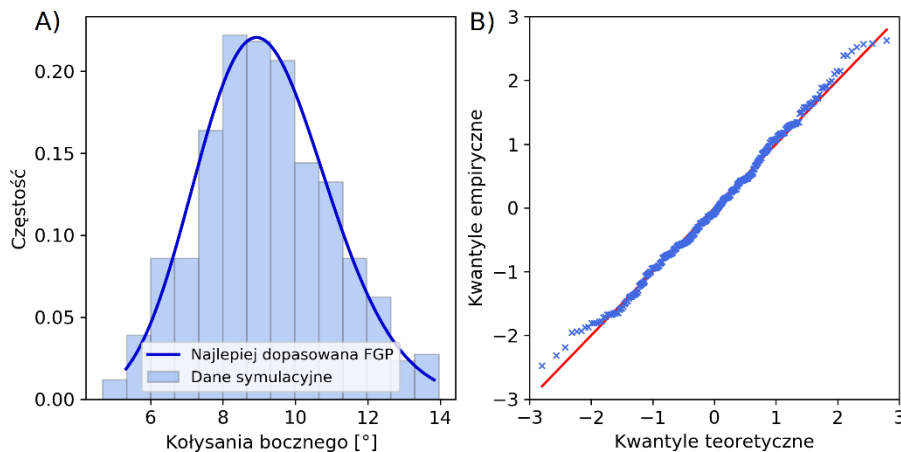
W związku z powyższym, wykorzystując metodę symulacyjną wyznaczono minimalną liczbę trajektorii jednostki, pozwalających na poziomie ufności 95% uzyskać parametry cyrkulacji z błędami nieprzekraczającymi przyjętych wartości progowych. Podobnie jak w przypadku kryteriów manewrowości IMO (IMO, 2002), analizowano średnicę taktyczną i przesunięcie czołowe, jako parametry charakteryzujące cyrkulację statku. Dodatkowo, weryfikowano wartości kołysania bocznego, w celu statystycznego uwzględnienia odpowiedzi kadłuba statku na fali nieregularnej. Jako dopuszczalne progi błędów związanych z parametrami cyrkulacji przyjęto odpowiednio: 1%, 3% oraz 5% długości całkowitej statku. W przypadku analizy kołysania bocznego, przyjęto takie same wartości procentowe dopuszczalnego błędu dla progów, którego przekroczenie (40°) traktowane jest jako zdarzenie awaryjne. Wartość ta wynika z zaproponowanych przez IMO kryteriów statecznościowych drugiej generacji, dla statku znajdującego się w stanie nieuszkodzonym (IMO, 2020).

Początkowo zbadano, czy analizowane parametry pochodzące z wybranego modelu ruchu statku dla dużego zbioru cyrkulacji statku pasażerskiego ($n=400$), różnią się od siebie pomiędzy kolejnymi realizacjami falowania dla tych samych parametrów symulacyjnych. Z tego powodu sprawdzono, czy dla różnych kroków czasowych, odmienna realizacja falowania przy ustalonych parametrach symulacji skutkuje odmiennymi wynikami (np. wyznaczonymi trajektoriami jednostki). Dlatego też, na Rysunku 20 zaprezentowano

rozzrzut pozycji statku w momencie osiągnięcia kursu rzeczywistego $OS_{KR}=180^\circ$, będącego kryterium określania średnicy taktycznej cyrkulacji według IMO (IMO, 2002). W tym celu wybrano przykładowy scenariusz symulacyjny (zwrot $35^\circ PB$, prędkość 20 w., fala baksztagowa o wysokości $H_S=5,3$ m). Na Rysunku 21 przedstawiono natomiast za pomocą histogramu (A) oraz wykresu porównującego kwantyle rozkładów (B) (ang. *Q-Q plot*), wartości maksymalnego odnotowanego kołysania statku w trakcie cyrkulacji dla tego samego scenariusza symulacyjnego i różnych realizacji falowania. Całość badań przeprowadzono dla różnych wychyleń steru dużego statku pasażerskiego, różnych wysokości fali znacznej oraz kątów natarcia fali na kadłub jednostki.



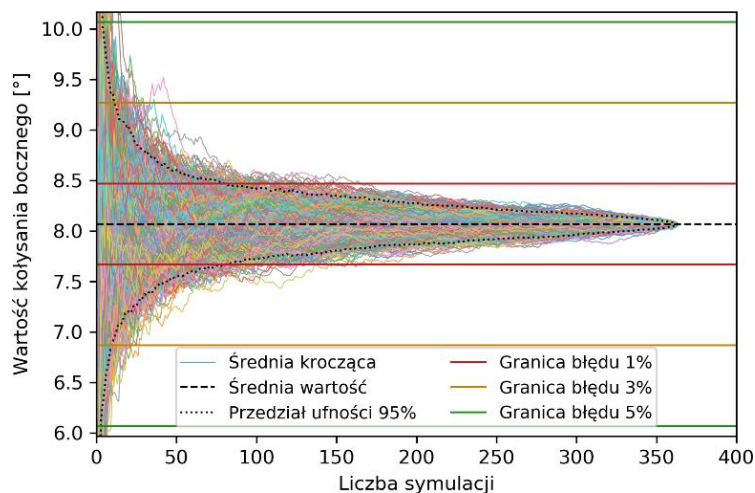
Rysunek 20. Rozrzut pozycji statku dla różnych realizacji falowania w wybranym scenariuszu symulacyjnym w momencie osiągnięcia przez statek kursu 180°



Rysunek 21. Przykładowy rozkład maksymalnego chwilowego kołysania statku w wybranym scenariuszu symulacyjnym

W celu wyznaczenia minimalnej liczby trajektorii statku na fali nieregularnej, wykorzystano podejście symulacyjne, obliczając średnią kroczącą każdego analizowanego parametru (średnica taktyczna cyrkulacji, przesunięcie czołowe, kołysanie boczne) z dostępnego zbioru trajektorii statku (Rysunek 22). W trakcie symulacji, dobierając losowo

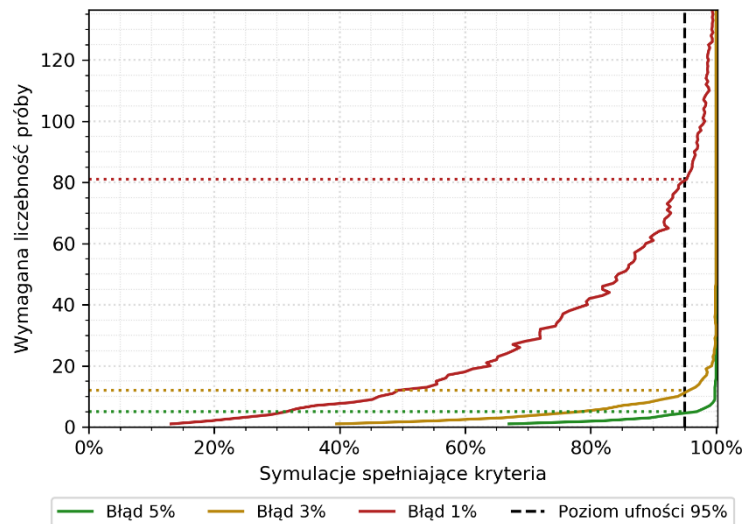
kolejne realizacje falowania sprawdzano, czy wartość obliczonej średniej mieści się w granicach przyjętych błędów (1%, 3% oraz 5%).



Rysunek 22. Przykład sprawdzania średniej kroczącej dla wybranego scenariusza symulacyjnego i analizy kołysania bocznego

Wyniki analizy, w zależności od scenariusza symulacyjnego, wskazywały na różne wartości wymaganej liczby realizacji falowania i były one uzależnione głównie od natężenia zakłóceń środowiskowych (np. wyższa fala znaczna powodowała większe odchylenie standardowe wartości, co skutkowało koniecznością wykonania większej liczby symulacji pozwalających osiągnąć akceptowalny próg błędu). Jednakże, pomimo że wyznaczone wartości minimalnej liczebności próby wahały się w zależności od analizowanego parametru i scenariusza symulacyjnego, to odnotowywane różnice nie były znaczne, w szczególności dla progów akceptowalnego błędu $> 1\%$. Dla dopuszczalnego błędu na poziomie 3% (który uznano za wystarczający dla potrzeb operacyjnych) oraz referencyjnej wysokości fali znacznej $H_S=5,3$ m (co odpowiada 6° w skali Douglasa) (Cornish & Ives, 2009), wyznaczone wartości niezbędnej liczby realizacji falowania nie przekraczały zazwyczaj $n=20$. Wyższe wartości ($n=25$) odnotowano głównie w scenariuszach z większym stanem morza ($H_S=8,0$ m). Na Rysunku 23 przedstawiono zestawienie minimalnych realizacji falowania, niezbędnych do uzyskania akceptowalnej wartości maksymalnego kołysania bocznego dla każdego z przyjętych progów błędu. Podobnie jak w poprzednich przypadkach, wykorzystano ten sam, przykładowy scenariusz symulacyjny (zwrot 35° PB, prędkość 20 w., fala baksztagowa o wysokości $H_S=5,3$ m). Jak można zaobserwować na Rysunku 23, miejsce przecięcia linii wskazującej 95% symulacji spełniających założone kryteria z krzywymi wyznaczonymi dla akceptowalnego progu błędów 3% oraz 5% nie wskazują na minimalną liczebność próby większą od $n=20$. W związku z tym, przyjęto tę wartość jako liczbę składowych trajektorii statku wykorzystywanych w badaniach przedstawionych w dalszych częściach niniejszej pracy.

Przeprowadzona analiza minimalnej liczebności próby określiła wymaganą liczbę realizacji falowania $n=20$, pozwalającą na późniejsze wyznaczenia obszarów CADCA w granicach przyjętego błędu. Wybrana wartość n wskazywała zatem na możliwość uzyskania akceptowalnego błędu na poziomie 3% przy 95% poziomie ufności, zachowując jednocześnie dodatkowy margines bezpieczeństwa wynikający z i) wykorzystania większej liczby realizacji falowania niż uzyskana średnia wartość ($n=6$); ii) uwzględnienia gorszych warunków falowych niż te, które rozpatrywano w dalszym wyznaczaniu CADCA.



Rysunek 23. Wyniki wyznaczania minimalnej liczby realizacji falowania dla kołysania bocznego w wybranym scenariuszu symulacyjnym i różnych dopuszczalnych wartości błędów

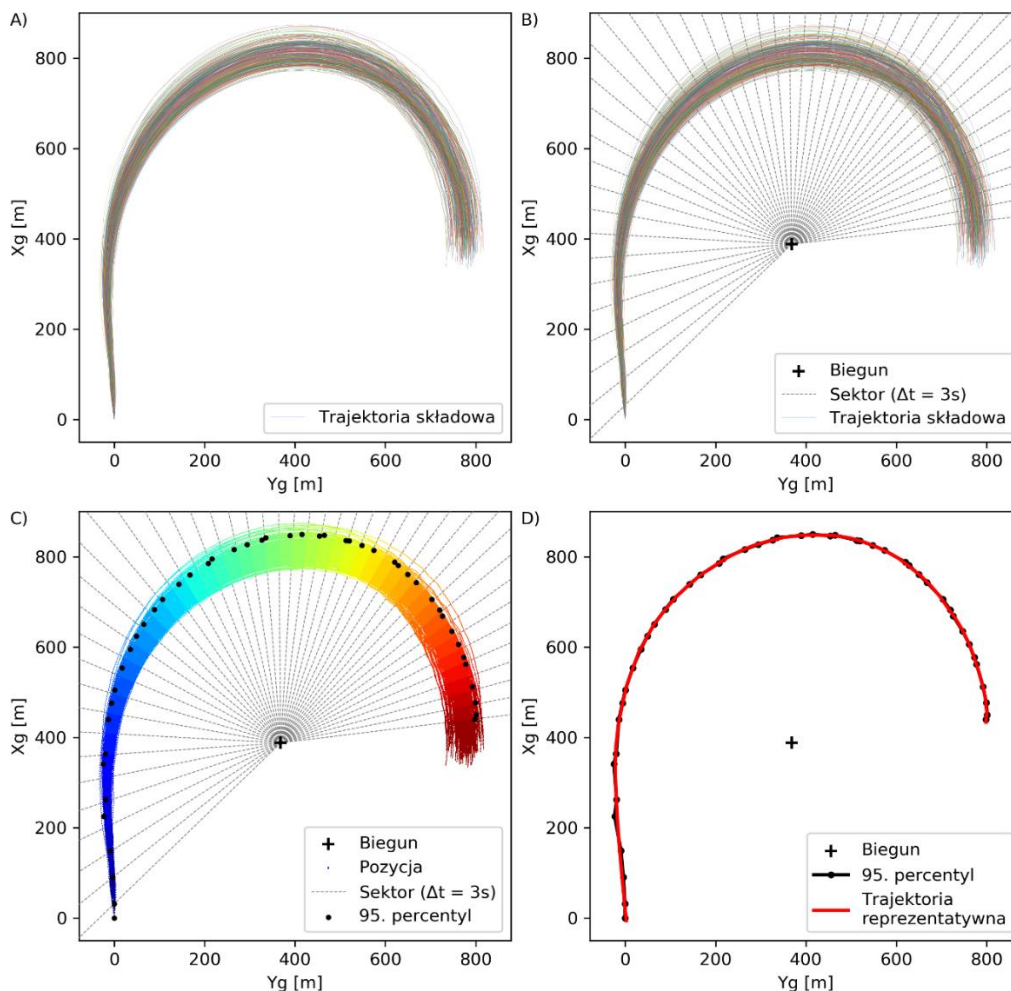
3.3.2. Wyznaczanie trajektorii reprezentatywnej

Kolejnym krokiem służącym przygotowaniu plików wejściowych do obliczania CADCA, było wyznaczenie reprezentatywnej trajektorii ruchu statku na bazie zbioru 20 trajektorii składowych. Cały proces został schematycznie przedstawiony dla przykładowego scenariusza symulacyjnego na Rysunku 24.

Początkowo zrzutowano wszystkie trajektorie składowe jednostki (pochodzące z tego samego scenariusza symulacyjnego, ale różniące się od siebie realizacją falowania) na płaszczyznę (Rys. 24-A). Następnie, zbiór trajektorii składowych podzielono na sektory kątowe. Wykorzystano w tym celu promień wodzący, poprowadzony od bieguna, którego pozycja uwzględnia parametry skrajnych trajektorii statku pochodzących z analizowanego zestawu danych (Rys. 24-B). Szerokość sektora odpowiadała pojedynczemu krokowi czasowemu Δt , dla którego wyznaczono oryginalne - składowe trajektorie statku dostarczone z zewnętrznego modelu ruchu statku (w wybranym do pracy źródle danych $\Delta t=0,2$ s). Na potrzeby czytelnej wizualizacji, na Rysunku 24 liczba trajektorii składowych została

zwiększona do $n=400$, a sektor Δt powiększono piętnastokrotnie ($\Delta t=3$ s), w stosunku do nominalnie wykorzystywanej wartości.

Następnie, obliczając odległość od bieguna sprawdzono, która pozycja statku w danym sektorze jest zlokalizowana w 95. percentylu, zgodnie z przyjętym w badaniach poziomem ufności (Rys. 24-C). Ponieważ z definicji CADCA jest obszarem granicznym, przyjęto, że 95% pozycji w danym sektorze kątowym musi znajdować się bliżej przyjętego bieguna, co pozwoli na uwzględnienie najgorszego scenariusza obliczeniowego. Skutkuje to bowiem wykorzystaniem najdłuższej – zewnętrznej (na poziomie ufności 95%) trajektorii, tj. najmniej korzystnej pod względem bezpieczeństwa statku w trakcie symulowania sytuacji spotkaniowej. Prędkość postępową statku została obliczona dla reprezentatywnej trajektorii pomiędzy kolejnymi pozycjami statku dla zadanego kroku czasowego Δt i przy założeniu ruchu krzywoliniowego. Na końcowym etapie przygotowania reprezentatywnej trajektorii statku (Rys. 24-D), zastosowano wygładzanie jej przebiegu z użyciem filtru Savitzky’ego-Golaya, w celu zniwelowania wartości odstających (Press, 2007; Savitzky & Golay, 1964).



Rysunek 24. Przykład schematycznego wyznaczania trajektorii reprezentatywnej spośród wszystkich trajektorii wejściowych dla przykładowego scenariusza symulacyjnego

Przygotowane w opisany sposób trajektorie reprezentatywne statku wyznaczone dla każdego scenariusza symulacyjnego, stanowiły pliki wejściowe do oprogramowania służącego wyznaczaniu CADCA opisanego w Rozdziale 3.1. Zastosowana metoda wstępnej obróbki danych pozwoliła na:

- Uwzględnienie stochastycznej natury modelowania stanu morza, poprzez wykorzystanie wielu symulacji ruchu statku dla tego samego scenariusza i różnych realizacji falowania.
- Częściowe zniwelowanie istniejących niepewności i przybliżeń wynikających z matematycznego modelowania ruchu statku, poprzez wykorzystanie wielu symulacji tego samego scenariusza obliczeniowego.
- Przyjęcie nawigacyjnie niekorzystnego scenariusza na przyjętym poziomie ufności i z akceptowalnym błędem granicznym, wykorzystując przy tym proaktywne podejście do bezpieczeństwa.
- Skrócenie czasu symulacji służących wyznaczaniu CADCA, ze względu na redukcję liczby wykorzystywanych trajektorii z początkowych $n=20$ składowych do pojedynczej – reprezentatywnej.

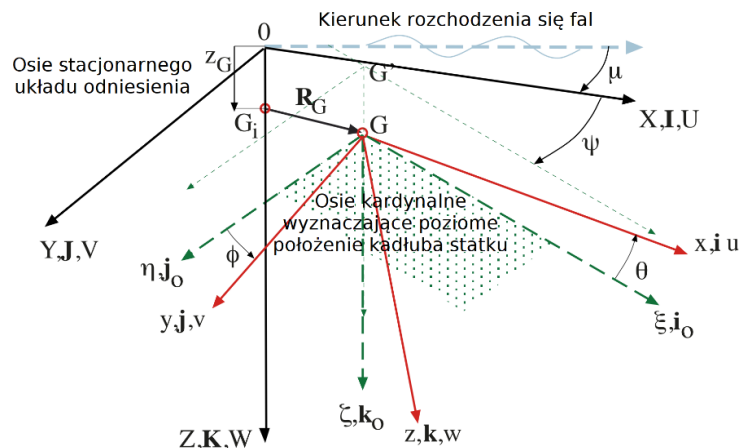
3.4. Model ruchu statku *LaiDyn* – opis działania i walidacja

W celu sprawdzenia zaproponowanej metody wyznaczania CADCA, konieczne było wykorzystanie trajektorii ruchu statku na fali nieregularnej, pochodzących z zewnętrznego źródła danych. W związku z tym, w niniejszej pracy wykorzystano model *LaiDyn* (Matusiak, 2021), jako przykładowe źródło danych o ruchu statku. Trajektorie jednostki po obróbce wstępnej przedstawionej w Rozdziale 3.3, posłużyły za dane wejściowe do oprogramowania symulacyjnego opisanego w Rozdziale 3.1.

3.4.1. Ogólna zasada działania modelu

LaiDyn jest numerycznym modelem ruchu statku pozwalającym na zasymulowanie manewrowości jednostki i zachowania jej kadłuba w sześciu stopniach swobody, zarówno na fali regularnej jak i nieregularnej (Matusiak, 2017). W modelu przyjęto założenie, że statek jest bryłą sztywną uwzględniającą wpływ nieliniowych efektów falowania na kadłub jednostki oraz występowanie sił hydrodynamicznych, w tym wymuszających sił Froude’a-Krylov’a w dziedzinie czasu (Manderbacka i in., 2011).

Matematyczny opis odpowiedzi statku poddanego wymuszeniom realizowany jest w dwóch układach odniesienia - globalnym i lokalnym, które zaprezentowano na Rysunku 25. Pierwszy z nich jest stały względem Ziemi, a znajdująca się tam płaszczyzna XY , odpowiada poziomowi wody spokojnej na akwenu. Drugi układ odniesienia (x, y, z) ma swój początek w środku ciężkości przemieszczającego się statku (Matusiak, 2021), co jest dogodne z perspektywy wyznaczania ruchów o charakterze oscylacyjnym.



Rysunek 25. Układy współrzędnych wykorzystywane w modelu *LaiDyn*. Przetłumaczono na podstawie: (Matusiak, 2017)

Podobnie jak w wielu innych rozwiązaniach, w modelu *LaiDyn* wyznaczanie całkowitego ruchu statku jest rozdzielone obliczeniowo. Oznacza to, że na ruch średni opisujący przemieszczenie środka ciężkości bryły sztywnej są następnie nanoszone ruchy oscylacyjne. Mając na uwadze wykorzystywaną w modelu konwencję notacji, w Równaniach 4-7 przedstawiono ogólne zależności fizyczne, opisujące ruchy statku w dziedzinie czasu (Matusiak, 2017). Równanie 4 przedstawia pochodną położenia wektora prędkości bryły sztywnej w czasie, prowadzącą do wyznaczenia położenia środka statku. Równania 5-7 opisują natomiast macierze obrotu statku, kolejno dla każdego z trzech rozpatrywanych kątów obrotu, tj. myśzkowania, kiwania i kołysania (ang. *yaw*, *pitch*, *roll*). W tym celu, wykorzystywane są relacje składowych prędkości pomiędzy lokalnym i globalnym układem współrzędnych (Matusiak, 2021).

$$\mathbf{U} = \dot{\mathbf{R}}_G = \dot{X}_G \mathbf{I} + \dot{Y}_G \mathbf{J} + \dot{Z}_G \mathbf{K} = u \mathbf{i} + v \mathbf{j} + w \mathbf{k} \quad (4)$$

gdzie:

$\dot{X}_G, \dot{Y}_G, \dot{Z}_G$ oraz u, v, w są składowymi wektora prędkości \mathbf{U} środka ciężkości statku, z uwzględnieniem globalnego i lokalnego układu odniesienia.

$$\begin{pmatrix} u_3 \\ v_3 \\ w_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} u_2 \\ v_2 \\ w_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

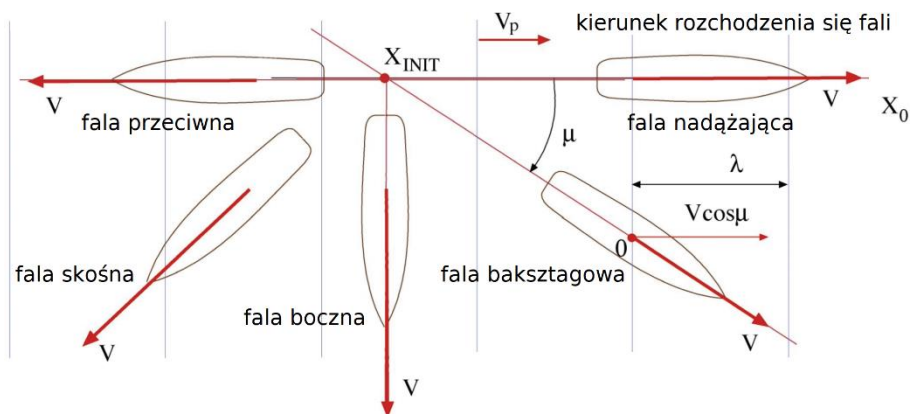
$$\begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} \quad (7)$$

gdzie:

ψ, θ, ϕ są kątami obrotu statku: ψ oznacza myszkowanie (ang. *yaw*), θ kiwanie (ang. *pitch*), a ϕ kołysanie (ang. *roll*). Zmienne u, v, w są natomiast składowymi wektora prędkości liniowej statku z uwzględnieniem lokalnego układu odniesienia (Matusiak, 2021).

Zgodnie z przedstawionymi Równaniami 4-7, model *LaiDyn* wykorzystuje zbiór różniczkowych równań ruchu statku, przez co konieczne jest dyskretne rozwiązanie zależności w czasie. W celu rozwiązania równań różniczkowych, w oprogramowaniu *LaiDyn* zastosowano metody Runge-Kutta (Matusiak, 2021), co jest powszechnie stosowanym podejściem.

Zaprezentowany na Rysunku 25 kąt oznaczony symbolem μ , związany jest z przyjętym w modelu *LaiDyn* kierunkiem rozchodzenia się fal oraz konwencją jego notacji. Zgodnie z wizualizacją kierunku falowania zaprezentowaną na Rysunku 26, μ należy interpretować jako względny kąt natarcia fali na kadłub statku, gdzie 0° oznacza falę nadążającą, 45° falę baksztagową, 90° falę boczną, 135° falę skośną, a 180° falę przeciwną. Wartości dodatnie oznaczają falę nacierającą na kadłub z prawej, a ujemne z lewej burty.



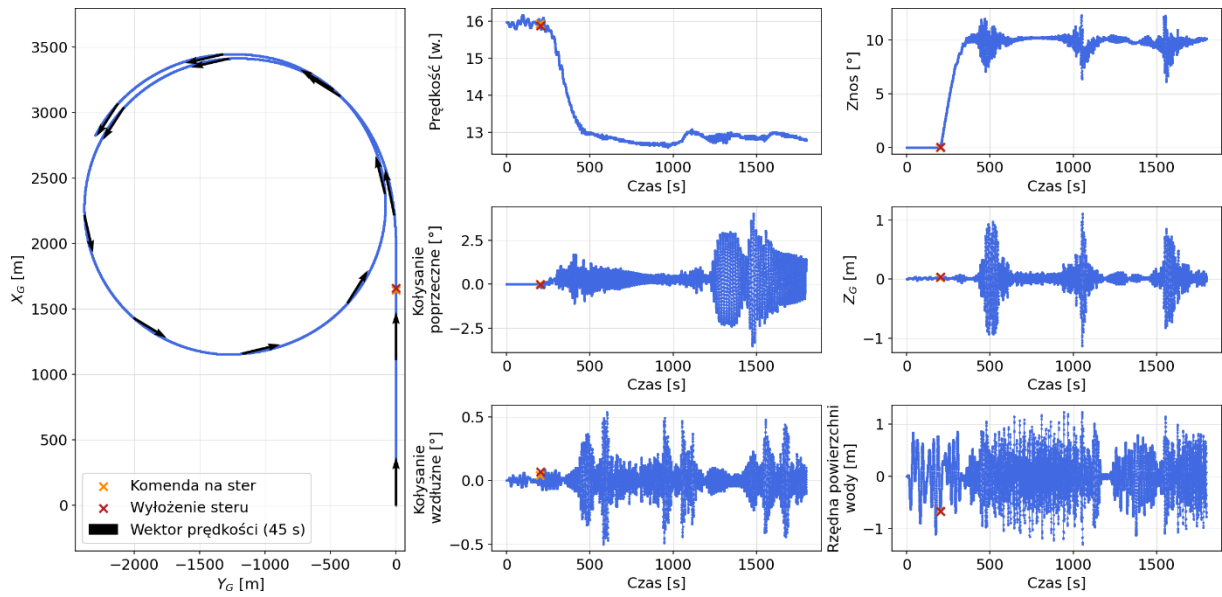
Rysunek 26. Przyjęta w modelu *LaiDyn* konwencja wyrażania kierunku oddziaływania fali na kadłub statku. Przetłumaczono na podstawie: (Matusiak, 2021)

3.4.2. *LaiDyn* - walidacja i zastosowanie modelu

Oprogramowanie *LaiDyn*, jak i zastosowany w nim model ruchu, było wykorzystywane zarówno w badaniach porównawczych realizowanych w ramach międzynarodowych projektów naukowych, m.in. SHOPERA (Shigunov i in., 2018) i FLARE (Taimuri i in., 2019, 2020), a także w testach organizowanych przez ITTC (ang. *International Towing Tank Conference*) - Międzynarodową Konferencję Basenów Holowniczych (ITTC, 2002, 2005). W celu przeprowadzenia weryfikacji modelu *LaiDyn*, dla statku typu Ro-Pax realizowano również eksperymenty na basenie modelowym z użyciem oscylatora ruchu płaskiego PMM (*Planar Motion Mechanism*) (Matusiak & Stigler, 2012). Uzyskane w testach wyniki zostały powszechnie uznane za satysfakcjonujące i wystarczająco dokładne do odwzorowania zachowania statku, w szczególności dla jednostek typu Ro-Pax.

Model *LaiDyn* był również wielokrotnie używany w pracach badawczych. Wykorzystywano w nich oprogramowanie zarówno do symulowania ruchu statku na fali nieregularnej, jak i jego manewrowości. Prace te dotyczyły między innymi estymacji dynamicznych efektów zalewania przedziałów na statku pasażerskim, gdzie wyniki uzyskane z modelu *LaiDyn* były porównywane z oprogramowaniem komercyjnym (Manderbacka i in., 2011). Ponadto, *LaiDyn* był wykorzystywany do symulowania ruchu statku na fali, wliczając w to niekorzystne warunki pogodowe. W ten sposób weryfikowano np. wpływ nadmiernych ruchów jednostki, a także przyspieszeń wynikających z zachowania statku na wzburzonym morzu, na kadłub oraz ładunek kontenerów zamocowany na pokładzie (Acanfora i in., 2017a, 2017b, 2018; Hinz i in., 2018). Model *LaiDyn* był również wykorzystywany w badaniach dotyczących zagadnień operacyjnych, związanych z bezpieczeństwem transportu morskiego, w tym unikaniem zderzeń statków (Gil, Montewka, i in., 2020b; Krata i in., 2016; Szlapczynski & Krata, 2018) oraz optymalizacją pogodowej trasy przejścia jednostki (Krata & Szlapczynska, 2018).

W dotychczasowych badaniach, wielokrotnie wykorzystywano program *LaiDyn* do generowania trajektorii statku oraz symulowania jego ruchów na fali nieregularnej, jako danych wejściowych do innych modeli symulacyjnych i probabilistycznych. Wizualizację przykładowych danych dostarczonych przez program *LaiDyn*, na które składają się cyrkulacja statku w czasie dla zadanego scenariusza obliczeniowego wraz z wybranymi parametrami ruchu jednostki na fali, przedstawiono na Rysunku 27.



Rysunek 27. Przykładowa wizualizacja cyrkulacji statku zamodelowana z wykorzystaniem programu LaiDyn – trajektoria oraz wybrane parametry ruchu jednostki w czasie

4. BADANIA SYMULACYJNE – SCENARIUSZE, WYNIKI, ANALIZA

W celu przeanalizowania koncepcji CADCA oraz zaproponowanej metody jej wyznaczania, w zakresie wpływu czynników operacyjnych oraz środowiskowych na zmienność rozmiaru i kształtu obszaru, przeprowadzono badania symulacyjne. Badania zrealizowano z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania symulacyjnego, którego zasada działania została opisana w Rozdziale 3.1. Do realizacji badań wykorzystano obiekty odwzorowujące zarówno przeszkody stacjonarne, jak i statki obce w drodze, w celu przeanalizowania szerokiego spektrum możliwych sytuacji spotkaniowych.

4.1. Zakres badań symulacyjnych

Zgodnie z przedstawioną metodą wyznaczania CADCA, w przypadku spotkania dwóch poruszających się obiektów, za każdym razem statek własny (OS) realizował pojedynczy manewr wymijający (ang. *single action*) na wskazaną burtę, podczas gdy statek obcy (TT) utrzymywał swój kurs i prędkość. Symulacje realizowane były dla różnych sytuacji spotkaniowych, parametrów manewru wymijającego oraz warunków falowych. Po zrealizowaniu zwrotu o zaplanowaną zmianę kursu, statek własny utrzymywał kurs końcowy oraz napór pędnika w taki sposób, by zgodnie z dynamicznym równaniem ruchu, powrócić do zadanej w scenariuszu prędkości początkowej. Po zrealizowaniu manewru wymijającego, kurs i prędkość statku własnego były utrzymywane aż do chwili, w której możliwe było rozminięcie się statków.

Ze względu na modelowanie sytuacji spotkaniowej statków przy istniejących na akwenu symulacyjnym zakłóceniach środowiskowych, konieczne było ujednoczenie kierunku falowania. Było to konieczne, ponieważ użyty do badań model ruchu statku *LaiDyn*, wykorzystuje konwencję kierunku rozchodzenia się fali przedstawioną w Rozdziale 3.4.1 (Rysunek 26), tj. wskazuje względny kierunek oddziaływania fali na kadłub (μ). Dlatego też, należało odpowiednio dopasować kąt μ w taki sposób, by względne kierunki natarcia fali uwzględniały kursy każdego ze statków na początku symulacji. W przypadku, gdy nie było możliwe znalezienie trajektorii statku pasującej dokładnie do symulowanej sytuacji spotkaniowej (ze względu na ograniczony zbiór rozpatrywanych kierunków fali), dobierano trajektorię dla najbliższego dostępnego kierunku natarcia fali. Dzięki dopasowywaniu względnych kierunków, warunki falowe były relatywnie spójne, a kierunek dostatecznie ujednoczony na całym akwenu symulacyjnym.

W celu wybrania reprezentatywnych warunków falowych, wysokości fali znacznej (H_S) użyte w badaniach symulacyjnych wynikały z pomiarów wieloletnich, zrealizowanych z wykorzystaniem boi pogodowych zainstalowanych na Morzu Bałtyckim (Pettersson i in., 2021). Ostatecznie, wybrano trzy średnie wartości H_S , odpowiadające dwóm typowym (0,9 m oraz 1,8 m) oraz jednej maksymalnej wysokości fali (4,3 m). Dla typowych wysokości fali znacznej, wybrano średnie wartości odnotowane na południowym Bałtyku w miesiącach letnich (czerwiec-lipiec) oraz jesiennych (październik-listopad). Ze względu na brak informacji o uśrednionej, maksymalnej wartości H_S dla południowego Bałtyku, wykorzystano wysokość odnotowaną na stacji pomiarowej zainstalowanej w Basenie Arkońskim (Pettersson i in., 2021).

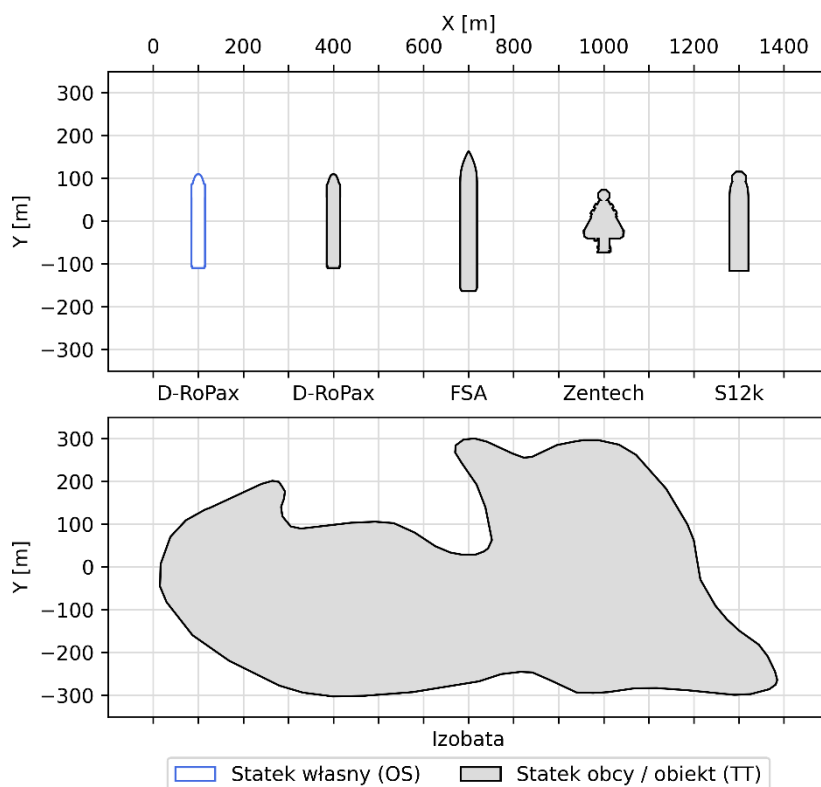
4.1.1. Charakterystyka wykorzystanych obiektów

Do realizacji badań wykorzystano jeden model statku własnego – dużą jednostkę służącą do przewozu pasażerów oraz ładunków tocznych (Ro-Pax). W celu sprawdzenia różnych obiektów charakterystycznych, do badań symulacyjnych wybrano zarówno typowe przeszkody stacjonarne (platforma i statek wiertniczy, izobata bezpieczeństwa), jak i statki w drodze (bliźniacza jednostka typu Ro-Pax oraz duży statek wycieczkowy). Taki dobór przeszkód pozwolił na poddanie analizie spektrum przeszkód o regularnym i nieregularnym kształcie, a także zróżnicowanej wielkości, co pozwoliło odwzorować zestaw obiektów, które można spotkać podczas żeglugi w warunkach rzeczywistych.

Podstawową charakterystykę statków i obiektów wybranych do przeprowadzenia badań symulacyjnych zestawiono w Tabeli 1, podczas gdy rzut ich obwiedni na płaszczyznę przedstawiono na Rysunku 28.

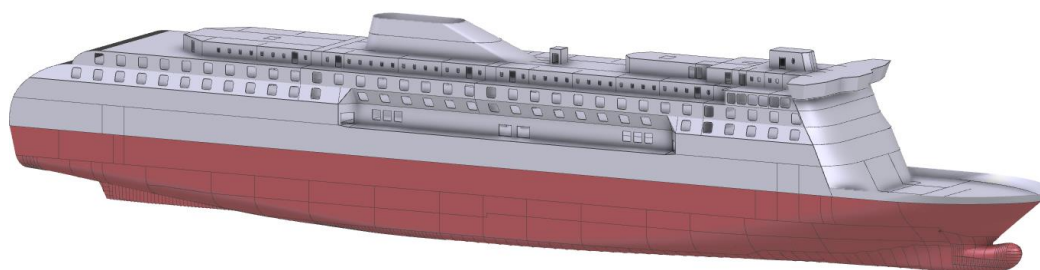
Tabela 1. Charakterystyka obiektów wybranych do badań symulacyjnych

	Statek własny	Cel (statek / obiekt)				
Nazwa	D-RoPax	D-RoPax	FSA	Zentech	S12k	Izobata
Obiekt	Statek typu Ro-Pax	Statek typu Ro-Pax	Statek wycieczkowy	Platforma wiertnicza	Statek wiertniczy	Płycizna na podejściu do portu Nowy Jork
Rodzaj	Ruchomy	Ruchomy	Ruchomy	Stacjonarny	Stacjonarny	Stacjonarny
Kształt	Kadłub (regularny)	Kadłub (regularny)	Kadłub (regularny)	Trójkątny (nieregularny)	Kadłub (regularny)	Podłużny (nieregularny)
Długość (całkowita)	219,2 m	219,2 m	327,0 m	146,0 m	232,9 m	1370,0 m
Szerokość (całkowita)	30,0 m	30,0 m	37,4 m	89,6 m	42,0 m	603,0 m



Rysunek 28. Zwymiarowane obrysy obiektów wybranych do badań symulacyjnych

Jednostka *D-RoPax* wybrana do badań w roli statku własnego oraz obcego, to jeden z modeli promów pasażersko-samochodowych fińskiej firmy NAPA¹. Kadłub ma 219,2 m długości całkowitej, długość między pionami wynosi 207,5 m, przy 30 m szerokości i 7,2 m projektowego zanurzenia statku (Hirdaris i in., 2019). Wizualizację kadłuba modelu NAPA *D-RoPax* przedstawiono na Rysunku 29.



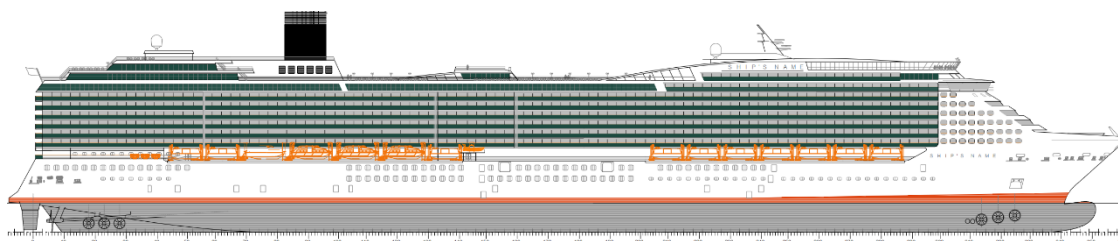
Rysunek 29. Model statku *D-RoPax* projektu firmy NAPA wykorzystany w badaniach symulacyjnych (Hirdaris i in., 2019)

Drugim statkiem wykorzystanym w badaniach jako statek w drodze jest duży, nowoczesny wycieczkowiec oznaczany na potrzeby dysertacji jako FSA (Floodstand-A)². Jednostka to tzw. *Post-Panamax* (Rysunek 30) ze względu na wymiary przekraczające

¹ Firma NAPA specjalizuje się w projektowaniu statków, tworzeniu kalkulatorów ładunkowych oraz systemów wspomaganie decyzji, ze szczególnym uwzględnieniem statków pasażerskich.

² Koncepcję statku stworzono w ramach europejskiego projektu badawczego *Floodstand*, którego jednym z celów było zaproponowanie dwóch projektów jednostek pasażerskich (model A i B) (Kujanpää & Routi, 2009).

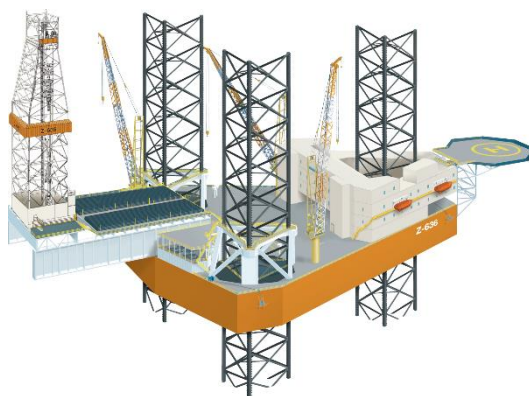
dopuszczalne parametry statku mogącego pokonać Kanał Panamski. FSA ma 327 m długości całkowitej, 308 m długości między pionami, 37,4 m szerokości kadłuba i 8,8 m zanurzenia projektowego (Hirdaris i in., 2019).



Rysunek 30. Model statku Floodstand-A (FSA) wykorzystany w badaniach symulacyjnych (Kujanpää & Routi, 2009)

Przeszkody stacjonarne wybrane do badań to zarówno obiekty tzw. sektora *offshore* jak i obiekty naturalne. Do budowli hydrotechnicznych należy samopodnośna platforma wiertnicza (ang. *jack-up drilling rig*) Z-636 projektu firmy Zentech (Rysunek 31 - lewo), o długości kadłuba 87,5 m i 86,6 m szerokości (Zentech Inc., 2014).

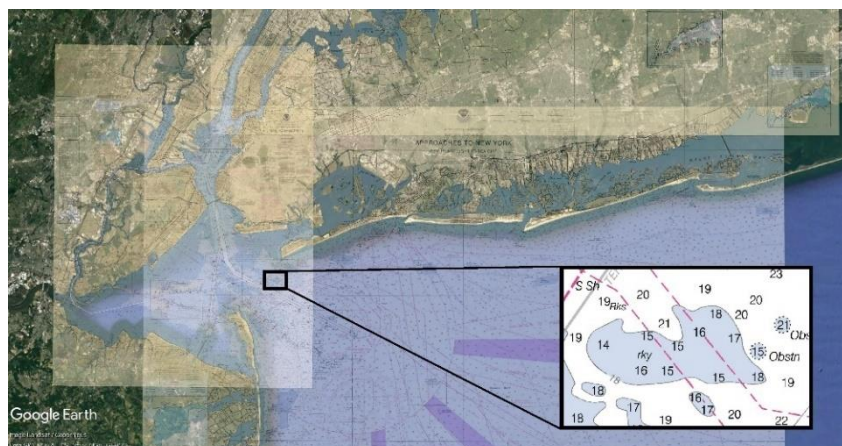
Jako przeszkodę stacjonarną o regularnym kształcie wybrano statek wiertniczy SAIPEM 12000 (oznaczony w dysertacji jako S12k), będący jednostką klasy *ultra deepwater drillship* (Rysunek 31 - prawo). Statek ma 228 m długości całkowitej przy 42 m szerokości i zanurzeniu eksploatacyjnym 12 m (Saipem S.p.A., 2018).



Rysunek 31. Obiekty wybrane jako sztuczne przeszkody stacjonarne – platforma wiertnicza Zentech Z-636 (Zentech Inc., 2014) (po lewej) oraz statek wiertniczy Saipem 12000 (Saipem S.p.A., 2018) (po prawej)

Ostatnią przeszkodą wybraną do badań symulacyjnych jest obwiednia odpowiadająca kształtem izobacie 18 ft. znajdującej się na północny-wschód od toru podejściowego do Nowego Jorku tzw. *Ambrose Channel*. Pomimo, iż przedstawiona metoda wyznaczania CADCA nie uwzględnia obecnie głębokości występujących na akwenie symulacyjnym, to wykorzystanie obiektu tego typu pozwoliło zasymulować spotkanie statku własnego z wirtualną *izobata bezpieczeństwa* interpretowaną jako przeszkodę dwuwymiarową.

W porównaniu do pozostałych obiektów stacjonarnych wykorzystanych w badaniach symulacyjnych, wybrana izobata jest największą przeszkodą (prawie 4 km obwodu i ponad 55 ha powierzchni) o nieregularnym kształcie. Płyciznę wybraną jako wzór do zamodelowania izobaty bezpieczeństwa użytej w badaniach symulacyjnych zaprezentowano na tle zdjęć satelitarnych (Google LLC, 2022) oraz nałożonych rastrowych map nawigacyjnych NOAA (ang. *National Oceanic and Atmospheric Administration*) (Office of Coast Survey NOAA, 2022) na Rysunku 32.



Rysunek 32. Wybrana izobata 18 ft. na podejściu do portu Nowy Jork - lokalizacja na mapach nawigacyjnych (Office of Coast Survey NOAA, 2022) oraz zdjęciach satelitarnych (Google LLC, 2022)

4.1.2. Scenariusze symulacyjne

Zrealizowane badania symulacyjne miały na celu zweryfikowanie wpływu sytuacji spotkaniowej, parametrów manewru wymijającego oraz występujących na akwenu zakłóceń środowiskowych na dynamiczny graniczny obszar manewrowy CADCA wybranego statku typu Ro-Pax. Z tego względu, wybrano scenariusze symulacyjne pozwalające określić zarówno kompleksowe obszary niezależne od kursów rzeczywistych (uwzględniające wszystkie istniejące możliwości), jak i wybrane charakterystyczne scenariusze spotkaniowe (uwzględniające wybrany kurs statku $\pm 10^\circ$). Podejście niezależne od kursów jednostek zostało wybrane ze względu na możliwość obiektywnego porównania granic, kształtów i wyznaczonych powierzchni CADCA. Obszar skonstruowany w taki sposób wskazuje na najmniej korzystny scenariusz, ponieważ wykorzystuje największą wartość MDTC spośród wszystkich zasymulowanych kursów statku. Dzięki temu, możliwa jest ocena faktycznego wpływu analizowanych parametrów manewru wymijającego oraz zakłóceń pogodowych, pomijając przy tym wpływ kształtu przeszkody i początkowego kursu statku własnego, determinującego niewielki zbiór rozwiązań geometrycznych.

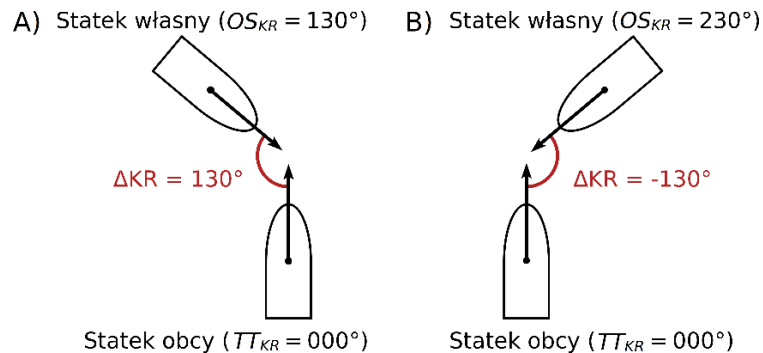
Liczba wybranych do badań obiektów, analizowanych parametrów manewru wymijającego oraz zakłóceń środowiskowych, a także rozpatrywane kursy statku własnego skutkowały realizacją 2 903 040 scenariuszy symulacyjnych. Wyjściowo, dla każdego ze scenariuszy realizowane było średnio ~140 pojedynczych symulacji, wynikających z liczby początkowych układów pozycjonowania statku własnego oraz przeszkody.

Ze względu na modyfikowanie wartości kursu początkowego statku własnego, przeszkoda zawsze była skierowana na północ ($TT_{KR} = 000^\circ$), by dodatkowo nie dublować przypadków geometrycznych, wynikających z uwzględnionej już wcześniej różnicy kursów ΔKR . Wartość ta jest wyliczana z zależności przedstawionej w Równaniu 8 i zwizualizowana na Rysunku 33. W czasie wykonywania symulacji modyfikowanie kursów obu statków nie było konieczne, ponieważ w wykorzystanym oprogramowaniu służącym wyznaczaniu CADCA zarówno falowanie, jak i kąty kursowe na przeszkodę związane są z kierunkami względnymi, a nie rzeczywistymi.

$$\Delta KR = \begin{cases} OS_{KR}, & \text{dla } OS_{KR} \leq 180^\circ \\ -(TT_{KR} - OS_{KR}), & \text{dla } OS_{KR} > 180^\circ \end{cases} \quad (8)$$

gdzie:

ΔKR jest względną różnicą kursów rzeczywistych obu statków. OS_{KR} jest kursem początkowym statku własnego, a $TT_{KR} = 360^\circ$ jest kursem północnym statku obcego.



Rysunek 33. Różnica kursów ΔKR pomiędzy statkami dla dwóch przykładowych sytuacji spotkaniowych

Specyfikacja zrealizowanych scenariuszy symulacyjnych z wyszczególnieniem wszystkich analizowanych parametrów obejmowała:

- Parametry 1 statku własnego:
 - 360 kursy rzeczywiste $\{OS_{KR} \in \mathbb{Z} \mid 000^\circ \leq OS_{KR} < 360^\circ\}$
 - 2 prędkości początkowe $OS_V \in \{16 \text{ w.}, 20 \text{ w.}\}$
 - 8 kątów wychylenia steru $OS_{ster} \in \{\pm 5^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 35^\circ\}$
 - 3 planowane zmiany kursu $OS_{\Delta K} \in \{20^\circ, 40^\circ, 60^\circ\}$

- Parametry 5 przeszkód:
 - 1 kurs rzeczywisty $TT_{KR} \in \{000^\circ\}$
 - 2 prędkości 2 statków obcych $TT_V \in \{16 w., 20 w.\}$
 - 1 prędkość 3 obiektów stacjonarnych $TT_{V_0} \in \{0 w.\}$
- Parametry falowania:
 - 3 wysokości fali znacznej $H_S \in \{0,9 m, 1,8 m, 4,3 m\}$
 - 8 względnych kierunków fali $\mu \in \{0^\circ, \pm 45^\circ, \pm 90^\circ, \pm 135^\circ, 180^\circ\}$

Spośród powyższego, obszernego zbioru zrealizowanych badań, do szczegółowej analizy wybrano scenariusze symulacyjne pozwalające zweryfikować różne warianty sytuacji spotkaniowej oraz przyszłe potencjalne zastosowania aplikacyjne CADCA. Wyboru dokonano w oparciu o zgrubną analizę wyników cząstkowych tak, by wyselekcjonować najbardziej charakterystyczne, reprezentatywne oraz interesujące przypadki nawigacyjne. W celu ułatwienia prezentacji wyników, które zostały przeanalizowane w dalszych częściach niniejszego rozdziału, w Tabeli 2 zamieszczono charakterystykę scenariuszy symulacyjnych wybranych do szczegółowej analizy w dalszych częściach niniejszego rozdziału.

W trakcie całych badań zrealizowano ponad 410 mln (410 664 960) pojedynczych symulacji służących wyznaczeniu wartości MDTC. Ze względu na konieczność wykonania obszernych zadań obliczeniowych, konieczne było zrównoleglenie symulacji pomiędzy rdzeniami logicznymi procesora. Dzięki temu, możliwe było dalsze dostosowanie oprogramowania służącego do symulacyjnego wyznaczania CADCA i ostatecznie wykorzystanie do obliczeń *Komputerów Dużej Mocy* (KDM) należących do *Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej CI TASK*.

Całkowity czas realizacji wszystkich wykonanych symulacji wyniósł 826 782 420,6 s. Oznacza to, że w sytuacji, gdyby symulacje były realizowane jednowątkowo (przy założeniu uzyskanego w trakcie badań średniego czasu trwania pojedynczej symulacji), niezbędne byłoby prowadzenie obliczeń nieprzerwanie przez ponad 26 lat. Zrównoleglenie obliczeń i wykorzystanie KDM pozwoliło zrealizować badania symulacyjne w niecałe 17 dni, przyjmując średnią alokację zasobów i czas kolejkowania zadań. Oznacza to zredukowanie czasu obliczeń o ponad 99,8%.

Tabela 2. Charakterystyka scenariuszy symulacyjnych wybranych do analizy

Scenariusz	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
Uzyskane CADCA	Rysunek 34	Rysunek 35	Rysunek 37	Rysunek 38	Rysunek 40	Rysunek 41	Rysunek 43	Rysunek 44	Rysunek 47	Rysunek 48	Rysunek 49	Rysunek 50
Cel	każdy											
Kurs statku własnego [°]	025, 180, 270, każdy	025, 180, 270, każdy	każdy	025	każdy	każdy	każdy	270	każdy	180	każdy	każdy
Rozpiętość sektora CADCA (kurs $\pm 10^\circ$) [°]	21 i 360	21 i 360	360	21	360	360	360	21	360	21	360	360
Prędkość statku własnego [w.]	20	20	20	20	16, 20	16, 20	20	20	20	20	16	16
Kąt wychylenia steru [°]	5	35	5, 10, 15, 35	5, 10, 15, 35	5	5	15	15	15	15	10	10
Kierunek zwrotu	PB	PB	LB i PB	LB i PB	LB i PB	LB i PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
Planowana zmiana kursu [°]	20	60	60	60	60	60	20, 40, 60	20, 40, 60	40	40	60	60
Kurs przeszkody [°] (zorientowanie)	000 (północ)											
Prędkość statku obcego [w.]	16	20	16	16	16	20	20	20	20	20	16	16
Wysokość fali znacznej H_s [m]	0,9	4,3	4,3	4,3	0,9	0,9	1,8	1,8	0,9, 1,8, 4,3	0,9, 1,8, 4,3	1,8	4,3
Względny kąt natarcia fali na kadłub μ [°]	-45	-45	0	0	135	135	180	180	-90	-90	0, ± 45 , ± 90 , ± 135 , 180	0, ± 45 , ± 90 , ± 135 , 180

4.2. Wyniki i analiza badań symulacyjnych

W celu zaprezentowania dynamicznego charakteru CADCA, rozumianego jako zmienność wymiarów oraz kształtu wymaganego obszaru manewrowego statku w sytuacji spotkaniowej, analizę uzyskanych wyników podzielono na trzy odrębne części. Każda z nich została zorientowana na zbadanie wpływu odrębnej grupy uwzględnianych parametrów symulacyjnych, tj. charakterystyki sytuacji spotkaniowej, manewru wymijającego oraz wpływu falowania oddziałującego na statek, na właściwości CADCA. Ze względu na znaczną objętość, grupę związaną z parametrami manewru wymijającego podzielono dodatkowo na analizę wpływu kąta wychylenia płetwy sterowej, prędkości początkowej statków oraz planowanej zmiany kursu.

4.2.1. Analiza wpływu sytuacji spotkaniowej na CADCA

Do zbadania wpływu sytuacji spotkaniowej, przez którą rozumie się wzajemne położenie obiektów (geometrię spotkania), rodzaj napotykanego przeszkody, a także jej kształt i wymiary wybrano głównie scenariusze symulacyjne *S1* oraz *S2* scharakteryzowane w Tabeli 2.

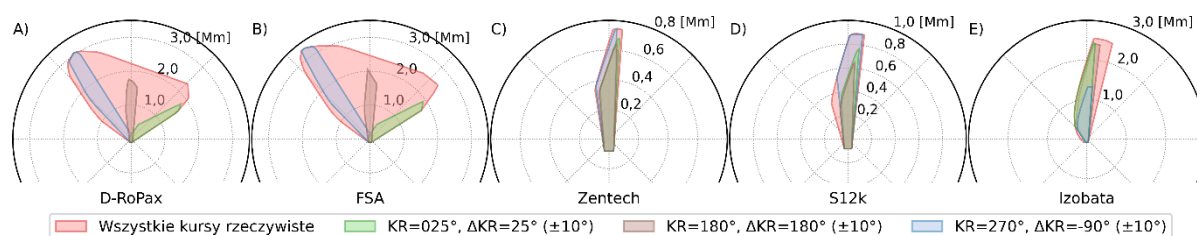
Scenariusz *S1* reprezentuje korzystne, z punktu widzenia eksploatacji statku własnego, rozwiązanie sytuacji nadmiernego zbliżenia. Obejmuje to najmniejsze rozpatrywane wychylenie steru na prawą burtę, nieznaczne odchylenie statku (20°) od kursu początkowego, większą od statku obcego prędkość postępową (20 w. vs. 16 w.), jak również korzystne warunki pogodowe ($H_S=0,9$ m).

Scenariusz *S2* stanowi całkowite przeciwieństwo opisanych powyżej parametrów symulacyjnych. Przyjęto w nim realizację typowego manewru ostatniej szansy (35° na prawą burtę, znaczna, 60-stopniowa zmiana kursu), przy jednakowej prędkości statku własnego i obcego (20 w.). Dodatkowo, manewr wymijający realizowany w tym scenariuszu jest wykonywany przy niekorzystnych warunkach zakłóceń zewnętrznych – fala baksztagowa, $H_S=4,3$ m.

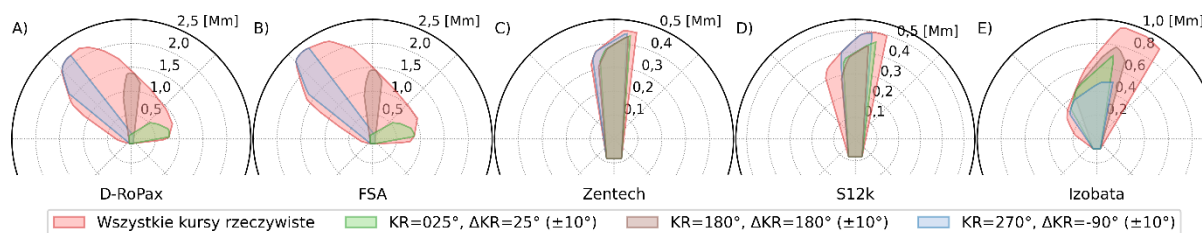
W obu przypadkach, obszary graniczne zaprezentowane na Rysunku 34 i Rysunku 35, zostały przedstawione w formie odrębnych serii danych dla wybranych sektorów CADCA, wynikających z początkowego kursu statku własnego ($OS_{KR} = 025^\circ$ - zielony, $OS_{KR} = 025^\circ$ - pomarańczowy, $OS_{KR} = 270^\circ$ - niebieski) oraz przypadku uwzględniającego wszystkie

możliwe kursy statku własnego i jednocześnie różnice kursów ΔKR (czerwony). Dzięki zmianie wyłącznie jednego parametru, tj. kursu początkowego statku własnego (sektora CADCA), możliwa była ocena wpływu wzajemnego położenia kąowego obu obiektów na rozmiar wymaganego obszaru manewrowego. Prezentacja wyników dla różnych przeszkód i jednakowego scenariusza symulacyjnego, pozwala równocześnie zweryfikować wpływ rodzaju napotkanego obiektu (przeszkoda stacjonarna lub statek w drodze) oraz jego rozmiaru i kształtu na wielkość i przebieg obwiedni CADCA.

Konwencję jednoczesnej prezentacji wyników dla każdej z pięciu wykorzystanych w badaniach przeszkód utrzymano również w kolejnych częściach niniejszego rozdziału. Dzięki temu, wpływ rodzaju oraz kształtu napotkanego obiektu na CADCA, można było ocenić również podczas dalszych etapów analizy wyników badań.



Rysunek 34. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S1 dla różnych kursów początkowych statku własnego



Rysunek 35. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S2 dla różnych kursów początkowych statku własnego

Jak wynika z obszarów przedstawionych na Rysunku 34 i Rysunku 35, CADCA różni się diametralnie w rozumieniu uzyskanych kształtów i rozmiarów obwiedni, w zależności od napotkanego obiektu. Dotyczy to zarówno kształtu, rozmiaru, jak i rodzaju napotkanej przeszkody. W obu scenariuszach (S1 i S2), wymiary CADCA uzyskane dla statków w drodze były zdecydowanie większe od wymiarów obszarów granicznych wyznaczonych dla przypadku alizji (napotkania przeszkody stacjonarnej). Porównując CADCA uwzględniające wszystkie różnice kursów pomiędzy statkami (kolor czerwony), obszar wyznaczony dla napotkania dużego wycieczkowca (FSA) w drodze, w przypadku scenariusza S1 wymagał łącznej powierzchni manewrowej wynoszącej $6,9 \text{ Mm}^2$, podczas gdy największy wyznaczony obszar dla napotkania przeszkody stacjonarnej (izobaty bezpieczeństwa) wynosił $1,31 \text{ Mm}^2$. W pierwszym przypadku, maksymalne wyznaczone MDTC wyniosło $3,31 \text{ Mm}$ na kącie

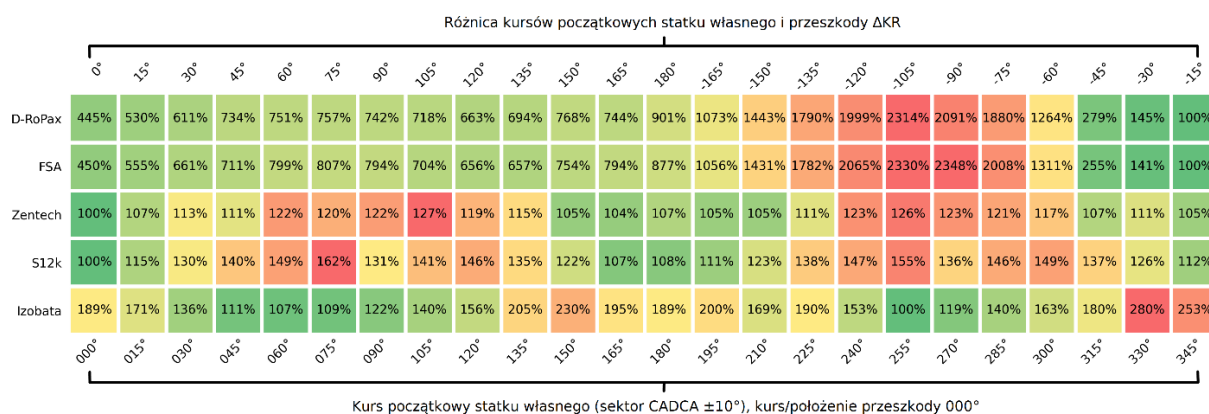
kursowym $\alpha_K \cong 330^\circ$, podczas gdy dla izobaty, maksimum MDTC osiągnięto w odległości 2,56 Mm na $\alpha_K \cong 010^\circ$. W przypadku CADCA wyznaczonych w ramach wyników w scenariuszu S2, ogólna tendencja w uzyskanych rozmiarach i kształcie pomiędzy jednostkami w drodze i przeszkodami stacjonarnymi została utrzymana, jednak CADCA są proporcjonalnie mniejsze (3,34 Mm dla FSA oraz 0.41 Mm dla izobaty bezpieczeństwa). Wynika to przede wszystkim z realizacji manewru powodującego znaczne zacieśnienie cyrkulacji statku podczas zwrotu (maksymalne wyłożenie steru na burtę). Skutkowało to szybszym rozwiązaniem sytuacji spotkaniowej i ostatecznie mniejszym wymaganym obszarem manewrowym.

Analiza uzyskanych kształtów CADCA związana z rodzajem napotkanej przeszkody wskazuje na zdecydowanie większy wymagany obszar manewrowy mający swoje wyraźne maksimum MDTC zlokalizowane przed lewym trawersem ($\sim 60^\circ$ LB), w przypadku napotkania statku w drodze. W przypadku alizji (sytuacji spotkaniowej z przeszkodą stacjonarną), uzyskane CADCA są zdecydowanie mniej rozbieżne dla różnych kursów początkowych statku własnego. Podczas napotkania niewielkich przeszkód stacjonarnych, jak platforma wiertnicza (Zentech), obszary CADCA uzyskane dla różnych kursów początkowych statku OS_{KR} praktycznie nie różnią się od siebie, niezależnie od analizowanego scenariusza symulacyjnego. Kolejna obserwacja związana z kształtem przeszkody dotyczy wymiarów obiektu. W przypadku przeszkód stacjonarnych, które są wyraźnie podłużne (jak statek wiertniczy S12k czy izobata bezpieczeństwa), uzyskane obszary poza większymi wartościami MDTC, cechują się również zwiększoną rozpiętością kątową wymaganego obszaru manewrowego. Dodatkowo, w tych przypadkach zauważalna jest tendencja do uzyskiwania maksymalnych MDTC w kątach kursowych $\sim 10^\circ$ prawej burty.

Analiza otrzymanych sektorów CADCA dla różnych kursów statku własnego wskazuje na znaczne rozbieżności w obwiedniach obszarów. Dotyczy to przede wszystkim przypadków napotkania innego statku w drodze lub podłużnej, nieregularnej przeszkody stacjonarnej o znacznych rozmiarach. W zależności od kursu początkowego statku własnego, zarówno położenie sektorów CADCA dla zadanych parametrów symulacyjnych, jak i uzyskane wartości maksymalnego MDTC różnią się znacznie. W przypadku spotkania dwóch statków D-RoPax, w scenariuszu S1, najmniejszy obszar manewrowy ($0,42 \text{ Mm}^2$) był wymagany w przypadku różnicy kursów obu statków $\Delta KR = 180^\circ$, tj. w przypadku, gdy obie jednostki szły wprost na siebie. Przeciwnie, największa wymagana powierzchnia manewrowa (z wyłączeniem obszaru obejmującego wszystkie dostępne możliwości) wynosiła $1,14 \text{ Mm}^2$ przy maksymalnym MDTC sięgającym 3,05 Mm i została wyznaczona w przypadku różnicy kursów $\Delta KR = -90^\circ$ (statek

obcy zlokalizowany z lewej burty statku własnego i skierowany prostopadłe do niego: $OS_{KR} = 270^\circ, TT_{KR} = 000^\circ$). Należy jednocześnie zauważyć, że kształty wszystkich CADCA uzyskanych w scenariuszach ze statkami obcymi są ze sobą porównywalne (nieznaczne różnice pomiędzy statkami D-RoPax a FSA w *S1* i *S2* dotyczą wyłącznie rozmiarów CADCA, są natomiast pomijalne w aspekcie kształtów obwiedni).

Jak wykazano, zarówno rodzaj, jak i wymiary oraz kształt napotykaney przeszkody wpływają bezpośrednio na wymagany obszar manewrowy statku. CADCA, ze względu na swój dynamiczny charakter, zmienia swoje granice w zależności od przeszkody dla tych samych parametrów manewru wymijającego. Zmienność CADCA ze względu na sytuację spotkaniową, zaprezentowano na Rysunku 36 w formie mapy ciepła dla wyznaczonych powierzchni obszarów manewrowych. Wyniki przedstawiono dla każdego z napotkanych obiektów (rzędy) oraz sektorów CADCA zbudowanych w oparciu o różne kursy początkowe statku własnego (kolumny). Najmniejsza obliczona powierzchnia obszaru posłużyła jako poziom odniesienia do zwizualizowania różnic pomiędzy wielkościami CADCA dla każdej przeszkody z osobna. Do przedstawienia wyników wybrano scenariusz *S2*, w którym obie jednostki poruszają się z prędkością 20 w., a zwrot jest realizowany poprzez wychylenie płetwy sterowej $35^\circ PB$ do momentu osiągnięcia zmiany kursu o 60° . Wysokość fali znacznej na akwenu symulacyjnym wynosiła 4,3 m, a kąt natarcia fali na kadłub $\mu = -45^\circ$.



Rysunek 36. Porównanie wymaganych powierzchni CADCA w zależności od kursu statku własnego (kolumny) dla każdej z przeszkód (rzędy)

Zaprezentowane wyniki wskazują na zdecydowanie różną, konieczną do uwzględnienia przestrzeń manewrową (zarówno w rozumieniu wymaganej powierzchni, jak i kształtu CADCA poprzez różnorodny rozkład maksymalnych wartości MDTC, w zależności od analizowanego scenariusza symulacyjnego). Dotyczy to nie tylko różnic występujących pomiędzy scenariuszami kolizji i alizji, ale także geometrii sytuacji spotkaniowej, tj. różnicy kursów (ΔKR) pomiędzy statkiem własnym i obcym. Jak widać, po rozkładzie powierzchni

CADCA, w ujęciu globalnym (biorąc pod uwagę wszystkie przeszkody), nawet przy założeniu jednego kursu statku obcego ($TT_{KR}=000^\circ$) nie jest możliwe jednoznaczne wskazanie najbardziej niebezpiecznych kursów początkowych statku własnego (najgorszych przypadków), ze względu na ich zróżnicowanie w zależności od typu, wymiarów i kształtu przeszkody. W przypadku napotkania statku w drodze, maksima można zaobserwować w sektorach wynikających z kursów początkowych (OS_{KR}) oscylujących w granicach około $240^\circ-270^\circ$, $\Delta KR \in (-120, -90)$, czyli w scenariuszach, w których statek własny znajduje się na prawej burcie statku obcego na początku sytuacji spotkaniowej, a realizując zadany zwrot w prawo wpływa pod dziób statku obcego. W skrajnych przypadkach, różnica pomiędzy powierzchnią wymaganych obszarów manewrowych wyznaczonych dla różnych kursów początkowych i tego samego napotkanego obiektu sięga ponad 2000%.

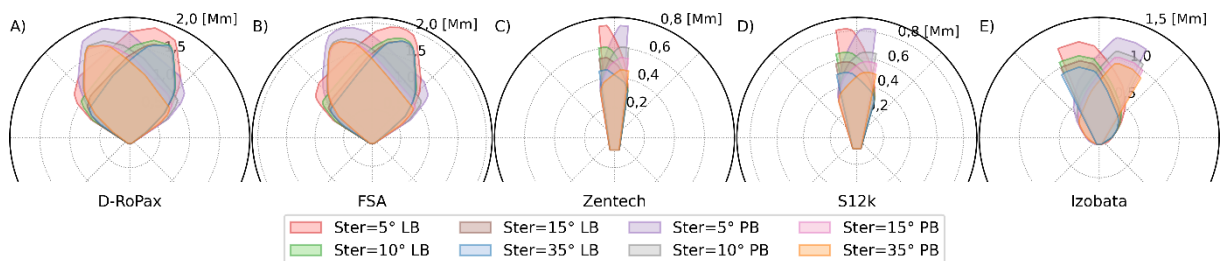
W przypadku sytuacji spotkaniowych z przeszkodami stacjonarnymi, zróżnicowanie w wielkości wymaganych powierzchni manewrowych jest zdecydowanie mniejsze niż w przypadku napotkania obiektów ruchomych (do 180% różnicy pomiędzy skrajnymi powierzchniami sektorów CADCA wyznaczonych dla izobaty). Jednakże, pod względem rozproszenia wartości i maksimów wyznaczonych w oparciu o wskazany kurs początkowy statku, uzyskane wartości są mniej skoncentrowane wokół jednego sektora kąтового. Wskazuje to bezpośrednio na wpływ nie tylko rodzaju przeszkody (ruchoma lub stacjonarna), ale także jej kształtu i rozmiaru na wyznaczony graniczny obszar manewrowy.

4.2.2. Analiza wpływu manewru wymijającego na CADCA – wychylenie steru

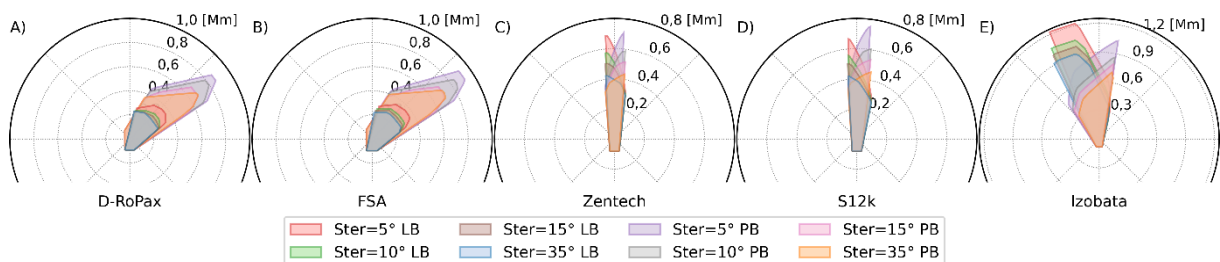
W przypadku wpływu parametrów manewru wymijającego na rozmiar i kształt CADCA, analizę podzielono na trzy pomniejsze etapy. Scenariusze *S3* i *S4* zostały wybrane w celu oceny wpływu wielkości kąta wychylenia płetwy sterowej oraz burty, na którą realizowany jest manewr, na wymagany obszar manewrowy. W przypadkach *S5* oraz *S6*, parametrem, który jest zmieniany w trakcie symulacji jest prędkość początkowa statku oraz kierunek realizacji zwrotu. Dwa ostatnie przypadki sprawdzające wpływ parametrów manewru wymijającego, tj. *S7* oraz *S8* pozwalają ocenić związek pomiędzy wielkością planowanego zwrotu (odchylenia jednostki od kursu początkowego) a rozmiarem i kształtem obwiedni CADCA.

W scenariuszach pozwalających ocenić wpływ wielkości wychylenia płetwy sterowej (*S3* oraz *S4*) na CADCA (przedstawionych na Rysunku 37 i Rysunku 38), statek własny w obu przypadkach przemieszcza się z większą prędkością (20 w.) niż statek obcy (16 w.). Pomimo

tej korzystnej sytuacji, manewry wymijające realizowane są w obecności znacznych zakłóceń zewnętrznych ($H_S=4,3$ m, $\mu=0^\circ$), a sam manewr realizowany jest do czasu osiągnięcia największej analizowanej zmiany kursu (60°), z wykorzystaniem różnych kątów wychylenia płetwy sterowej wykładanej na każdą z burt. W przypadku scenariusza *S3* analizowane są wszystkie możliwe kursy statku, co pozwala na uwzględnienie i porównanie (również pomiędzy napotkanymi przeszkodami) najgorszych przypadków wynikających z geometrii sytuacji spotkaniowej. W przypadku obszarów przedstawionych na Rysunku 38 (*S4*), wybrany został pojedynczy sektor ($OS_{KR} = 025^\circ, \Delta KR = 25^\circ$), w celu zaprezentowania sytuacji, w których zmiana kierunku realizacji zwrotu skutkuje znacznie mniejszym wymaganym obszarem manewrowym.



Rysunek 37. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu *S3* dla różnych wychyleń płetwy sterowej

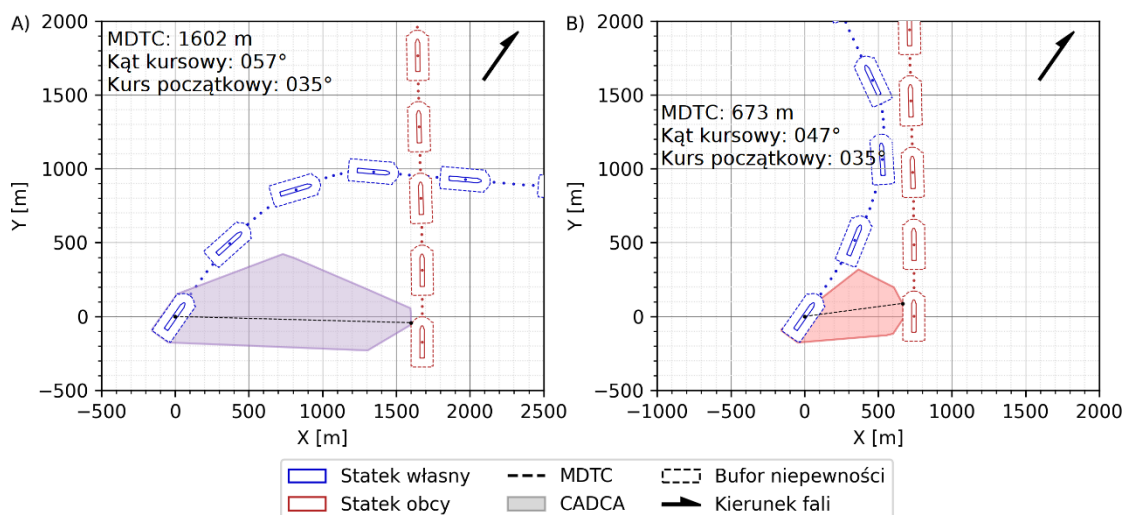


Rysunek 38. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu *S4* dla różnych wychyleń płetwy sterowej

Jak zaprezentowano na Rysunkach 37 oraz 38, zrealizowane badania symulacyjne potwierdziły, zgodnie z przewidywaniami, że im większe wychylenie steru, tym mniejszy wymagany obszar manewrowy (w przypadku porównywania różnych wielkości wychyleń steru na tę samą burtę). Wynika to przede wszystkim z zacieśnienia cyrkulacji statku podczas zwrotu, w związku z większym wychyleniem płetwy sterowej, co skutkuje mniejszą uzyskaną średnią taktyczną cyrkulacji statku.

W scenariuszu *S3*, różnica w powierzchniach uzyskanych CADCA dla wychylenia steru 5° oraz 35° waha się od 51% (FSA) do nawet 67% (Zentech). W przypadku scenariusza *S4*, dla którego wyniki przedstawiono na Rysunku 38, można zaobserwować, że istnieją sytuacje spotkaniowe, dla których (ze względu na wzajemny układ kątowy oraz rodzaj napotkanego obiektu), realizacja manewru na jedną z burt jest niekorzystna, w rozumieniu wymaganego

obszaru manewrowego lub maksymalnej wyznaczonej odległości MDTC. Przykład takiej sytuacji spotkaniowej dwóch statków D-RoPax przedstawiono na Rysunku 39. Naniesiono na nim trajektorie jednostek (projekcje kadłubów zostały zsynchronizowane w czasie) dla maksymalnego MDTC uzyskanego na prawą (A) oraz lewą (B) burtę dla tego samego kursu początkowego statku własnego. Na wykresie nałożono dodatkowo CADCA, w celu zaprezentowania umiejscowienia wyniku MDTC dla analizowanej sytuacji spotkaniowej w ramach obwiedni wyznaczonego obszaru granicznego. Jak można zauważyć, ze względu na najgorszy przypadek uwzględniony później w CADCA, dla tego samego kursu rzeczywistego statku własnego, rozwiązanie sytuacji zwrotem na prawą burtę (dla analizowanych parametrów symulacyjnych), wymaga rozpoczęcia manewru prawie kilometr wcześniej, ze względu na jego realizację w kierunku utrzymującego kurs i prędkość statku obcego.



Rysunek 39. Porównanie trajektorii statków, dla których wyznaczono maksymalne MDTC dla spotkania dwóch jednostek typu Ro-Pax oraz zwrotu na prawą (A) i lewą (B) burtę w scenariuszu S4

Należy zaznaczyć, że zgodnie z założeniami CADCA przedstawionymi w Rozdziale 3.1, rozpatrywane są wyłącznie zagadnienia związane z geometrią sytuacji spotkaniowej i fizyką ruchu jednostek, a sam manewr dla wybranych parametrów brzegowych jest nadal manewrem ostatniej szansy. Dlatego też, w podobnej sytuacji zachodzącej w warunkach rzeczywistych, konieczne byłoby uwzględnienie dodatkowych czynników, takich jak interpretacja przepisów COLREG. Niemniej jednak, możliwe jest wystąpienie w rzeczywistości sytuacji przedstawionej na Rysunku 39, gdzie działając w świetle obowiązujących prawideł COLREG, realizacja zwrotu na lewą burtę byłaby nie tylko dopuszczalna, ale wręcz uzasadniona i konieczna. Z tego względu, trafnym wydaje się pomysł udostępnienia nawigatorowi dodatkowej informacji, dotyczącej możliwej realizacji zwrotu na lewą burtę również w przypadku, gdy nie jest to manewr pierwszego wyboru. Można jednak

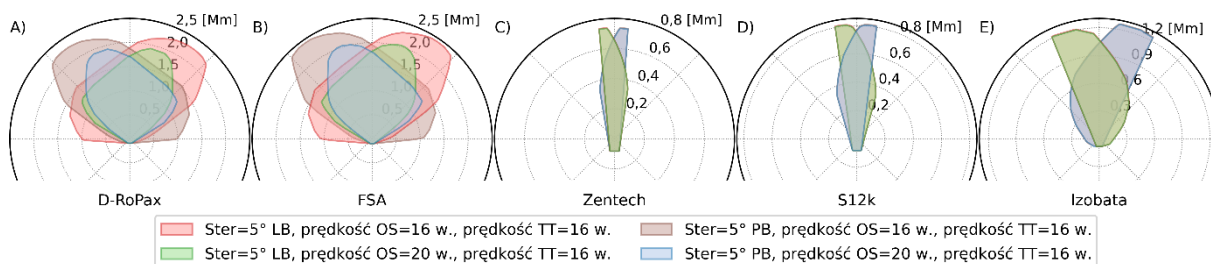
zauważyć, że dla niektórych sytuacji spotkaniowych, ze względu na niekorzystny dla statku własnego układ geometryczny, realizacja manewru ostatniej szansy na prawą burtę zwyczajnie nie może zakończyć się powodzeniem, z powodu ograniczeń manewrowych statku własnego.

W przypadku sytuacji spotkaniowych z przeszkodami stacjonarnymi dla sektora CADCA zbudowanego w oparciu o kurs wyjściowy $OS_{KR} = 025^\circ$, różnica pomiędzy realizacją zwrotu na lewą i prawą burtę nie jest tak znacząca dla dwóch statków w drodze, jednak jest ciągle zauważalna. Największe różnice pomiędzy obwiedniami CADCA uzyskanymi dla jednakowego wychylenia steru w różnych kierunkach można ponownie odnotować w przypadku napotkania przez statek przyjętej izobaty bezpieczeństwa. Wynika to z jej największych rozmiarów oraz nieregularnego, podłużnego kształtu skutkującego znacznymi dysproporcjami w uzyskanych obszarach, w porównaniu do mniejszych i bardziej proporcjonalnych przeszkód, takich jak platforma wydobywcza Zentech. W przypadku izobaty, różnica pomiędzy manewrem realizowanym poprzez wychylenie steru 35° na lewą burtę (maksymalne MDTC 9,2 kabla) wymaga niecałe 75% więcej wolnej powierzchni manewrowej, niż jednakowy zwrot wykonany na burtę prawą (maksymalne MDTC 7 kabli). W przypadku napotkania platformy Zentech, uzyskane różnice pomiędzy jednakowymi zwrotami na każdą z burt są zdecydowanie mniejsze i ze względów operacyjnych pomijalne (różnica w maksymalnym uzyskanym MDTC na każdą z burt dla zwrotu 35° wynosiła 23 m). Należy jednak zauważyć, że w przypadku platformy wiertniczej, większe wartości uzyskano dla zwrotów na prawą, a nie jak w przypadku izobaty na lewą burtę.

4.2.3. Analiza wpływu manewru wymijającego na CADCA – prędkości statków

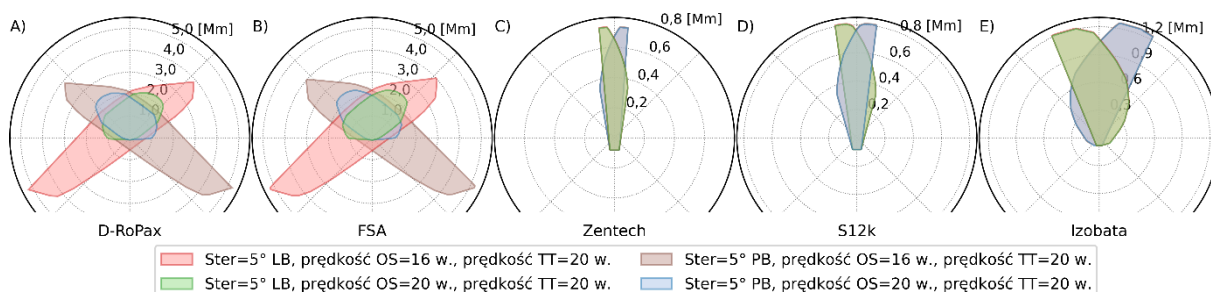
Na Rysunku 40 i Rysunku 41 przedstawiono obszary CADCA uzyskane dla scenariuszy S5 oraz S6 uwzględniających wszystkie możliwe różnice kursów pomiędzy dwoma statkami. W przypadku obszarów przedstawionych na Rysunku 40, statek obcy porusza się z prędkością 16 w., podczas gdy na Rysunku 41 realizowany scenariusz zakładał żeglugę statku obcego z prędkością 20 w. Ze względu na fakt, iż w obu przypadkach analizowano przemieszczanie się statku własnego dwoma prędkościami (16 lub 20 w.), możliwe było poddanie analizie sytuacji, w których obie jednostki płyną zarówno z jednakową, jak i różną prędkością. Taki dobór parametrów symulacyjnych skutkowało uzyskaniem CADCA w sytuacjach korzystnych z perspektywy statku własnego (gdy płynął on szybciej lub z jednakową prędkością jak przeszkoda) oraz skrajnie niekorzystnych (gdy statek własny jest doganiany przez obcy, poruszający się z większą od niego prędkością). Do analizy wybrano stosunkowo korzystną

wysokość fali skośnej (wysokość $H_s=0,9$ m, $\mu=135^\circ$), niewielkie wychylenie płetwy sterowej (5°) i znaczną zmianę kursu (60°).



Rysunek 40. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S5 dla różnych prędkości statku własnego i kierunku realizacji zwrotu

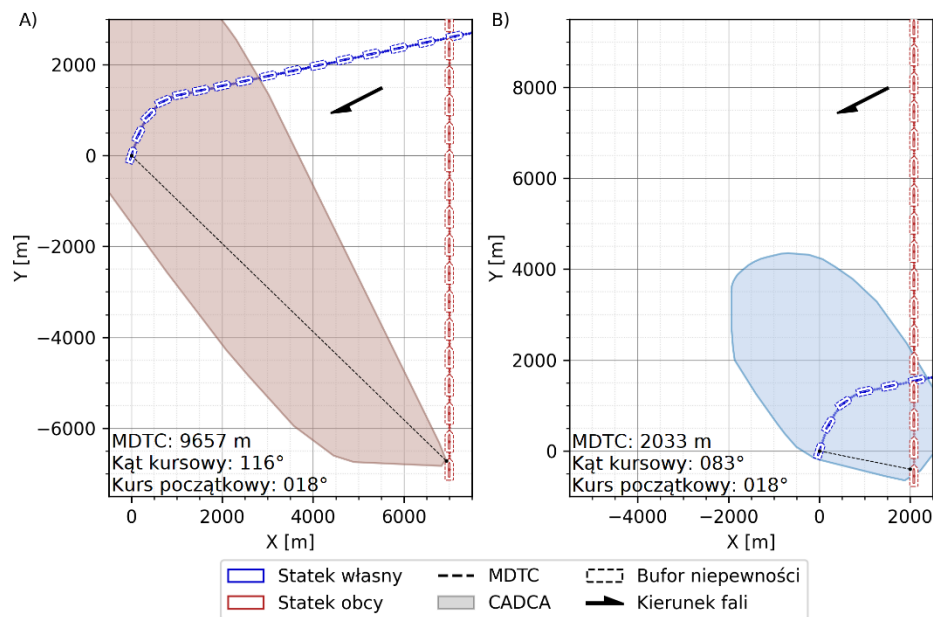
Jak widać, różnica prędkości pomiędzy przemieszczającymi się obiektami ma istotny wpływ na uzyskane wyniki badań symulacyjnych. W przypadku, gdy obie jednostki poruszają się z jednakową prędkością, CADCA dla wychylenia steru 5° zlokalizowana jest wyłącznie przed trawersem statku własnego, a maksima wyznaczonych MDTC znajdują się na kątach kursowych $\sim 040^\circ$ LB lub $\sim 040^\circ$ PB, w zależności od kierunku realizacji zwrotu. Zarówno dla spotkania ze statkiem D-RoPax jak i FSA, korzystna dla statku własnego różnica prędkości, podczas której rozpoczyna on manewr płynąc o 4 węzły szybciej od statku obcego, skutkuje w obu przypadkach wymaganą powierzchnią CADCA mniejszą o 76% (kolejno $1,85$ Mm² i $2,02$ Mm²), w porównaniu do utrzymywania jednakowej prędkości przez obie jednostki.



Rysunek 41. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S6 dla różnych prędkości statku własnego i kierunku realizacji zwrotu

W przypadku scenariusza S6 przedstawiającego sytuację niekorzystną z perspektywy statku własnego (przeszkoda przemieszcza się z jednakową lub większą prędkością), uzyskane kształty obwiedni CADCA, jak i wyznaczone powierzchnie manewrowe zdecydowanie różnią się od siebie. W sytuacji, w której statek obcy przemieszcza się szybciej od statku własnego, pojawia się dodatkowy sektor CADCA umieszczony za trawersem jednostki własnej, zlokalizowany na kącie kursowym $\angle K \cong 115^\circ$ z burty, na którą wykładano płetwę sterową. Wynika to z możliwości wystąpienia sytuacji spotkaniowej, podczas której statek obcy dogania statek własny (wyprzedzanie). W takim przypadku, realizacja zwrotu zgodnie z założonymi

w badaniach parametrami (pojedynczy manewr wymijający o 60° , a następnie dalsze utrzymywanie kursu końcowego do momentu rozwiązania sytuacji nadmiernego zbliżenia), skutkuje znacznymi pod względem operacyjnym wartościami MDTC. Opisywaną sytuację przedstawiono wraz z nałożonymi CADCA na Rysunku 42 (A – przeszkoda płynie z większą prędkością; B – przeszkoda płynie z jednakową prędkością), z wykorzystaniem trajektorii uzyskanych dla maksymalnego MDTC i tego samego kursu początkowego statku wynoszącego $OS_{KR} = 018^\circ$.



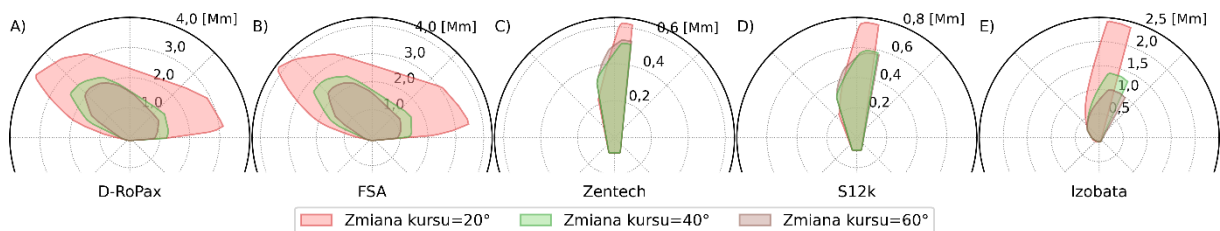
Rysunek 42. Porównanie trajektorii statków, dla których wyznaczono maksymalne MDTC w spotkaniach jednostek D-RoPax i FSA płynących z różnymi prędkościami początkowymi w scenariuszu S6

W warunkach rzeczywistych, możliwym rozwiązaniem byłoby zrealizowanie pełnej cyrkulacji statku, co w praktyce skutkowałoby rozwiązaniem sytuacji spotkaniowej przy jednocześnie krótszym czasie realizacji całego manewru. Jednakże, ze względu na przyjętą metodę wyznaczania CADCA, bazującą wyłącznie na geometrii oraz fizyce ruchu obiektów, dla zadanych parametrów symulacyjnych oraz niektórych kursów rzeczywistych, konieczne było zrealizowanie manewru w znacznej odległości od statku obcego (maksymalne MDTC wynoszące dla obu statków obcych $\sim 5,2$ Mm). Z tego względu, dla scenariusza niekorzystnego (statek własny wolniejszy od statku obcego) wymagany jest aż sześciokrotnie większy obszar manewrowy (różnica powierzchni $12,2$ Mm² oraz $MDTC_{max}=3,3$ Mm) niż dla scenariusza korzystnego (statek własny szybszy od statku obcego). Należy nadmienić, że wartości te dotyczą obszarów CADCA wyznaczonych dla wszystkich kursów rzeczywistych statku własnego, co skutkuje uwzględnieniem również niniejszej, skrajnie niekorzystnej sytuacji spotkaniowej.

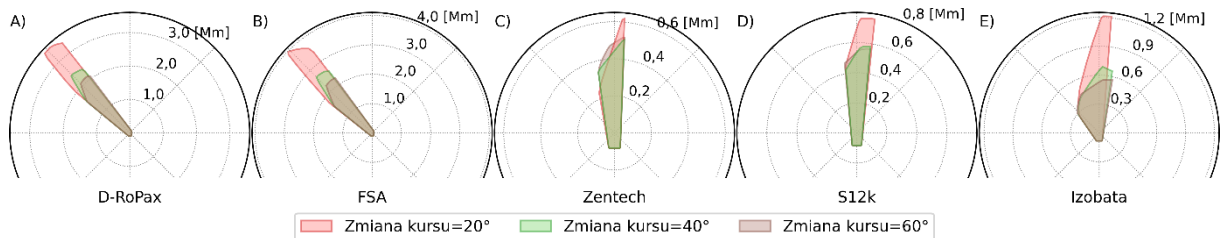
Dla wykorzystanego do badań modelu statku własnego, różnica prędkości rzędu 4 w. nie skutkuje znaczącym zacieśnieniem cyrkulacji. Jak można zaobserwować na Rysunku 40 oraz Rysunku 41 (C-E), poruszanie się z większą prędkością nie przekłada się na istotne różnice w rozmiarach uzyskanych obszarów w spotkaniach z przeszkodami stacjonarnymi. W tych scenariuszach, zarówno zmiany przebiegu obwiedni CADCA wynikające z uzyskanych powierzchni, jak i maksymalne wartości MDTC są całkowicie pomijalne pod względem operacyjnym.

4.2.4. Analiza wpływu manewru wymijającego na CADCA – zmiana kursu

Ostatnim analizowanym parametrem manewru wymijającego jest wpływ wielkości zmiany kursu statku na rozmiar i kształt wymaganych obszarów manewrowych. W celu zweryfikowania wpływu tego parametru na CADCA wybrano scenariusze S7 i S8, których wyniki przedstawiono kolejno na Rysunku 43 i Rysunku 44. W obu przypadkach, zarówno jednostka własna jak i napotkany obiekt przemieszczają się z jednakową prędkością wynoszącą 20 w. Manewr realizowany jest poprzez wychylenie steru 15° na prawą burtę, przy prawie dwumetrowej, przeciwnej fali. W pierwszym, spośród dwóch analizowanych przypadków, CADCA została przedstawiona jako obszar uwzględniający wszystkie możliwe różnice kursów ΔKR , podczas gdy na Rysunku 44 zaprezentowano obszary dla sektora zbudowanego w oparciu o kurs początkowy statku własnego wynoszący $OS_{KR} = 270^\circ$ ($\Delta KR = -90^\circ$).



Rysunek 43. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S7 dla różnych zmian kursu statku po zwrocie



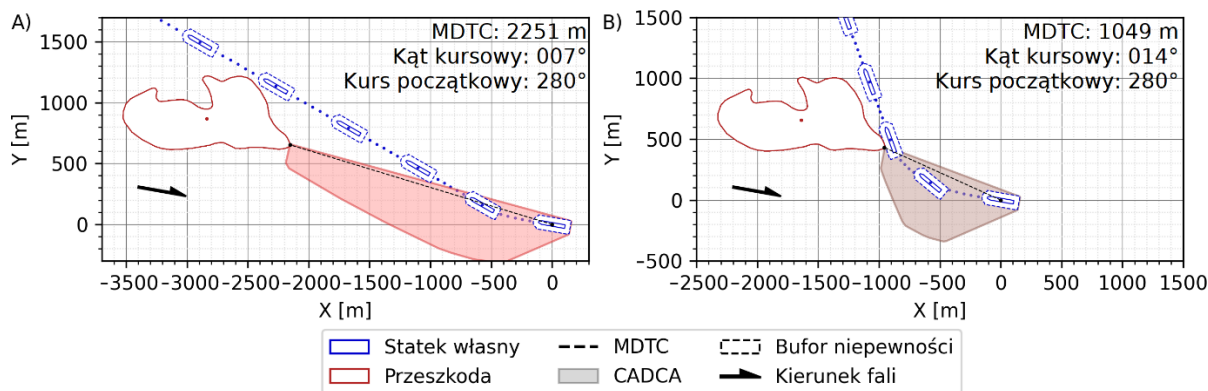
Rysunek 44. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S8 dla różnych zmian kursu statku po zwrocie

Jak można zaobserwować, zarówno w przypadku sektora o rozpiętości 21° jak i 360°, wpływ odchylenia jednostki od kursu początkowego jest zauważalny, a w niektórych przypadkach znaczny. Dla przeszkód ruchomych (D-RoPax oraz FSA), ta zależność jest szczególnie wyraźna w przypadku porównywania obszarów wyznaczonych dla najmniejszej

rozpatrywanej zmiany kursu (20°) z wynikami uzyskanymi dla pozostałych wartości (40° i 60°). Dla spotkania statku D-RoPax z FSA, w przypadku zaplanowania zwrotu o 20° w S7, wymagany jest prawie czterokrotnie większy wolny obszar manewrowy, a w przypadku S8 jest to powierzchnia dwukrotnie większa niż w przypadku zwrotu o 60° . Co istotne, różnice pomiędzy zmianą kursu o 40° i 60° nie są już tak wyraźne i dla spotkania tych samych statków wymagają kolejno o 46% (S7) oraz o 22% (S8) większego wolnego obszaru manewrowego niż dla zwrotu o 60° .

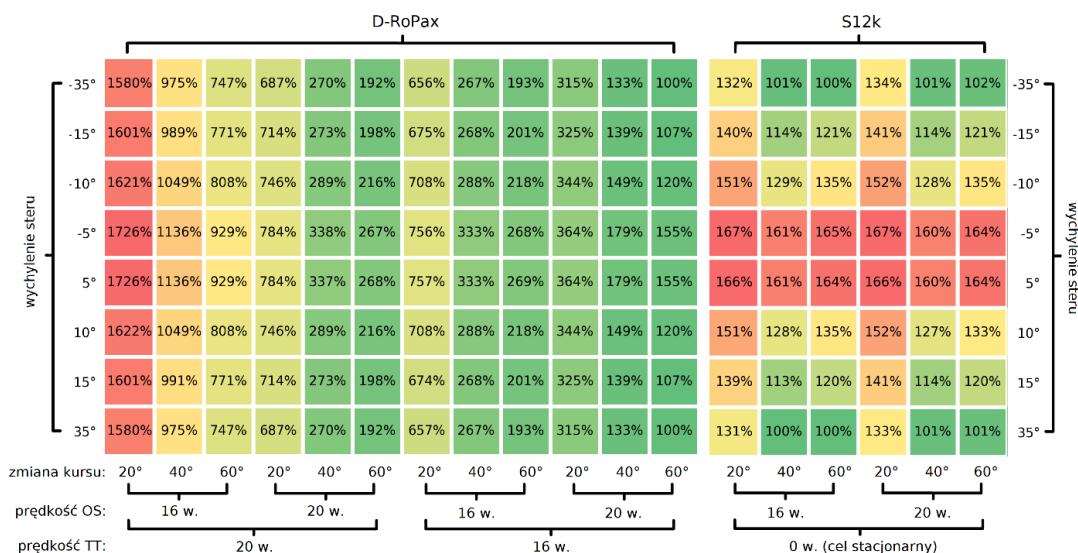
Ze względu na wybranie w scenariuszu S8 niekorzystnej geometrii spotkania (gdzie różnica kursów pomiędzy statkami wynosi $\Delta KR = -90^\circ$, co skutkuje sektorem CADCA zlokalizowanym w pobliżu maksimum MDTC w przypadku uwzględniania wszystkich kombinacji kursów), różnica w uzyskanych wartościach $MDTC_{max}$ nie jest znacząca i pomiędzy rozpatrywanymi scenariuszami wynosi nieco ponad 2 kable. W przypadku porównywania uzyskanych wartości MDTC dla różnych zmian kursu w S8, różnica odległości uzyskana dla spotkania dwóch statków D-RoPax wynosiła 1,4 Mm pomiędzy zmianą kursu o 20° (maksymalne MDTC 3,5 Mm) i o 60° (maksymalne MDTC 2,1 Mm).

Zaobserwowana tendencja, zarówno pomiędzy wymaganymi rozmiarami powierzchni, jak i maksymalnego MDTC pomiędzy skrajnymi wartościami zmiany kursu początkowego o 20° i 60° , wskazuje na brak liniowej zależności pomiędzy tym parametrem, a uzyskanymi wynikami MDTC, a przez to powierzchniami CADCA. Jest to najbardziej widoczne w przypadku przeszkód stacjonarnych, gdzie różnica w obszarach wyznaczonych dla zmiany kursu o 40° i 60° jest praktycznie pomijalna, a możliwe jest nawet wystąpienie sytuacji, w której większa zmiana kursu wymaga większego CADCA. Taką sytuację można zaobserwować chociażby w przypadku napotkania platformy Zentech przez statek własny płynący kursem $OS_{KR} = 270^\circ$ (Rysunek 44-C). Brak liniowej zależności wynika w znacznej mierze z wpływu nieregularnego kształtu oraz wymiarów napotykanego obiektu (a w szczególności, ze stosunku jego długości do szerokości). Obserwacje dotyczące rozmiarów CADCA w odniesieniu do planowanej wielkości zwrotu w scenariuszach dotyczących alizji statku (zderzenia z obiektem stacjonarnym), zostały również potwierdzone w poprzednich badaniach, w których wykorzystano inne przeszkody o nieregularnym, podłużnym kształcie (Gil, 2021). Przykładową trajektorię dla wyznaczonego maksymalnego MDTC i spotkania statku D-RoPax z przyjętą izobata bezpieczeństwa przedstawiono wraz z nałożonymi CADCA na Rysunku 45, kolejno dla zmiany kursu o 20° (A) oraz 60° (B) i kursu początkowego statku wynoszącego 280° .



Rysunek 45. Porównanie trajektorii statku, dla których wyznaczono maksymalne MDTC dla spotkania z przyjętą izobatą bezpieczeństwa i różnych wartości zmiany kursu w scenariuszu S8

W celu zbiorczego przedstawienia wpływu parametrów manewru wymijającego na CADCA, na Rysunku 46 w formie mapy ciepła zaprezentowano powierzchnie wyznaczonych obszarów manewrowych. Zestawienie przygotowano dla spotkania ze statkiem D-RoPax w drodze (po lewej) oraz stacjonarną przeszkodą S12k (po prawej). W analizie uwzględniono wszystkie możliwe kursy statku, prędkości każdego z obiektów zaangażowanych w sytuację spotkaniową, planowaną wielkość zwrotu statku własnego oraz kąt i kierunek wychylenia płetwy sterowej. Jako referencyjną, przyjęto najmniejszą uzyskaną powierzchnię CADCA, oddzielnie dla każdego z analizowanych obiektów. Do realizacji porównania wartości wybrano korzystne warunki środowiskowe, tj. $H_S=1,8$ m oraz falę przeciwną $\mu=180^\circ$.



Rysunek 46. Mapa ciepła uzyskanych powierzchni CADCA dla wszystkich rozpatrywanych parametrów manewru wymijającego dla spotkania statku własnego z D-RoPax (po lewej) i S12k (po prawej)

Jak można zauważyć, w przypadku dwóch statków w drodze, największy wpływ na powierzchnie CADCA spośród analizowanych parametrów ma prędkość wypadkowa statku własnego i obcego. Różnica pomiędzy rozmiarem CADCA przy korzystnej (z perspektywy statku własnego) konfiguracji parametrów, gdy statek własny płynie z prędkością większą niż

przeszkoda, może sięgać nawet 1265% niż w sytuacji przeciwnej. Należy jednocześnie zauważyć, że otrzymane wartości wynikają z uwzględnienia CADCA wygenerowanych dla wszystkich możliwych kursów początkowych statku własnego. Z tego powodu, uwzględniono również skrajnie niekorzystne przypadki zaprezentowane na Rysunku 41 i omówione w poprzednich częściach niniejszego rozdziału. W takich przypadkach, ze względu na doganianie jednostki własnej przez statek obcy, pojawia się dodatkowy sektor niebezpieczny zlokalizowany za trawersem statku. Oznacza to, że w przypadku rozpatrywania pojedynczego sektora CADCA, dla jednego początkowego kursu rzeczywistego, rozkład powierzchni na mapie ciepła mógłby różnić się od tego zaprezentowanego na Rysunku 46. Kolejnym parametrem wpływającym znacząco na wymaganą powierzchnię manewrową podczas spotkania dwóch ruchomych obiektów jest planowana wartość zwrotu. W scenariuszach, w których oba obiekty poruszały się z jednakową prędkością, najmniejsza zmiana kursu statku (20°) wymagała nawet pięciokrotnie większej powierzchni manewrowej, niż w przypadku maksymalnej rozpatrywanej wartości odchylenia jednostki od kursu początkowego (60°). Zaskakujący wydaje się mniejszy wpływ kąta wychylenia steru na wymaganą powierzchnię manewrową w porównaniu do pozostałych parametrów manewru wymijającego. Wyniki potwierdziły, że im większy kąt wychylenia płetwy sterowej (skutkujący mniejszą średnicą taktyczną cyrkulacji), tym mniejszy wymagany obszar manewrowy. Niemniej jednak, różnice pomiędzy skrajnymi wartościami powierzchni CADCA dla wychylenia steru wahają się od 46% do nawet 182% dla zwrotu na lewą burtę (oznaczoną ujemnymi wartościami kątów wychylenia steru), a wartości uzyskane dla zwrotów na prawą burtę są niemal symetryczne.

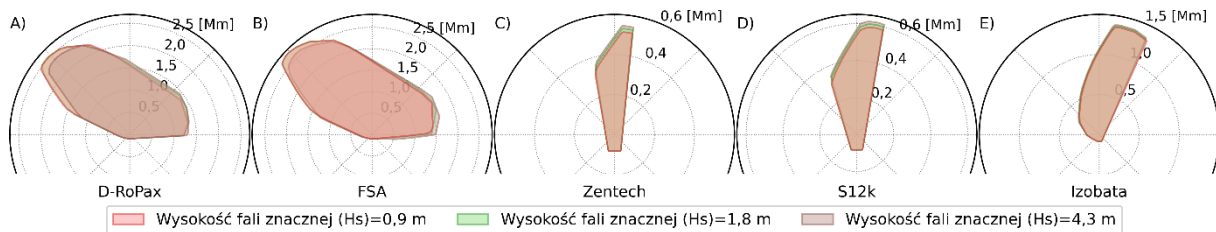
W przypadku analizowanego modelu jednostki i wymijania przeszkody stacjonarnej, prędkość statku własnego wpływa w sposób pomijalny na wymagany obszar manewrowy (różnice rzędu 2%). Nieco inaczej wygląda tendencja, którą można zaobserwować w zmianie wielkości wymaganych obszarów, w przypadku parametru zmiany kursu. Uzyskane powierzchnie CADCA różnią się od siebie wielkością od 1% do 33%, przy czym należy odnotować brak wyraźnej, liniowej zmiany, w zależności od wielkości planowanego zwrotu. Pomimo tego, największe obszary manewrowe są wymagane zawsze w przypadku najmniejszej analizowanej zmiany kursu (20°). Nieliniowy wzrost wymaganych obszarów wynika prawdopodobnie z wybranego do analizy obiektu (Rysunek 46), którym jest statek wiertniczy S12k o wyraźnie podłużnym kształcie. Dlatego też, zwiększanie zmiany kursu nie zawsze jednakowo oddziałuje na wielkość i kształt CADCA. Z tego powodu, nie w każdym przypadku maksymalne odchylenie jednostki od kursu początkowego (60°), może skutkować najlepszym,

z punktu widzenia wymaganego obszaru, rozwiązaniem sytuacji spotkaniowej. Największy wpływ na wielkość CADCA w przypadku napotkania wybranej przeszkody stacjonarnej ma kąt wychylenia steru, którego zwiększenie w niektórych przypadkach skutkuje nawet 65% mniejszym wymaganym obszarem manewrowym. Wynika to z bezpośredniego wpływu tego parametru na zacieśnianie średnicy taktycznej cyrkulacji statku, co w praktyce skutkuje szybszym osiągnięciem planowanej zmiany kursu, tj. zakończeniem realizacji manewru wymijającego. W przypadku tego parametru, widoczna jest wyraźna, liniowa tendencja wskazująca na zmniejszanie CADCA, przy większych kątach wychylenia steru. Wyniki powierzchni uzyskane dla obszarów wyznaczonych na lewą oraz prawą burtę są symetryczne i bardzo do siebie zbliżone. Pomijalne różnice wynikają prawdopodobnie z nieznacznie odmiennych cyrkulacji statku na każdą z burt oraz nie w pełni regularnego kształtu przeszkody.

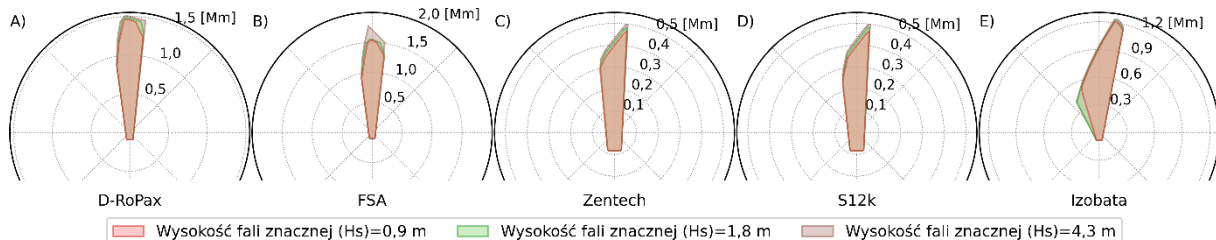
4.2.5. Analiza wpływu zakłóceń środowiskowych na CADCA

Ostatnia część analizy wyników badań, dotyczy wpływu zakłóceń środowiskowych, rozumianych w niniejszej dysertacji jako falowanie zadane na akwencie symulacyjnym, na wielkość i kształt wyznaczonych obszarów granicznych statku. Z tego względu, w przygotowanych scenariuszach *S9 - S12* skupiono się na zmianie parametrów powiązanych z falowaniem, tj. wysokości fali znacznej (H_S) oraz względnego kąta natarcia fali na kadłub (μ).

Na Rysunku 47 i Rysunku 48 przedstawiono wyniki uzyskane kolejno w scenariuszach *S9* oraz *S10*, w których zmienianym parametrem była wysokość fali znacznej (H_S). Na pierwszym z rysunków, zaprezentowano CADCA wyznaczone niezależnie od początkowego kursu statku, przez co uwzględniono wszystkie występujące możliwości różnic kursów pomiędzy jednostkami (ΔKR). Na drugim z wykresów (Rysunek 48), przedstawiono CADCA wyznaczone dla jednego sektora zbudowanego w oparciu o początkowy kurs statku własnego $OS_{KR} = 180^\circ$, tj., gdy statki płyną wprost na siebie ($\Delta KR = 180^\circ$). W obu przypadkach wykorzystano te same parametry symulacyjne, tj. zarówno własny jak i napotkany statek poruszały się z tą samą prędkością wynoszącą 20 w. Podczas realizacji manewru wymijającego, płetwa sterowa była wykładana 15° na prawą burtę, a manewr był wykonywany aż do momentu osiągnięcia zmiany kursu o 40° . Wysokości fali znacznej zadane na akwencie zmieniały się w ramach zaprezentowanych na rysunkach serii danych, ale względny kąt natarcia fali na kadłub w momencie rozpoczęcia manewru był jednakowy i wynosił $\mu = -90^\circ$ (fala boczna z lewej burty).



Rysunek 47. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S9 dla różnych zmian wysokości fali znacznej



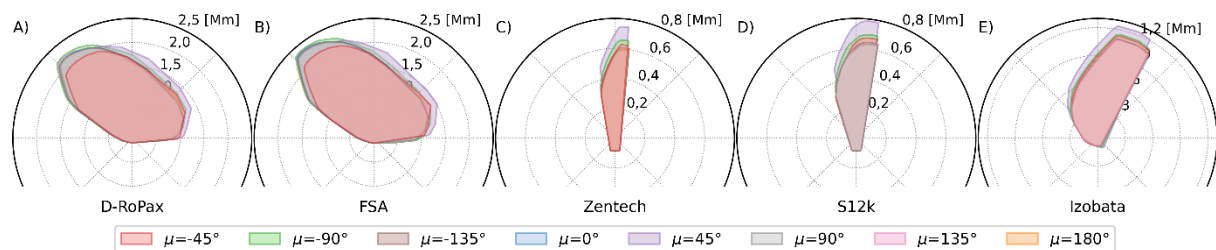
Rysunek 48. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S10 dla różnych zmian wysokości fali znacznej

Jak zaprezentowano na powyższych rysunkach, dla wybranego scenariusza symulacyjnego, wysokość fali znacznej nie ma istotnego wpływu na rozmiar i kształt otrzymanych CADCA, niezależnie od rozpatrywania wąskiego sektora CADCA lub obszaru zbudowanego w oparciu o wszystkie kursy początkowe. Różnice zarówno w całkowitej wymaganej powierzchni manewrowej, jak również w kształcie obwiedni i maksymalnych wyznaczonych wartościach MDTC są nieznaczne i w większości przypadków pomijalne z punktu widzenia eksploatacji statku. W scenariuszu S9, dla skrajnych odległości MDTC w spotkaniach z obiektami stacjonarnymi, różnice pomiędzy skrajnymi wartościami dla każdej z serii danych (wysokości fali znacznej) sięgają ¼ długości statku. Wyraźniejsze, ale nadal nieznaczne różnice można zaobserwować dla sytuacji napotkania statku w drodze. Dla ruchomych obiektów płynących z jednakową prędkością, różnice w maksymalnym obliczonym MDTC sięgały pojedynczej długości statku (nieco ponad kabel). Nieznaczne różnice pomiędzy wyznaczonymi wielkościami CADCA, wynikają prawdopodobnie ze stosunkowo niewielkiej zmiany kursu (40°) i znacznej prędkości początkowej statku (20 w.). W krótkim czasie potrzebnym do osiągnięcia przez statek zadanej różnicy kursu, wpływ falowania na akwencie (niezależnie czy działającego z korzystnego czy z niekorzystnego kierunku) jest nieznaczny, ponieważ ekspozycja kadłuba na wektor zakłóceń zewnętrznych jest krótka.

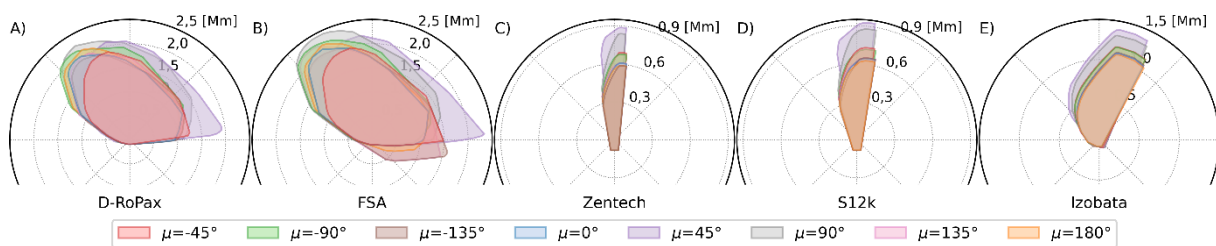
Należy nadmienić, że przeprowadzone obserwacje mają bezpośredni związek z wybranym w scenariuszu kierunkiem natarcia fali μ , który jest bezpośrednio powiązany z wysokością fali znacznej i wspólnie wpływają one na odpowiedź kadłuba na fali. Możliwe jest zatem wystąpienie sytuacji, w której dla innego kierunku fali, otrzymane wyniki będą się od siebie różnić. Na podstawie otrzymanych wyników, nie zaobserwowano również klarownej

zależności pomiędzy badaną wysokością fali znacznej, a kształtem lub wymiarami uzyskanych obszarów CADCA. Jednakże, dla większości przeszkód (szczególnie stacjonarnych), można zauważyć zależność, z której wynika, że dla wybranych parametrów symulacyjnych, im mniejsza wysokość fali, tym wymagany jest (nieznacznie) większy obszar manewrowy. Jak wspomniano, wynika to prawdopodobnie z wyboru kierunku względnego fali $\mu=-90^\circ$, co skutkowało nacieraniem fali w lewą burtę statku. Dla manewru realizowanego na prawą burtę zwiększało to kątową i postępową prędkość statku podczas zwrotu, przyspieszając osiągnięcie zadanego kursu końcowego, a ostatecznie, szybsze wyminięcie przeszkody. Dlatego też, im większa wysokość fali, tym większe było jej oddziaływanie na kadłub statku, natomiast ze względu na korzystny kierunek fali dla realizowanego w scenariuszu manewru wymijającego, falowanie ostatecznie zmniejszało uzyskane rozmiary CADCA.

Ostatnimi scenariuszami wybranymi do analizy wpływu zakłóceń zewnętrznych były *S11* i *S12*, podczas których zmieniano względny kąt natarcia fali na kadłub (μ). W obu z nich, CADCA została przedstawiona jako obszar uwzględniający wszystkie możliwe początkowe kursy statku własnego. Manewr wymijający realizowany był poprzez wyłożenie steru 10° na prawą burtę. Ze względu na weryfikację wpływu kierunku falowania na CADCA, wybrano maksymalny dostępny wariant zmiany kursu statku (60°) tak, by uzyskać możliwie długą ekspozycję kadłuba na zakłócenia podczas zwrotu. Zarówno statek własny jak i obcy poruszały się z jednakową prędkością wynoszącą 16 w. Jediną różnicą w obu scenariuszach symulacyjnych była wysokość fali znacznej. Na Rysunku 49 przedstawiono CADCA wyznaczone dla wszystkich kątów natarcia fali na kadłub i wysokości fali $H_S=1,8$ m, podczas gdy na Rysunku 50 obszary zostały wyznaczone dla $H_S=4,3$ m.



Rysunek 49. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu *S11* dla różnych kątów natarcia fali na kadłub



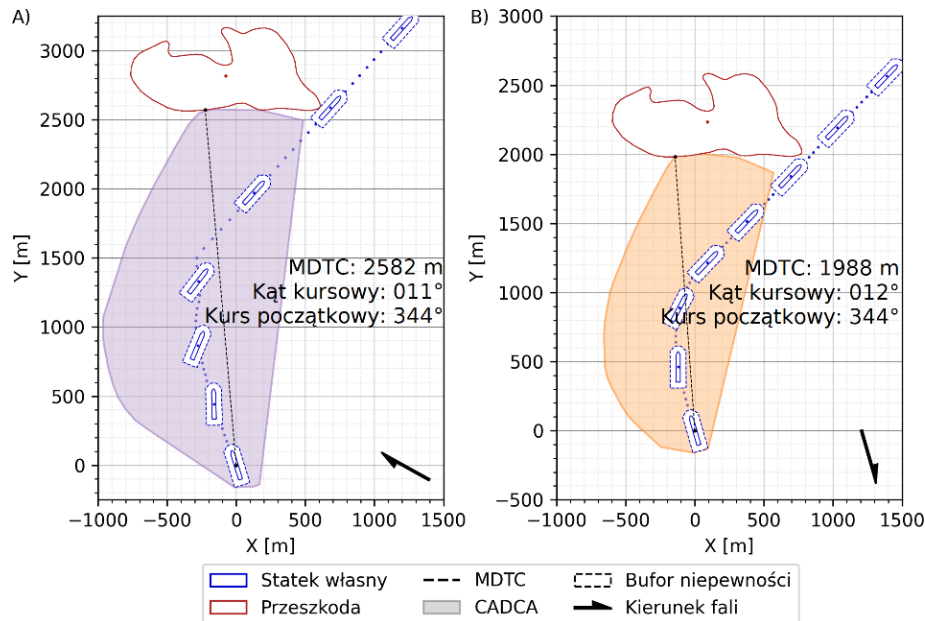
Rysunek 50. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu *S12* dla różnych kątów natarcia fali na kadłub

Jak zaprezentowano na wykresach biegunowych (Rysunek 49 i Rysunek 50), CADCA wyznaczone dla różnych kątów natarcia fali na kadłub, szczególnie w scenariuszu *S11*, nie różnią się znacznie od siebie. Podobnie jak w przypadku analizy wpływu wysokości fali znacznej na CADCA, również w przypadku kąta natarcia fali na kadłub, parametr ten jest bezpośrednio powiązany z pozostałymi właściwościami opisującymi stan morza zadany na akwencie symulacyjnym. Dla wybranych scenariuszy, zarówno dla $H_S=1,8$ m, jak i $H_S=4,3$ m, największe obszary wyznaczone zazwyczaj dla kąta $\mu=45^\circ$ (fala baksztagowa z prawej burty) lub $\mu=90^\circ$ (fala boczna), w zależności od napotykanego obiektu, a różnice w powierzchniach uzyskanych pomiędzy tymi kierunkami są pomijalne.

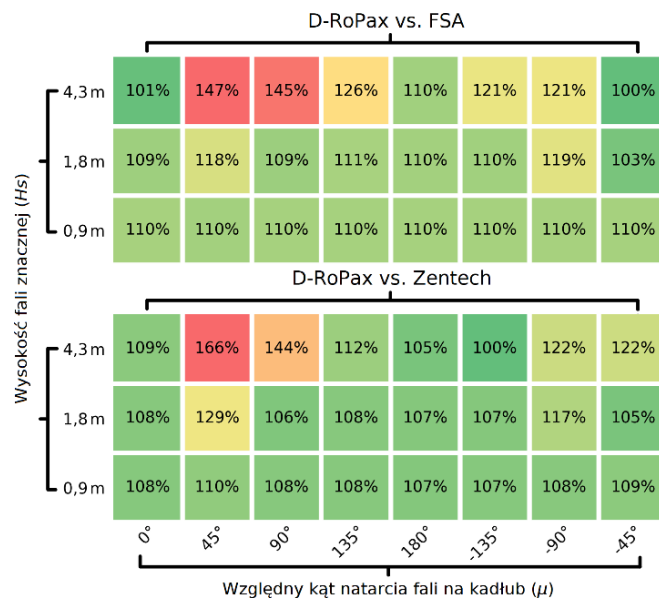
Zarówno największe, jak i najmniejsze wyznaczone CADCA (oraz maksymalne wartości MDTC) są bezpośrednio związane z wybranym scenariuszem symulacyjnym oraz kierunkiem i parametrami realizacji zwrotu. Jest to szczególnie zauważalne w przypadku spotkania dwóch statków w drodze i wysokiej fali znacznej (scenariusz *S12*), gdzie najmniejsze obszary wyznaczone dla $\mu=-45^\circ$. W takim przypadku fala baksztagowa nacierająca na kadłub z lewej burty powoduje zarówno zwiększenie prędkości postępowej statku podczas zwrotu, jak i jego prędkości kątowej. W przypadku zwrotu w prawo (ster 10° PB), skutkuje to większą prędkością na zwrocie, a w efekcie zacieśnieniem cyrkulacji i szybszym osiągnięciem docelowego kursu statku. Skutkuje to różnicą w powierzchni wyznaczonych CADCA wynoszącą $\sim 1,5 \text{ Mm}^2$ ($\sim 50\%$), pomiędzy najmniejszym i największym obszarem uzyskanym dla spotkania dwóch statków w drodze. W przypadku przeszkód stacjonarnych, różnice w powierzchniach pomiędzy skrajnymi CADCA są zbliżone, ale ich wartości bezwzględne wyznaczone dla analizowanego scenariusza są dość nieznaczne. Różnice w wyznaczonych powierzchniach przekładają się na rozbieżności pomiędzy maksymalnymi MDTC rzędu 3 kabli dla przeszkód nieruchomych i około 5 kabli dla statku obcego w drodze.

Przykład trajektorii statków wraz z nałożonymi CADCA przedstawiającymi spotkanie statku z izobata bezpieczeństwa w scenariuszu *S12* przedstawiono na Rysunku 51. Sytuację spotkaniową zaprezentowano dla kursu rzeczywistego statku, dla którego wyznaczone największe MDTC ($OS_{KR}=344^\circ$, $\mu=45^\circ$ - Rysunek 51-A). Druga część rysunku (B) przedstawia wartość MDTC uzyskaną dla tego samego kursu statku, jednak przy korzystnym kierunku natarcia fali na kadłub ($\mu=180^\circ$ - Rysunek 51-B). Dodatkowo, w celu zbiorczego zwizualizowania wyznaczonych powierzchni CADCA w relacji do analizowanych parametrów falowania, na Rysunku 52 przedstawiono powierzchnie wyznaczonych obszarów w formie mapy ciepła. Zestawienie wyników wykonano dla omawianych scenariuszy spotkaniowych,

rozszerzonych dodatkowo o $H_S=0,9$ m, dla wybranej przeszkody ruchomej (FSA – góra) oraz stacjonarnej (Zentech – dół).



Rysunek 51. Porównanie trajektorii statku, dla których wyznaczono maksymalne MDTC dla spotkania z przyjętą izobatką bezpieczeństwa i różnych wartości kierunków fali w scenariuszu S12



Rysunek 52. Mapa ciepła powierzchni uzyskanych dla dwóch przeszkód, różnych wysokości fali znacznej oraz wszystkich analizowanych kątów natarcia fali na kadłub w chwili rozpoczęcia manewru

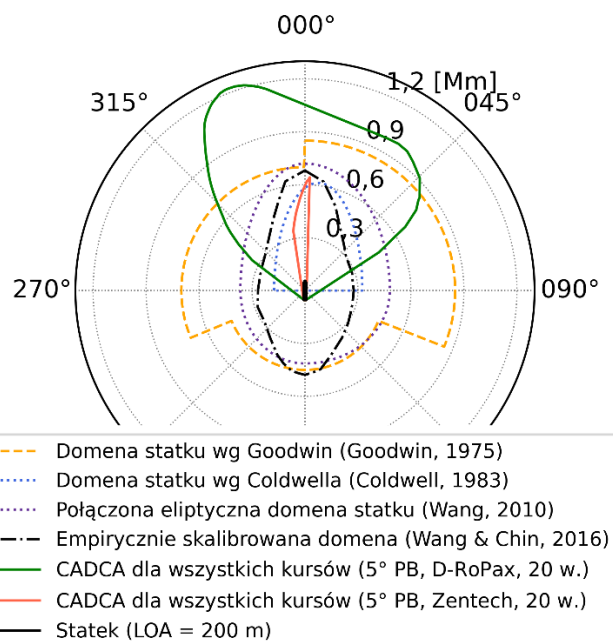
4.3. Porównanie CADCA z domeną statku

Zrealizowane uprzednio badania wykazały, że dla wybranych scenariuszy symulacyjnych możliwe jest wyznaczanie obwiedni CADCA, tj. obszaru granicznego wskazującego granice realizacji wybranego manewru wymijającego (ostatniej szansy), które niekiedy przekraczają zaproponowane przez niektórych autorów domeny statku (Gil, 2021).

Może to prowadzić do niepoprawnego wykorzystania koncepcji domeny, której sposób wyznaczania nie zawsze gwarantuje możliwość jej zastosowania w celu unikania zderzeń statków (Montewka i in., 2020). Oznacza to, że możliwe byłoby nie tylko bezpośrednie, ale również pośrednie wykorzystanie CADCA, służące chociażby kalibrowaniu domen statków wykorzystywanych w unikaniu kolizji czy wyznaczaniu granicznych parametrów spotkaniowych, takich jak odległość lub czas do wykonania manewru ostatniej szansy.

Również w przypadku badań zrealizowanych na potrzeby niniejszej dysertacji i wykorzystania jako statku własnego modelu D-RoPax, zweryfikowano i porównano uzyskane CADCA z wybranymi domenami statku (Rysunek 53). W tym celu, dla wybranych, korzystnych z perspektywy statku własnego scenariuszy symulacyjnych, pomniejszono sztucznie kadłub statku do długości całkowitej (LOA) wynoszącej 200 m tak, by odpowiadał on jednostce, dla której wykreślono domeny na Rysunku 4. Następnie zmodyfikowano metodę wyznaczania CADCA w taki sposób, by zniwelować wszystkie dodatkowe marginesy i bufor niepewności, wpływające na sztuczne powiększanie kadłuba statku, a w efekcie dynamicznego obszaru granicznego. Na potrzeby porównania CADCA z domenami statku, zniesiono weryfikację akceptowalnego BCR w trakcie realizacji manewru oraz całkowicie zlikwidowano wprowadzony bufor niepewności. Oznacza to, że na każdym etapie działania oprogramowania symulacyjnego, w tym wyznaczania pojedynczej wartości MDTC, wykorzystywany był wyłącznie obrys pomniejszonego do 200 m kadłuba statku i trajektorie statku D-RoPax.

Realizacja badań skutkowała uzyskaniem obwiedni CADCA dla wszystkich początkowych kursów statku (podobnie jak w przypadku większości domen), w spotkaniu ze statkiem w drodze (D-RoPax) oraz przeszkodą stacjonarną (platforma Zentech). W celu przygotowania uproszczonych obwiedni, wybrano zwrot na prawą burtę realizowany poprzez wychylenie płetwy sterowej 5° i docelową zmianę kursu 60° . Statek własny w obu przypadkach poruszał się z maksymalną rozpatrywaną prędkością 20 w., podczas gdy statek obcy płynął wolniej (16 w.). Dodatkowo, na akwenu symulacyjnym zadano dobre warunki falowe (fala nadążająca, $H_S=0,9$ m).

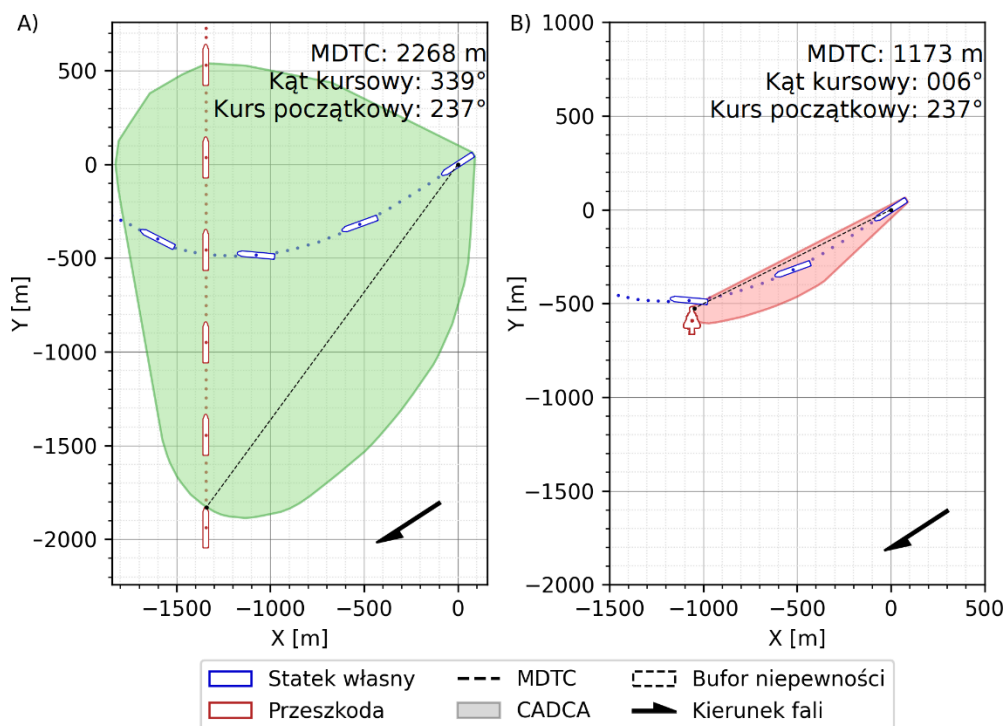


Rysunek 53. Porównanie wybranych domen statku z uproszczonymi CADCA wyznaczonymi dla dwóch scenariuszy symulacyjnych

Jak można zauważyć, nawet dla korzystnych z perspektywy statku własnego scenariuszy spotkaniowych i braku dodatkowych buforów powiększających obszar graniczny, dla spotkania z innym statkiem w drodze, CADCA w sektorze dziobowym ($\pm 45^\circ$) przekracza znacznie wszystkie porównywane domeny statku. Należy jednak zauważyć, że do porównania wybrano najmniejszy rozpatrywany kąt wychylenia płetwy sterowej (5°), co skutkuje większymi obszarami niż w przypadku wyłożenia steru na burtę. Wynikało to z intencji odwzorowania założeń domeny statku, która z definicji dotyczy tego, co nawigator *chciałby* utrzymać wolne od przeszkód, więc jest związane z wartościami preferowanymi, a nie granicznymi. W przypadku korzystnych parametrów symulacyjnych, wyłącznie CADCA dla spotkania z platformą wiertniczą wpisuje się w większość naniesionych domen statku. Oznacza to, że obszar, będący z założenia granicznym, który nawigator *musi* utrzymać wolny od przeszkód (ze względu na właściwości manewrowe swojego statku), przekracza i to w znaczący sposób obwiednie obszarów, które nawigator *chciałby* utrzymać wolne od innych obiektów. Należy jednak nadmienić, że nałożone obszary zakładają każdy możliwy kurs początkowy statku własnego. Przywołując zatem Rysunek 34 i Rysunek 35 oraz analizę wyników symulacyjnych z Rozdziału 4.2.1, należy uwzględnić fakt, że dla pojedynczej różnicy kursów statków (jednego sektora CADCA), obszary mogłyby zdecydowanie różnić się od siebie i skutkować obwiedniami, które wpisywałyby się w nałożone domeny statku.

Ciekawą obserwacją jest również lokalizacja maksymalnych wartości MDTC w ramach obwiedni CADCA po stronie przeciwnej niż powiększenie obwiedni w większości domen.

W domenach, projektowanych głównie dla statków o napędzie mechanicznym, będących na tym samym poziomie uprzywilejowania w myśl Prawidła 18 COLREG, sektory niebezpieczne są zazwyczaj zlokalizowane z prawej burty statku własnego, ze względu na konieczność ustępowania tam pierwszeństwa statkom zgodnie z Prawidłem 15. Jednakże sytuacja, w której statek własny znajduje się z prawej burty statku obcego i mimo wszystko jest zobowiązany zgodnie z COLREG wykonać manewr wymijający również może zajść w praktyce. Takie okoliczności mogą zaistnieć, np. gdy statek obcy jest uprzywilejowany w myśl Prawidła 18 lub gdy zgodnie z Prawidłem 17, statek własny jest zobowiązany rozwiązać sytuację nadmiernego zbliżenia własnym manewrem. Zrealizowane badania symulacyjne z predefiniowanym zwrotem (na prawą burtę) i statkiem obcym utrzymującym swój kurs i prędkość wykazały, że najmniej korzystne okoliczności (maksymalne wartości MDTC implikujące konieczność najwcześniejszej realizacji manewru wymijającego), są zlokalizowane na kątach kursowych $\sim 20^{\circ}$ - 30° LB. Oznacza to wystąpienie sytuacji, w której dla znajdującego się w tym sektorze obiektu zachowującego swój kurs i prędkość, możliwe było znalezienie takiej kombinacji wzajemnych kursów statków, dla których zajdzie najmniej korzystny układ geometryczny, skutkujący maksymalnym MDTC. Trajektorie dla takiej sytuacji w spotkaniach z obiektem w ruchu (zielona obwódka CADCA) oraz platformą wydobywczą (czerwona obwódka CADCA) przedstawiono na Rysunku 54.



Rysunek 54. Trajektorie dla maksymalnych wartości MDTC wyznaczonych dla spotkania ze statkiem D-RoPax oraz platformą Zentech dla przedstawionych uproszczonych obwódki CADCA

5. DYSKUSJA

Przedstawione wyniki badań oraz przeprowadzona analiza wykazały znaczną zmienność dynamicznego obszaru manewrowego CADCA, w zależności od realizowanego scenariusza symulacyjnego. Jak wykazano, w zależności od analizowanego parametru (charakterystyka sytuacji spotkaniowej, manewru wymijającego, warunków środowiskowych), wpływ na obszar jest różny – od znikomego po znaczny, zarówno w kontekście całkowitej wymaganej powierzchni manewrowej, jak również kształtu obwiedni i maksymalnych wartości MDTC. Na podstawie uzyskanych rezultatów badań wykazano, że dla tego samego statku własnego, nie tylko parametry manewru wymijającego oraz zakłóceń środowiskowych, ale również kształt, rozmiar przeszkody, a także dynamika sytuacji spotkaniowej wpływają na rozmiar CADCA. Jednakże, jak każda koncepcja, CADCA również nie jest wolna od ograniczeń związanych z przyjętymi założeniami, modelowaniem zjawisk oraz metodą wyznaczania obszaru manewrowego.

5.1. Zidentyfikowane ograniczenia CADCA

Główne ograniczenia i niepewności związane z metodą wyznaczania CADCA dotyczą przede wszystkim wykorzystania zewnętrznego modelu ruchu statku. Dokładność modelowania właściwości manewrowych statku wpływa na jakość wyznaczonych cyrkulacji statku dla zadanych parametrów operacyjnych oraz istniejących zakłóceń środowiskowych. Ponieważ trajektorie jednostek stanowią dane wejściowe do metody wyznaczania CADCA, ich jakość na wejściu wpływa bezpośrednio na jakość obszarów otrzymywanych na wyjściu. W niniejszej dysertacji jako przykładowe źródło danych wybrano model ruchu statku *LaiDyn*, wykorzystywany dotychczas w wielu pracach naukowych i badawczo-rozwojowych. Dodatkowo, jak przedstawiono w Rozdziale 3.4.2 model był kilkakrotnie weryfikowany. Świadczy to o wysokiej jakości danych wejściowych, które powinny gwarantować dobre odwzorowanie zachowania statku w rzeczywistości, dzięki czemu obszary CADCA wyznaczone w badaniach symulacyjnych i zaprezentowane częściowo w Rozdziale 4.2 również powinny wiarygodnie odwzorowywać rzeczywiste obszary graniczne jednostki.

Jednakże, jak każdy model, również *LaiDyn* jest wyłącznie uproszczonym odwzorowaniem matematycznym zjawisk obserwowanych w warunkach rzeczywistych. Dlatego też podjęto działania, służące zminimalizowaniu wpływu występujących niepewności na otrzymywane wyniki. W celu zniwelowania wpływu dokładności modelowania ruchu statku

na CADCA, zgodnie z procedurą zaprezentowaną w Rozdziale 3.3.2 do wyznaczania obszarów wykorzystuje się, nie pojedynczą trajektorię statku otrzymaną z modelu *LaiDyn*, lecz 20 odrębnych realizacji cyrkulacji statku dla jednakowych parametrów symulacyjnych. Te poddawane są obróbce wstępnej i służą wyznaczeniu końcowej trajektorii reprezentatywnej (akceptowalny błąd 3%, przedział ufności 95%), używanej następnie do wyznaczania CADCA. Pozwala to na zminimalizowanie ryzyka wykorzystania niedokładnych danych dotyczących cyrkulacji statku, otrzymanych w oparciu o pojedynczą realizację falowania.

Kolejnym działaniem mającym na celu obsługę potencjalnych niepewności jest wirtualne powiększanie kadłuba statku tzw. *buforem niepewności*, którego projekcja jest następnie wykorzystywana do symulacyjnego wyznaczania MDTC. Zasadę działania bufora, jak również składowe poprawki oraz przyjęte na potrzeby dysertacji wartości opisano w Rozdziale 3.1.5. Implementacja dodatkowej weryfikacji minimalnej odległości przejścia przed dziobem (BCR) w procesie wyznaczania CADCA (Rozdział 3.1.4), również wpływa na racjonalizację uzyskanych wyników symulacyjnych. Pomimo zastosowania symulacyjnej metody wyznaczania CADCA bazującej na fizyce ruchu, jej empiryczna kalibracja pozwala dodatkowo uwzględnić występowanie sytuacji spotkaniowej, której w praktyce należałoby unikać (dobra praktyka) pomimo istnienia teoretycznego, geometrycznego rozwiązania sytuacji nadmiernego zbliżenia.

Należy nadmienić, że zaproponowana metoda wyznaczania dynamicznego granicznego obszaru manewrowego CADCA jest uniwersalna, elastyczna i może być dalej udoskonalana w celu zniwelowania występujących niepewności i ograniczeń. Możliwe jest, zgodnie z zaproponowaną procedurą wyznaczania CADCA, zarówno dostosowanie liczby jak i wartości poprawek wchodzących w skład bufora niepewności, zmiana wartości progowej BCR weryfikowanej w czasie symulacji MDTC, czy nawet całkowita zmiana wykorzystywanego modelu ruchu statku. Wynika to z faktu, iż użyty na potrzeby dysertacji model *LaiDyn* nie stanowi składowego komponentu CADCA, a służy wyłącznie dostarczeniu danych wejściowych w uniwersalnym formacie. Możliwe jest zatem użycie innego oprogramowania do wyznaczenia trajektorii ruchu statku i ich późniejsze wykorzystanie w przedstawionej metodzie wyznaczania CADCA.

Poza opisanymi niepewnościami, największym ograniczeniem aplikacyjnym CADCA wpływającym na możliwość zastosowania przedstawionej koncepcji w praktyce, jest znaczna liczba parametrów brzegowych wpływających na wyznaczone obszary. Jak przedstawiono w Rozdziale 4.2, otrzymane obszary zależą od rodzaju, kształtu, wielkości statku oraz

przeszkody, ich parametrów operacyjnych, a także zakłóceń środowiskowych. W związku z tym, są one niejako podmiotowe i wyznaczone dla precyzyjnie wyselekcjonowanych jednostek i warunków. Dlatego też, w celu rozszerzenia możliwości zastosowania CADCA np. jako zobiektywizowanego kryterium bezpieczeństwa, konieczne byłoby podjęcie dodatkowych działań, mających na celu rozwinięcie zaproponowanej koncepcji i przeskalowanie wyników z danej grupy statków do ogółu.

Ograniczeniem użytkowym koncepcji jest również zaledwie częściowe uwzględnienie w niej przepisów COLREG, zakładających bezwzględną konieczność rozwiązania sytuacji spotkaniowej przez statek własny. Z jednej strony jest to zaleta, gdyż nawigator otrzymuje kształt obszaru manewrowego uwzględniającego niekorzystny nawigacyjnie scenariusz, w którym statek własny zobowiązany jest ustąpić pierwszeństwa, bez względu na geometrię sytuacji spotkaniowej i znajdowanie się na prawej burcie statku obcego. Sytuacja taka może wystąpić w praktyce ze względu na wytyczne Prawidła 18 (uprzywilejowany statek obcy), bądź wytyczne Prawidła 17, gdy należy podjąć działania mające na celu rozwiązanie sytuacji spotkaniowej własnym manewrem. Z drugiej strony, są to sytuacje rzadziej występujące podczas codziennej żeglugi od tych, w których statek własny jest zobowiązany utrzymać swój kurs i prędkość ze względu na pierwszeństwo drogi. Dodatkowo, w zrealizowanych badaniach nie sprawdzono scenariusza, podczas którego jednostka własna zamiast realizować zwrot o zadaną wartość, a następnie utrzymywać nowy kurs po zwrocie, wykonuje pełną cyrkulację by rozwiązać sytuację nadmiernego zbliżenia. W niektórych przypadkach zaprezentowanych w Rozdziale 4.2.3, które skutkowały znacznymi wartościami MDTC (a przez to zwiększonymi rozmiarami CADCA), mogłoby to skutkować otrzymaniem mniejszych wymaganych obszarów manewrowych, które byłyby wynikiem działań zbliżonych do manewrów podejmowanych przez nawigatora w praktyce.

5.2. Przyszłe prace i kierunki rozwoju

Przyszłe prace związane z rozwojem koncepcji dynamicznego granicznego obszaru manewrowego będą związane głównie z likwidacją dotychczas zidentyfikowanych ograniczeń metody, zniwelowaniem występujących niepewności, jak również rozwinięciem koncepcji w kierunku uniwersalizacji CADCA, dzięki czemu możliwe byłoby jeszcze szersze spektrum praktycznych zastosowań koncepcji.

Jednym z możliwych rozwiązań, które mogłyby być zweryfikowane w trakcie przyszłych prac, byłoby zbadanie wpływu zastosowanego modelu ruchu statku na różnice

w wyznaczonych obszarach CADCA. Badania takie, można by zrealizować korzystając z danych obejmujących trajektorie ruchu jednostek dla jednakowych statków i parametrów symulacji tak jak w przypadku plików wygenerowanych z wykorzystaniem programu *LaiDyn*, jednak dostarczonych przez inne źródło danych. Powtórzenie badań z użyciem różnych modeli ruchu statku, pozwoliłoby na bardziej precyzyjne określenie poprawek mających na celu zniwelowanie uproszczeń i niedokładności wynikających z użycia pojedynczego źródła danych o cyrkulacji statku. Badania takie, byłyby możliwe do zrealizowania również z wykorzystaniem infrastruktury dostępnej na uczelniach morskich, poprzez użycie i eksport danych o manewrach zrealizowanych na symulatorze mostka nawigacyjnego, w przypadku dostępności w jego zasobach tego samego modelu jednostki. Część badań nad wpływem modelu ruchu na wyznaczanie CADCA, mogłaby obejmować również walidację wyników otrzymanych z programu *LaiDyn*, poprzez ich porównanie z danymi otrzymanymi w warunkach rzeczywistych, np. z badań przeprowadzonych na modelach statków w skali.

Dalsze badania mogłyby również dotyczyć uniwersalizacji koncepcji CADCA, w celu zaproponowania w pełni zobiektywizowanego kryterium bezpieczeństwa w zakresie unikania zderzeń statków. W tym celu, możliwe byłoby zrealizowanie badań uwzględniających szerokie spektrum zarówno statków własnych jak i przeszkód, stanowiących wyczerpującą grupę reprezentatywną jednostek i związanych z nimi parametrów manewrów wymijających oraz zakłóceń pogodowych. Wyznaczenie bardzo obszernego zbioru CADCA dla typowych prędkości eksploatacyjnych statków, powiązanych z typami i wymiarami jednostek w zadanych warunkach pogodowych, pozwoliłoby stworzyć swoisty metamodel CADCA. Jego wykorzystanie mogłoby pozwolić na zaproponowanie uśrednionego bądź najbardziej zbliżonego obszaru CADCA dla zadanych, wejściowych parametrów modelu. Takie rozwiązanie można by uzyskać poprzez wykorzystanie analizy historycznych danych o ruchu statków pochodzących z AIS, do uzyskania statystycznych rozkładów dla reprezentatywnych grup statków, podczas gdy sam metamodel mógłby wykorzystywać np. podejście bazujące na sztucznych sieciach neuronowych. Dzięki temu, zaproponowane wyniki nie dotyczyłyby pojedynczego statku bądź pojedynczej grupy jednostek. Byłyby natomiast zuniwersalizowane, zobiektywizowane i dobrane na podstawie wielu czynników decyzyjnych, co pozwoliłoby na szerokie spektrum zastosowania koncepcji m.in. w zastosowaniach brzegowych związanych z określaniem poziomu ryzyka w czasie rzeczywistym. Dzięki temu, nie byłoby konieczne każdorazowe dostarczanie trajektorii z zewnętrznego modelu ruchu dla konkretnego statku.

Kolejne kierunki rozwoju CADCA, to także możliwość rozwinięcia koncepcji dwuwymiarowego obszaru do trójwymiarowej przestrzeni granicznej. W tym celu, należałoby uwzględnić dodatkową współrzędną pionową i weryfikować symulacyjnie kontakt podwodnej części kadłuba z dnem morskim lub kontakt nadwodnej części statku z przeszkodą stałą. Takie badania i rozwinięcie zaproponowanej koncepcji, pozwoliłoby w przyszłości, poza przypadkiem zderzenia jednostki, rozważać również jej wejście na mieliznę lub wolny prześwit pionowy np. podczas przechodzenia statku pod mostem.

Jeden z kierunków rozwoju koncepcji dynamicznego obszaru granicznego, to również szersze zastosowanie CADCA na statkach autonomicznych, w szczególności w ramach algorytmów negocjacyjnych zakładających interakcję oraz współpracę pomiędzy jednostkami zaangażowanymi w sytuację spotkaniową. W trakcie rozwoju badań nad MASS oraz ich stopniowego wprowadzania do eksploatacji, możliwe byłoby rozważanie wpływu współpracy statku własnego z napotkanym obiektem na wielkość i przebieg obwiedni CADCA. W tym celu należałoby zrealizować badania, w których statek obcy nie pozostaje jak dotychczas bierny w trakcie sytuacji nadmiernego zbliżenia. Zamiast utrzymywać swój kurs i prędkość, należałoby zweryfikować różne kombinacje manewrów statku własnego oraz obcego - zarówno korzystne powodujące zmniejszenie wymaganego obszaru granicznego, jak i skrajnie niekorzystne, kiedy statek obcy manewruje w kierunku jednostki własnej. Sytuacja taka może zaistnieć chociażby w przypadku awarii lub błędu któregoś z systemów odpowiedzialnych za sterowanie jednostką MASS. Takie sytuacje są jednak możliwe również w przypadku konwencyjnych statków obsadzonych załogą, gdzie w wyniku błędów lub złej komunikacji, dochodziło już do wypadków morskich jak np. w przypadku zderzenia statków Baltic Ace i Corvus J w grudniu 2012 roku (Bahamas Maritime Authority, 2016; Kulbiej & Wołęjsza, 2016). Zrealizowanie takich badań symulacyjnych i zweryfikowanie wpływu wspólnego działania obu statków byłoby możliwe poprzez nieznaczną modyfikację zaproponowanej metody wyznaczania CADCA. Otrzymane wyniki mogłyby przyczynić się do rozszerzenia możliwości aplikacyjnych koncepcji CADCA, w szczególności w kierunku jej zastosowania w algorytmach negocjacyjnych bazujących na współpracy obu jednostek (Pietrzykowski i in., 2022).

5.3. Perspektywiczne zastosowania CADCA

Ze względu na możliwość odwzorowania dynamicznej natury sytuacji spotkaniowej na morzu za pomocą CADCA, przyszłe zastosowania przedstawionej koncepcji obszaru powinny

skupiać się wokół aspektów związanych z bezpieczeństwem nawigacji. Jednakże, w zależności od celu zastosowania CADCA oraz potencjalnego użytkownika końcowego, możliwe jest elastyczne dopasowanie warstwy informacyjnej oraz wizualizacyjnej CADCA do możliwie trafnej i intuicyjnego odwzorowania ich potrzeb. Dodatkowym atutem przedstawionej koncepcji jest symulacyjna metoda wyznaczania obszaru oraz jej wysoka aplikacyjność, co pozwala na szerokie spektrum wykorzystania CADCA w transporcie morskim. Dotyczy to zarówno statków obsadzonych załogą, jednostek autonomicznych, a także administracji morskich oraz służb nadzoru ruchu.

5.3.1. Zastosowania pokładowe

Do potencjalnych, przyszłych zastosowań CADCA, w których możliwe byłoby wykorzystanie koncepcji bezpośrednio na pokładzie statku należą:

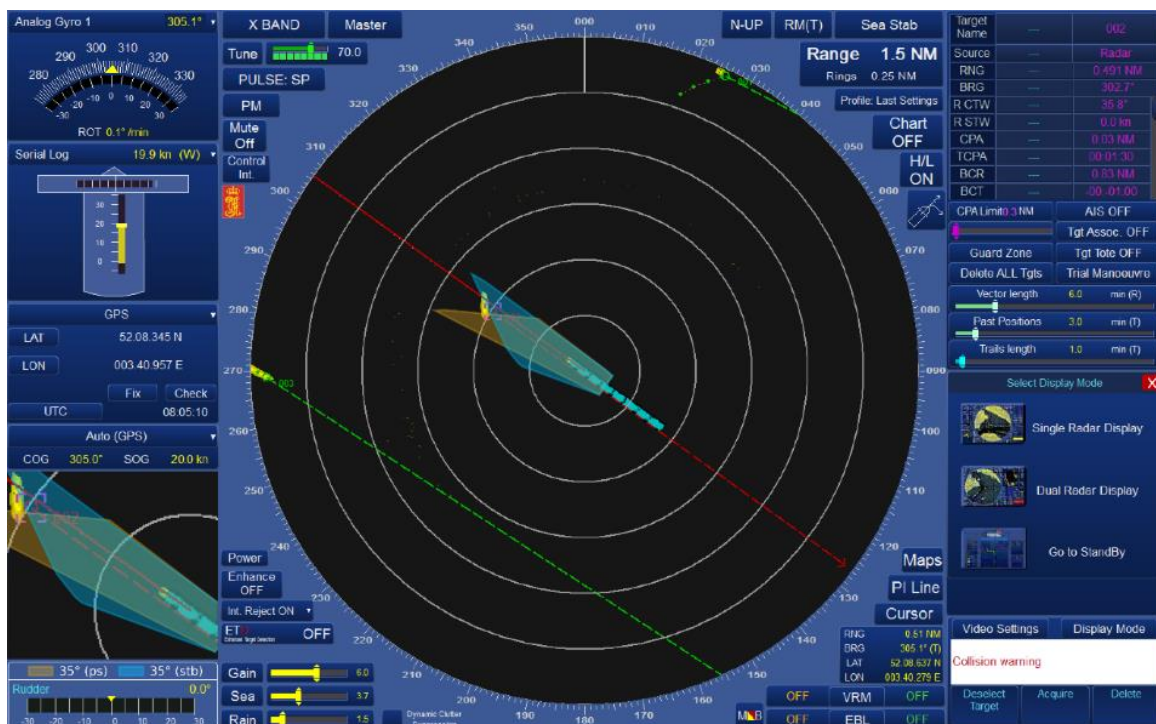
- Udostępnienie i wyświetlanie oficerowi wachtowemu dodatkowej warstwy informacji za pomocą nowej funkcjonalności - nakładki CADCA w urządzeniach ARPA lub ECDIS (Gil, 2021). Propozycję wizualizacji takiego rozwiązania na ekranie radarowym dla przykładowej sytuacji spotkaniowej zaprezentowano na Rysunku 55 i Rysunku 56. Jak zaprezentowano, dla wybranego echa radarowego dodanego do śledzenia, włączono opcję nakładki CADCA dla różnych kątów wyłożenia steru, wyznaczonych dla obecnej sytuacji nawigacyjnej i pogodowej. W takiej sytuacji nawigator otrzymywałby dodatkową informację dotyczącą realizacji manewru wymijającego dla wychylenia steru 5° na prawą i lewą burtę (Rysunek 55). Wraz z rozwojem sytuacji spotkaniowej, mogłyby być dostępne dodatkowe obwiednie wyznaczone dla większych kątów wychylenia steru (np. 35° jak na zaproponowano na Rysunku 56).
- Wykorzystanie CADCA w nawigacyjnych systemach wspomaganie decyzji DSS, do informowania nawigatora o konieczności (i czasie lub odległości) realizacji manewru ostatniej szansy, zarówno na statkach obsadzonych załogą, jak i MASS operujących w stopniu DoA-1, np. w formie wskaźników wyprzedzających (Wróbel i in., 2021).
- Wykorzystanie CADCA do wyznaczania granicznych parametrów spotkaniowych lub kalibrowania wykorzystywanych domen statków, używanych następnie w składowych systemów ostrzegania o zderzeniach CAS

(ang. *Collision Alert System*) (Szlapczynski & Szlapczynska, 2021) lub DSS (Gil, Wróbel, i in., 2020; Montewka i in., 2022).

- Wykorzystanie CADCA na statkach w pełni autonomicznych (MASS DoA-4) w algorytmach planowania bezpiecznego przejścia, negocjacyjnych oraz unikania zderzeń pomiędzy statkami zaangażowanymi w spotkanie (C. Liu i in., 2022; Öztürk i in., 2022; Vagale, Bye, i in., 2021; Veitch & Andreas Alsos, 2022). Ponieważ zakłada się, że statki MASS będą znać swoje modele ruchu (koncepcja cyfrowego bliźniaka, ang. *digital twin*) (Utne i in., 2020; Vasanthan & Nguyen, 2021), możliwa mogłaby być wymiana informacji w czasie rzeczywistym, z uwzględnieniem bieżącej sytuacji nawigacyjnej, pogodowej, czy nawet potencjalna współpraca oraz ustalanie manewrów pomiędzy jednostkami (Akdağ i in., 2022).



Rysunek 55. Możliwa wizualizacja CADCA w formie nakładki na radar Manta firmy Kelvin Hughes pracujący na zakresie 3 Mm (Gil, 2021).



Rysunek 56. Możliwa wizualizacja CADCA w formie nakładki na radar Manta firmy Kelvin Hughes pracujący na zakresie 1,5 Mm (Gil, 2021).

5.3.2. Zastosowania brzegowe

Poza zastosowaniami pokładowymi, możliwe byłoby także wykorzystanie zaproponowanej koncepcji CADCA w wybranych rozwiązaniach lądowych. Ma to szczególne znaczenie ze względu na fakt, że rozwiązania związane z szeroko pojętą automatyzacją, komputeryzacją oraz wykorzystaniem sztucznej inteligencji w transporcie morskim są stosowane nie tylko bezpośrednio na pokładach statków, ale również w portach i terminalach (de la Peña Zarzuelo i in., 2020; Kaup i in., 2021) oraz rozwiązaniach dedykowanych służbie VTS (Bukhari i in., 2013; Kao i in., 2007; Tsou i in., 2010). Do perspektywicznych możliwości aplikacyjnych w zastosowaniach lądowych należałyby w szczególności:

- Udostępnianie i wyświetlanie operatorowi służby lądowej (RCC lub dyspozytorowi służby VTS) dodatkowej warstwy informacji za pomocą funkcjonalności CADCA. Działanie to mogłoby być realizowane na urządzeniach ARPA lub ECDIS (Gil, 2021), podobnie jak w rozwiązaniach pokładowych.
- Wykorzystanie CADCA jako zobiektywizowanego kryterium bezpieczeństwa danej grupy statków (wyznaczonego na podstawie krytycznych scenariuszy nawigacyjnych), w oprogramowaniu służącym monitorowaniu ruchu

morskiego. Potencjalnym zastosowaniem koncepcji, byłoby jej wykorzystanie w rozwiązaniach związanych z szacowaniem ryzyka zderzenia w czasie rzeczywistym. Dzięki temu, możliwe byłoby wyznaczanie jednostek zaangażowanych w potencjalnie niebezpieczne sytuacje spotkaniowe i podjęcie prewencyjnych działań przez służby nadzorujące bezpieczeństwo transportu morskiego.

- Zastosowanie koncepcji CADCA w morskim planowaniu przestrzennym. Możliwe byłoby wykorzystanie obszarów granicznych jako zobiektywizowanego kryterium bezpieczeństwa służącego np. strategicznej ocenie ryzyka danej grupy statków (Mazurek i in., 2022). Użycie CADCA mogłoby zostać wykorzystane w procesie planowania zmian w ruchu morskim, projektowania torów i dróg wodnych (np. w celu wyznaczenia lub kalibracji zakładanej szerokości toru wodnego, wpływającej na przyszły obszar manewrowy statku) (Gucma i in., 2022; Gućma & Ślącćka, 2015; Ślącćka, 2001).

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W niniejszej rozprawie poruszono problem związany z unikaniem zderzeń statków morskich z innymi jednostkami i przeszkodami stacjonarnymi. Po dokonaniu przeglądu literatury w zakresie istniejących rozwiązań dotyczących unikania kolizji w transporcie morskim, zidentyfikowano ograniczenia w dotychczas zaproponowanych koncepcjach. Do najczęściej występujących wad należą: brak obiektywizacji wskaźników poprzez subiektywny i arbitralny dobór parametrów bezpieczeństwa, brak powiązania wskaźników z manewrem wymijającym, ignorowanie występujących na akwenie zakłóceń środowiskowych, a także pomijanie dynamiki ruchu statku. W związku powyższym, celem niniejszej pracy było *opracowanie metody pozwalającej na wyznaczenie dynamicznego granicznego obszaru manewrowego dla statku morskiego w sytuacji kolizyjnej, z możliwością jego zastosowania na jednostkach załogowych oraz autonomicznych.*

W odpowiedzi na zidentyfikowane ograniczenia istniejących rozwiązań, opracowano i zaproponowano rozwiniętą koncepcję dynamicznego granicznego obszaru manewrowego CADCA (ang. *Collision Avoidance Dynamic Critical Area*). Jest to obszar zbudowany wokół statku własnego, którego obwiednia wskazuje najmniejszą odległość do napotkanego obiektu, w której możliwe jest wykonanie manewru ostatniej szansy dla zadanych parametrów sytuacji spotkaniowej (rodzaj, kształt i rozmiar przeszkody, wzajemne położenie obiektów), manewru wymijającego (prędkość początkowa statku własnego, kąt wychylenia steru, planowana zmiana kursu) oraz zakłóceń środowiskowych (wysokość fali znacznej, kąt natarcia fali na kadłub). Do wyznaczenia obszaru CADCA wykorzystano autorskie oprogramowanie symulacyjne implementujące opracowaną metodę, które służy do obliczania wartości najmniejszej odległości do zderzenia MDTC (ang. *Minimum Distance to Collision*). Zastosowanie tego wskaźnika pozwoliło na uwzględnienie najbardziej niekorzystnej sytuacji nawigacyjnej, poprzez wybranie ze zbioru wyznaczonych wartości MDTC maksymalnej dla danego kąta kursowego. Zaproponowana metoda symulacyjna pozwala na uwzględnienie geometrii sytuacji spotkaniowej oraz fizyki ruchu statku. Właściwości manewrowe statku oraz jego ruch na fali zostały uwzględnione poprzez zastosowanie zewnętrznego modelu ruchu *LaiDyn*, który w zrealizowanych badaniach był wybrany jako przykładowe źródło danych wejściowych do oprogramowania symulacyjnego.

W dysertacji przedstawiono również szereg rozwiązań pozwalających na zniwelowanie wpływu zidentyfikowanych ograniczeń metody oraz występujących niepewności. W tym celu,

dane wejściowe zawierające trajektorie statku są poddawane wstępnej obróbce, co pozwala uwzględnić stochastyczną realizację falowania i zmniejszyć istniejące niepewności wynikające z matematycznego modelowania zachowania kadłuba na fali nieregularnej. Kolejnym sposobem minimalizowania niepewności jest zastosowanie bufora powiększającego wirtualnie obwiednię kadłuba jednostki, m.in. o poprawki związane ze wzajemnym oddziaływaniem na siebie mijających się statków. W pracy przedstawiono również sposób racjonalizacji CADCA, poprzez uwzględnienie w metodzie symulacyjnego wyznaczania MDTC, dopuszczalnej odległości przejścia przed dziobem (BCR), wyznaczonej w oparciu o historyczne dane empiryczne.

W celu zaprezentowania skuteczności metody wyznaczania CADCA oraz zbadania dynamicznego charakteru zaproponowanej koncepcji, przeprowadzono obszerne badania symulacyjne. Do realizacji badań wybrano statek pasażerski typu Ro-Pax oraz zróżnicowane przeszkody – od statku wycieczkowego w drodze, po stacjonarne obiekty o regularnym i nieregularnym kształcie oraz szerokim spektrum wymiarów. Analizę wyników przeprowadzono dla wybranych scenariuszy symulacyjnych, w celu zbadania wpływu sytuacji spotkaniowej, parametrów manewru wymijającego oraz zakłóceń środowiskowych na rozmiar i kształt CADCA. Otrzymane wyniki pozwoliły wykazać, że:

- CADCA posiada dynamiczny charakter ze względu na znaczne zróżnicowanie obszarów w zależności od zadanych parametrów brzegowych symulacji. Wpływ na wielkość i kształt CADCA mają zarówno charakterystyka sytuacji spotkaniowej, parametry manewru wymijającego oraz warunki falowe występujące na akwenuie.
- Spośród właściwości manewru wymijającego, największy wpływ na rozmiar obszaru w spotkaniach dwóch jednostek w drodze ma różnica początkowej prędkości pomiędzy nimi.
- W przypadku statków płynących z jednakową prędkością, parametrem decydującym o największej wymaganej powierzchni manewrowej jest planowana wielkość zwrotu (odchylenie od kursu początkowego statku).
- Kąt wychylenia płetwy sterowej ma decydujący wpływ na rozmiar CADCA w spotkaniach z przeszkodą stacjonarną. Wynika to z bezpośredniego przełożenia tego parametru na średnicę taktyczną cyrkulacji statku, przy korzystnej dla statku własnego różnicy prędkości pomiędzy obiektami.

- Porównanie uproszczonych CADCA, będących z założenia obszarami krytycznymi wskazuje, że mogą one osiągać rozmiary większe od wybranych, zgeneralizowanych domen statku.

W pracy przedyskutowano istniejące ograniczenia metody i zaproponowano możliwe rozwiązania zidentyfikowanych problemów. Nakreślono przyszłe kierunki rozwoju koncepcji i prowadzenia dalszych badań w zakresie unikania kolizji statków. W pracy omówiono również szeroki wachlarz potencjalnych zastosowań aplikacyjnych CADCA, ze względu na użyteczny charakter zaproponowanego wskaźnika oraz algorytmiczną metodę wyznaczania dynamicznego obszaru granicznego. Zaproponowane formy implementacji CADCA, dotyczyły zarówno rozwiązań dla statków obsadzonych załogą, przyszłych jednostek autonomicznych, jak również zastosowania koncepcji przez służby nadzoru ruchu statków (np. jako zobiektywizowanego kryterium wykonalności przez statek manewru wymijającego). W związku z tym, zaproponowano potencjalne wykorzystanie CADCA w formie dodatkowej warstwy informacji w urządzeniach nawigacyjnych, elementu składowego algorytmów planowania bezkolizyjnego przejścia statku, czy jako wskaźnika wykorzystywanego w szacowaniu ryzyka wypadku w czasie rzeczywistym.

Przeprowadzone badania symulacyjne oraz analiza otrzymanych wyników pozwalają stwierdzić, że postawiona w dysertacji teza badawcza stanowiąca, że *„uwzględnienie charakterystyki sytuacji spotkaniowej statku morskiego, opisującej wzajemne położenie oraz dynamikę ruchu obiektów w warunkach występowania zakłóceń środowiskowych, pozwala na wyznaczenie metodą symulacyjną zobiektywizowanego kryterium wykonalności manewru wymijającego, którym jest graniczny obszar manewrowy statku”* została potwierdzona. Jednocześnie, główny cel badawczy rozprawy, dotyczący opracowania metody wyznaczania obszaru granicznego i jego możliwej implementacji na statkach obsadzonych załogą oraz jednostkach autonomicznych został pomyślnie osiągnięty.

SPIS RYSUNKÓW

Rysunek 1. Etapy działania statku mającego pierwszeństwo drogi. Przetłumaczono na podstawie: (Gil, Montewka, i in., 2020b).....	16
Rysunek 2. Obszar zagrożenia kolizyjnego CTPA. Przetłumaczono na podstawie: (Szlapczynski & Szlapczynska, 2017a).....	19
Rysunek 3. Rozlokowanie stref OZT dla przykładowego spotkania z pięcioma statkami obcymi. Przetłumaczono na podstawie: (Sawada i in., 2021)	21
Rysunek 4. Przykładowe domeny statków dla jednostki o długości 200 m. Przetłumaczono na podstawie: (Gil, 2021)	22
Rysunek 5. Wysokopoziomowa procedura wyznaczania CADCA	26
Rysunek 6. Wysokopoziomowy schemat blokowy oprogramowania symulacyjnego	28
Rysunek 7. Początkowe pozycjonowanie statku własnego oraz przeszkody (oznaczona kolorem szarym) dla wybranego kursu rzeczywistego (Montewka i in., 2022).....	29
Rysunek 8. Schemat blokowy fragmentu algorytmu pozycjonujący obiekty na początku symulacji.....	30
Rysunek 9. Graficzna reprezentacja wskaźnika MDTC podczas spotkania statku z przeszkodą stacjonarną (A) oraz inną jednostką w drodze (B)	32
Rysunek 10. Kolejne etapy symulacyjnego wyznaczania MDTC na przykładzie dwóch statków w drodze.....	33
Rysunek 11. Przykładowy scenariusz symulacyjny przedstawiający wykrywanie akceptowalnego progu BCR podczas wyznaczania MDTC.....	35
Rysunek 12. Schemat blokowy fragmentu programu odpowiedzialnego za obliczanie pojedynczej wartości MDTC dla dwóch statków w drodze	35
Rysunek 13. Mapa gęstości ukazująca analizowane pozycje statków pochodzące z danych AIS (Gil i in., 2022)	36
Rysunek 14. Przykład sytuacji przejścia przed dziobem statku i wyznaczania wartości BCR. Przetłumaczono na podstawie: (Gil i in., 2022).....	37
Rysunek 15. Rozkład statystyczny BCR z podziałem na typy statków zaangażowanych w spotkanie jednostek w Cieśninach Duńskich. Zmodyfikowano na podstawie: (Gil i in., 2022).....	37
Rysunek 16. Poprawki składowe bufora niepewności	38
Rysunek 17. Kolejne etapy konstruowania przykładowej obwiedni CADCA	40
Rysunek 18. Różne możliwości wizualizacji obszaru CADCA.....	43

Rysunek 19. Związek pomiędzy reprezentacjami fal w dziedzinie częstotliwości i w dziedzinie czasu dla krótkoterminowego ujęcia stanu morza dla ustalonego falowania rozwiniętego. Przetłumaczono na podstawie: (Faltinsen, 2005)	46
Rysunek 20. Rozrzut pozycji statku dla różnych realizacji falowania w wybranym scenariuszu symulacyjnym w momencie osiągnięcia przez statek kursu 180°	48
Rysunek 21. Przykładowy rozkład maksymalnego chwilowego kołysania statku w wybranym scenariuszu symulacyjnym	48
Rysunek 22. Przykład sprawdzania średniej kroczącej dla wybranego scenariusza symulacyjnego i analizy kołysania bocznego	49
Rysunek 23. Wyniki wyznaczania minimalnej liczby realizacji falowania dla kołysania bocznego w wybranym scenariuszu symulacyjnym i różnych dopuszczalnych wartości błędów	50
Rysunek 24. Przykład schematycznego wyznaczania trajektorii reprezentatywnej spośród wszystkich trajektorii wejściowych dla przykładowego scenariusza symulacyjnego	51
Rysunek 25. Układy współrzędnych wykorzystywane w modelu LaiDyn. Przetłumaczono na podstawie: (Matusiak, 2017).....	53
Rysunek 26. Przyjęta w modelu LaiDyn konwencja wyrażania kierunku oddziaływania fali na kadłub statku. Przetłumaczono na podstawie: (Matusiak, 2021).....	54
Rysunek 27. Przykładowa wizualizacja cyrkulacji statku zamodelowana z wykorzystaniem programu LaiDyn – trajektoria oraz wybrane parametry ruchu jednostki w czasie	56
Rysunek 28. Zwymiarowane obrysy obiektów wybranych do badań symulacyjnych.....	59
Rysunek 29. Model statku D-RoPax projektu firmy NAPA wykorzystany w badaniach symulacyjnych (Hirdaris i in., 2019)	59
Rysunek 30. Model statku Floodstand-A (FSA) wykorzystany w badaniach symulacyjnych (Kujanpää & Routi, 2009)	60
Rysunek 31. Obiekty wybrane jako sztuczne przeszkody stacjonarne – platforma wiertnicza Zentech Z-636 (Zentech Inc., 2014) (po lewej) oraz statek wiertniczy Saipem 12000 (Saipem S.p.A., 2018) (po prawej)	60
Rysunek 32. Wybrana izobata 18 ft. na podejściu do portu Nowy Jork - lokalizacja na mapach nawigacyjnych (Office of Coast Survey NOAA, 2022) oraz zdjęciach satelitarnych (Google LLC, 2022)	61

Rysunek 33. Różnica kursów ΔKR pomiędzy statkami dla dwóch przykładowych sytuacji spotkaniowych	62
Rysunek 34. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S1 dla różnych kursów początkowych statku własnego	66
Rysunek 35. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S2 dla różnych kursów początkowych statku własnego	66
Rysunek 36. Porównanie wymaganych powierzchni CADCA w zależności od kursu statku własnego (kolumny) dla każdej z przeszkód (rzędy).....	68
Rysunek 37. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S3 dla różnych wychyleń płetwy sterowej.....	70
Rysunek 38. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S4 dla różnych wychyleń płetwy sterowej.....	70
Rysunek 39. Porównanie trajektorii statków, dla których wyznaczono maksymalne MDTC dla spotkania dwóch jednostek typu Ro-Pax oraz zwrotu na prawą (A) i lewą (B) burtę w scenariuszu S4.....	71
Rysunek 40. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S5 dla różnych prędkości statku własnego i kierunku realizacji zwrotu	73
Rysunek 41. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S6 dla różnych prędkości statku własnego i kierunku realizacji zwrotu	73
Rysunek 42. Porównanie trajektorii statków, dla których wyznaczono maksymalne MDTC w spotkaniach jednostek D-RoPax i FSA płynących z różnymi prędkościami początkowymi w scenariuszu S6	74
Rysunek 43. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S7 dla różnych zmian kursu statku po zwrocie.....	75
Rysunek 44. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S8 dla różnych zmian kursu statku po zwrocie.....	75
Rysunek 45. Porównanie trajektorii statku, dla których wyznaczono maksymalne MDTC dla spotkania z przyjętą izobata bezpieczeństwa i różnych wartości zmiany kursu w scenariuszu S8.....	77
Rysunek 46. Mapa ciepła uzyskanych powierzchni CADCA dla wszystkich rozpatrywanych parametrów manewru wymijającego dla spotkania statku własnego z D-RoPax (po lewej) i S12k (po prawej).....	77
Rysunek 47. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S9 dla różnych zmian wysokości fali znacznej	80

Rysunek 48. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S10 dla różnych zmian wysokości fali znacznej	80
Rysunek 49. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S11 dla różnych kątów natarcia fali na kadłub.....	81
Rysunek 50. Obszary CADCA uzyskane w scenariuszu S12 dla różnych kątów natarcia fali na kadłub.....	81
Rysunek 51. Porównanie trajektorii statku, dla których wyznaczono maksymalne MDTC dla spotkania z przyjętą izobatą bezpieczeństwa i różnych wartości kierunków fali w scenariuszu S12.....	83
Rysunek 52. Mapa ciepła powierzchni uzyskanych dla dwóch przeszkód, różnych wysokości fali znacznej oraz wszystkich analizowanych kątów natarcia fali na kadłub w chwili rozpoczęcia manewru	83
Rysunek 53. Porównanie wybranych domen statku z uproszczonymi CADCA wyznaczonymi dla dwóch scenariuszy symulacyjnych	85
Rysunek 54. Trajektorie dla maksymalnych wartości MDTC wyznaczonych dla spotkania ze statkiem D-RoPax oraz platformą Zentech dla przedstawionych uproszczonych obwiedni CADCA.....	86
Rysunek 55. Możliwa wizualizacja CADCA w formie nakładki na radar Manta firmy Kelvin Hughes pracujący na zakresie 3 Mm (Gil, 2021).	93
Rysunek 56. Możliwa wizualizacja CADCA w formie nakładki na radar Manta firmy Kelvin Hughes pracujący na zakresie 1,5 Mm (Gil, 2021).	94

SPIS TABEL

Tabela 1. Charakterystyka obiektów wybranych do badań symulacyjnych	58
Tabela 2. Charakterystyka scenariuszy symulacyjnych wybranych do analizy.....	64

BIBLIOGRAFIA

1. Abilio Ramos, M., Utne, I. B., & Mosleh, A. (2019). Collision avoidance on maritime autonomous surface ships: Operators' tasks and human failure events. *Safety Science*, *116*, 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.02.038>
2. Acanfora, M., Krata, P., Montewka, J., & Kujala, P. (2018). Towards a method for detecting large roll motions suitable for oceangoing ships. *Applied Ocean Research*, *79*, 49–61. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.07.005>
3. Acanfora, M., Montewka, J., Hinz, T., & Matusiak, J. (2017a). On the estimation of the design loads on container stacks due to excessive acceleration in adverse weather conditions. *Marine Structures*, *53*, 105–123. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2017.01.003>
4. Acanfora, M., Montewka, J., Hinz, T., & Matusiak, J. (2017b). Towards realistic estimation of ship excessive motions in heavy weather. A case study of a containership in the Pacific Ocean. *Ocean Engineering*, *138*, 140–150. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.04.025>
5. Akdağ, M., Solnør, P., & Johansen, T. A. (2022). Collaborative collision avoidance for Maritime Autonomous Surface Ships: A review. *Ocean Engineering*, *250*, 110920. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110920>
6. Allianz Global Corporate & Specialty. (2021). *Safety and Shipping Review 2021: An annual review of trends and developments in shipping losses and safety*. Allianz Global Corporate & Specialty SE. <https://www.agcs.allianz.com/content/dam/onemarketing/agcs/agcs/reports/AGCS-Safety-Shipping-Review-2019.pdf>
7. Bahamas Maritime Authority. (2016). *Report of the investigation into the loss of m.v Baltic Ace following a collision with m.v Corvus J at the North Hinder Junction Precautionary Area on the 5th December 2012*. Bahamas Maritime Authority.
8. Baldauf, M., Benedict, K., Fischer, S., Motz, F., & Schröder-Hinrichs, J.-U. (2011). Collision avoidance systems in air and maritime traffic. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, *225*(3), 333–343. <https://doi.org/10.1177/1748006X11408973>
9. Baldauf, M., Mehdi, R., Deeb, H., Schröder-Hinrichs, J. U., Benedict, K., Krüger, C., Fischer, S., & Gluch, M. (2015). Manoeuvring areas to adapt ACAS for the maritime

- domain. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 43(15), 39–47. <https://doi.org/10.17402/037>
10. Boccotti, P. (2000). *Wave mechanics for ocean engineering* (1st ed). Elsevier.
 11. Bogusławski, K., Gil, M., Nasur, J., & Wróbel, K. (2022). Implications of autonomous shipping for maritime education and training: The cadet's perspective. *Maritime Economics & Logistics*, 24(2), 327–343. <https://doi.org/10.1057/s41278-022-00217-x>
 12. Bole, A. G., Wall, A., & Norris, A. (2014). *Radar and ARPA manual: Radar, AIS and target tracking for marine radar users* (3rd edition). Butterworth-Heinemann.
 13. Bolman, B., Jak, R. G., & van Hoof, L. (2018). Unravelling the myth – The use of Decisions Support Systems in marine management. *Marine Policy*, 87, 241–249. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.10.027>
 14. Bukhari, A. C., Tusseyeva, I., lee, B.-G., & Kim, Y.-G. (2013). An intelligent real-time multi-vessel collision risk assessment system from VTS view point based on fuzzy inference system. *Expert Systems with Applications*, 40(4), 1220–1230. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.016>
 15. Campbell, S., Naeem, W., & Irwin, G. W. (2012). A review on improving the autonomy of unmanned surface vehicles through intelligent collision avoidance manoeuvres. *Annual Reviews in Control*, 36(2), 267–283. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2012.09.008>
 16. Celik, M., & Cebi, S. (2009). Analytical HFACS for investigating human errors in shipping accidents. *Accident Analysis & Prevention*, 41(1), 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.09.004>
 17. Chen, P., Huang, Y., Mou, J., & van Gelder, P. H. A. J. M. (2018). Ship collision candidate detection method: A velocity obstacle approach. *Ocean Engineering*, 170, 186–198. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.023>
 18. Chen, P., Huang, Y., Mou, J., & van Gelder, P. H. A. J. M. (2019). Probabilistic risk analysis for ship-ship collision: State-of-the-art. *Safety Science*, 117, 108–122. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.04.014>
 19. Coldwell, T. G. (1983). Marine Traffic Behaviour in Restricted Waters. *Journal of Navigation*, 36(3), 430–444. <https://doi.org/10.1017/S0373463300039783>
 20. Colley, B. A., Curtis, R. G., & Stockel, C. T. (1983). Manoeuvring Times, Domains and Arenas. *Journal of Navigation*, 36(2), 324–328. <https://doi.org/10.1017/S0373463300025030>

21. Cornish, M. M., & Ives, E. E. (2009). *Reeds maritime meteorology* (3rd Ed.). Adlard Coles Nautical.
22. Crestelo Moreno, F., Roca Gonzalez, J., Suardíaz Muro, J., & García Maza, J. A. (2022). Relationship between human factors and a safe performance of vessel traffic service operators: A systematic qualitative-based review in maritime safety. *Safety Science*, *155*, 105892. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105892>
23. Davis, P. V., Dove, M. J., & Stockel, C. T. (1980). A Computer Simulation of Marine Traffic Using Domains and Arenas. *Journal of Navigation*, *33*(2), 215–222. <https://doi.org/10.1017/S0373463300035220>
24. de la Peña Zarzuelo, I., Freire Soeane, M. J., & López Bermúdez, B. (2020). Industry 4.0 in the port and maritime industry: A literature review. *Journal of Industrial Information Integration*, *20*, 100173. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100173>
25. Dinh, G. H., & Im, N. (2016). The combination of analytical and statistical method to define polygonal ship domain and reflect human experiences in estimating dangerous area. *International Journal of E-Navigation and Maritime Economy*, *4*, 97–108. <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2016.06.009>
26. Du, L., Banda, O. A. V., Huang, Y., Goerlandt, F., Kujala, P., & Zhang, W. (2021). An empirical ship domain based on evasive maneuver and perceived collision risk. *Reliability Engineering & System Safety*, *213*, 107752. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107752>
27. Du, L., Goerlandt, F., & Kujala, P. (2020). Review and analysis of methods for assessing maritime waterway risk based on non-accident critical events detected from AIS data. *Reliability Engineering & System Safety*, *200*, 106933. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.106933>
28. Du, L., Goerlandt, F., Valdez Banda, O. A., Huang, Y., Wen, Y., & Kujala, P. (2020). Improving stand-on ship's situational awareness by estimating the intention of the give-way ship. *Ocean Engineering*, *201*, 107110. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107110>
29. Dudoit, A., Rimša, V., Bogdevičius, M., & Skorupski, J. (2022). Effectiveness of Conflict Resolution Methods in Air Traffic Management. *Aerospace*, *9*(2), 112. <https://doi.org/10.3390/aerospace9020112>
30. Dudoit, A., & Skorupski, J. (2020). A Simulation-Based Approach for the Conflict Resolution Method Optimization in a Distributed Air Traffic Control System. W M. Siergiejczyk & K. Krzykowska (Red.), *Research Methods and Solutions to Current*

- Transport Problems: Proceedings of the International Scientific Conference Transport of the 21st Century, 9–12th of June 2019, Ryn, Poland* (T. 1032). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-27687-4>
31. Dudziak, J. (2008). *Teoria okretu*. Fundacja Promocji Przemysłu Okretowego i Gospodarki Morskiej.
 32. EMSA. (2020). *Annual Overview of Marine Casualties and Incidents 2020*. EMSA - European Maritime Safety Agency. <http://www.emsa.europa.eu/news-a-press-centre/external-news/download/5854/3734/23.html>
 33. Faltinsen, O. M. (1999). *Sea loads on ships and offshore structures*. Cambridge University Press.
 34. Faltinsen, O. M. (2005). *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*. Cambridge University Press. <http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=667612>
 35. Fan, C., Wróbel, K., Montewka, J., Gil, M., Wan, C., & Zhang, D. (2020). A framework to identify factors influencing navigational risk for Maritime Autonomous Surface Ships. *Ocean Engineering*, 202, 107188. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107188>
 36. Fiskin, R., Nasiboglu, E., & Yardimci, M. O. (2020). A knowledge-based framework for two-dimensional (2D) asymmetrical polygonal ship domain. *Ocean Engineering*, 202, 107187. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107187>
 37. Fujii, Y., & Tanaka, K. (1971). Traffic Capacity. *Journal of Navigation*, 24(4), 543–552. <https://doi.org/10.1017/S0373463300022384>
 38. Fukuda, G., & Shoji, R. (2017). Development of Analytical Method for Finding the High Risk Collision Areas. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 11(3), 531–536. <https://doi.org/10.12716/1001.11.03.20>
 39. Fukuto, J., & Imazu, H. (2013). New collision alarm algorithm using obstacle zone by target (OZT). *IFAC Proceedings Volumes*, 46(33), 91–96. <https://doi.org/10.3182/20130918-4-JP-3022.00044>
 40. Galor, W. (2016). An assessment of ship encounter situations based on predicted points of collision. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 118(46), 82–87. <https://doi.org/10.17402/122>

41. Gil, M. (2021). A concept of critical safety area applicable for an obstacle-avoidance process for manned and autonomous ships. *Reliability Engineering & System Safety*, 214, 107806. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107806>
42. Gil, M., Koziół, P., Wróbel, K., & Montewka, J. (2022). Know your safety indicator – A determination of merchant vessels Bow Crossing Range based on big data analytics. *Reliability Engineering & System Safety*, 220, 108311. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108311>
43. Gil, M., Montewka, J., Krata, P., Hinz, T., & Hirdaris, S. (2020a). Semi-dynamic ship domain in the encounter situation of two vessels. W C. G. Soares (Red.), *Developments in the Collision and Grounding of Ships and Offshore Structures* (s. 301–307). Taylor and Francis Group.
44. Gil, M., Montewka, J., Krata, P., Hinz, T., & Hirdaris, S. (2020b). Determination of the dynamic critical maneuvering area in an encounter between two vessels: Operation with negligible environmental disruption. *Ocean Engineering*, 213, 107709. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107709>
45. Gil, M., Wróbel, K., Montewka, J., & Goerlandt, F. (2020). A bibliometric analysis and systematic review of shipboard Decision Support Systems for accident prevention. *Safety Science*, 128, 104717. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104717>
46. Gillies i in. (2007). *Shapely: Manipulation and analysis of geometric objects*. toblerity.org. <https://github.com/Toblerity/Shapely>
47. Goodwin, E. M. (1973). A Statistical Study of Ship Domains. *Journal of Navigation*, 26(1), 130. <https://doi.org/10.1017/S0373463300022992>
48. Goodwin, E. M. (1975). A Statistical Study of Ship Domains. *Journal of Navigation*, 28(3), 328–344. <https://doi.org/10.1017/S0373463300041230>
49. Google LLC. (2022). *Google Earth Pro v7.3.4.8642*.
50. Gucma, S., & Ślącza, W. (2015). Methods for Optimization of Sea Waterway Systems and their Application. *Polish Maritime Research*, 22(3), 14–19. <https://doi.org/10.1515/pomr-2015-0051>
51. Gucma, S., Ślącza, W., & Bąk, A. (2022). Assessment of ship manoeuvring safety in waterway systems by relative navigational risk. *Archives of Transport*, 64(4), 109–124. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.1230>
52. Hansen, M. G., Jensen, T. K., Lehn-Schiøler, T., Melchild, K., Rasmussen, F. M., & Ennemark, F. (2013). Empirical Ship Domain based on AIS Data. *Journal of Navigation*, 66(6), 931–940. <https://doi.org/10.1017/S0373463313000489>

53. Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., Wieser, E., Taylor, J., Berg, S., Smith, N. J., Kern, R., Picus, M., Hoyer, S., van Kerkwijk, M. H., Brett, M., Haldane, A., Fernández del Río, J., Wiebe, M., Peterson, P., ... Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585, 357–362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
54. Hinz, T., Acanfora, M., Montewka, J., Krata, P., & Matusiak, J. E. (2018). *Meta-Model Assessing the Probability of Exceeding the Allowed Acceleration Limits, with the Use of Bayesian Network*. 13th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, Kobe, Japan.
55. Hinz, T., Krata, P., Matusiak, J., & Malinowska, K. (2021, czerwiec 7). *Turning maneuver as a potential cause of the next stability failure mode for a ship in operation*. STAB&S - 1st International Conference on the Stability and Safety of Ships and Ocean Vehicles, Glasgow, UK.
56. Hirdaris, S. E., Montewka, J., Matusiak, J., Mikkola, T., Gil, M., Zhang, M., Taimuri, G., Hinz, T., Ruponen, P., & Tompuri, M. (2019). *Extreme scenarios and scenario modelling* (Deliverable 3.1 FLARE project no. 814753). Aalto University.
57. Hörteborn, A., Ringsberg, J. W., Svanberg, M., & Holm, H. (2019). A Revisit of the Definition of the Ship Domain based on AIS Analysis. *Journal of Navigation*, 72(3), 777–794. <https://doi.org/10.1017/S0373463318000978>
58. Huang, Y., Chen, L., Chen, P., Negenborn, R. R., & van Gelder, P. H. A. J. M. (2020). Ship collision avoidance methods: State-of-the-art. *Safety Science*, 121, 451–473. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.09.018>
59. Huang, Y., Chen, L., & van Gelder, P. H. A. J. M. (2019). Generalized velocity obstacle algorithm for preventing ship collisions at sea. *Ocean Engineering*, 173, 142–156. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.12.053>
60. Huang, Y., & van Gelder, P. H. A. J. M. (2020). Collision risk measure for triggering evasive actions of maritime autonomous surface ships. *Safety Science*, 127, 104708. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104708>
61. Huang, Y., van Gelder, P. H. A. J. M., & Wen, Y. (2018). Velocity obstacle algorithms for collision prevention at sea. *Ocean Engineering*, 151, 308–321. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.01.001>
62. Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D graphics environment. *Computing in Science & Engineering*, 9(3), 90–95. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>

63. Im, N., & Luong, T. N. (2019). Potential risk ship domain as a danger criterion for real-time ship collision risk evaluation. *Ocean Engineering*, *194*, 106610. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106610>
64. Imazu, H. (2017). Evaluation Method of Collision Risk by Using True Motion. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, *11*(1), 65–70. <https://doi.org/10.12716/1001.11.01.06>
65. IMO. (1995). *Resolution A.823(19): PERFORMANCE STANDARDS FOR AUTOMATIC RADAR PLOTTING AIDS (ARPAs)*. IMO.
66. IMO. (2002). *RESOLUTION MSC.137(76): STANDARDS FOR SHIP MANOEUVRABILITY*. International Maritime Organization.
67. IMO. (2008). *MSC 85/26/Add.1—Annex 20—Strategy for the development and implementation of e-Navigation*.
68. IMO. (2010). *COLREG : Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea, 1972 (Consolidated Edition 2003)*. International Maritime Organization.
69. IMO. (2011). *Resolution A.1046(27): WORLDWIDE RADIONAVIGATION SYSTEM*.
70. IMO. (2014). *SOLAS : International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, As Amended 2014 (Consolidated Edition 2014)*. IMO Publishing.
71. IMO. (2015). *Resolution A.1106(29): REVISED GUIDELINES FOR THE ONBOARD OPERATIONAL USE OF SHIPBORNE AUTOMATIC IDENTIFICATION SYSTEMS (AIS)*. IMO.
72. IMO. (2019). *LEG 106/8/1—Regulatory scoping exercise and gap analysis of conventions emanating from the legal committee with respect to Maritime Autonomous Surface Ships (MASS): Outcomes of MSC 99 and MSC 100 regarding MASS*.
73. IMO. (2020). *MSC.1/Circ.1627: INTERIM GUIDELINES ON THE SECOND GENERATION INTACT STABILITY CRITERIA*. IMO.
74. Islam, R., Yu, H., Abbassi, R., Garaniya, V., & Khan, F. (2017). Development of a monograph for human error likelihood assessment in marine operations. *Safety Science*, *91*, 33–39. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.07.008>
75. ITTC. (2002). *The Specialist Committee on Prediction of Extreme Ship Motions and Capsizing Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC. II*, 619–748.
76. ITTC. (2005). *Final Report and Recommendations to the 24th ITTC. II*, 369–408.

77. Janßen, T. J., Baldauf, M., Müller-Plath, G., & Kitada, M. (2021). The Future of Shipping: A Shore-Based Experience? W S. Bauk & S. D. Ilčev (Red.), *The 1st International Conference on Maritime Education and Development* (s. 51–61). Springer International Publishing.
78. Kao, S.-L., Lee, K.-T., Chang, K.-Y., & Ko, M.-D. (2007). A Fuzzy Logic Method for Collision Avoidance in Vessel Traffic Service. *Journal of Navigation*, *60*(1), 17–31. <https://doi.org/10.1017/S0373463307003980>
79. Kaup, M., Deja, A., Ślącza, W., & Gróbarczyk, M. (2021). The Port Community System as an example of integration of port users. *Procedia Computer Science*, *192*, 4396–4405. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.09.216>
80. Kayano, J., Imazu, H., Nishizaki, C., & Murai, K. (2015). A study on analysis of characteristics of ships navigators' look-out by using OZT. *10th System of Systems Engineering Conference (SoSE)*, 274–279. <https://doi.org/10.1109/SYSOSE.2015.7151968>
81. Kayano, J., & Kumagai, K. (2017). Effectiveness of the OZT taking into account with the other ships' waypoints information. *Joint 17th World Congress of International Fuzzy Systems Association and 9th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (IFSA-SCIS)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/IFSA-SCIS.2017.8023286>
82. Krata, P., & Montewka, J. (2015). Assessment of a critical area for a give-way ship in a collision encounter. *The Archives of Transport*, *34*(2), 51–60. <https://doi.org/10.5604/08669546.1169212>
83. Krata, P., Montewka, J., & Hinz, T. (2016). Towards the assessment of critical area in a collision encounter accounting for stability conditions of a ship. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, *114*, 169–178.
84. Krata, P., & Szlapczynska, J. (2018). Ship weather routing optimization with dynamic constraints based on reliable synchronous roll prediction. *Ocean Engineering*, *150*, 124–137. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.12.049>
85. Kuchar, J. K., & Yang, L. C. (2000). A review of conflict detection and resolution modeling methods. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *1*(4), 179–189. <https://doi.org/10.1109/6979.898217>
86. Kujanpää, J., & Routi, A.-L. (2009). *Concept Ship Design A* (Deliverable D1.1a Nr FP7-RTD-218532; FLOODSTAND: Integrated flooding and standard for stability and crises management). STX Europe.

87. Kulbiej, E., & Wolejsza, P. (2016). An Analysis of Possibilities How the Collision Between M/V 'Baltic Ace' and M/V 'Corvus J' Could Have Been Avoided. *Annual of Navigation*, 23(1), 121–134. <https://doi.org/10.1515/aon-2016-0008>
88. Kumagai, K., Mochida, T., Tanaka, Y., & Kayano, J. (2012). Basic Study on Analyzing of Maneuvering for Avoiding Collision in the Congested Sea Area where Many Ships are Crossing by Using OZT. *2012 Fifth International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology*, 270–275. <https://doi.org/10.1109/ICETET.2012.63>
89. Kuwata, Y., Wolf, M. T., Zarzhitsky, D., & Huntsberger, T. L. (2014). Safe Maritime Autonomous Navigation With COLREGS, Using Velocity Obstacles. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 39(1), 110–119. <https://doi.org/10.1109/JOE.2013.2254214>
90. Lazarowska, A. (2017). A new deterministic approach in a decision support system for ship's trajectory planning. *Expert Systems with Applications*, 71, 469–478. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.11.005>
91. Lazarowska, A. (2020). Comparison of Discrete Artificial Potential Field Algorithm and Wave-Front Algorithm for Autonomous Ship Trajectory Planning. *IEEE Access*, 8, 221013–221026. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3043539>
92. Lee, H.-J., Furukawa, Y., & Park, D.-J. (2021). Seafarers' awareness-based domain modelling in restricted areas. *Journal of Navigation*, 74(5), 1172–1188. <https://doi.org/10.1017/S0373463321000394>
93. Lenart, A. S. (1983). Collision Threat Parameters for a new Radar Display and Plot Technique. *Journal of Navigation*, 36(3), 404–410. <https://doi.org/10.1017/S0373463300039758>
94. Lenart, A. S. (2015). Analysis of Collision Threat Parameters and Criteria. *Journal of Navigation*, 68(5), 887–896. <https://doi.org/10.1017/S0373463315000223>
95. Lenart, A. S. (2017). Approach Parameters in Marine Navigation – Graphical Interpretations. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 11(3), 521–529. <https://doi.org/10.12716/1001.11.03.19>
96. Liang, X., Qu, X., Wang, N., Li, Y., & Zhang, R. (2019). Swarm control with collision avoidance for multiple underactuated surface vehicles. *Ocean Engineering*, 191, 106516. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106516>
97. Lisowski, J., & Śmierchalski, R. (1995a). Methods to assign the safe manoeuvre and trajectory avoiding collision at sea. *WIT Transactions on The Built Environment*, 12, 8. <https://doi.org/10.2495/MT950581>

98. Lisowski, J., & Śmierchalski, R. (1995b). Assigning of Safe and Optimal Trajectory Avoiding Collision at Sea. *IFAC Proceedings Volumes*, 28(2), 346–350. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)51692-4](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)51692-4)
99. Liu, C., Chu, X., Wu, W., Li, S., He, Z., Zheng, M., Zhou, H., & Li, Z. (2022). Human–machine cooperation research for navigation of maritime autonomous surface ships: A review and consideration. *Ocean Engineering*, 246, 110555. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110555>
100. Liu, K., Yuan, Z., Xin, X., Zhang, J., & Wang, W. (2021). Conflict detection method based on dynamic ship domain model for visualization of collision risk Hot-Spots. *Ocean Engineering*, 242, 110143. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110143>
101. Livadas, C., Lygeros, J., & Lynch, N. A. (1999). High-level modeling and analysis of TCAS. *Proceedings 20th IEEE Real-Time Systems Symposium (Cat. No.99CB37054)*, 115–125. <https://doi.org/10.1109/REAL.1999.818833>
102. Manderbacka, T., Matusiak, J., & Ruponen, P. (2011). Ship Motions Caused by Time-Varying Extra Mass on Board. *Proceedings of the 12th International Ship Stability Workshop*, 263–270.
103. Matusiak, J. (2017). *Dynamics of a Rigid Ship*. Aalto University. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-60-7262-3>
104. Matusiak, J. (2021). *Dynamics of a Rigid Ship—With applications*. Aalto University. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-64-0399-1>
105. Matusiak, J., & Stigler, C. (2012). Ship motion in irregular waves during a turning circle manoeuvre. W N. T. K.J. Spyrou (Red.), *The 11TH International Conference on the Stability of Ships and OCEAN Vehicles, Athens, 23-28 September 2012* (s. 291–298). National Technical University of Athens, School of Naval Architecture and Marine Engineering.
106. Mazurek, J., Lu, L., Krata, P., Montewka, J., Krata, H., & Kujala, P. (2022). An updated method identifying collision-prone locations for ships. A case study for oil tankers navigating in the Gulf of Finland. *Reliability Engineering & System Safety*, 217, 108024. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108024>
107. Montewka, J., Gil, M., & Wróbel, K. (2020). Discussion on the article by Zhang & Meng entitled “Probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment” [Ocean Eng. 186 (2019) 106130]. *Ocean Engineering*, 209, 107527. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107527>

108. Montewka, J., Goerlandt, F., & Kujala, P. (2011). A New Definition of a Collision Zone For a Geometrical Model For Ship-Ship Collision Probability Estimation. *TransNav, International Journal on Marine Navigation and Safety Od Sea Transportation*, 5(3), 365–373. <https://doi.org/10.1201/b11344-16>
109. Montewka, J., Goerlandt, F., & Kujala, P. (2012). Determination of collision criteria and causation factors appropriate to a model for estimating the probability of maritime accidents. *Ocean Engineering*, 40, 50–61. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2011.12.006>
110. Montewka, J., Goerlandt, F., Lammi, H., & Kujala, P. (2011). A Method for Assessing a Causation Factor for a Geometrical MDTC Model for Ship-Ship Collision Probability Estimation. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 5(3), 365–373.
111. Montewka, J., Hinz, T., Kujala, P., & Matusiak, J. (2010). Probability modelling of vessel collisions. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(5), 573–589. <https://doi.org/10.1016/j.res.2010.01.009>
112. Montewka, J., & Krata, P. (2014). Towards the assessment of a critical distance between two encountering ships in open waters. *European Journal of Navigation*, 12(3), 7–14.
113. 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(3), 307–322. <https://doi.org/10.1177/1748006X11399988>
114. Montewka, J., Manderbacka, T., Ruponen, P., Tompuri, M., Gil, M., & Hirdaris, S. (2022). Accident susceptibility index for a passenger ship-a framework and case study. *Reliability Engineering & System Safety*, 218, 108145. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108145>
115. Ochi, M. K. (2005). *Ocean waves: The stochastic approach*. Cambridge University Press.
116. Office of Coast Survey NOAA. (2022, sierpień 17). *NOAA Raster Chart Products*. <https://nauticalcharts.noaa.gov/charts/noaa-raster-charts.html#rnc-charts>
117. Öztürk, Ü., Akdağ, M., & Ayabakan, T. (2022). A review of path planning algorithms in maritime autonomous surface ships: Navigation safety perspective. *Ocean Engineering*, 251, 111010. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111010>

118. Ożoga, B., & Montewka, J. (2018). Towards a decision support system for maritime navigation on heavily trafficked basins. *Ocean Engineering*, *159*, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.073>
119. Perera, L. P., & Guedes Soares, C. (2015). Collision risk detection and quantification in ship navigation with integrated bridge systems. *Ocean Engineering*, *109*, 344–354. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.08.016>
120. Pêtrès, C., Romero-Ramirez, M.-A., & Plumet, F. (2012). A potential field approach for reactive navigation of autonomous sailboats. *Robotics and Autonomous Systems*, *60*(12), 1520–1527. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2012.08.004>
121. Pettersson, H., Brüning, T., & Larsson, M. (2021). *Wave climate in the Baltic Sea 2020: HELCOM BSEFS 2021* [HELCOM Baltic Sea Environment Fact Sheets]. HELCOM.
122. PIANC. (2014). *MarCom WG 121: Harbour Approach Channels—Design Guidelines*. <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHACDGPI2/harbour-approach-channels>
123. Pietrzykowski, Z. (2008). Ship’s Fuzzy Domain – a Criterion for Navigational Safety in Narrow Fairways. *Journal of Navigation*, *61*(3), 499–514. <https://doi.org/10.1017/S0373463308004682>
124. Pietrzykowski, Z., & Uriasz, J. (2009). The Ship Domain – A Criterion of Navigational Safety Assessment in an Open Sea Area. *Journal of Navigation*, *62*(1), 93–108. Cambridge Core. <https://doi.org/10.1017/S0373463308005018>
125. Pietrzykowski, Z., & Uriasz, J. (2010). Knowledge Representation in a Ship’s Navigational Decision Support System. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, *4*(3), 265–270.
126. Pietrzykowski, Z., & Wielgosz, M. (2021). Effective ship domain – Impact of ship size and speed. *Ocean Engineering*, *219*, 108423. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108423>
127. Pietrzykowski, Z., Wołajsza, P., Nozdrzykowski, Ł., Borkowski, P., Banaś, P., Magaj, J., Chomski, J., Mąka, M., Mielniczuk, S., Pańka, A., Hatłas-Sowińska, P., Kulbiej, E., & Nozdrzykowska, M. (2022). The autonomous navigation system of a sea-going vessel. *Ocean Engineering*, *261*, 112104. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112104>

128. Polvara, R., Sharma, S., Wan, J., Manning, A., & Sutton, R. (2018). Obstacle Avoidance Approaches for Autonomous Navigation of Unmanned Surface Vehicles. *Journal of Navigation*, 71(1), 241–256. <https://doi.org/10.1017/S0373463317000753>
129. Press, W. H. (Red.). (2007). *Numerical recipes: The art of scientific computing* (3rd ed). Cambridge University Press.
130. Ravenna, K. (1980). Collision Avoidance Systems—The Evolution Continues. *OCEANS '80*, 193–197. <https://doi.org/10.1109/OCEANS.1980.1151385>
131. Rawson, A., & Brito, M. (2021). A critique of the use of domain analysis for spatial collision risk assessment. *Ocean Engineering*, 219, 108259. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108259>
132. Rawson, A., Rogers, E., Foster, D., & Phillips, D. (2014). Practical Application of Domain Analysis: Port of London Case Study. *Journal of Navigation*, 67(2), 193–209. <https://doi.org/10.1017/S0373463313000684>
133. Riggs, R. F. (1975). A Modern Collision Avoidance Display Technique. *Journal of Navigation*, 28(2), 143–155. <https://doi.org/10.1017/S0373463300037681>
134. Riggs, R. F., & O'Sullivan, J. P. (1980). An Analysis of the Point of Possible Collision. *Journal of Navigation*, 33(2), 259–283. <https://doi.org/10.1017/S037346330003527X>
135. Rong, H., Teixeira, A. P., & Guedes Soares, C. (2021). Spatial correlation analysis of near ship collision hotspots with local maritime traffic characteristics. *Reliability Engineering & System Safety*, 209, 107463. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107463>
136. Rytter, A., & Skorupski, J. (2017). The Concept of Initial Air Traffic Situation Assessment as a Stage of Medium-Term Conflict Detection. *Procedia Engineering*, 187, 420–424. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.395>
137. Saipem S.p.A. (2018). *Saipem 12000—Brochure*. Saipem S.p.A. www.saipem.com/en/identity-and-vision/assets/saipem-12000
138. Savitzky, Abraham., & Golay, M. J. E. (1964). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627–1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>
139. Sawada, R., Sato, K., & Majima, T. (2021). Automatic ship collision avoidance using deep reinforcement learning with LSTM in continuous action spaces. *Journal of Marine Science and Technology*, 26(2), 509–524. <https://doi.org/10.1007/s00773-020-00755-0>

140. Shaobo, W., Yingjun, Z., & Lianbo, L. (2020). A collision avoidance decision-making system for autonomous ship based on modified velocity obstacle method. *Ocean Engineering*, *215*, 107910. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107910>
141. Shigunov, V., el Moctar, O., Papanikolaou, A., Potthoff, R., & Liu, S. (2018). International benchmark study on numerical simulation methods for prediction of manoeuvrability of ships in waves. *Ocean Engineering*, *165*, 365–385. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.07.031>
142. Skorupski, J. (2015). The risk of an air accident as a result of a serious incident of the hybrid type. *Reliability Engineering & System Safety*, *140*, 37–52. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.03.031>
143. Song, A. L., Su, B. Y., Dong, C. Z., Shen, D. W., Xiang, E. Z., & Mao, F. P. (2018). A two-level dynamic obstacle avoidance algorithm for unmanned surface vehicles. *Ocean Engineering*, *170*, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.10.008>
144. Specht, C., Pawelski, J., Smolarek, L., Specht, M., & Dabrowski, P. (2019). Assessment of the Positioning Accuracy of DGPS and EGNOS Systems in the Bay of Gdansk using Maritime Dynamic Measurements. *Journal of Navigation*, *72*(3), 575–587. <https://doi.org/10.1017/S0373463318000838>
145. Statheros, T., Howells, G., & Maier, K. M. (2008). Autonomous Ship Collision Avoidance Navigation Concepts, Technologies and Techniques. *Journal of Navigation*, *61*(1), 129–142. <https://doi.org/10.1017/S037346330700447X>
146. Svanberg, M., Santén, V., Hörteborn, A., Holm, H., & Finnsgård, C. (2019). AIS in maritime research. *Marine Policy*, *106*, 103520. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2019.103520>
147. Szlaczynski, R. (2008). Fuzzy Collision Threat Parameters Area (FCTPA)—A New Display Proposal. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, *2*(4), 359–362.
148. Szlaczynski, R. (2009). Planning Emergency Manoeuvres. *Journal of Navigation*, *62*(1), 79–91. <https://doi.org/10.1017/S0373463308004992>
149. Szlaczynski, R., & Krata, P. (2018). Determining and visualizing safe motion parameters of a ship navigating in severe weather conditions. *Ocean Engineering*, *158*, 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.03.092>
150. Szlaczynski, R., & Szlaczynska, J. (2015). A Target Information Display for Visualising Collision Avoidance Manoeuvres in Various Visibility

- Conditions. *Journal of Navigation*, 68(6), 1041–1055.
<https://doi.org/10.1017/S0373463315000296>
151. Szlapczynski, R., & Szlapczynska, J. (2016). An analysis of domain-based ship collision risk parameters. *Ocean Engineering*, 126, 47–56.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.08.030>
152. Szlapczynski, R., & Szlapczynska, J. (2017a). A method of determining and visualizing safe motion parameters of a ship navigating in restricted waters. *Ocean Engineering*, 129, 363–373. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.11.044>
153. Szlapczynski, R., & Szlapczynska, J. (2017b). Review of ship safety domains: Models and applications. *Ocean Engineering*, 145, 277–289.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.09.020>
154. Szlapczynski, R., & Szlapczynska, J. (2021). A ship domain-based model of collision risk for near-miss detection and Collision Alert Systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 214, 107766. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107766>
155. Szłapczyński, R. (2015). Planowanie i wizualizacja bezpiecznych manewrów statków oparte na zmodyfikowanym diagramie Cockcrofta. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport*, 105, 67–79.
156. Szłapczyński, R., & Śmierzchalski, R. (2009). Supporting navigator's decisions by visualizing ship collision risk. *Polish Maritime Research*, 16(1).
<https://doi.org/10.2478/v10012-008-0015-7>
157. Szubrycht, T. (2020). Marine accidents as potential crisis situations on the Baltic sea. *Archives of Transport*, 54(2), 125–135. <https://doi.org/10.5604/01.3001.0014.2972>
158. Ślącza, W. (2001). Determination vessel's manoeuvring area on the basis of risk failure analysis. W *Seas & Oceans Vol. 1: Proceedings of the 1st International Congress of Seas and Oceans, Szczecin—Międzyzdroje, Poland 18–22 September 2001* (s. 549–558). Dział Wydawnictw Wyższej Szkoły Morskiej.
159. Śmierzchalski, R. (2005). Ships' domains as collision risk at sea in the evolutionary method of trajectory planning. W K. Saeed & J. Pejaś (Red.), *Information Processing and Security Systems* (s. 411–422). Springer US.
160. Taimuri, G., Matusiak, J., Mikkola, T., Kujala, P., & Hirdaris, S. (2020). A 6-DoF maneuvering model for the rapid estimation of hydrodynamic actions in deep and shallow waters. *Ocean Engineering*, 218, 108103.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108103>

161. Taimuri, G., Mikkola, T., Matusiak, J., Kujala, P., & Hirdaris, S. (2019, październik 29). *The Influence of Hydrodynamic Assumptions on Ship Maneuvering*. 22nd Numerical Towing Tank Symposium (NuTTS 2019), Tomar, Portugal.
162. Tam, C., Bucknall, R., & Greig, A. (2009). Review of Collision Avoidance and Path Planning Methods for Ships in Close Range Encounters. *Journal of Navigation*, 62(3), 455–476. <https://doi.org/10.1017/S0373463308005134>
163. Thieme, C. A., Utne, I. B., & Haugen, S. (2018). Assessing ship risk model applicability to Marine Autonomous Surface Ships. *Ocean Engineering*, 165, 140–154. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.07.040>
164. Tsou, M.-C. (2016). Multi-target collision avoidance route planning under an ECDIS framework. *Ocean Engineering*, 121, 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.05.040>
165. Tsou, M.-C., Kao, S.-L., & Su, C.-M. (2010). Decision Support from Genetic Algorithms for Ship Collision Avoidance Route Planning and Alerts. *Journal of Navigation*, 63(1), 167–182. <https://doi.org/10.1017/S037346330999021X>
166. Utne, I. B., Rokseth, B., Sørensen, A. J., & Vinnem, J. E. (2020). Towards supervisory risk control of autonomous ships. *Reliability Engineering & System Safety*, 196, 106757. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106757>
167. Vagale, A., Bye, R. T., Oucheikh, R., Osen, O. L., & Fossen, T. I. (2021). Path planning and collision avoidance for autonomous surface vehicles II: A comparative study of algorithms. *Journal of Marine Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00773-020-00790-x>
168. Vagale, A., Oucheikh, R., Bye, R. T., Osen, O. L., & Fossen, T. I. (2021). Path planning and collision avoidance for autonomous surface vehicles I: A review. *Journal of Marine Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s00773-020-00787-6>
169. Van Rossum, G., & Drake, F. L. (2009). *Python 3 Reference Manual*. CreateSpace.
170. Vasanthan, C., & Nguyen, D. T. (2021). Combining Supervised Learning and Digital Twin for Autonomous Path-planning. *IFAC-PapersOnLine*, 54(16), 7–15. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2021.10.066>
171. Veitch, E., & Andreas Alsos, O. (2022). A systematic review of human-AI interaction in autonomous ship systems. *Safety Science*, 152, 105778. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105778>

172. Virtanen, P., Gommers, R., Oliphant, T. E., Haberland, M., Reddy, T., Cournapeau, D., Burovski, E., Peterson, P., Weckesser, W., Bright, J., van der Walt, S. J., Brett, M., Wilson, J., Millman, K. J., Mayorov, N., Nelson, A. R. J., Jones, E., Kern, R., Larson, E., ... SciPy 1.0 Contributors. (2020). SciPy 1.0: Fundamental Algorithms for Scientific Computing in Python. *Nature Methods*, 17, 261–272. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0686-2>
173. Wang, N. (2010). An Intelligent Spatial Collision Risk Based on the Quaternion Ship Domain. *Journal of Navigation*, 63(4), 733–749. <https://doi.org/10.1017/S0373463310000202>
174. Wang, N. (2013). A Novel Analytical Framework for Dynamic Quaternion Ship Domains. *Journal of Navigation*, 66(2), 265–281. <https://doi.org/10.1017/S0373463312000483>
175. Wang, Y., & Chin, H.-C. (2016). An Empirically-Calibrated Ship Domain as a Safety Criterion for Navigation in Confined Waters. *Journal of Navigation*, 69(2), 257–276. <https://doi.org/10.1017/S0373463315000533>
176. Warmowska, M. (2003). *Modelowanie ruchu cieczy w wybranych zagadnieniach hydrodynamiki okrętu*. Polski Rejestr Statków S.A.
177. Weintrit, A. (2013). Prioritized Main Potential Solutions for the e-Navigation Concept. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 7(2), 27–38. <https://doi.org/10.12716/1001.07.01.03>
178. Weintrit, A. (2016). E-Nav, Is It Enough? *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 10(4), 567–574. <https://doi.org/10.12716/1001.10.04.04>
179. Wróbel, K. (2021). Searching for the origins of the myth: 80% human error impact on maritime safety. *Reliability Engineering & System Safety*, 216, 107942. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107942>
180. Wróbel, K., Gil, M., Krata, P., Olszewski, K., & Montewka, J. (2021). On the use of leading safety indicators in maritime and their feasibility for Maritime Autonomous Surface Ships. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 1748006X2110276. <https://doi.org/10.1177/1748006X211027689>
181. Wróbel, K., Gil, M., & Montewka, J. (2020). Identifying research directions of a remotely-controlled merchant ship by revisiting her system-theoretic safety control structure. *Safety Science*, 129, 104797. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104797>

182. Yuan, X., Zhang, D., Zhang, J., Zhang, M., & Guedes Soares, C. (2021). A novel real-time collision risk awareness method based on velocity obstacle considering uncertainties in ship dynamics. *Ocean Engineering*, 220, 108436. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108436>
183. Zentech Inc. (2014). *Z-636 Jackup Drilling Rig Design Specifications*. Zentech Inc. www.zentech-usa.com/about/proprietary/jackup-rig-designs/z-636-jackup-rig/
184. Zhang, L., & Meng, Q. (2019). Probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment. *Ocean Engineering*, 186, 106130. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106130>
185. Zhang, M., Montewka, J., Manderbacka, T., Kujala, P., & Hirdaris, S. (2021). A Big Data Analytics Method for the Evaluation of Ship—Ship Collision Risk reflecting Hydrometeorological Conditions. *Reliability Engineering & System Safety*, 213, 107674. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107674>
186. Zhang, W., Feng, X., Qi, Y., Shu, F., Zhang, Y., & Wang, Y. (2019). Towards a Model of Regional Vessel Near-miss Collision Risk Assessment for Open Waters based on AIS Data. *Journal of Navigation*, 72(06), 1449–1468. <https://doi.org/10.1017/S037346331900033X>
187. Zhang, W., Goerlandt, F., Kujala, P., & Wang, Y. (2016). An advanced method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. *Ocean Engineering*, 124, 141–156. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.059>
188. Zhang, X., Wang, C., Jiang, L., An, L., & Yang, R. (2021). Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey. *Ocean Engineering*, 235, 109380. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.109380>
189. Zhao-lin, W. (1988). Analysis of Radar PAD Information and a Suggestion to Reshape the PAD. *Journal of Navigation*, 41(1), 124–129. <https://doi.org/10.1017/S0373463300009103>
190. Zhou, J., Ding, F., Yang, J., Pei, Z., Wang, C., & Zhang, A. (2021). Navigation safety domain and collision risk index for decision support of collision avoidance of USVs. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 13, 340–350. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2021.03.001>
191. Zhu, X., Xu, H., & Lin, J. (2001). Domain and Its Model Based on Neural Networks. *Journal of Navigation*, 54(1), 97–103. <https://doi.org/10.1017/S0373463300001247>