

Plovidba u polarnim uvjetima

Pajkanović, Matija

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:473995>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-25**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

POMORSKI FAKULTET

MATIJA PAJKANOVIĆ

PLOVIDBA U POLARNIM UVJETIMA

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2024.

SVEUČILIŠTE U RIJECI

POMORSKI FAKULTET

PLOVIDBA U POLARNIM UVJETIMA
NAVIGATION IN POLAR CONDITIONS

ZAVRŠNI RAD
BACHELOR THESIS

Kolegij: Pomorska meteorologija i oceanografija

Mentor: doc. dr. sc. Tatjana Ivošević

Student: Matija Pajkanović

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112085897

Rijeka, rujan 2024.

Student: MATIJA PAJKANOVIĆ

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112085897

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom PLOVIDBA U POLARNIM UVJETIMA / SAILING IN POLAR CONDITIONS izradio/la samostalno pod mentorstvom te komentorstvom doc. dr. sc. Tatjana Ivošević.

U radu sam primijenio/la metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio/la literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo/la u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao/la sam i povezo/la s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



Matija Pajkanović

Student: MATIJA PAJKANOVIĆ

Studijski program: Nautika i tehnologija pomorskog prometa

JMBAG: 0112085897

IZJAVA STUDENTA – AUTORA
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student - autor



Matija Pajkanović

SAŽETAK

Tema ovog rada obrađuje zahtjevnost plovidbe brodova kroz polarna područja zbog specifičnih klimatskih uvjeta koji njima vladaju. Rad je podijeljen u 5 cjelina u kojima se detaljno opisuju polarna područja Arktika i Antartike te njihove meteorološke i oceanografske karakteristike. U Uvodu je predstavljena problematika teme koja se razrađuje kroz ovaj rad. Drugo poglavlje opisuje polarna područja Arktika i Antartike, njihovu topografiju i oceanografiju. U trećem poglavlju opisana je meteorologija polarnih područja, nastajanje leda na moru, njegove vrste i opasnost koju on predstavlja za brodove. Četvrto poglavlje odnosi se na plovidbu u najvažnijim polarnim područjima te pomorske plovidbene rute. I na kraju poglavlje o pravilima koja reguliraju sigurnost plovidbe kao što su Polarni kodeks i ICE klase.

Ključne riječi: Arktički polarni vrtlog, led na moru, Antarktička cirkumpolarna morska struja, plovidbene rute, polarni kodeks.

SUMMARY

The thesis explores the challenges ships encounter while passing through the environmentally harsh polar regions. The study is structured around five chapters that provide a comprehensive description of the Arctic and Antarctica, including detailed information about their meteorological and oceanographic characteristics. The introduction outlines the central issue that is explored in greater detail in the thesis. The second chapter provides an extensive overview of the topographic and oceanographic features of the Arctic and Antarctica, commonly known as the polar regions. The third chapter provides an account of the meteorological features of the polar areas, including the formation of sea ice, its various types, and the peril it poses to ships. Chapter Four focuses on the specifics of navigating the most significant polar sailing routes. The final chapter addresses the regulations governing the safety of navigation, including the Polar Code and the ICE Classes.

Keywords: Arctic polar vortex, ice, Antarctic Circumpolar Current, navigation routes, polar code, polar conditions.

SADRŽAJ

SAŽETAK.....	I
SUMMARY.....	I
SADRŽAJ	II
1. UVOD	1
2. POLARNI KRAJEVI	2
2.1. ARKTIK.....	5
2.1.1. Arktički polarni vrtlog.....	5
2.1.2. Topografija oceanskog podmorja.....	6
2.1.3. Euroazijski bazen	7
2.1.4. Američko-azijski bazen (Amerasia)	8
2.1.5. Oceanografija Arktika	8
2.2. ANTARTIKA	9
2.2.1. Drakeov prolaz	10
2.2.2. Weddelovo more.....	11
3. METEOROLOGIJA U POLARNIM PODRUČJIMA.....	13
3.1. POVIJEST METEOROLOGIJE U POLARNIM PODRUČJIMA.....	13
3.2. LED NA MORU	14
3.2.3. Vrste morskoga leda	15
3.3. POLARNI STRATOSFERSKI OBLACI.....	17
3.4. MORSKE STRUJE POLARNIH PODRUČJA.....	19
3.4.1. Antarktička cirkumpolarna struja.....	19
3.4.2. Arktička struja.....	19
3.4.3. Beaufortov žir	21
4. PLOVIDBA POLARNIM PODRUČJIMA	22
4.1. POMORSKE PLOVIDBENE RUTE ARKTIKOM.....	22
4.2. PLOVIDBA BERINGOVIM MOREM I TJESNACEM	24
4.3. PLOVIDBA BALTIČKIM MOREM	24
4.4. PLOVIDBA NORVEŠKIM MOREM	26
4.5. POLARNE PUTNIČKE KOMPANIJE.....	27

5. REGULACIJA PLOVIDBE U POLARNIM KRAJEVIMA	29
5.1. POLAR CODE	29
5.2. INTERNATIONAL ICE PATROL.....	30
5.3. ICE KLASA BRODOVA.....	31
5.3.1. Finske ICE klase brodova	31
6. ZAKLJUČAK.....	34
LITERATURA	36
KAZALO KRATICA.....	38
POPIS SLIKA.....	39
POPIS GRAFIKONA	40
POPIS TABLICA	41

1. UVOD

Plovidba brodom u polarnim područjima zbog specifičnih klimatskih uvjeta koji njima vladaju jedna je od najzahtjevnijih plovidbi. Da bi plovidba bila moguća moraju biti ispunjeni određeni preduvjeti koji podrazumijevaju posebnu građu brodova, razna pravila i restrikcije, ali i poznavanje meteorologije i oceanografije polarnih područja. Osnovna svojstva i vrste leda na moru, morske struje polarnih područja, pomorske plovidbene rute kroz zaleđena područja samo su neki od pojmova koje je potrebno poznavati i uzimati u obzir kod planiranja plovidbe ovim područjima. Vrlo važan dokument koji je donesen o ovom tipu plovidbe jest Polar code - kodeks o plovidbi polarnim područjima koji sadrži sve bitne upute o pripremi broda i posade.

Plovidba u polarnim zaleđenim krajevima uvijek se smatrala vrlo teškom i zahtjevnom. Polarni krajevi predstavljaju prostor oko Južnog i Sjevernog pola. Područje južno pola naziva se Antarktikom, dok se sjeverno polarno područje naziva Arktik. Jedna od najvažnijih karakteristika polarnih područja vezana za plovidbu brodovima odnosi se na prekrivenost tih područja ledom i ledenim santama.

Iako se ovim područjima plovilo od samih početaka razvoja pomorstva - zbog loše gradnje, nepoznavanja uvjeta i nedostatka navigacijske opreme – plovidba je često bila kobna i upravo su u ovim područjima zabilježene brojne pomorske nesreće. Razvojem pomorstva i brodogradnje te upoznavanjem meteorologije i oceanografije ovih područja plovidba postaje sve uspješnija i učestalija iako i dalje zahtjevna i izazovna. Globalno zatopljenje koje je postalo naša svakodnevnica ima velik utjecaj upravo na ova područja jer je zbog njega došlo do smanjenja opsega polarnih krajeva i proširilo područje za lakšu i nesmetanu plovidbu.

Cilj ovog rada je analizirati izazove i opasnosti plovidbe u polarnim uvjetima tako što će obraditi osnovne meteorološke i oceanografske karakteristike pojedinih polarnih područja Arktika i Antarktika, ukazati na klimatske promjene i pojave koje imaju utjecaja na pomorski promet u polarnim krajevima i prikazati postojeće pomorske rute.

Isto tako, rad će istražiti postojeće međunarodne pomorske regulative i standarde kojima je reguliran pomorski promet u polarnim područjima, a čija je svrha omogućiti sigurnu plovidbu u polarnim krajevima.

2. POLARNI KRAJEVI

Polarni krajevi označavaju prostor između zemljopisnih širina $66^{\circ} 33'$ i 90° , koji se nadalje mogu podijeliti na subpolarna (60° - 75°) i polarna (75° - 90°) područja.¹ To je jedno od najekstremnijih područja na Zemlji, područje polarne klime koja pretpostavlja ekstremno niske temperature, jaku glacijaciju, ekstremne promjene u dnevnim satima. Središta tih regija čine polovi. To su dvije točke kroz koje prolazi zamišljena os rotacije Zemlje.

Južni pol je točka koja se nalazi na otprilike 100 metara nadmorske visine, a ledena ploča iznad nje je debela skoro 2700 metara. Ovo je područje Antartike. Sjeverni pol je točka na plutajućem ledu koja se počela označavati od 1909. kada su njen točan položaj utvrdili istraživači Robert Peary i Frederick Cook. Utvrđivanje preciznog položaja Sjevernog pola bilo je ključno za razumijevanje zemaljske geografije i kartografije što je posebno važno za navigaciju.² Sjeverno polarno područje naziva se Arktik (Slika 1), okruženo je Arktičkim more. Temperatura zraka na Arktiku uvijek je ispod 0°C što je granica stvaranja leda. Tipična zimska temperatura na Arktiku je -30°C do -40°C . U sjevernoj polarnoj regiji nalaze se mnoga naselja kao što su Sisimiut, Barrow i Tiksi. Južna polarna regija Antarktika (Slika 2) znatno je hladnija, zimske temperature na kopnu često su ispod -60°C pa ovdje nema naselja već samo znanstvenih baza.

¹ Gelo, B. (2010). *Opća i pomorska meteorologija*, Sveučilište u Zadru, Odjel za promet i pomorstvo, str. 358

² Robert Peary and Frederick Cook (1997): *The race to the North Pole.*, Polar Record Journal, University of Cambridge



Slika 1. Karta Arktika koja prikazuje prosječnu površinu Arktičkog ledenog pokriva (1981.-2010.) s linijama koje ocrtaavaju granice ledenog pokriva (2016.), granica šuma te izoterme 10 °C u srpnju (<https://www.kek.hr/uvod-u-polarne-krajeve/>)



Slika 2. Karta Antartike na kojoj su prikazane granice leda u kolovozu i veljači (<https://www.kek.hr/uvod-u-polarne-krajeve/>)

Granice polarnih krajeva određuju se na nekoliko načina:

- Matematička granica je definirana sjevernom ($66^{\circ} 33' \text{ SGŠ}$) i južnom polarnicom ($66^{\circ} 33' \text{ JGŠ}$).
- Vegetacijska granica je određena mjestom gdje započinje tundra jer zbog izrazito niskih temperatura (zimi -30°C do -40°C , ljeti 3°C do 12°C) i kratkih vegetacijskih razdoblja (50 do 60 dana godišnje) drveće ne uspijeva preživjeti u polarnim krajevima³

³ Global Earth Observation and Dynamics of Eco Systems Lab: Tundra Vegetation Dinamics, Northern Arizona University

- Klimatska granica je određena prosječnom temperaturom koja je najtoplijem ljetnom mjesecu srpnju niža od 10 °C.

2.1. ARKTIK

Arktički ocean je najmanji od pet oceana svijeta, smješten na Sjevernom polu, i okružen je kopnenim masama Sjeverne Amerike, Europe, Azije i Grenlanda. Arktički ocean pokriva oko 14 milijuna kvadratnih kilometara i oko pet puta je veći od najvećeg, Sredozemnog mora. Najveća izmjerena dubina arktičkog oceana je 5502 metara, a srednja dubina je malo manja od jednog kilometra i iznosi 987 metara.

Jedno od glavnih značajki koje obilježavaju arktičku regiju odnose se na jednogodišnji i višegodišnji led. Ovo sjeverno polarno područje tema je interesa i nagađanja od najranijih vremena kada je teorija sferne Zemlje prvi put postala poznata. Grci su prema grčkoj mitologiji⁴, izučavanjem astronomije, teoretizirali da bi izvan Arktičkog kruga oko ljetnog solsticija postojala kontinuirana dnevna svjetlost, odnosno, kontinuirana tama u vrijeme zimskog solsticija. Neki su smatrali da su zemlje na polovima sumorne divljine vezane za led, dok su drugi imali popularnije gledanje o zemlji izvan sjevernog vjetera koja je neprestano sjala suncem, naseljena mirnom civilizacijom poznatom kao Hiperborejci⁵. Ta su nagađanja potaknula avanturiste da riskiraju teške klimatske uvjete i nepoznate opasnosti kako bi proširili geografsko znanje, nadajući se nacionalnom i osobnom bogatstvu.

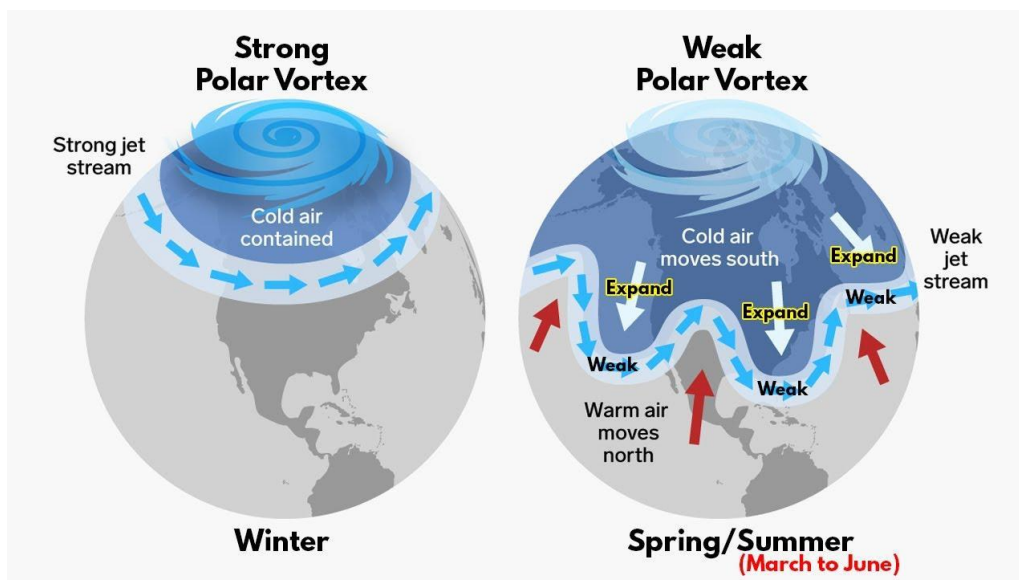
2.1.1. Arktički polarni vrtlog

Arktički polarni vrtlog je cirkulacija jakih zapadnih vjetrova formiranih u stratosferi, oko 10-30 milja iznad Sjevernog pola, koja se događa tijekom zime. Ovi vjetrovi kruže oko ogromnog bazena ekstremno hladnog zraka i zadržavaju hladni zrak iznad Sjevernog pola. Ponekad se atmosferski valovi znani kao Rossbyjevi valovi kreću prema gore i oslabljuju polarni vrtlog uzrokujući tako izlivanje hladnog zraka. Ta se pojava naziva iznenadno stratosfersko zagrijavanje.

⁴ Pinsent, J. (1985) *Grčka mitologija*, Biblioteka svjetski mitovi i legende, Otokar Keršovani

⁵ Enciklopedija Britannica: *Hyperborean* (<https://www.britannica.com/topic/Hyperborean>)

Krajem veljače godine 2019., žestok napad zimskog vremena pogodio je južne ravnice i obalu Gulfa, što je dovelo do razgovora o slabljenju polarnog vrtloga i te kako bi to moglo biti povezano sa sveobuhvatnijim trendom nestabilnih vremenskih obrazaca poznatih pod pojmom globalno zatopljenje.



Slika 3. Djelovanje polarnog vrtloga u zimskim i ljetnim mjesecima (<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/understanding-arctic-polar-vortex>)

Kao što je na slici 3 prikazano kada je arktički polarni vrtlog posebno jak i stabilan (slika 3 lijevi globus) potiče polarni mlazni tok dolje u troposferi da se pomakne prema sjeveru. Hladniji polarni zrak zadržava se na Arktiku. Kada vrtlog oslabi, pomakne se ili podijeli (slika 3 desni globus), polarni mlazni tok često postaje izuzetno valovit, dopuštajući toplom zraku da preplavi Arktik, dok se polarni zrak širi u srednje geografske širine.⁶

2.1.2. Topografija oceanskog podmorja

Do sredine sadašnjeg stoljeća vjerovalo se na temelju dokaza koje je prikupio Fridtjof Nansen⁷, koji je krajem 19. stoljeća prvi identificirao ocean na središnjem Arktiku, da se radi o jednom velikom bazenu. Detaljnim istraživanjem iz 1950. godine otkrivene su izuzetno složene značajke na dnu oceana. Dok se početno pretpostavljalo da se radi o jednom oceanskom bazenu, Arktički ocean u osnovi sadrži dva glavna duboka bazena koja su dalje podijeljena s tri transoceanska podmorska grebena u četiri manja bazena. Taj veliki

⁶ <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/understanding-arctic-polar-vortex>

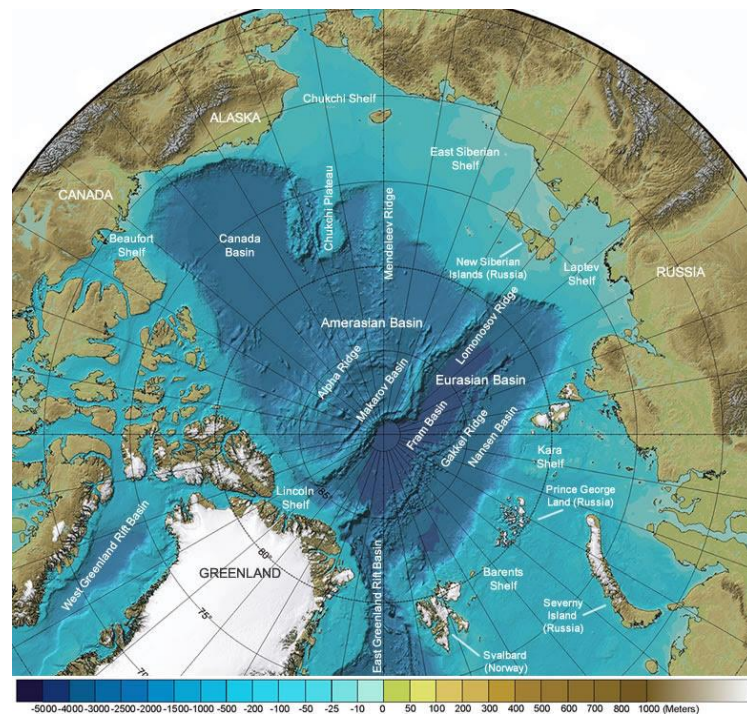
⁷ Nansen, F. (1999) *Farthest North*, Random House Publishing Group

podmorski planinski lanac kasnije će biti nazvan Lomonosov greben po velikom znanstveniku, pjesniku i ruskom profesoru Moskovskog državnog sveučilišta, Mihailu Vasiljeviču Lomonosovu. Prosječna nadmorska visina Lomonosovog grebena je oko 3048 metara, što razdvaja Arktički ocean u dva bazena komplicirane geografije. Geografski se nazivaju Euroazijski bazen, koji leži na europskoj strani ovog grebena i Američko-azijski bazen, koji leži na američkoj strani. Ovaj greben varira u širini od 40 do 120 milja s najvišom točkom koja varira u dubini od 944 do 1700 metara.

2.1.3. Euroazijski bazen⁸

Nansen Cordillera dio je Zemljinog globalnog grebenskog sustava, koji se proteže između Euroazijskog bazena i ponekad ga dijeli na dva manja bazena. Ovaj arktički segment otkriven je početkom 1960-ih i tako je dobio ime Nansen Cordillera u čast Fridtjofa Nansena. To je oceansko dno sa širokom dolinom procjepa omeđenom bočnim planinama procjepa. Bazen Fram tvori depresiju između grebena Nansen-Gakkel i grebena Lomonosov, dosežući dubinu od 4300 metara. Geografski sjeverni pol nalazi se iznad dna bazena Fram blizu njegovog sjecišta s grebenom Lomonosov (slika 4). Najmanji pod-bazen unutar Arktičkog oceana je bazen Nansen, koji se nalazi između grebena Nansen-Gakkel i euroazijskog kontinentalnog ruba. Euroazijski bazen je podijeljen otocima i poluotocima na 5 mora: Čukotsko more, Istočno Sibirsko more, Laptev, Kara i Barentsovo more. Navedena mora zauzimaju 36% Arktičkog oceana, dok sadrže svega 2% ukupnog volumena vode.

⁸ Enciklopedija Britannica: *Topography of the ocean floor* / Arctic Ocean (<https://www.britannica.com/place/Arctic-Ocean/Topography-of-the-ocean-floor>)



Slika 4. Lomonosov greben (<https://www.sciencephoto.com/media/166936/view>)

2.1.4. Američko-azijski bazen (Amerasia)⁹

Alpha Cordillera predstavlja potpuno izrezan, širok i surov podvodni planinski lanac koji razdvaja bazen Amerasia na dva nejednaka dijela. Greben je otkriven krajem 1950-ih i od tada je utvrđeno da je seizmički neaktivan, a njegovo podrijetlo do danas ostaje nepoznato. Smješten između Alfa Cordillera i grebena Lomonosov, bazen Makarov ima dubinu poda od oko 4000 metara. Najveći podbazen Arktičkog oceana je Kanadski bazen, koji se proteže do duljine od oko 1100 km od Beaufortovog pojasa do Alfa Cordillera. Opća glatkoća karakterizira pod, s kontinuiranim blagim nagibom s istoka prema zapadu i uz povremene prekide morskim brežuljcima. Prosječna dubina Kanadskog bazena je 3810 metara.

2.1.5. Oceanografija Arktika

Mnogo je čimbenika koji Arktičkom oceanu u usporedbi sa susjednim oceanima, Sjevernim Atlantikom i Tihim oceanom daju različite čimbenike - fizičke, kemijske i biološke. Jedan od najvažnijih čimbenika je ledeni prekrivač, koji drastično smanjuje potencijal prijenosa energije ocean-atmosfera za više od 100 puta. Osim toga, morski led smanjuje količinu

⁹ Enciklopedija Britannica: Topography of the ocean floor in Arctic Ocean; <https://www.britannica.com/place/Arctic-Ocean/Topography-of-the-ocean-floor>

sunčeve svjetlosti koju morski organizmi zahtijevaju za fotosintezu i razbija učinak miješanja vjetrova.

Arktički ocean također se može smatrati ušćem Atlantskog oceana. Primarna cirkulacija odvija se kroz Framski tjesnac između regija Spitsbergen i Grenland. Drugi, iako manji dio, uključuje jugozapadni tok kroz Barentsovo i more i Kanadski arhipelag. Važno je napomenuti da odljev vode na Atlantik značajno sudjeluje u globalnoj cirkulaciji termohalina i temperaturi oceana i time utječe na globalnu klimatsku varijabilnost. Ova interakcija toplih voda iz GIN mora s hladnijim vodama, slatkom vodom, ledom i atmosferom dovodi do sjevernoatlantske duboke vode, koja se pak pretvara u globalnu cirkulaciju.

Vode niskog saliniteta (do 3 ‰¹⁰) s Pacifika prolaze kroz plitki Beringov tjesnac do Arktičkog oceana. Iako se čini da je srednji protok prisiljen zbog neke milimetarske razlike u razini mora između Sjevernog Pacifika i Arktičkog oceana, važan izvor varijabilnosti uzrokovan je kretanjima vjetra, uglavnom atmosferskom cirkulacijom velikih razmjera iznad sjevernog Pacifika. Volumen ulaza slatke vode u Arktički ocean samo je 2 %.. Smatra se da su oborine oko 10 puta veće od isparavanja, iako se nijedno ne može točno izračunati.

2.2. ANTARTIKA

Antartika je kontinent koji okružuje Južni pol Zemljine kugle i zbog klimatskih ekstrema jedini je ljudima nenaseljeni kontinent na Zemlji. Ovo su najhladnija područja Zemlje s prosječnom godišnjom temperaturom od -50°C¹¹ u unutrašnjosti kontinenta dok je uz obalu temperatura oko -18°C. Istovremeno, ovo su područja s najmanje oborina i to u pravilu u obliku snijega, ali i najvjetrovitija. Visok atmosferski tlak zadržava se nad kontinentom pa prema obalama neprekidno pušu snažni vjetrovi i oni imaju veliki utjecaj na okolna mora.

Zaljevi Rossovog i Weddellovog mora između kojih se nalazi Transatlantičko gorje dijele Antartiku na puno veći istočni (3/4 površine) i zapadni dio.

¹⁰ Buljan, M., Zore-Armanda, M. (1971). *Osnovi oceanografije i pomorske meteorologije*, Institut za oceanografiju i ribarstvo, Split, str. 78.

¹¹ Buljan, M., Zore-Armanda, M. (1971). *Osnovi oceanografije i pomorske meteorologije*, Institut za oceanografiju i ribarstvo, Split, str. 261.

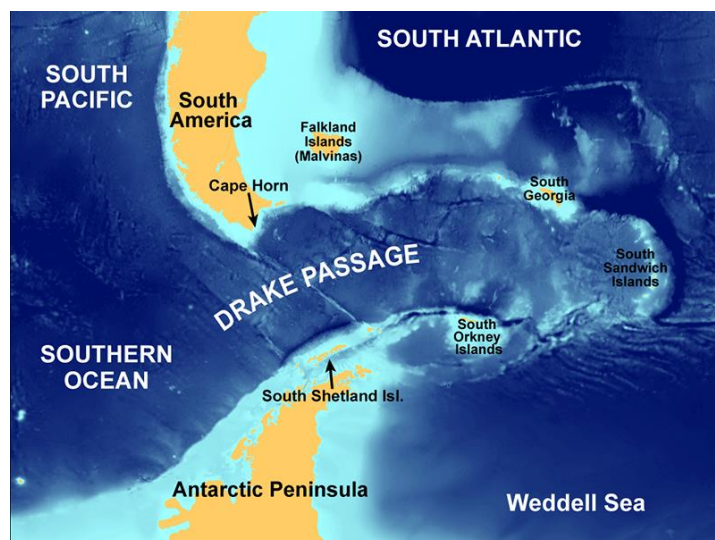
2.2.1. Drakeov prolaz¹²

Drakeov prolaz (Slika 5) je široki dubokomorski tjesnac dug 1000 kilometara koji dijeli Atlantik od Tihog oceana. Nalazi se između rta Horn, najjužnije točke Južne Amerike, i Južnih Šetlandskih otoka, oko 160 kilometara sjeverno od Antarktičkog poluotoka. Ovaj prolaz je granica za zonu klimatske tranzicije po kojoj se hladni, vlažni, subpolarni uvjeti Ognjene zemlje (Tierra del Fuego) razlikuju od hladnih, polarnih uvjeta Antarktike.

Drakeov prolaz, dio Atlantskog oceana, nalazi se između Ognjene zemlje i južnih Šetlandskih otoka Antarktike. Iako je dobio ime po poznatom engleskom pomorcu Sir Francisu Drakeu, prolazom je prvi put plovila flamanska ekspedicija pod zapovjedništvom kapetana Willema Schoutena.

Drakeov prolaz bio je od velikog značaja za pomorski promet 19. stoljeća i ranog 20. stoljeća, sve do otvaranja Panamskog kanala 1914. godine. Ekstremni meteorološki uvjeti poput snažnog hladnog vjetrova (koji od zapada puše prosječnom brzinom od 30 do 40 čvorova ali često dostiže i brzinu do 60 čvorova) i jake morske struje (koje se gibaju od zapada prema istoku jačinom od 90 do 150 sverdrupa) otežavali su prolazak Drakeovim tjesnacem, pogotovo u prošlosti dok su brodovi plovili na jedra. Snažni, prevladavajući zapadni vjetrovi nad Drakeovim prolazom najžešće pušu u sjevernom dijelu oko rta Horn. Ovi sustavi niskog tlaka, ponekad u obliku ciklona, nastaju preko Pacifika i kreću se prema istoku duž južnog ruba prolaza. Od sjevera prema jugu prosječna godišnja temperatura zraka kreće se od 5 °C do -3 °C. Temperature površinskih voda kreću se od 6°C na sjeveru do -1°C na jugu. Postoji približna promjena na oko 60°S geografske širine, što razgraničuje zonu antarktičke konvergencije.

¹² Enciklopedija Britannica: *Drake passage, Waterway, South America*; <https://www.britannica.com/place/Drake-Passage>



Slika 5. Drakeov prolaz (<https://www.pinterest.jp/pin/113504853091944077/>)

Većina protoka vode Drakeovog prolaza je od zapada prema istoku i postaje dio Antarktičke cirkumpolarne struje, koja se smatra najvećom strujom na svijetu. Vjeruje se da se njen protok kreće između 95-150 milijuna kubičnih metara u sekundi. Zbog suženja prolaza, antarktička cirkumpolarna struja pokazuje izvanredno ubrzanje, uglavnom oko 60°S. Na izlasku iz prolaza većina vode putuje istočno ili sjeveroistočno; dio vodi prema sjeveru u južni Atlantik i poznat je kao Falklandska struja.

Drakeov prolaz bogat je planktonom, posebno krilom - rakovima nalik škampima koji su osnovna prehrana mnogih vrsta, uključujući kitove, lignje, carske pingvine i tuljane. Najčešća vrsta ribe u ovoj regiji je antarktički bakalar. Neke od riba, koje se ovdje zadržavaju poznate su kao "beskrvne" jer njihova krv ne sadrži.

2.2.2. Weddelovo more

Weddelovo more (Slika 6) je more Južnog oceana koje se prostire duž obale Antartike, između Antarktičkog poluotoka i Coatsove zemlje. Obuhvaća površinu od 2.800.000 km². Južni dio Weddelovog mora trajno je prekriven ledom, a more je dobilo ime po britanskom moreplovcu Jamesu Weddellu koji je prvi plovio njime 1823. godine. Godine 1820. pokušana je plovidba ovim morem britanskim jedrenjakom, ali je plovidba zaustavljena teškim zaleđivanjem sjeverno-istočnog djela mora. Iste godine, led je zaustavio i ruski brod *Vostok* južno od otočja Južni Sandwich.

Weddellovo more je obično teško zaleđeno, ledeni pokrov se početkom ljeta proteže na sjever do oko 60 ° S u zapadnom i središnjem sektoru. Ova činjenica ozbiljno ometa navigaciju u tom području. Prevladavajući vjetrovi i struje potiskuju ledene formacije prema jugozapadnoj obali te je tako čine nepristupačnom. More sadrži ledenjake i ledene ploče s malo otvorene vode u ljetnim mjesecima.¹³ Većina hladnih oceanskih dubinskih voda antarktičkog je podrijetla, struje površinskih voda kreću se uglavnom u smjeru kazaljke na satu oko mora, jugozapadno duž Coats Landa i odatle prema sjeveru duž Antarktičkog poluotoka, na kraju se sreću s prevladavajućim zapadnim vjetrovima.¹⁴



Slika 6. Weddellovo more (<https://www.britannica.com/place/Weddell-Sea>)

¹³ House, D., Lloyd, M., Toomey, P. & Dickins, D. (2010). *The Ice Navigation Manual*, Witherby Seamanship International Ltd, Edinburgh, UK, str. 100

¹⁴ Enciklopedija Britannica: *The Weddell sea* (<https://www.britannica.com/place/Weddell-Sea>)

3. METEOROLOGIJA U POLARNIM PODRUČJIMA

Znanost polarne meteorologije usredotočuje se na analizu atmosferskih uvjeta u polarnim područjima Zemlje. Jedna od uobičajenih karakteristika polarnih okruženja je inverzija površinske temperature, što pridonosi pojavi katabatičkih vjetrova. U usporedbi sa srednjom geografskom širinom ili tropskom klimom, poznato je da vertikalni temperaturni profil u polarnim područjima pokazuje veću složenost.

3.1. POVIJEST METEOROLOGIJE U POLARNIM PODRUČJIMA

Podaci polarne meteorologije počeli su se prikupljati 1893. godine kada je Fridtjof Nansen¹⁵, jedan od najznačajnijih svjetskih polarnih istraživača započeo ekspediciju ploveći prema Sjevernom polu. Zadatak ekspedicije bilo je pravilno bilježenje vremenskih uvjeta, dobivanje relevantnih meteoroloških informacija te rana oceanografska zapažanja. Kasnije je Vagn Walfrid Ekman, švedski oceanograf i fizičar, dio svoje teorije o otklonu površinske struje zbog trenja temeljio na podacima dobivenih s Nansenovog broda Fram

Porast međunarodne trgovine i razvoj pomorskog prometa (nakon izuma električnog telegrafa 1843. godine) od 1850. godine bio je glavni poticaj za razvoj pomorske meteorologije¹⁶. Atmosfera bi se mjerila instrumentima na balonima lansiranim duž sjeverne američke i kanadske granice. Protuzračna obrana Sjeverne Amerike rutinski je profilirala Arktik tim instrumentima. Obrana Sjedinjenih Država također je uključivala nuklearne podmornice opremljene sonarom prema gore. Podaci zabilježeni iz tih slučajeva su deklasificirani i postali su izvor informacija koje će se koristiti u procjeni stanjivanja leda od 1980. do danas. Ti se datumi kreću od 1958. do 1979. godine. Rusija je također dala vrlo točne podatke od 1937. do 1991. godine.

U zadnje vrijeme mapiranje i mjerenje podmornicama znatno se smanjilo. Jedna od konvencionalnih tehnika mjerenja debljine leda je napraviti rupu u ledu i izmjeriti prikupljeni uzorak leda. Osim toga, mnoge napredne tehnike i instrumenti razvijeni su isključivo za praćenje i mjerenje vremenskih uvjeta u polarnim regijama koje također uključuju plutače za ravnotežu ledene mase i satelite.

¹⁵ Nansen, F. (1999) *Farthest North*, Random House Publishing Group

¹⁶ <https://klima.hr/razno/zanimljivosti/smo60godina.pdf>

Važan razlog daljnjeg razvoja polarne meteorologije je to što je s rastućom zabrinutošću zbog globalnog zatopljenja ona postala interesantnija i važnija nego ikad prije. To je jednostavno zato što se veliki dio Zemljinog snijega i leda nalazi u polarnim regijama, na koje će globalno zagrijavanje imati maksimalan utjecaj, pa su povratne informacije o kretanjima leda i snijega od iznimne važnosti. Kako povećanje atmosferskog ugljičnog dioksida povećava učinke globalnog zagrijavanja, u polarnim regijama bilježi se puno brži porast temperature u usporedbi s bilo kojim drugim dijelom svijeta.

3.2. LED NA MORU

Led je čvrsto agregacijsko stanje vode; nastaje kad temperatura padne na 0°C.

Led je važan parametar oceanografije, meteorologije i navigacije. Širenjem leda iz polarnih područja prema umjerenim geografskim širinama dolazi do hlađenja klime u umjerenim regijama (veće površine leda i snijega reflektiraju veći dio sunčevog zračenja čime se smanjuje količina apsorbirane topline na površini Zemlje a što rezultira hlađenjem klime u tim regijama) i promjene putanja depresije (kako depresije najčešće prate granice između hladnog i toplog zraka širenjem leda pomiče se granica do koje prodire hladni polarni zrak).

Brodске rute djelomično ovise o ledenim uvjetima. U morskim polarnim područjima s teškim ledenim pokrivačem plovidba postaje nemoguća zbog gotovo neprohodnih barijera, a plovila su prisiljena zaobilaziti ili čekati da se prolazi, zaljevi i luke oslobode od zaleđenog morskog pokrivača. Prodori leda u mora umjerenih zona stvaraju ozbiljne opasnosti za plovidbu u obliku plutajućih santi leda.¹⁷

Jedan od glavnih uzroka velikih oceanskih struja je ogromna temperaturna razlika između zagrijane površine mora oko ekvatora i tropskih mora te hladnih voda u polarnim područjima; Hladna voda u dubinama oceana potječe iz polarnih područja prekrivenih ledom. Stoga je led neizravno jedan od uzroka morskih struja.

Postoje dvije vrste leda koje se mogu pronaći u oceanima i morima - morski led koji nastaje smrzavanjem slane morske vodom i kopneni led koji potječe od kopnenih

¹⁷ Pomorska enciklopedija, 1. izdanje, Leksikografski Zavod Miroslav Krleža;
<https://pomorska.lzmk.hr/Natuknica?id=3763>

ledenjaka čiji se dijelovi odlamaju i kližu u more. Jedan manji dio leda u mora dopijeva iz zaleđenih rijeka.

3.2.3. Vrste morskoga leda¹⁸

Morski led koji nastaje smrzavanjem slane morske vode može se naći u više pojavnih oblika.

- **Mladi led**

Led se počinje stvarati na -2°C . U prvoj fazi radi se malim, 1-2 cm dugim kristalima leda na površini nakon čega se stvara ledena kaša, koji se naziva i mladi led. Na samom početku zaleđivanja morska površina se mijenja i više ne sjaji. Često prije smrzavanja dolazi do porasta vodene pare iz mora zbog znatne temperaturne razlike između mora i zraka. Kada temperatura padne dovoljno, ledena kaša se brzo smrzava do debljine od 5 cm.

- **Tignjaci**

S povećanjem debljine ledene kaše, površina mora izbjeljuje, a kaša se razbija u okrugle ploče s blago podignutim rubovima od najmanjih valova. Ove ploče nalik palačinkama rastu odozdo prema gore, zarobljavajući sol u sredini, s malim ledenicama koje se formiraju na svakoj koja se kasnije smrzne kada postane još hladnije. Iz toga se formira led koji se naziva tignjaci, promjera od 30 do 100 cm, ponekad i do 2 mm ali njegova debljina nikada neće biti veća od 10 cm. Tignjaski led je vrlo porozan. Slani ledeni pokrivač debljine 10 cm možda neće podržati težinu osobe, dok slatkovodni led ove debljine može izdržati mnogo veće opterećenje. U vedrom i hladnom vremenu led raste za 36 sati do ove debljine.

- **Ledene kitice**

Povremeno, osobito u ekstremno hladnoj atmosferi, na površini mora pojavljuju se ledene kitice. One nastaju zamrzavanjem vrhova manjih valova na moru.

- **Ledeno polje**

Na još nižim temperaturama tignjaci postaju tvrđi, prekriveni kristalnim mrazom, a pojavljuju se i ledene kitice, visoke 5-10 cm. Snijeg tada gotovo prekriva sve nepravilnosti i pogoduje međusobnom spajanju i učvršćivanju tiganjaca dok se ne

¹⁸ Pomorska enciklopedija, 1. izdanje, Leksikografski Zavod Miroslav Krleža; <https://pomorska.lzmk.hr/Natuknica?id=3763>

stvori kompaktno i čvrsto ledeno polje, koje bi se moglo protezati i nekoliko stotina kilometara daleko prema otvorenom moru kao glatka ledena ravnica.

- **Ledene gromade** (Slika 7)

Rub leda na otvorenom moru završava odvojenim ledenim pločama. Ponekad je pojas tih ploča širok nekoliko stotina metara, a može biti debljine 30-60 cm i dovoljno jak da može izdržati nekoliko ljudi. Akumulacijom i uzastopnim zamrzavanjem, u roku od nekoliko godina mogu postići debljinu od 10 metara ili više.



Slika 7. Ledenjak (Word stock photo)

3.3. POLARNI STRATOSFERSKI OBLACI

Polarni stratosferski oblaci formiraju se u zimskoj polarnoj stratosferi između 15 i 25 km visine. Ove oblake najbolje je promatrati tijekom građanskog sumraka kada je Sunce od 1° do 6° ispod horizonta, uglavnom zimi i na većim geografskim širinama.

Što se sastava oblaka tiče u početku se pretpostavljalo da su dijelovi oblaka pretežito voda. „Mjerenja optičkim radarom pokazala su visoku prateću depolarizaciju, što se očekuje za nesferične čvrste čestice, ali i vrlo nisku depolarizaciju, što ukazuje na tekućinu umjesto krutih čestica. Navedeno ukazuje na postojanje više vrsta polarnih stratosferskih oblaka:

- a) Tip₁: oblaci koji se formiraju iznad temperatura smrzavanja (Slika 8 gore)
- b) Tip_{1a/1b}: oblaci građeni od krutih (tekućih) čestica koje se stvaraju iznad temperatura smrzavanje
- c) Tip₂: oblaci građeni od leda nastalog ispod temperature smrzavanja¹⁹ (Slika 8 dolje)

Relativna vlažnost stratosfere je za razliku od troposfere niska 1-5%²⁰, i zbog toga u njoj može postojati vrlo malo oblaka. Polarni stratosferski oblaci formiraju se samo na vrlo niskim temperaturama, obično nižim od -78°C. Ove niske temperature redovito prevladavaju u donjem dijelu stratosfere tijekom polarne zime. Na Antarktiku, na primjer, temperature ispod -88°C obično rezultiraju polarnim stratosferskim oblacima tipa₂. Suprotno tome, tako niske temperature su relativno rijetke iznad Arktika.

¹⁹ Kovačević, M. (2016) Završni rad, *Klorofluorouglikovodici i ozonska rupa*, Zagreb, str 7; <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:154503>

²⁰ <https://sage.nasa.gov/2021/08/studying-earths-stratospheric-water-vapor/>



Slika 8. Polarni stratosferni oblaci – gore Tip1 (<https://www.antarctica.gov.au/about-antarctica/ice-and-atmosphere/atmosphere/clouds-and-radiation/polar-stratospheric-clouds/>), dolje Tip2(<https://www.pinterest.com/pin/54817320452907191/>)

3.4. MORSKE STRUJE POLARNIH PODRUČJA

Morske struje označavaju gibanje morske odnosno oceanske vode, kreću se u određenom smjeru i mogu biti stalne, periodične ili povremene. Povremene ili periodične struje svojim djelovanjem utječu na manja područja dok stalne struje imaju globalan utjecaj.

3.4.1. Antarktička cirkumpolarna struja²¹

Antarktička cirkumpolarna struja je oceanska struja koja kruži oko Antarktike uzrokovana je vjetrovima i kreće se od zapada prema istoku. Nepravilna je u širini i tijeku zbog utjecaja susjednih kopnenih masa, topografije podmorja i prevladavajućih vjetrova. Njeno gibanje je iznimno komplicirano jer se cijelo vrijeme izmjenjuje s drugim masama vode na svim razinama. Smatra se granicom koja odvaja Južni ocean od Atlantskog, Indijskog i Tihog oceana na približno 60 °S geografske širine.

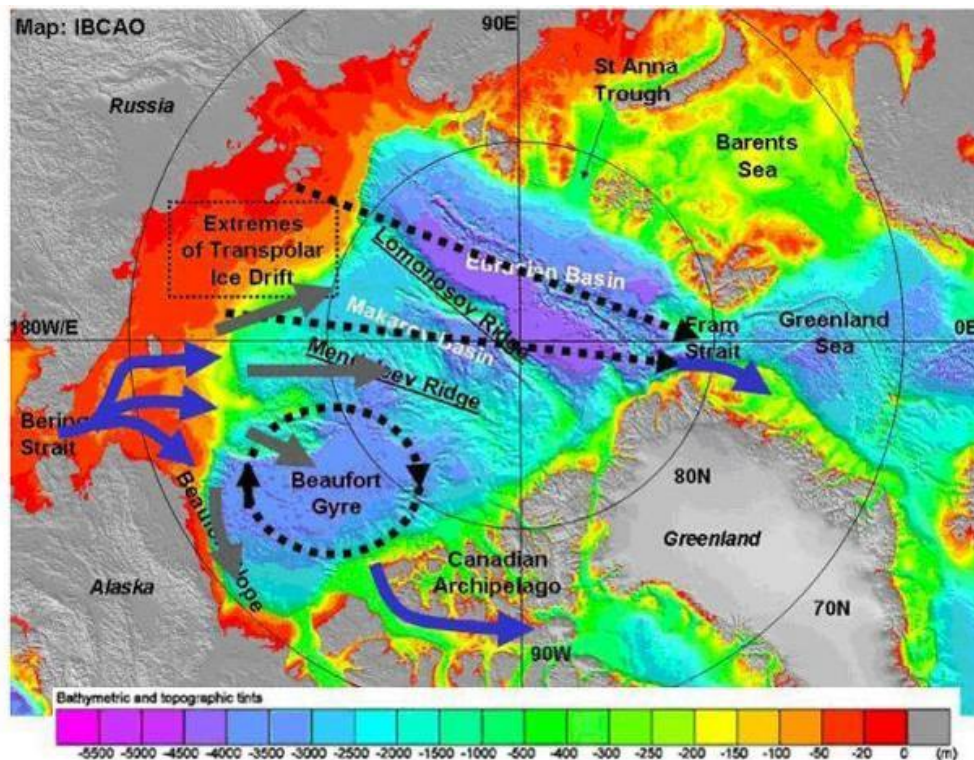
Antarktička cirkumpolarna struja široka je više od 8° geografske širine u svom najširem dijelu. Postoje i male varijacije u njevoj putanji ovisno o mjestu. Na Pacifiku i Indijskom oceanu kreće se od geografskih širina 48 ° S do 58 ° S za sjevernu granicu struje, a južni kraj ide do gotovo 70 ° S u blizini obale Marie Byrd Land na Antarktiku. Sjeverna granica ove struje u Atlantskom oceanu kreće se od 42° S do 48° S geografske širine, dok se na južnoj strani nalazi na približno 60° S. Procjenjuje se da je prosječni transport struje 134 *sverdrupa*, što odgovara 134 milijuna kubičnih metara ili oko 4,7 milijardi kubičnih metara u sekundi. Međutim, prema nekim istraživanjima protok struje kroz Drakeov prolaz može biti čak 173,3 *sverdrupa*, što odgovara 173,3 milijuna kubičnih metara odnosno oko 6,1 milijardu kubičnih metara u sekundi.

3.4.2. Arktička struja

Tijekom ljeta, zapadni Arktički ocean karakterizira hladna i relativno svježja pacifička zimska voda (Pacific Winter Water PWW) koja prekriva toplu i slanu atlantsku vodu. Ovaj PWW naziva se hladnom haloklinskom vodom zbog niske temperature koja pretežno sudjeluje u vertikalnom prijenosu topline iz Atlantske vode (Atlantic Water AW) u gornji ocean i morski led. Štoviše, PWW je bogat hranjivim tvarima, ali siromašan otopljenim kisikom i doprinosi zakiseljavanju zapadnog Arktičkog oceana, a to je trend

²¹ <https://www.britannica.com/place/Antarctic-Circumpolar-Current>

koji je u porastu posljednjih godina. Različiti izvori kažu da dotok pacifičke vode u Beringov tjesnac zimi i ledeno-oceanski procesi u Čukotskom moru određuju svojstva PWW-a. PWW preraspodjeljuje donji haloklin dubokog kanadskog bazena bočnim ubrizgavanjem ili dijaferskim miješanjem s gore navedenim AW. Prema jednoj studiji, horizontalno prenošenje PWW-a djelovanjem vjetrova uzvodno od graničnog područja Čukotskog mora i kanjona Barrow do nizvodno sjevernog kanadskog bazena, ima važnu ulogu u produbljivanju PWW granice na rubu Beaufortovog žira. ²²

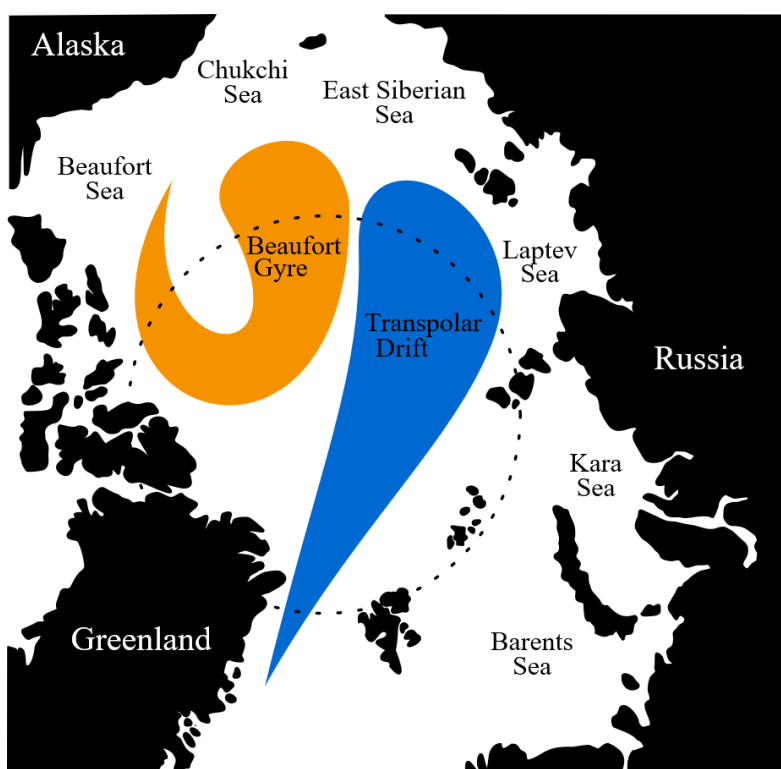


Slika 9. Cirkulacija vode do Arktičkog oceana
[\(https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/arctic-ocean-circulation-going-around-at-the-102811553/\)](https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/arctic-ocean-circulation-going-around-at-the-102811553/)

²² <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/arctic-ocean-circulation-going-around-at-the-102811553/>

3.4.3. Beaufortov žir²³

Beaufortov žir jedna je od glavnih oceanskih struja unutar Arktičkog oceana, koja se proteže sjeverno od obale Aljaske i Kanade. U prošlosti je arktički morski led dugo vremena cirkulirao u Beaufortovom žiru, stvarajući neobično gusti višegodišnji morski led. Međutim, zbog povećanja temperature Arktika, Beaufortov žir je izgubio znatnu količinu leda. Dok je nekada ovo područje predstavljalo prostor koji je ledu omogućavao da sazri i naraste u najdeblji i najstariji led na Arktiku sada se to područje pretvorilo u "groblje" za stariji led.



Slika 10. Beaufortov žir (<https://blogs.agu.org/geospace/2017/09/20/tracking-driftwood-gives-researchers-insight-into-past-arctic-ocean-changes/>)

²³ https://en.wikipedia.org/wiki/Beaufort_Gyre

4. PLOVIDBA POLARNIM PODRUČJIMA

Plovidba u polarnim predjelima i području leda jedna je od najzahtjevnijih plovidba jer se zbog ekstremnih klimatskih uvjeta susreće s mnogo izazova. S razvojem tehnologije prometa, sve brojnim i temeljitijim istraživanjima meteoroloških i oceanografskih pojava plovidba polarnim krajevima je napredovala što se odrazilo i na povećanje prometa u ovim područjima. Izgrađeni su novi brodovi, istražene nove rute a informacije o kretanju i nastajanju leda točnije su i pravovremene. Zbog klimatskih promjena, led se na Arktiku topi zbog čega dolazi do nastajanja više novih pomorskih ruta za brodove.

4.1. POMORSKE PLOVIDBENE RUTE ARKTIKOM²⁴

Trenutne glavne arktičke plovne rute su:

- **Sjeverna morska ruta** (Northern Sea Route) se proteže arktičkim dijelom obale Rusije. U narednim godinama, Sjeverna morska ruta vjerojatno će postati prva pomorska ruta bez leda i nudi ogromne komercijalne izgleda. To bi rezultiralo smanjenjem udaljenosti između istočne Azije i zapadne Europe s 21.000 km preko Sueskog kanala na 12.800 kilometara i smanjenjem tranzitnog vremena za 10 do 15 dana. Povijesno gledano, tijekom sovjetske ere, Sjeverna morska ruta koristila se za vojnu opskrbu i vađenje resursa na sovjetskom Arktiku. Nakon raspada Sovjetskog Saveza, početkom 1990-ih Sjeverna morska ruta nije bila toliko atraktivna. Tek krajem 2000-ih godina došlo je do povećanog interesa te je promet u Sjevernoj morskoj ruti ponovno porastao. Njemački brodovi Beluga Fraternity i Beluga Foresight završili su prvo komercijalno putovanje sjevernom morskom rutom 2009. godine, koja je povezala Busan s Rotterdamom s nekoliko zaustavljanja uz pomoć ruskog ledolomca. Druge brodarske tvrtke su krenule u istraživanja novih ruta, ali one nisu bile komercijalno održive. Tada je 2018. godine Venta Maersk, brod od 3.600 TEU, postao prva međudometna kontejnerska usluga koja je krenula ovom rutom. Godine 2024. prvi kontejnerski brod Panamax završio je NSR prolaz bez pratnje ledolomca.
- **Sjeverozapadni prolaz** (Northwest passage) je ruta preko kanadskog Arktičkog oceana, a njenim korištenjem smanjila bi se nautička udaljenost između istočne Azije

²⁴ <https://transportgeography.org/contents/chapter1/transportation-and-space/polar-shipping-routes/>

i zapadne Europe za oko 13.600 kilometara u usporedbi s korištenjem Panamskog kanala, pokrivajući udaljenost od 24.000 kilometara. Godine 2007., prvi put u povijesti, Sjeverozapadni prolaz je bio otvoren tijekom ljeta. Trenutno nije sigurno da li je ovaj prolaz stabilan i siguran za prolazak brodova.

- **Transpolarna morska ruta** (Transpolar sea route) – ova ruta pretpostavlja korištenje središnjeg Arktika kao izravne rute od Beringovog tjesnaca do Atlanskog oceana kod Murmanska ali samo u teoriji jer ovo područje neće biti bez leda u bližoj budućnosti.
- **Arktički most** (Arctic Bridge) mogao bi povezivati ruski luku Murmansk ili norvešku luku Narvik i uspostaviti odnos s kanadskom lukom Churchill u pokušaju da služi trgovini žitaricama. Budući da nije sama transarktička ruta, očekuje se da će ova veza povezati dva zaleđa: sjeverozapadnu Europu i sjevernoamerički Srednji zapad preko Arktika.



Slika 11. Polarne plovidbene rute

(<https://transportgeography.org/contents/chapter1/transportation-and-space/polar-shipping-routes/>)

4.2. PLOVIDBA BERINGOVIM MOREM I TJESNACEM

Smješteni u najudaljenijem sjevernom dijelu Tihog oceana, Beringovo more i tjesnac djeluju kao prirodna granica između Azije i Sjeverne Amerike. Stapa se s Arktičkim oceanom na sjeveru preko tjesnaca zvanog Beringov tjesnac, gdje je udaljenost između Azije i Sjeverne Amerike samo oko 85 km na najbližoj točki. Ova linija razgraničenja koja razdvaja Sjedinjene Države od Rusije prolazi i kroz more i kroz tjesnac. Dubine Beringovog tjesnaca relativno su plitke, oko 30 do 50 metara. Tisućama godina ranije, tijekom ledenog doba, razina mora drastično se spustila, pretvarajući ovaj tjesnac u kopneni most između kontinenta Azije i Sjeverne Amerike. Ovaj prirodni fenomen omogućio je migraciju mnogih vrsta biljaka i životinja iz jedne regije u drugu.

Ekstremni vremenski uvjeti Beringovog mora, iznimno niske temperature od $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ s jakim olujama koje se događaju prilično često zbog čega je redovna pojava brzog nakupljanja leda na nadgrađima brodova. Visine valova narastu preko 12 metara, dok snažne plimne struje, magla, kiša i morski led koji pluta, uglavnom na sjeveru, još više kompliciraju navigaciju. Na sjevernom dijelu Beringovo more zimi je prekriveno ledenim poljem debljine jednog metra, a na nekim mjestima na humcima ima nadmorsku visinu od preko 30 metara. Led je u najvećoj snazi u travnju i proteže se sve do zaljeva Bristol i obala Kamčatke. U svibnju počinje topljenje leda, a do srpnja više nema leda u moru osim plutajućeg leda u Beringovom tjesnacu. Unatoč svim tim nepogodama ovo je važan put za pomorski promet na sovjetskom istoku koji povezuje istočnu granicu smještenu u Provideniji na Čukotskom poluotoku sjevernim morskim putem do Arkhangelska na zapadu. Beringovo more također ima više od 300 vrsta ribe, pa je od iznimnog značaja za ribarstvo. Najveći izvoz ribe je losos, haringa, iverak i bakalar. Također se vjeruje da se ispod Beringovog epikontinentalnog pojasa i duž poluotoka Kamčatke nalazi nafta i plin, te da će se kroz sljedećih par godina krenuti s izvlačenjem ovih sirovina.²⁵

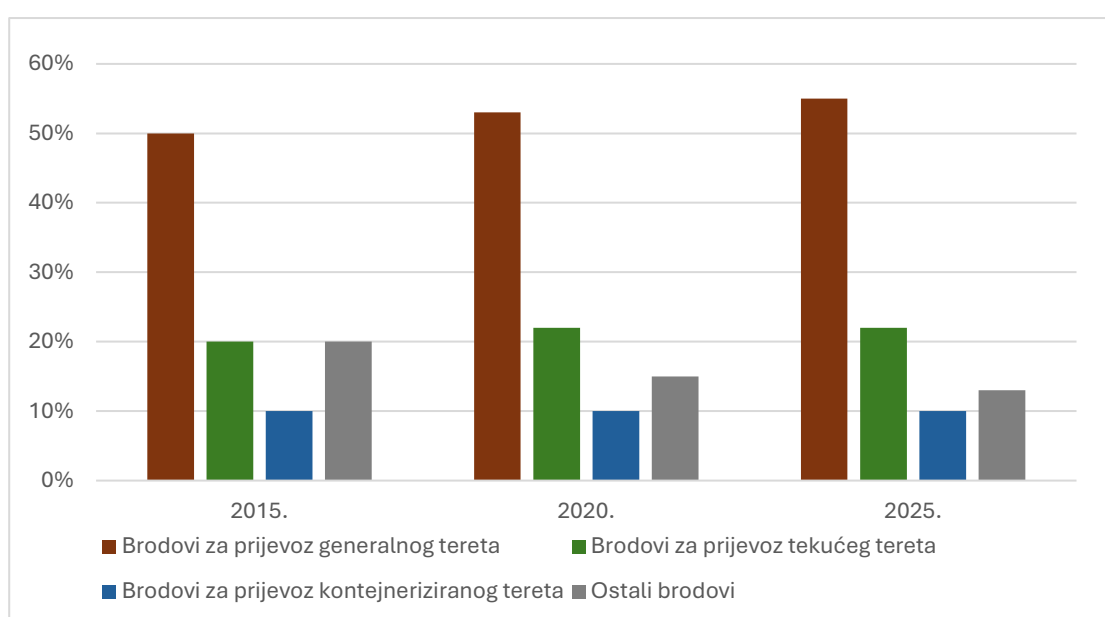
4.3. PLOVIDBA BALTIČKIM MOREM

Baltičko more služi kao ključna trgovačka ruta na globalnoj razini, s približno 2000 brodova koji prevoze različite vrste tereta poput generalnog, tekućeg tereta i suhog rasutog tereta te putnika. Baltičko more okružuje više od 400 luka, od kojih 90 aktivno doprinose međunarodnoj trgovini poput luka Gdansk i Gdynia u Poljskoj te Klapeda u

²⁵ <https://www.britannica.com/place/Bering-Sea>

Litvi koje su najveće kontejnerske luke, te putničke luke poput luke Tallinn u Estoniji, luke Helsinki u Finskoj i luke Stockholm u Švedskoj.

Dokazano je da preko 50% brodova koji plove Baltičkim morem su brodovi za prijevoz generalnog tereta te 20% brodova su brodovi za prijevoz tekućeg tereta, uglavnom ulja. Nedavna pandemija COVID-19 koja je započela 2020. godine i usporila cijeli svijet, nije uspjela usporiti i nanijeti značajnu štetu trgovačkom prometu Baltičkih luka koje pokazuju relativno stabilne rezultate. Međutim, ne može se reći da Baltička pomorska ruta nema svojih posebnih izazova i uvjeta.²⁶



Graf 1. Postotak brodova koji plove baltičkim morem

(autor)

Iz grafikona 1 vidljivo je da brodovi za prijevoz generalnog tereta već 2015. godine čine 50% sveukupnog broja brodova koji plove Baltičkim morem, a uočave se i tendencija porasta broja brodova za prijevoz generalnog i tekućeg tereta. Broj brodova za prijevoz kontejneriziranog tereta je konstantan dok se smanjuje broj ostalih brodova.

Pomorski promet ovom rutom suočava se s brojnim izazovima poput uskog tjesnaca, raspršene kopnene mase i prisutnosti leda. Baltičko more i okolne arktičke regije

²⁶ House, D., Lloyd, M., Toomey, P. & Dickins, D. (2010). *The Ice Navigation Manual*, Witherby Seamanship International Ltd, Edinburgh, UK, str. 57

obično su prekriveni ledom tijekom cijele godine što plovilima otežava sigurnu plovidbu. Zbog takvih uvjeta, pomorski promet na ovome području je iznimno težak i zahtijeva od brodova da se u plovidbi pridržavaju specifičnih standarda ICE klase kako bi izdržali ekstremno okruženje.

4.4. PLOVIDBA NORVEŠKIM MOREM

Norveško more (Slika 12) je dio Arktičkog oceana, smješteno u sjevernoj Europi u rubnom morskom dijelu. Njegova površina je 1.383.000 kubnih kilometara i nalazi se na sjeverozapadnu Norveške. Na zapadnoj strani graniči s Grenlandskim morem, a na južnoj sa Sjevernim morem. Sjeveroistočno od Norveškog mora nalazi se Barentsovo more. Jugozapadno je omeđen i odvojen od Atlantskog oceana podmorskim grebenom koji se proteže od Islanda do Farskih otoka. U svojem sjevernom dijelu Norveško more ima greben Jan Mayen koji ga odvaja od Grenlandskog mora.

Norveško more oduvijek je bilo poznato ribarsko područje. Vode koje okružuju Lofotske otoke označene su kao najbogatije ribolovno područje Europe idealno za uzgoj atlantskog bakalara. Ribolov lososa također je unosan posao u obalnim vodama ovog mora. Međutim, izvješća sugeriraju da je u Norveškom moru izlovljeno oko 41% ribljeg fonda. Vjeruje se kako morsko dno ima ogromne količine nafte, kao i rezerve prirodnog plina, a njihova komercijalna eksploatacija započela je 1993. Područje bez ikakvog leda važna je Sjeverna morska ruta i pruža direktan prolaz od Atlantskog oceana do ruskih arktičkih luka Arkhangelsk, Murmansk i Kandalaksha. Glavne luke duž Norveškog mora su Trondheim, Tromsø i Narvik.²⁷

²⁷ <https://www.worldatlas.com/seas/norwegian-sea.html>



Slika 12. Norveško more (<https://www.worldatlas.com/seas/norwegian-sea.html>)

4.5. POLARNE PUTNIČKE KOMPANIJE

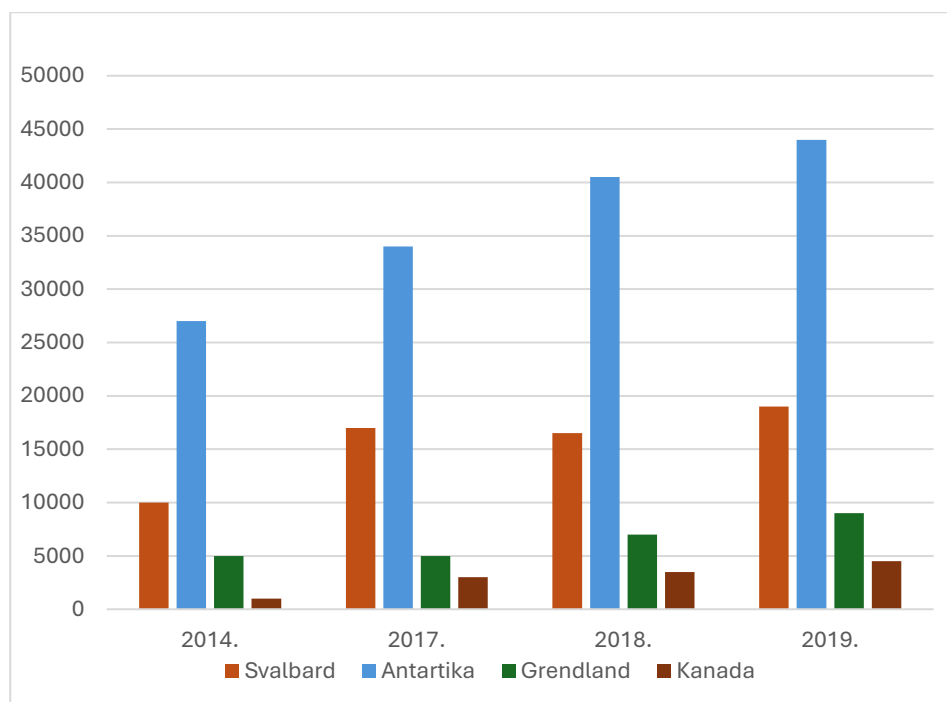
Usprkos teškim uvjetima u plovidbi polarnim područjima, tijekom godina, povećava se interes u turističkom prijevozu putnika morem, pa zbog toga nastaju nove kompanije. Trenutno postoji najveći interes za ekspedicijama na Antartici i Grenlandu.

Neke od značajnijih putničkih kompanija su sljedeće:

- **Oceanwide expeditions** je nizozemska kompanija koja se od početka bazirala na plovidbu polarnim područjima, najviše Antartikom. Oceanwide expeditions je bila jedna od prvih kompanija u svijetu koja je otplovila na takva netaknuta mjesta, pa se ubraja u osnivače turizma polarnih područja.
- **Scenic group** je kompanija koja je u početku bila usredotočena na prijevoz putnika rijekama u Europi, Južno-istočnoj Aziji i Rusiji koja se zbog nedavnih problema sa Ukrajinom izbrisala sa turističke slike. Dana 15. kolovoza 2023. godine Scenic je predstavio svoj prvi oceanski brod, Scenic Eclipse koji plovi Amerikom, Europom, Artikom, Antartikom i norveškim fjordovima te zbog

velikog uspjeha u prvome oceanskom brodu, Scenic predstavlja novi putnički brod Scenic Eclipse II, potpuno identični sestrinski brod²⁸

- **Poseidon expeditions** je britanska kompanija, nastala 1999. godine. Godine 2001. organizirano je prvo putovanje Sjevernim polom, sa približno 100 putnika na nuklearno pogonjenom ledolomcu Yamal. Kompanija se bavi plovidbom kroz Arktik i Antartiku s manjim brodovima koji mogu prevoziti oko 100 putnika.



Graf 2. Broj posjetitelja na određenim polarnim destinacijama (autor)

Iz grafikona 2 vidljivo je da je Antartika u zadnjih 10 godina najposjećenije polarno područje. Godine 2014. posjetilo ju je približno 27000 posjetitelja, a 2019. godine taj je broj narastao do skoro 45000 posjetitelja. Grafikon istovremeno ukazuje na porast posjetitelja na svim polarnim destinacijama – Svalbardu, Grendlandu i Kanadi.

²⁸ Seršić, A. (2022). 'Putnički brodovi za kružna putovanja koji plove u području leda', Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, citirano: 02.07.2024., <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:265573>

5. REGULACIJA PLOVIDBE U POLARNIM KRAJEVIMA

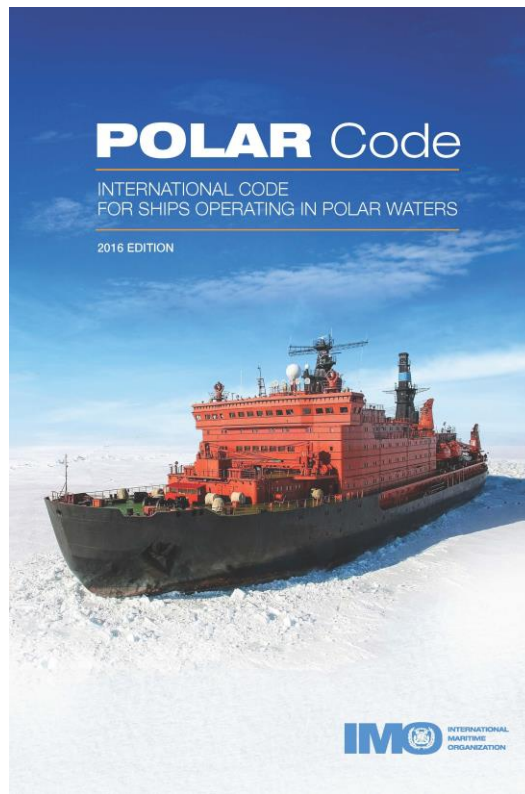
5.1. POLAR CODE²⁹

Međunarodni kodeks sigurnosti za brodove koji plove u polarnim vodama obuhvaća cijeli niz pitanja projektiranja, opreme, izgradnje, osposobljavanja, traganja i spašavanja te zaštite okoliša koja su važna za brodove koji plove u negostoljubivim vodama koja okružuje Zemljine polove.

Svi brodovi koji plove u područjima južno od 60°S i oko Arktika sjeverno od 60°N geografske širine s izuzećima uz obalu Islanda i sjeverne Skandinavije, kao i neke dijelove Rusije moraju se pridržavati *Polar Code*-a. (Slika 13)

Polarni kod opisuje smjernice o tome kome, kada i gdje su potrebne posebne kvalifikacije. Kao opći zahtjev, časnici palube, uključujući zapovjednika moraju proći odgovarajuću obuku i steći osnovnu ili naprednu potvrdu o stručnosti. Zahtjevi za različite tipove brodova i uvjeti u kojima plove su definirani. Ovisno o tome radi li se o tankeru, putničkome brodu ili nekoj drugoj vrsti broda i ovisno plovi li u području bez leda ili u “otvorenom” moru gdje je morski led manji od 1/10, postoje različiti zahtjevi za obuku. U slučaju plovidbe u područja bez leda nisu potrebni takvi certifikat. U “otvorenim vodama” samo navigacijski časnici moraju proći osnovno osposobljavanje i dobiti odgovarajuću potvrdu. Kada neki brod uđe u “druge vode” svi navigacijski časnici moraju imati završenu najmanje osnovnu obuku i posjedovati odgovarajuću svjedodžbu, dok zapovjednici i prvi časnici moraju proći naprednu obuku.

²⁹ <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/polar-code.aspx>



Slika 13. Naslovna stranica Polar Codea
(<https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/polar-code.aspx>)

5.2. INTERNATIONAL ICE PATROL³⁰

Još od prvih plovidba kroz Sjeverni Atlantik, sante leda su prijetile brodovima. Kroz povijesti navigacije prije kraja 19. stoljeća, vidljivo je da se veliki broj nesreća dogodio u blizini Grand Banksa, područja Atlantskog oceana sjeveroistočno od Kanade. Brod *Lady of the Lake* potonuo je 1833. godine i odnio 70 života. Između 1882. i 1890. godine na istom području izgubljeno je 14 brodova, a 40 ih je ozbiljno oštećeno zbog leda. To ne uključuje veliki broj kitolovaca i ribarskih brodova koji su izgubljeni ili oštećeni zbog leda.

Nažalost, trebala se dogoditi jedna od najvećih pomorskih katastrofa svih vremena da bi se javila potreba za međunarodnom suradnjom u rješavanju navigacijskih opasnosti. Tragedija koju je izazvalo potonuće RMS TITANICA 15. travnja 1912. godine bio je razlog za uspostavljanje međunarodne patrola leda. Na svom prvom putovanju iz Southamptonu u Engleskoj prema New Yorku južno od područja Grand Banks

³⁰ House, D., Lloyd, M., Toomey, P. & Dickins, D. (2010). *The Ice Navigation Manual*, Witherby Seamanship International Ltd, Edinburgh, UK str. 253

sjeveroistočno od Kanade, TITANIC je udario o santu leda i potonuo u roku od dva i pol sata. Iako je noć bila vedra, a more mirno, gubitak života bio je velik, više od 1500 od 2224 putnika i članova posade je stradalo. Brod je bio izgrađen prema najnovijim sigurnosnim inovacijama, uključujući pregrade i inovacije poput automatskih zatvarajućih vodonepropusnih vrata. Ironično je da je publicitet o tim značajkama dao brodu reputaciju nepotopivosti. Gubitak TITANICA osvijestio je javnost o stvarnom potencijalu santi leda za izazivanje havarija što je rezultiralo prvom konvencijom o sigurnosti života na moru 1914. godine, SOLAS-om.

5.3. ICE KLASA BRODOVA

ICE klasa se odnosi na klasifikaciju kojom se određuje sposobnost broda za plovidbu kroz područja morskog leda. Ova je klasifikacija vrlo važna za osiguravanje sigurnosti plovidbe u polarnim regijama. Brodovi s višom klasom za plovidbu po ledu mogu prolaziti kroz deblji i čvršći led. Neke od važnih značajki brodova s klasom za plovidbu po ledu su:

- Ojačani trup – Trup treba izdržati pritisak leda i spriječiti oštećenja.
- Povećana snaga – brodovi s klasom za plovidbu kroz led imaju veću snagu motora kako bi se probili i plovili kroz ledeno more
- Pramac za probijanje leda – pramac je posebno dizajniran kako bi efikasnije probijao led

5.3.1. Finske ICE klase brodova³¹

Finsko-švedski pravilnici o klasama za plovidbu po ledu su široko priznati standardi koji kategoriziraju brodove prema njihovoj sposobnosti za plovidbu kroz led. Kategorije se kreću od IA Super, što je najviša razina i označava sposobnost plovidbe u debelom višegodišnjem ledu, do Ice Class III za brodove koji ploviti u lakšim ledenim uvjetima.

Klase leda II i III odnose se na plovila koja ne zadovoljavaju standarde utvrđene propisima ICE klase. Brodovi koji posjeduju certifikat klase leda II mogu ispunjavati uvjete za potporu ledolomcu u blažim uvjetima leda ako imaju odgovarajuću nosivost. S

³¹ <https://www.traficom.fi/en/transport/maritime/ice-classes-ships>

druge strane, brodovi s certifikatom klase leda III ni u kojem slučaju nemaju pravo na pomoć ledolomcu.

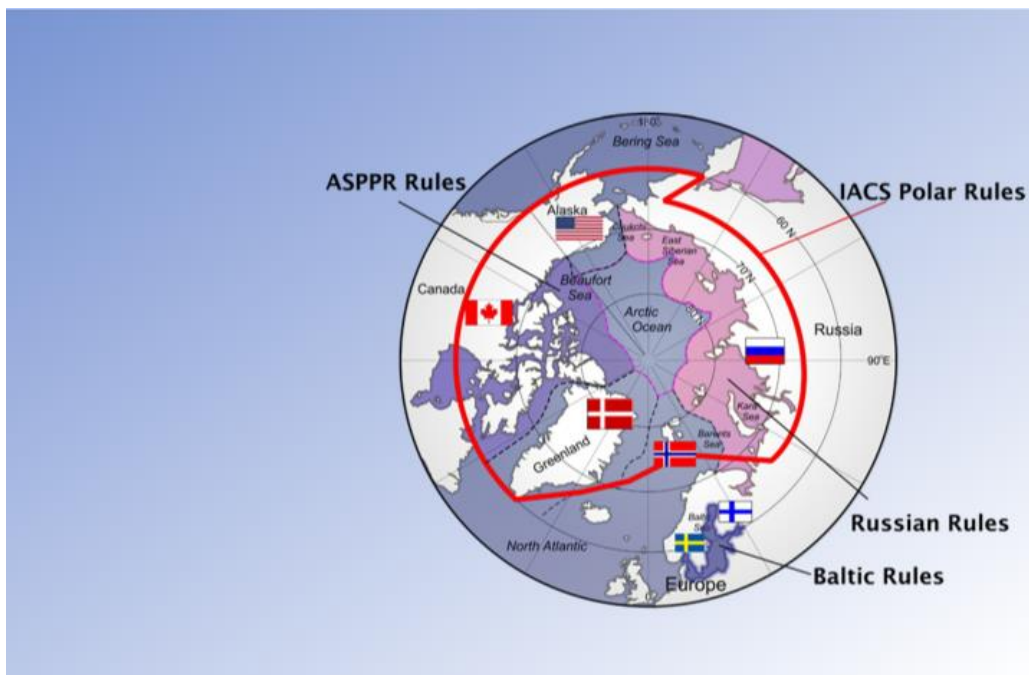
Da bi potvrdio finsku klasu leda, predstavnik broda dužan je dostaviti kopije sljedećih potvrda: Potvrda o registru, Potvrda o klasifikaciji, Load Lines certifikat i International Tonnage certifikat.

Classification Society	Ice Class				
Finnish-Swedish Ice Class Rules	IA Super	IA	IB	IC	Category II
Russian Maritime Register of Shipping(Rules 2007)	Arc 5	Arc 4	Ice 3	Ice 2	Ice 1
Russian Maritime Register of Shipping(Rules 1995)	UL	L1	L2	L3	L4
Russian Maritime Register of Shipping(Rules 1999)	LU5	LU4	LU3	LU2	LU1
American Bureau of Shipping	IAA A1	IA Ao	IB	IC	D0
Bureau Veritas	IA SUPER	IA	IB	IC	ID
CASPPR, 1972	A	B	C	D	E
China Classification Society	Ice Class B1*	Ice Class B1	Ice Class B2	Ice Class B3	Ice Class B
Det Norske Veritas	ICE-1A* ICE-10	ICE-1A ICE-05	ICE-1B	ICE-1C	ICE-C
Germanischer Lloyd	E4	E3	E2	E1	E
Korean Register of Shipping	ISS	IS1	IS2	IS3	IS4
Lloyd's Register of Shipping	1SS	1A	1B	1C	1D
Nippon Kaiji Kyokai	IA Super	IA	IB	IC	ID
Registro Italiano Navale	IAS	IA	IB	IC	ID

Tablica 1. ICE klase brodova (House, D., Lloyd, M., Toomey, P. & Dickins, D. (2010). The Ice Navigation Manual, Witherby Seamanship International Ltd, Edinburgh, UK str.116)

U tablici 1. prikazane su klase brodova različitih registara po kategorijama od IA do kategorije 3.

Kako bi se održala ICE klasa IA Super ili IA za brod kojem je kobilica položena ili je bila u sličnoj fazi izgradnje prije 1. rujna 2003., moraju biti ispunjeni standardi utvrđeni Uredbom o klasi leda iz 2017. do 1. siječnja godine kojom se obilježava dvadeset godina od njegove isporuke. Odgovornost za dokazivanje pridržavanja ažuriranih propisa klase leda leži na vlasniku broda.



Slika 14. Područje ICE klase

(https://www.engr.mun.ca/~cdaley/8074/Ice%20Class%20Rules_CD.pdf)

Još neka pravila kojih se moraju pridržavati brodovi koji plove u polarnim područjima:

- IACS Polarna pravila (International Association of Classification Societies – pravila na području Arktičkog oceana i okolnih kopnenih masa za utvrđivanje potrebne klase za određeni brod i u kojim uvjetima plovi.³²
- ASPPR pravila (Arctic Shipping Pollution Prevention Regulations) – pravila na području Kanade za sprječavanje onečišćenja mora

³² House, D., Lloyd, M., Toomey, P. & Dickins, D. (2010). *The Ice Navigation Manual*, Witherby Seamanship International Ltd, Edinburgh, UK, str. 117

6. ZAKLJUČAK

Plovidba u polarnim uvjetima predstavlja poseban izazov u pomorstvu iz više razloga među kojima su najvažniji i najutjecajniji ekstremni vremenski uvjeti koji vladaju u polarnim područjima, prisutnost leda te nedovoljno izgrađena infrastruktura što je opet posljedica ekstremnih klimatskih uvjeta koji donose sa sobom brojna ograničenja. Istraživanje ovog rada polazi od ovih postavki i obuhvaća najvažnije aspekte plovidbe u polarnim područjima - utjecaj klimatskih obilježja i klimatskih promjena na uvjete plovidbe; pomorske plovidbene rute i strategije; tehnički zahtjevi za brodove; postojanje i važnost međunarodnih propisa za plovidbu polarnim područjima čime se pospješuje sigurnosti.

Istraživanje je pokazalo da je utjecaj klimatskih obilježja u polarnim područjima presudan za plovidbu i pomorske plovidbene rute. Karakteristika polarnih krajeva je ekstremno niska temperatura, velike količine leda, snažni olujni vjetrovi, iznimno jake morske struje što sve predstavlja veliku opasnost za ljude i brodove pa je planiranje plovidbe iznimno zahtjevno i pretpostavlja uvažavanje i poznavanje meteorologije, oceanografije i topografije područja, praćenje utvrđenih pomorskih i plovnih ruta te poštivanje pravila ponašanja kako bi se osigurala sigurnosti plovidbe.

Glavni nalaz istraživanja je veliki utjecaj koji klimatske promjene imaju na plovidbu polarnim područjima. S jedne strane smanjivanje arktičkog leda izazvanog globalnim zatopljenjem otvara nove pomorske plovidbene rute i putove. Dok se s druge strane zbog toga povećava rizik od plutajućeg leda i nepredvidivih vremenskih uvjeta i pojava.

Istraživanjem su obrađene ustanovljene međunarodne regulative i propisi kojima su postavljeni standardi plovidbe u polarnim područjima, - Polar Code, ICE klase brodova, Polar patrol. U radu je istaknuta važnost njihovog postojanja jer su njima utvrđeni minimalni tehnički i operativni zahtjevi kojih se treba pridržavati čime se smanjuje rizik plovidbe u uvjetima leda i osigurava sigurnost broda i posade.

Radom je ukazano na povećanje obujma plovidbe polarnim područjima što zbog globalnog zatopljenja koje sa sobom povlači smanjivanje područja stalnog leda i otvara nove plovne rute, što zbog ekonomske potrebe traženja kraćih plovidbenih pravaca ali i zbog atraktivnosti ovih područja za organizaciju turističkih putovanja i zarade putničkih kompanija.

Uza sve postojeće regulative, propise, standarde, sisteme za praćenje i dojavljivanje te druge utvrđene procedure i dalje postoje ograničenja i nedostaci. Kad se tome doda i tendencija rasta pomorskog polarnog prometa, postaje jasno da je neophodno unaprijediti postojeću tehnologiju kako bi ona davala pristup pravovremenim relevantnim i preciznim meteorološkim i oceanografskim podacima. Osim toga je potrebno izraditi nove modele predviđanja klimatskih promjena, poraditi na stvaranju i unapređivanju tehnologije koja će na brz i precizan način obavještavati i upozoravati na opasnosti. Umjetna inteligencija i nove tehnologije koje nastaju definitivno se moraju fokusirati i na rješavanje ovih problema plovidbe u polarnim područjima

Na kraju, plovidba u polarnim uvjetima, specifična zbog ekstremnih klimatskih uvjeta koji tuda vladaju, zahtjeva prilagođen pristup: posebna plovila opremljena tako da se mogu suočiti s ekstremima, posebne kvalifikacije posade i regulaciju plovidbe za ove specifične uvjete. Kako pomorski promet u polarnim regijama ima tendenciju rasta, a klimatske promjene sve češće dovode do nepredviđenih i iznenadnih pojava, posebno je važno nastaviti istraživati i unapređivati sva područja plovidbe u polarnim uvjetima kako bi se ona bila sigurna za sve sudionike.

LITERATURA

[1] Buljan, M., Zore-Armanda, M. (1971). *Osnovi oceanografije i pomorske meteorologije*, Institut za oceanografiju i ribarstvo, Split

[2] Enciklopedija Britannica: *Drake passage, Waterway, South America*; (<https://www.britannica.com/place/Drake-Passage>)

[3] Enciklopedija Britannica: *Hyperborean* (<https://www.britannica.com/topic/Hyperborean>)

[4] Enciklopedija Britannica: *The Weddell sea* (<https://www.britannica.com/place/Weddell-Sea>)

[5] Enciklopedija Britannica: *Topography of the ocean floor / Arctic Ocean* (<https://www.britannica.com/place/Arctic-Ocean/Topography-of-the-ocean-floor>)

[6] Gelo, B. (2010). *Opća i pomorska meteorologija*, Sveučilište u Zadru, Odijel za promet i pomorstvo, str. 358

[7] Global Earth Observation and Dynamics of Eco Systems Lab: *Tundra Vegetation Dynamics*, Northern Arizona University

[8] House, D., Lloyd, M., Toomey, P. & Dickins, D. (2010). *The Ice Navigation Manual*, Witherby Seamanship International Ltd, Edinburgh, UK

[9] https://en.wikipedia.org/wiki/Beaufort_Gyre

[10] <https://klima.hr/razno/zanimljivosti/smo60godina.pdf>

[11] <https://sage.nasa.gov/2021/08/studying-earths-stratospheric-water-vapor/>

[12] <https://www.britannica.com/place/Antarctic-Circumpolar-Current>

[13] <https://www.britannica.com/place/Bering-Sea>

[14] <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/understanding-arctic-polar-vortex>

[15] <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/arctic-ocean-circulation-going-around-at-the-102811553/>

- [16] <https://www.trafficom.fi/en/transport/maritime/ice-classes-ships>
- [17] <https://www.worldatlas.com/seas/norwegian-sea.html>
- [18] Kovačević, M. (2016) Završni rad, *Klorofluorouglikovodici i ozonska rupa*, Zagreb, str 7; <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:154503>
- [19] Nansen, F. (1999) *Farthest North*, Random House Publishing Group
- [20] Pinsent, J. (1985) *Grčka mitologija*, Biblioteka svjetski mitovi i legende, Otokar Keršovani
- [21] Polar Code - <https://www.imo.org/en/OurWork/Safety/Pages/polar-code.aspx>
- [22] Peary R. and Cook, F. (1997): *The race to the North Pole*., Polar Record Journal, University of Cambridge
- [23] Pomorska enciklopedija, 1. izdanje, Leksikografski Zavod Miroslav Krleža; <https://pomorska.lzmk.hr/Natuknica?id=3763>
- [24] Pomorske plovidbene rute arktikom -<https://transportgeography.org/contents/chapter1/transportation-and-space/polar-shipping-routes/>
- [25] Seršić, A. (2022). 'Putnički brodovi za kružna putovanja koji plove u području leda', Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet, citirano: 02.07.2024., <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:187:265573>

KAZALO KRATICA

Amarasia – Američko-azijski bazen

PWW – Pacific Winter Water

AW – Atlantic Water

NSR – Northern Sea Route

POPIS SLIKA

Slika 1. Karta Arktika koja prikazuje prosječnu površinu Arktičkog ledenog pokrova	3
Slika 2. Karta Antartike na kojoj su prikazane granice leda u kolovozu i veljači	4
Slika 3. Djelovanje polarnog vrtloga u zimskim i ljetnim mjesecima.....	6
Slika 4. Lomonosov greben	8
Slika 5. Drakeov prolaz	11
Slika 6. Weddellovo more	12
Slika 7. Ledenjak.....	16
Slika 8. Polarni stratosferni oblaci	18
Slika 9. Cirkulacija vode do Arktičkog oceana	20
Slika 10. Beaufortov žir	21
Slika 11. Polarne plovidbene rute	23
Slika 12. Norveško more.....	27
Slika 13. Naslovna stranica Polar Codea.....	30
Slika 14. Područje ICE klase	33

POPIS GRAFIKONA

Graf 1. Postotak brodova koji plovo baltičkim morem	25
Graf 2. Broj posjetitelja na određenim polarnim destinacijama (autor)	28

POPIS TABLICA

Tablica 1. ICE klase brodova (House, D., Lloyd, M., Toomey, P. & Dickins, D. (2010). The Ice Navigation Manual, Witherby Seamanship International Ltd, Edinburgh, UK str.116)32