

Analiza vremena neraspoloživosti operacija uslijed vremenskih prilika

Licul, Paolo

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:453251>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
DIPLOMSKI STUDIJ RAČUNARSTVA

Diplomski rad

**Analiza vremena neraspoloživosti operacija
uslijed vremenskih prilika**

Rijeka, Kolovoz 2024.

Paolo Licul

0069085613

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET
DIPLOMSKI STUDIJ RAČUNARSTVA

Diplomski rad

**Analiza vremena neraspoloživosti operacija
uslijed vremenskih prilika**

Mentor: Prof. dr. sc. Jerko Škifić

Rijeka, Kolovoz 2024.

Paolo Licul

0069085613

Rijeka, 15.03.2024.

Zavod: Zavod za računarstvo
Predmet: Platformske nezavisno programiranje

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Paolo Licul (0069085613)**
Studij: Sveučilišni diplomski studij računarstva (1400)
Modul: Programsko inženjerstvo (1441)

Zadatak: **Analiza vremena nerasploživosti operacija uslijed vremenskih prilika /
Weather standby analysis**

Opis zadatka:

Izraditi računalni program za analizu vremena nerasploživosti operacija uslijed vremenskih prilika s primjenom na kompleksne pomorske projekte. Analizirati i opisati metode određivanja nerasploživosti operacija, vodeći računa o parametrima karakterističnim za izvođenje pomorskih objekata: period, smjer i visina vala, trajanje operacije, položaj plovila, itd.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanja diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Zadatak uručen pristupniku: 20.03.2024.

Mentor:
prof. dr. sc. Jerko Škifić

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:
prof. dr. sc. Miroslav Joler

Izjava o samostalnoj izradi rada

Izjavljujem da sam samostalno izradio ovaj rad.

Rijeka, kolovoz 2024.

Paolo Licul

Sadržaj

| | |
|--|----|
| 1. Uvod | 7 |
| 2. Pomorske Operacije | 8 |
| 3. Projekt/Kampanja | 12 |
| 4. Analiza vremena neraspoloživosti | 15 |
| 5. Tehnologije | 20 |
| 5.1. Baza podataka | 20 |
| 5.2. Python | 21 |
| 5.3. QT | 23 |
| 6. Programsko rješenje | 24 |
| 6.1. Struktura baze | 24 |
| 6.2. Izvor podataka | 25 |
| 6.3. Modeli | 26 |
| 6.4. Tok simulacije | 28 |
| 6.5. Grafički prikazi | 35 |
| 7. Simulacija kampanje i analize vremena neraspoloživosti | 41 |
| 8. Zaključak | 57 |
| Sažetak | 58 |
| Abstract | 58 |
| Literatura | 59 |
| 10. Dodaci | 61 |
| 10.1. Sadržaj slika | 61 |
| 10.2. Sadržaj tablica | 61 |
| 10.3. Sadržaj dijagrama | 61 |
| 10.4 Sadržaj jednadžbi | 62 |

1. Uvod

Pomorske operacije predstavljaju složen i izazovan aspekt pomorske industrije u kojem vremenski uvjeti igraju ključnu ograničavajuću ulogu. Pomorske operacije su uvjetovane meteoceanskim uvjetima poput vjetrova, morskih struja, valova, padalina i mnogih drugih, a u ovom radu fokus će biti na određeni set najbitnijih podataka kako bi se izvršila analiza. Sve u svemu, u ovom diplomskom radu, fokus je stavljen na analizu vremena neraspoloživosti (eng. *weather standby*) u pomorskim operacijama.

Vrijeme neraspoloživosti odnosi se na period kada su operacije privremeno obustavljene ili se početak njihovog izvođenja odgađa zbog nepovoljnih vremenskih uvjeta. Analizom temeljenom na povijesnim podacima (eng. *hindcast*), možemo dobiti temelj za daljnje kompleksnije simulacije koje služe za planiranje projekata, procjenu troškova i optimizaciju resursa u pomorskom sektoru.

Cilj ovog rada je razviti programsko rješenje koje će omogućiti analizu podataka o vremenskim uvjetima i njihovom utjecaju na pomorske operacije. Kroz kombinirani pristup koji uključuje simulaciju baziranu na povijesnim podacima, razvoja algoritama za analizu i razvoj intuitivnog korisničkog sučelja, nastoji se stvoriti alat koji se u teoriji može koristiti za unaprjeđenje procesa donošenja odluka u planiranju i izvođenju pomorskih operacija.

U narednim poglavljima, detaljno će biti obrađene specifičnosti pomorskih operacija, metodologije analize vremena neraspoloživosti, korištene tehnologije u razvoju programskog rješenja. Na kraju će biti prezentirani rezultati i zaključci proizašli iz ove analize.

2. Pomorske Operacije

Jednu definiciju pomorske operacije iznosi Det Norske Veritas (DNV) u „DNV-OS-H101“ priručniku o pomorskim operacijama.

DNV definira pomorsku operaciju na sljedeći način: Pomorska operacija je ne rutinska operacija s jasno definiranim ograničenim trajanjem koja se bavi upravljanjem objektima i/ili pomorskim plovilima u morskom okruženju u privremenim fazama.

Morska okruženja u ovome slučaju čine pristaništa, brodogradilišta, priobalna područja, otvoreno more i podmorje.

Prilikom planiranja morskih operacija potrebno je uzeti u obzir okolišne uvjete koji mogu utjecati na strukturalni integritet, operativnu učinkovitost i sigurnost plovidbe.

Ključni fenomeni uključuju vjetar, valove, struje i plimu. Navedeni fenomeni značajno utječu na stres i nameću ograničenja u morskim aktivnostima.

Dodatni faktori koji u specifičnim slučajevima mogu utjecati na izvodivost operacije su uvjeti tla, led i snijeg, temperaturne varijacije, *fouling*, problemi s vidljivošću kao što je magla i jaka kiša te seizmička aktivnost poput potresa.

Također, u realnoj situaciji važno je uzeti u obzir teško predvidljive lokalne okolišne fenomene poput specifičnih varijacija plime, jedinstvenih uvjeta valova ili morskih valova često pod utjecajem lokalnih struja, neočekivanih uzoraka vjetrova, jakih vjetrova iz oluja i polarnih nišina te promjenjivih struja.

U modelu ovoga rada biti će uključen samo limitirani set najbitnijih faktora kako bi se simulirali operacioni limiti.

Trajanje pomorske operacije se može definirati na sljedeći način:

$$Tr = Tpop + Tc \quad (2.1)$$

Odnosno, referentni period operacije Tr je zbroj planiranog trajanja operacije $Tpop$ i maksimalnog dopustivog prekoračenja planiranog trajanja operacije Tc .

U pravilu, preporučljivo je odrediti planirano vrijeme izvođenja operacije na konzervativni način,

odnosno tako da ono predstavlja vrijeme trajanja operacije koje ima vjerojatnost da bude prekoračeno od cca. 10% do 20%.

Na sličan način određuje se i T_c . U pravilu odabiremo T_c jednakog trajanja kao i T_{pop} , na taj način referentni period operacije je dvostruko dulji od planiranog. U iznimnim situacijama kada npr. imamo puno iskustva oko izvođenja određene operacije moguće je odrediti T_c koji je 50% trajanja T_{pop} . Također, vrijeme dopustivog prekoračenja ne bi osim u iznimnim slučajevima smjelo biti ispod 6 sati.

2.1. Kategorizacija

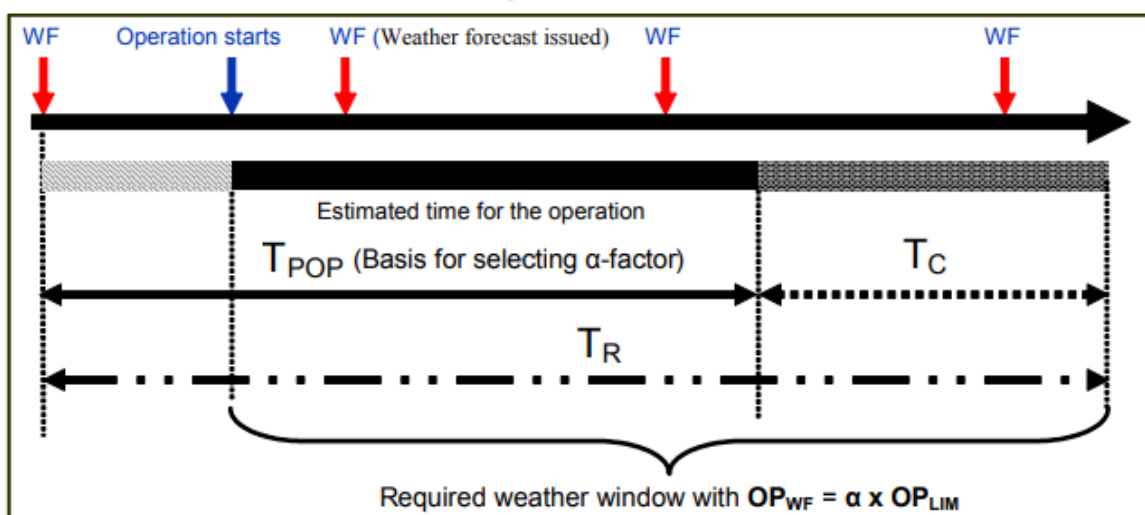
Pomorske operacije se mogu kategorizirati na više načina. Jedna podjela se tiče toga mogu li se meteorološki uvjeti smatrati ograničenima ili ne ograničenima za vrijeme izvođenja operacije. Točnije, tu se misli jesu li meteorološki uvjeti (vrijeme) neposredno predvidljivi. Druga jednako bitna kategorija po kojoj se mogu podijeliti operacije je prema tome može li ih se privremeno obustaviti. Na taj način definiramo dvije kategorije prekidne i neprekidne operacije.

- Operacije s ograničenim vremenom

Pomorske operacije sa ograničenim meteorološkim uvjetima definiramo kao operacije koje imaju referentni period operacije manji od 96 sati sa planiranim vremenom trajanja od maksimalno 72 sata. Ovo je neki opći uvjet i trajanje referentnog perioda se može produžiti ili smanjiti, ovisno o specifičnim uvjetima i predvidljivosti/promjenjivosti meteoroloških uvjeta u specifičnim situacijama.

Na primjer, operacije sa referentnim periodom dužim od 96 sati se mogu planirati kao operacije s ograničenim vremenskim uvjetima u slučaju da je moguće implementirati kontinuirano praćenje vremenskih uvjeta i prognoziranje vremena, te ako je moguće da se operacija privremeno obustavi i da u zadovoljavajućem vremenu pomorski objekt/plovilo dođe u sigurne uvjete.

Točno vrijeme započinjanja planirane operacije se u pravilu na ovakvom tipu operacija određuje nakon izlaska zadovoljavajuće vremenske prognoze.



Slika 2.1 Vremenski okvir

- Operacije neograničene vremenom

Pomorske operacije neograničene vremenom definiramo kao operacije koje traju dulje od operacija s ograničenim vremenom. One se razlikuju po tome što za takvu vrstu operacija se ne može pouzdano prognozirati vremenske uvjete tokom cijelog trajanja operacije.

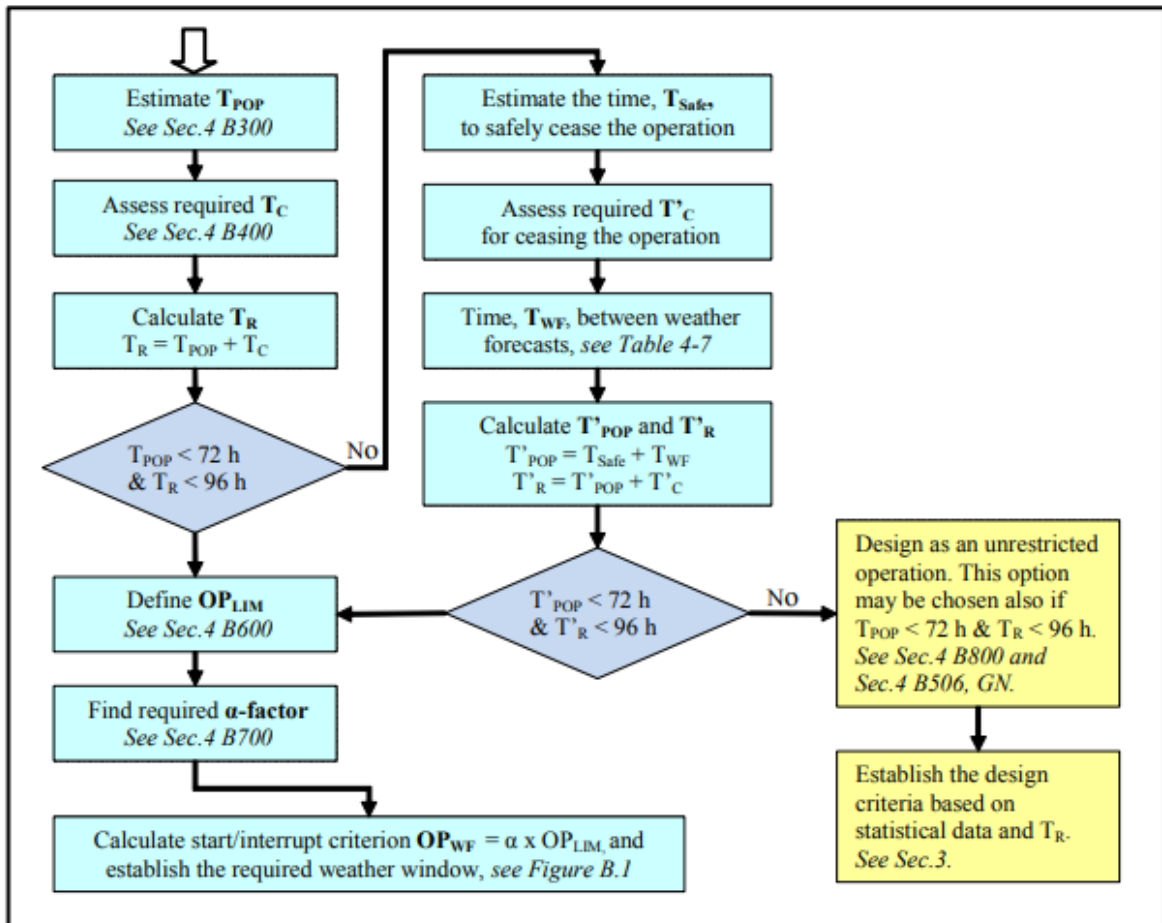
Iz tog razloga, prilikom planiranja ovog tipa operacija, se umjesto prognoziranih vjerojatnih uvjeta koriste nepovoljniji statistički ekstremni uvjeti. Korištenjem takvih uvjeta postizemo veću sigurnost da će se operacija zapravo moći izvršiti.

Iako nije preporučeno, može se koristiti manje rigorozne uvjete u određenim specifičnim slučajevima kao npr. u slučaju da se operacija izvodi na području na kojem je dokumentirano da se dugoročnom prognozom može dovoljno pouzdano odrediti vremenske uvjete ili ako se radi o specijalnim plovilima ili se plovila kreću dovoljnom brzinom da izbjegnu moguće ekstremne uvjete.

- Određivanje kategorije

Prema navedenoj podjeli, bilo bi potrebno definirati i način na koji je moguće odrediti u koju kategoriju spada određena pomorska operacija. Ukratko, to se čini na način da se definira planirano vrijeme trajanja operacije i vrijeme dopustivog prekoračenja te na kraju se izračuna trajanje referentnog perioda. Ukoliko je to vrijeme manje od 96 sati, pomorska operacija spada u kategoriju sa ograničenim vremenskim uvjetima. Ukoliko to nije slučaj, ali postoji mogućnost da se sigurno privremeno obustavi izvođenje operacije, u tom slučaju se može smatrati da operacija pripada prvoj kategoriji.

U ostalim slučajevima radi se o pomorskim operacijama sa neograničenim vremenom.



Slika 2.2 Operacije ograničene/neograničene vremenom

2.2. Primjeri pomorskih operacija

Kao što je prethodno navedeno, pomorske operacije su širok pojam koji obuhvaća planirane ne rutinske pomorske radnje.

Neki primjeri pomorskih operacija su sljedeći:

- Rukovanje teretom i operacije instalacije
- Porinuće predmeta
- Tegljenje
- Uvlačenje predmeta na fiksnu ili plutajuću platformu.
- Porinuće predmeta na otvorenom moru.
- Instalacije struktura

3. Projekt/Kampanja

U stvarnom svijetu vrlo često se ne izvodi samo jedna pomorska operacija zasebno, nego se radi izvršavanja nekog cilja formuliraju kompleksni projekti i kampanje. Takav kompleksni projekt se sastoji od više operacija koje mogu i ne moraju biti međusobno zavisne. Osim međusobnih zavisnosti u projektu, moramo također razmatrati jesu li pojedine pomorske operacije prekidne ili neprekidne.

Naravno, osim kompleksnih projekata imamo i jednostavnije.

Na ovoj razini pomorske operacije dijelimo na:

- Kontinuirane operacije
- Operacije ograničene na jedan referentni period
- Kompleksne projekte

Kod projekata koji se sastoje od kontinuirane operacije, kao što naziv izdaje, oni se sastoje od jedne kontinuirane operacije.

Kontinuiranom operacijom smatra se operacija koja nema fiksno trajanje, nego se onda izvodi (dok god uvjeti to dopuštaju) određeni broj dana/tjedana do završetka projekta.

Iz tog razloga ovaj tip pomorskih operacija ne zahtijeva vremenski prozor s minimalnom duljinom, a operacija se može prekinuti na kratko vrijeme ako se prekorače operativni limiti.

Projekti koji se sastoje od operacija ograničenih na jedan referentni period, obuhvaćaju sve jednokratne operacije i nizove međusobno nezavisnih operacija koje zahtijevaju određene vremenske uvjete te su neprekidne. Ovaj tip operacija je u suštini sličan kao definicija vremenski ograničene operacije po kategorizaciji pomorskih operacija. Imamo referentni period operacije te vrijeme čekanja da operacija počne sa izvođenjem.

Pod kompleksne projekte podrazumijevamo projekte i kampanje koji se sastoje od više pomorskih operacija. U pravilu, operacije se izvode sekvencijalno, ali također su moguće neke druge međuzavisnosti koje će biti opisane u sljedećem pod poglavlju.

U ovu kategoriju također spadaju razni ciklički projekti gdje se niz operacija ciklički ponavlja.

3.1. Međuzavisnosti i sljedovi operacija

Kod kompleksnih projekata sa više operacija često se događa da je potrebno da se te operacije obave u specifičnom rasporedu. Osim rasporeda, postoji više načina na koje se te veze mogu definirati s obzirom na vrijeme završetka – vrijeme početka.

U jednom projektu može naravno biti više različitih tipova veza između operacija.

Za pomorske operacije relevantni su sljedeći tipovi međuzavisnih veza :

- Kraj-početak (eng. Finish-to-start) ne fiksiran početak

U ovom tipu veze Operacija 2 može početi ako, i samo ako je Operacija 1 završila.

Između početka Operacije 2 i Operacije 1 moguće je da se dogodi privremena obustava nastave rada zbog npr. vremenskih uvjeta. To je u ovom slučaju moguće, pošto se radi o ne fiksiranom početku Operacije 2. Kod ovakve situacije vrijeme neraspoloživosti bi bilo vrijeme čekanja da se započne sa Operacijom 2.

Također, trebalo bi dodati da je Operacija 1 u ovom slučaju tzv. nevezana operacija. Nevezana operacija je tip operacije koja može biti takoreći promatrana sama za sebe, odnosno za razliku od fiksirane verzije ove veze gdje je nužno da Operacija 2 odmah započne, Operacija 1 se može izvoditi bez obzira na operacione limite Operacije 2.

Ova serijska veza je najjednostavniji i ujedno najčešći tip veza pomorskih operacija.

- Kraj-početak (eng. Finish-to-start) fiksiran početak

U ovom tipu veze Operacija 2 također mora započeti kada je Operacija 1 završila. Dakle, bitna razlika je što operacija umjesto da može započeti u ovom slučaju je direktno vezana i mora započeti. Kao što je spomenuto, ovo ima za posljedicu da se prilikom planiranja početka Operacije 1 mora također misliti o tome da osim što moraju biti zadovoljeni operativni limiti Operacije 1 moraju biti (nakon izvođenja Operacije 1) i zadovoljeni operativni limiti Operacije 2.

U ovom slučaju Operacija 1 je vezana operacija pošto je za njeno izvođenje također potrebno razmatrati operativne limite neke druge operacije (u ovom slučaju Operacije 2).

- Početak-početak (eng. Start-to-start) ne fiksiran početak

Kod veze početak-početak, odmah nakon što krene izvođenje Operacije 1 može početi i izvođenje operacije 2. Ukoliko Operacija 2 ne krene istovremeno sa Operacijom 1, može doći do vremena neraspodivnosti ukoliko o Operaciji 2 zavisi neka sljedeća operacija.

- Početak-početak (eng. Start-to-start) fiksiran početak

U ovoj verziji veze početak-početak se radi o tome da Operacija 2 mora krenuti istovremeno sa Operacijom 1. U suštini, ovaj tip veze se svodi na paralelizaciju operacija.

4. Analiza vremena neraspoloživosti

Analiza vremena neraspoloživosti pomorskih operacija je proces koji zahtjeva razmatranje mnogih faktora. Kako bi se analiziralo vrijeme neraspoloživosti potrebno je imati sljedeće podatke: podatci o stanju oceana, tip operacije i projekta, trajanja operacija i operativnih limita itd.

4.1. Meteoceanski uvjeti

Meteoceanski podatci služe kao polazna točka za analizu vremena neraspoloživosti. Naziv meteoceanski se često u literaturi pojavljuje pod složenicom *metocean* koja nastaje od riječi meteorologija i oceanografija.

Meteoceanski podatci obuhvaćaju međusobno povezane atmosferske i oceanografske faktore koji utječu na morsko okruženje. Ovi podatci su naravno vrlo bitni za više-manje sve pomorske aktivnosti od same navigacije pa sve do planiranja pomorskih operacija.

Meteoceanski uvjeti podrazumijevaju provođenje analize mnogih elemenata poput vjetra, valova, plime, morskih struja i atmosferskog tlaka koji zajedno oblikuju stanje i ponašanje oceana i atmosfere iznad površine mora.

Jedna od glavnih komponenti metocean uvjeta je vjetar. Vjetar pokreće površinske struje oceana i stvara valove. Ovisno o brzini vjetra, trajanju i udaljenosti preko koje vjetar puše, ti valovi se značajno razlikuju po visini, periodi i ostalim svojstvima.

Podatci o vjetru se vrlo često koriste za dizajniranje i planiranje u pomorstvu. Snažni vjetrovi mogu dovesti do ekstremnih visina valova te zato predstavljaju značajan rizik za pomorske operacije.

Valovi su ključni parametar meteoceanskih podataka koji će se iskoristiti za analizu vremena neraspoloživosti. Valovi su pod utjecajem lokalnih uvjeta vjetra i udaljenih meteoroloških događaja. Valovi koji su stvoreni olujama stotinama milja daleko mogu putovati preko oceana i utjecati na obalna područja daleko od svog izvora. Modeliranje i prognoza valova su ključni za planiranje pomorskih aktivnosti, osiguranje sigurnosti plovila itd.

Plima, periodičko podizanje i padanje razine mora uzrokovano gravitacijskim silama mjeseca i sunca, još je jedan važan metocean parametar. Uzorci plime značajno variraju diljem svijeta, s nekim regijama koje doživljavaju velike amplitude plime, dok druge bilježe minimalne promjene.

Oceanske struje su pokretane kombinacijom vjetra, razlikom u gustoći vode i rotacijom zemlje koji igraju značajnu ulogu u reguliranju klime i distribuciji topline diljem svijeta. Struje poput Golske struje u Atlantskom oceanu ili Kuroshio struje u Tihom oceanu, imaju dubok utjecaj na

regionalne klime, morsku bioraznolikost i globalne vremenske uzorke. Točni podaci o strujama su neophodni za učinkovite brodske rute.

Atmosferski tlak utječe na vremenske sustave i uzorke cirkulacije oceana. Sustavi visokog i niskog tlaka mogu dovesti do oluja, uragana i drugih ekstremnih vremenskih nepogoda koje utječu na pomorska i obalna okruženja. Praćenje promjena atmosferskog tlaka je bitno za prognozu vremena i razumijevanje potencijalnih utjecaja klimatskih promjena na metocean uvjete.

Sve u svemu, može se reći da metoceanski podatci prikazuju složena međudjelovanja atmosferskih i oceanografskih faktora. Korištenje metoceanskih podataka je nužno kako bi imali sposobnost točnog praćenja, modeliranja i predviđanja pomorskih uvjeta, što je ključno za planiranje i izvršavanje pomorskih operacija i ostalih pomorskih i priobalnih aktivnosti.

Bitno je spomenuti da će u ovom programskom rješenju ograničenje biti samo na oceanske uvjete, to jest na visinu, smjer i periodu valova. Iz tog razloga u ovom se radu neće upotrebljavati više naziv metoceanski nego oceanski uvjeti.

4.2. Operativni limiti

Operativni limit definira se kao kombinaciju vrijednost oceanskih uvjeta ispod ili iznad kojih se pomorska operacija ne može sigurno izvoditi. Najčešći oceanski parametri koji se koriste za definiciju operativnih limita pomorskih operacija, su kombinacija visine vala i periode vala. Također ovisno o tipu pomorske operacije, plovilu i opremi, mogu biti potrebni i drugi metoceanski parametri.

Za potrebe ovog rada, radi jednostavnosti ograničiti ćemo definiciju operativnih limita samo na najčešće korištene parametre. Dakle, operativni limiti biti će izraženi kao kombinacija visine i periode vala, također, osim ta dva parametra voditi ćemo računa i o smjeru iz kojeg dolazi val u odnosu na plovilo.

4.3. Vrijeme neraspoloživosti Operacija

U ovome poglavlju biti će definirano vrijeme neraspoloživosti i ostali pokazatelji vezani za vrijeme neraspoloživosti operacija.

Vrijeme neraspoloživosti se može jednostavno definirati kao vrijeme u kojem se pomorska operacija ne može izvršavati. Iz te jednostavne definicije se može iščitati da to znači da je vrijeme neraspoloživosti ništa drugo nego vrijeme za koje određena operacija kasni sa izvođenjem.

Dakle, 'ukupno trajanje operacije' je zbroj 'vremena obavljanja operacije' i 'vremena kašnjenja'. Gdje je 'vrijeme obavljanja operacije' vrijeme koje je potrebno da se operacija uspješno dovrši bez ikakvih kašnjenja i 'vrijeme kašnjenja', time se može zaključiti da je vrijeme za koje ta operacija neočekivano kasni definirana formulom 4.1.

$$T_{total} = T_{op} + T_{ww} \quad (4.1)$$

Također imamo dodatnu kategoriju koja je vremenski rizik koja se može definirati kao postotak vremena u kojem su pomorske operacije neraspoložive.

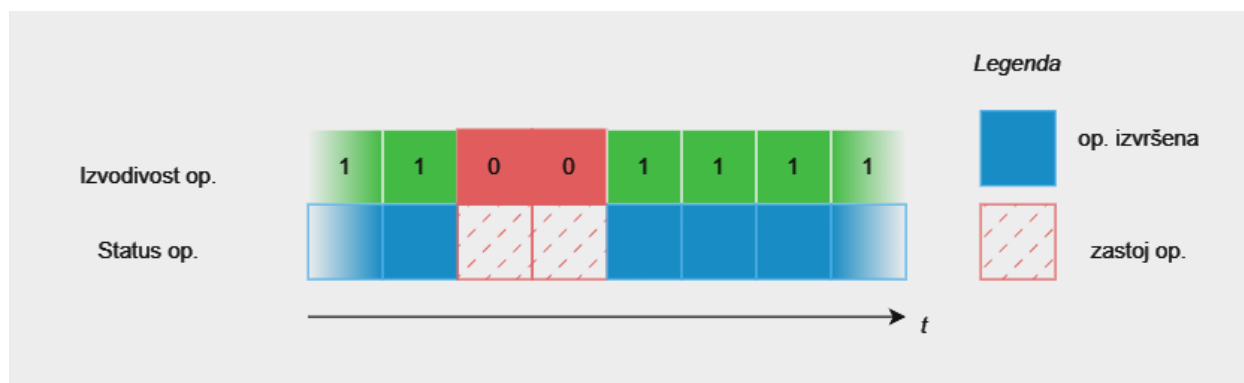
U sljedećim poglavljima biti će pokazano kako se može definirati vremenski rizik po definiranim kategorijama pomorskih operacija: kontinuirane operacije, operacije ograničene na jedan referentni period i kompleksne projekte.

- Kontinuirane operacije

U slučaju kontinuiranih pomorskih operacija vremenski rizik se može jednostavno predstaviti kao postotak radnog vremena koji je potrošen na čekanje da se ispune operativni limiti.

Dakle, vremenski rizik je udio vremena u kojem se operacija može izvoditi.

Slika 4.1 prikazuje jedan primjer kontinuirane operacije sa kašnjenjem. Zelene i crvene kutije pokazuju je li kontinuirana operacija izvediva, odnosno jesu li operativni limiti prekoračeni ili ne.



Slika 4.1 Kontinuirana operacija

- Operacije ograničene na jedan referentni period

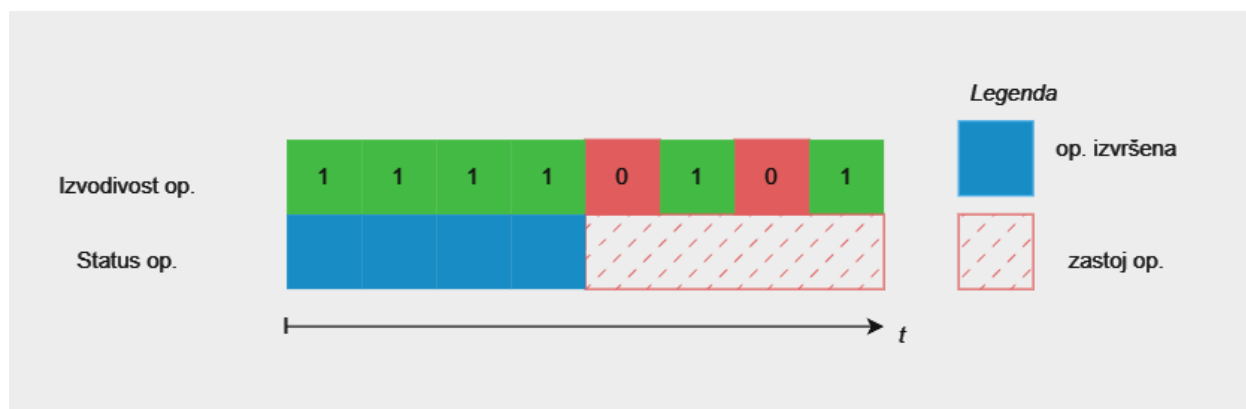
Za operacije ograničene na jedan referentni period ili za niz operacija koje su sve ne-kontinuirane i nemaju međuzavisnosti (nisu povezane eng. *uncoupled*), umjesto da je vremenski rizik definiran kao vrijeme u kojemu su operativni limiti prekršeni, vremenski rizik može biti promatran kao vrijeme čekanja.

Pod vrijeme čekanja misli se na količinu vremena za koje su operacije u stanju u stanju čekanja dok se ne ostvare ponovno odgovarajući oceanski uvjeti kako bi operativni limiti bili zadovoljeni.

Slika 4.2 prikazuje jedan hipotetski primjer projekta s jednim referentnim periodom.

Projekt se sastoji od jedne operacije koja zahtjeva vremenski prozor duljine barem četiri vremenska *slot*a.

Vremenski rizik je prikazan kao distribucija vremena čekanja prije nego što se projekt može izvršiti. Kod ovog tipa projekta postotak radnog vremena ne odražava točno vrijeme zastoja jer se ne uzima u obzir postojanost meteoceanskih uvjeta, odnosno ispunjavanja operativnih limita.



Slika 4.2 Operacija ograničena referentnim periodom

- Kompleksni projekti

Kod kompleksnih projekata situacija je malo zamršenija. Postoji više metoda putem kojih se može doći do vremenskog rizika i vremena neraspoloživosti kod kompleksnih projekata.

Ako se radi o zbilja kompleksnim operacijama sa mnogo međuzavisnosti, kompleksnost analitičkog izračuna vremena čekanja prerasta realne granice pa je potrebno upotrijebiti neki drugi način izračuna.

Neke od tih metoda kojima se može napraviti analiza kompleksnih projekata su: stohastička simulacija nad povijesnim podacima, vjerojatnosne mreža (eng. *probabilistic network*), stabla odluke (eng. *decision trees*) itd.

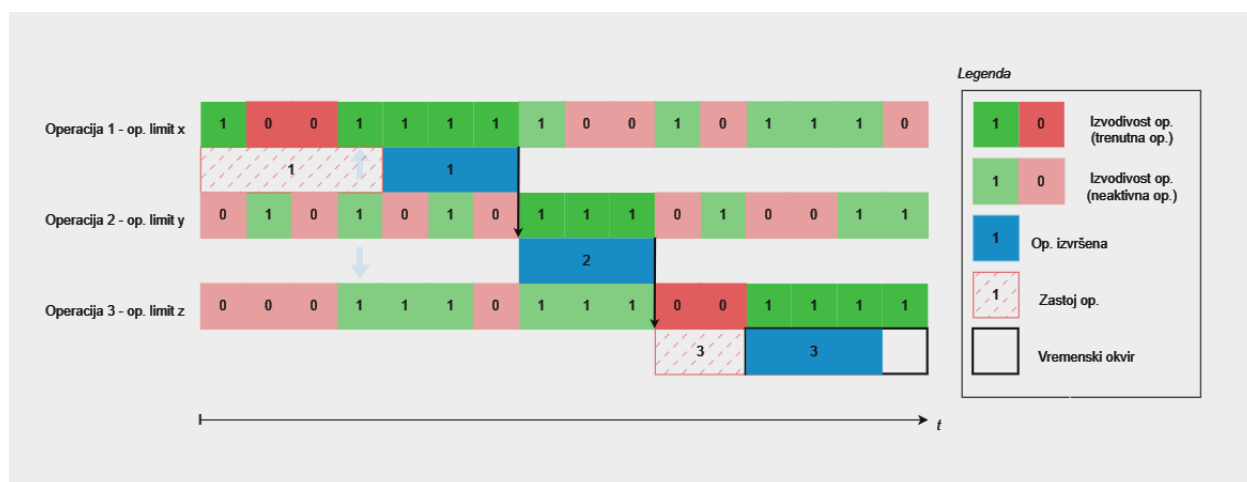
Na slici 4.3 imamo primjer kompleksnog projekta koji se sastoji od 3 operacije:

Operacija 1 i Operacija 2 su neprekidne dok je Operacija 3 prekidna.

Veza između Operacije 1 i Operacije 2 je definirana kao fiksna kraj-početak veza odnosno Operacija 2 mora započeti kada se Operacija 1 završi.

Veza između Operacije 2 i Operacije 3 je definirana kao ne fiksna kraj-početak veza što

omogućava čekanje da se ostvare povoljni vremenski uvjeti za obavljanje Operacije 3 koja je neprekidna.



Slika 4.3 Operacija ograničena referentnim periodom

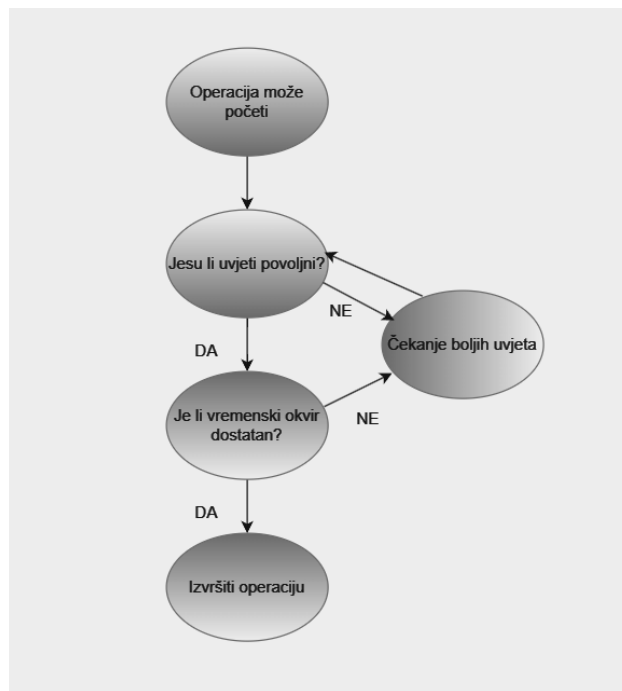
4.4. Stablo odluke ishoda

Radi provedbe analize potrebno je napraviti simulaciju kampanja i operacija.

U ovome radu ograničiti ćemo se samo na simulaciju neprekidnih operacija i na razini kampanje/projekta projekti će biti simulirani sa sljedećim međuzavisnostima i vrstama sljedova: simulirati će se početak-početak i kraj-početak veze u obje verzije, u *coupled* i *uncoupled* verzijama.

Na razini pojedine operacije, stablo odabira prikazan je na slici 4.4. Čvorovi predstavljaju test nekog uvjeta. Na temelju ove simulacije pojedine operacije mogu se odrediti neki pokazatelji poput prosječnog vremena čekanja ili prosječna količina dana na kojima je operacija izvediva kroz neko vrijeme. Ova simulacija također služi kao temelj i početna točka za analizu na razini kampanje.

Simulacija na razini kampanje je dosta kompliciranija pošto je potrebno uzeti u obzir različite sljedove operacija. Iz ove simulacije moguće izvući podatke poput prosječnog čekanja u određenoj kampanji, prosječno čekanje za pojedine operacije u pojedinim kampanjama, kako različite međuzavisnosti utječu na rezultate itd.



Slika 4.4 Stablo odabira opća operacija

5. Tehnologije

U ovome poglavlju biti će opisane tehnologije koje su korištene za izradu programskog rješenja. Glavni uvjet koji je postavljen u zadatku rada, bio je da izrađeni program zadovoljava uvjete platformski nezavisnog programiranja. Odnosno, program bi trebao biti što je više moguće sistemski agnostičan. Definirano je ispunjenje tog uvjeta tako da je moguće potvrditi da izrađeni program funkcionira na barem dva različita operacijska sustava: Windows i Linux.

Radi izrade takvog programa odlučeno je da će se koristiti Python programski jezik i QT za izradu grafičkog korisničkog sučelja.

5.1. Baza podataka

Za izradu programskog rješenja ovog projekta nije nužno koristiti relacijsku bazu podataka, štoviše, korištenjem relacijske baze podataka povećalo se vrijeme potrebno za izvođenje simulacije. Inicijalno prije ikakvih izmjena od prilike 80%-90% vremena koje potroše funkcije za simulaciju kampanja i operacija, „potrošilo“ se na ubacivanje podataka u bazu podataka. Nakon optimizacijskih promjena ovaj postotak se maksimalno smanjio te nam ne predstavlja znatni trošak.

Razlog korištenja baze je lakša manipulacija, veća preglednost podataka i veća sigurnost od pogreške nego da je korištena pohrana rezultata u npr. JSON ili .csv datotekama.

Korištena je SQLITE baza podataka. Sqlite je jednostavan, lagan (eng. *lightweight*) SQL (eng. *structured query language*) *database engine*. To je jedna od najkorištenijih baza podataka zbog svoje jednostavnosti i malene veličine, čime pogoduje širokom spektru projekata.

Odlikuje se brzim operacijama sa malim *overhead*-om. Također je važno spomenuti da Sqlite nije samostalni softver za upravljanje bazama podataka, nego knjižica funkcija koja se integrira direktno u kod programa. Dakle, može se reći da Sqlite spada u *embedded* baze podataka.

Glavna motivacija za korištenje Sqlite umjesto neke druge baze podataka je da QT koji je korišten za ovo korisničko sučelje ima vrlo dobru integraciju sa Sqlite bazama.

5.2. Python

Python je programski jezik visoke razine sa širokim spektrom namjene i upotrebe.

Jedna od najistaknutijih značajki Pythona je čitljivost i jednostavnost. Python koristi jasnu sintaksu i naglašava važnost pravilnog uvlačenja koda, što rezultira lako čitljivim i razumljivim kodom. Ova karakteristika značajno olakšava suradnju među programerima i održavanje koda.

Druga važna značajka Pythona je dinamičko tipiziranje. Ovo znači da se tipovi varijabli određuju automatski tijekom izvršavanja programa, što programerima omogućuje fleksibilnije pisanje koda i brži razvoj aplikacija. Dinamičko tipiziranje posebno je korisno u fazi *prototypeing*-a i eksperimentiranja s novim idejama.

Python također nudi interaktivno okruženje, poznato kao REPL (eng. *Read-Eval-Print Loop*), koje omogućuje brzo testiranje koda i eksperimentiranje. Ova značajka je iznimno korisna za učenje jezika, brzo testiranje ideja i debugiranje koda.

Jedna od jačih strana Pythona leži u njegovoj opsežnoj standardnoj biblioteci. Python dolazi s bogatom zbirkom ugrađenih modula i funkcija koje pokrivaju širok spektar funkcionalnosti, od rada s datotekama do mrežnog programiranja. Ova bogata standardna biblioteka često eliminira potrebu za vanjskim zavisnostima i ubrzava razvoj projekata.

Konačno, Python podržava više programskih paradigmi, uključujući proceduralno, objektno-orijentirano i funkcionalno programiranje. Ova fleksibilnost omogućuje programerima da odaberu najprikladniji pristup za rješavanje problema, prilagođavajući se različitim stilovima programiranja i zahtjevima projekta. Ovakva „širina“ čini Python pogodnim za širok spektar primjena, od jednostavnih skripti do složenih softverskih sustava.

Python se koristi u različitim područjima poput:

- Web razvoj: *Frameworks*-i poput Django, Flask i FastAPI omogućuju brz razvoj web aplikacija.
- Znanost o podacima i strojno učenje: Biblioteke kao NumPy, pandas, scikit-learn i TensorFlow čine Python vodećim jezikom u ovim područjima.
- Automatizacija i skriptiranje: Idealan za pisanje skripti koje automatiziraju repetitivne zadatke.
- Razvoj softvera: Koristi se za razvoj desktop aplikacija, testiranje softvera i DevOps zadatke.
- Internet stvari (IoT): Popularan izbor za razvoj IoT rješenja, posebno na platformama poput Raspberry Pi.

Nakon svega, može se zaključiti da su prednosti i nedostaci pythona ukratko sljedeći:

Prednosti:

- Lako učenje i čitljivost koda
- Velika zajednica i bogat ekosustav biblioteka
- Višenamjenski jezik prikladan za različite vrste projekata
- Odlična podrška za integraciju s drugim jezicima i sustavima

Nedostaci:

- Relativno sporije izvođenje u usporedbi s kompajliranim jezicima
- Ograničenja u mobilnom razvoju
- Potencijalni problemi s verzijama (Python 2 vs Python 3)

5.3. QT

QT je *framework* za razvoj aplikacija koji se koristi za kreiranje grafičkih korisničkih sučelja (GUI) i razvoj višeplatformskih aplikacija. Izvorno, QT je razvijen za C++, ali je evoluirao kako bi podržao različite programske jezike, uključujući Python kroz PySide knjižicu, poznat i kao *Qt for Python*.

QT nudi bogat set alata za razvoj aplikacija. Njegova glavna prednost je višeplatformska podrška, što znači da aplikacije razvijene u QT-u mogu raditi na Windowsu, macOS-u, Linuxu, Androidu, iOS-u, i drugim operativnim sustavima bez potrebe za promjenama u izvornom kodu. Tom je značajkom direktno ispunjen preduvjet platformske nezavisnosti ovog projekta.

Osim toga, QT nudi napredne mogućnosti za dizajn korisničkih sučelja, uključujući podršku za 2D i 3D grafiku, animacije, mrežno programiranje, rad s bazama podataka, i još mnogo toga.

QT se koristi u različitim industrijama za razvoj širokog spektra aplikacija poput:

1. Automobilska industrija: QT se koristi za razvoj *infotainment* sustava, digitalnih kokpita i drugih integriranih sustava u vozilima. Na primjer, QT za razvoj svojeg *infotainment* sustava koristi i hrvatska firma Rimac
2. Medicinska oprema: QT omogućuje razvoj aplikacija za medicinske uređaje koji zahtijevaju intuitivna i pouzdana korisnička sučelja
3. Kućanski uređaji: QT omogućuje razvoj korisničkih sučelja za pametne uređaje kao što su pametni hladnjaci, perilice rublja, i drugi uređaji povezani s Internetom stvari (IoT)

Sve u svemu, QT je vrlo svestran *framework* koji može biti iskorišten za rješavanje širokog spektra potreba za aplikacije s grafičkim sučeljima.

6. Programsko rješenje

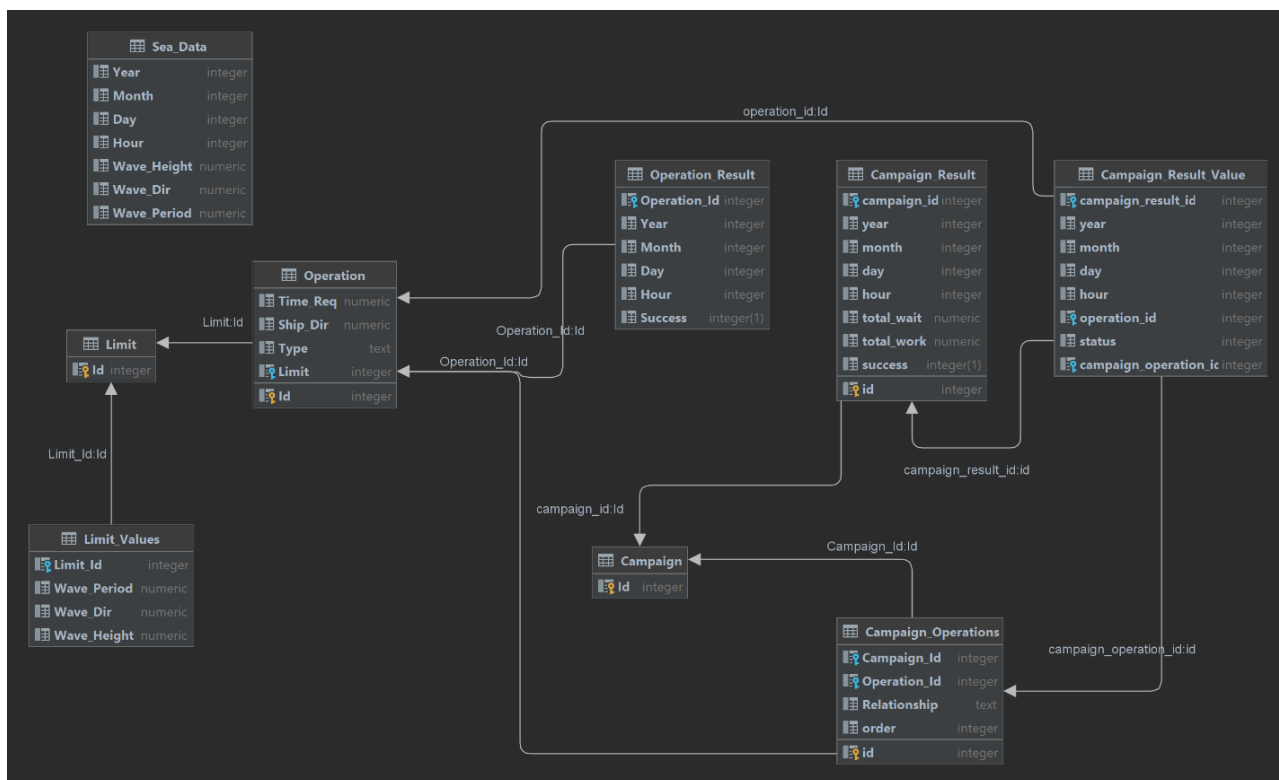
U ovome poglavlju biti će detaljno opisano osmišljeno programsko rješenje odnosno njegova implementacija. Logički ćemo napredovati od temelja ka prikazu rezultata analize.

Početi će se objašnjenjem strukture relacijske baze podataka, zatim objasniti prvo oceanske podatke koje su koristili kao temelj za provođenje analize vremena neraspoloživosti. Zatim u nastavku slijedi opis modela s kojima se opisuju oceanski podatci, operacije, operativni limiti, kampanje i operacijske međuzavisnosti unutar kampanje. Nadalje, biti će opisane tablice u relacijskoj bazi kojima se predstavljaju navedeni modeli te će naposljetku biti opisani algoritmi za izračune rezultata operacija i kampanja te prikazi rezultata i grafički prikazi kojima prikazujemo rezultate analize.

6.1. Struktura baze

Zbog odluke za korištenje relacijske SQL baze podataka bilo je potrebno izraditi strukturu koja će balansirati kompleksnosti normalizacije tablica s praktičnosti rada s relacijskom bazom podataka.

Na dijagramu 6.1 vidimo prikaz tablica i njihovih međuzavisnosti. Može se primijetiti da je operacija centralna tablica oko koje gradimo ostatak programa.



Dijagram 6.1. Relacijski dijagram baze podataka

6.2. Izvor podataka

Kao temelj ove analize korišteni su povijesni podatci preuzeti sa web platforme Copernicus. Copernicus web stranica je službeni portal EU programa za prikupljanje raznih podataka vezanih za naš planet. Pruža pristup satelitskim podacima i informacijama za praćenje okoliša, upravljanje resursima i reagiranje na katastrofe. Platforma nudi podatke u stvarnom vremenu o klimi, zemljištu i moru.

Podatke o oceanskom stanju koje su preuzeti odnose se na područje Sjevernog mora, točnije na koordinatama 54°N, 5.99°E između 2010. i 2020. godine.

Podatci su mjereni u intervalu od tri sata počevši od ponoći (00:00).

U razmatranje je uzet limitirani set oceanskih podataka:

- Visina vala - Hs(m)
- Smjer kretanja vala - TheH(°N)
- Perioda vala - Tp(s)

| Year | Month | Day | Hour | Wave_Height | Wave_Dir | Wave_Period |
|------|-------|-----|------|-------------|----------|-------------|
| 2010 | 1 | 1 | 0 | 1.87 | 44.64 | 6.02 |
| 2010 | 1 | 1 | 3 | 1.85 | 40.95 | 6.03 |
| 2010 | 1 | 1 | 6 | 1.71 | 36.19 | 5.86 |
| 2010 | 1 | 1 | 9 | 1.59 | 32.96 | 5.65 |
| 2010 | 1 | 1 | 12 | 1.43 | 26.9 | 5.55 |
| 2010 | 1 | 1 | 15 | 1.31 | 19.21 | 7.35 |
| 2010 | 1 | 1 | 18 | 1.21 | 13.91 | 10.82 |
| 2010 | 1 | 1 | 21 | 0.99 | 9.01 | 9.93 |
| 2010 | 1 | 2 | 0 | 1.11 | 358.19 | 11.33 |
| 2010 | 1 | 2 | 3 | 1.1 | 356.17 | 10.93 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 2019 | 12 | 31 | 12 | 1.91 | 322.4 | 8.3 |
| 2019 | 12 | 31 | 15 | 1.99 | 326.97 | 8.88 |
| 2019 | 12 | 31 | 18 | 1.89 | 329.7 | 8.92 |
| 2019 | 12 | 31 | 21 | 1.71 | 331.41 | 8.81 |

Tablica 6.1 Tablica oceanskih podataka

Podaci su dobiveni u .ts formatu u kojem je osim samih podataka bila i legenda stupaca te je bilo potrebno iz datoteke maknuti objašnjenje i manualno pretvoriti u .txt format. Zatim, koristeći *Pandas python* knjižicu napravljena je funkcija putem koje se podatci čitaju iz .txt datoteke kao

CSV datoteka sa delimeterom koji je „,“, odnosno prazno mjesto (eng. *white space*) umjesto zarez. Nakon toga se pročitani podatci ubacuju u bazu podataka.

6.3. Modeli

Kako bi bilo moguće simulirati bilo kakvu realnu situaciju/pojavu potrebno je izraditi određeni model kojim se modelira odnosno kvantificira realna pojava te je se predstavlja virtualnim modelom.

- Operativni Limit

Granične vrijednosti preko kojih je operacija neizvediva definira se putem operativnih limita. Pošto je odlučeno da se parametri ograniče na podatke o visini, smjeru i periodi vala, onda moramo na model operativnih limita definirati koristeći iste parametre.

Operativni limiti definirani su putem dvodimenzionalne tablice gdje se na osi X pronalazi smjer kretanja vala s obzirom na smjer kretanja plovila.

Dakle, ukoliko se plovilo kreće u smjeru 30 stupnjeva (u odnosu na sjever), a val dolazi iz smjera 45 stupnjeva onda to znači da će se plovilo susresti s valom na 15 stupnjeva.

Na osi y nalazi se perioda vala.

Na točki (X,Y) odnosno npr. (10s,130 stupnjeva) nailazi se na maksimalnu visinu vala pod kojom plovilo može sigurno izvoditi određenu operaciju.

| TheH(°N)/Tp(s) | 0 | 10 | 45 | 90 | 135 | 180 | 225 | 270 | 315 |
|----------------|----|--------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1 | 1 | 1,022 | 1,1 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,7 |
| 2 | 2 | 2,022 | 2,1 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 2,7 |
| 3 | 3 | 3,022 | 3,1 | 3,2 | 3,3 | 3,4 | 3,5 | 3,6 | 3,7 |
| 4 | 4 | 4,022 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,4 | 4,5 | 4,6 | 4,7 |
| 6 | 6 | 6,022 | 6,1 | 6,2 | 6,3 | 6,4 | 6,5 | 6,6 | 6,7 |
| 8 | 8 | 8,022 | 8,1 | 8,2 | 8,3 | 8,4 | 8,5 | 8,6 | 8,7 |
| 10 | 10 | 10,022 | 10,1 | 10,2 | 10,3 | 10,4 | 10,5 | 10,6 | 10,7 |
| 12 | 12 | 12,022 | 12,1 | 12,2 | 12,3 | 12,4 | 12,5 | 12,6 | 12,7 |

Tablica 6.2 Tablica primjer operativnih limita

Na sličan način kao što su uvedeni relevantni oceanski podaci, uvode se i operativni limiti iz csv datoteka koristeći *Pandas* za čitanje podataka te se konstruira objekt koji predstavlja operativni limit. Naposljetku slijedi ubacivanje objekata u bazu podataka.

- Operacija

Razinu operacija modeliramo koristeći sljedeće parametre:

- Vrijeme potrebno za izvođenje operacije izraženo u satima
- Smjer kretanja plovila
- Tip operacije
 - Pod tipom operacije se misli na neprekidne i prekidne operacije. Za potrebe analize ovaj rad je ograničen samo na jedan tip operacija, neprekidne operacije
- Operativni limiti

Ovi podatci su dostatni kako bi se simulirala razina operacija.

6.3.1. Rezultati Simulacije

Same rezultate simulacije izvedivosti operacija također je potrebno pohraniti.

U simulaciji se testira je li operacija izvediva ako se započne na određeni datum i zapisuje *boolean* „da“ ili „ne“ (eng. *true/false*) vrijednost u objekt.

- Kampanja

Kampanja služi kako bi se definirao slijed operacija da bi se moglo ispitati vrijeme neraspoloživosti operacija u kompleksnim projektima.

Kampanja se sastoji od više operacija te veza između navedenih operacija.

Točnije, objekt tipa kampanja sadrži u sebi objekte koji predstavljaju operacije u kampanji.

Objekti koji predstavljaju operacije u kampanji se sastoje od sljedećih parametara:

- Podatci vezani za samu operaciju
- Redno mjesto operacije u kampanji
- Tip veze sa prošlom operacijom u kampanji
 - Ovdje se misli na veze početak-početak i kraj-početak u fiksiranim i ne fiksiranim verzijama veze

6.3.2. Rezultati Simulacije

Rezultati simulacije kampanja dijele se na dvije razine.

Prva razina rezultata simulacije izvođenja kampanje daju uvid u to je li određena kampanja izvediva ako je započeta na određeni datum, koliko vremena je potrošeno na rad i koliko je vremena potrošeno na čekanje. Ovime se dobiva generalni pregled koji je bitan za jedan dio analize.

Dok se na drugoj razini nalaze detaljni rezultati simulacije kampanje. Ovdje se pronalaze rezultati na razini pojedinih operacija kampanje.

Ove rezultate prikazuje se koristeći sljedeće parametre:

- Datum rezultata
- Operacija za koju dobivamo rezultat
- Status:
 - čekanje (eng. *wait*) – operacija nije još započela sa izvođenjem nego je u stanju mirovanja
 - početak operacije (eng. *start*) – operacija započinje s izvođenjem
 - rad (eng. *work*) – operacija je u procesu izvođenja
 - kraj operacije (eng. *end*) – operacija je izvršena

Na temelju detaljnije druge razine formira se prva razina rezultata simulacije izvedivosti kampanja.

6.4. Tok simulacije

U ovome djelu detaljno će biti objašnjen algoritam kojim je odrađena simulacija izvedivosti operacija i kampanja.

- Operacija

Kako bi se naposljetku obavili analizu vremena neraspoloživosti na razini operacije, potrebno je započeti s određivanjem kada je operacija izvediva i kada nije.

Kako bi se odredila izvedivost operacije koja je krenula na određeni datum potrebno je imati određene sljedeće parametre:

- Oceanski podatci oceana
 - Visina vala, period vala i smjer kretanja vala
- Operativni limiti
 - Maksimalna visina vala u ovisnosti na periodu vala i smjer iz kojeg dolazi val

- Smjer kretanja plovila
- Vrijeme potrebno za izvođenje operacije

Ukratko rečeno, iz zadanih parametara periode vala i smjera kretanja vala u odnosu na plovilo potrebno je odrediti koja je maksimalna visina vala koju plovilo može podnesti i ostati unutar operativnih limita sigurne pomorske operacije.

Detaljni postupak ćemo opisati tako da proces podijelimo na sljedeće korake:

0) Priprema podataka

Dohvaćanje potrebnih parametara: visina vala, perioda vala, smjer kretanja vala, smjer kretanja plovila, vrijeme trajanja operacije, tablica operativnih limita

Vrijeme trajanja operacije pretvara se u broj potrebnih vremenskih *slotova* (time se prati uzorkovanje oceanskih podataka od 3 sata) na način da se vrijeme trajanja podijeli sa 3 i zaokruži na više.

Uzime se N (broj vremenskih *slotova*) sljedećih stanja oceanskih podataka za koje će se odraditi provjeru zadovoljavanja operativnih limita.

Input: seaDataList: list of SeaData, operation: Operation

Output: None

```

foreach seaData in seaDataList do
    timeSlotsReq ← ⌈  $\frac{\text{operation.timeReq}}{3}$  ⌉
    seaDataIndex ← index of seaData in seaDataList
    seaDataTimeSlots ← empty list
    for timeSlot ← 0 to timeSlotsReq - 1 do
        | seaDataTimeSlots.append(seaDataList[seaDataIndex + timeSlot])
    end
    operationResult ← new OperationResult(
        operationId = operation.id,
        year = seaData.year,
        month = seaData.month,
        day = seaData.day,
        hour = seaData.hour,
        success = successCheck(operation.shipDir, operation.limit.values, seaDataTimeSlots, operation.type)
    )
    insertRowData(operationResult)
end
return

```

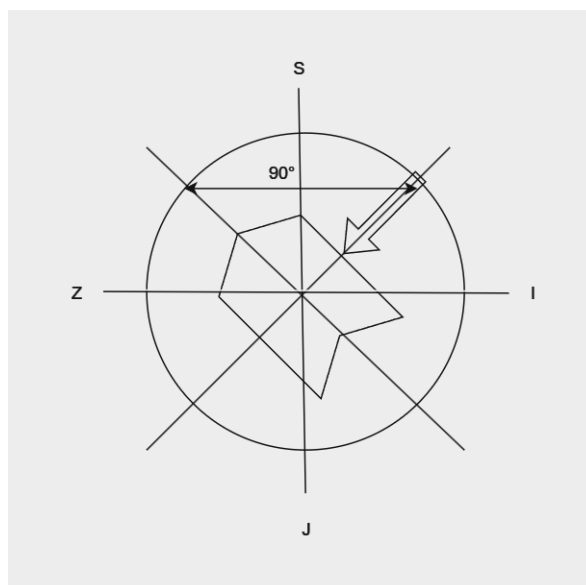
Slika 6.1 Pseudokod funkcije za generaciju rezultata simulacije Op.

1) Provjera jesu li oceanski uvjeti za sve vremenske *slotove* zadovoljavajući

Kako bi se utvrdilo jesu li oceanski uvjeti na određeni datum zadovoljili operativne limite potrebno je odrediti koja je visina vala granična vrijednost operativnih limita.

U tu svrhu počinjemo s određivanjem relativnog smjera kretanja vala u odnosu na smjer kretanja

plovila. Pošto su smjerovi kretanja vala i plovila izraženi u odnosu na sjever (eng. *true north*), potrebno je dobiti smjer iz kojeg dolazi val na plovilo.



Slika 6.2 Relativni smjer vala

Relativni smjer vala u odnosu na plovilo dobiva se na način da se „zaokrene“ koordinatni sustav tako da smjer kretanja plovila predstavlja smjer od 0 stupnjeva.

Relativni smjer dakle iznosi ostatak dijeljenja razlike smjera kretanja vala i smjera kretanja broda sa 360.

```
Input: waveDir: float, shipDir: float
Output: relativeDir: float
relativeDir ← (waveDir - shipDir) mod 360;
return relativeDir;
```

Slika 6.3 Pseudokod izračuna relativnog smjera kretanja vala naspram kretanja plovila

Zatim, koristeći metodu najbližeg susjeda odabire se stupac iz tablice operativnih limita. Traži se najbliža vrijednost relativnog smjera vala u odnosu na zadane vrijednosti smjera iz tablice operativnih limita. Funkcija kojom se vrši interpolacija metodom najbližeg susjeda je definirana na način da se pronalazi stupac koji odgovara smjeru koji je apsolutnom vrijednosti najmanje udaljen od relativne vrijednosti.

```
Input: limitVals: list of LimitValue, relativeDir: float, wavePeriod: float
Output: closestWaveDir: float
closestLimit ← min(limitVals, key = lambda lv : |lv.waveDir - relativeDir|)
return closestLimit.waveDir
```

Slika 6.4 Pseudokod funkcije za pronalazak najbližeg kuta

Ostaje još za odrediti periodu vala. Kako bi to bilo postignuto, koristiti će se linearna interpolacija. Linearna interpolacija je metoda za procjenu vrijednosti funkcije između dviju poznatih vrijednosti.

Kada postoje dvije točke (x_1, y_1) i (x_2, y_2) , linearna interpolacija se koristi za pronalaženje vrijednosti y za neku vrijednost x koja leži između x_1 i x_2 . Formula za linearnu interpolaciju je:

$$y = y_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} (y_2 - y_1) \quad (6.1)$$

Ova formula pretpostavlja da se promjena između točaka odvija linearnom, odnosno ravnomjernom, brzinom.

U ovom slučaju, funkcija je definirana na način da pronalazi prvu manju i prvu veću periodu od realne periode vala, koja je zadana oceanskim podacima, koja je prisutna u našoj tablici operativnih limita. Ukoliko ne pronađe veću ili manju vrijednost, zaključuje se da operacija nije izvediva.

Ukoliko pronađe manji i veći limit, time se dobiju x_1 i x_2 (gdje je x_2 veća perioda limita, a x_1 manja perioda limita) i vrši linearnu interpolaciju.

```

Input: lowLimit: LimitValue, highLimit: LimitValue, targetPeriod: float
Output: LimitValue
if lowLimit.period == highLimit.period then
  | return LimitValue(targetPeriod, lowLimit.dir, lowLimit.height);
end
ratio ←  $\frac{\text{targetPeriod} - \text{lowLimit.period}}{\text{highLimit.period} - \text{lowLimit.period}}$ ;
interpHeight ← lowLimit.height + ratio × (highLimit.height - lowLimit.height);
dir ← lowLimit.dir;
return LimitValue(targetPeriod, dir, interpHeight);

```

Slika 6.5 Pseudokod funkcije za interpolaciju visine vala

Kao rezultat je dobivena interpolirana maksimalna dopustiva visina vala te ostaje da se provjeri je li ta visina manja ili veća od trenutne visine valova.

Rezultat se pohranjuje u listu rezultata i petlja se pomiče korak unaprijed te se cijeli proces ponavlja za sljedeći datum.

| Id Operacije | Year | Success |
|--------------|------------------|---------|
| 1 | 2005-02-01 00:00 | False |
| 1 | 2005-02-01 03:00 | True |
| 1 | 2005-02-01 06:00 | True |
| 1 | 2005-02-01 09:00 | True |
| 1 | 2005-02-01 12:00 | True |
| 1 | 2005-02-01 15:00 | True |
| 1 | 2005-02-01 18:00 | True |
| 1 | 2005-02-01 21:00 | True |

| | | |
|-----|------------------|-------|
| ... | ... | ... |
| 1 | 2005-02-03 12:00 | True |
| 1 | 2005-02-03 15:00 | False |
| 1 | 2005-02-03 18:00 | False |

Tablica 6.3 Primjer tablice rezultata operacije

- Kampanja

Radi potrebe simulacije kampanje koristiti će se podatci koji su dobiveni kao rezultati simulacije izvedivosti operacija. Simulacije će biti obavljene na način da za svaki dan bude izrađen izračun, točnije, simulira se izvođenje slijeda operacija (kampanje) koja počinje na određeni datum. Za početni datum uzima se 6 sati ujutro za svaki dan u rasponu raspoloživih podataka.

Kod simulacije kampanja postoji dodatna razina kompleksnosti koju je potrebno uzeti u obzir: različite međuzavisnosti između operacija i slijed samih operacija.

Također, pošto je teoretski moguće (iako takav slučaj nećemo susresti u okvirima ovog rada) da je određena kampanja neizvediva, potrebno je definirati način na koji se može to zaključiti te potom pohraniti podatak o uspješnosti kampanje.

Ukratko, algoritam za simulaciju kampanje radi na način da pronalazi najraniji izvedivi datum za svaku operaciju dok god taj datum također poštuje pravila međuzavisnosti između operacija te slijeda operacija u kampanji.

Kako bi se izvršio izračun kampanje potrebno je dohvatiti podatke o operacijama iz date kampanje te njihovim međuzavisnostima. Osim navedenog, također dohvaća sve datume za koje postoje definirani oceanski uvjeti (ti datumi su također jednaki svim datumima za koje postoje podaci o izvedivosti operacije).

Zatim, definira se petlja koja za svaki dan (od dana za koje imamo definirane podatke) izračunava izvedivost operacije ako ona krenu u X sati ujutro.

Operacije kampanje se spremaju u stog (eng. *stack*) na način da je na dnu stoga zadnja operacija kampanje, a na vrhu prva operacija kampanje.

Zatim, za svaku operaciju kampanje, počinjući od vrha stoga se izvodi sljedeći slijed operacija koji će biti opisani u sljedećem koraku.

Operacije se izvode sve dok stog nije prazan.

- 1) Iz stoga uzima prvu operaciju te se također u stog proviri i vidi koja je sljedeća operacija (bez da je maknuta iz stoga).
Sada je prisutna trenutna operacija i sljedeća operacija u kampanji.
- 2) Trenutna operacija dodaje se u stog obrađenih operacija.

- 3) Pronalazi se prvi datum koji je veći ili jednak trenutnom datumu (ukoliko se radi o prvoj izvedbi petlje onda je trenutni datum jednak datumu kada počinje kampanja), a da je operacija izvediva uz taj datum odmah se izračunava kada je ta operacija izvedena odnosno datum završetka operacija koja je počela na prvi izvedivi datum.

S podacima trenutnog datuma, datuma početka i datuma kraja operacije, izrađuje se rezultate kampanje za tu operaciju gdje između trenutnog datuma i datuma početka je operacija bila u stanju čekanja (eng. *wait*). Na datum početka ona je bila u stanju početka operacije (eng. *start*), između početka i kraja operacije ona je bila u statusu rada (eng. *work*) te se kraj označava oznakom kraja (eng. *finish*).

Te rezultate se zatim sprema u listu rezultata.

- 4) Prije nego što se prijeđe na sljedeću operaciju vrši se provjera izvedivosti sljedeće operacije ako su trenutni privremeni rezultati trenutne operacije prihvatljivi.

Ova provjera se razlikuje s obzirom na vrstu međuzavisnosti između operacija.

Ukoliko se radi o vezi kraj-početak, traži se prvi datum nakon datuma kraja trenutne operacije na koji je sljedeća operacija izvediva.

Ukoliko se radi o fiksiranoj vrsti međuzavisnosti, onda je potrebno da je pronađeni datum na koji sljedeća operacija može krenuti jednak datumu kraja prošle operacije. Inače, ako se radi o ne fiksiranoj vrsti onda će biti dovoljan bilo koji datum nakon (uključujući završetak) završetka trenutne operacije.

U drugoj vrsti međuzavisnosti, početak-početak u fiksiranoj varijanti, tada se provjerava je li pronađeni datum na koji sljedeća operacija može krenuti jednak datumu početka trenutne operacije, a u ne fiksiranoj varijanti. Dovoljno je dobiti bilo koji datum nakon početka operacija gdje se također uključuje početak operacije.

Ukoliko su navedeni datumi pronađeni na već opisani način, vraća se da je sljedeća operacija prolazna, odnosno ukoliko nisu, onda vraća da nije.

```
Data: nextOperation, firstPassingDate, endDate, operationResultModel
Result: Boolean or None
begin
  if relation is "Finish-Start Non Fixed" then
    nextOpDate = getFirstPassingDate(endDate, nextOperation);
    return endDate ≤ nextOpDate;
  else if relation is "Finish-Start Fixed" then
    nextOpDate = getFirstPassingDate(endDate, nextOperation);
    return endDate = nextOpDate;
  else if relation is "Start-Start Non Fixed" then
    nextOpDate = getFirstPassingDate(firstPassingDate, nextOperation);
    return firstPassingDate ≤ nextOpDate;
  else if relation is "Start-Start Fixed" then
    nextOpDate = getFirstPassingDate(firstPassingDate, nextOperation);
    return firstPassingDate = nextOpDate;
  return False;
any error return None;
end
```

Slika 6.6 Pseudokod funkcije za provjeru izvedivosti operacije kampanje

- 5) Sljedeće se provjerava postoji li uopće sljedeća operacija i ukoliko je došlo do pogreške pri traženju sljedećeg prolaznog datuma, do čaga će doći u slučaju da kampanja nije izvediva, onda se vraćaju dosadašnji rezultati skupa sa informacijom da simulacija kampanje sa početkom na originalni datum nije moguća.
- 6) Ukoliko je program došao do kraja stoga ili ako je sljedeća operacija u nizu izvediva, sljedeći korak je da, ukoliko je broj puta za koji je program završio u petlji oporavka veći od 0 onda se dodaje za trenutnu operaciju vrijeme čekanja (eng. *wait*) jednako tom broju. Postavlja se broj puta za koji je program bio u petlji oporavka na 0. Naposljetku pomiče se trenutni datum na datum početka ili kraja trenutne operacije ovisno o međuzavisnostima na sljedećoj operaciji.
- 7) Ukoliko program nije na kraju stoga ili nije uspješno pronađen zadovoljavajući datum za početak sljedeće operacije, onda se radi sljedeće.
Iz stoga procesuiranih operacija kampanje miče se trenutna operacija, miču se rezultati trenutne operacije. Ove dvije operacije se izvode nad stogom procesuiranih operacija dok se ne naiđe na operaciju u kampanji koju je moguće uopće pomaknuti. Te operacije su samo prva operacija i ne fiksirane operacije.
Ukoliko je prva takva operacija početna operacija kampanje, onda se trenutni datum postavlja na početni datum pomaknut za 3 sata (vrijeme između mjerenja) te se počinje praktički ispočetka. Inače se pomiče trenutni datum na datum početka ili kraja nađene operacije s obzirom na njenu međuzavisnost – ako je kraj-početak onda se izabire kraj, inače se izabire početak operacije.

Koraci se ponavljaju dok se ne isprazni stog ili dok se ne dogodi da nije pronađen niti jedan izvediv datum za sljedeću operaciju.

6.5. Grafički prikazi

Kako bi rezultati analize vremena neraspoloživosti i oceanski podatci bili vizualno prezentirani, napravljeni su grafički prikazi u obliku grafova i tabličnog prikaza podataka.

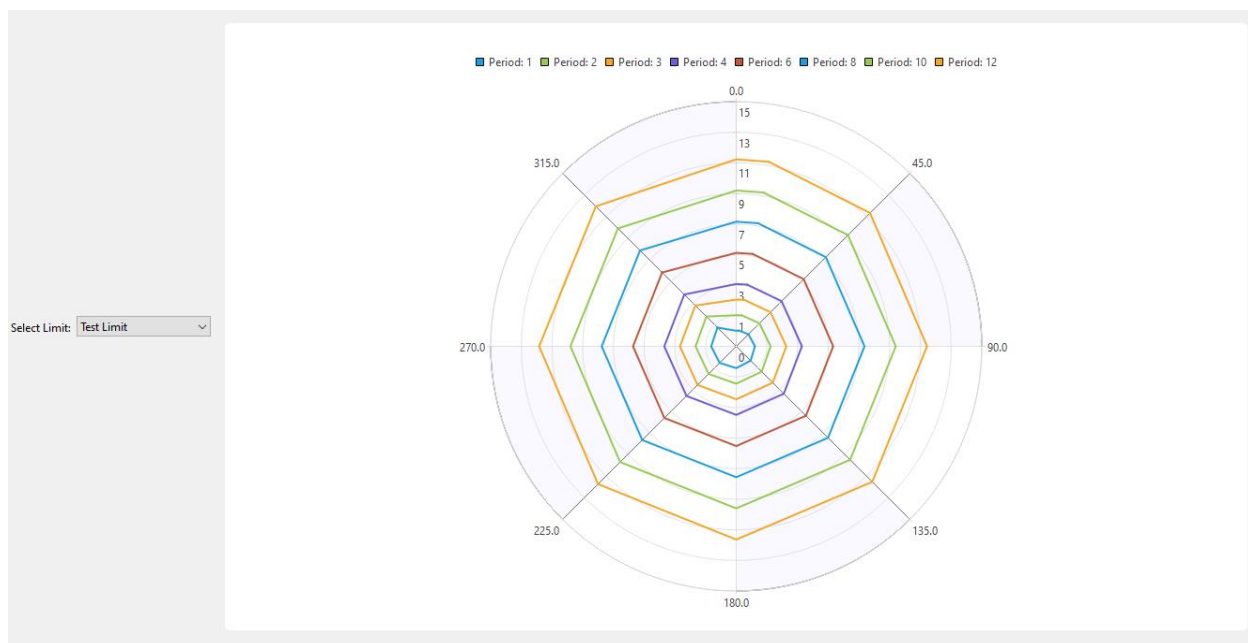
Biti će predstavljena svaka vrsta grafičkog prikaza, opisane transformacije podataka i postupci koji su bili potrebni za njihovu izradu te kratko objašnjenje njihove svrhe

- Polarni graf Operativnih Limita

Polarni graf operativnih limita služi za prikaz promjene maksimalne dozvoljene visine vala s obzirom na periodu i relativni smjer vala.

S obzirom da podatak smjera vala je na rasponu od 0 – 360 stupnjeva, ovaj tip grafa se prirodno nametnuo kao korisno rješenje.

Pošto su podaci već posloženi na način koji poštuje logiku izrade polarnog dijagrama, nisu bile potrebne nikakve značajne transformacije podataka. Za izradu polarnog dijagrama iskorištene su funkcionalnosti *QPolarChart* klase.



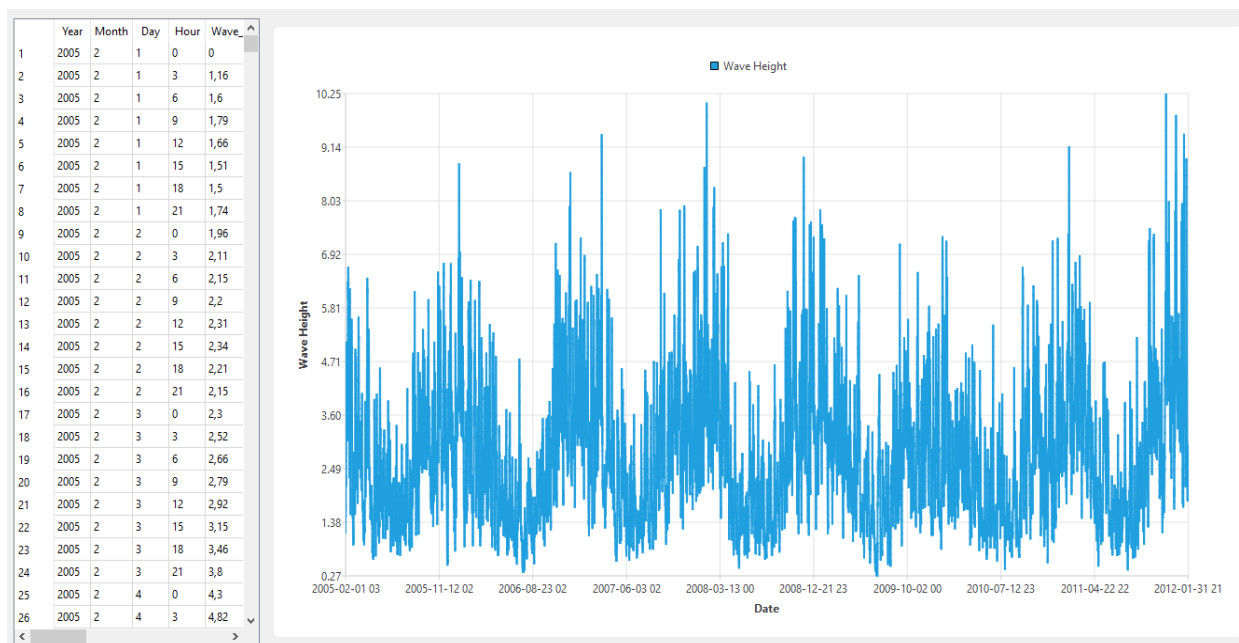
Dijagram 6.2 Primjer polarno grafa Op.Lim.

- Tablica oceanskih podataka i dijagram visine valova

Tablica oceanskih podataka pruža korisniku direktno iz grafičkog sučelja pristup relevantnim oceanskim podatcima koji se dohvaćaju iz baze podataka.

Također, grafički prikaz omogućuje brz prikaz trenda kretanja visine valova pomoću kojeg je moguće napraviti generalnu procjenu kada će operativni limiti biti prekršeni.

Dakle, moguće je vidjeti datum i periodu, visinu i smjer vala na taj datum. Osim navedenog tabličnog prikaza postoji i grafički prikaz tzv. linijski dijagram (eng. *line chart*) na kojemu je prikazana visina vala u metrima na osi ordinata te je na osi apscisa prikazan datum.



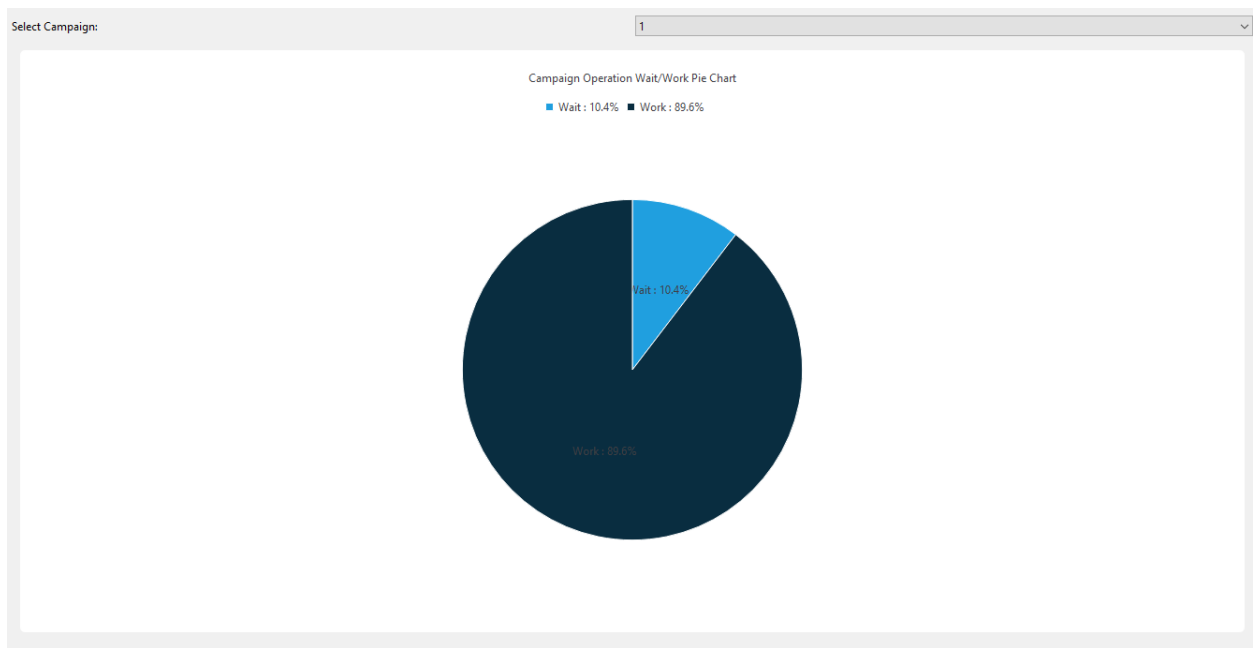
Dijagram 6.3 Oceanskih podataka

Za izradu ovog prikaza iskorištene su funkcionalnosti *QSqlTableModel* klase koja omogućuje jednostavan tablični prikaz i dohvaćanje podataka potrebnih za izradu dijagrama visine vala. S dohvaćenim podatcima je izrađen dijagram koristeći se mogućnostima *QChart* klase.

- Kružni graf Vremena čekanja/Vremena rada

Kružni graf (eng. *pie chart*) prikazuje u postocima odnos vremena provedenog na čekanje naspram vremena provedenog u radu na globalnoj razini za odabranu kampanju.

Podatci su pripremljeni putem SQL upita u kojemu se za odabranu kampanju među svim redcima rezultata kampanje zbrajaju svi retci koji imaju status „u čekanju“ (eng. *wait*) i svi retci koji nemaju taj status. Zatim se te vrijednosti u programu jednostavno uvrste u objekt klase *QPieSeries* koji sam izračunava postotke i prikazuje ih grafički na *QChart* objektu.



Dijagram 6.4 Kružni Dijagram Vremena čekanja/Vremena rada

Ovaj jednostavni prikaz služi za prikaz generalne slike o tome koliko vremena je potrošeno na čekanje. Upotreba ovog grafa uvelike olakšava usporedbu različitih kampanja.

- Dijagram toka kampanje

Dijagram toka (eng. flowchart) kampanje služi za prikaz toka izvođenja operacija unutar jedne instance kampanje. Dakle, za instancu odabrane kampanje koja počinje sa simuliranim izvođenjem na određeni datum prikazuje se tok operacije. Prikazuje se trajanje operacije po satima te se označuje jasno u kojem statusu je određena operacija u određenom trenutku.

Za izradu prikaza iskorištena je *QHorizontalStackedBarSeries* klasa koja omogućuje izradu grupiranih stupčastih grafikona. Za postizanje izgleda dijagrama toka podatke bilo je potrebno izvršiti određenu transformaciju podataka kako bi se oni uklapali u koncepciju *QHorizontalStackedBarSeries* klase.

Podatci se transformiraju na način da se iterira kroz listu rezultata kampanje i grupiraju se podatci prema statusu i operaciji kampanje.

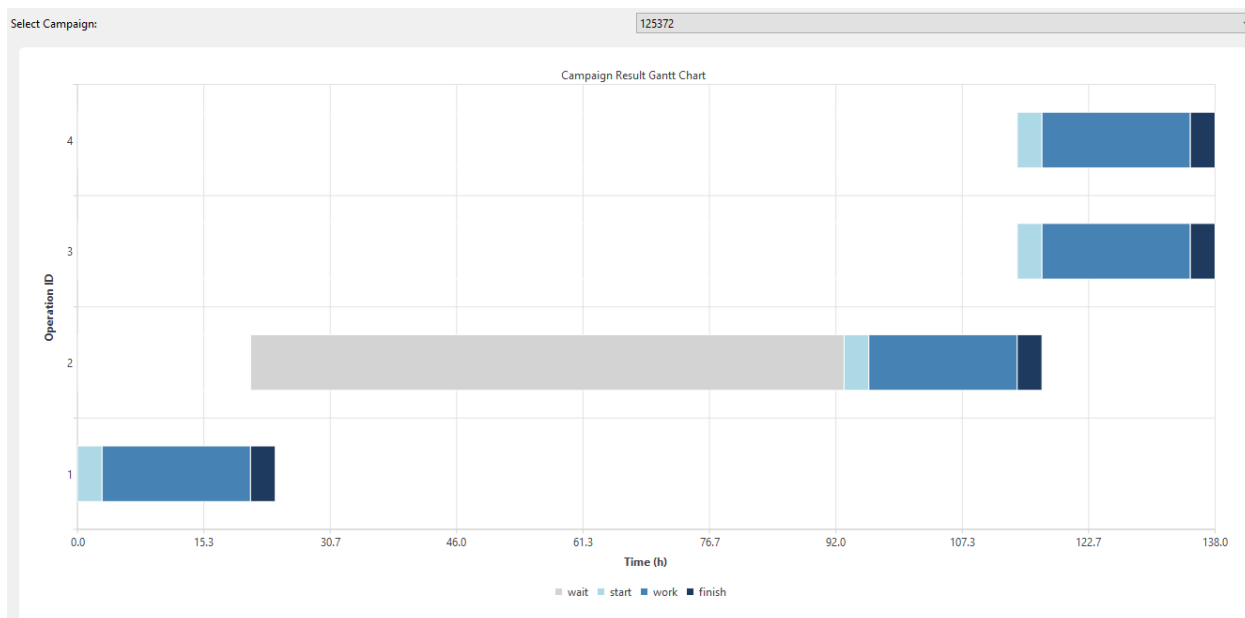
Grupirani podatci su pohranjeni u strukturi rječnika (eng. *dict*) s time da je ključ *tuple* koji predstavlja id operacije kampanje i status.

Gdje status može biti:

- *PrevOp* – služi da se početak trake pomakne na kraj prošle operacije, ova kategorija je skrivena na grafu
- *Wait*
- *Start*
- *Work*
- *Finish*

Svaka operacija kampanje ima zapis u rječniku sa svakim od navedenih statusa s time da taj zapis može biti i jednak 0, ukoliko npr. nije bilo čekanja.

Zatim se izrađuje sam graf. Izgled dijagrama toka u suštini se postiže na način da se podacima koji su pod *PrevOp* statusom dodjeljuje transparentna boja te su oni stoga nevidljivi.



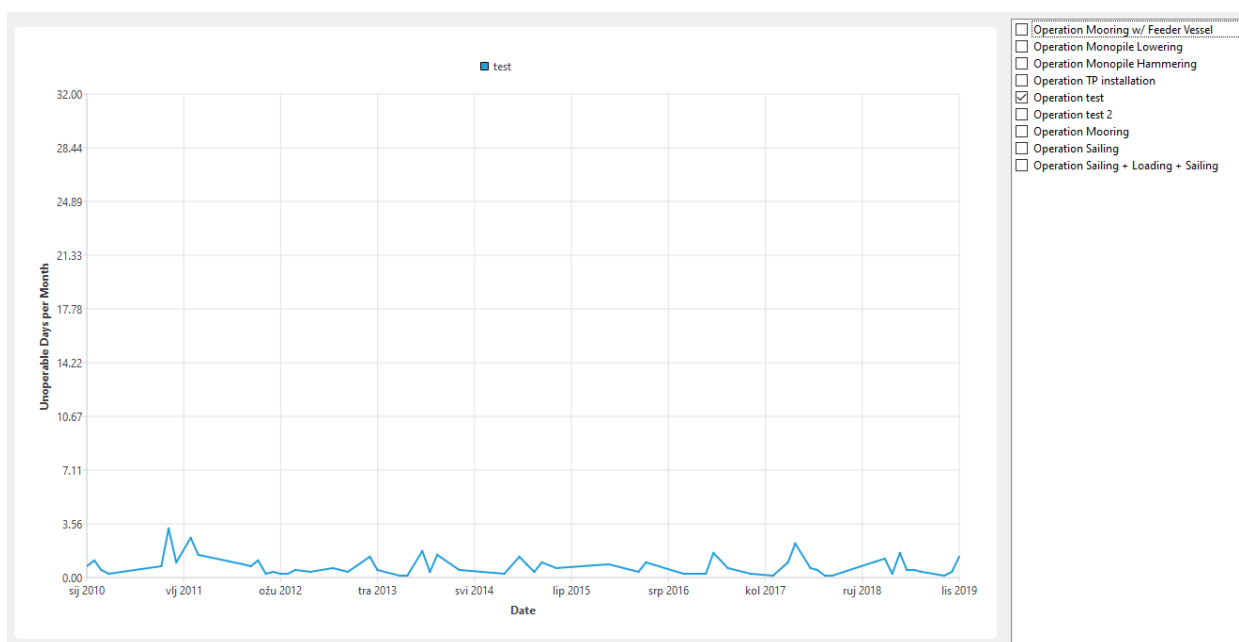
Dijagram 6.5 Dijagram Toka Kampanje

- Dijagram Ukupnog Broja Dana Neraspoloživosti Operacija

Dijagram ukupnog broja dana neraspoloživosti operacija je dijagram koji na razini mjeseca zbraja ukupno vrijeme kada su operacije neraspoložive. Dakle, u obzir se uzimaju globalno sve operacije koje su korištene u projektu.

Iz ovog prikaza te usporedbom sa dijagramom stanja mora moguće je uočiti očekivanu korelaciju te tako na još jedan način potvrditi ispravnost simulacije.

Također, ovaj dijagram se može iskoristiti za dedukciju koje operacije najviše utječu na vrijeme čekanja.



Dijagram 6.6 Dijagram neraspoloživosti operacija

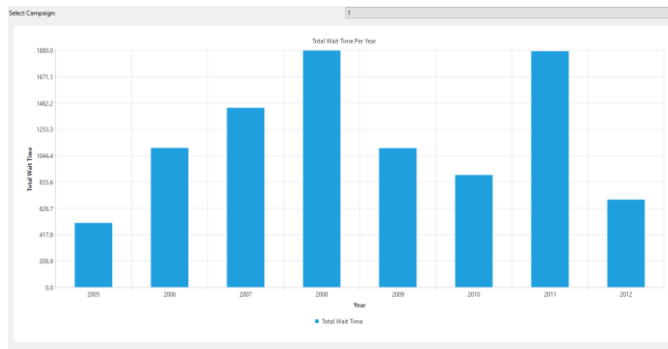
- Dijagrami Ukupnog/Prosječnog Vremena Čekanja

Stupčasti dijagrami (eng. *bar chart*) vezani za vrijeme čekanja služe kako bi bilo prikazano vrijeme potrošeno na čekanje i njegovo kretanje po datumima. Iz tog razloga napravljeni su dijagrami koji prikazuju ukupno i prosječno vrijeme čekanja. Napravljene su dvije vrste dijagrama: po godini i po mjesecima u godini.

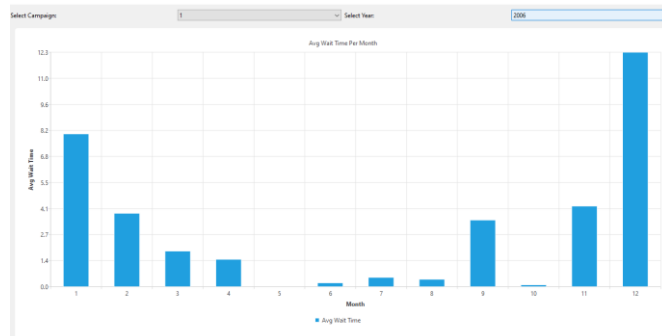
Dakle, u suštini ovdje se radi o 4 dijagrama: ukupno vrijeme čekanja po godini i po mjesecu, prosječno vrijeme čekanja po godini i po mjesecu.

Na osi Y prikazana je duljina čekanja u satima dok su na osi y prikazani mjeseci/godine za koje se to vrijeme čekanja obračunalo.

Transformacija podataka je u ovom slučaju vrlo jednostavna, zbraja se vrijeme čekanja za sve kampanje koje su krenule u određenoj godini ili mjesecu te ako se radi o prosjeku, onda se zbroj dijeli sa brojem operacija koje su se u tom razdoblju dogodile.



Dijagram 6.7 Dijagram ukupnog čekanja



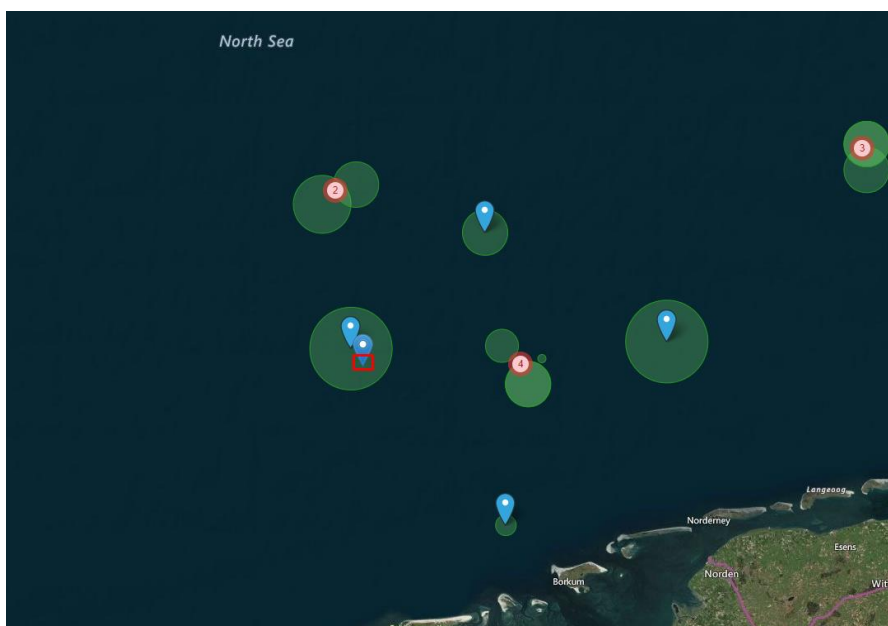
Dijagram 6.8 Dijagram prosječno vremena čekanja

7. Simulacija kampanje i analize vremena neraspoloživosti

Analiza vremena neraspoloživosti je napravljena na temelju jednostavnog modela jednog projekta instalacije monopila i prijelaznih modula pomorske (eng. *offshore*) vjetroelektrane.

Ova vrsta projekta je odabrana prvenstveno zbog izrazite količine javno dostupne dokumentacije i radova na temu pomorskih vjetroelektrana i njihove izgradnje. Ta činjenica omogućuje da u ovom radu čiji fokus nije osmišljavanje i simulacija realnog projekta ipak se testira izrađeno programsko rješenje na (relativno) realnim podacima u (relativno) stvarnom slijedu operacija.

Lokacija za koju su prikupljeni i u ovome programu iskorišteni podatci o stanju oceana nalaze se na koordinatama 54°N, 5.99°E koje se nalaze u neposrednoj blizini Gemini polja vjetroelektrana. Osim spomenute vjetroelektrane u radijusu od 100 kilometara nalaze se mnoge druge vjetroelektrane. Moguće je stoga zaključiti da je pozicija koja je odabrana za svrhe ove analize, iskoristiva za projekt izgradnje vjetroelektrane. Na slici 7.1 označene su vjetroelektrane u djelu sjevernog mora neposredno pokraj izabrane lokacije.



Slika 7.1 54°N, 5.99°E na karti svijeta i obližnje vjetroelektrane

7.1. Kampanja

Analiza će se izvršiti na tri slične kampanje koje se bave istim projektom ali s različitim pristupima. Osmišljene su sljedeće kampanje:

1. Jedno *HLV*(eng. *Heavy Lift Vessel*) plovilo koje ima mogućnost instalacije monopila prenosi monopile i prijelazne module do lokacije izgradnje vjetroelektrana te potom vrši instalaciju 8 monopila i njihovih prijelaznih modula.
2. Jedno *HLV*(eng. *Heavy Lift Vessel*) plovilo koje ima mogućnost instalacije monopila i jedno dodatno plovilo (eng. *Feeder Vessel*) prenosi monopile i prijelazne module do lokacije izgradnje vjetroelektrana te potom *HLV* plovilo vrši instalaciju 8 monopila i njihovih prijelaznih modula.
3. Jedno *HLV*(eng. *Heavy Lift Vessel*) plovilo koje ima mogućnost instalacije monopila i dva dodatna plovila (eng. *Feeder Vessel*) koja prenose monopile i prijelazne module do lokacije izgradnje vjetroelektrana te potom *HLV* plovilo vrši instalaciju 8 monopila i njihovih prijelaznih modula

Ova tri scenarija pokrivaju dva od tri najčešća načina transporta monopila:

1. *Shuttling* – dovoz monopila obavlja plovilo koje vrši instalaciju
2. Pomoćna tegleća plovila *Feeders* vrše prijevoz monopila
3. *Wet tow* tehnika kod koje monopili plutaju na površini mora te ih vuku tegleća vozila

7.2. Operacije

Svaka kampanja se sastoji od operacija putovanja, sidrenja i privezivanja broda/brodova, pomicanje i spuštanje monopila (cilindrični metalni objekt koji služi kao temelj vjetroelektrane, zabijen u morsko dno), zabijanje (eng. *hammering*) monopila i instalacije prijelaznog djela(objekt koji služi kao prijelaz između monopila i samog tornja turbine).

Trajanja operacija (osim putovanja čije smo trajanje sami odredili) preuzeta su iz javno dostupnih podataka i nalaze se u tablici.

Kao što je već spomenuto, postoji sedam različitih operacija te njihov detaljan opis se može pronaći na tablici 7.1.

| Operacija | Trajanje (h) | Opis | Kampanja |
|---|--------------|--|----------|
| Utovar (eng. <i>loading</i>) MP i TP | 3 | Utovar Monopila i Prijelaznih modula na brodove | 1,2,3 |
| Plovidba | 3 | Plovidba od polazišta do lokacije izgradnje vjetroelektrana | 1,2,3 |
| Plovidba + Utovar + Plovidba | 12 | Napravljena radi jednostavnosti, opisuje situaciju kada dodatno plovilo odlazi do ishodišta, vrši utovar te se vraća na lokaciju instalacije | 3 |
| Sidrenje i privezivanje – Samo <i>HLV</i> | 3 | Sidrenje plovila u morsko dno i pripremne operacije | 1 |
| Sidrenje i privezivanje - dodatna plovila | 6 | Sidrenje plovila u morsko dno i privezivanje(eng. <i>mooring</i>) dodatnih plovila | 2,3 |
| Pomicanje i spuštanje MP | 6 | Pomicanje MP od strane <i>HLV</i> i spuštanje u poziciju za zabijanje | 1,2,3 |
| Zabijanje MP | 6 | Zabijanje (eng. <i>hammering</i>) MP | 1,2,3 |
| Postavljanje TP i konekcija s MP | 6 | Pomicanje TP, postavljanje na MP i konekcija | 1,2,3 |

Tablica 7.1 Detaljni popis operacija kampanje

7.3. Operativni Limiti

Svaka od navedenih operacija ima svoj skup operativnih limita.

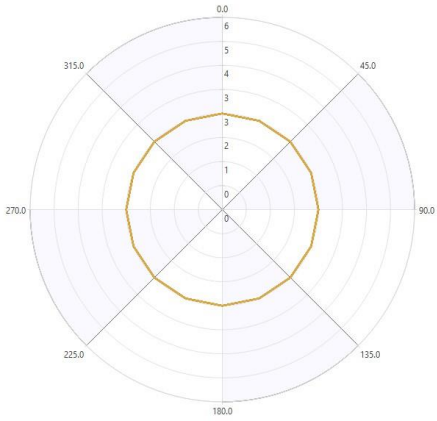
Kako bismo osigurali da su zadani relativno realistični operativni limiti, konzultirani su različiti radovi koji sadrže studije u projektima izgradnje pomorskih vjetroelektrana. Također korišteni su DNV priručnici i ISO standardi koji nalažu da u ovakvim operacijama kao operativni limit se uzima visina vala(Hs) od 1.5m do 2.5m.

Operacija utovara se obavlja u sigurnoj luci koja je zaštićena od velikih valova koji bi onemogućili njeno izvođenje te će zato pretpostavka biti da je ona uvijek moguća.

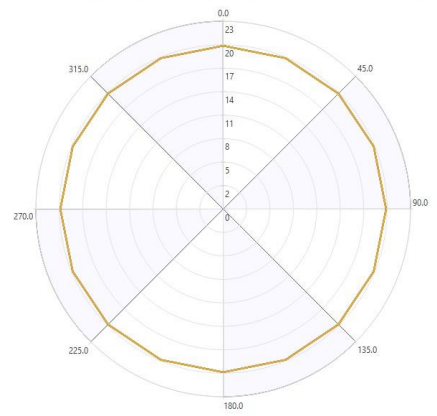
Za manje kritične operacije i operacije za koje nisu uspješno pronađeni detaljniji limiti, limiti su pojednostavljeni te se ne mijenjaju s obzirom na periodu i smjer vala. Te operacije su plovidba te sidrenje i privezivanje.

Za ostale operacije (pomicanje i spuštanje MP, zabijanje MP, postavljanje TP i konekcija s MP) zadani su (relativno) realni limiti koji su napravljeni nalik na stvarne podatke.

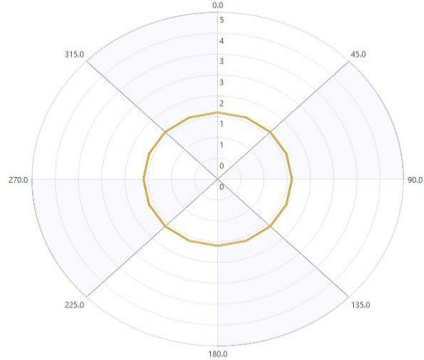
Period: 4 Period: 6 Period: 8 Period: 9 Period: 10 Period: 11 Period: 12 Period: 13 Period: 14 Period: 15 Period: 16 Period: 17 Period: 18



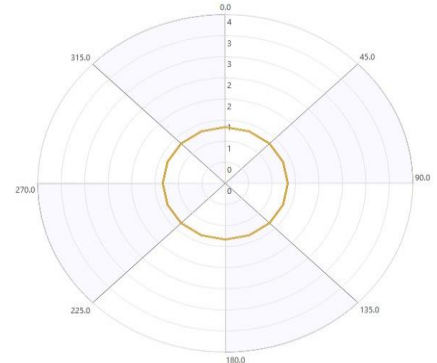
Period: 4 Period: 6 Period: 8 Period: 9 Period: 10 Period: 11 Period: 12 Period: 13 Period: 14 Period: 15 Period: 16 Period: 17 Period: 18



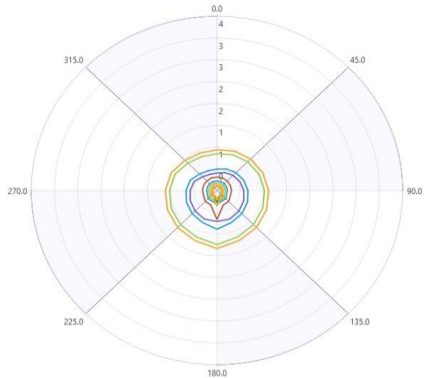
Period: 4 Period: 6 Period: 8 Period: 9 Period: 10 Period: 11 Period: 12 Period: 13 Period: 14 Period: 15 Period: 16 Period: 17 Period: 18



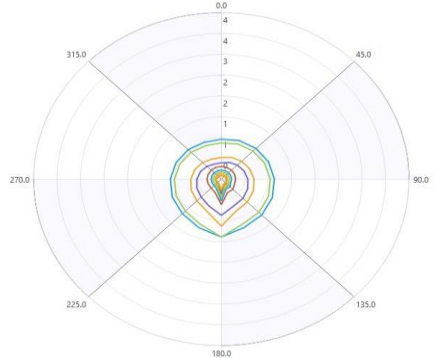
Period: 4 Period: 6 Period: 8 Period: 9 Period: 10 Period: 11 Period: 12 Period: 13 Period: 14 Period: 15 Period: 16 Period: 17 Period: 18



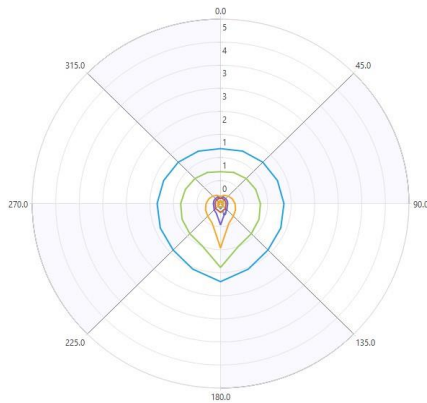
Period: 4 Period: 6 Period: 8 Period: 9 Period: 10 Period: 11 Period: 12 Period: 13 Period: 14 Period: 15 Period: 16 Period: 17 Period: 18



Period: 4 Period: 6 Period: 8 Period: 9 Period: 10 Period: 11 Period: 12 Period: 13 Period: 14 Period: 15 Period: 16 Period: 17 Period: 18



Period: 4 Period: 6 Period: 8 Period: 9 Period: 10 Period: 11 Period: 12 Period: 13 Period: 14 Period: 15 Period: 16 Period: 17 Period: 18



Dijagram 7.1 Polarni grafovi za Operativne limite, redoslijed: 1,2,3,4,5,6,7 ili Plovidba, Sidrenje/Privezivanje HLV, Sidrenje i privezivanje dodatna plovila, Pomicanje MP, Instalacija MP, Instalacija TP

7.4. Tok Kampanja

Svaka kampanja ima za cilj instalaciju 8 monopila te postavljanje njihovih prijelaznih modula. Taj proces je opisan pomoću 8 različitih operacija, a kako bi bilo instalirano svih 8 monopila potrebno je kombinirati i ponavljati operacije.

Stoga jedna kampanja instalacije 8 monopila u prvom i drugom scenariju ima 35 operacije, a u trećem scenariju ima 30 operacija.

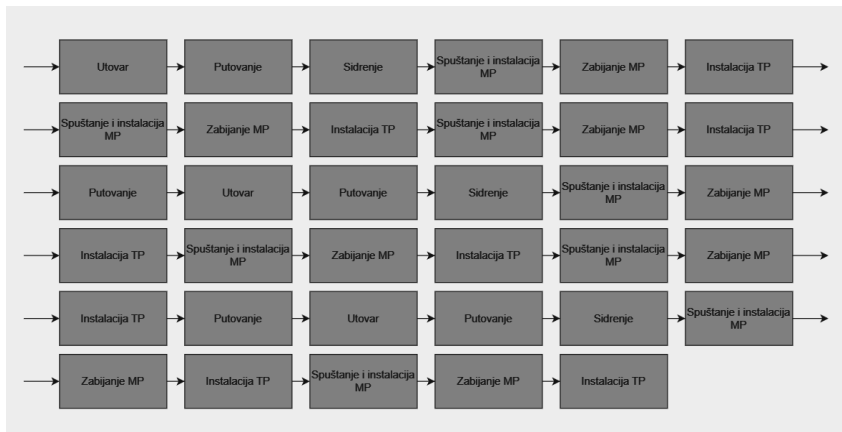
| Operacija | Kampanja 1 | Kampanja 2 | Kampanja 3 |
|---|------------|------------|------------|
| Utovar (eng. <i>loading</i>) MP i TP | 3 | 3 | 1 |
| Plovidba | 5 | 5 | 1 |
| Plovidba + Utovar + Plovidba | | 0 | 1 |
| Sidrenje i privezivanje – Samo <i>HLV</i> | 3 | 0 | 0 |
| Sidrenje i privezivanje-dodatna plovila | 0 | 3 | 3 |
| Pomicanje i spuštanje MP | 8 | 8 | 8 |
| Zabijanje MP | 8 | 8 | 8 |
| Postavljanje TP i konekcija s MP | 8 | 8 | 8 |
| Ukupno | 35 | 35 | 30 |

Tablica 7.2 Kvantitativni popis operacija po kampanjama

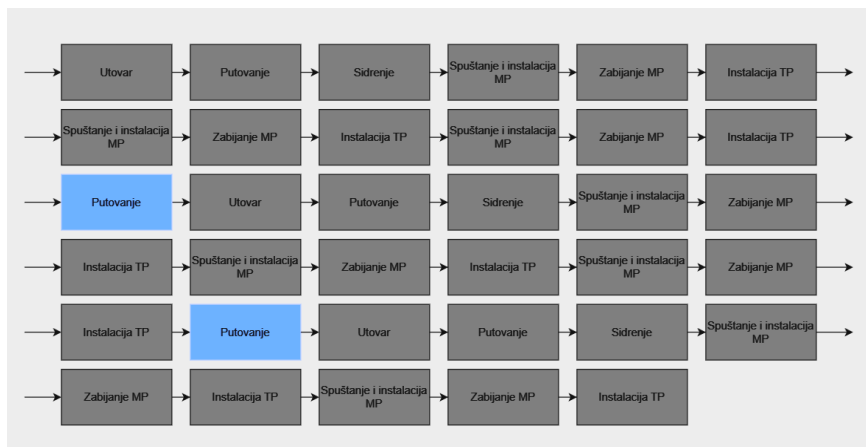
Iako kampanje 1 i 2 naizgled imaju iste operacije, između njih je razlika u slijedu zbog toga što transportno dodatno plovilo može krenuti na povratno putovanje za transport dodatnih monopila i prije nego što se do kraja izvrši zabijanje monopila.

Koristeći ovu i ostale razlike između kampanja moguće je analizirati kako različite međuzavisnosti između operacija utječu na vrijeme nerasploživosti.

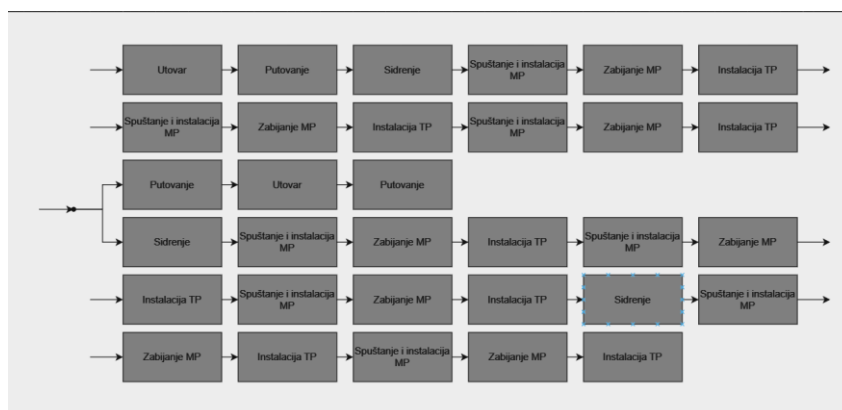
Detaljnije je predstavljen tok svake pojedine kampanje na dijagramima toka 7.8,7.9,7.10.



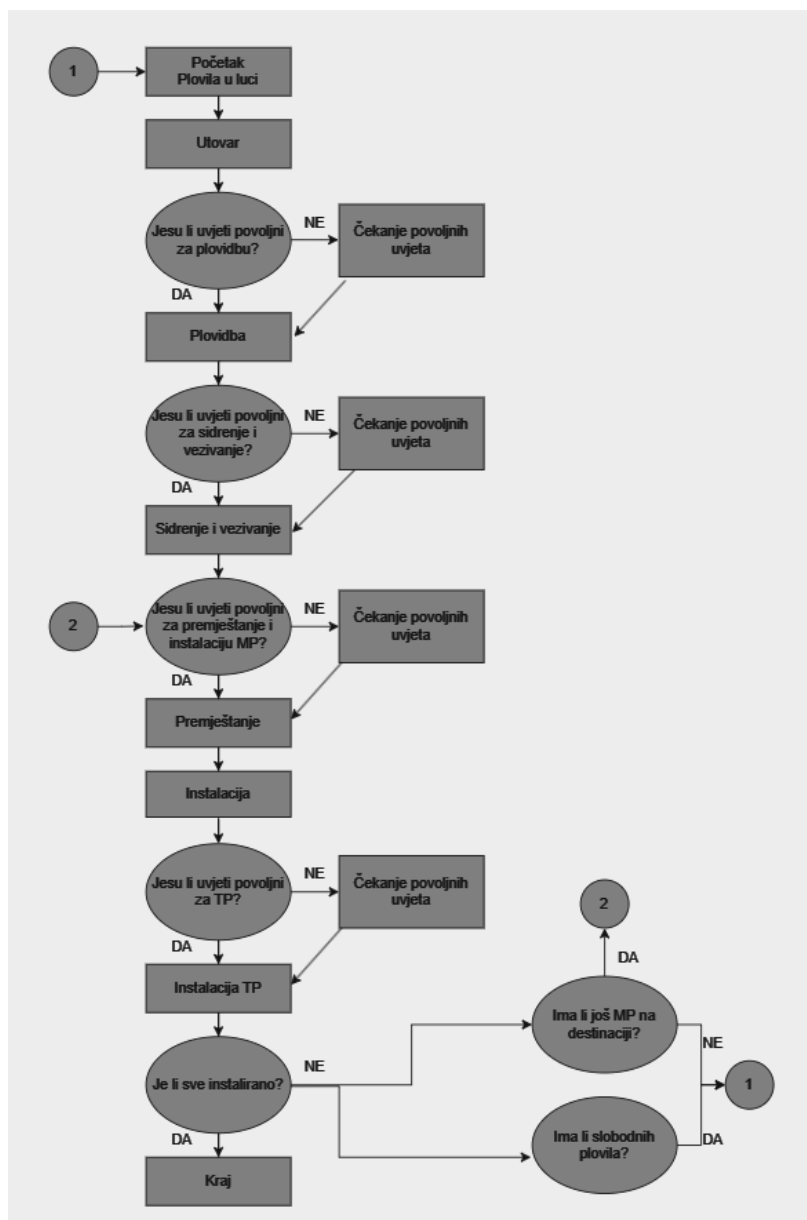
Dijagram 7.2 Dijagram Toka 1. Kampanje



Dijagram 7.3 Dijagram Toka 2. Kampanje



Dijagram 7.4 Dijagram Toka 3. Kampanje



Dijagram 7.5 Dijagram općeg toka projekta

7.5. Rezultati

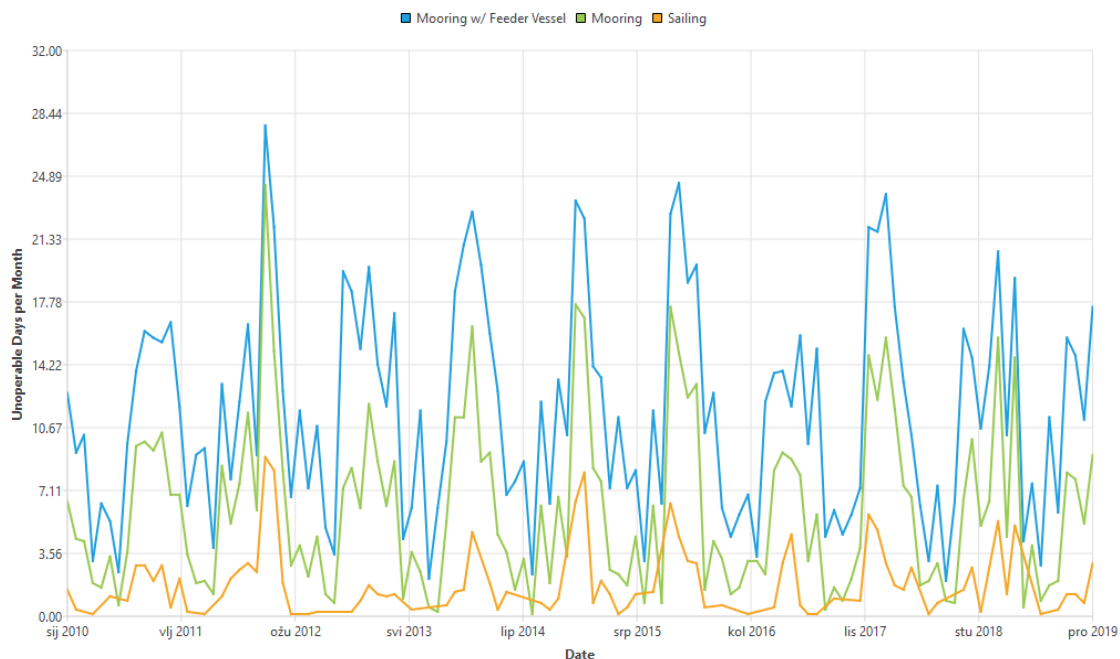
U ovome poglavlju biti će predstavljene rezultati prethodno opisanih kampanja i operacija.

Neraspoloživost operacija

Za uvid u nerasploživost samih operacija odvojeno od razine kampanje biti će iskorišten dijagram ukupnog broj nerasploživih dana mjesečno po operacijama.

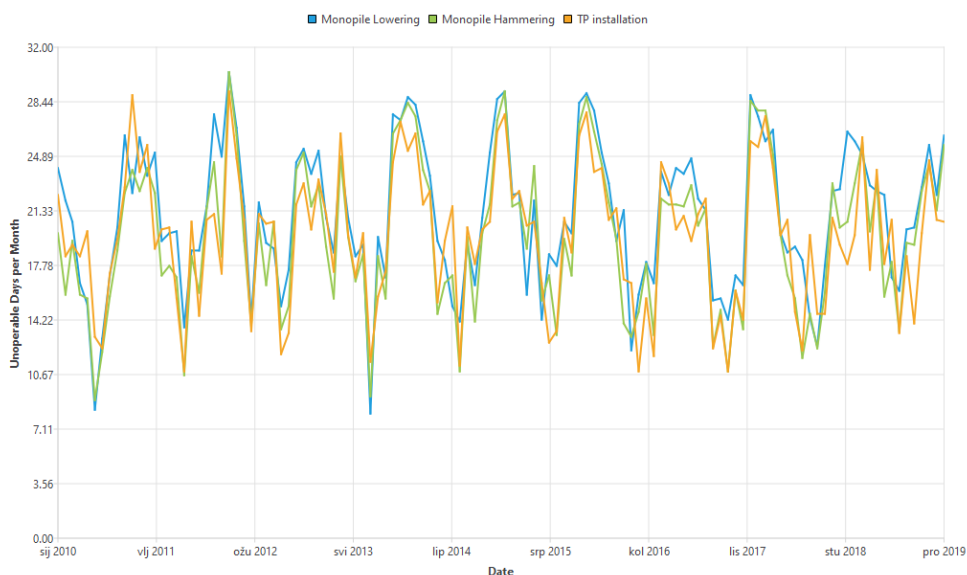
Iz dijagrama 7.12 mogu se iščitati podaci za operacije s pojednostavljenim operativnim limitima. Kod operacija sa jednostavnim limitima dobiva se očekivani izgled grafa s obzirom da su limiti

visine vala kod plovidbe 3 metra, sidrenja 2 metra i sidrenja s privezivanjem pomoćnih plovila 1.5 metara.



Dijagram 7.6 Nerasploživost pojednostavljenih op.

Kod operacija sa kompleksnijim limitima opravdano bi bilo očekivati i kompleksniju raspodjelu, ali ipak kao što je prikazano na polarnom grafu svi limiti prate više-manje isti uzorak. Iz tog razloga na grafu 7.13 se nalaze slične krivulje.



Dijagram 7.7 Neraspoloživost ostalih Op.

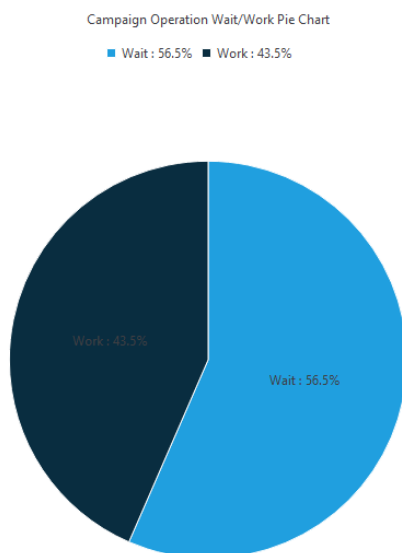
Sve u svemu, zaključak je da je operacija spuštanja monopila najkritičnija te da su operacije putovanja i sidrenja najnekritičnije.

Daljnjom analizom podataka pokazalo se da je operacija spuštanja monopila na raspon u od 10 godina neizvediva ukupno 2527.875 dana odnosno otp. 6.95 godina, dok su operacija zabijanja MP i operacija instalacije TP neizvedive 2359 dana odnosno 2356.5 dana.

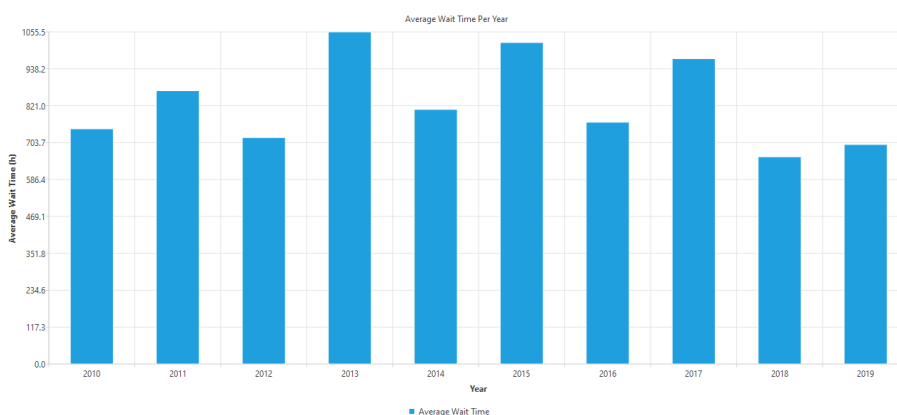
- Prva kampanja

U prvoj kampanji postoji slučaj u kojem svu instalaciju obavlja jedno plovilo.

Ukoliko uzmemo u obzir globalno sve kampanje ovog tipa koje su izvršene, ukupno vrijeme potrošeno na čekanje naspram ukupnog vremena provedenog na rad je 43.5% naspram 56.5%. Takva situacija signalizira da postoje relativno izvedive kampanje te da limiti nisu premali.

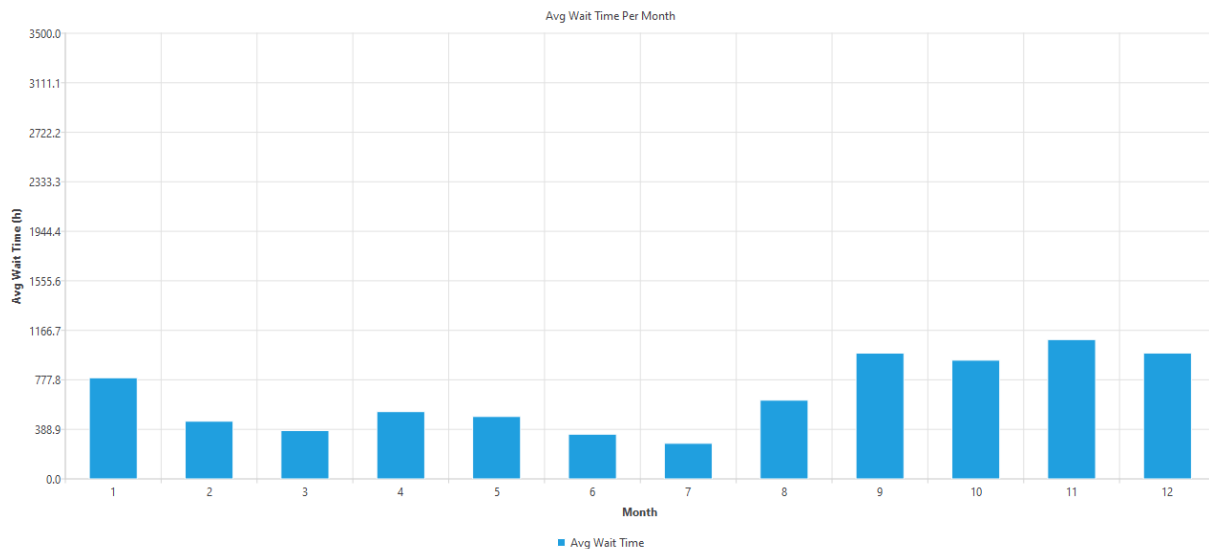


Dijagram 7.8 Kružni graf 1.kampanja

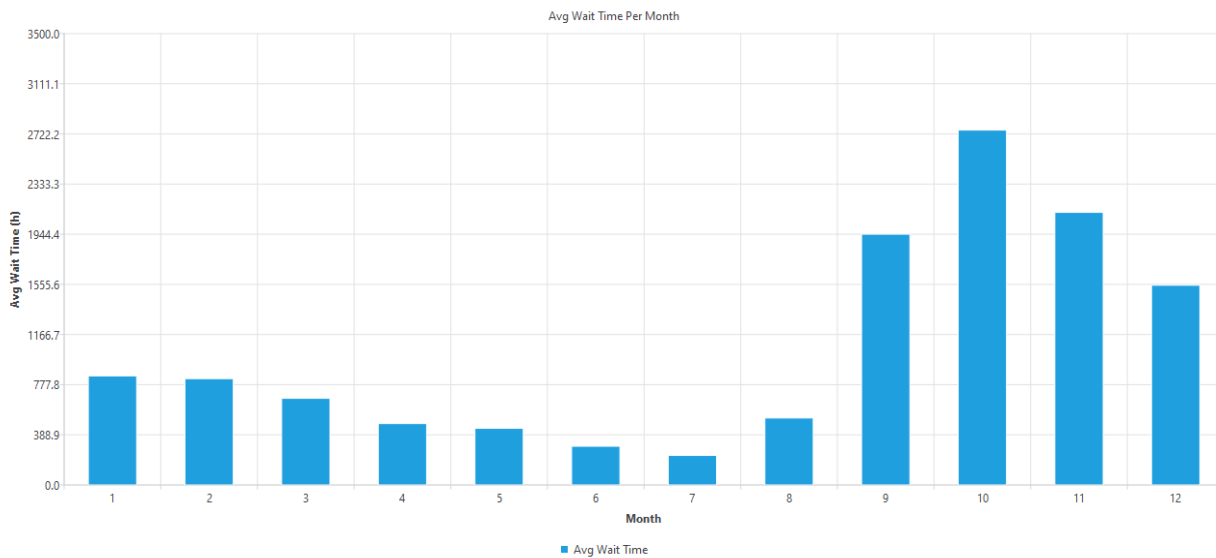


Dijagram 7.9 Prosječno čekanje 1. kampanje po godini

Pregledom prosječnog vremena trajanja kampanje na godišnjoj razini vidljiv je osrednji raspon vrijednosti cca. 700-1050. Za pregled na razini mjeseca uzeti će se godinu s najdužim i sa najkraćim prosječnim trajanjem kampanje: 2018. i 2013. Razlike između 2013. i 2018. najviše su izražene u kasnoj jeseni te zimskim mjesecima. Može se zaključiti da je što se tiče visine valova, zima 2018. godine bila izrazito blaža te time omogućila manje prosječno vrijeme čekanja.



Dijagram 7.10 Prosječno čekanje po mjesecu 1.kampanje 2018.

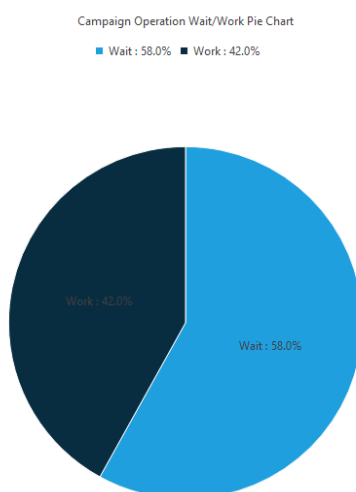


Dijagram 7.11 Prosječno čekanje po mjesecu 1.kampanje 2013.

Druga kampanja

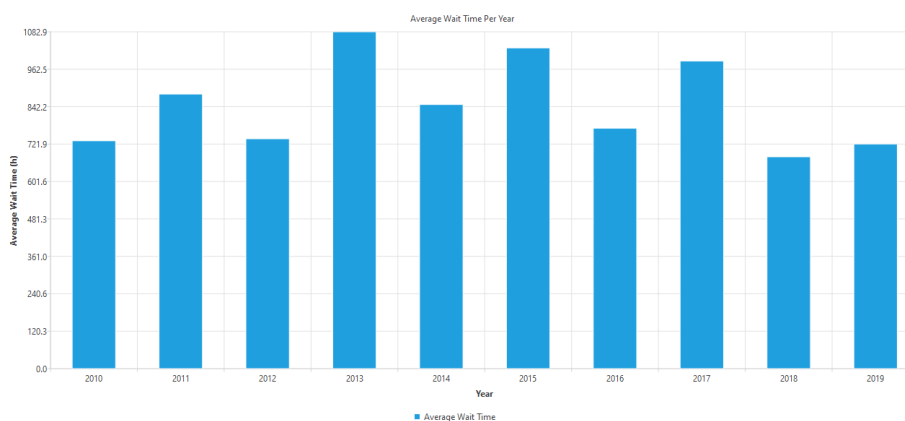
Druga kampanja se razlikuje od prve utoliko da postoji jedno plovilo koje služi za prijenos MP i TP modula. Ovo rezultira time da transportno plovilo može krenuti na put prema ishodištu da pribavi dodatne MP i TP ranije te bi u teoriji ta promjena trebala rezultirati smanjenjem vremena čekanja.

Ukupno vrijeme potrošeno na čekanja naspram vremena ukupnog vremena potrošenog na rad je 58% naspram 42%.

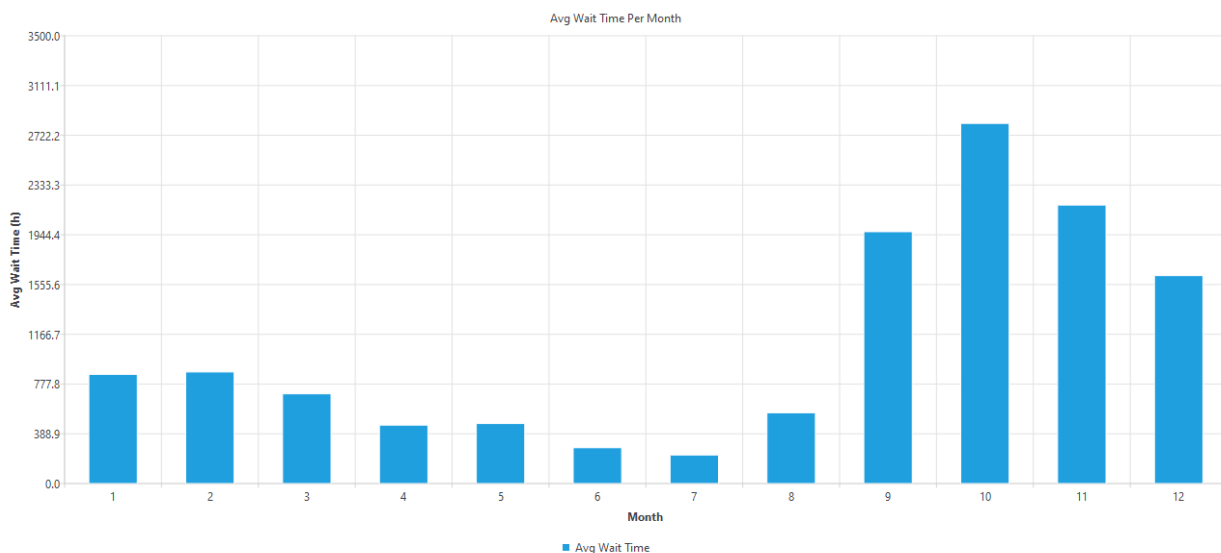


Dijagram 7.12 Kružni graf 2.kampanja

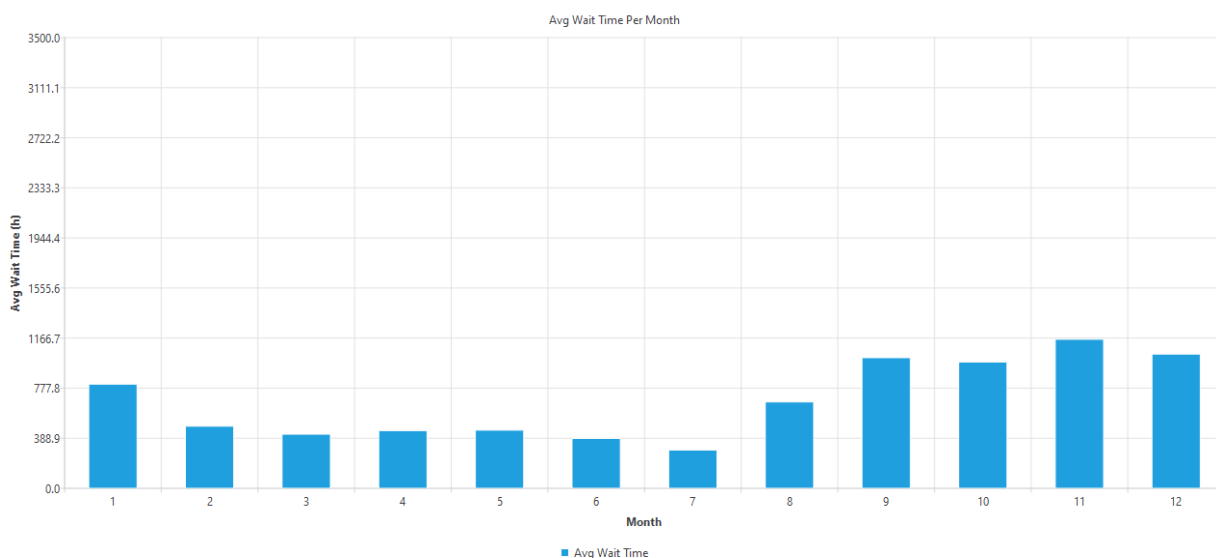
Pregledom prosječnog vremena trajanja kampanje na godišnjoj razini vidljiv je osrednji raspon vrijednosti cca. 720-1080. Za pregled na razini mjeseca uzeti će se godinu s najdužim i sa najkraćim prosječnim trajanjem kampanje: 2018. i 2013. Razlike se događaju iz već navedenih razloga.



Dijagram 7.13 Prosječno čekanje 2. kampanje po godini



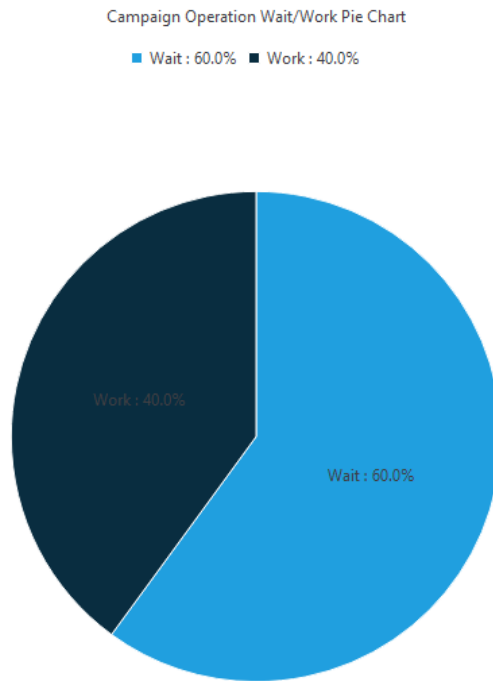
Dijagram 7.14 Prosječno čekanje po mjesecu 2.kampanje 2013.



Dijagram 7.15 Prosječno čekanje po mjesecu 2.kampanje 2018.

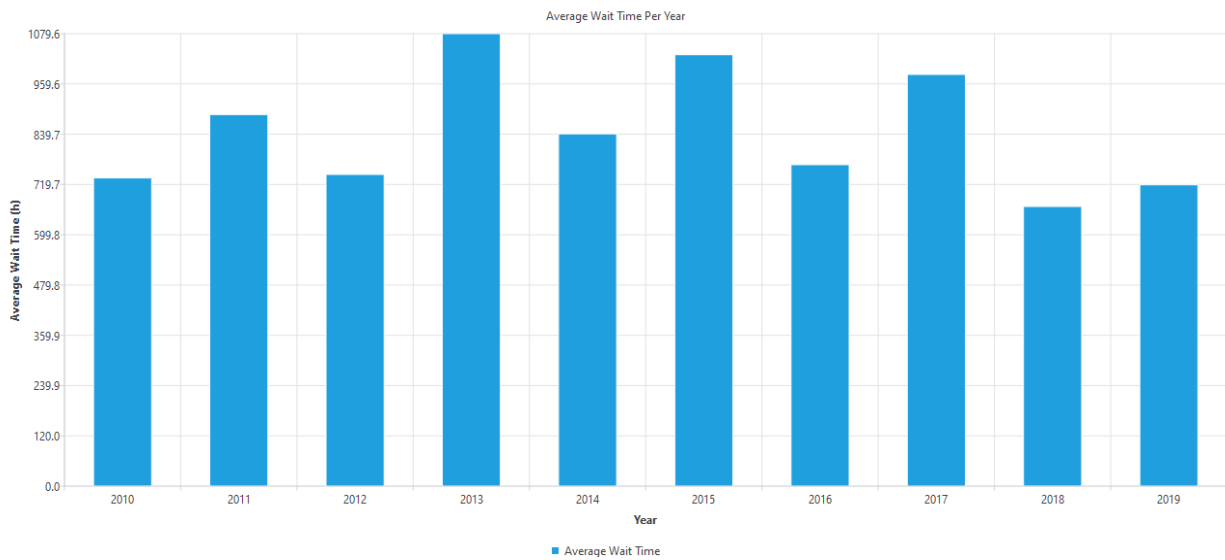
Treća kampanja

Treća kampanja uvodi još jedno dodatno plovilo koje služi za prijenos MP i TP modula. Ovo rezultira time da transportno plovilo može krenuti na put prema ishodištu da pribavi dodatne MP i TP dok se vrši instalacija MP, TP koji su na drugom plovilu, te bi u teoriji ta promjena trebala rezultirati smanjenjem vremena čekanja.



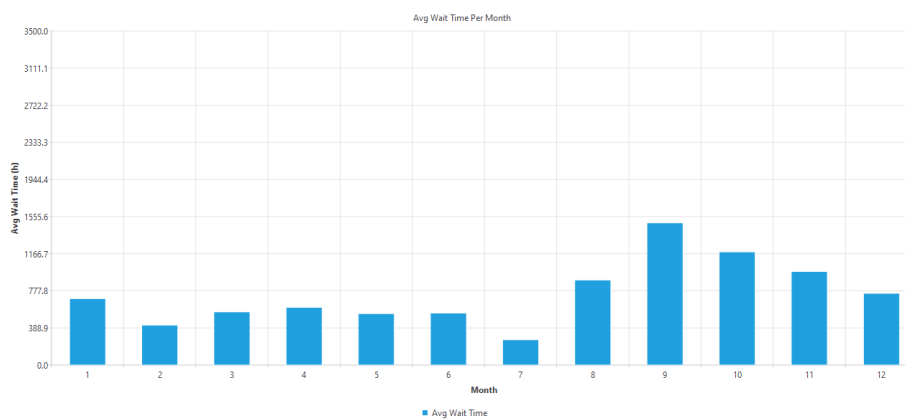
Dijagram 7.16 Kružni graf 3.kampanja

Ukupno vrijeme potrošeno na čekanja naspram ukupnog vremena potrošenog na rad je 60% naspram 40%.

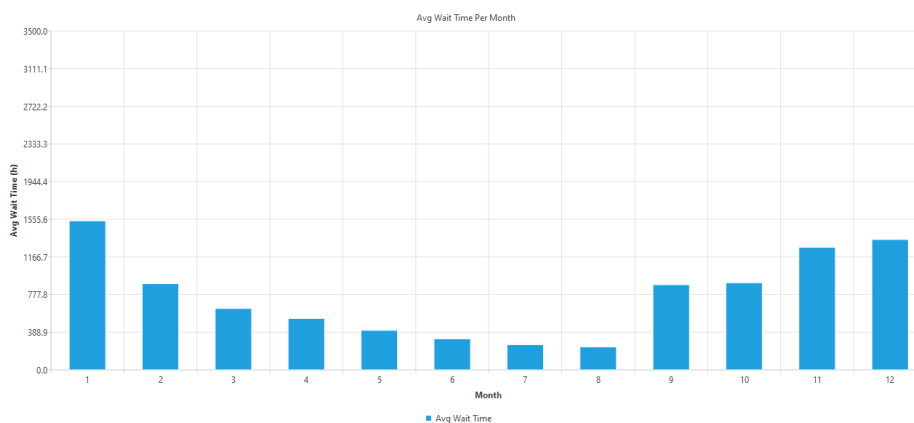


Dijagram 7.17 Prosječno čekanje 3. kampanje po godini

Kritične godine su ponovno 2013. i 2018., ali ovaj put će se pogledati dvije godine sa više prosječnim vrijednostima: 2012. i 2016.



Dijagram 7.18 Prosječno čekanje po mjesecu 1.kampanje 2012.



Dijagram 7.19 Prosječno čekanje po mjesecu 1.kampanje 2016.

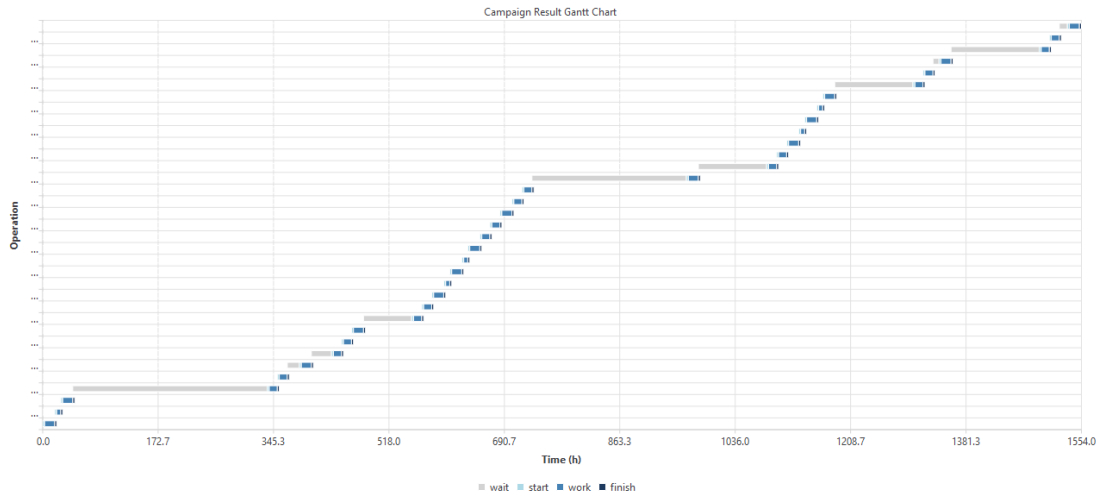
7.6. Usporedba toka kampanja

Do sada je napravljena usporedba na razini ukupnih podataka kampanja.

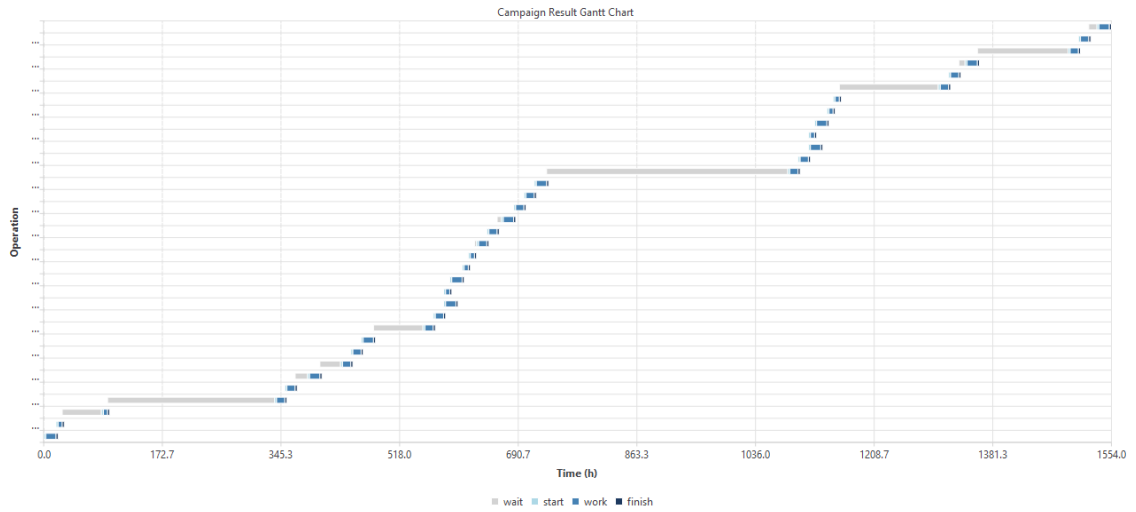
U ovom poglavlju odabran je jedan datum početka i za njega su uzeti dijagrami toka operacija za svaku od tri kampanje.

Odabran je nasumično jedan datum čije vrijeme neraspoloživosti operacija se nalazi na sredini raspona vrijednosti ukupnog vremena neraspoloživosti operacija.

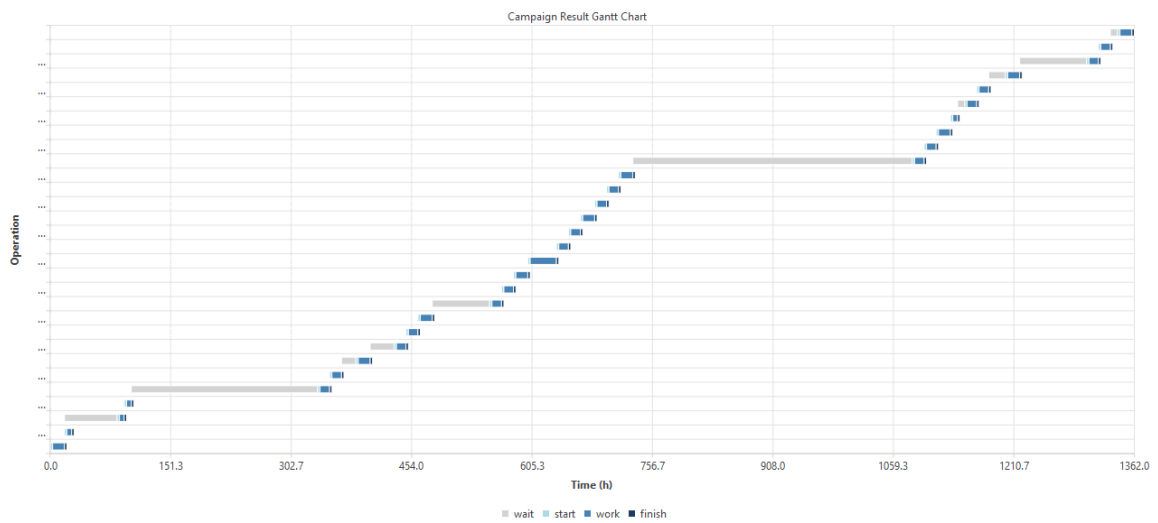
Odabran je datum 22.09.2014.



Dijagram 7.20 Dijagram toka 1. kampanja

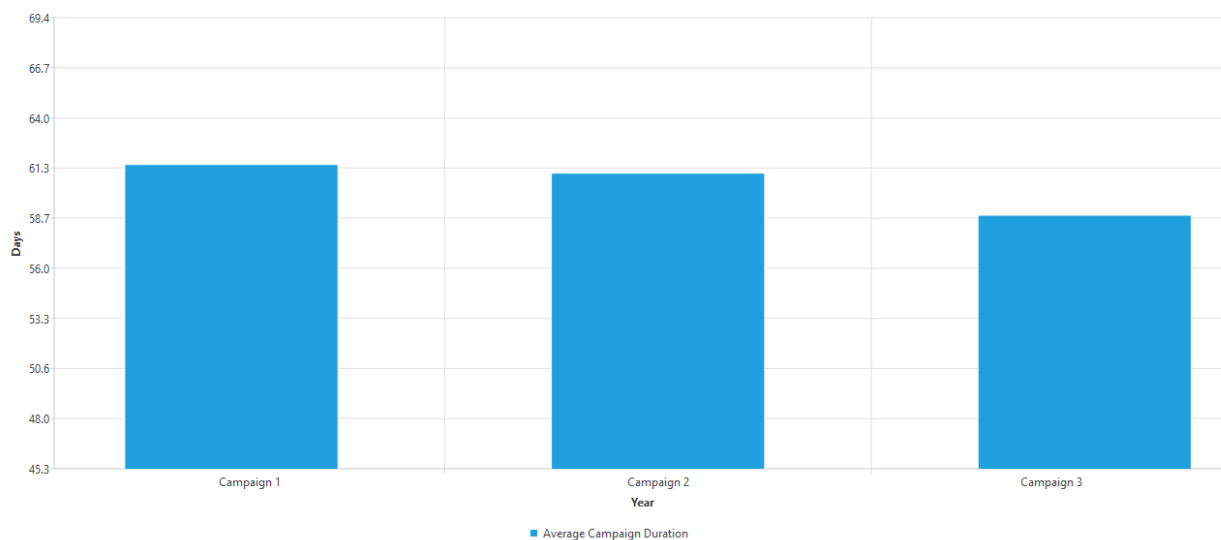


Dijagram 7.21 Dijagram toka 2. kampanja



Dijagram 7.22 Dijagram toka 3. kampanja

Iz dijagrama toka 7.26,7.28,7.29 može se iščitati da bezobzira na razlike u slijedu kampanje 1 i 2 u ovom slučaju traju jednako (1554 sati), dok kampanja 3 ima nešto kraće ukupno trajanje (1362). Ovo je čest slučaj što dokazuje i mala razlika u prosječnim vrijednostima između različitih kampanja (dijagram 7.29).



Dijagram 7.23 Prosječno trajanje kampanja u danima

Najveće čekanje (744,975 i 780 sati) u odabranim kampanjama se nalazi kod operacije instalacije monopila, ali samo iz razloga što je operacija nakon, operacija zabijanja monopila u morsko dno, povezana fiksnom kraj-početak vezom. Stoga je potrebno da između operacija instalacije monopila i njegovog zabijanja ne bude zastoja te to rezultira dodatnim čekanjem na duži povoljan vremenski prozor u kojemu je moguće obaviti obje operacije uzastopno.

Ako se pobliže usporedi graf prve i druge kampanje vidljivo je da je mogućnost ranijeg odlaska transportnog plovila omogućila uštedu vremena, ali u ovom slučaju zbog oceanskih uvjeta prilikom postavljanja 6. monopila (16.operacija 2.kampanje) dobitak na vremenu nije došao do izražaja.

Sve u svemu, čak i na temelju ovakvog malog i idealiziranog modela stvarnih projekata, uključivanjem dodatnih transportnih plovila smanjujemo vrijeme neraspodivnosti operacija.

8. Zaključak

U ovom radu dan je kontekst potreban za uvod u jednu vrlo kompleksnu temu planiranja pomorskih operacija i izrađeno je programsko rješenje za simulaciju i analizu povijesnih oceanskih podataka s ciljem analize vremena neraspoloživosti operacija.

Rezultati simulacije operacija pružili su temelj za izradu realnog prikaza utjecaja operativnih limita na trajanje operacije i posljedično cijele kampanje.

Kampanje koje su izrađene za ovaj rad sastoje se od 30-35 operacija što je samo idealizirani model koji predstavlja dio jednog stvarnog projekta izgradnje pomorskih vjetroelektrana.

Također je bitno je napomenuti da je analiza povijesnih podataka (eng. *hindcast analysis*) samo jedan dio modela koji se koriste za planiranje pomorskih operacija.

Stvarni projekti u pravilu se sastoje od više stotina različitih operacija i izrada jednog stvarnog projekta i njegova simulacija su sigurno zanimljiva tema koja bi mogla biti zasebni rad.

Upotrebom pomorskih operacija s različitim operativnim limitima i međuzavisnostima uspješno je demonstrirano kako nepovoljne vremenske prilike utječu na izvodivost operacija.

U ovom modelu korišteni su isključivo podaci o visini, periodi i smjeru valova, ali u stvarnosti je potrebno uzeti u obzir i utjecaj vjetra, morskih struja i mnogih drugi parametara.

Sažetak

U ovome radu opisane su pomorske operacije, operativni limiti i kampanje. Koristeći limitirani set podataka o stanju oceana, visina vala, perioda vala i smjer vala napravljeno je programsko rješenje za analizu vremena neraspoloživosti operacija. Izrađenim algoritmom određuje se prvo izvedivost operacije te na tom temelju simulira izvođenje kampanje. Također, postoji podrška za simulaciju različitih međuzavisnosti i sljedova operacija. Programsko rješenje napravljeno je koristeći python i Qt, sadrži različite grafičke prikaze putem kojih je moguće provesti analizu. Prikaz funkcionalnosti programskog rješenja napravljen je putem simulacije tri različite kampanje vezane za projekt izgradnje pomorskih vjetroelektrana.

Abstract

This paper describes maritime operations, operational limits, and campaigns. Using a limited dataset on ocean conditions, wave height, wave period, and wave direction, a software solution was developed to analyze the downtime of operations. The developed algorithm first determines the feasibility of the operation and, based on that, simulates the execution of the campaign. Additionally, there is support for simulating various interdependencies and sequences of operations. The software solution was developed using Python and Qt, and includes various graphical displays through which analysis can be conducted. The functionality of the software solution is demonstrated through the simulation of three different campaigns related to the offshore wind farm construction project.

Literatura

1. -. (2. Svibanj 2024). *Wikipedia*. Preuzeto 31. kolovoz 2024 iz SQLite:
<https://en.wikipedia.org/wiki/SQLite>
2. -. (6. Svibanj 2024). *Wikipedia*. Preuzeto 31. kolovoz 2024 iz Metocean:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Metocean>
3. -. (n.d.). *Qt for Python*. Preuzeto 31. kolovoz 2024 iz Qt for Python:
<https://doc.qt.io/qtforpython-6/index.html>
4. -. (n.d.). *Qt Group*. Preuzeto 31. kolovoz 2024 iz
<https://www.qt.io/resources/videos/10-years-of-rimac-in-vehicle-infotainment-with-qt>
5. -. (n.d.). *Russian Maritime Register of Shipping (RS)*. Preuzeto 31. kolovoz 2024 iz
Marine operations: <https://rs-class.org/en/services/marine-operations-mo/>
6. Bulder, B., Swamy, K., Warnaar, P., Delft, Y. v., & Chrysochoidis-Antsos, N. (31. Srpanj 2019). *Research Gate*. Preuzeto 31. kolovoz 2024 iz Innovations for Port of Den Helder Infrastructure following offshore wind developments:
<https://www.researchgate.net/publication/359108382>
7. DNV-OS-H203. (Veljača 2012). *Transit and Positioning of Offshore Units*. Preuzeto 31. kolovoz 2024 iz Transit and Positioning of.
8. G.F. Clauss and T. Riekert, T. U. (1990). Preuzeto 31. kolovoz 2024 iz Operational Limitations of Offshore Crane Vessels.
9. Guachamin, W., Gao, Z., Moan, T., & Li, L. (Kolovoz 2016). *Research Gate*.
doi:10.1016/j.oceaneng.2016.08.015
10. Li, L., Haver, S., & Berlin, N. (2021). *Science Direct*. Preuzeto 31. kolovoz 2024 iz Assessment of operational limits: Effects of uncertainties in sea state description:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095183392100037X#sec2>
11. Milschus, A. (19. Siječanj 2016). *offshoreWIND.biz*. Preuzeto 31. kolovoz 2024 iz FEEDER SYSTEM: “Feeder to serve for the match”:

<https://www.offshorewind.biz/2016/01/19/feeder-system-feeder-to-serve-for-the-match/>

12. OFFSHORE STANDARD, DNV-OS-H101. (Listopad 2011). Preuzeto 31. kolovoz 2024 iz Marine Operations, General.
13. Rip, J. (2015). *Probabilistic downtime analysis for complex marine projects*. Preuzeto 31. kolovoz 2024 iz Probabilistic downtime analysis for.
14. Tjaberings, J., Fazi, S., & Ursavas, E. (20. Rujan 2022). *Science Direct*. doi:10.1016/j.rser.2022.112951
15. *Wikipedia*. (n.d.). Dohvaćeno iz Gemini Wind Farm: https://en.wikipedia.org/wiki/Gemini_Wind_Farm

10. Dodaci

10.1. Sadržaj slika

| | |
|---|----|
| Slika 2.1 Vremenski okvir..... | 10 |
| Slika 2.2 Operacije ograničene/neograničene vremenom | 11 |
| Slika 4.1 Kontinuirana operacija..... | 17 |
| Slika 4.2 Operacija ograničena referentnim periodom..... | 18 |
| Slika 4.3 Operacija ograničena referentnim periodom..... | 19 |
| Slika 4.4 Stablo odabira opća operacija | 20 |
| Slika 6.1 Pseudokod funkcije za generaciju rezultata simulacije Op..... | 29 |
| Slika 6.2 Relativni smjer vala | 30 |
| Slika 6.3 Pseudokod funkcije za pronalazak najbližeg kuta | 30 |
| Slika 6.4 Pseudokod funkcije za interpolaciju visine vala | 31 |
| Slika 6.5 Pseudokod funkcije za provjeru izvedivosti operacije kampanje | 33 |
| Slika 7.1 54°N, 5.99°E na karti svijeta i obližnje vjetroelektrane..... | 41 |

10.2. Sadržaj tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 6.1 Tablica oceanskih podataka | 25 |
| Tablica 6.2 Tablica primjer operativnih limita..... | 26 |
| Tablica 6.3 Primjer tablice rezultata operacije..... | 32 |
| Tablica 7.1 Detaljni popis operacija kampanje | 43 |
| Tablica 7.2 Kvantitativni popis operacija po kampanjama | 45 |

10.3. Sadržaj dijagrama

| | |
|---|----|
| Dijagram 6.1. Relacijski dijagram baze podataka..... | 24 |
| Dijagram 6.2 Primjer polarno grafa Op.Lim. | 35 |
| Dijagram 6.3 Oceanskih podataka | 36 |
| Dijagram 6.4 Kružni Dijagram Vremena čekanja/Vremena rada | 37 |
| Dijagram 6.5 Dijagram Toka Kampanje | 38 |
| Dijagram 6.6 Dijagram neraspoloživosti operacija..... | 39 |
| Dijagram 6.7 Dijagram ukupnog čekanja | 40 |

| | |
|--|----|
| Dijagram 6.8 Dijagram prosječno vremena čekanja | 40 |
| Dijagram 7.7 Polarni grafovi za Operativne limite, redoslijed:1,2,3,4,5,6,7 ili Plovidba, Sidrenje/Privezivanje HLV, Sidrenje i privezivanje dodatna plovila, Pomicanje MP, Instalacija MP, Instalacija TP | 44 |
| Dijagram 7.10 Dijagram Toka 1. Kampanje | 46 |
| Dijagram 7.8 Dijagram Toka 2. Kampanje | 46 |
| Dijagram 7.9 Dijagram Toka 3. Kampanje | 46 |
| Dijagram 7.11 Dijagram općeg toka projekta | 47 |
| Dijagram 7.12 Nerasploživost pojednostavljenih op. | 48 |
| Dijagram 7.13 Neraspoloživost ostalih Op. | 48 |
| Dijagram 7.14 Kružni graf 1.kampanja..... | 49 |
| Dijagram 7.15 Prosječno čekanje 1. kampanje po godini | 49 |
| Dijagram 7.16 Prosječno čekanje po mjesecu 1.kampanje 2018. | 50 |
| Dijagram 7.17 Prosječno čekanje po mjesecu 1.kampanje 2013. | 50 |
| Dijagram 7.18 Kružni graf 2.kampanja..... | 51 |
| Dijagram 7.19 Prosječno čekanje 2. kampanje po godini | 51 |
| Dijagram 7.20 Prosječno čekanje po mjesecu 2.kampanje 2013. | 52 |
| Dijagram 7.21 Prosječno čekanje po mjesecu 2.kampanje 2018. | 52 |
| Dijagram 7.22 Kružni graf 3.kampanja..... | 53 |
| Dijagram 7.23 Prosječno čekanje 3. kampanje po godini | 53 |
| Dijagram 7.24 Prosječno čekanje po mjesecu 1.kampanje 2012. | 54 |
| Dijagram 7.25 Prosječno čekanje po mjesecu 1.kampanje 2016. | 54 |
| Dijagram 7.26 Dijagram toka 1. kampanja | 55 |
| Dijagram 7.27 Dijagram toka 2. kampanja | 55 |
| Dijagram 7.28 Dijagram toka 3. kampanja | 55 |
| Dijagram 7.29 Prosječno trajanje kampanja u danima..... | 56 |
| | |
| 10.4 Sadržaj jednadžbi | |
| Jednadžba 1 | 31 |