

Analiza tehnoloških, klimatskih i ekoloških čimbenika pri plovidbi LNG brodova kroz Arktik

Šišak, Ante

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zadar / Sveučilište u Zadru**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:162:764740>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-11**



Sveučilište u Zadru
Universitas Studiorum
Jadertina | 1396 | 2002 |

Repository / Repozitorij:

[University of Zadar Institutional Repository](#)



zir.nsk.hr



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Sveučilište u Zadru
Pomorski odjel
Sveučilišni diplomski studij
Organizacija u pomorstvu

Ante Šišak

**ANALIZA TEHNOLOŠKIH, KLIMATSKIH I EKOLOŠKIH
ČIMBENIKA PRI PLOVIDBI LNG BRODOVA KROZ ARKTIK**

**ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL, CLIMATIC AND ECOLOGICAL
FACTORS IN THE NAVIGATION OF LNG VESSELS THROUGH
ARCTIC**

Diplomski rad

Zadar, 2024.

Sveučilište u Zadru
Pomorski odjel - Nautički odsjek
Sveučilišni diplomski studij
Organizacija u pomorstvu

**ANALIZA TEHNOLOŠKIH, KLIMATSKIH I EKOLOŠKIH
ČIMBENIKA PRI PLOVIDBI LNG BRODOVA KROZ**

**ANALYSIS OF TECHNOLOGICAL, CLIMATIC AND ECOLOGICAL
FACTORS IN THE NAVIGATION OF LNG VESSELS THROUGH
ARCTIC**

Diplomski rad

Student/ica:
Ante Šišak

Mentor/ica:
doc. dr. sc. Ivan Toman

Zadar, 2024.



Izjava o akademskoj čestitosti

Ja, **Ante Šišak**, ovime izjavljujem da je moj **diplomski** rad pod naslovom **Analiza tehnoloških, klimatskih i ekoloških čimbenika pri plovidbi LNG brodova kroz Arktik** rezultat mojega vlastitog rada, da se temelji na mojim istraživanjima te da se oslanja na izvore i radove navedene u bilješkama i popisu literature. Ni jedan dio mojega rada nije napisan na nedopušten način, odnosno nije prepisan iz necitiranih radova i ne krši bilo čija autorska prava.

Izjavljujem da ni jedan dio ovoga rada nije iskorišten u kojem drugom radu pri bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj, obrazovnoj ili inoj ustanovi.

Sadržaj mojega rada u potpunosti odgovara sadržaju obranjenoga i nakon obrane uređenoga rada.

Zadar, 28. listopada 2024.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
SAŽETAK.....	III
ABSTRACT	IV
1. UVOD	1
1.1. Problem, predmet i objekti istraživanja	1
1.2. Radna hipoteza	1
1.3. Svrha i ciljevi istraživanja	2
1.4. Znanstvene metode	2
1.5. Struktura rada	3
2. GEOGRAFSKA OBILJEŽJA I ANALIZA ARKTIČKIH PLOVIDBENIH RUTA.....	4
2.1. Vrste i nastanak leda u polarnim krajevima: Utjecaj globalnog zatopljenja na Arktik8	
2.2. Sjeverozapadni prolaz (Northwest Passage - NWP)	9
2.3. Sjeverni morski prolaz (engl. Northern Sea Route - NSR)	11
2.4. Transpolarna pomorska ruta (Transpolar Sea Route - TSR)	13
2.5. Obilježja LNG brodova koji plove arktičkim plovidbenim rutama (poboljšanje, učinkovitost, sigurnost)	14
2.6. Sigurnost i održivost u Arktiku: Polarni kodeks, BEATA, SOLAS, MARPOL i UNCLOS	20
3. ULOGA ARKTIČKOG VIJEĆA I POLITIKE PLOVIDBE PREKO ARKTIKA	23
3.1. Utjecaj politike arktičke plovidbe na međunarodne odnose.....	24
3.2. Promicanje sigurnosti i održivosti arktičkih pomorskih ruta za LNG brodove.....	25
4. KLIMATSKE PROMJENE I NJIHOV UTJECAJ NA PLOVIDBU PREKO ARKTIKA	
25	

4.1.	Uloga autohtonih zajednica i strategije za održivu plovidbu u Arktiku	29
4.2.	Obrazovanje, etika i prilagodba u polarnoj regiji Arktika.....	32
4.3.	Arktik na prekretnici i nadolazeća opasnost potpunog nestanka leda	33
4.4.	Smanjenje ledenih pokrova, promjena albeda i globalne posljedice.....	35
4.5.	Utjecaj klimatskih promjena Arktičkog područja na eksploataciju prirodnih resursa 40	
4.6.	Klima, oborine i topografske značajke Arktika: Utjecaj klimatskih promjena	41
4.7.	Evolucija klime kroz geološku povijest Zemlje	43
4.8.	Promjene u Arktičkom morskom ledu.....	43
4.8.1.	Istraživanja i praćenje	44
4.8.2.	Utjecaj Atlantifikacije na morski led: Klimatske i oceanografske promjene, te njihova dinamika.....	47
4.8.3.	Utjecaj atmosferske cirkulacije na transformaciju arktičkog morskog leda	48
4.8.4.	Održive strategije i inovativni EU projekti za prilagodbu klimatskim promjenama Arktika	49
4.9.	Ekološki i tehnološki odgovor na klimatske promjene (adaptacija pomorskih ruta Arktika)	51
5.	EKOLOŠKI UTJECAJI PLOVIDBE LNG BRODOVA KROZ ARKTIK.....	52
5.1.	Očuvanje prirode i održivost Arktika	53
5.2.	Osnovni rizici pri plovidbi Arktikom	53
6.	ODRŽIVA UPOTREBA POMORSKIH RUTA ARKTIKA ZA LNG BRODOVE	58
6.1.	Trenutno stanje Arktičkih pomorskih ruta.....	60
6.2.	Tehnološke inovacije u prijevozu LNG-a	61
6.3.	Buduće perspektive Arktičkih pomorskih ruta.....	63
7.	ZAKLJUČAK.....	66
	LITERATURA.....	69
	POPIS SLIKA	79

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu istraženi su ključni aspekti koji definiraju izazove i prednosti brodova za prijevoz ukapljenog prirodnog plina (LNG) u arktičkim plovidbenim rutama. Prvi cilj je osvrtnost na tehničke inovacije koje su u velikoj mjeri doprinijele poboljšanju učinkovitosti ovih brodova, posebno u kontekstu ekstremnih vremenskih uvjeta koji karakteriziraju Arktik. Uz navedeno, implementirane su sigurnosne mjere Međunarodnim kodeksom za brodove koji plovo ovim polarnim prostorom, poznatim kao „Polar Code“, kako bi se smanjili rizici povezani s plovidbom kroz ovo osjetljivo područje. Kodeks je sveobuhvatni pravni okvir usvojen od strane Međunarodne pomorske organizacije (engl. International Maritime Organization, IMO), te je stupio na snagu 1. siječnja. 2017. godine. Arktik, regija poznata po svojoj surovoj klimi i nepreglednim zaleđenim prostranstvima, sve se više prepoznaje kao nova i potencijalno vrlo značajna plovna ruta za brodove koji prevoze LNG. Globalne klimatske promjene, koje uzrokuju brzo otapanje arktičkog leda, omogućuju otvaranje novih pomorskih puteva koji su ranije bili nepristupačni. Ova promjena otvara vrata za značajne ekonomske prilike, jer omogućava kraće i brže rute između ključnih ekonomskih centara, kao što su Europa i Azija. Njihovom primjenom znatno se smanjuju vrijeme plovidbe i troškovi transporta, čineći LNG još konkurentnijim na globalnom tržištu.

Plovidba Arktikom donosi brojne izazove, osobito u pogledu ekološke i sigurnosne održivosti. Osjetljivost arktičkog ekosustava zahtijeva pažljivo planiranje i provedbu pomorskih operacija kako bi se minimalizirali rizici. Iako plovidba kroz Arktik skraćuje pomorske rute, smanjujući emisije i zagađenje koje nastaju duljim putovanjem, opasnost od ekoloških katastrofa i dalje postoji. Na primjer, izljevi nafte ili LNG-a u slučaju nesreće mogu ozbiljno ugroziti jedinstveni arktički okoliš. Emisije iz brodskih motora također mogu pridonijeti ubrzanju topljenja leda, što dodatno naglašava važnost stroge primjene ekoloških standarda i zaštitnih mjera kako bi se očuvala ravnoteža ovog krhkog ekosustava, dok se istovremeno zadovoljavaju ekonomski interesi.

Pored ekoloških izazova, plovidba arktičkim vodama zahtijeva i značajnu infrastrukturu, uključujući specijalizirane brodove sposobne za plovidbu kroz led, kao i luke i terminale prilagođene arktičkim uvjetima. Suradnja između država koje dijele ovaj prostor i

privatnog sektora ključna je za razvoj i implementaciju tehnologija koje će omogućiti sigurno i efikasno kretanje LNG brodova kroz ovaj izazovni okoliš.

Iako Arktik nudi izvanredne mogućnosti za skraćivanje plovnih ruta i smanjenje troškova transporta LNG-a, uspjeh ove inicijative ovisi o balansiranju ekonomskih koristi s potrebom za očuvanjem krhkog arktičkog ekosustava. Dugoročna održivost ovih ruta zahtijeva međunarodnu suradnju, rigoroznu regulativu i usvajanje naprednih tehnologija koje će osigurati sigurno i odgovorno korištenje Arktika kao plovne rute.

Posljednji aspekt koji je obrađen odnosi se na ekološke implikacije korištenja LNG-a u transportu, s naglaskom na smanjenje emisija i održivu upotrebu pomorskih ruta Arktika. Kroz analizu ovih čimbenika, diplomski rad pruža sveobuhvatan uvid u suvremene prakse plovidbe i izazove s kojima se suočavaju operateri u arktičkim vodama.

Ključne riječi: Arktik, LNG, klimatske promjene, otapanje leda, pomorski putevi, transportni troškovi, sigurnosni izazovi, arktički ekosustav, specijalizirani brodovi, međunarodna suradnja, napredne tehnologije, dugoročna održivost.

ABSTRACT

This master's thesis explores the key aspects that define the challenges and advantages of Liquefied Natural Gas (LNG) carriers navigating Arctic shipping routes. The first objective is to review the technical innovations that have significantly contributed to improving the efficiency of these vessels, particularly in the context of the extreme weather conditions characteristic of the Arctic. Additionally, safety measures have been implemented under the International Code for Ships Operating in Polar Waters, known as the "Polar Code," to reduce the risks associated with navigation through this sensitive area. The Code is a comprehensive legal framework adopted by the International Maritime Organization (IMO) and came into force on January 1, 2017.

The Arctic, a region known for its harsh climate and vast frozen expanses, is increasingly recognized as a new and potentially significant shipping route for LNG carriers. Global climate change, which is causing the rapid melting of Arctic ice, is enabling the opening of new maritime routes that were previously inaccessible. This shift presents significant

economic opportunities, as it allows for shorter and faster routes between key economic centers, such as Europe and Asia. The use of these routes greatly reduces sailing time and transportation costs, making LNG even more competitive in the global market.

Navigating the Arctic presents numerous challenges, particularly in terms of environmental and safety sustainability. The sensitivity of the Arctic ecosystem demands careful planning and execution of maritime operations to minimize risks. Although Arctic navigation shortens shipping routes, reducing emissions and pollution associated with longer voyages, the threat of environmental disasters remains. For instance, oil or LNG spills in the event of an accident could seriously endanger the unique Arctic environment. Emissions from ship engines can also contribute to the acceleration of ice melting, further emphasizing the importance of strict application of environmental standards and protective measures to preserve the balance of this fragile ecosystem while meeting economic interests.

In addition to environmental challenges, navigating Arctic waters requires significant infrastructure, including specialized ships capable of ice navigation, as well as ports and terminals adapted to Arctic conditions. Cooperation between the countries that share this region and the private sector is crucial for the development and implementation of technologies that will enable the safe and efficient movement of LNG carriers through this challenging environment.

While the Arctic offers extraordinary opportunities for shortening shipping routes and reducing LNG transportation costs, the success of this initiative depends on balancing economic benefits with the need to preserve the fragile Arctic ecosystem. The long-term sustainability of these routes requires international cooperation, rigorous regulation, and the adoption of advanced technologies that will ensure the safe and responsible use of the Arctic as a shipping route.

The final aspect addressed relates to the environmental implications of using LNG in transportation, with an emphasis on reducing emissions and the sustainable use of Arctic maritime routes. Through the analysis of these factors, the thesis provides a comprehensive insight into contemporary shipping practices and the challenges faced by operators in Arctic waters.

Keywords: Arctic, LNG, climate change, ice melting, maritime routes, transportation costs, safety challenges, Arctic ecosystem, specialized ships, international cooperation, advanced technologies, long-term sustainability.

1. UVOD

1.1. Problem, predmet i objekti istraživanja

Plovidba LNG brodova kroz Arktik predstavlja značajan izazov zbog specifičnih klimatskih uvjeta, ekoloških rizika i tehnoloških zahtjeva. Osnovni problem istraživanja u ovom diplomskom radu je rast globalne potražnje za prirodnim plinom kojim se potiče povećanje broja plovidbi kroz arktičke rute, no s obzirom na osjetljivost arktičkog ekosustava i složenost navigacije u tom području, postoji potreba za detaljnom analizom kako bi se osigurala sigurnost i održivost tih operacija.

Predmet istraživanja obuhvaća analizu tehnoloških, klimatskih i ekoloških čimbenika koji utječu na plovidbu LNG brodova kroz Arktik. Fokus je na identificiranju ključnih izazova, procjeni rizika te predlaganju mjera za optimizaciju sigurnosti i smanjenje negativnog utjecaja na okoliš.

Objekt istraživanja plovnih puteva Arktika obuhvaća nekoliko ključnih aspekata:

1. Tehnološki čimbenici - Tehnologije brodova, navigacijski sustavi, sustavi za upravljanje teretom (LNG), ledolomci, te inovacije u dizajnu brodova za plovidbu u ekstremnim uvjetima.
2. Klimatski čimbenici - Analiza vremenskih uvjeta u Arktiku, promjene u ledenom pokrovu, sezonske varijacije, te utjecaj klimatskih promjena na sigurnost plovidbe.
3. Ekološki čimbenici - Utjecaj plovidbe LNG brodova na arktički ekosustav, potencijalne ekološke katastrofe poput izlivanja LNG-a, zagađenje bukom, te mjere za zaštitu okoliša i održivost.

1.2. Radna hipoteza

Uz već navedene probleme, predmet i objekt istraživanja, radna hipoteza ovog diplomskog rada je efikasna plovidba LNG brodova kroz Arktik koja se može postići integracijom naprednih tehnoloških rješenja, prilagođenih navigacijskih strategija te rigoroznih ekoloških mjera, čime se smanjuju rizici povezani s klimatskim uvjetima i zaštitom osjetljivog arktičkog ekosustava. Očekuje se da će optimizacija ovih čimbenika omogućiti sigurnu i održivu plovidbu, unatoč izazovima koje postavljaju ekstremni klimatski uvjeti i potreba za očuvanjem okoliša. Ova hipoteza istražuje kako planirani razvojni i tehnološki koraci mogu poboljšati učinkovitost i održivost plovidbe LNG brodova kroz Arktik, smanjujući rizike

povezane s izazovnim klimatskim uvjetima i očuvanjem osjetljivog ekosustava, te osigurati dugoročnu sigurnost ovih operacija.

1.3. Svrha i ciljevi istraživanja

Svrha istraživanja je detaljno analizirati tehnološke, klimatske i ekološke čimbenike koji utječu na plovidbu LNG brodova kroz Arktik, s ciljem identificiranja ključnih izazova i predlaganja rješenja koja će omogućiti sigurnu, učinkovitu i ekološki održivu plovidbu u ovom osjetljivom i zahtjevnom području. Istraživanje također ima za cilj doprinijeti boljem razumijevanju utjecaja klimatskih promjena na arktičke rute te pomoći u razvoju strateških smjernica za budući razvoj i prilagodbu tehnologija u sektoru pomorskog prijevoza LNG-a, te opisati trendove i preporuke za održivu upotrebu pomorskih ruta Arktika za LNG brodove.

Ciljevi istraživanja:

1. Identificirati i analizirati ključne tehnološke čimbenike koji utječu na sigurnost i učinkovitost plovidbe LNG brodova kroz Arktik, uključujući inovacije u dizajnu brodova, navigacijske sustave i specijalizirane opreme za plovidbu u hladnim uvjetima.
2. Istražiti klimatske čimbenike i njihovu ulogu u planiranju i provođenju plovidbi kroz Arktik, s posebnim naglaskom na promjene u ledenom pokrovu, sezonske varijacije te dugoročne utjecaje klimatskih promjena na plovidbu.
3. Procijeniti ekološke rizike povezane s plovidbom LNG brodova kroz Arktik, uključujući potencijalne opasnosti za arktički ekosustav, te predložiti mjere za minimiziranje negativnog utjecaja na okoliš.

Ovi ciljevi omogućuju detaljno razumijevanje različitih aspekata funkcionalnosti i budućnosti Arktičke plovne rute, te pružaju osnovu za preporuke i strategije usmjerene na njen uspješan razvoj.

1.4. Znanstvene metode

Znanstvene metode korištene u izradi ovog rada su primarno metode deskripcije i metoda scenarija, te komparativna metoda. Osim toga, najzastupljenije su metode sinteze i analize.

1. Metoda analize i sinteze:

Analiza: Razlaganje složenih problema povezanih s plovidbom kroz Arktik na pojedinačne čimbenike (tehnološke, klimatske, ekološke) kako bi se detaljno razumjeli njihovi specifični utjecaji i međusobne povezanosti.

Sinteza: Povezivanje dobivenih rezultata iz analize kako bi se formirala cjelovita slika o izazovima i rješenjima za plovidbu LNG brodova kroz Arktik.

2. Komparativna metoda: Usporedba različitih tehnoloških rješenja, klimatskih uvjeta i ekoloških strategija korištenih u različitim arktičkim rutama ili regijama. Cilj je identificirati najbolje prakse i prilagoditi ih specifičnim uvjetima u Arktiku.
3. Deskriptivna metoda: Opisivanje trenutnog stanja tehnologije, klimatskih uvjeta i ekoloških rizika povezanih s plovidbom LNG brodova kroz Arktik. Ova metoda omogućuje prikupljanje i prezentaciju podataka na način koji je razumljiv i koristan za daljnju analizu.
4. Metoda scenarija: Razvijanje i analiza različitih scenarija budućeg razvoja tehnologije, klimatskih promjena i ekoloških regulativa. Ova metoda pomaže u anticipaciji mogućih izazova i prilika te formuliranju preporuka za buduće akcije.

Kombinacija ovih metoda omogućit će sveobuhvatno istraživanje problema te pružanje konkretnih preporuka i rješenja za sigurnu i održivu plovidbu LNG brodova kroz Arktik.

1.5. Struktura rada

Ovaj je rad podijeljen u sedam poglavlja. U prvom poglavlju su izneseni problem, predmet i objekti istraživanja te hipoteza i svrha istraživanja. Također, navedene su i metode korištene u izradi rada.

U ostalim poglavljima razrade diplomskog rada opisuju se geografska obilježja i analiza plovidbenih ruta Arktika s osvrtom na Sjeverozapadni prolaz (engl. Northwest Passage - NWP) - u daljnjem tekstu NWP, Sjeverni morski prolaz (engl. Northern Sea Route - NSR) - u daljnjem tekstu NSR i Transpolarnu pomorsku rutu (engl. Transpolar Sea Route - TSR) - u daljnjem tekstu TSR, uloga Arktičkog vijeća i politike tog područja, klimatske promjene i njihov utjecaj na plovidbu, te ekološki utjecaji plovidbe LNG brodova kroz Arktik, kao i održiva upotreba pri plovidbi opisanim područjem.

Zaključak je sedmo poglavlje i donosi nam završnu misao o predmetu istraživanja i sintezu cjelokupnog rada.

2. GEOGRAFSKA OBILJEŽJA I ANALIZA ARKTIČKIH PLOVIDBENIH RUTA

Povijest plovidbe Arktikom, koja počinje krajem 15. stoljeća, obilježena je potragom za novim pomorskim rutama i resursima. Istraživači poput Fridtjofa Nansena i Roalda Amundsena tražili su prolaze poput NWP i NSR, a Arktik je bio poznat po svojoj opasnosti i neistraženosti. Kako su se vremenski uvjeti mijenjali, plovidba je postajala riskantnija, no razvoj brodogradnje povećao je interes za eksploataciju arktičkih resursa (Caymaz, 2024).

Novo gospodarske mogućnosti za plovidbu kroz Arktik postaju sve značajnije uslijed klimatskih promjena, koje su doprinijele smanjenju leda i otvaranju dodatnih ruta. U ovom kontekstu, arktičke plovidbene rute poput NWP, NSR i TSR kao važne „pomorske prometne arterije“ predstavljaju ključne elemente u globalnoj trgovini i potencijalu iskorištavanja bogatih mineralnih resursa. Smanjenje leda u Arktiku omogućava brže i jeftinije putovanje između Azije i Europe, što, zajedno s varijacijama u sposobnostima prikupljanja prihoda, utječe na investicije u infrastrukturu za plovidbu ovom rutom. (Klub za ekspedicionizam i kulturu – KEK, 2003). Prema istraživanjima, NSR omogućava skraćivanje putovanja između europskog i azijskog kontinenta do 40 posto u usporedbi s tradicionalnim rutama (Smith i sur., 2020). Osim toga, sigurnost i izazovi vezani uz ekstremne uvjete plovidbe zahtijevaju daljnje istraživanje i ulaganje u infrastrukturu kako bi se osigurala sigurna navigacija. Zbog toga je važno razumjeti ne samo ekonomske aspekte, već i potencijalne ekološke posljedice koje bi mogle nastati uslijed povećanog prometa putem spomenutih novih ruta koje su nekada koristili samo istraživači za vrijeme ekspedicija.



Slika 1. Arktičke pomorske rute

Izvor: URL 1

Geografske značajke arktičkih plovidbenih ruta definiraju specifične izazove i mogućnosti koje one pružaju za međunarodno pomorstvo. NSR koja se proteže uz sjevernu obalu Rusije, predstavlja ključnu rutu koja omogućava brzo povezivanje između ključnih svjetskih tržišta Europe i Azije, značajno skraćujući plovidbu u usporedbi s tradicionalnim rutama poput Sueskog kanala. S druge strane, NWP kroz kanadski arktički arhipelag omogućava vezu između Atlantskog i Tihog oceana, ali se suočava s izazovima poput navigacije u kompleksnom ledenom okruženju (Bhagwat, 2023). Osim toga, TSR koja prolazi izravno preko Arktičkog oceana, predstavlja najkraći put, ali donosi i dodatne rizike vezane uz ekstremne vremenske uvjete i prisutnost leda (Gudev, 2024). Stoga je jasno da svaka od ovih ruta nudi jedinstvene prednosti i prepreke koje se moraju razmotriti u okviru globalnog pomorskog prometa kako bi se razvila ravnotežena i održiva strategija za budućnost. Istovremeno, meteorološke anomalije otkrivaju prirodne ljepote Arktika, te čine ovo područje vrlo popularnim turističkim odredištem u polarnoj regiji, a edukacija posjetitelja predstavlja dodatan izazov za održavanje prirode.

Navigacija u arktičkom području ima dugu povijest, ali je njezin značaj porastao u 21. stoljeću, posebice zbog pandemijske krize i aktualnih klimatskih promjena koje su omogućile otvaranje ovih plovnih putova te postale alternativa tradicionalnim rutama preko Sueskog i Panamskog kanala. Kontinuirano predviđanje promjena ledenih uvjeta omogućava preciznije planiranje ruta, što je presudno za sigurnu plovidbu LNG tankerima. Povećanje prolaznosti najsjevernijim dijelom Zemlje olakšava logistiku i potiče ekonomski razvoj regije. Stoga, trenutni trendovi u transportu LNG-a ne predstavljaju samo sigurnu i efikasnu plovidbu, već i simbol ubrzanog razvoja arktičkog prostora kao ključnog čvorišta globalne energetske trgovine.

Prema studiji (Henke i sur., 2024.), očekuje se da će sezona plovidbe do 2070. godine znatno produljiti, otvarajući nova tržišta i prilike za prijevoznike. Međutim, rast visine valova i niske temperature krajem sezone predstavljaju rizike, što zahtijeva razvoj strategija za sigurnu plovidbu. Također, ove rute imaju i geopolitički značaj. Razvoj infrastrukture i plovnosti u Arktiku postaje sve važniji, posebno nakon blokade Sueskog kanala, što naglašava potrebu za alternativnim putevima (Gogoleva i sur., 2023). Sredinom 20. stoljeća arktički promet bio je većinom rezerviran za vojne i istraživačke misije, dok je od kasnih 2000-ih trgovinska aktivnost počela rasti. Porast interesa za eksploataciju prirodnih resursa rezultirao je značajnim porastom brodskih aktivnosti. Inovacije u brodogradnji i razvoj ledolomaca postali su ključni za ovu promjenu, dok su turska brodogradilišta specijalizirana za gradnju brodova visokih tehničkih

zahtjeva, kao što su ledolomci, postavila temelje za konkurenciju u arktičkom prometu (Caymaz, 2024).

Trenutno, Rusija i Kanada imaju različite jurisdikcije nad ovim prolazima, što može dovesti do međunarodnih napetosti. Suradnja među državama kroz zakonodavne okvire i multilateralni sporazumi ključni su za održivo korištenje resursa i slobodan protok roba (Hume, 1984). Također, važno je podržati lokalne zajednice, posebno za autohtone narode čiji je način života usko povezan s morskim resursima i koje ovise o ovim prostorima, kako bi se razvili održivi ekonomski modeli koji ne ugrožavaju okoliš. Kombinacija znanstvenih podataka, integracija održivosti i međunarodna suradnja mogu omogućiti da Arktičke rute postanu primjer održivog pomorskog prometa (Østreng, 2013).

Sjeverno polarno područje - Arktik je specifičan zbog svoje jedinstvene topografije koja značajno utječe na navigacijske mogućnosti. Naziv "Arktik" potječe od grčke riječi "arktos", što znači "sjever", i odnosi se na zvijezda Velikog i Malog Medvjeda, koji se nalaze u smjeru prema Sjevernom polu. Prekriven je slojem leda debljine od nekoliko centimetara do nekoliko metara, koji se formira na površini Arktičkog oceana, najmanjeg i najplićeg oceana na svijetu. Ledena površina ovog oceana dovoljno je tanka da omogućava kretanje brodova ledolomaca uzduž i poprijeko, osobito tijekom ljeta i jeseni kada je led minimalan. Najmanja količina leda na Arktiku obično se javlja sredinom rujna, kada se zbog ljetnih temperatura led u Arktičkom oceanu najviše topi. Prema podacima iz istraživanja koje je proveo National Snow and Ice Data Center (NSIDC), minimalna površina morskog leda u 2023. godini iznosila je oko 4,23 milijuna kvadratnih kilometara, što je ispod prosjeka za ovo razdoblje i najniže stanje u posljednjih nekoliko desetljeća. Ova smanjenja u pokrivaču leda povezana su s globalnim klimatskim promjenama, koje uzrokuju porast temperature i ubrzano topljenje leda. Regija obiluje prostranim morima, plitkim zaljevima i ledenjacima, što predstavlja izazov za LNG brodove. (Vander-Zwaag i sur., 1990).



Slika 2. Karta Arktika

Izvor: URL 2

Arktički prostor je smješten u sjevernoj hemisferi, oko Sjevernog pola, te se najčešće definira pomoću Arktičkog kruga, zamišljene linije koja označava granicu unutar koje sunce ne zalazi ljeti i ne izlazi zimi. Arktički krug se nalazi na oko $66,5^\circ$ sjeverne širine i uključuje dijelove zemalja kao što su Norveška, Švedska, Finska, Rusija, Kanada, Sjedinjene Američke Države (posebno Aljaska) i Danska (posebno Grenland). Ova linija određuje granice regije koja obuhvaća različite geografske jedinice i prirodne značajke. Geografski se razlikuje od drugih polarnih regija zbog svoje složene strukture i specifičnih fizičkih karakteristika. Središnji dio Arktika čini Arktički ocean, koji je okružen kopnenim masama. To je najsjeverniji ocean i prekriva ga sloj leda koji se mijenja u debljini i površini ovisno o sezoni i klimatskim uvjetima. Obale Arktičkog oceana su raznolike, uključujući planinske lance, niske obale i fjordove. Na sjeveroistoku, Rusija dominira s Arktičkom obalom koja uključuje značajne regije na dalekom sjeverozapadu države kao što su poluotok Kola (naziv od finske riječi „kolla“ što znači stijena ili kamen) sa svjetski poznatom glavnom lukom i najvećim gradom Murmansk i Čukotski poluotok na sjeveroistoku Azije (naziv po lokalnom narodu Čukča). Na sjeverozapadu, Kanada ima pristup kroz arktičke arhipelage kao što su Kanadski Arktički arhipelag i Hudsonov zaljev (Romanyuk i sur., 2023).

2.1. Vrste i nastanak leda u polarnim krajevima: Utjecaj globalnog zatopljenja na Arktik

Zakrčenost ledom i perspektiva otapanja arktičkog leda ključne su za razlikovanje ovih plovidbenih polarnih ruta. Led u polarnim krajevima dolazi u različitim oblicima i nastaje na različite načine. Postoje četiri glavne vrste leda u tim područjima: ledenjaci, ledeni brijegovi, morski led i višegodišnji led.

Ledenjaci se sastoje od čiste vode, tj. snijega koji se nagomilava. Kada se susretnu s morem, stvaraju se plitki ledeni šelfovi, koji su zaljevi s morskom vodom preko kojih plutaju ledenjaci. Inače, ovo su velike mase leda koje se nalaze na kopnu. Nastaju kada se snijeg nakuplja i komprimira tijekom vremena, te se mogu kretati vrlo sporo i oblikovati krajolik stvarajući doline, fjordove i druge geološke oblike. Zbog porasta temperature zraka, rubni dijelovi ledenjaka se lome i formiraju ledene brijegove koji plutaju u moru. Arktički ledenjaci, poput onih na Grenlandu, mogu biti vrlo debeli. Isti dosežu oko 3.000 metara na najdebljim dijelovima. Visinom mogu odstupati, odnosno ista iznosi nekoliko stotina metara iznad razine mora na najvišim dijelovima. Većina mase leda je ispod površine tla, a visina ledenjaka mase iznad površine uvelike ovisi o lokalnim topografskim uvjetima.

Iako su ledeni brijegovi vidljivi iznad površine mora, samo oko 10% njihovog volumena je iznad vode, dok je velika većina ispod površine mora. To su komadi leda koji se odvajaju od ledenjaka i plove u moru ili oceanu. Oni nastaju kada ledenjaci dosegnu more i počnu se raspadati na manje dijelove. Ledeni brijegovi mogu biti veliki i predstavljati opasnost za pomorski promet jer se veći dio leda nalazi ispod površine vode. Konkretno, u Arktiku mogu biti debeli od nekoliko desetaka metara do preko 100 metara, ovisno o njihovom izvoru i starosti. Visina ledenih brijegova može odstupati. Tipično, ledeni brijegovi mogu dosegnuti visinu iznad razine mora od 10 do 50 metara, iako neki mogu biti i viši.

Morski led nastaje kada se morska voda smrzne, tj. kada temperatura mora padne na $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, počinje se smrzavati, iako se točno smrzavanje može razlikovati ovisno o salinitetu mora. U tom procesu nastaje morski led, karakterističan za Arktik. Debljina leda ovisi o duljini razdoblja hladnog vremena – što dulje traje hladnoća, to je led deblji. Led koji se stvara tijekom zime, a ljeti se otapa, naziva se jednogodišnjim sezonskim ledom i obično je debljine oko dva metra (1 do 3 metra), ovisno o temperaturi. Morski led može biti sezonski (nastaje zimi i topi se ljeti) ili višegodišnji (preživljava više sezona). Ima važnu ulogu u reguliranju klime i u ekosustavima u moru. Kao i kod ostalih vrsta leda, većina volumena morskog leda je

potopljena, a vidljiva visina iznad razine mora može biti oko 10% ukupne debljine leda. To znači da samo nekoliko metara iznad mora može biti vidljivo, dok veći dio leda leži ispod površine.

Led koji „preživljava“ ljeto i ostaje neotopljen naziva se višegodišnjim ledom i čini središnji dio Arktika. Može se nalaziti na moru (višegodišnji morski led) ili na kopnu (višegodišnji ledenjak), te je obično deblji i stabilniji od sezonskog leda i važan je za regulaciju temperature i ekosustava u svojim područjima. Ovaj led može biti debljine od 3 do 5 metara, ali u nekim slučajevima može doseći i veće vrijednosti, te je u ravnoteži s procesom njegovog zimskog stvaranja i ljetnog otapanja. Kao i kod sezonskog leda, samo mali postotak višegodišnjeg leda je iznad površine mora, dok je većina ispod površine. Nažalost, zbog globalnog zatopljenja, takvi oblici leda na Arktiku postaju sve rjeđi. Posljednjih nekoliko ljeta Sjeverni pol je postao jezero ispunjeno razlomljenim komadima leda, pri čemu je višegodišnji led postao jednogodišnji.



Slika 3. Ledeni brijegovi – klasifikacija (Izvor: Polar Discovery)

Izvor: URL 2

2.2. Sjeverozapadni prolaz (Northwest Passage - NWP)

Početak 21. stoljeća, smanjenje ledenog pokrivača uslijed klimatskih promjena otvorilo je nove pomorske rute, poput NWP, što donosi nove ekonomske prilike ali i izazove u pogledu sigurnosti i okoliša (Rovenskaya, 2024). NWP je plovni put koji povezuje Atlantski i

Tihi ocean kroz složen sustav tjesnaca i kanala kanadskog Arktičkog arhipelaga. Ovaj prolaz, koji se proteže duž sjeverne obale Sjeverne Amerike od Davisovog prolaza na istoku do Beringovog prolaza na zapadu, ima dugogodišnju povijest istraživanja i upotrebe. Povijesno gledano, ovaj put bio je gotovo neprohodan zbog guste ledene pokrivače koja ga je pokrivala većinu godine. Otvorio se tek povremeno u ljetnim mjesecima kada bi se led povukao, a prvi ga je uspješno prošao Roald Amundsen 1906. godine. U rujnu 2014. godine MV “Nunavik” postao je prvi teretni brod koji je samostalno plovio Sjeverozapadnim prolazom bez pratnje u komercijalne svrhe (KEK, 2003). Međutim, smješten između kanadskih arktičkih otoka, nudi povoljnije uvjete za plovidbu tijekom ljeta, ali mu je sezona navigacije kraća, što može utjecati na isplativost (Hume, 1984). Stoga posljednjih desetljeća postaje sve važniji i dostupniji s promjenama klimatskih uvjeta i smanjenjem leda tijekom ljeta, omogućujući sezonski izvoz prirodnih resursa iz Arktika.

Satelitska opažanja i podaci pokazuju da se površina arktičkog leda smanjuje brže nego ikada prije, što omogućuje sve češće otvaranje prolaza tijekom ljeta. Ova promjena u dostupnosti može dramatično smanjiti vrijeme putovanja između Europe i Istočne Azije. Jedna od glavnih prednosti otvaranja NWP je smanjenje udaljenosti između ključnih trgovačkih centara. Na primjer, putovanje između Europe i Istočne Azije može se skratiti za tisuće nautičkih milja, što dovodi do uštede na troškovima goriva i vremenu. Također, prolaz pruža novu alternativu za rute koje su ranije bile preopterećene ili politički nesigurne. Unatoč prednostima, spomenuti prolaz donosi i brojne izazove. Varijabilnost u razinama leda i neočekivani vremenski uvjeti mogu otežati plovidbu. Ledene stijene i plutajući led predstavljaju prijetnju za brodove, što zahtijeva posebne navigacijske strategije i pripremu. Također, postoji zabrinutost zbog sigurnosnih i ekoloških aspekata, uključujući mogućnost onečišćenja i utjecaj na osjetljive arktičke ekosustave. S obzirom na trenutačne klimatske trendove, očekuje se da će se dostupnost ovog prolaza povećavati u budućnosti. Međutim, to će zahtijevati razvoj naprednih tehnologija za navigaciju i upravljanje rizicima. Također, političke i ekološke izazove treba riješiti kroz međunarodnu suradnju i regulative (Duah, 2024).

Ova ruta je najzakrčenija ledom od svih triju ruta. Kanadski Arktik ima vrlo složenu mrežu tjesnaca i otočja, što uzrokuje da se led zadržava tijekom većeg dijela godine. Iako klimatske promjene uzrokuju povlačenje leda, NWP i dalje ostaje većinom nepristupačan zbog nepredvidivih i često iznenadnih kretanja leda, čak i tijekom ljetnih mjeseci.

Dugoročna perspektiva za NWP je neizvjesna. Iako se led postupno povlači, složena geografija i nakupljanje leda u tjesnacima ograničavaju razvoj ove rute kao pouzdanog komercijalnog prolaza. Postoji šansa za povećanu upotrebu u dalekoj budućnosti, ali trenutno ostaje vrlo riskantna.

Primjeri usporedbe plovidbe NWP s tradicionalnim rutama:

1. Rotterdam, Nizozemska – Yokohama, Japan preko NWP-a može se skratiti za oko 4.000 milja u usporedbi s tradicionalnim putem preko Panamskog kanala;
2. Hamburg, Njemačka – Vancouver, Kanada može se skratiti za oko 2.500 milja ako se koristi NWP umjesto rute kroz Panamski kanal;
3. New York, SAD – Šangaj, Kina putem NWP-a može skratiti put za oko 3.500 milja u odnosu na uobičajeni put preko Panamskog kanala;
4. London, Engleska – Tokio, Japan preko NWP-a može biti skraćeno za približno 5.000 milja u usporedbi s rutom koja prolazi kroz Sueski kanal.



Slika 4. Tradicionalne i Arktičke pomorske rute

Izvor: URL 7

2.3. Sjeverni morski prolaz (engl. Northern Sea Route - NSR)

NSR (tzv. Ruski Sjeverni prolaz) se proteže uz sjevernu obalu Rusije, od Karaškog mora na zapadu do Beringovog prolaza na istoku. Ova ruta, koja uključuje prolazak kroz Laptevsko i Istočnosibirsko more, nudi najkraći put između europskih luka i luka na Dalekom Istoku, posebno kineskih i japanskih. Time se u ekonomičnom smislu nameće za trgovačku flotu brodova i povećava pristup resursima u Arktiku. Kao i NWP, NSR je povijesno bio zatvoren tijekom većine godine zbog leda, međutim zbog smanjenja ledenog pokriva, ovaj put, iako je i

dalje izazovan zbog nepouzdanih vremenskih uvjeta i promjenjivog leda, postaje sve dostupniji omogućujući prolazak brodova tijekom sve dužih razdoblja u ljetnim mjesecima (otprilike od kraja lipnja do kraja rujna), te nudi značajne prednosti u pogledu smanjenja vremena putovanja i troškova, te na taj način omogućava Rusiji da iskoristi svoje arktičke luke i razvije infrastrukturu za pomorski promet.



Slika 5. Položaj Istočnosibirskog mora

Izvor: URL 4

Najmanje je zakrčen ledom od sve tri rute, ponajviše zbog svoje pliće obale. More uz sjevernu obalu Rusije relativno se brzo zagrijava tijekom ljeta, što dovodi do ranijeg otapanja leda i duže plovidbene sezone, međutim za prohodnost iste često je potrebna podrška ledolomaca (slika 6.), osobito na početku i kraju sezone.

Nadalje, NSR ima najbolju perspektivu za komercijalnu upotrebu zbog duže plovidbene sezone i sve većih ulaganja Rusije u infrastrukturu i ledolomce. S obzirom na brzo otapanje leda, ova ruta se može sve više koristiti, a postoje projekcije da bi mogla postati još važnija u sljedećih nekoliko desetljeća. Međutim, izazovi poput klimatskih uvjeta i potrebe za infrastrukturu ostaju ključni faktori za daljnji razvoj (Ship & Ocean Foundation, Tokyo, 2001). Ova ruta nudi bržu alternativu tradicionalnim pomorskim putovima, što omogućava bolju iskorištenost resursa i smanjenje emisija plinova, čineći je atraktivnom za brodarske kompanije.



Slika 6. Ruski nuklearni ledolamac. (Fotografija Hiroshija Utsumija, Instituta za arktička istraživanja i promatranja)

Izvor: URL 5

Tijekom ljeta, Sunce ne zalazi 24 sata dnevno u području iznad Sjevernog pola, što se naziva "polarni dan" ili "polarno svitanje". Ovo razdoblje traje od otprilike 20. ožujka do 23. rujna, ovisno o točnoj lokaciji dok zimski period započinje otprilike od kraja rujna do kraja ožujka, te u tom području Sunce ne izlazi 24 sata dnevno, što se naziva "polarna noć". Ovo razdoblje traje od otprilike 23. rujna do 20. ožujka. Povećanje pomorskog prometa preko Arktika smanjuje globalno onečišćenje zbog manjih udaljenosti putovanja i nižih emisija CO₂, ali ostaje rizik i zabrinutost zbog potencijalnih ekoloških posljedica eksploatacije za lokalne ekosustave. Ipak, očekuje se razvijanje dodatne infrastrukture i tehnologije za navigaciju, te je ključno uspostaviti pravovremene i striktno regulacije te međunarodne sporazume za upravljanje ekološkim i sigurnosnim izazovima (Schach, 2018).

2.4. Transpolarna pomorska ruta (Transpolar Sea Route - TSR)

TSR (tzv. Transarktika), prelazi središnji Arktik, povezujući Atlantski i Tih ocean direktno preko Sjevernog pola. Ova ruta prolazi kroz Arktički ocean i okružena je kopnenim masama Eurazije i Sjeverne Amerike. U usporedbi s ostalim rutama, ovo područje Arktika je najviše zakrčeno trajnim, debelim slojem gustog leda koji se rijetko povlači čak i tijekom ljeta, što ovu rutu čini najmanje dostupnom od svih. Trenutno je prolaz kroz TSR praktički nemoguć bez iznimno snažnih ledolomaca.

S obzirom na trenutne klimatske promjene i otapanje leda, TSR postaje sve razmatranija kao moguća pomorska ruta. Očekuje se da će daljnje otapanje leda omogućiti plovidbu ovom rutom, čime bi se značajno skratilo vrijeme putovanja između sjeverne Europe i istočne Azije.

Ako se TSR potpuno otvori, mogla bi ponuditi najbrži mogući put između Atlantskog i Tihog oceana, što bi moglo donijeti velike logističke i ekonomske prednosti, uključujući smanjenje troškova i vremena transporta. Također, otvaranje ove rute moglo bi omogućiti nove trgovačke prilike i pristup novim resursima u središnjem Arktiku. Glavni izazov za TSR je trenutna nepredvidljivost leda. Iako se otapanjem zaleđenog prostranstva otvaraju mogućnosti budućih ključnih komponenti globalnog pomorskog prometa, još uvijek postoje značajni rizici povezani s promjenjivosti leda i ekstremnim vremenskim uvjetima. Također, plovidba kroz ovu rutu zahtijeva visok stupanj pripreme i tehnologije za navigaciju u teškim uvjetima, te je se za potpuni razvoj ove rute potrebno uskladiti tehnološki napredak s međunarodnim regulativama i ekološkim standardima kako bi se osigurala sigurna i održiva plovidba (Kubat , 2006).

U prošlosti je ova ruta bila gotovo neprohodna zbog stalne prisutnosti leda, ali TSR ima dugoročnu perspektivu kao ruta s najizravnijim putem preko Arktika, ali za sada je to daleka budućnost. Klimatske promjene mogu smanjiti debljinu leda, no trajat će desetljećima prije nego što bi TSR mogla postati praktična za redovitu plovidbu.

2.5. Obilježja LNG brodova koji plove arktičkim plovidbenim rutama (poboljšanje, učinkovitost, sigurnost)

Transport LNG-a postaje ključan na globalnom energetsom tržištu zbog sve veće potražnje za čistijim izvorima energije i može djelovati kao katalizator za razvoj održivijeg međunarodnog pomorskog prometa (Schach, 2018), čime doprinosi jačanju energetskih odnosa među državama i potiče geopolitičku stabilnost. Istraživanja pokazuju da će tehnološki napredak u materijalima i navigacijskim sustavima poboljšati sigurnost plovidbe. Međutim, promjene u klimatskim uvjetima zahtijevaju prilagodbu plovila i operacija. Geopolitičke napetosti oko arktičkih resursa dodatno kompliciraju situaciju, čineći međunarodnu suradnju neophodnom za očuvanje ovog osjetljivog područja (Knight i sur., 2022; Sharapov, 2023).

S obzirom na globalne promjene u energetsom sektoru, potrebna su inovativna rješenja koja će pridonijeti održivom razvoju i smanjenju emisije ugljikovog dioksida. U tom kontekstu, LNG brodovi se ističu kao ključni element u globalnom energetsom sustavu, osobito u kontekstu arktičkih plovidbenih ruta, omogućujući sigurniji i učinkovitiji transport prirodnog plina. Njihova sposobnost navigacije kroz ekstremne meteorološke uvjete, uz istovremeno poštivanje međunarodnih propisa, predstavlja značajan korak naprijed u sektoru pomorskog prijevoza. Korištenje LNG tehnologije u arktičkom prostoru ne samo da povećava učinkovitost

opskrbe energijom, već također smanjuje rizik od ekoloških nesreća, čime se poboljšava sigurnost plovidbe. Uvodna razmatranja o ovim pitanjima postavljaju temelje za daljnju analizu prednosti i izazova s kojima se suočavaju LNG brodovi, usmjeravajući pažnju na ključne aspekte koji oblikuju budućnost ovog industrijskog segmenta.

Konstrukcija LNG brodova osmišljena je s posebnim naglaskom na sigurnost, učinkovitost i ekološke standarde, što ih čini pogodnima za plovidbu kroz izazovne uvjete sjevernog polarnog područja. Napredni izolacijski i sigurnosni sustavi i visokokvalitetno opremljeni dvostruki trup i teretne pregrade na LNG brodovima smanjuju rizik od curenja tereta, te uključuju specijalne protupožarne sustave prilagođene niskim temperaturama, čime se povećava sigurnost plovidbe i smanjuje negativan utjecaj na okoliš. Moderni propulzijski sustavi optimiziraju potrošnju pogonskog goriva, čime povećavaju ukupnu učinkovitost i smanjuju operativne troškove (Mokhatab i sur., 2013). To uključuje korištenje specijalnih materijala poput čelika visoke otpornosti na niske temperature te dizajn trupa koji omogućuje probijanje kroz ledene mase. Arktički LNG brodovi često posjeduju specifičnu tzv. "ledenu klasu" radi optimizacije uvjeta plovidbe, koju definiraju međunarodna klasifikacijska društva i koja određuje koliko je brod sposoban za plovidbu kroz različite debljine leda. Najčešće klase za ove brodove su ARC7 ili ARC8, koje karakterizira napredni sustavi za upravljanje ledom i robusna konstrukcija, čime se osigurava sigurno i učinkovito kretanje kroz ove zahtjevne slojeve leda ali s različitim razinama otpornosti na led. Klasa ARC7 pruža visoku otpornost za umjerenije ledene uvjete, dok klasa ARC8 nudi vrhunsku otpornost i sposobnost za navigaciju kroz najteže ledene uvjete u arktičkim regijama. Shodno tomu, LNG brodovi igraju ključnu ulogu u održivom razvoju morskog transporta unutar arktičkih regija, omogućujući sigurniji transport energenta.

ARC7 je specijalizirana klasa LNG brodova dizajnirana za plovidbu kroz arktičke vode koje su prekrivene ledom s umjerenim do teškim uvjetima leda. Ovi brodovi mogu probijati led debljine do 1,5 metra, što ih čini prikladnim za plovidbu u područjima gdje su ledeni uvjeti zahtjevni, ali ne ekstremni. Njihova konstrukcija uključuje ojačane trupove s posebnim slojem čelika otporan na niske temperature, što osigurava otpornost na udarce leda i dugotrajno izlaganje ekstremnim uvjetima. Brodovi klase ARC7 također su opremljeni naprednim sustavima za upravljanje plovidbom u ledu, uključujući sustave za kontrolu brzine i smanjenje otpora leda, što omogućuje bolju manevriranje kroz guste ledene slojeve. Koriste se za transport LNG-a kroz arktičke regije, kao što je Sjeverni pomorski put i druge rute gdje su ledeni uvjeti

prisutni, ali ne stalno ekstremni. Idealni su za operacije u regijama s povremenim debelim ledom ili gdje su sezonske promjene leda prisutne.

ARC8 predstavlja naprednu klasu LNG brodova koja je dizajnirana za operacije u najzahtjevnijim arktičkim uvjetima. Ovi brodovi mogu ploviti kroz debeli led debljine do 2,1 metar, što ih čini sposobnima za navigaciju kroz ekstremne ledene uvjete gdje je led stalno prisutan i vrlo gust. Konstrukcija brodova uključuje visoko ojačane trupove, često koristeći posebno pojačane materijale i dodatnu izolaciju koja omogućuje brodu da izdrži dugotrajne udarce leda i ekstremne temperaturne uvjete. Osim toga, opremljeni su naprednim sustavima za probijanje leda, uključujući dizajn trupa u obliku slova U koji pomaže u raspodjeli sile udarca, te posebnim potisnim sustavima koji pomažu u prevladavanju debelog leda. Ovi brodovi su idealni za plovidbu kroz najteže arktičke regije gdje su ledeni uvjeti konstantno ekstremni, kao što su sjeverni dijelovi Arktičkog oceana ili područja koja su često podložna debeloj ledenoj pokrivači. Koriste se za dugotrajne rute u ekstremnim uvjetima, gdje je potrebna maksimalna otpornost na led i učinkovitost u ekstremnim hladnoćama.



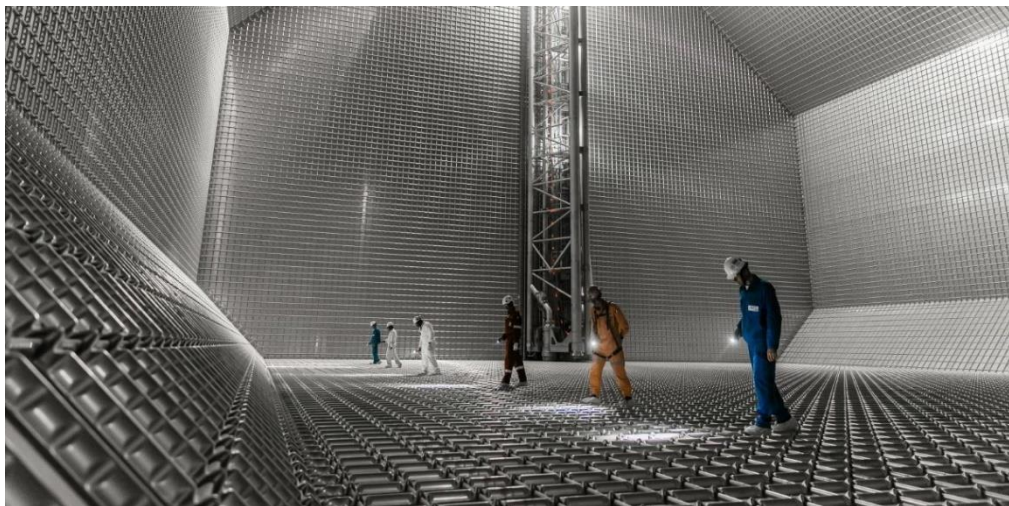
Slika 7. Prikaz ledolomca u suradnji s ARC7 LNG brodom

Izvor: URL 6

Za LNG brodove koji plove Arktikom, ključni su sustavi pogona i upravljanja. Mnogi od ovih brodova opremljeni su podvodnim propulzivnim jedinicama poznatim kao azipodi, koji omogućuju izvrsnu manevarsku sposobnost i omogućuju brodu da se okreće i plovi unatrag kroz led. Ovi sustavi također omogućuju optimalno manevriranje u uskim plovnim putovima i različitim uvjetima leda, čime se povećava sigurnost plovidbe. Motori LNG brodova prilagođeni arktičkim uvjetima često koriste kombinaciju konvencionalnih goriva i LNG-a, što

smanjuje emisije štetnih plinova i povećava energetska učinkovitost. Upotreba LNG-a kao goriva dodatno smanjuje ekološki otisak broda, što je ključno u osjetljivom ekosustavu Arktika, koji je vrlo osjetljiv na klimatske promjene.

Kako bi se osigurao siguran transport LNG-a, ovi brodovi su opremljeni naprednim sustavima izolacije. Skladišni tankovi LNG-a izrađeni su od specijalnih materijala poput nikla ili aluminija koji izdržavaju ekstremno niske temperature do $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dodatno, tankovi su obloženi vakuumskom izolacijom kako bi se minimalizirali gubici energije i osiguralo da LNG ostane u tekućem stanju tijekom cijelog putovanja. Zaštita posade od ekstremno niskih temperatura također je ključna, stoga su brodovi opremljeni grijanim prostorima i izolacijskim sustavima kako bi se osigurala toplina unutar broda. Prostorije za posadu, kontrolne sobe i operativni prostori posebno su dizajnirani da zadrže toplinu i omogućuju ugodan rad u vrlo hladnim uvjetima.



Slika 8. Prikaz tanka za prijevoz tereta s LNG broda (membranski oblik)

Izvor: URL 7

Navigacija kroz arktičke vode zahtijeva napredne sustave praćenja leda i meteoroloških uvjeta. LNG brodovi za arktičke rute opremljeni su radarima za otkrivanje leda, sonarima i drugim alatima koji omogućuju precizno kretanje kroz ledene mase. Moderni brodovi koriste satelitsku komunikaciju kako bi dobili ažurirane informacije o kretanju leda i vremenskim uvjetima, čime se smanjuje rizik od sudara s ledenim santama ili neočekivanih zastoja. Također, LNG brodovi koji plove Arktikom opremljeni su naprednim sustavima za predviđanje kretanja leda kako bi se osigurala sigurnost i učinkovitost plovidbe kroz zahtjevne ledene uvjete. Ovi

sustavi igraju ključnu ulogu u planiranju najsigurnijih i najbržih ruta kroz područja prekrivena ledom.

Brodovi su opremljeni naprednim radarima i sensorima koji omogućuju detekciju leda u stvarnom vremenu. Ovi uređaji koriste elektromagnetske valove za skeniranje okoline broda i detekciju leda, uključujući suhi led koji sublimira, odnosno iz čvrstog stanja se izravno pretvara u plinovito, bez prelaska u tekuću fazu, te ledene ploče. Moderni radari mogu razlikovati različite vrste leda i pružiti detaljne informacije o njihovoj gustoći i debljini.



Slika 9. Batimetrijska karta Arktika

Izvor: URL 8

Sustavi za automatsko prepoznavanje Automatski identifikacijski sustav (AIS) i digitalne mape dodatno olakšavaju navigaciju u teškim i njezinamičnijim arktičkim uvjetima. AIS podaci integrirani su s navigacijskim sustavima broda, kao što su radar i elektroničke karte. Ova integracija omogućuje kapetanima i ostalim časnicima plovidbene straže da bolje razumiju okolinu broda, uključujući prisutnost drugih plovila i potencijalne prepreke poput leda. AIS koristi konstelaciju satelita koji orbitiraju Zemljom i emitiraju signale koji sadrže informacije o vremenu i poziciji tj. Globalni navigacijski satelitski sustav (GNSS) koji se sastoji od nekoliko ključnih komponenti koje zajedno omogućuju precizno pozicioniranje i navigaciju (GPS-a (američki), GLONASS-a (ruski), Galileo-a (europski) i BeiDou-a (kineski)) pri čemu svaki od njih ima vlastitu mrežu satelita. Sustav koristi tehnologiju za precizno praćenje pozicije broda, te da komuniciraju međusobno i s nadležnim tijelima odnosno s obalnim postajama. Ovi podaci omogućuju brodovima da šalju informacije o identitetu broda, vrsti tereta, destinaciji, statusu plovidbe, svojoj trenutnoj lokaciji, brzini i smjeru plovidbe (kurs) drugim brodovima i zemaljskim postajama. To pomaže u koordinaciji kretanja i izbjegavanju sudara. Dodatno, ovi

podaci također mogu pomoći u planiranju rute u arktičkim regijama gdje se ledeni uvjeti mogu brzo mijenjati i gdje je potrebno prilagoditi rutu u stvarnom vremenu. Ovaj sustav doprinosi učinkovitijoj navigaciji kroz zahtjevne arktičke uvjete (Berg, 2018).

Satelitske slike i podaci omogućuju analizu velikih područja i pružaju informacije o obrascima leda na velikim udaljenostima. Ove slike mogu prikazivati promjene u ledu tijekom vremena i omogućiti analizu sezonskih i klimatskih varijacija.



Slika 10. Prikaz otapanja imponantnih ledeni stijena na Arktiku (preuzeto s: Paul Souders via Getty Images)

Izvor: URL 9

Napredni računalni modeli i softverski alati za prognozu koriste podatke o vremenskim uvjetima, temperaturi mora, brzini vjetrova i drugim relevantnim faktorima za predviđanje kretanja leda. Ovi modeli mogu simulirati kako će se led kretati i mijenjati, što pomaže u planiranju plovidbe.

Sustavi za predviđanje kretanja leda značajno povećavaju sigurnost plovidbe jer omogućuju bolje razumijevanje i predviđanje opasnosti koje led može predstavljati. Pravilna upotreba ovih tehnologija može smanjiti rizik od nesreća i oštećenja broda zbog leda. Također, optimizacija ruta temeljem predviđanja kretanja leda doprinosi učinkovitijoj plovidbi, smanjuje potrošnju goriva i omogućuje brži dolazak do odredišta. Međutim, unatoč napretku u tehnologiji, predviđanje kretanja leda može biti izazovno zbog varijacija u uvjetima leda i promjenjivih vremenskih uvjeta. Preciznost modela i sustava ovisi o kvaliteti prikupljenih podataka i tehnologiji koja se koristi, što može utjecati na točnost predviđanja (Hibler i sur., 2013).

LNG brodovi dizajnirani za arktičke uvjete moraju se pridržavati strogih ekoloških standarda kako bi minimizirali svoj utjecaj na osjetljiv ekosustav Arktika. Ovi brodovi koriste

tehnologije za smanjenje emisije štetnih stakleničkih plinova, kao što su sustavi za čišćenje ispušnih plinova (engl. scrubber) i motori na LNG. Osim toga, brodovi su dizajnirani da minimiziraju rizik od curenja ili izlivanja goriva u okoliš. Specijalni sustavi za kontrolu balastnih voda i otpada osiguravaju da se otpadni materijali pravilno upravljaju i ne kontaminiraju okoliš.

Globalna konkurencija za resurse i napredak u tehnologiji, uključujući autonomne brodove i napredne navigacijske sustave, ključni su za osiguranje sigurne plovidbe. USV (engl. Unmanned Surface Vehicles) brodovi predstavljaju značajan napredak u pomorskoj tehnologiji, nudeći brojne prednosti za različite primjene i operacije na vodi. Dizajnirani su za autonomnu operaciju bez potrebe za ljudskom posadom. Isti koriste senzore, kamere, GNSS, radare i druge tehnologije za samostalnu navigaciju i obavljanje zadataka. Mogu raditi u teško dostupnim ili opasnim područjima gdje bi bila riskantna ljudska prisutnost čime se eliminira posada i smanjuju troškovi rada i potreba za sigurnosnim mjerama, međutim pravni i sigurnosni aspekti uporabe USV brodova još uvijek su u fazi razvoja i usklađivanja s međunarodnim zakonima. Različitih su vrsta i primjena poput: istraživački USV (koriste se za prikupljanje podataka o moru, poput temperature, saliniteta i kvalitete vode); vođeni USV (koriste se za vojne ili sigurnosne svrhe, uključujući patroliranje i nadzor); komercijalni USV (koriste se za transport tereta, praćenje brodskih ruta i logistiku); USV za zaštitu okoliša (koriste se za praćenje zagađenja i očuvanje okoliša) (Harris, 2018).

2.6. Sigurnost i održivost u Arktiku: Polarni kodeks, BEATA, SOLAS, MARPOL i UNCLOS

Regulacije poput „Polar Code“ i inicijative kao što je „Barents Euro-Arctic Transport Plan“ jačaju sigurnosne protokole u arktičkim vodama, poboljšavajući sigurnost i smanjujući emisije (Afenyo, 2024). Napredni pogonski sustavi, zadovoljavaju standarde Polar Code-a i povećavaju sigurnost u teškim uvjetima.

Polarni kodeks (engl. Polar Code) je međunarodni regulatorni okvir koji je razvijen kako bi poboljšao sigurnost plovidbe i zaštitu okoliša u polarnih područjima, uključujući Arktik i Antarktiku. Usvojen je od strane Međunarodne pomorske organizacije (IMO) i primjenjuje se na brodove koji plove kroz ove ekstremne regije. Usvojen je u siječnju 2014. godine na 94.

sjednici Odbora za sigurnost pomorske plovidbe (engl. Marine Safety Committee, MSC), te je službeno stupio na snagu 1. siječnja 2017. godine. Sastoji se od dva dijela:

Dio I – Sigurnost: Ovaj dio sadrži zahtjeve za dizajn, konstrukciju, opremu i operativne procedure brodova koji plove u polarnim uvjetima.

Dio II – Zaštita okoliša: Ovaj dio uspostavlja smjernice za zaštitu polarnih ekosustava, uključujući pravila za upravljanje otpadom i emisijama.

Plan prometne povezanosti Barentsovog euro-arktičkog područja (engl. Barents Euro-Arctic Transport Plan, BEATA) dio je šireg konteksta suradnje unutar Barentsovog euro-arktičkog vijeća (engl. Barents Euro-Arctic Council, BEAC), koje je osnovano 11. siječnja 1993. godine u Kirkenesu, Norveška. BEATA predstavlja inicijativu usmjerenu na razvoj i koordinaciju prometne infrastrukture u regiji Barentsovog mora, koja obuhvaća sjeverne dijelove Norveške, Švedske, Finske i Rusije. Cilj plana je poboljšanje prometne povezanosti između tih zemalja, kako bi se olakšao protok robe i ljudi, povećala regionalna suradnja te podržao gospodarski razvoj i održivost u tom dijelu Arktika.

Konvencija o sigurnosti života na moru (engl. Safety of Life at Sea, SOLAS), pruža osnovne smjernice za sigurnost na moru koje su relevantne i za plovidbu u arktičkim vodama, gdje su sigurnosni standardi posebno važni zbog ekstremnih uvjeta, osnovna međunarodna pravila za sigurnost pomorske plovidbe, te se primjenjuje na sve pomorske regije, uključujući i Arktik. Konvencija je prvi put usvojena 1. svibnja 1914. godine, u reakciji na potonuće broda „Titanic“ 1912. godine. Originalna verzija konvencije stupila je na snagu 1929. godine. Od tada su usvojene različite verzije i amandmani. Najnovija verzija, koja uključuje izmjene i dodatke, stupila je na snagu 1. srpnja 2014. godine. Sastoji se od 14 glavnih poglavlja. Svako poglavlje pokriva različite aspekte sigurnosti plovidbe i zaštite života na moru, uključujući zahtjeve za opremom, signalizacijom, obukom posade, i mnoge druge ključne aspekte sigurnosti brodova.

Regulacija poput Međunarodne konvencije o sprečavanju onečišćenja s brodova (engl. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, MARPOL), osnovana je kao odgovor na sve veću zabrinutost zbog onečišćenja mora. Konvenciju je usvojila Međunarodna pomorska organizacija (IMO) 1973. godine. Prva verzija MARPOL-a usvojena je 2. studenog 1973., ali je zbog tehničkih i pravnih izazova nije odmah stupila na snagu. Zbog toga je kasnije, 1978. godine, usvojen Protokol koji je značajno dopunio i promijenio originalnu konvenciju. Kombinacija tih dvaju dokumenata poznata je kao MARPOL 73/78, koji je stupio na snagu 2. listopada 1983. godine. Ključna je za smanjenje štetnih emisija iz brodskog

prometa, uključujući emisije sumporovih oksida (SO_x). MARPOL Aneks VI, koji se bavi zagađenjem zraka s brodova, postavlja stroge standarde za sadržaj sumpora u brodskom gorivu kako bi se smanjilo onečišćenje zraka.

MARPOL se tijekom godina razvijao kroz dodatke (Aneks), koji se bave različitim vrstama onečišćenja poput nafte, kemikalija, štetnih tvari u pakiranju, otpadnih voda, smeća, i zagađenja zraka. Aneks VI, koji se odnosi na zagađenje zraka, stupio je na snagu 19. svibnja 2005. godine, i od tada je postao ključan u regulaciji emisija SO_x i dušikovih oksida (NO_x) iz brodova.

Prema ovoj regulaciji, brodovi koji plove međunarodnim vodama moraju koristiti goriva s niskim sadržajem sumpora ili implementirati tehnologije za smanjenje emisija, kao što su sustavi za čišćenje ispušnih plinova. Cilj ovih mjera je smanjiti emisije sumpornih oksida koje doprinose kiselim kišama, zdravstvenim problemima i onečišćenju okoliša.

Nadalje, MARPOL potiče prelazak na alternativna goriva poput ukapljenog prirodnog plina, koji ima niži udio sumpora i drugih štetnih tvari, čime se dodatno smanjuje utjecaj brodskog prometa na okoliš. Ova regulacija je dio globalnih napora za očuvanje okoliša i zdravlja ljudi, a njezina provedba ima značajan utjecaj na smanjenje zagađenja mora i atmosfere.

Konvencija Ujedinjenih naroda o pravu mora (engl. United Nations Convention on the Law of the Sea, UNCLOS), odnosno međunarodni ugovor koji regulira prava i odgovornosti država na morima i oceanima je usvojen 10. prosinca 1982. godine na trećoj konferenciji Ujedinjenih naroda o pravu mora u Montevideu, Urugvaj, te je stupio na snagu 16. studenog 1994. godine, nakon što je postignut dovoljan broj ratifikacija. UNCLOS igra ključnu ulogu u reguliranju prava i odgovornosti u Arktiku, posebno u kontekstu ekonomske ekskluzivnosti, zaštite okoliša, slobode plovidbe i rješavanja sporova. Kako se uvjeti u Arktiku mijenjaju zbog klimatskih promjena i povećane ljudske aktivnosti, UNCLOS i s njom povezani međunarodni regulativi i mehanizmi postaju još važniji za upravljanje i očuvanje ovog strateški važnog područja.

Implementacija hitnih protokola i uporaba suvremenih tehnologija, poput bespilotnih letjelica, važni su za pravovremeno prepoznavanje problema i reakciju u kriznim situacijama. Ovo osigurava sigurnost posade, plovila i okoliša (Woodward i sur., 2010).

Automatizacija i digitalne tehnologije omogućuju nadzor u stvarnom vremenu, što poboljšava sigurnost i učinkovitost plovidbe, osobito u složenim uvjetima. Motori s dvostrukim

gorivom (nafta, dizel i LNG) koji koriste LNG kao glavni izvor pogonske energije značajno smanjuju emisije SO_x i NO_x, emitirajući do 25% manje CO₂ od brodova na tzv. teška goriva (nafta i naftni derivati), čime doprinose smanjenju onečišćenja zraka. Ovi motori ne samo da poboljšavaju ekološku održivost plovila, već pružaju i veću fleksibilnost u operacijama jer omogućuju brodovima prilagodbu različitim vrstama goriva prema dostupnosti i ekonomskim uvjetima. Korištenjem LNG-a kao alternativnog goriva, plovila također pridonose smanjenju emisije stakleničkih plinova i imaju manji utjecaj na okoliš, što je posebno važno u kontekstu globalnih napora za borbu protiv klimatskih promjena i očuvanje morskog ekosustava. Uz to, primjena LNG-a može dovesti do ušteda u troškovima goriva i smanjenja operativnih troškova, čime se povećava ukupna učinkovitost plovidbe (Fiorini i sur., 2021). Shodno tomu, daljnje ulaganje u inovacije i istraživanje ključno je za budućnost LNG transporta u ovim zahtjevnim regijama. Također, pravilno održavanje i modernizacija motora povećavaju sigurnost u ekstremnim uvjetima.

U globalnom kontekstu, LNG doprinosi energetske sigurnosti smanjenjem ovisnosti o tradicionalnim izvorima. Zemlje poput SAD-a, Rusije i Kine ulažu u infrastrukturu i regulative koje potiču upotrebu LNG-a, dok arktičke rute povećavaju učinkovitost transporta čime se doprinosi stabilnosti cijena energije i globalnoj energetske sigurnosti. (Manole i sur., 2020; Wei i sur., 2019).

3. ULOGA ARKTIČKOG VIJEĆA I POLITIKE PLOVIDBE PREKO ARKTIKA

Arktičko vijeće, osnovano 1996. godine, ključno je za suradnju među arktičkim državama i drugim akterima u regulaciji plovidbe i zaštiti okoliša u Arktiku. S porastom komercijalizacije arktičkih ruta i brzom klimatskom promjenom, vijeće potiče razvoj sigurnosnih i ekoloških standarda, osobito za LNG brodove. Rastuća međunarodna aktivnost u regiji donosi izazove usklađivanja interesa s globalnim normama. Uključujući radne grupe poput „Zaštita morskog okoliša Arktika (PAME)“, Arktičko vijeće vodi politike koje osiguravaju održivost i sprečavanje sukoba, dok se suočava s novim prilikama i izazovima u vezi s resursima i trgovinskim rutama.

3.1. Utjecaj politike arktičke plovidbe na međunarodne odnose

Istraživanje o Norveškom otočju Svalbardu (norveški arhipelag između kopnene Norveške i Sjevernog pola u Arktičkom oceanu) pokazuje kako prelazak s eksploatacije resursa na ekološki nadzor može utjecati na suverenitet i prava stranih subjekata. Razvoj trgovačkih pravaca kroz Euroazijski Arktik zahtijeva pažljivo planiranje i usklađivanje međunarodnih politika za sigurnost i održivost plovinih putova, osobito za LNG brodove.

Polarni kodeks IMO-a, koji je na snazi od 2017. godine, postavlja sigurnosne i ekološke standarde za plovidbu u polarnoj regiji. Osim toga, bilateralni i multilateralni sporazumi, poput Arktičkog sporazuma o pretraživanju i spašavanju iz 2011. godine, reguliraju specifična pitanja. Arktik postaje važna ruta za LNG brodove, čije plovidbe zahtijevaju stroge standarde zbog složenih uvjeta. Arktičko vijeće i njegove radne grupe, kao što su „PAME“ i „Radna grupa za održivost“, igraju ključnu ulogu u osiguravanju sigurnosti i održivosti plovidbe u skladu s najvišim standardima zaštite okoliša i održivosti.



Slika 11. Arhipelag Svalbard nalazi se daleko iznad Arktičkog kruga i odvojen je od euroazijskog kopna otprilike 1000 km Barentsovim morem. Karta iz Owl and Mouse Educational Software.

Izvor: URL 10

PAME (engl. Protection of the Arctic Marine Environment) je radna grupa Arktičkog vijeća odgovorna za zaštitu okoliša u arktičkim pomorskim područjima. Njihov rad fokusira se na očuvanje morskog okoliša Arktika, razvoj i primjenu mjera za smanjenje zagađenja te očuvanje ekosustava. Osnovana je 1991. godine kao dio Arktičkog vijeća, koje je službeno započelo s radom 1996. godine. Grupa se kontinuirano razvija kako bi odgovorila na nove izazove u zaštiti arktičkog mora.

Radna grupa za održivost unutar Arktičkog vijeća bavi se pitanjima održivog razvoja i integracije održivih praksi u sve aspekte arktičkih aktivnosti. Cilj grupe je promicanje održivog upravljanja resursima, razvoj i implementacija politika koje podržavaju ekološki prihvatljive prakse. Osnovana je kao dio Arktičkog vijeća, a konkretno datum osnivanja može varirati ovisno o specifičnim inicijativama i zadacima koji su se razvijali kroz vrijeme. Povezana je s radom Arktičkog vijeća koje je službeno započelo s radom 1996. godine.

3.2. Promicanje sigurnosti i održivosti arktičkih pomorskih ruta za LNG brodove

Zbog sve veće komercijalizacije arktičkih pomorskih ruta, ključno je osiguranje integriteta i održivosti, osobito za LNG brodove. Arktičko vijeće igra sve važniju ulogu u regulaciji koja utječe na međunarodne odnose, s ciljem unapređenja sigurnosti plovidbe i očuvanja okoliša. Razvoj infrastrukture i održivih praksi važno je za smanjenje rizika povezanih s prometom LNG brodova. Također, gospodarski interesi moraju se uravnotežiti s zaštitom arktičkog ekosustava, što zahtijeva suradnju među arktičkim državama i međunarodnim organizacijama (Afenyo, 2024).

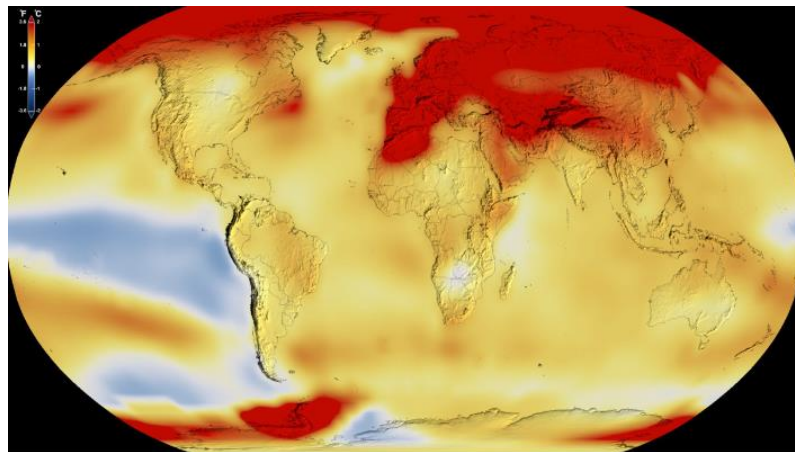
Arktik, važan za globalno energetska tržište, privlači interes vanjskih aktera poput Kine, koja ulaže u infrastrukturu i pomorske putove. Međunarodni odnosi u regiji su kompleksni, kombinirajući suradnju i natjecanje, osobito između Rusije i zapadnih zemalja. Arktičko vijeće, iako bez regulatornih ovlasti, pruža forum za dijalog i suradnju, olakšavajući postizanje konsenzusa o sigurnosnim standardima i zaštiti okoliša.

Sigurnost plovidbe na Arktiku je prioritet zbog ekstremnih uvjeta. Arktičko vijeće naglašava važnost razvoja infrastrukture i održivosti, uključujući smanjenje emisija stakleničkih plinova i onečišćenja. Iako ne donosi obvezujuće propise, Vijeće postavlja smjernice koje države mogu usvojiti, doprinosi učinkovitoj regulaciji i zaštiti okoliša.

4. KLIMATSKE PROMJENE I NJIHOV UTJECAJ NA PLOVIDBU PREKO ARKTIKA

Klimatske promjene pogađaju cijeli planet, ali njihov utjecaj je daleko izraženiji u Arktičkoj regiji koja obuhvaća sjeverna mora i zemlje oko Arktičkog oceana. Arktik se zagrijava dvostruko do čak četiri puta brže od globalnog prosjeka, što je posljedica interakcije

nekoliko faktora specifičnih za ovu regiju. Konkretno, globalne temperature su se od predindustrijskog razdoblja povećale za otprilike 1,2 °C, dok su temperature u Arktiku porasle za oko 2,5 °C do 4 °C ili više. Ove promjene temperature nisu uniforme, nego variraju ovisno o specifičnim lokacijama i godišnjim dobima. Oceanske i atmosferske struje igraju ključnu ulogu u prijenosu topline prema Arktiku. Toplije oceanske struje, poput Atlantske meridionalne cirkulacije (AMOC), dovode toplu vodu u Arktički ocean, što dodatno destabilizira ledeni pokrivač. Ove promjene utječu na raspodjelu topline i dodatno pogoršavaju učinke klimatskih promjena u Arktičkoj regiji. Uz to, Tropske oluje značajno utječu na Arktik jer prenose toplinu s ekvatorske površine na više slojeve atmosfere. Ova toplina se zatim prenosi do Arktika globalnim vjetrovima, što rezultira hlađenjem ekvatora i istodobnim zagrijavanjem Arktika. U 2022. godini, prosječne temperature značajno su se lokalno razlikovale u odnosu na prosjeke iz razdoblja 1951. do 1980. godine, što pokazuje slika 12. Iako je globalna temperaturna anomalija za tu godinu iznosila oko 0,9 °C, Arktik je bio otprilike 2 °C topliji (Schracktrainingcenter, 2024.).



Credit: Global Temperature Anomalies from 1880 to 2022, NASA Scientific Visualization Studio^[4]

Slika 12. Temperaturna anomalija za 2022. u odnosu na prosjek za razdoblje 1951. – 1980.

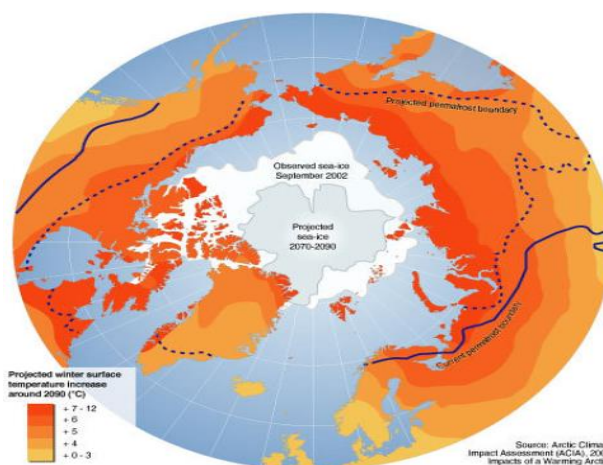
Izvor: URL 11

Prirodni mehanizam AMOC, kao veliki "oceanski transporter", predstavlja jedan od najvažnijih sustava oceanske cirkulacije na svijetu. Ova kompleksna mreža morskih struja ima ključnu ulogu u regulaciji klimatskih uvjeta na Zemlji, a posebno u područjima Sjeverne Amerike i Europe. Djeluje tako da toplije vode iz ekvatorijalnih krajeva kreću prema sjeveru, gdje se postupno hlade i postaju gušće. Kada voda dođe do sjevernih područja, posebno oko Grenlanda i Arktika, ona tone zbog povećane gustoće, stvarajući duboke oceanske struje koje vraćaju hladniju vodu prema jugu. Ovaj ciklus toplih površinskih i hladnih dubokih struja stvara

kružni sustav koji regulira prijenos topline u Atlantskom oceanu, a taj proces značajno utječe na klimatske obrasce diljem svijeta.

Klimatske promjene značajno utječu na stabilnost i snagu AMOC-a. Kako globalne temperature rastu, otapanje polarnih ledenih pokrova, posebno na Grenlandu, uzrokuje povećani dotok slatke vode u sjeverni Atlantski ocean. Slatka voda je manje gusta od slane vode, što može oslabiti proces tonjenja hladne vode na sjeveru. Prosječna gustoća slane vode (morske vode) je oko $1,025 \text{ g/cm}^3$, te je gušća zbog prisutnosti otopljenih soli, prvenstveno natrijevog klorida (NaCl), kao i drugih minerala. Gustoća slatke vode je oko $1,000 \text{ g/cm}^3$ pri standardnim uvjetima ($0 \text{ }^\circ\text{C}$), te se njena fizička karakteristika (gustoća) smanjuje pri zagrijavanju. Ovo slabljenje ključnog mehanizma može usporiti ili destabilizirati AMOC, čime bi se smanjio kapacitet prijenosa topline prema sjevernim geografskim širinama. Na primjer, smanjenje toplinskog prijenosa prema Europi moglo bi dovesti do oštrijih zimskih uvjeta u tom dijelu svijeta, dok bi regije u tropskom pojasu mogle doživjeti ekstremnije toplinske valove i suše. S manje topline koja bi se prenijela prema Europi, Arktička regija bi akumulirala više topline, što bi dodatno pogoršalo problem otapanja morskog leda i permafrosta. Osim toga mogao bi se smanjiti kapacitet oceana za skladištenje ugljika, što bi dodatno pogoršalo emisije stakleničkih plinova u atmosferi.

Slika 13., prikazuje prosjek scenarija iz „Procjene utjecaja klimatskih promjena na Arktik (ACIA)“ za godinu 2090., uključujući površinske temperature na kopnu, veličinu polarnih ledenih kapa i vanjske granice permafrosta.

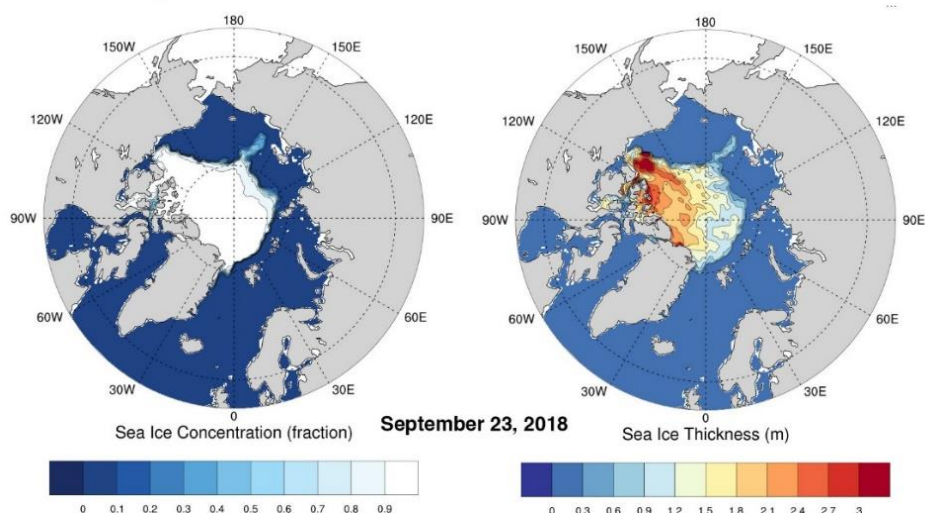


Slika 13. Predviđene promjene u arktičkoj klimi, 2090.

Sezonske promjene pokrivenosti ledom utječu na plovidbu LNG brodova. Tijekom ljetnog i jesenskog perioda topljenje leda otvara nove, kraće putanje za transport LNG-a, što je ključno za globalno tržište. No, promjenjivi vremenski uvjeti i nestabilnost leda predstavljaju značajne izazove, što zahtijeva napredne metode za predviđanje brzine plovidbe u otežanim uvjetima (Tarovik, 2024). Otapanje arktičkog leda omogućava pristup ranije nepristupačnim područjima preko plovidbenih ruta poput NSR, NWP i TSR koje postaju važnije za globalnu trgovinu omogućujući veći gospodarski potencijal, uključujući transport LNG-a, te tako čineći Arktik privlačnom opcijom za prijevoz ovog ključnog energenata u globalnoj energetske tranziciji budući da međunarodni brodski promet čini oko 90% svjetske trgovine (Gogoleva i sur., 2023).

Klimatske promjene mijenjaju prometne rute na Arktiku, postavljajući ekološke izazove, posebno kod transporta LNG-a. Eksploatacija i transport mogu ugroziti staništa životinja, poput medvjeda i tuljana, te uzrokovati zagađenje mora i zraka, čime se narušava kvaliteta ekosustava i narušavanja migracijske putanje morskih sisavaca (Vander-Zwaag i sur., 1990). Infrastruktura potrebna za ove aktivnosti može dodatno opteretiti resurse i izazvati sukobe s lokalnim zajednicama koje ovise o okolišu. Regulacija arktičke navigacije unutar međunarodnih propisa, poput ranije spomenutih UNCLOS-a i Polarnog kodeksa, ističe važnost usklađivanja komercijalnih interesa s očuvanjem okoliša (Chircop i sur., 2020).

Plovidba ovim područjem nosi značajne rizike za osjetljive ekosustave pod pritiskom klimatskih promjena. Prema Kettleu (2024), razumijevanje ekonomskih i zdravstvenih rizika podržava zaštitne mjere, što je ključno za politiku koja minimizira negativne učinke. Svalbardski ugovor ilustrira kompleksnost regulacije, koja se mora prilagoditi novim izazovima, poput očuvanja okoliša (Chuffart, 2024). To zahtijeva prilagodbu postojećih pravila i stručnost u upravljanju resursima radi održivosti arktičkog ekosustava.



Slika 14. Prikaz ljetnog razdoblja Arktičkog područja 2018. godine

Izvor: URL 13

4.1. Uloga autohtonih zajednica i strategije za održivu plovidbu u Arktiku

Na području Arktika živi više od dvadeset autohtonih naroda, čija imena ovise o regiji u kojoj borave. Među njima su Inuiti (Polarni Eskimi), Thule, Neneci (arktici nomadi) te Laponci (Sami) – arktički narod Europe. Budućnost autohtonih naroda Arktika suočava se s velikim izazovima uslijed globalnog zatopljenja. Smanjenje debljine leda otežava život Inuitima i drugim narodima koji ovise o ledu za lov i transport lovine. Klimatske promjene dodatno otežavaju lov, a otapanje tzv. vječnog leda „permafrosta“ oslobađa bakterije koje su bile zarobljene desecima do stotinama tisuća godina, dok se dublji slojevi u nekim regijama smatraju starima čak i milijunima godina. Prije nekoliko godina, otopljeni permafrost izazvao je masovni pomor sobova zbog bakterija koje su uzrokovale davno izumrlu sobovsku kugu. U nekim slučajevima, ljudi su gubili do 200 sobova u jednoj noći, a cijela stada su nestajala, što je mnoge prisililo da se preselu u gradove u potrazi za poslom.



Slika 15. Prikaz stanovništva Arktika (Izvor: Davor Rostuhar)

Izvor: URL 14

Ljudske aktivnosti dodatno utječu na krhke arktičke ekosustave, omogućujući nove pomorske rute. Time se povećava plovidba i eksploatacija prirodnih resursa, ali se također donosu rizici poput onečišćenja i nesreća. Iako neka naselja u SAD-u i Kanadi unutar arktičkog kruga bilježe rast stanovništva u gradovima, ukupna populacija autohtonih naroda Arktika opada. Svake godine količina leda na Arktiku se smanjuje, što dovodi do smanjenja polarnih staništa i sve manje prisutnosti autohtonih zajednica koje se bave tradicionalnim djelatnostima.

Autohtone zajednice igraju ključnu ulogu u očuvanju okoliša na Arktiku, koji je suočen s klimatskim promjenama i ljudskom aktivnošću. Njihovo znanje o ekosustavu i prakse održivog upravljanja resursima mogu doprinijeti očuvanju bioraznolikosti, te njihovo uključivanje o donošenje odluke uz suradnju država i zainteresiranih strana može bitno doprinijeti zaštiti baštine i okoliša (Kraska, 2014).

U sjevernom Beringovom i Čukotskom moru, razne vrste riba se pod utjecajem promjena temperature i smanjivanja zooplanktona čime se smanjuje dostupnost hrane za ribe šire prema sjeveru. Nadalje, polarni medvjedi, koji ovise o morskom ledu za lov i razmnožavanje, također se pod istim utjecajem suočavaju s ozbiljnim prijetnjama. Dulja razdoblja bez leda povećavaju njihove energetske potrebe i smanjuju reproduktivni uspjeh. Istraživanja pokazuju da produžena razdoblja bez leda povećavaju kretanje medvjeda, što dodatno ugrožava njihovo preživljavanje (Duah, 2024).



Slika 16. Polarni medvjedi - Fotografija Unsplash, Hans Jurgen Mager

Izvor: URL 15

Prema istraživanju o gubitku teritorija u ruskom Arktiku, erozija obale pod utjecajem otapanja leda može iznositi 2 do 3 m godišnje, što će imati velike ekonomske posljedice za lokalne zajednice (Ogorodov i sur., 2023).

Raznovrstan životinjski svijet na kopnu Arktika i povezanost brojnih otočja ledom rezultirali su naseljenosti Arktika još od prapovijesti. Dok Antarktika službeno nema stalne stanovnike, najjužniji kontinent naseljavaju istraživači i prateće osoblje tijekom cijele godine. Broj ljudi na Antarktici varira između oko 1000 zimi (u lipnju) i 4000 ljeti (u prosincu). U usporedbi s tim, ukupna populacija stalnog stanovništva Arktika prelazi četiri milijuna ljudi. Bogatstvo života na moru i kopnu pruža ključne resurse za preživljavanje i napredak lokalnih zajednica. Arktik obuhvaća različita naselja, od malih industrijaliziranih gradova do brojnih sela i nomadskih zajednica. Neki narodi su uslijed intenzivnog izlovljavanja riba iz mora doveli određene vrste do ruba istrebljenja, što je dovelo do uvođenja mjera zaštite. Danas je jedina ugrožena vrsta grenlandski kit (lat. *Balaena mysticetus*). Tradicionalno stanovništvo koristi određene životinje za izradu odjeće i obuće, prehranu, te za izradu alata i materijala u svakodnevnom životu. (KEK, 2003).

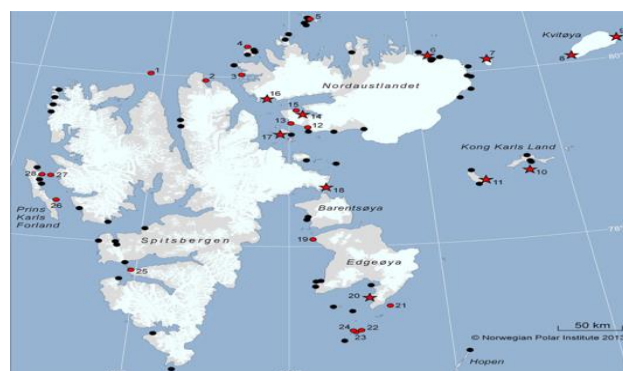
Povijest plovidbe arktičkim vodama seže tisućama godina unatrag, kada su plemena koristila more za ribolov i trgovinu. Europske sile su tijekom istraživačkog doba tražile nove trgovačke putove prema Aziji, a istraživači poput Nansena i Amundsena su se suočavali s izazovima leda i ekstremnih temperatura. S razvojem tehnologije, plovidba se promijenila, a klimatske promjene sada brzo otvaraju nove pomorske rute, no s velikim ekološkim rizicima. Komercijalna plovidba postaje sve češća, što izaziva sukob između gospodarskih interesa i

zaštite arktičkog ekosustava. Za održivu budućnost plovidbe, nužna je internacionalna suradnja i razvoj strategija koje balansiraju ekološku sigurnost i gospodarske interese.

4.2. Obrazovanje, etika i prilagodba u polarnoj regiji Arktika

Povećane temperature i topljenje leda zahtijevaju sustavno obrazovanje i javno osvješćivanje. Ekstremni vremenski uvjeti, poput snažne snježne oluje „blizzarda“ koja se karakterizira izuzetno jakim vjetrovima, gustim padalinama i izrazito niskim temperaturama pokazuju potrebu za pripravnosću zajednica. Tijekom „blizzarda“, snijeg može smanjiti vidljivost na minimum, često na manje od 400 metara, a jaki vjetrovi dodatno pogoršavaju uvjete stvarajući snježne nanose i zimske oluje. Ovi uvjeti mogu biti opasni za promet, infrastrukturu i ljude, posebno u područjima gdje su blizzardi česti, poput Arktika. Na primjer, zimska sezona 2021./22. u Clyde Riveru, Kanada imala je 33 dana mećave, što ističe potrebu za strategijama brzog djelovanja (Grigorieva, 2024). Zbog toga je integracija lokalnog znanja, osobito od autohtonih naroda, u izradu planova ključna za učinkovitu prilagodbu s obzirom da se očekuje kako bi do 2040. godine plovidba Arktikom bila moguća tokom većine godine (Fox i sur., 2023; K. Y. Ng i sur., 2015).

Zahtjeva se i preispitivanje etičkih imperativa ove osjetljive regije. Otvaranje novih plovnih putova i zastarijevanje tradicionalnih navigacijskih praksi čine nužnim razumijevanje utjecaja tih promjena na ekosustav i lokalne zajednice. Primjeri poput promjena u upravljanju Svalbardom, koje uključuju preusmjeravanje s eksploatacije resursa na očuvanje okoliša, pomažu nam u razumijevanju kako klimatske promjene oblikuju etičke okvire navigacije (Chuffart, 2024).



Slika 17. Karta koja prikazuje sva registrirana mjesta okupljanja morževa na Svalbardu. Mjesta označena crvenom bojom bila su zauzeta tijekom jedne ili obje zračne ankete provedene 2006. godine (prema Lydersen i sur., 2008.) i istraživanje 2012. godine. Zvezdice označavaju mjesta na kojima su bila prisutna mlada mladunčad tijekom jedne od anketa.

Izvor: URL 16

Polarni krajevi često se doimaju kao negostoljubiva područja većini svjetskog stanovništva. Život u tim krajevima uglavnom se svodi na preživljavanje kroz nomadsko stočarenje, lov i ribolov. Budući da ovi krajevi nemaju povoljne klimatske uvjete za poljoprivredu, ljudi su potpuno ovisni o životinjama koje naseljavaju ta područja. Istraživanja pokazuju da je Arktik bio naseljen još od gornjeg paleolitika (40.000 – 10.000 godina pr. Kr.), u vrijeme kada poljoprivreda nije bila razvijena. Autohtoni narodi Arktik smatraju prirodnim bogatstvom, poštuju ga i zahvalni su što žive u tom kraju koji im je poznat kroz generacije. Arktički okoliš uključuje nekoliko različitih zona, pri čemu je najvažnija granica između šuma i tundre. Od šuma prema obali Arktika protežu se područja prekrivena tundrom, dok dalje na sjeveru nema vegetacije, a krajolik čine samo more i morski led (KEK, 2003).

4.3. Arktik na prekretnici i nadolazeća opasnost potpunog nestanka leda

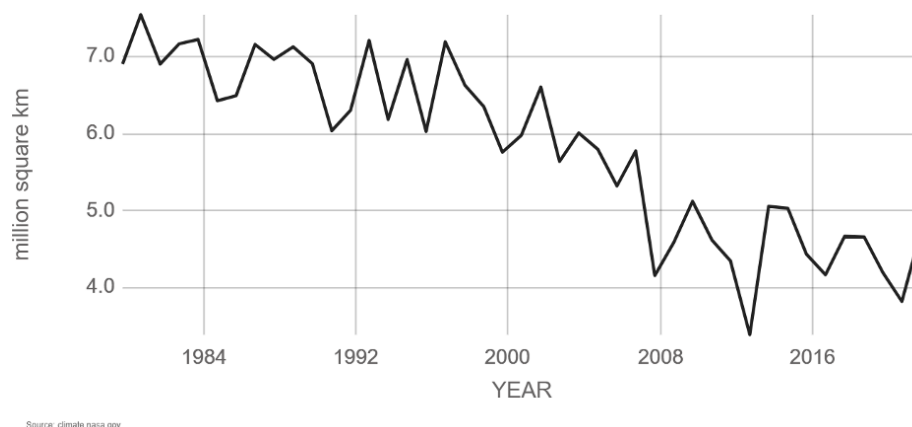
Klimatske promjene uzrokuju dugotrajne promjene u obrascima vremena, uključujući povećanje temperature, promjene u oborinama i porast razine mora. Glavni uzrok leži u emisijama stakleničkih plinova uslijed sagorijevanja fosilnih goriva i krčenje šuma. Ove promjene, globalne po prirodi, utječu na cijeli planet i imaju dalekosežne posljedice, uključujući navigaciju kroz Arktik. Topljenje ledenjaka stvara nove plovne rute, što može promijeniti trgovačke putove, ali povećava rizik od prirodnih katastrofa (Lemke i sur., 2011). Za uspješnu navigaciju, nužno je razviti strategije koje balansiraju ekološku sigurnost i gospodarske interese, uz suradnju među državama i napredak u tehnologiji.

Trenutačno stanje arktičkog leda i dalje je predmet aktivnog istraživanja i promatranja, a znanstvenici širom svijeta nastavljaju proučavati složene procese koji utječu na njegovo otapanje i obnovu. Ovo nas podsjeća da su klimatske promjene dinamičan fenomen i da je potrebno stalno prikupljanje podataka i prilagodba modela kako bismo što bolje razumjeli buduće promjene i donijeli informirane odluke.

Posljednja istraživanja pokazuju da Arktik prolazi kroz dramatične klimatske promjene, koje bi mogle zauvijek promijeniti ovaj krhki ekosustav. Britanska javna radiotelevizijska kuća BBC (engl. British Broadcasting Corporation), osnovana 1922. godine te ujedno prepoznatljiva kao jedan od najstarijih i najpoznatijih medijskih servisa na svijetu, poznat po svojoj nepristranoj novinarskoj praksi i širokom spektru programskih sadržaja je 2009. godine objavio reportažu o Arktiku u kojoj je sudjelovao ugledni polarni znanstvenik Peter Wadhams sa Sveučilišta Cambridge, a koju je organizirao Jim McNeill, britanski istraživač i stručnjak za preživljavanje u ekstremnim uvjetima. Katlinska arktička ekspedicija, usmjerena na

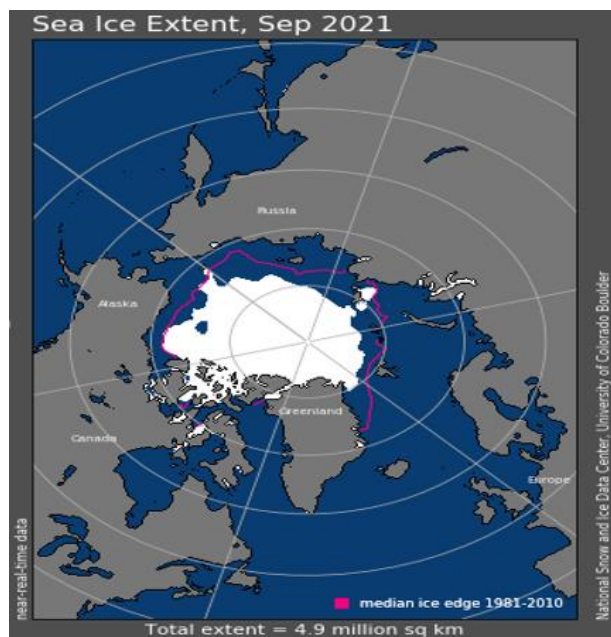
pronalaženje odgovora na ključna znanstvena pitanja o morskom ledu na Arktiku, trajala je nekoliko tjedana te se nedavno vratila sa svojim rezultatima. Glavna svrha ekspedicije bila je utvrditi koliko dugo će zagrijavanje planeta omogućiti da Arktik zadrži cjelogodišnji ledeni pokrivač: koliko vremena je preostalo do nestanka arktičkog leda?. Inače, prva takva istraživačka ekspedicija održana je 2013. godine.

Prema Wadhamsu, koji Arktik proučava još od 1970-ih, rezultati su bili zabrinjavajući. Istraživanje je pokazalo da bi se, prema novom znanstvenom konsenzusu, ubrzano otapanje morskog leda moglo pretvoriti Arktik u otvoreni ocean u roku od dvadeset godina, a značajan dio tog smanjenja mogao bi se dogoditi već unutar deset godina. Ranija predviđanja, koja su podržavali znanstvena literatura i Međuvladin panel za klimatske promjene (engl. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022), navodila su da bi Arktik bez leda mogao postati stvarnost tek sredinom stoljeća. Tri godine kasnije, Wadhams je prognozirao da će Arktik ostati bez leda već 2015. ili 2016. godine, opisujući te klimatske promjene kao "globalnu katastrofu". Članak koji je naveo novinara Nafeeza Ahmeda na intervju s Wadhamsom za „The Guardian“ (britanski dnevni novinski list s dugom poviješću, osnovan 1821. godine, prepoznat kao jedan od vodećih nacionalnih i međunarodnih novina), iznio je procjenu da će se arktički led otopiti unutar 30 godina. Međutim, to je predviđanje u medijima pogrešno preneseno, te je vrijeme smanjeno za red veličine.



Slika 18. Predviđanje znanstvenika Peter Wadhams sa Sveučilišta Cambridge

Izvor: URL 17



Slika 19. Usporedba granica leda 1981.-2010. godine s današnjom situacijom

Izvor: URL 17

4.4. Smanjenje ledenih pokrova, promjena albeda i globalne posljedice

Klimatske promjene predstavljaju jedan od najvažnijih izazova današnjice, sa snažnim i dalekosežnim učincima na različite dijelove svijeta. Posebno su izražene na Arktiku, regiji koja obuhvaća sjeverne dijelove Zemlje oko Sjevernog pola, gdje se odvijaju jedne od najbržih i najdrastičnijih klimatskih promjena na planetu. Arktik je ključan za razumijevanje globalnih klimatskih promjena zbog svog značajnog utjecaja na globalne vremenske obrasce, razinu mora i ekosustave. U ovom radu istražuje se kako klimatske promjene utječu na Arktik, uključujući promjene u ledenim pločama i ledenjacima, topljenje permafrostnog tla, promjene u ekosustavima te utjecaje na ljudske aktivnosti. Uspon temperature na ovom vitalnom djelu planeta Zemlje dramatično utječe na morski led, smanjujući njegov obujam i utječući na sigurnost plovidbe. Istraživanja pokazuju da se temperature u Arktiku povećavaju gotovo dvostruko brže od svjetskog prosjeka (ACIA, 2004).

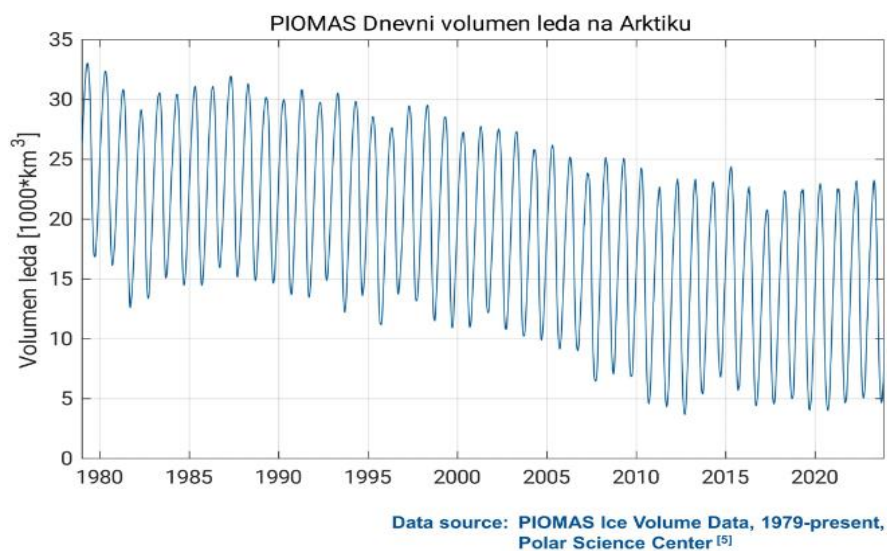


Slika 20. Arktičke zone permafrosta. Može biti različite dubine, od nekoliko metara do više stotina metara

Izvor: URL 8

Brzo zagrijavanje Arktika uzrokuje dramatične promjene u regiji, uključujući smanjenje ledenog pokrivača, promjene u obrascima padalina i porast temperatura. Ovaj fenomen, poznat kao "Arktičko pojačanje", ima dalekosežne posljedice na okoliš, pomorske rute i eksploataciju resursa. Ovo ubrzano zagrijavanje dovodi do niza drugih promjena u regiji koje imaju globalne posljedice. Jedan od najočitijih učinaka klimatskih promjena u Arktiku je značajan porast temperatura. Znanstveni podaci pokazuju da se prosječna temperatura u Arktiku povećava brže od globalnog prosjeka. Prema podacima Arktičkog izvještaja, prosječna temperatura u regiji raste otprilike dvostruko brže od globalne prosječne temperature. Ovaj fenomen ima brojne posljedice, uključujući povećanje brzine topljenja leda, promjene u vegetaciji i promjene u obrascima migracije životinja. Ledeni pokrov Arktika, koji uključuje polarni led i ledene ploče, igra ključnu ulogu u reguliranju globalne klime. Ova komponenta klimatskog sustava značajno doprinosi stabilizaciji temperature Zemlje, a smanjenje arktičkog leda u posljednjim desetljećima donosi duboke promjene s dalekosežnim posljedicama na globalni klimatski sustav. Arktički led, uključujući polarni led i ledene ploče poput Grenlandske ledene ploče, služi kao važan regulator temperature Zemlje. Ove ledene mase reflektiraju sunčevu svjetlost i smanjuju količinu topline koja se apsorbira u oceanima i kopnenim površinama. Reflektivnost ili albedo arktičkog leda pomaže u održavanju niskih temperatura u Arktiku, čime se doprinosi globalnoj klimatskoj ravnoteži. Satelitska opažanja u posljednjim desetljećima otkrivaju da se površina arktičkog morskog leda smanjuje brže nego ikad prije. Između 1979. i 2022. godine, prosječna površina morskog leda u ljetnim mjesecima smanjena je za oko 40%. Ovaj pad ima

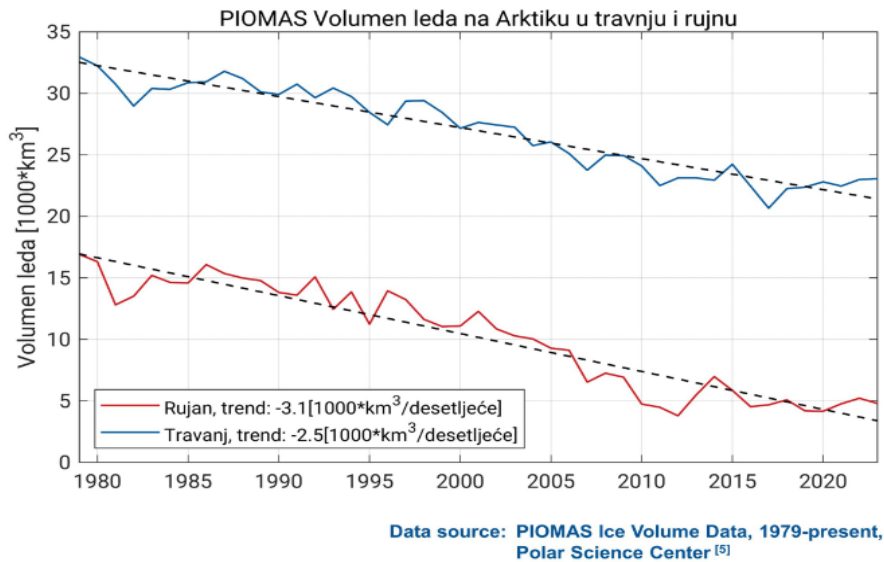
značajne posljedice za globalni klimatski sustav. Smanjenje leda znači da se površina oceana koja je prije bila prekrivena ledom sada izlaže sunčevoj svjetlosti, što povećava apsorpciju topline. Ovaj fenomen poznat je kao "pozitivna povratna veza" (engl. positive feedback) odnosno tzv. albedo učinak i doprinosi globalnom zagrijavanju. Albedo je ključan za razumijevanje utjecaja smanjenja arktičkog leda na globalnu klimu. Albedo (latinski: "bjelina") se odnosi na sposobnost površine da reflektira sunčevu svjetlost. To je mjera koja pokazuje omjer između primljene i reflektirane (odbijene) svjetlosti. (Morten i sur., 2023). Porastom temperatura te time smanjivanjem ledenog pokrova, površina oceana postaje tamnija i preuzima reflektivnost, te apsorbira više sunčeve energije. To dovodi do daljnjeg zagrijavanja i dodatnog smanjenja leda, što stvara povratni ciklus koja ubrzava proces otapanja, a time i zagrijavanja atmosfere. Uz to, albedo učinci nisu ujednačeni tijekom godine; zimi, bijeli led reflektira većinu sunčeve svjetlosti, dok ljeti tamnije površine povećavaju apsorpciju solarne energije.



Slika 21. PIOMAS Dnevni volumen leda na Arktiku u razdoblju od 1979. do 2023.

Izvor: URL 11

Volumen leda na Arktiku, koji se mjeri svakodnevno od 1. siječnja 1979. do 31. listopada 2023., pokazuje opadajući trend, što je prikazano na slici 21. Ipak, svake godine Arktik prolazi kroz ciklus akumulacije leda tijekom zime i topljenja leda tijekom ljeta. Stoga su na slici 21. vidljive godišnje fluktuacije. U travnju svake godine razina leda na Arktiku dostiže svoj godišnji maksimum, dok se u rujnu bilježi godišnji minimum (Schracktrainingcenter, 2024.).

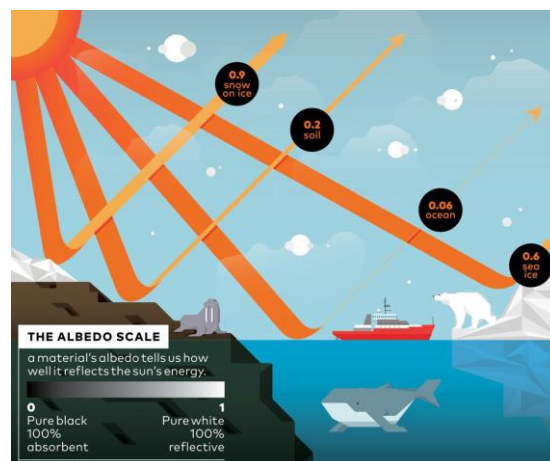
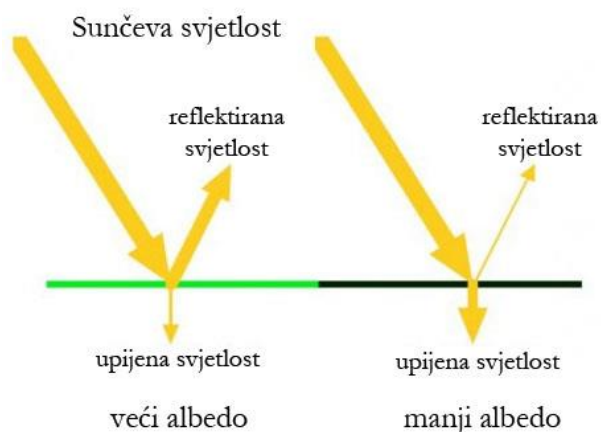


Slika 22. PIOMAS Volumen leda na Arktiku u travnju i rujnu u razdoblju od 1979. do 2023.

Izvor: URL 11

Kada se prikažu samo mjesečne vrijednosti volumena leda za travanj i rujnu u razdoblju od 1979. do 2023. godine, može se primijetiti trend smanjenja leda na Arktiku, što je ilustrirano na slici 22. Linarnom ekstrapolacijom temeljenom na podacima s grafa iz slike 22. može se doći do zaključka da bi za 10 godina u rujnu moglo doći do potpunog nestanka leda na Arktiku. S druge strane, moglo bi se pretpostaviti da će led u travnju ostati prisutan barem tijekom ovog stoljeća. Međutim, zbog velike promjenjivosti klimatskih procesa i ovisnosti klimatskih promjena o budućim emisijama stakleničkih plinova, predviđanje nestanka leda na Arktiku nije jednostavno (Schracktrainingcenter, 2024.).

Albedo se može kretati između 0 i 1, gdje 0 označava da je sva primljena svjetlost apsorbirana, dok 1 znači da je sva primljena svjetlost reflektirana. Dakle, potpuno bijelo tijelo, koje reflektira svu svjetlost, ima albedo od 1, dok apsolutno crno tijelo, koje ne reflektira nikakvu svjetlost, ima albedo od 0. U praksi, albedo se češće izražava u postocima. Tako, potpuno bijelo tijelo ima albedo od 100 %, dok crno tijelo ima albedo od 0 %. Ako se kaže da tijelo ima albedo od 50 %, to znači da ono reflektira polovinu primljene svjetlosti. (STEM, 2023). Ledene površine imaju visoki albedo, što znači da odražavaju većinu sunčeve svjetlosti natrag u svemir.



Slika 23.1 i 23.2. Prikaz Albedo učinka

Izvor: URL 18

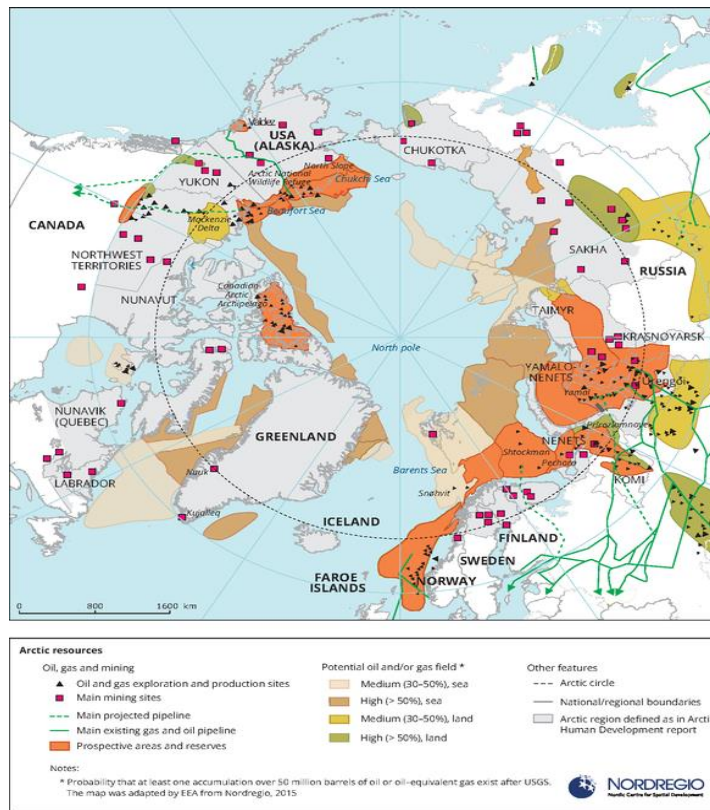
Jedan od najznačajnijih primjera smanjenja arktičkog leda je drastična promjena u površini arktičkog morskog leda tijekom ljetnih mjeseci. Podaci iz NASA-e pokazuju da je minimalna površina morskog leda u ljeto 2012. godine bila najniža otkako se počelo pratiti satelitskim mjerenjima. Tada je površina leda pala na 3,4 milijuna kvadratnih kilometara, što je otprilike 50% manje u usporedbi s prosjekom iz 1980-ih godina. Ovaj dramatičan pad odražava brzinu i intenzitet promjena koje se odvijaju u Arktiku. Osim promjene u površini, smanjenje volumena leda je također značajno. Debljina arktičkog leda smanjena je za više od 60% od 1970-ih godina. Ovaj gubitak volumena leda doprinosi porastu razine mora jer otopljeni led povećava količinu vode u oceanima. Smanjenje arktičkog leda ima utjecaj na globalne klimatske obrasce na nekoliko načina. Prvo, promjene u albedu mogu utjecati na globalne temperature, jer povećana apsorpcija topline u Arktiku može izazvati promjene u cirkulaciji atmosfere. Ovo može dovesti do promjena u vremenskim obrascima i intenziviranju ekstremnih vremenskih događaja, kao što su oluje i poplave u različitim dijelovima svijeta. Drugo, smanjenje leda utječe na obrasce morskih struja. Ledene ploče i polarna voda igraju ključnu ulogu u reguliranju morskih struja koje prenose toplinu između ekvatora i polova. Promjene u arktičkom ledu mogu uzrokovati promjene u ovim strujama, što može imati posljedice na klimatske uvjete u regijama koje nisu izravno povezane s Arktikom. Treće, otapanje arktičkog leda može uzrokovati oslobađanje metana iz permafrostnog tla. Metan je staklenički plin s mnogo većim potencijalom za zagrijavanje u usporedbi s ugljičnim dioksidom. Oslobađanje metana iz permafrostnog tla može dodatno pogoršati globalno zagrijavanje i stvoriti dodatne izazove za regulaciju klime. Kako bi se ublažili učinci smanjenja arktičkog leda na globalnu klimu, nužno je poduzeti mjere za smanjenje emisija stakleničkih plinova i očuvanje ledenih

pokrova. Međunarodni sporazumi, poput Pariškog sporazuma, postavljaju ciljeve za smanjenje globalnih emisija i usmjeravaju napore prema održivom razvoju. Također je važno istraživati i primjenjivati nove tehnologije za smanjenje emisija metana i drugih stakleničkih plinova kako bi se ublažili učinci klimatskih promjena. Povećanje svijesti o važnosti arktičkog leda i njegovom utjecaju na globalnu klimu također je ključno. Podizanje svijesti među građanima i donositeljima odluka može potaknuti podršku za klimatske politike i akcije koje su potrebne za zaštitu arktičkog leda i globalnog klimatskog sustava (Grigorieva, 2024).

4.5. Utjecaj klimatskih promjena Arktičkog područja na eksploataciju prirodnih resursa

Klimatske promjene imaju značajan utjecaj na prometne tokove i prirodne resurse u Arktiku. Smanjenje arktičkog leda otvara nove pomorske rute, dok istovremeno čini dostupnijima bogate resurse ove regije. Otvaranje ovih ruta donosi mnoge prednosti, uključujući smanjenje troškova i vremena transporta. Međutim, također stvara izazove u pogledu navigacije, sigurnosti i zaštite okoliša. Smanjeni ledeni pokrov može povećati opasnost od nezgoda zbog nepredvidljivih uvjeta i nepristupačnih područja koja još nisu dobro mapirana ili istražena. Potrebno je razviti nove navigacijske strategije i tehnologije za praćenje i upravljanje pomorskim prometom kako bi se osigurala sigurnost plovidbe i minimizirao rizik od nesreća i onečišćenja. Arktik je poznat po svojim bogatim zalihama prirodnih resursa, uključujući naftu, plin, minerale i rijetke metale. Klimatske promjene čine ove resurse dostupnijima zbog smanjenja leda koji je prije otežavao pristup tim područjima. Na primjer, u Barentsovom moru i Čukotskom moru identificirane su velike količine naftnih i plinskih resursa. Dok povećana dostupnost resursa može dovesti do gospodarskog rasta i energetske sigurnosti za mnoge zemlje, eksploatacija može imati teške ekološke posljedice poput rizika od izlivanja nafte, onečišćenje mora, i destrukciju osjetljivih arktičkih ekosustava. Također ovo najsjevernije mjesto na Zemlji sadrži bogate naslage minerala i rijetkih metala, uključujući željezo (Fe), nikal (Ni), bakar (Cu) i litij (Li). Ovi materijali su ključni za moderne tehnologije i obnovljive izvore energije. Povećana eksploatacija može potaknuti gospodarski razvoj u regiji, ali također može uzrokovati ozbiljne ekološke probleme, uključujući degradaciju tla, onečišćenje voda i poremećaje u životnoj sredini. Povećana eksploatacija tih prirodnih resursa može dovesti do sukoba među državama i korporacijama koje nastoje kontrolirati i pristupiti ovim bogatstvima. Geopolitičke napetosti i nesuglasice oko prava na eksploataciju mogu izazvati sukobe i političke tenzije u regiji. Također, ekološki problemi, kao što su onečišćenje

i uništavanje staništa, mogu imati dugoročne posljedice za arktičke ekosustave i globalnu klimu. (Copernicus Programme, 2014).



Slika 24. Područja podzemnih slojeva trenutnih i potencijalnih nalazišta prirodnog plina i nafte

Izvor: URL 19

4.6. Klima, oborine i topografske značajke Arktika: Utjecaj klimatskih promjena

Arktička klima je specifična i ekstremna, s vrlo hladnim temperaturama, dugim zimama i kratkim ljetima. Zime u Arktiku su izuzetno hladne, s temperaturama koje mogu pasti ispod -30 °C u mnogim područjima. Na primjer, u regijama poput sjeverne Aljaske i Kanade, minimalne temperature zimi često dosežu -40 °C. Ljeta su relativno blaga, s temperaturama koje rijetko prelaze 10 °C; u nekim dijelovima, kao što je sjeverni Grenland, ljetne temperature mogu biti samo oko 0-5 °C. Tijekom zime, Arktik je gotovo potpuno mračan zbog polarne noći koja može trajati i do šest mjeseci, dok ljeti uživa u polarnom danu s neprekidnim dnevnim svjetlom.

Oborine u Arktiku (tzv. „hladnoj pustinji“) predstavljaju važan aspekt njegove klime i ekosustava. Količina oborina u arktičkim regijama varira, ali u većini područja godišnje

količine oborina su relativno male, često manje od 200 mm. Na primjer, u arktičkim regijama Kanade i Aljaske, godišnje oborine mogu biti ispod 150 mm. U obalnim područjima, gdje je utjecaj oceana izraženiji, količina oborina može biti nešto veća, ali još uvijek se kreće u rasponu od 200-300 mm godišnje. Tijekom ljetnih mjeseci, oborine mogu biti nešto obilnije i češće, dok se u zimskim mjesecima snijeg najčešće akumulira. U nekim dijelovima Arktika, kao što su visoke planine ili obalna područja, snijeg može akumulirati u značajnim količinama i zadržati se na tlu i preko nekoliko mjeseci (Linke i sur., 2023).

Topografske značajke Arktika, uključujući ledene ploče, planinske lance, visoke zemlje i obalne formacije, igraju ključnu ulogu u oblikovanju regije. Topljenje ledenih ploča i ledenjaka dovodi do promjena u razini mora i terenskim karakteristikama, što uzrokuje povećanje poplava, eroziju obala i promjene u ekosustavima. Osim toga, mijenjaju se obrasci oborina, što dodatno utječe na topografske značajke, poput fjordova i obalnih područja. Grenlandska ledena ploča, koja pokriva oko 1.710.000 kvadratnih kilometara, najvažnija je ledena masa u Arktiku i značajno utječe na globalni klimatski sustav. Ova ledena ploča sadrži oko 10% svjetske slatkovodne leda i njezino topljenje doprinosi globalnom porastu razine mora, što može imati ozbiljne posljedice za obalne regije širom svijeta.

Znanstvenici predviđaju da bi se razina mora mogla podići za više od 7 metara ako se sav led na Grenlandu otopi, što bi moglo potopiti mnoge obalne gradove. Osim Grenlandske ledene ploče, Arktik se odlikuje brojnim manjim ledenjacima i ledenim kapama, primjerice na Aljasci i sjevernim dijelovima Kanade, koji također imaju značajan utjecaj na lokalne klimatske uvjete. Ovi manji ledenjaci reguliraju protok rijeka i lokalne vodene resurse, te pružaju specifična staništa za mnoge vrste (Linke i sur., 2023).



Slika 25. Ljetni arktički led smanjio se za 13% svakog desetljeća otkako su satelitski podaci započeli 1979. godine. (Izvor: Dirk Notz/AP)

Izvor: URL 20

4.7. Evolucija klime kroz geološku povijest Zemlje

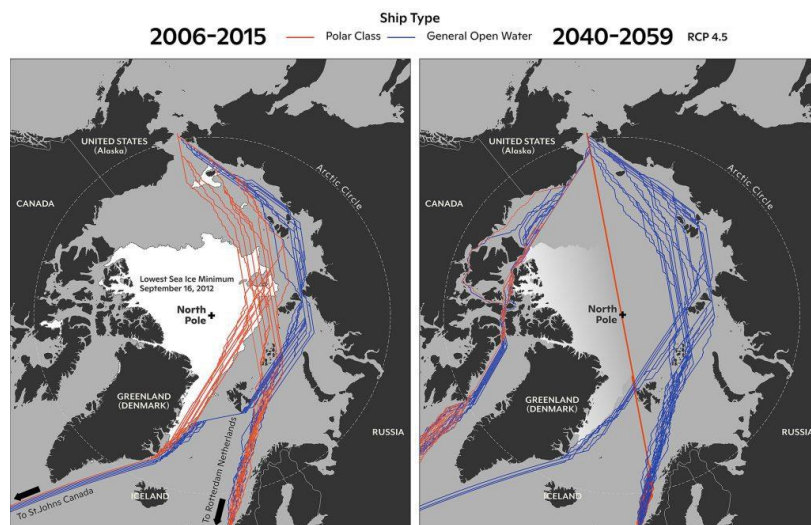
Holocenska (Holocen - geološko razdoblje koje je započelo prije otprilike 11.700 godina i još uvijek traje) toplina prije 7.5 do 4.5 tisuća godina pokazala je povećanje produktivnosti i smanjenje leda, što ukazuje na stalne promjene u okolišu. Analize poput onih provedenih na jezeru „Lake 578“ u Grenlandu otkrivaju značajne tranzicije u ekosustavu, kao što su anoksija i stratifikacija, što dodatno komplicira predviđanja o budućem stanju morskog leda (Schneider i sur., 2024).

Klimatske fluktuacije kroz povijest, poput onih tijekom kvaternara, oblikovale su populacije različitih vrsta kao što su reindeer i tornjasta breza. Kvaternar je geološko razdoblje koje obuhvaća posljednjih približno 2.6 milijuna godina i traje do danas a dijeli se na Pleistocen (oko 2.6 milijuna do 11.700 godina prije sadašnjosti) i poznat je po čestim ledenim dobima, te na gore navedeni Holocen (od oko 11.700 godina prije sadašnjosti do danas) odnosno trenutni period unutar kvaternara koji je započeo nakon posljednjeg ledenog doba i karakterizira ga stabilizacija klime.

4.8. Promjene u Arktičkom morskom ledu

U razvijanju razumijevanja promjena u Arktičkom morskom ledu, važno je osvježiti uspomene na njegovu povijest i značaj. Tijekom posljednjih desetljeća, Arktički morski led je doživio dramatične promjene, koje su dovele do smanjenja površine i debljine leda. Ove promjene su rezultat povećanja globalnog zatopljenja, koje je uzrokovano povećanjem emisije stakleničkih plinova. Povijesno gledano, morski led je imao ključnu ulogu u ekosustavima sjevernih mora, poslužujući kao stanište mnogih vrsta, uključujući medvjede, tuljane i razne morske ptice. Proučavanje prošlih obrazaca može pomoći znanstvenicima u predviđanju budućih scenarija i razumijevanju potencijalnih posljedica. Danas se situacija s Arktičkim morskim ledom smatra jednim od najbitnijih pitanja povezanih s klimatskim promjenama. Smanjanjem leda, povećava se i otvorena vodena površina, što dovodi do povećanog zagrijavanja oceana, stvarajući tako povratni ciklus koji dodatno ubrzava otapanje. Prema podacima Nacionalne uprave za zrakoplovstvo i svemir (engl. National Aeronautics and Space Administration, NASA) sa sjedištem u Washington, D.C., Sjedinjene Američke Države, površina ljetnog morskog leda smanjila se za više od 40% od 1979. godine. Ova situacija ne samo da ugrožava lokalne ekosustave, nego također utječe na globalne klimatske obrasce, razinu mora i vremenske uvjete. Gledajući prema budućnosti, potreba za proaktivnim pristupom i održivim planiranjem postaje sve važnija. Stručnjaci predlažu intenzivniju globalnu suradnju

u istraživanju i zaštiti Arktičkog mora, kao i jačanje zakonodavstva koja reguliraju korištenje prirodnih resursa u tom području. Povećane investicije u obnovljive izvore energije i smanjenje emisije stakleničkih plinova ključni su koraci ka umanjivanju negativnih učinaka klimatskih promjena. Edukacija i javna svijest također igraju značajnu ulogu u mobilizaciji zajednica i potpori politikama održivog razvoja. Budućnost Arktičkog morskog leda ovisi o kolektivnim naporima na globalnoj razini, a pravi odgovor na ovu krizu bit će od presudne važnosti za cijeli planet.



Slika 26. Model pomorskog prometa u Arktičkom oceanu (Smith i Stephenson 2013) predviđa trgovačke rute koje će se otvoriti kako se morski led smanjuje sredinom 21. stoljeća, s polarnim brodovima koji su ojačani za led (narančasti) prema Međunarodnoj asocijaciji klasifikacijskih društava (IACS) i drugim vrstama brodova koje su dizajnirane za otvoreno more (plavi)

Izvor: URL 21

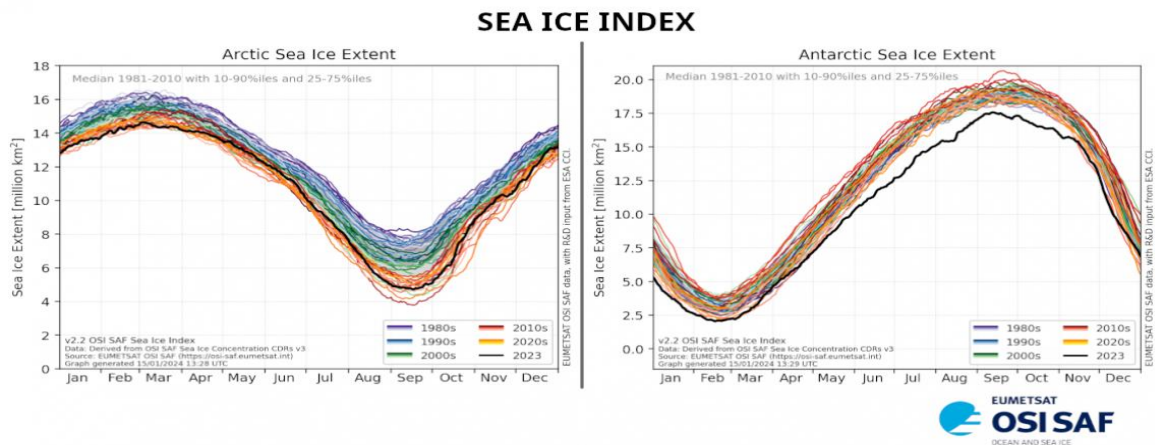
Povijesni podaci pokazuju da je morski led u prošlosti bio stabilniji, ali od 1970-ih godina primjećujemo značajno smanjenje u njegovoj debljini i površini (Schneider i sur., 2024). Godine 2007. došlo je do naglog smanjenja morskog leda, što je pokrenulo globalnu zabrinutost i intenziviralo istraživanje klimatskih promjena (Overland, 2023). Promjene u albedo učinku, gdje otvoreno more bolje apsorbira sunčevu svjetlost i povećava temperature, dodatno ubrzavaju otapanje leda (Zhai i sur., 2023).

4.8.1. Istraživanja i praćenje

U kontekstu trenutnih istraživanja, satelitska opažanja, poput onih s projektom „CryoSat-2“ satelita koji pripada misiji Europske svemirske agencije (engl. ESA - European Space Agency), omogućuju praćenje promjena u visini i debljini leda te sezonskih varijacija

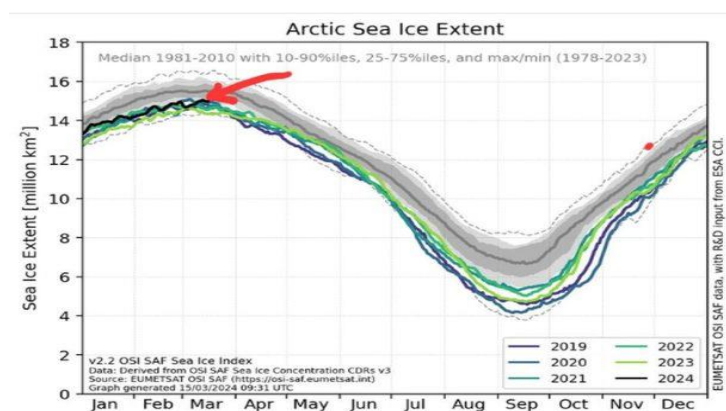
Arktičkog prostora (Doglioni i sur., 2021). CryoSat-2 je lansiran 8. travnja 2010. godine kao dio ESA-ine Copernicus programa za promatranje Zemlje, te je opremljen radarom za visoku preciznost, poznatim kao radar visinske pulsacije (SAR - Interferometrijski radar). Ovaj radar omogućuje vrlo točna mjerenja debljine leda i nadzora površinskih promjena u ledenim pokrovima. Ovi podaci pokazuju da morski led postaje tanji i manje stabilan, što ima globalne posljedice, uključujući povećanje razine mora i promjene u klimatskim obrascima.

In-situ mjerenja, koja uključuju prikupljanje podataka izravno u prirodnom okruženju, umjesto u kontroliranim uvjetima, također su od velike važnosti za precizno razumijevanje promjena u ekosustavima Arktika (DiTullio i sur., 2024). Korištenje ovih tehnika omogućuje bolje razumijevanje mikrobioloških promjena i njihovih utjecaja na biogeokemijske cikluse.



Slika 27. OSI SAF indeks leda – klimatski pokazatelj pokrivenosti morskog leda. Prikazuje više od 40 godina podataka o proširenju morskog leda u seriji grafovima

Izvor: URL 22



Slika 28. Grafički prikaz povećanja leda na Arktiku u prvih nekoliko mjeseci 2024. godine u odnosu na isto razdoblje prošlih šest godina

Izvor: URL 23

Istraživanja pokazuju da se promjene u ledenom pokrovu mogu odraziti na aerosole i druge sastavnice atmosfere, čime se posredno utječe na klimatske obrasce diljem svijeta (Łepkowska i sur., 2024). Aerosoli su sitne čestice ili kapljice koje su suspendirane u zraku. Mogu biti prirodnog ili antropogenog (ljudskog) porijekla i uključuju tvari poput prašine, dima, polena, morske soli, tekućina, pa čak i mikroskopske organizme. U kontekstu atmosfere, aerosoli igraju važnu ulogu u klimatskim procesima jer mogu utjecati na oblačnost, raspršivanje sunčevog zračenja i formiranje padalina. Uzimajući u obzir aerosole, njihov učinak na klimatološke procese može se promatrati kroz distribuciju i sastav čestica koje utječu na radijativne bilance. Tijekom zimskih mjeseci, na primjer, prisutnost čestica iz sjeverno-sibirске regije doprinosi formiranju Arktičke magle, povećavajući koncentracije čestica u zraku. Ovi aerosoli ne samo da utječu na kvalitetu zraka, već također mogu mijenjati obrasce oblaka i oborina, što dodatno potiče klimatske povratne veze (Boyer i sur., 2023). Na taj način se stvara složeni sustav međusobno povezanih čimbenika koji dodatno otežavaju predviđanje budućih klimatskih scenarija i njihovu povezanost s promjenama u morskom ledu. S obzirom na ubrzano klimatsko otapanje u Arktičkom području, hitna je potreba za interdisciplinarnim pristupom istraživanju tih povratnih veza. Ova priznata potreba neizbježno vodi do političkih razgovora na globalnoj razini, kao što su oni koji se odvijaju u sklopu Međunarodne polarne godine (engl. International Polar Year, IPY). To je znanstvena inicijativa koja se provodi u određenim vremenskim razdobljima kako bi se intenzivno istražili polarni krajevi Zemlje, Arktik i Antarkt. Cilj ove inicijative je unaprijediti razumijevanje polarnih regija i njihovih globalnih utjecaja kroz međunarodnu suradnju.

Prva Međunarodna polarna godina održana je 1882.-1883., druga 1932.-1933., a treća je organizirana 1957.-1958. kao Međunarodna geofizička godina. Posljednja, četvrta Međunarodna polarna godina održana je od 2007. do 2008. godine, kada su znanstvenici iz cijelog svijeta surađivali na brojnim istraživačkim projektima usmjerenima na polarne regije i njihov utjecaj na globalnu klimu, ekosustave i ljudske zajednice.

Isto tako, prema istraživanjima, metan oslobođen iz otopljenog permafrostnog tla (trajno smrznuto) može imati katastrofalne posljedice s obzirom na njegovu potencijalno višestruku učinkovitost u zadržavanju topline u atmosferi u odnosu na ugljični dioksid (CO₂). Oslobođanje metana iz otopljenih dijelova mreže permafrostnog tla ne samo da ubrzava klimatske promjene, već također zahtijeva hitne mjere za kontrolu emisija, posebno u arktičkim regijama gdje je permafrost najznačajniji (Angelopoulos i sur., 2020). Uz to, mnoge studije naglašavaju

socijalno-ekonomske posljedice otapanja permafrostnog tla koje zahtijevaju sveobuhvatan pristup uključujući planiranje održivosti i strategije upravljanja rizicima.

4.8.2. Utjecaj Atlantifikacije na morski led: Klimatske i oceanografske promjene, te njihova dinamika

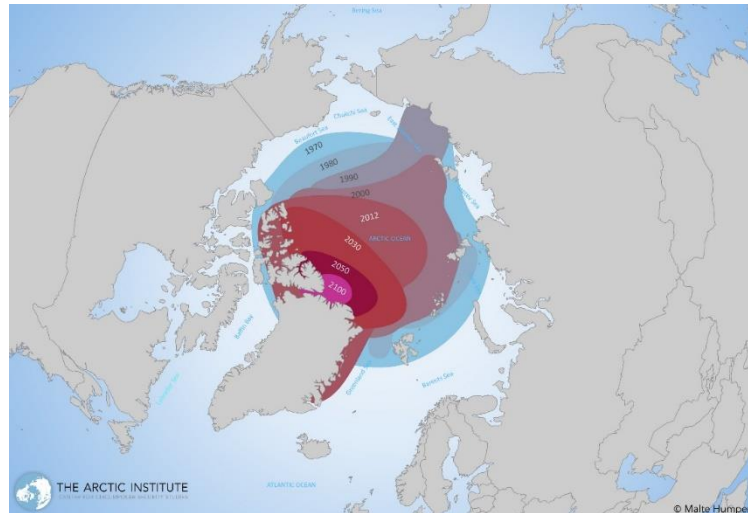
Promjene u morskom ledu posljedica su složenih interakcija između klimatskih uvjeta i oceanografskih procesa. Morski led u Arktiku osjetljivo reagira na promjene temperature zraka, koja se u ovom području povećava brže nego na globalnoj razini. Posljednjih desetljeća bilježi se značajno smanjenje volumena morskog leda, što se povezuje s fenomenom Atlantifikacije. Ovaj proces uključuje povećan dotok topline i slanosti iz Atlantskog oceana u Arktički bazen, što utječe na stabilnost morskog leda i mijenja njegova fizička svojstva. To ima utjecaj ne samo na ekosustav, već i na klimatske obrasce u regiji (Kaiser, 2024).

Buduće promjene zahtijevaju multidisciplinarni pristup, uključujući znanstvena istraživanja, uspostavljanje politike za smanjenje emisija stakleničkih plinova i međunarodnu suradnju. Praćenje i analiza podataka o morskom ledu te razvoj novih tehnologija za kontinuiranu procjenu njegovog stanja ključni su za razumijevanje dinamičnih sustava. Razvoj algoritama za daljinsko istraživanje može donijeti važne informacije o stanju morskog leda i njegovim promjenama, te pomoći u očuvanju arktičkog ekosustava i globalnom klimatskom sustavu (Gu, 2024).

Oceanske struje igraju ključnu ulogu u raspodjeli topline i oblikovanju morskog leda. Struje poput Golfske struje prenose toplo more prema sjeveru, povećavajući temperaturu površinske vode u Arktiku i ubrzavajući otapanje leda. Praćenje tih struja važno je za razumijevanje njihovih klimatskih učinaka (Tao, 2024). Otapanje arktičkog leda povećava razinu mora i mijenja obrasce oceanskih struja, što utječe na migracije morskih vrsta i ribolovne industrije. Također, oslobađa se metan, snažan staklenički plin, što pogoršava klimatske promjene. Bez strategija za smanjenje emisija i očuvanje ekosustava, posljedice će postati ozbiljnije, a mogu se pojaviti i nove ekološke krize.

Sezonske promjene također igraju važnu ulogu. Tijekom zime, niske temperature uzrokuju debljanje leda, dok se ljeti proces otapanja ubrzava zbog visokih temperatura. Analize pokazuju da je u posljednjih 40 godina minimalna vrijednost ljetnog morskog leda opala, što

ima dalekosežne posljedice za oceanske ekosustave i globalne klimatske obrasce (Moncada Lopez, 2024). Razumijevanje ovih promjena važno je za planiranje strategija očuvanja i prilagodbu na klimatske promjene.



Slika 29. Proširenje arktičkog ljetnog leda 1970-2100.

Izvor: URL 8

4.8.3. Utjecaj atmosferske cirkulacije na transformaciju arktičkog morskog leda

Promjene u obrascima atmosferske cirkulacije imaju značajan utjecaj na transformacije morskog leda u Arktičkom oceanu. Tijekom posljednjih nekoliko desetljeća, znanstvenici su primijetili da negativne faze Arktičke oscilacije (AO) i Arktičkog dipola (AD) dovode do jačanja anticiklonalne cirkulacije, što rezultira višim pritiscima u Beaufortovom visokom području (Chang i sur., 2024). Ove promjene mogu značajno utjecati na kretanje morskog leda, a posljedice uključuju dvosmjerne varijacije, gdje pozitivne faze AO i AD uzrokuju obrnuto kretanje leda. AD je fenomen u kojem se razlike u tlaku zraka između dva područja u Arktiku (obično jedno područje s visokim tlakom i drugo s niskim tlakom) dovode do promjena u vremenskim uvjetima i cirkulaciji zraka. Arktički dipol može utjecati na raspodjelu morskog leda, temperature i obrasce oborina u Arktiku. U razdoblju od 1984. do 2022. godine, starost arktičkog morskog leda značajno se smanjila, što implicira promjenu ekološke ravnoteže (Chen i sur., 2023). Tijekom prvih godina, starije i višegodišnje (engl. multi-year ice, MYI) površine leda činile su dominantan dio arktičkog ekosustava. MYI led je sinonim za deblji i otporniji ledeni sloj u usporedbi s novijim, sezonskim ledom, koji se stvara i topi unutar jedne godine.

Međutim, s vremenom je došlo do povećanja sezonskog leda i smanjenja opsega MYI-a, što je rezultiralo smanjenjem starosti leda. Tokom drugog razdoblja, specifične atipične cirkulacije vjetra, uzrokovane promjenama u AO, doprinijele su divergenciji leda i daljnjem smanjenju starosti (Chen i sur., 2023). Razumijevanje veza između atmosferskih procesa i pomaka morskog leda, kao što je utjecaj BH (Barometrijska visina - visinska razina u atmosferi gdje se provode mjerenja ili analize) na morsku cirkulaciju, može pomoći u razvoju strategija za očuvanje i održivo upravljanje ovim osjetljivim područjem (Chang i sur., 2024). Kroz multidisciplinarna istraživanja i globalne napore, moguće je osigurati bolju otpornost arktičkog okruženja prema nadolazećim klimatskim promjenama.

4.8.4. Održive strategije i inovativni EU projekti za prilagodbu klimatskim promjenama Arktika

Postojeće politike često ne zadovoljavaju potrebe pogođenih zajednica. EU financirani projekti poput: Istraživanje klimatskih promjena i Arktika je projekt istražuje utjecaj klimatskih promjena na arktički okoliš i zajednice „CHARTER-a“, Prilagodba klimatskim promjenama temeljem ekosustava i integrirana politika „ECOTIP-a“ i Budući utjecaji klimatskih promjena i okoliša u Arktiku „FACE-IT-a“ značajno doprinose istraživanju tih promjena i nude smjernice za bolje upravljanje resursima, potičući međunarodnu suradnju. Implementacija održivih strategija i analiza utjecaja na tundru, uključujući moguće scenarije požara, ključni su za uspješno upravljanje (Young i sur., 2015).

CHARTER (engl. Climate Change and Arctic Research) se orijentira na razumijevanje kako klimatske promjene utječu na tundru, ledeni pokrov i lokalne ekosustave te kako se te promjene mogu ublažiti i prilagoditi. Projekt je pokrenut 2020. godine i trebao bi trajati nekoliko godina.

ECOTIP (engl. Ecosystem-based Climate Change Adaptation and Integrated Policy) se usredotočuje na integraciju ekosustavnog pristupa u prilagodbu klimatskim promjenama i politiku upravljanja. Projekt istražuje kako promjene u ekosustavima utječu na okoliš i društva, te nudi smjernice za razvijanje održivih strategija. ECOTIP je započeo 2019. godine i traje do 2024. godine.

FACE-IT (engl. Future Arctic Climate and Environment Impact) se bavi analizom budućih utjecaja klimatskih promjena na arktički okoliš, s naglaskom na promjene u tundri i mogućim

scenarijima poput požara. Projekt istražuje kako klimatske promjene mogu utjecati na različite aspekte arktičkog ekosustava i predlaže rješenja za upravljanje tim promjenama. FACE-IT je pokrenut 2021. godine i planira se završiti 2026. godine.

Povećanje javne svijesti o promjenama u Arktičkom morskom ledu ključno je za kolektivnu akciju i smanjenje utjecaja klimatskih promjena. Informiranje javnosti o znanstvenim saznanjima i posljedicama ovih promjena pomaže u stvaranju održivih politika. Obrazovni programi, radne grupe i kampanje mogu osvježiti svijest o važnosti Arktika kao globalno značajnog ekosustava. Informirani građani bolje razumiju svoju ulogu u zaštiti okoliša, što može dovesti do podrške ekološkim inicijativama i smanjenja gubitka bioraznolikosti. Uključivanje tema o klimatskim promjenama u školske kurikule i korištenje interdisciplinarnih pristupa može pružiti učenicima sveobuhvatan uvid u problem. Neformalno obrazovanje, poput radionica i terenskih istraživanja, dodatno potiče angažman i razvoj kritičkog razmišljanja (Johannessen i sur., 2023). Mediji igraju ključnu ulogu u informiranju javnosti o pitanjima očuvanja okoliša, uključujući promjene u Arktičkom morskom ledu. Kroz različite platforme, mediji mogu prenijeti znanstvene vijesti i povećati pritisak na donositelje odluka da poduzmu mjere zaštite okoliša. Aktivno sudjelovanje medija može mobilizirati zajednicu i podržati ekološke inicijative (Christensen i sur., 2013). S obzirom na ubrzane klimatske promjene, ključna je analiza hidroklimatskih obrazaca u arktičkim regijama kako bi se razumjeli utjecaji na vlažnost i sezonske ekstreme.

Nove sofisticirane tehnologije, poput StraitFlux metodologije, nude preciznije analize morske energije i cirkulacije, što pomaže u boljem razumijevanju budućih klimatskih scenarija i razvoju učinkovitih politika za očuvanje arktičkog leda (Winkelbauer, 2024). Metoda StraitFlux koristi napredne tehnike i instrumente za prikupljanje podataka o brzinama struja, temperaturama i drugim relevantnim parametrima, omogućujući detaljnu analizu i modeliranje. Ove informacije pomažu u boljem razumijevanju utjecaja morskih prolaza na šire oceanske i klimatske sustave, kao i u predviđanju promjena koje mogu nastati zbog prirodnih ili ljudskih aktivnosti.

Istraživačke inicijative, poput HiLAT (engl. High-Latitude Analysis and Transport), omogućuju bolje razumijevanje promjena u Arktičkom okruženju kroz integraciju globalnog modeliranja i analitičkih sposobnosti (Samsel i sur., 2023). HiLAT usmjerava pozornost na razumijevanje i analizu promjena u područjima s visokim geografskim širinama, posebno u

Arktičkom okruženju. Bavi se integracijom globalnog modeliranja i analitičkih sposobnosti kako bi se bolje razumjele promjene u arktičkom okolišu. Ova inicijativa uključuje proučavanje atmosferskih i oceanografskih procesa, transporta tvari i utjecaja klimatskih promjena u visokim geografskim širinama.

4.9. Ekološki i tehnološki odgovor na klimatske promjene (adaptacija pomorskih ruta Arktika)

Klimatske promjene imaju dubok i značajan utjecaj na osjetljive arktičke ekosustave. Porast temperatura i intenzivno otapanje leda uzrokuju masovne migracije borealnih i subarktičnih vrsta prema sjeveru, što dovodi do značajnih promjena u njihovom ponašanju, prehrambenim navikama i reproduktivnim obrascima, te mogu imati dugoročne i nepredvidive posljedice na filogenezu i kompleksne ekološke interakcije. Pored toga, globalno zagrijavanje i korištenje Arktičkih pomorskih ruta ima brojne posljedice za mnogobrojne autohtone zajednice Arktičke regije. Na primjer, tradicionalno lovljenje kitova i tuljana postaje sve teže zbog smanjenja morskog leda. Također, rast turizma u arktičkoj regiji izaziva zabrinutost zbog ekoloških i kulturnih utjecaja velikog broja turista. S druge strane, neki autohtoni narodi vide razvoj Arktičke pomorske rute kao priliku za ekonomski razvoj i nastoje izvoziti meso sobova koristeći svoje tradicionalne metode stočarenja. Korištenje Arktičke pomorske rute tako ne uključuje samo transport resursa, već i složena socijalna pitanja.

Tehnološke inovacije igraju ključnu ulogu u praćenju promjena i razvoju održivih strategija. Implementacija višefunkcionalnih ekoloških mreža, poput ekoloških koridora, može pomoći u prilagodbi biološke raznolikosti i podržati održivi razvoj (Xu, 2024). Na primjer, klimatske dramatične promjene utječu na biogeografske obrasce i dovode do gubitka staništa za vrste poput medvjeda i tuljana. Topljenje leda omogućuje širenje invazivnih vrsta i destabilizira postojeće ekosustave. Efikasni modeli predviđanja, poput istraživački projekt koji se bavi procjenom utjecaja klimatskih faktora na hidrologiju i okoliš u europskim prostorima, ESHIPPOClim (engl. European Spatial Hydrological Integrated Prediction and Optimization of Climate), koristi suvremene tehnologije i modele za predviđanje kako faktori poput temperature i zagađenja utječu na hidrologiju i klimu, te time i praćenje promjena u staništima riba i ostalog ugroženog životinjskog svijeta Arktika i njihove migracije. Cilj ovog modela je optimizirati predviđanje i razumijevanje klimatskih promjena i njihovih učinaka, pružajući važne informacije za planiranje i upravljanje okolišem. (Gillis i sur., 2024).

Umjetna inteligencija (engl. Artificial intelligence, AI) također poboljšava analizu podataka, omogućujući preciznije predviđanje klimatskih promjena i optimizaciju energetske učinkovitosti. AI se koristi za procjenu emisija stakleničkih plinova i poboljšanje održivosti kroz energetske strategije (Lucarini, 2024). U Arktiku, razvoj obnovljivih izvora energije, poput solarne, vjetro i geotermalne energije, ključan je za smanjenje emisija i poticanje lokalne održivosti (Arruda, 2018).

Hibridni pogonski sustavi i goriva s niskim emisijama, značajno smanjuju negativan utjecaj. Sustavi za praćenje emisija i tehnologije za čišćenje ispušnih plinova omogućuju bržu reakciju na ekološke incidente, dok inovacije poput optimizacije trupa i sustava za recikliranje smanjuju potrošnju goriva i emisije.

5. EKOLOŠKI UTJECAJI PLOVIDBE LNG BRODOVA KROZ ARKTIK

Otvaranje novih pomorskih ruta koje su ranije bile neprohodne može imati ozbiljne posljedice za osjetljive arktičke ekosustave, uključujući ugrožene divlje vrste. Nesreće ili curenja, te donošenje invazivnih vrsta kroz balastne vode na ovim rutama mogu uzrokovati značajnu štetu lokalnoj flori i fauni, dok velika količina prevoženog plina može imati dugoročne posljedice za globalnu klimu i prirodne resurse.

Povećanje broskog prometa u Arktiku, uzrokovano otapanjem leda, utječe na zvučni krajolik, povećavajući podvodni šum između 5-20 dB (Heaney i sur., 2013). Ovo ima destruktivne učinke na morsku faunu i dodatne stresove za ekosustav. U regijama poput Baffinovog zaljeva smještenog između Baffinovog otoka i zapadne obale najvećeg otoka svijeta Grenlanda, povećana komercijalna aktivnost donosi nove izazove i prilike, što zahtijeva održivo upravljanje resursima kako bi se minimizirali negativni ekološki utjecaji (Sejas i sur., 2018).

Razvoj strategija za smanjenje ekoloških rizika od pojačanog intenziteta plovidbe nužan je, uključujući smjernice za održivo upravljanje resursima, praćenje emisija i korištenje alternativnih goriva (Grigoriadis, 2024). Promjene klimatskih uvjeta i smanjenje arktičkog leda povećavaju plovnost, ali istovremeno izazivaju regulatorne i sigurnosne probleme.

5.1. Očuvanje prirode i održivost Arktika

Povećanje broskog prometa zahtijeva pažljivo planiranje održivih praksi, uključujući regulaciju prometa i zaštitu osjetljivih područja. Arktička regija, koja obuhvaća dijelove Kanade, Aljaske, Grenlanda, Norveške, Švedske i Rusije, suočava se s brojnim prijetnjama, uključujući industrijsku eksploataciju i zagađenje na područjima gdje je potreban ozbiljniji pristup očuvanju bioraznolikosti i održavanju dugoročne održivosti (Lamers i sur., 2018).

U svjetlu klimatskih promjena, održive prakse zaštite Arktika su ključne. Zemlje i organizacije usmjeravaju napore na smanjenje emisija stakleničkih plinova, očuvanje staništa i poticanje održivog ribolova. Inicijative poput morskih zaštićenih područja i ekoturizma igraju važnu ulogu u očuvanju spomenute ugrožene bioraznolikosti, dok podržavaju lokalne zajednice. Dodatna ulaganja i razvoj obnovljivih i alternativnih izvora energije, poput vjetroelektrana i solarnih panela, smanjuje ovisnost o fosilnim gorivima i pomaže očuvanju biodiverziteta. Strategije očuvanja moraju balansirati ekonomske aktivnosti i zaštitu prirode (Tennberg, 2017).

5.2. Osnovni rizici pri plovidbi Arktikom

Plovidba u Arktičkim vodama predstavlja složeni izazov koji zahtijeva razmatranje prošlih iskustava, trenutnih uvjeta i budućih planova. Povijest Arktika obilježena je brojnim tragedijama uslijed ekstremnih vremenskih uvjeta i neadekvatne opreme, što je dovelo do gubitaka života i brodova. Danas, informacije iz tih iskustava pomažu u oblikovanju sigurnosnih protokola za buduće misije u ovoj regiji. Nedostatak podataka o meteorološkim uvjetima čini planiranje plovidbe rizičnijim.

Istraživanje specifičnih izazova arktičke plovidbe pokazuje da ekstremni klimatski uvjeti i promjene u ledu čine navigaciju izrazito složenom. Sezonske varijacije, gdje je zimi more gotovo potpuno zamrznuto, dok ljeti led stvara neregularne plohe, povećava rizik od sudara. Posebna priprema i oprema su nužni za izdržavanje jakih vjetrova i debelog leda (Berkman, 2010).

Uz spomenute brojne izazove zbog ekstremnih klimatskih uvjeta i niskih temperatura, plovidba Arktikom suočava se i s jakim vjetrovima koji oblikuju ledene pokrove i maglom, koja otežavaju vidljivost i manevriranje brodovima što zahtijeva holistički pristup

kombinirajući tradicionalne metode s modernim tehnologijama. Osim prirodnih prepreka, kompleksna geografska struktura s nepredvidivim ledom i strujama dodatno povećava rizike. Važno je procijeniti debljinu i koncentraciju leda, kao i iskustvo posade (Liu, 2024). Dinamička Bayesova mreža (DBN) omogućava procjenu i predikciju rizika koristeći dugoročne meteorološke podatke i stručne uvide, što pomaže u prilagodbi na brze klimatske promjene. Ova statistička metoda može unaprijediti sigurnost plovidbe i donošenje informiranih odluka. Također, i modeli osiguravajućih premija specifični za Arktik pomažu u procjeni rizika prema tipu broda i ruti plovidbe, uzimajući u obzir Bayesovu teoriju i funkciju gubitka (Afenyo, 2024).

Problemi s nepreciznim pomorskim kartama dodatno kompliciraju navigaciju, te mogu utjecati na sudare s ledom ili podvodnim preprekama, dok tehnologije poput GNSS-a, iako korisne, mogu biti pogođene smetnjama zbog geomagnetskih oluja i atmosferskih poremećaja (Y. Sook Lee i sur., 2017). Pouzdanost tehnologije je također presudna, no ovisnost o njoj može biti problematična zbog mogućih kvarova i smetnji. Stoga je važno redovito održavanje opreme i razvijanje strategija za upravljanje tehnološkim rizicima (Tanaka i sur., 2023). Ravnoteža između tehnologije i ljudskih vještina te razvoj strategija za prevenciju tehnološke ovisnosti bit će ključni za budućnost sigurnosti plovidbe u Arktiku (Hong, 2020).

Specifični uvjeti kao što su ekstremno vrijeme i osjetljiva ekosustava čine ljudsku percepciju i reakcije ključnima za sigurnost plovidbe. Educirana posada koja prolazi kroz specijaliziranu obuku stvarnih situacija za rad u arktičkim uvjetima, uključujući tehnike preživljavanja u slučaju nužde na ledenoj površini može brže donositi odluke u kriznim situacijama, dok komunikacija unutar posade i s vanjskim službama može pomoći u rješavanju problema i smanjenju rizika. Socio-kulturni čimbenici također igraju značajnu ulogu; pomorci iz različitih kulturnih pozadina mogu imati različite pristupe rješavanju rizika (Praetorius i sur., 2023).

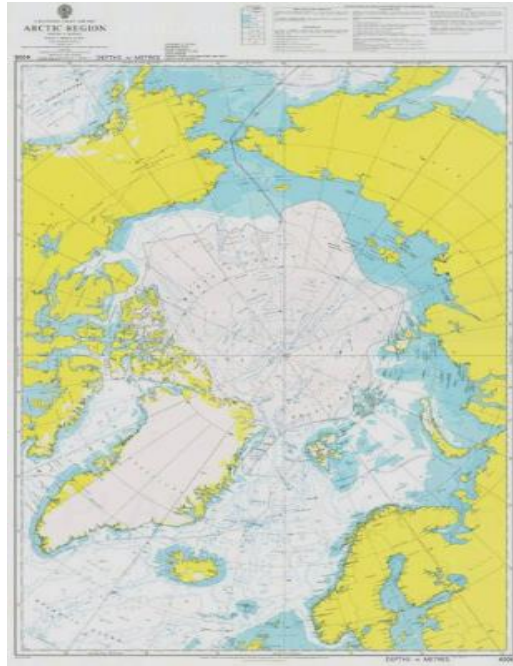
Očekuje se da će ulaganja u infrastrukturne projekte u područjima s visokim klimatskim rizicima, poput Pečorskog mora na sjeverozapadnom dijelu europske Rusije i Karskog mora smještenog između Barentsovog mora, Laptevskog mora i otočja Severnaja zemlja, doseći 8,2 trilijuna rubalja, pri čemu četvrtina tih sredstava ide na rizična područja (Badina i sur., 2024).

Analizom različitih slučajeva, kao što su nesreće, problemi s tehnologijom i izazovi vezani uz klimatske promjene, može se bolje razumjeti kompleksnost arktičkog okruženja. Na primjer, jedn od najpoznatijih slučajeva havarije je ona iz 2020. godine ruskog polarnog

istraživačkog broda „Knyaz Vladimir“ koji je zbog teških vremenskih uvjeta u blizini Svalbarda pretrpio sudar s ledenim brijegom jasno ilustrira kako nedovoljna priprema i neadekvatne karte mogu rezultirati katastrofalnim ishodom. Ove studije pokazuju potrebu za unapređenjem navigacijskih sustava i hitnim protokolima tijekom plovidbe, čime se može smanjiti rizik od sličnih incidenata u budućnosti. Ova ekspedicija imala je za cilj prelazak Arktika, ali brod je zapao u guste ledene sante, što je rezultiralo njegovim potapanjem. Posada je, suočena s ekstremnim uvjetima, bila primorana na dugotrajnu potragu za preživljavanjem na ledu, što je postalo simbol ljudske izdržljivosti i odlučnosti. Takvi incidenti ne samo da su oblikovali povijest arktičkog istraživanja, već su potaknuli promjene u pristupu sigurnosti i opremi koja se koristi prilikom plovidbe u ovom izazovnom okruženju. Društveni i ekološki faktori također su značajno utjecali na arktičko istraživanje, posebno u kontekstu klimatskih promjena. Globalno zagrijavanje smanjuje obujam leda, što čini rute plovidbe dostupnijima, ali istovremeno povećava rizik od nepredviđenih vremenskih uvjeta. U tom kontekstu, istraživanje povijesnih incidenata može pružiti vrijedne smjernice za buduće plovidbe i prevenciju sličnih nesreća. S obzirom na sve veću dostupnost sjevernih ruta uslijed otapanja leda, očekuje se povećanje broja brodova, što može rezultirati većim rizicima za okoliš i sigurnost na moru gdje veća gustoća plovidbe može izazvati sudare i smanjenje sigurnosnih standarda. Informacije o stanju leda i vremenskim uvjetima moraju biti lako dostupne i u stvarnom vremenu, kako bi se kapetani i posade mogli pravovremeno prilagoditi. Mnogi istraživači suočili su se s iznimnim uvjetima koje donosi plovidba Arktikom. Jedan od najpoznatijih primjera ilustrira putovanje Norvežanina Fridtjofa Nansena, koji je 1893. krenuo na sjever s ciljem da istraži ovo područje i njegovu geografski nepoznatu prirodu. Nansen je iskoristio prirodne elemente tako što je plovio u ledu, koristeći poznati norveški istraživački brod „Fram“, koji je izgrađen 1892. godine i koristi se za polarna istraživanja, za istraživanje površinskih struja, što je postavilo temelje modernim teorijama o sjevernjačkim morskim strujama. Ovaj način navigacije pokazuje kako kombinacija tradicionalnih vještina i znanstvenih metoda može rezultirati uspješnim istraživačkim poduhvatima.

Također, Arctic Pilot Project (APP) osnovanog 1981. bio je ambiciozan kanadski projekt za transport prirodnog plina s Arktika do istočne Kanade putem ledolomaca. Projekt je postavio temelje za kasnije inicijative i politike u sklopu Arctic Council, koji je službeno osnovan 1996. godine kako bi se nastavila i proširila suradnja u zaštiti arktičkog okoliša i održivom razvoju u regiji. uključivao proizvodnju i ukapljivanje plina na otoku Melville, s velikim naglaskom na ekološke procjene zbog arktičkih uvjeta.

Netočne karte predstavljaju ozbiljan izazov za plovidbu Arktikom zbog nedostatka detaljnog istraživanja i preciznog mapiranja ovog složenog područja. Arktik se neprekidno mijenja uslijed brzog topljenja leda i klimatskih promjena, što otkriva nove dijelove oceana, otočja i podvodnih grebena koji su prethodno bili skriveni. Kao rezultat toga, tradicionalne karte često ne uspijevaju pratiti ove promjene, što može rezultirati zastarjelim ili netočnim podacima.



Slika 30. ADMIRALTY pomorska karta 4006: Arktička regija.

Izvor: URL 67

Promjene na površini, poput pomicanja leda i varijacija u morskim tokovima, često nisu adekvatno prikazane na starim kartama, što povećava rizik od nesreća. Geološke formacije, grebeni i podvodne prepreke, koje postaju vidljive uslijed povlačenja leda, mogu biti netočno prikazane ili potpuno nepoznate, dok ekstremni arktički uvjeti dodatno otežavaju precizno istraživanje i kartografske misije. Stoga, netočne karte ne samo da otežavaju navigaciju, već značajno povećavaju rizik od nesreća, uključujući nasukavanja i sudare s neotkrivenim podvodnim strukturama. Razvoj i primjena naprednih tehnologija i metodologija za precizno mapiranje i praćenje promjena u arktičkom okolišu postaju ključno važni za osiguranje sigurnije i učinkovitije plovidbe.

Pored izazova povezanih s netočnim kartama, plovidbu Arktikom dodatno otežavaju specifični problemi koji proizlaze iz promjena krajolika zbog nakupljanja ili topljenja leda. Na

primjer, radarska navigacija postaje izuzetno složena jer radarski odrazi često ne odgovaraju onome što je prikazano na zastarjelim kartama. Promjene u ledu, kao što su stvaranje novih grebena ili promjena u ledu koji pluta, mogu uzrokovati da radarske slike budu neprecizne, što dovodi do značajnih nesigurnosti u preciznosti navigacije.

Osim toga, plovidbu dodatno otežava slaba ili potpuno nepostojeća dostupnost službi traganja i spašavanja, što značajno povećava rizik u slučaju nesreća. Na primjer, ako brod doživi kvar ili nesreću u udaljenim dijelovima Arktika, mogućnost pravovremenog pružanja pomoći može biti ozbiljno ograničena, što može dovesti do teških posljedica za posadu i teret.

Nedostatak pomorskih kontrolnih službi, poput VTS-a (engl. Vessel Traffic Service), pilotaže i sličnih organizacija koje pomažu u upravljanju pomorskim prometom, dodatno doprinosi složenosti plovidbe. U Arktiku, gdje su uvjeti često ekstremni i nepredvidivi, prisutnost takvih usluga može biti ograničena ili potpuno odsutna. Na primjer, u regijama poput Barentsovog mora ili okolice Sjevernog pola, gdje su uvjeti izuzetno zahtjevni, nedostatak profesionalne pomoći u vođenju brodova može povećati rizik od nesreća.

Komunikacijski problemi su također značajan izazov. Pomorske radio stanice, uključujući obalne VHF/DSC, MF/DSC i NAVTEX, rijetko su dostupne u Arktiku. Geostacionarni satelitski sustav INMARSAT nudi vrlo slab signal, a HF komunikacija je nepouzdana zbog slabog ionosferičkog reflektiranja u polarnom području. Na primjer, brod koji se nalazi u udaljenom dijelu Sjevernog ledenog oceana može imati poteškoća s održavanjem veze s obalom zbog slabe komunikacije, što otežava koordinaciju i reakciju u hitnim situacijama.

Navigacija u Arktiku također se suočava s problemima s kompasima. Magnetski kompasi su nepouzdana zbog velike varijacije u magnetskom polju i slabe horizontalne komponente magnetizma, dok žirokompasi pate zbog slabe sile precesije (fenomen koji se događa kada se žiroskop rotira i na njega djeluju vanjske sile, što uzrokuje promjenu smjera osi rotacije). Ovi problemi čine navigaciju još složenijom, jer pouzdane metode određivanja smjera postaju neprecizne. Na primjer, brod koji koristi magnetski kompas može imati značajne greške u određivanju smjera zbog promjena u magnetskom polju, što može dovesti do opasnih pogrešaka u navigaciji.

Međunarodna pomorska organizacija (IMO) razvila je metodologiju ocjene rizika koja olakšava plovidbu, a primjena geografskih informacijskih sustava (GIS) omogućuje sigurniji transport LNG-a (Olkhovik i sur., 2018). GIS je računalni sustav dizajniran za prikupljanje, pohranu, analizu i prikaz prostornih i geografskih podataka, te omogućuje korisnicima da vizualiziraju, razumiju i interpretiraju podatke u odnosu na njihov geografski položaj. Koristi različite vrste prostornih podataka, uključujući karte, slike satelita, podatke o visinama i informacije o zemljištu. Softverski alati GIS-a omogućuju analizu podataka, izradu karata i modeliranje prostornih odnosa. Primjeri uključuju softverske alate „ArcGIS“ i „QGIS“ za koje su potrebni serveri i računala s velikim kapacitetom za pohranu i obradu prostornih podataka.

Zbog svih ovih poteškoća, nužno je razvijati i primjenjivati napredne tehnologije i metodologije za precizno mapiranje, navigaciju i komunikaciju. Inovacije kao što su napredni satelitski sustavi, autonomni brodski sustavi i precizne radarske tehnologije postaju ključni za osiguranje sigurnije i učinkovitije plovidbe u ovom izazovnom i dinamičnom okruženju.

6. ODRŽIVA UPOTREBA POMORSKIH RUTA ARKTIKA ZA LNG BRODOVE

Razvojem sveobuhvatne i holističke politike koja štiti okoliš i lokalne zajednice, doprinosi se bržem i učinkovitijem razvoju plovnih ruta u Arktiku. Ovaj pristup ne samo da stvara održivu osnovu za buduće pomorske operacije, već i potiče ekonomski rast i razvoj lokalnih zajednica, čime se poboljšava kvaliteta života stanovništva. Arktik, kao jedno od najosjetljivijih ekoloških područja na svijetu, zahtijeva pažljivo planiranje i implementaciju strategija koje uzimaju u obzir složene interakcije između klimatskih promjena i ljudskih aktivnosti.

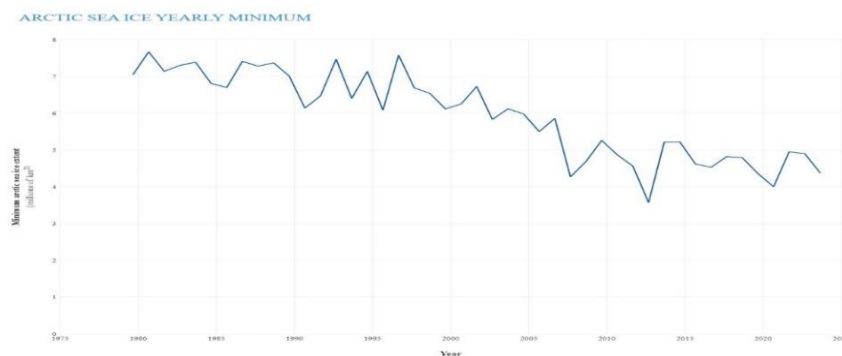
Povećanje svijesti o ekološkim pitanjima i edukacija lokalnog stanovništva postali su ključni elementi ove politike. Uključivanje lokalnih i autohtonih zajednica u proces donošenja odluka osigurava da se njihovi interesi i znanja integriraju u razvoj strategija upravljanja. Na primjer, iskustva iz kanadske Arktike pokazala su kako angažman lokalnih zajednica može dovesti do uspješnijih i prihvaćenijih politika očuvanja okoliša.

Osim već spomenutih mjera, postoji i potreba za jačanjem međunarodnih okvira koji reguliraju plovidbu u Arktičkom području. Zajednička pravila i standardi, uz suradnju među državama koje dijele Arktik, mogu značajno doprinijeti sigurnosti i održivosti plovnih puteva.

U tom kontekstu, primjer suradnje između Norveške i Rusije na održavanju sigurnosti plovidbe može poslužiti kao model za druge zemlje u regiji.

Uvođenje napredne tehnologije u izgradnju brodova, poput korištenja hibridnih goriva, predstavlja važan korak prema održivosti. Brodovi pogonjeni vodikom ili električnom energijom omogućuju postizanje nulte emisije, čime se smanjuje ekološki trag pomorskih operacija. Prema istraživanjima, brodovi koji koriste alternativna goriva već su pokazali smanjenje emisija stakleničkih plinova za do 90%. Ova tehnološka rješenja nisu samo ekološki prihvatljiva, već također povećavaju operativnu učinkovitost i smanjuju troškove.

Također, implementacija satelitskog nadzora i korištenje preciznih i sofisticiranih navigacijskih sustava značajno povećavaju sigurnost plovidbe. Ovi sustavi omogućuju real-time praćenje plovnih ruta, što smanjuje rizik od nesreća i zagađenja. Na primjer, korištenje satelitskog nadzora u pomorstvu već je rezultiralo smanjenjem incidenata za 30% u nekim arktičkim regijama.



Slika 31. Opseg morskog leda na Arktiku pri kraju ljetne sezone topljenja svakog rujna od 1979. do 2023., prema satelitskim opažanjima. Ukupni opseg definiran je kao površina svih dijelova satelitske slike gdje je koncentracija leda najmanje 15 posto. Količina morskog leda koja preostane nakon ljetnog topljenja brzo opada. Grafika NOAA Climate.gov, na temelju podataka iz Nacionalnog centra za snijeg i led.

Izvor: URL 25

Korištenje modernih tehnologija ne samo da unapređuje operativnu učinkovitost, već i doprinosi zaštiti prirodnih resursa. Ove inovacije omogućuju da se pomorske rute u Arktiku koriste na odgovoran i održiv način, što je ključno za očuvanje ekosustava. Razvijajući sinergiju između tehnologije, znanja lokalnih zajednica i međunarodne suradnje, održiva upotreba pomorskih ruta može postati ključna komponenta izgradnje otpornijeg arktičkog ekosustava, čime se jačaju temelji za buduće generacije.

Na kraju, ključno je kontinuirano ulagati u istraživanje i razvoj kako bi se osigurala održiva budućnost arktičkih pomorskih ruta, osnažujući time globalne napore za očuvanje ovog dragocjenog i krhkog okoliša.

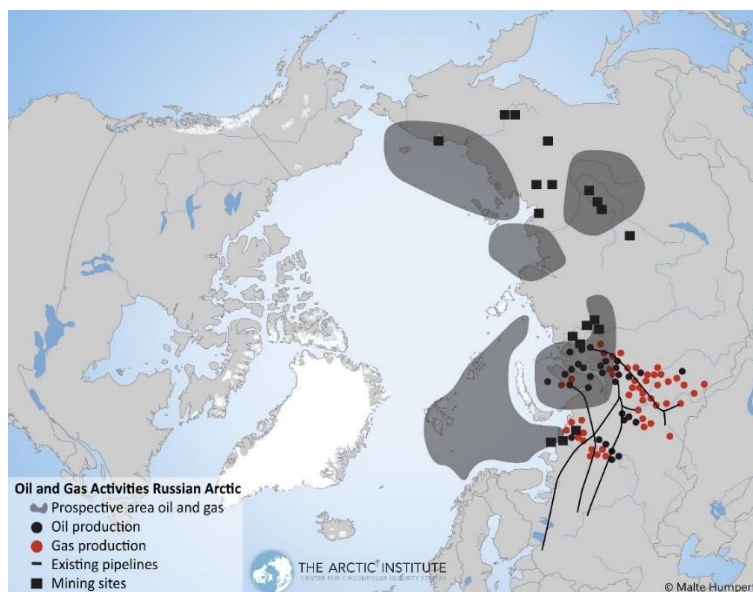
6.1. Trenutno stanje Arktičkih pomorskih ruta

Razvoj arktičkih pomorskih ruta predstavlja izazov i priliku za globalnu pomorsku industriju, ali zahtijeva pažljivo razmatranje specifičnih geografskih, okolišnih i klimatskih uvjeta ovog krhkog ekosustava. Klimatske promjene, koje ubrzano otapaju ledeni pokrov Arktika, omogućavaju lakši prolaz sjevernim plovnim putevima, otvarajući potencijalne trgovačke rute koje skraćuju vrijeme prijevoza robe između Europskog, Azijskog i Sjeverno Američkog kontinenta. No, istovremeno, ove promjene ugrožavaju spomenute osjetljive ekosustave i biljne i životinjske vrste koje ovise o trajnom ledu za preživljavanje.

LNG brodovi suočavaju se s nizom tehničkih i operativnih izazova na Arktiku, uključujući nepredvidive vremenske uvjete, varijabilnu prisutnost leda, jake struje i ograničenu infrastrukturu za hitne intervencije. Ove uvjete dodatno pogoršavaju nagle promjene vremena, koje mogu stvoriti oluje, a debeli led može ugroziti sigurnost plovidbe. LNG brodovi moraju biti opremljeni opisanom specijaliziranom tehnologijom za navigaciju kroz složene i opasne arktičke uvjete, uključujući ojačane trupove, sustave za detekciju leda i fleksibilne planove ruta koji omogućavaju brzu prilagodbu u slučaju promjena u okolišu. Njihova brzina i putanja uvjetovani su prisutnošću leda, a svaka greška može imati katastrofalne posljedice za okoliš i sigurnost.

Geografska specifičnost Arktika zahtijeva prilagodbu brodskih operacija kako bi se smanjio utjecaj na okoliš i osigurala sigurnost posade i tereta. Plovidba u ovim vodama mora biti vođena strogim ekološkim standardima, uz konstantno praćenje stanja ledenog pokrova i vremenskih prilika, što naglašava važnost naprednih tehnologija poput satelitskog nadzora i automatiziranih navigacijskih sustava. Na primjer, upotreba dronova i satelitskog nadzora omogućuje pomorcima preciznije informacije o položaju leda, čime se smanjuje mogućnost sudara s ledom i drugih nesreća koje bi mogle dovesti do ekološke katastrofe. (Tarovik, 2024).

Socio-ekonomski aspekti korištenja arktičkih pomorskih ruta također igraju ključnu ulogu u oblikovanju budućnosti ovih puteva. S jedne strane, smanjenje ledenog pokrova otvara prilike za eksploataciju resursa poput prirodnog plina, minerala i nafte, što može donijeti ekonomski rast i nove investicije u sjeverne regije. Posebno važno postaje iskorištavanje plinskih nalazišta, budući da je Arktik dom značajnim zalihama prirodnog plina, a LNG brodovi postaju ključni u transportu ovih resursa na globalna tržišta.



Slika 32. Prikaz nalazišta nafte i prirodnog plina u djelovima Rusije na prostoru Arktika

Izvor: URL 8

Međutim, postoji jasan sukob između ekonomskih i okolišnih ciljeva. Rast industrijske aktivnosti u Arktiku može dovesti do nepopravljivih oštećenja spomenutih osjetljivih ekosustava, pogoršanja stanja lokalnih zajednica, kao i porasta zagađenja mora. Ove su zajednice često ovisne o prirodnim resursima Arktika, a neodrživi razvoj može ugroziti njihov način života. Stoga je ključno balansirati između gospodarskih interesa i očuvanja okoliša, kako bi se osigurao dugoročno održiv razvoj.

Uvođenje zelenih tehnologija u pomorsku industriju, poput ekološki prihvatljivih goriva i hibridnih pogonskih sustava, igra ključnu ulogu u smanjenju emisija stakleničkih plinova i očuvanju krhkih arktičkih ekosustava. Hibridni brodovi koji koriste vodik ili električnu energiju mogu smanjiti emisije gotovo na nulu, čime se minimalizira štetan utjecaj pomorskih operacija na okoliš. Iako su početni troškovi implementacije ovih inovacija visoki, dugoročne koristi, poput smanjenja operativnih troškova i očuvanja okoliša, nadmašuju te početne investicije, čineći ih održivim i sigurnim izborom za buduće generacije.

Ove mjere omogućuju sigurnu i održivu trgovinu kroz arktičke vode, istovremeno pružajući okvir za zaštitu prirodnih resursa i očuvanje lokalnih zajednica koje ovise o ovom krhkom, ali iznimno važnom području.

6.2. Tehnološke inovacije u prijevozu LNG-a

Napredak tehnologije brodogradnje i novi modeli automatiziranih brodskih sustava opisanih ranije u radu, za smanjenje emisija, poboljšanom izolacijom spremnika i naprednim

navigacijskim sustavima, što omogućuje preciznije planiranje ruta i smanjenje potrošnje goriva. S obzirom na to da je teret (LNG) osjetljiv na toplinu i mora se održavati na vrlo niskim temperaturama, inovacije u dizajnu kriogenih spremnika omogućuju učinkovitije i sigurnije skladištenje LNG-a, smanjujući gubitke i povećavajući energetske efikasnost. Osim toga, novi materijali koji se koriste u izgradnji ovih spremnika poboljšavaju izolaciju, čime dodatno smanjuju rizik od curenja ili ispuštanja plina. Ovi brodovi opremljeni su specijaliziranim trupovima ojačanim za lomljenje leda, što omogućuje kontinuiran transport čak i u najsurovijim uvjetima. To je posebno važno za sjeverne plovne puteve, gdje se zbog klimatskih promjena otvaraju nove trgovačke rute, ali i povećava rizik za pomorske operacije. Nadalje, osim prijevoza ovi brodovi kao pogonsko gorivo koriste sam plin koji prevoze, što čini ove brodove znatno ekološki prihvatljivijima u usporedbi s tradicionalnim brodovima na dizelski pogon.

Takve inovacije pridonose očuvanju arktičkog ekosustava, ali i povećavaju ekonomsku isplativost transporta (Wang, 2024). Korištenje laganih, izdržljivih materijala i uvođenje automatizacije smanjuju potrošnju goriva i povećavaju sigurnost. S obzirom na rastući promet LNG brodova, prilagodba dizajna i navigacijskih sustava ekološkim standardima postaje nužna. Ovi sustavi pomažu u prepoznavanju ekoloških rizika prije nego što nastanu ozbiljne posljedice i omogućuju LNG industriji da integrira, te uskladi ekonomske i ekološke ciljeve u svoje poslovne strategije (Pongrácz i sur., 2020). Fluktuacije u cijenama plina kao čišćeg i održivijeg izvora energije, visoki troškovi osiguranja i potreba za naprednom tehnologijom mogu utjecati na profitabilnost operacija (Goodsite i sur., 2023). Potrebna je detaljna analiza troškova i koristi kako bi se utvrdila isplativost proširenja aktivnosti na ovom području.



Slika 33. Prikaz kretanja LNG broda „OB River“ kroz led u Arktiku, 2012. godina. (Dynagas Ltd putem EPA)

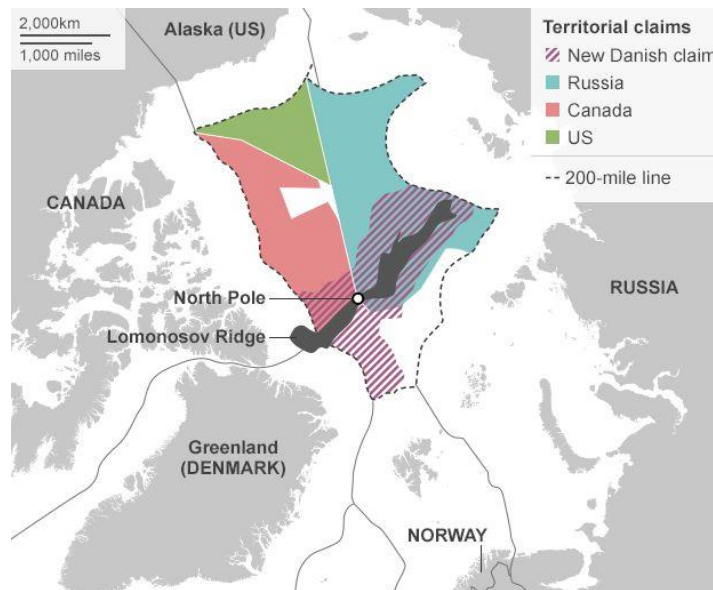
Izvor: URL 26

6.3. Buduće perspektive Arktičkih pomorskih ruta

Buduće perspektive arktičkih pomorskih ruta otvaraju niz izazova, ali i prilika koje zahtijevaju pažljivu i dugoročnu strategiju razvoja. S klimatskim promjenama koje postupno smanjuju led u arktičkim vodama, ove rute postaju sve dostupnije, omogućujući otvaranje novih trgovačkih putova i skraćivanje vremena transporta između Azije, Europe i Sjeverne Amerike. Međutim, s tim dolaze i brojni izazovi, posebno u pogledu očuvanja osjetljivih arktičkih ekosustava koji su ključni za biološku raznolikost i stabilnost ovog područja.

Osim ranije spomenutih procjena IMO-a za vrijeme plovidbe Arktikom u odnosu na tradicionalne rute koje se može skratiti za 30-40%, što donosi značajne ekonomske prednosti, posebno za prijevoz robe poput LNG-a, studija objavljena u časopisu „Marine Policy, 2020., ističe kako ekstremni vremenski uvjeti, nerazvijena infrastruktura i složeni sigurnosni protokoli predstavljaju glavne prepreke. Osim toga, geopolitički odnosi, posebno u vezi s ruskom kontrolom nad dijelovima rute, također utječu na buduću upotrebu ovog morskog puta.

Razvoj prometne infrastrukture na Arktiku zahtijeva sveobuhvatna i inovativna rješenja koja uzimaju u obzir klimatske, ekološke, ali i gospodarske aspekte. Arktičke rute koje su nekada bile nepristupačne sada postaju potencijalno glavne trgovačke arterije. No, kako bi se osigurala održivost ovog razvoja, potrebno je integrirati inovacije koje smanjuju štetne utjecaje na okoliš. Brodovi na obnovljive izvore energije, poput onih koji koriste vodik ili električnu energiju, mogu igrati ključnu ulogu u smanjenju emisija i zaštiti osjetljivih ekosustava. Uz to, sustavi za smanjenje emisija stakleničkih plinova, napredna tehnologija za filtriranje štetnih tvari iz ispušnih plinova, te korištenje hibridnih goriva mogu znatno pridonijeti ekološkoj održivosti. Suradnja između znanstvenika, industrije i lokalnih zajednica ključna je za uspostavljanje zajedničkih standarda za sigurnost plovidbe i očuvanje okoliša. Znanstvena istraživanja i tehnološke inovacije moraju biti usmjerene prema razvoju ekološki prihvatljivih rješenja, dok lokalne zajednice, uključujući autohtone narode, trebaju biti aktivni sudionici u odlučivanju o budućnosti svojih teritorija. Obrazovanje i podizanje svijesti o važnosti očuvanja Arktika mogu pomoći u kreiranju politika koje uravnotežuju gospodarski razvoj s potrebom za zaštitom prirode (Erokhin i sur., 2018). Primjer suradnje na koje upozorava Arktičko vijeće (engl. Arctic Council), je sporazum o prevenciji nesreća u arktičkim vodama, koji su potpisale arktičke države (SAD, Rusija, Kanada, Norveška, Danska, Island, Švedska i Finska) s ciljem boljeg praćenja brodova i prevencije nesreća. Osim toga, lokalne zajednice, uključujući autohtone narode, igraju ključnu ulogu u praćenju utjecaja plovidbe na okoliš.



Slika 34. Teritorijalne pretenzije Arktičkog područja

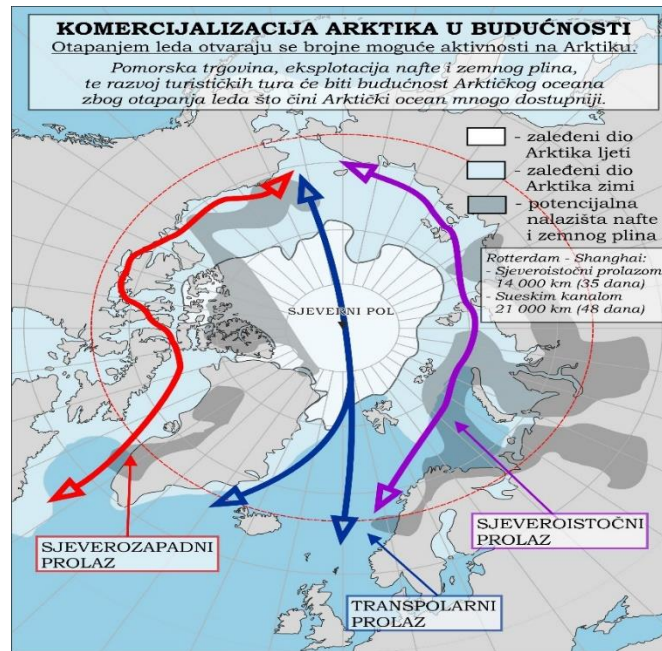
Izvor: URL 27

Gospodarske koristi koje donose arktičke pomorske rute često su primamljive za mnoge zemlje i korporacije, ali stvarna cijena često se ogleda u šteti nanesejoj osjetljivim ekosustavima. Stoga je važno razviti adaptacijske strategije koje će omogućiti sigurnu i održivu plovidbu, uz minimalan utjecaj na okoliš. Ulaganje u istraživanje klimatskih promjena i kontinuirano praćenje stanja na Arktiku može pomoći u predviđanju i ublažavanju mogućih ekoloških katastrofa.

Geopolitički, istraživanje iz 2020. godine, objavljeno u „Geopolitics“ časopisu, analizira kako porast interesa za arktičke pomorske rute povećava napetosti između velikih sila poput Rusije, Kine i SAD-a. Kineski projekt "Polarni Put Svile" (engl. Polar Silk Road), dio inicijative "Jedan pojas, jedan put", cilja na otvaranje novih trgovačkih ruta kroz Arktik, a Kina planira povećati svoje investicije u infrastrukturu i istraživanje tih ruta. Ova suradnja i interes donose nove ekonomske prilike, ali i izazivaju zabrinutost zbog militarizacije (rastuća vojna prisutnost, odnosno proces u kojem određeno područje, društvo ili sektor postaje pod većim utjecajem ili kontrolom vojske, ili u kojem se povećava vojna prisutnost i vojni resursi) i povećanog utjecaja Kine u Arktiku.

Kada je riječ o tehnološkim inovacijama, istraživanje koje su proveli Fridtjof Nansen Institute i Nordijski savjet ministara (engl. Nordic Council of Ministers) naglašava važnost razvoja brodova pogonjenih obnovljivim izvorima energije, poput LNG brodova s hibridnim pogonima (kombinacija vodika i električne energije). Ova tehnologija je već u fazi testiranja i može igrati ključnu ulogu u smanjenju emisija stakleničkih plinova. Jedan značajan primjer je

projekt "Clean Arctic Alliance", koji se zalaže za zabranu korištenja teških goriva u arktičkim vodama, što bi smanjilo rizik od ekoloških katastrofa. Osim toga, projekt "ECO Arctic", koji je pokrenut u suradnji nekoliko europskih država, razvija tehnologiju za smanjenje emisija i povećanje sigurnosti plovidbe kroz sofisticirane sustave satelitskog praćenja i prediktivne modele vremena i stanja leda.



Slika 35. Komercijalizacija Arktika u budućnosti (Izvor: Business Insider Australia)

Izvor: URL 28

7. ZAKLJUČAK

Tema diplomskog rada fokusira se na razvoj plovidbenih ruta u Arktiku, koje postaju sve važnije zbog rastuće globalne potražnje za energijom, posebno za LNG. Klimatske promjene omogućavaju plovidbu kroz rute koje su prethodno bile zatvorene, čime se skraćuje vrijeme putovanja između europskog i azijskog kontinenta. Prema nedavnim analizama, Čukotsko more predstavlja najveće izazove za sigurnu plovidbu. Povećanje troškova na tradicionalnim pomorskim pravcima, kao što je Crveno more (Sueski kanal) ili Panamski kanal, naglašava potrebu za pronalaženjem alternativnih ruta. Razvoj autonomnih brodova doprinosi poboljšanju sigurnosti i učinkovitosti plovidbenih operacija. Međutim, rast prometa u ovim područjima dovodi do većih emisija štetnih plinova, što stvara potrebu za održivijim pristupima. Budući napori trebali bi se usmjeriti na interdisciplinarna istraživanja i međunarodnu suradnju kako bi se odgovorilo na ove kompleksne i zahtjevne izazove.

Danas je neosporno da globalno zatopljenje postoji, jer su njegove posljedice prisutne svakodnevno u životu na Zemlji. Globalno klimatsko zagrijavanje uzrokovano povećanjem emisija stakleničkih plinova (posebno ugljikova dioksida) iz ljudskih aktivnosti poput korištenja fosilnih goriva i industrije, je dovelo je do porasta prosječne temperature planeta za oko 1,1°C od predindustrijskog razdoblja (1850-1900), te su u usporedbi s prošlim istraživanjima, znanstvenici utvrdili da je posljednje desetljeće (2011-2020) bilo najtoplije desetljeće ikad zabilježeno, što je jasan znak ubrzanog globalnog zagrijavanja. Na primjer, u 19. stoljeću, prosječna globalna temperatura bila je oko 13,7°C, što pokazuje značajan porast u posljednjih 150 godina. Prosječna globalna temperatura Zemlje danas iznosi oko 15°C, dok je prosječna temperatura oceana u 2021. godini iznosila približno 16,9°C, što je najviša zabilježena vrijednost u povijesti. Istraživanje NASA-e iz 2020. godine pokazalo je da je Arktik izgubio oko 13% svoje površine leda svakog desetljeća od kraja 20. stoljeća, što je dovelo do značajnog smanjenja ledenog pokrova i ubrzanog topljenja ledenjaka.

Ovaj porast temperature ima ozbiljne posljedice, uključujući sve brže otapanje ledenjaka na Arktiku, što rezultira smanjenjem površine leda i gubitkom staništa za brojne vrste. Također, toplinski valovi postaju sve češći i intenzivniji, ugrožavajući ljudsko zdravlje i sigurnost. Jedna od najalarmantnijih posljedica je podizanje razine mora. Prema podacima Međuvladinog panela za klimatske promjene (IPCC), razina mora je od 1900. godine porasla za oko 20 cm, a taj porast se ubrzava. U razdoblju između 1993. i 2018. godine, razina mora porasla je za dodatnih 7,5 cm, što je gotovo dvostruko brže nego u prethodnim desetljećima, dok bi se do kraja ovog

stoljeća, prema najnovijim projekcijama IPCC-a, razina mora mogla bi porasti između 30 i 110 cm, ovisno o razini budućih emisija stakleničkih plinova. Ovo podizanje razine mora prijeti obalnim zajednicama diljem svijeta, povećavajući rizik od poplava, erozije obale i gubitka poljoprivrednog zemljišta, što će imati dugoročne ekonomske i ekološke posljedice.

Nadalje, klimatske promjene u Arktiku imaju značajan utjecaj na pomorsku navigaciju. Smanjenje ledenog pokrivača omogućuje lakšu plovidbu kroz sjeverne prolaze, što otvara nove mogućnosti za međunarodnu trgovinu i transport. Međutim, ova promjena donosi i izazove, kao što su povećani rizici od zagađenja i pritisak na ekosustave. Pristup novim morskim rutama omogućava proširenje međunarodne trgovine i transporta resursa. U isto vrijeme, važno je investirati u modernizaciju brodova i lučke infrastrukture, te razviti održive strategije koje uključuju ekološku zaštitu i međunarodnu suradnju.

Razumijevanje ekoloških posljedica plovidbe LNG brodova kroz Arktik postaje sve važnije zbog globalnih klimatskih promjena i povećane aktivnosti u tom osjetljivom području. Glavni izazovi uključuju utjecaj na lokalnu floru i faunu, te potencijalne probleme poput eutrofikacije i zagađenja izazvanog transportom LNG-a. Istraživanja sugeriraju da bi proširenje plovidbe i eksploatacije resursa, iako ekonomski korisno, moglo imati štetne posljedice za arktičke ekosustave. Stoga je od ključne važnosti razviti održive strategije koje balansiraju ekonomske koristi i očuvanje okoliša, kako bi se zaštitili ranjivi arktički ekosustavi.

Održiva upotreba pomorskih ruta u Arktiku postaje sve značajnija zbog globalnih promjena i rastuće potražnje za prirodnim plinom. Balansiranje ekonomskih interesa s očuvanjem osjetljivih ekosustava zahtijeva pragmatičan i odgovoran pristup. Potrebno je uspostaviti jasne smjernice za brodove koji prevoze LNG, uključujući tehničke aspekte i procjene ekoloških rizika. Međunarodni standardi mogu značajno pridonijeti očuvanju resursa i bioraznolikosti. Uključivanje lokalnih zajednica u donošenje odluka može osigurati održiviji razvoj i smanjiti sukobe. Za održivost pomorskog prometa važno je ulagati u infrastrukturu i tehnologije koje minimiziraju ekološki utjecaj, čime se osigurava budućnost Arktika i može poslužiti kao model za druge regije.

Smanjenje morskog leda, uzrokovano globalnim zatopljenjem, produljuje sezonu plovidbe, no također donosi rizike poput ekstremnih vremenskih uvjeta i nepredvidivih promjena. Stoga, LNG brodovi moraju biti opremljeni naprednim tehnologijama za sigurno plovljenje kroz ove promjenjive uvjete. Emisije iz brodova mogu dodatno pogoršati kvalitetu zraka i štetiti osjetljivim arktičkim ekosustavima. Kako bi se smanjio utjecaj na okoliš i očuvala

održivost, potrebno je implementirati sveobuhvatne strategije koje uključuju tehnološke prilagodbe i zaštitne mjere. Sezonske promjene u debljini leda također utječu na plovnost. Obično je to moguće tijekom ljetnih mjeseci, od srpnja do rujna, kada je arktički led najslabiji i najtanji te se povlači dovoljno da omogući pomorski promet, međutim zbog sezonskog topljenja leda, plovidba kroz Arktičke rute može varirati svake godine, a sve ovisi o specifičnim uvjetima leda u tom trenutku. Iako se uvjeti poboljšavaju ljeti, ledene sante i ledenjaci i dalje mogu predstavljati prijetnju, a navigacija zahtijeva pažljivo planiranje i praćenje. Razumijevanje klimatskih promjena i njihova primjena u planiranju plovidbe ključni su za osiguranje sigurnosti i održivosti plovnih ruta u Arktiku. Također, usklađivanje s međunarodnim regulativama i suradnja s lokalnim zajednicama od vitalne su važnosti za zaštitu okoliša i očuvanje prirodnih resursa.

NWP prolazi sjevernim dijelom Kanade, odnosno započinje u Atlantiku, te prelazi kroz razne arktičke zaljeve i prolaze, uključujući Baffinov zaljev, Lancasterov prolaz, Barrowov prolaz i Amundsenov prolaz, te izlazi u Pacifik i omogućuje skraćivanje pomorskih putanja između europskog kontinenta i azijskog kontinenta za oko 1.500 milja (2.400 kilometara) u odnosu na tradicionalne rute koje prolaze kroz Sueski kanal ili Panamski kanal (približno oko 40% kraći put), dok NSR koja prolazi duž obale Rusije od Barentsovog mora na zapadu do Beringovog prolaza na istoku, omogućuje skraćivanje istih pomorskih putanja za oko 1.800 milja (2.900 kilometara) u odnosu na spomenute tradicionalne rute. Zbog plićeg mora i bržeg otapanja leda, NSR je najdostupniji te predstavlja perspektivnu opciju za komercijalnu plovidbu, dok NWP ostaje vrlo zakrčen ledom zbog složene geografije i dubljeg mora, s neizvjesnom budućnošću. TSR, koja prolazi izravno preko sjevernog pola, omogućuje navedeno pomorsko putovanje dodatno skraćeno za otprilike 2.500 milja (4.000 kilometara) u odnosu na prethodne rute arktičkog akvatorija zbog sve većeg značaja klimatskih promjena ali još uvijek zahtijeva prilagodbu najnovije navigacijske tehnologije zbog ekstremnih uvjeta odnosno debelog trajnog leda, ali bi mogao postati značajan u vrlo dalekoj budućnosti.

LITERATURA

1. Knjige

1. Laurence C. Smith, Scott R. Stephenson, & John A. Agnew (2020) "Divergent long-term trajectories of human access to the Arctic"
2. J. Bhagwat (2023), "Maritime Shipping in the Arctic: Challenges and Opportunities to Improve Safety Must Be Reflected in the State's Transport Policy"
3. P. Gudev (2024), "The Conflict Potential of the Arctic: Myth or Reality?"
4. Martin Henke, Tyler W. Miesse, Andre de Souza de Lima, Celso Ferreira, Thomas Ravens, Ralph Pundt (2024), "Evolving Arctic maritime hazards: Declining sea ice and rising waves in the Northwest Passage."
5. Valentina Gogoleva, N. Kirsanova, T. Zyabkina, Tatyana Dolgoplova (2023), "Prospects for the use of Arctic routes in the context of climate change and the implementation of the concept of sustainable development of the Arctic zone"
6. Ebru Caymaz (2024), "A research on the Turkish shipyards in the Arctic: Opportunities and challenges"
7. Howard Hume (1984), "A Comparative Study of the Northern Sea Route and the Northwest Passage"
8. Willy Østreg (2013-04-17), "The Natural and Societal Challenges of the Northern Sea Route", Springer Science & Business Media
9. David L. Vander-Zwaag, Cynthia Lamson (1990-03-01), "Challenge of Arctic Shipping", McGill-Queen's Press – MQUP
10. V. Romanyuk, V. Pishchalnik, D. Zarubina (2022), "Analysis of the ice cover variations in the arctic sea of Okhotsk based on aircraft and satellite observations"
11. Selina Agyemang Duah (2024), "Climate Change Adaptation to Local Transportation Risks Related to Climate Change in the Canadian Arctic"
12. Michael Schach (2018), "Impacts of an Ice-Free Northeast Passage on LNG Trading"
13. Ivana Kubat (2006), "Impact of Climate Change on Arctic Shipping"
14. Saeid Mokhatab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, David Wood (2013-10-15), "Handbook of Liquefied Natural Gas", Gulf Professional Publishing
15. Berg, H. (2018). "Arctic Shipping and the Role of AIS." *Journal of Marine Policy*, 95, str. 1-11
16. Hibler, W. D., & Lemke, P. (2013). "Modeling the Arctic Sea Ice System." In *Arctic Climate Change: An Assessment of the Current State of Knowledge*.

17. Harris, C. (2018). "The Rise of Unmanned Surface Vehicles: Applications and Challenges." *Journal of Marine Technology*, 33(2), str. 45-59.
18. Mawuli Afenyo (2024), "Safe and Sustainable Arctic Shipping Management and Development"
19. John L. Woodward, Robin Pitbaldo (2010-03-25), "LNG Risk Based Safety", John Wiley & Sons
20. Michele Fiorini, Alexandra Middleton (2024), "Geopolitics of Arctic Shipping - Focus on the Northern Sea Route", str. 195-200
21. E. Manole, Francia Kinchington (2020), "Under whose flag? The race to dominate natural resources: an examination of the evolving power dynamics of superpowers and flag protectionism on global trade and maritime security"
22. B. Wei, E. Mamliev, F. M. Mustafin, E. A. Lobova, O. F. Mustafin (2019), "Reliable and safe energy resources from Russia to China"
23. Oleg Tarovik (2024), "A benchmark study on ship speed prediction models in Arctic conditions: machine learning, process-based and hybrid approaches"
24. V. Kalyu, D. A. Smirnov, V. Tarovik, M. Sergeev, V. Petrova (2023), "The environmental safety of the Russian arctic shelf waters and improving the safety of marine ecosystems by reducing the noise pollution"
25. Ship & Ocean Foundation (Tokyo, Japan) (2001), "Hokkyokukai koro"
26. E. Olkhovik, E. V. Andreeva, A. Tezikov (2019), "Ice influence on forming shipping routes in the water area of the Northern sea route"
27. E. Olkhovik, *Inland Shipping* (2018), "Analysis of speed regime LNG-tankers in the Northern sea route in period of winter navigation 2017-18", str. 300-308
28. Romain Chuffart (2024), "Rethinking the exercise of sovereignty in the Anthropocene: From extraction to environmental protection in Arctic Svalbard"
29. Aldo Chircop, Floris Goerlandt, Claudio Aporta, Ronald Pelot (2020-08-11), "Governance of Arctic Shipping", Springer Nature
30. James Kraska (2014), "Asian States in U.S. Arctic Policy: Perceptions and Prospects", str. 14-21
31. Achilleas Grigoriadis (2024), "Quantitative impact of decarbonization options on air pollutants from different ship types"
32. Peter Lemke, Hans-Werner Jacobi (2011-11-22), "Arctic Climate Change", Springer Science & Business Media

33. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2022-05-19), "The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate", Cambridge University Press
34. Elena Rovenskaya (2024), "Future scenarios of commercial freight shipping in the Euro-Asian Arctic"
35. A. Knight, J. Haste (2022), "The Danger of Emergent Opportunities: Perverse Incentives, Climate Change, and Arctic Shipping"
36. D. Sharapov (2023), "Northern Sea route and climate change"
37. D. Sharapov (2023), "Arctic Ice Changes and Global Warming"
38. D. Sharapov (2023), "Ice models for Arctic structures"
39. J. Morten, P. Buchanan, C. Egevang, I. Glissenaar, S. Maxwell, N. Parr, J. Screen, Freydis Vigfúsdóttir, N. Vogt-Vincent, Daniel A Williams, Ned C. Williams, M. Witt, L. Hawkes, William Thurston (2023), "Global warming and arctic terns: Estimating climate change impacts on the world's longest migration"
40. Elena A. Grigorieva (2024), "Climate Change and Human Health in the Arctic: A Review"
41. Shari Fox, Alex Crawford, Michelle R. McCrystall, J. Stroeve, Jennifer Lukovich, Nicole Loeb, Jerry Natanine, M. Serreze (2023), "Extreme Arctic Weather and Community Impacts in Nunavut: A Case Study of One Winter's Storms and Lessons for Local Climate Change Preparedness"
42. Adolf K. Y. Ng, Austin Becker, Stephen Cahoon, Shu-Ling Chen, Paul Earl, Zaili Yang (2015-08-14), "Climate Change and Adaptation Planning for Ports", Routledge
43. Olivia Linke, N. Feldl, J. Quaas (2023), "Current-climate sea ice amount and seasonality as constraints for future Arctic amplification"
44. Tobias Schneider, Isla Castañeda, Boyang Zhao, Sascha Krüger, Jeffrey Salacup, Raymond Bradley (2024), "Lake 578: Holocene-length multiproxy (temperature, productivity, anoxia) reconstructions; 2019-2024"
45. J. Overland (2023), "Super Climate Events"
46. J. Overland, T. Ballinger, J. Cohen, J. Francis, E. Hanna, Ralf Jaiser, Baek-Min Kim, Seong-Joong Kim, J. Ukita, T. Vihma, Muyin Wang, Xiangdong Zhang (2021), "How do intermittency and simultaneous processes obfuscate the Arctic influence on midlatitude winter extreme weather events?"

47. Shuting Zhai, Becky Alexander (2023), "Data to support: Anthropogenic influence on tropospheric reactive bromine since the pre-industrial: Implications for ice-core bromine trends"
48. Francesca Doglioni (2023), "Arctic sea level and geostrophic flow: from the development of a satellite-based pan-Arctic dataset to the study of the seasonality from satellite remote sensing and model output"
49. Giacomo DiTullio, Peter Lee (2024), "Phytoplankton Community Composition, High Arctic, August-September 2018"
50. Patricia Kaiser (2024), "Changing Arctic zooplankton: aspects of physiology, food web structures and connectivity"
51. Tingyu Gu (2024), "Augmented Net Primary Production in Arctic Ocean Sustained by Increased Subarctic Inflow Water"
52. Ran Tao (2024), "Spatial heterogeneity and seasonal evolution of surface properties and radiative fluxes of Arctic sea ice"
53. Rigoberto Moncada Lopez (2024), "Sea Ice Discrete Element Modeling: Melt and Fracture of Floes and Sheets"
54. S. Ogorodov, S. Badina, D. Bogatova (2023), "Sea Coast of the Western Part of the Russian Arctic under Climate Change: Dynamics, Technogenic Influence and Potential Economic Damage"
55. Elżbieta Łepkowska, Natalia Łatacz, Aleksandra Osika, Marta Chmielewska, Jacek Jania, Eigil Lippert, Mohit Phulara, Piotr Głowacki (2024), "Interdisciplinary Polar Studies (IPS-2023) Modular Meeting: Arctic Amplification-Glaciers-Environment. REPORT. Sosnowiec-Svalbard. 2023"
56. Matthew Boyer, Diego Aliaga, Jakob Boyd Pernov, H el ene Angot, Lauriane L. J. Qu el ever, Lubna Dada, Benjamin Heutte, Manuel Dall'Osto, David C. S. Beddows, Zo e Brasseur, Ivo Beck, Silvia Bucci, Marina Duetsch, Andreas Stohl, Tiia Laurila, Eija Asmi, Andreas Massling, Daniel Charles Thomas, Jakob Klen  N jgaard, Tak Chan, Sangeeta Sharma, Peter Tunved, Radovan Krejci, Hans Christen Hansson, Federico Bianchi, Katrianne Lehtipalo, Alfred Wiedensohler, Kay Weinhold, Markku Kulmala, Tuukka Pet j , Mikko Sipil , Julia Schmale, Tuija Jokinen (2023), "A full year of aerosol size distribution data from the central Arctic under an extreme positive Arctic Oscillation: insights from the Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate (MOSAIC) expedition"

57. M. Angelopoulos, P. P. Overduin, F. Miesner, M. Grigoriev, A. Vasiliev (2020), "Recent advances in the study of Arctic submarine permafrost", str. 442-453
58. M. Mellat, C. Brunello, M. Werner, Dorothea Bauch, E. Damm, M. Angelopoulos, Daiki Nomura, Jeffrey M. Welker, Martin Schneebeli, M. Granskog, Maria Hoerhold, Amy R. Macfarlane, Stefanie Arndt, H. Meyer (2024), "Isotopic signatures of snow, sea ice, and surface seawater in the central Arctic Ocean during the MOSAiC expedition"
59. Xiaomin Chang, Tongliang Yan, Guangyu Zuo, Qing Ji, Ming Xue (2024), "Changes in Beaufort High and Their Impact on Sea Ice Motion in the Western Arctic during the Winters of 2001–2020s"
60. Aowen Chen, Weiqi Chen, Jian Zheng (2023), "Arctic Route Planning and Navigation Strategy: The Perspective of Ship Fuel Costs and Carbon Emissions"
61. Adam Young, Melissa Chipman (2015), "Collaborative Research: Integrating paleoecological analysis and ecological modeling to elucidate the responses of tundra fire regimes to climate change"
62. Johannessen, Ola M., Shalina, Elena V. (2023), "Will the summer sea ice in the Arctic reach a tipping point?"
63. Miyase Christensen, Annika E. Nilsson, N. Wormbs (2013-10-31), "Media and the Politics of Arctic Climate Change", Springer
64. Susanna Winkelbauer (2024), "Diagnostic evaluation of coupled Arctic energy and water budgets from observations and climate models"
65. Kevin D Heaney, Lora J Van Uffelen 1, Eva-Marie Nosal, Bruce M Howe, Glenn S Carter, Peter F Worcester, Matthew A Dzieciuch, Richard L Campbell, Patrick S Cross (2013), "Estimating uncertainty in subsurface glider position using transmissions from fixed acoustic tomography sources"
66. Sergio A. Sejas, Patrick C. Taylor & Ming Cai (2018), "Unmasking the negative greenhouse effect over the Antarctic Plateau"
67. F. Samsel, Gregory Abram, Lauren Gant, W. Weijer, M. Veneziani (2023), "Atmospheric Rivers: Changes in Arctic Sea Ice"
68. Zhili Xu (2024), "Optimization of composite ecological network patterns in Anhui Province based on multi-functional coupling of ecology-climate-economy"
69. Daniel Gillis, Charles Minns, Steven Campana, Brian Shuter (2024), "Major changes in fish thermal habitat diversity in Canada's Arctic lakes due to climate change"
70. Arianna Lucarini (2024), "Artificial intelligence and Eddy covariance: A review"

71. Gisele Arruda (2018-08-06), "Renewable Energy for the Arctic", Routledge
72. Gisele Arruda, Sebastian Krutkowski (2017), "Social impacts of climate change and resource development in the Arctic: Implications for Arctic governance", str. 277-288
73. Frédéric Lasserre, Olivier Faury (2019-09-05), "Arctic Shipping", Routledge
74. Machiel Lamers, Paula Duske & Linde van Bets (2018), "Understanding user needs: a practice-based approach to exploring the role of weather and sea ice services in European Arctic expedition cruising"
75. Monica Tennberg (2017-11-01), "The Northern Forum Arctic Council"
76. Paul Arthur Berkman (2010), "Environmental Security in the Arctic Ocean", Routledge
77. Ryan Wen Liu (2024), "From ports to routes: Extracting multi-scale shipping networks using massive AIS data"
78. Yuejun Liu (2024), "A Dynamic Bayesian Network model for ship navigation risk in the Arctic Northeast Passage"
79. Young-Sook Lee, David Weaver, Nina K Prebensen (2017-03-10), "Arctic Tourism Experiences", Cabi
80. Yoshifumi Tanaka, Rachael Lorna Johnstone, Vibe Ulfbeck (2023-07-25), "The Routledge Handbook of Polar Law", Taylor & Francis
81. Nong Hong (2020-04-13), "China's Role in the Arctic", Routledge
82. Gesa Praetorius, Charlott Sellberg and Riccardo Patriarca (2023-07-19), "Human Factors in Transportation", AHFE International
83. S. Badina, A. Pankratov (2024), "Coastal Natural and Economic Systems of the Pechora-Kara Region in the Context of Climate Change Risks"
84. Ellen Wang (2024), "A study on Arctic sea ice dynamics using the continuous spin Ising model"
85. Shuying Wang (2024), "Projected navigability of Arctic shipping routes based on climate model FIO-ESM v2.1"
86. Eva Pongrácz, Victor Pavlov, Niko Hänninen (2020-03-06), "Arctic Marine Sustainability", Springer Nature
87. Michael Goodsite, Niklas Swanstrom (2023-03-23), "Towards A Sustainable Arctic: International Security, Climate Change And Green Shipping", World Scientific
88. Erokhin, Vasili, Gao, Tianming, Zhang, Xiuhua (2018-12-28), "Handbook of Research on International Collaboration, Economic Development, and Sustainability in the Arctic", IGI Global

2. Internet izvori

1. URL 1 https://www.google.com/imgres?q=arctic%20sea%20routes&imgurl=https%3A%2F%2Fwww.economist.com%2Fcontent-assets%2Fimages%2F20240120_EPM918.png&imgrefurl=https%3A%2F%2Fwww.economist.com%2Fthe-economist-explains%2F2024%2F01%2F18%2Fhow-viable-is-arctic-shipping&docid=B2IOOGwMr_fLoM&tbnid=Pp1SOD0UJXx1zM&vet=12ahUKEwjNn5nliJqIAxWkyLsIHQs4DIMQM3oECEwQAA..i&w=608&h=551&hcb=2&ved=2ahUKEwjNn5nliJqIAxWkyLsIHQs4DIMQM3oECEwQAA, (29.08.2024.)
2. URL 2 <https://www.kek.hr/uvod-u-polarne-krajeve/> - Klub za ekspedicionizam i kulturu – KEK (29.08.2024)
3. URL 3 <https://arcticportal.org/shipping-portlet/shipping-routes> (01.09.2024)
4. URL 4 https://hr.wikipedia.org/wiki/Isto%C4%8Dnosibirsko_more#/media/Datoteka:East_Siberian_Sea_map_hr.svg (10.09.2024)
5. URL 5 <https://www.global.hokudai.ac.jp/blog/development-of-arctic-sea-routes-and-environmental-conservation/> (29.08.2024)
6. URL 6 <https://www.tradewindsnews.com/gas/sovcomflot-video-captures-february-first-northern-sea-route-voyage-for-lng-carrier/2-1-964206> (02.09.2024.)
7. URL 7 <https://www.tradewindsnews.com/gas/new-technology-could-extend-lng-tank-inspections-intervals-study-finds/2-1-1608574> (05.10.2024)
8. URL 8 <https://www.thearcticinstitute.org/arctic-maps/> (29.08.2024.)
9. URL 9 <https://www.livescience.com/arctic-ice-arches-melting-fast.html> (29.08.2024)
10. URL 10 <https://biophilesblog.wordpress.com/2015/09/08/getting-around/> (29.08.2024)
11. URL 11 <https://schracktrainingcenter.com/kb/2030-arktisk-bez-leda/> (05.10.2024)
12. URL 12 <https://www.grida.no/resources/7748> (27.08.2024)
13. URL 13 <https://jethrojeff.com/> (02.09.2024)
14. URL 14 <https://www.kek.hr/autohtoni-narodi-arktika/> (29.08.2024)

15. URL 15 <https://www.montagna.tv/214200/riconoscere-lanima-gemella-per-gli-orsi-polari-il-segreto-e-nella-puzza-di-piedi/> (29.08.2024)
16. URL 16 <https://polarresearch.net/index.php/polar/article/view/3202/html> , (29.08.2024.)
17. URL 17 <https://humanprogress.org/is-the-arctic-ice-about-to-disappear/> (29.08.2024)
18. URL 18 <https://www.stem.ba/ekologija/tutorijali/item/336-albedo> - STEM (science, technology, engineering, mathematics), Morski led (01.09.2024.)
19. URL 19 <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/arctic-resources> (27.08.2024)
20. URL 20 <https://www.theguardian.com/environment/2023/jun/06/too-late-now-to-save-arctic-summer-ice-climate-scientists-find> (01.09.2024.)
21. URL 21 <https://arctic.noaa.gov/report-card/report-card-2022/satellite-record-of-pan-arctic-maritime-ship-traffic/> (02.09.2024.)
22. URL 22 <https://osi-saf.eumetsat.int/> (01.09.2024.)
23. URL 23 <https://faktograf.hr/2024/03/22/arkticky-led-se-malo-oporavio-ali-trend-ostaje-negativan/> (01.09.2024.)
24. URL 24 <https://www.bookharbour.com/admiralty-chart-4006-a-planning-chart-for-the-arctic-region> (05.10.2024)
25. URL 25 <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-arctic-sea-ice-summer-minimum> (27.08.2024)
26. URL 26 <https://www.nbcnews.com/news/all/global-warming-open-crazy-shipping-routes-across-arctic-flna1c8678881> (29.08.2024)
27. URL 27 <https://www.bbc.com/news/world-europe-30481309> (27.08.2024)
28. URL 28 <https://www.kek.hr/buducnost-polarnih-krajeva/> (05.10.2024)
29. URL 29 <https://www.global.hokudai.ac.jp/blog/development-of-arctic-sea-routes-and-environmental-conservation/> (29.08.2024)
30. URL 30 <https://humanprogress.org/is-the-arctic-ice-about-to-disappear/> (29.08.2024)
31. URL 31 <https://marine.copernicus.eu/hr/explainers/why-ocean-important/sea-ice> Copernicus Programme 2014, Morski led (01.09.2024)

32. URL 32 <https://www.saatchiart.com/en-hr/art/Photography-Walrus-Svalbard-Norway/1611480/9463993/view> (29.08.2024)
33. URL 33 <https://www.britannica.com/science/iceberg/Arctic-icebergs> (29.08.2024)
34. URL 34 <https://www.tradewindsnews.com/gas/russian-fsru-in-chinese-yard-receives-clearance-to-take-northern-sea-route/2-1-1682892> (29.08.2024)
35. URL 35 <https://www.tradewindsnews.com/gas/modern-shadow-lng-carrier-leaves-northern-sea-route-with-russian-cargo/2-1-1694590> (29.08.2024)
36. URL 36 <https://www.global.hokudai.ac.jp/blog/development-of-arctic-sea-routes-and-environmental-conservation/> (29.08.2024)
37. URL 37 <https://eucbeniki.sio.si/geo8/2596/index1.html> (29.08.2024)
38. URL 38 <https://hr.radiopachone.org/ono-sto-razlikuje-sjeverni-pol-od-juznog-pola-znacajke-i-razlike-877> (29.08.2024)
39. URL 39 <https://vk-spy.ru/bs/the-prose-of-life/lyubopytnye-fakty-o-yuzhnom-i-severnom-polyusah-planety-zemlya/> (29.08.2024)
40. URL 40 <https://www.britannica.com/science/iceberg/Iceberg-distribution-and-drift-trajectories> (29.08.2024)
41. URL 41 <https://www.miragenews.com/sea-level-rises-from-melting-ice-massively-556460/> (29.08.2024)
42. URL 42 <https://nsidc.org/search/node> (27.08.2024)
43. URL 43 <https://greatwhitecon.info/resources/arctic-sea-ice-graphs/> (27.08.2024)
44. URL 44 <https://www.statista.com/chart/19104/extend-of-arctic-sea-ice/> (27.08.2024)
45. URL 45 <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-arctic-sea-ice-summer-minimum> (27.08.2024)
46. URL 46 <https://sites.google.com/view/asigraphs/home?authuser=1> (27.08.2024)
47. URL 47 <https://www.cambridge.org/us/universitypress/subjects/earth-and-environmental-science/climatology-and-climate-change/arctic-climate-impact-assessment-scientific-report> (29.08.2024) - Arctic Climate Impact Assessment (ACIA) Report
48. URL 48 <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/> (30.08.2024)

49. URL 49 https://report.ipcc.ch/ar6syр/pdf/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf (30.08.2024) -
Izvještaj Međuvladinog panela za klimatske promjene (IPCC) za 2022. godinu (Šesti
izvještaj o procjeni klimatskih promjena (AR6))
50. URL 50 <https://publications.gc.ca/site/eng/9.842584/publication.html> (30.08.2024)
-(1981), "Arctic Pilot Project"
51. URL 51 <https://www.pame.is/> (29.08.2024)
52. URL 52 <https://www.kek.hr/zivotinjski-svijet-arktika-antarktike/> (29.08.2024)
53. URL 53 <https://www.thearcticinstitute.org/wp-content/uploads/2016/07/Summer-Ice-Extent-1970-2100-high-res.jpg> (27.08.2024)
54. URL 54 <https://www.nature.com/articles/s43247-022-00498-3> (05.10.2024)

POPIS SLIKA

Slika 1. Arktičke pomorske rute.....	4
Slika 2. Karta Arktika.....	7
Slika 3. Ledeni brijegovi – klasifikacija (Izvor: Polar Discovery)	9
Slika 4. Tradicionalne i Arktičke pomorske rute	11
Slika 5. Položaj Istočnosibirskog mora	12
Slika 6. Ruski nuklearni ledolamac. (Fotografija Hiroshija Utsumija, Instituta za arktička istraživanja i promatranja).....	13
Slika 7. Prikaz ledolomca u suradnji s ARC7 LNG brodom	16
Slika 8. Prikaz tanka za prijevoz tereta s LNG broda (membranski oblik).....	17
Slika 9. Batimetrijska karta Arktika	18
Slika 10. Prikaz otapanja impozantnih ledeni stijena na Arktiku (preuzeto s: Paul Souders via Getty Images)	19
Slika 11. Arhipelag Svalbard nalazi se daleko iznad Arktičkog kruga i odvojen je od euroazijskog kopna otprilike 1000 km Barentsovim morem. Karta iz Owl and Mouse Educational Software.	24
Slika 12. Temperaturna anomalija za 2022. u odnosu na prosjek za razdoblje 1951. – 1980.	26
Slika 13. Predviđene promjene u arktičkoj klimi, 2090.....	27
Slika 14. Prikaz ljetnog razdoblja Arktičkog područja 2018. godine	29
Slika 15. Prikaz stanovništva Arktika (Izvor: Davor Rostuhar).....	30
Slika 16. Polarni medvjedi - Fotografija Unsplash, Hans Jurgen Mager	31
Slika 17. Karta koja prikazuje sva registrirana mjesta okupljanja morževa na Svalbardu. Mjesta označena crvenom bojom bila su zauzeta tijekom jedne ili obje zračne ankete provedene 2006. godine (prema Lydersen i sur., 2008.) i istraživanje 2012. godine. Zvezdice označavaju mjesta na kojima su bila prisutna mlada mladunčad tijekom jedne od anketa.	32
Slika 18. Predviđanje znanstvenika Peter Wadhams sa Sveučilišta Cambridge.....	34
Slika 19. Usporedba granica leda 1981.-2010. godine s današnjom situacijom	35
Slika 20. Arktičke zone permafrosta. Može biti različite dubine, od nekoliko metara do više stotina metara	36
Slika 21. PIOMAS Dnevni volumen leda na Arktiku u razdoblju od 1979. do 2023.....	37
Slika 22. PIOMAS Volumen leda na Arktiku u travnju i rujnu u razdoblju od 1979. do 2023.	38
Slika 23.1 i 23.2. Prikaz Albedo učinka	39

Slika 24. Područja podzemnih slojeva trenutnih i potencijalnih nalazišta prirodnog plina i nafte	41
Slika 25. Ljetni arktički led smanjio se za 13% svakog desetljeća otkako su satelitski podaci započeli 1979. godine. (Izvor: Dirk Notz/AP)	42
Slika 26. Model pomorskog prometa u Arktičkom oceanu (Smith i Stephenson 2013) predviđa trgovačke rute koje će se otvoriti kako se morski led smanjuje sredinom 21. stoljeća, s polarnim brodovima koji su ojačani za led (narančasti) prema Međunarodnoj asocijaciji klasifikacijskih društava (IACS) i drugim vrstama brodova koje su dizajnirane za otvoreno more (plavi)	44
Slika 27. OSI SAF indeks leda – klimatski pokazatelj pokrivenosti morskog leda. Prikazuje više od 40 godina podataka o proširenju morskog leda u seriji grafovima	45
Slika 28. Grafički prikaz povećanja leda na Arktiku u prvih nekoliko mjeseci 2024. godine u odnosu na isto razdoblje prošlih šest godina	45
Slika 29. Proširenje arktičkog ljetnog leda 1970-2100.	48
Slika 30. ADMIRALTY pomorska karta 4006: Arktička regija.....	56
Slika 31. Opseg morskog leda na Arktiku pri kraju ljetne sezone topljenja svakog rujna od 1979. do 2023., prema satelitskim opažanjima. Ukupni opseg definiran je kao površina svih dijelova satelitske slike gdje je koncentracija leda najmanje 15 posto. Količina morskog leda koja preostane nakon ljetnog topljenja brzo opada. Grafika NOAA Climate.gov, na temelju podataka iz Nacionalnog centra za snijeg i led.....	59
Slika 32. Prikaz nalazišta nafte i prirodnog plina u djelovima Rusije na prostoru Arktika	61
Slika 33. Prikaz kretanja LNG broda „OB River“ kroz led u Arktiku, 2012. godina. (Dynagas Ltd putem EPA)	62
Slika 34. Teritorijalne pretenzije Arktičkog područja.....	64
Slika 35. Komercijalizacija Arktika u budućnosti (Izvor: Business Insider Australia)	65