

# Analiza vremena neraspoloživosti uslijed vremenskih prilika

---

**Bolf, Stephani**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*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:190:924254>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-26**



*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Preddiplomski sveučilišni studij strojarstva

Računarske metode: mehanika fluida

Završni rad

**Analiza vremena neraspoloživosti uslijed vremenskih prilika / Weather  
standby analysis**

Mentor: prof. dr. sc. Jerko Škifić

Rijeka, siječanj 2023.

Stephani Bolf

0069080505

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Sukladno članku 9. "Pravilnika o završnom radu i završnom ispitu na preddiplomskom sveučilišnom studiju Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci" te sukladno "Uputama za pisanje završnog rada Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci" izjavljujem da sam završni rad pod nazivom „Analiza vremena nerasploživosti uslijed vremenskih prilika“ izradila samostalno, služeći se stečenim znanjem tijekom studija i literaturom navedenom na kraju rada, a sve pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Jerka Škifića.

Rijeka, siječanj 2023.



---

Stephani Bolf (0069080505)

## ZAHVALE

Ovim putem, želim se zahvaliti svojoj obitelji i partneru na usmjeravanju i savjetima kako bi sve ovo bilo moguće, te razumijevanju i podršci koju su mi pružali tijekom studiranja. Također, zahvaljujem i svom mentoru, izv.prof.dr.sc Jerku Škifiću prije svega na strpljenju i susretljivosti, pojašnjenjima i vremenu izdvojenom za konzultacije te pomoći tijekom izrade završnog rada.

U konačnici, zahvaljujem svim profesorima Tehničkog fakulteta u Rijeci, uz koje sam stekla nekolicinu znanja i iskustava te koji su uvelike doprinijeli u razvoju mene kao inženjera.

## Sadržaj

1. UVOD .....	6
2. ANALIZA VREMENA NERASPOLOŽIVOSTI.....	7
2.1. Terminologija .....	8
2.2. Slijed operacija .....	10
2.3. Trajanje operacija .....	11
2.4. Vrste projekata.....	12
2.3.1. Kontinuirane operacije.....	12
2.3.2. Operacije jednog prozora garancije .....	13
2.3.3. Složeni projekti .....	13
2.5. Shema ishoda.....	14
2.6. Prikupljanje podataka .....	14
3. SIMULACIJA ANALIZE VREMENA NERASPOLOŽIVOSTI.....	16
3.1. <i>Python</i> biblioteke .....	16
3.1.1. <i>NumPy</i> .....	16
3.1.2. <i>Pandas</i> .....	16
3.1.3. <i>Matplotlib</i> .....	16
3.1.4. <i>SciPy</i> .....	16
3.1.5. <i>Data classes</i> .....	17
3.2. Ulazni podaci.....	17
3.2.1. Tablica mjerenja stanja mora .....	17
3.2.2. Popis operacija i definiranih varijabli .....	18
3.2.3. Tablica ograničenja srednje visine vala s obzirom na smjer i period vala.....	18
3.3. Proračun zastoja pri izvođenju pomorskih operacija.....	19
3.3.2. Prosječno vrijeme čekanja operacija.....	25
3.3.3. Tijek kampanje za odabrani datum .....	29
3.3.4. Ovisnost zastoja o ograničenju srednje visine vala.....	33
3.3.5. Ovisnost zastoja u graničnim slučajevima vrijednosti ograničenja .....	36

3.3.6. Vrijeme čekanja određeno rasponom ograničenja .....	38
4. ZAKLJUČAK .....	41
Sažetak .....	42
Popis tablica .....	43
Popis slika .....	44
Popis literature.....	45

## 1. UVOD

Priobalne operacije pokrivaju širok raspon aktivnosti koje uključuju istraživanje ili bušenje područja u svrhu pronalaska sirovina, proizvodnju ili instalaciju postrojbi, remont i u konačnici transport objekata. S obzirom da se takve operacije izvode na moru uvjetovane su vremenskim prilikama poput padalina, vjetra, valova i morskih struja koje je potrebno uzeti u obzir kako bi se osiguralo kvalitetno i učinkovito izvođenje operacija. Prije samog početka izvođenja operacija, potrebno je predvidjeti utjecaj stanja mora i vremenskih uvjeta te postaviti kriterije provođenja operacija služeći se analizom vremena neraspoloživosti. Točni ulazni parametri dobiveni vremenskim serijama stanja mora, bitni su za stvaranje vjerodostojne slike podataka koji se dalje koriste za predviđanje budućeg ponašanja mora te raspoloživosti izvođenja operacija.

Osim izmjerenih stanja mora, bitno je postavljanje operativnih granica koje određuju maksimalne vrijednosti stanja mora, kao i maksimalno dopušteno kretanja plovila, kako bi se projekt uspješno odvio.

Cilj ovog završnog rada, izrada je i analiza programa za izračun vremenskih zastoja i vremena čekanja uslijed nepovoljnih vremenskih prilika, ali i pogodnih perioda za početak izvođenja projekta, koji se sastoji od osam kontinuiranih operacija.

## 2. ANALIZA VREMENA NERASPOLOŽIVOSTI

Pomorska operacija podrazumijeva svaku aktivnost morskih snaga ograničenu definiranim trajanjem te povezanu s rukovanjem objektom ili plovilom u morskom okruženju. U ovom završnom radu, pomorsku operaciju smatramo aktivnošću koja ima određeno neto trajanje te skup operativnih ograničenja, ovisno o opremi i aktivnostima koje se provode. Stvarno trajanje operacije ovisi o vremenskim uvjetima tijekom izvođenja iste: ako se prekorače operativna ograničenja, dolazi do faze čekanja. Informacija o očekivanom čekanju tijekom pomorskog projekta jedna je od najbitnijih informacija u procesu natječaja za takav projekt.

Vrijeme nerasploživosti termin je kojim se definira vremenski period tijekom kojeg se proces ne može obavljati što je bitno za održavanje povoljne raspoloživosti usluga te sprječavanje ili minimiziranje vremenskih gubitaka koji mogu rezultirati velikim financijskim troškovima.

Za kvalitetnu evaluaciju i procjenu vremena nerasploživosti nekog projekta neophodno je znati

1. Zadan niz operacija te njihov međuođnos u kampanji
2. Propisana ograničenja operacija ili plovila korištenih za obavljanje kampanje
3. Stanje mora na lokaciji gdje se izvodi kampanja



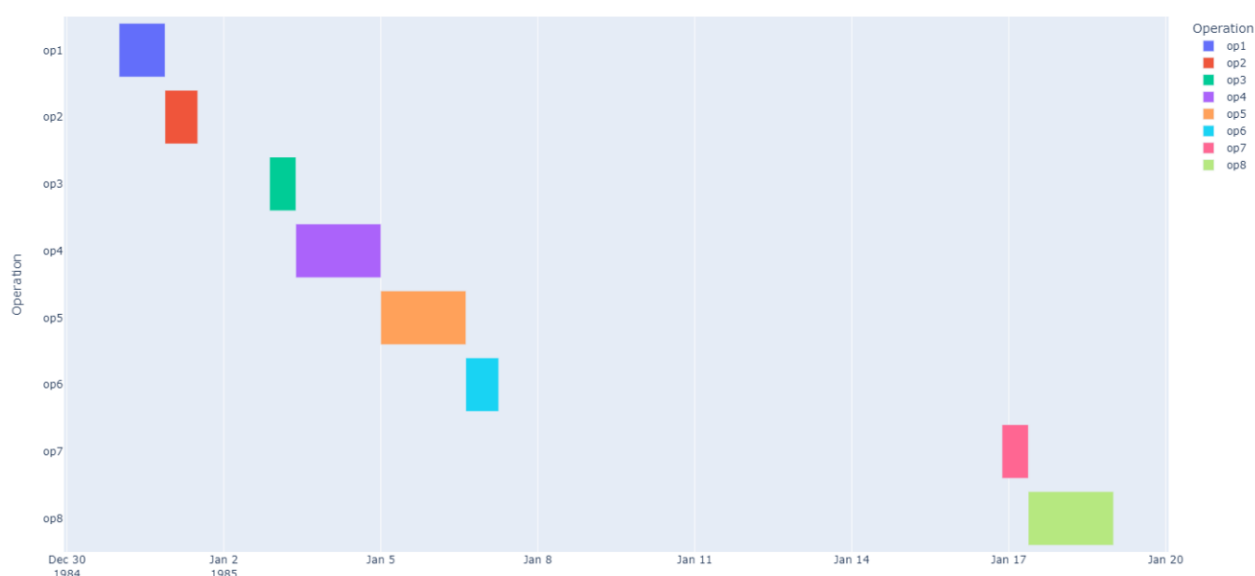
*Slika 2. 1. Nevrijeme uslijed izvođenja kampanje*



## 2.1. Terminologija

Za potpuno razumijevanje analize, ali i kasnijeg proračuna, prvo je potrebno razumjeti ključne pojmove korištene za proračun i daljnje predviđanje stanja mora.

Projekt ili kampanja, sastoji se od definiranog niza operacija. Operacija je najmanja izvršna jedinica kampanje, a cijela kampanja smatra se završenom tek kada su sve operacije koje ju čine završene. Svaka operacija ima definiranu radnu granicu, odnosno, kombinaciju vrijednosti meteoceanskih parametara iznad ili ispod kojih se operacija ne može nastaviti obavljati kao neopasna radnja. Na slici je prikazan tijek kampanje, iz kojeg se može vidjeti da su se operacije uzastopno izvršavale uz čekanja, kada stanje mora nije bilo povoljno te je visina valova prelazila graničnu.

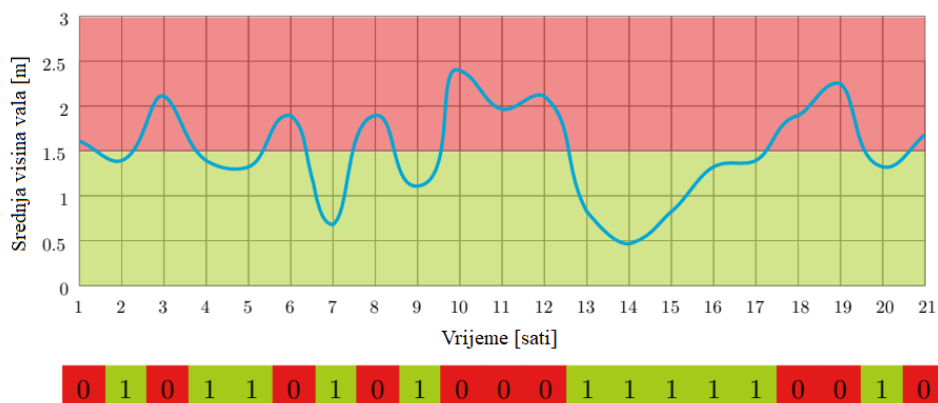


Slika 2. 2. Tijek izvršavanja kampanje

Najčešća operativna ograničenja pomorskih operacija su ograničenja za kombinaciju visine vala i perioda vala, iako i drugi meteoceanski parametri također mogu biti odlučujući, ovisno o predviđenoj opremi i vrsti operacije. Određivanje granica za specifičnu opremu nalazi se izvan opsega ovog rada, stoga je pretpostavka za ovaj rad da su te granice dostupne i reprezentativne. Relevantni meteoceanski parametri su sljedeći:

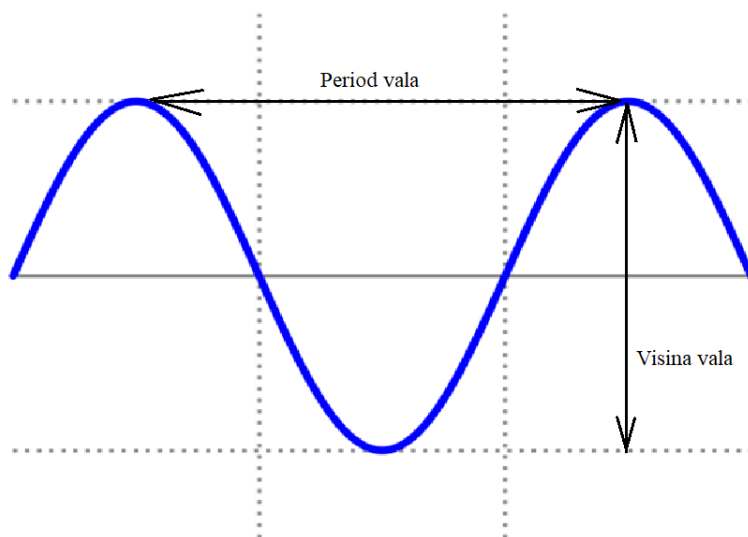
Visina vala, odražava opće stanje mora, velika visina vala uzrokuje velike pomake opreme, što otežava izvođenje operacija. Prosječna visina vala ( $H_s$ ) je najčešće korištena mjera kao ulazni podatak za visinu vala, koja će također biti korištena u pripadnom proračunu. Na slici je prikazan slučaj promjene visine valova kroz sate, zbog kojih se operacija ne može izvršiti dokgod se valovi

ne nađu u “zelenom području” onoliko dugo koliko je vrijeme trajanja operacije. Vrijednosti “0” i “1” u ovom slučaju predstavljaju pogodne i nepogodne iznose visina.



Slika 2. 3. Pogodnost izvršavanja operacije ovisno o ograničenju visine vala

Period vala ima veliki utjecaj na dinamički odziv plovnih objekata. Period prijelaza nule,  $T_z$ , srednje je vrijeme između dva uzastopna prijelaza brijega ili dola, a vršni period,  $T_p$ , varijabla je korištena u pripadnom proračunu uvog rada, a označava period u kojem je energija frekventijskog spektra maksimalna.



Slika 2. 4. Period i visina vala

Smjer valova uvjetuje radna ograničenja plovnog objekta povezana s valovima koja se mogu razlikovati ovisno o kutu između valova koji se približavaju i osi objekta. Tako većina plovila različito reagira na valove ovisno o tome dali im prilaze s pramčane ili krmene strane.

Brzina vjetra važan je parametar za operacije podizanja teških terete ili pomicanja velikih sekcija. Mjera brzine vjetra obično je 10-minutni prosjek na 10 metara visine plovnog objekta.

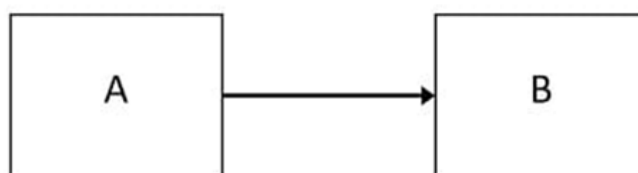
Smjer vjetra utječe na operativnost tijekom radnji dizanja teških tereta ili operacija u blizini drugih plovnih objekata ili prirodnih tvorevina.

Prozor garancije definira se kao dostupnost x-satnog vremenskog okvira za određene meteoceanske uvjete. Kako bi se uzeli u obzir nepredviđeni troškovi, prozor garancije je obično duži od neto trajanja operacije. Operativno ograničenje prozora garancije obično je jednako operativnom ograničenju operacije na koju se odnosi.

## 2.2. Slijed operacija

Odnosi prednosti predstavljaju određeni redoslijed kojim se slijed operacija u kampanji treba izvršiti. Između operacija unutar projekta može postojati nekoliko odnosa prednosti :

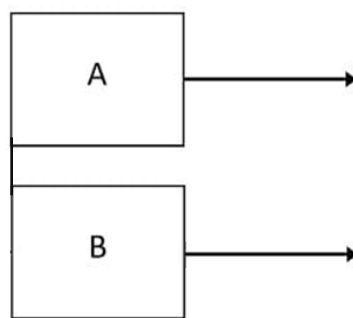
- Kraj-početak (*Finish-to-start*), najčešći je odnos prednosti operacija koji se susreće u pomorskim operacijama koji znači da operacija B može započeti ako i samo ako je operacija A završena. Može doći do kašnjenja između kraja operacije A i početka operacije B ako su operativna ograničenja operacije B prekoračena od strane stanja mora nakon završetka operacije A. Operacija B tada će započeti što je prije moguće, a proteklo vrijeme čekanja tada se obračunava kao zastoj za operaciju B. Takav slijed operacija primjenjen je na obavljanje operacija u ovom radu.



Finish to start

Slika 2. 5. Shema kraj-početak odnosa

- Kraj-početak, fiksno (*Finish-to-start, fixed*) implicira da stanje mora za operativne granice operacije A treba izravno pratiti stanje mora za operativne granice operacije B koja ujedno mora započeti izravno nakon završetka operacije A, što znači da nije dopušteno kašnjenje između dvije operacije. Budući da je ovaj specifični slijed stanja mora rjeđi, ova vrsta odnosa prednosti operacija može rezultirati većim zastojem nego klasični odnos kraj-početak, a stvarno vrijeme zastoja obračunava se kao vrijeme čekanja operacije A.
- Početak-početak (*start-to-start*), operacija B može započeti u istom trenutku kada i operacija A započne. Ako postoji kašnjenje u vremenu početka operacije B nakon što je operacija A započela, do prekida rada projekta dolazi samo ako kašnjenje u vremenu završetka operacije B utječe i odgađa ostatak rasporeda.



Start to start

Slika 2. 6. Shema početak-početak odnosa

- Početak-početak, fiksno (*start-to-start, fixed*) fiksna operacija B mora započeti istovremeno s operacijom A. Kao i kod početak-početak odnosa prednosti, i kod ovog onosa, operacije se izvode paralelno, što nije slučaj za ovaj rad.

### 2.3. Trajanje operacija

S obzirom da se operacije obavljaju na moru, u nepredvidljivim uvjetima, sklonim naglim promjenama, često dolazi do vremenskih odgađanja i zastoja, te u praksi postoje različiti nazivi za ta vremena odvijanja kampanje, ovisno o tome odnosi li se samo na aktivno obavljanje operacije ili ukupno vrijeme rada.

‘*neto trajanje*’ = vrijeme potrebno za izvršavanje operacije, bez odgoda

Stvarno trajanje operacije je ukupno vrijeme neto trajanja operacije s uračunatim vremenskim odgađanjima. Iz toga slijedi da je prekid rada jednak razlici između stvarnog trajanja i neto trajanja operacije.

$$\text{'stvarno trajanje'} = \text{'neto trajanje'} + \text{'vremenska odgoda'}$$

Zastoj je vremenski period prilikom kojeg određena ograničenja prelaze definirane limite te se ne može nastaviti kao sigurna akcija, bilo zbog lošeg vremena, stanja mora ili nekih drugih parametara.

$$\text{'zastoj'} = \text{'stvarno trajanje'} - \text{'neto trajanje'}$$

Pomorske operacije mogu se izvoditi samo ako je značajna visina valova ispod definiranih pragova ograničenja.

## **2.4. Vrste projekata**

Ovisno o vrsti projekta koji se izvršava, analiza prepoznaje i kategorizira pomorske operacije po sljedećim kategorijama:

- Kontinuirane operacije
- Operacije s jednim prozorom garancije
- Kompleksni projekti

### 2.3.1. Kontinuirane operacije

Kontinuirane operacije su operacije koje nemaju fiksno neto trajanje, već se izvode sve dok to uvjeti dopuštaju, što može biti nekoliko dana ili tjedana dok projekt ne završi. Dakle, operacija ne zahtijeva vremenski okvir u kojem treba biti izvršena, što znači da se rad može nakratko obustaviti ako se prekorače operativna ograničenja. Rizik nepogodnih vremenskih uvjeta može se predstaviti postotkom obradivosti, a on pokazuje očekivano vrijeme u kojem se operacija može izvršiti. Postotak obradivosti, kada meteoceanski uvjeti ne prelaze radnu granicu, obično se izračunava za svaku sezonu ili mjesec.

### 2.3.2. Operacije jednog prozora garancije

U slučaju operacije koja treba biti izvršena u jednom određenom vremenskom periodu ili niza nekontinuiranih i nepovezanih operacija, vremenski rizik prikazuje se kao vrijeme čekanja. Vrijeme čekanja označava vrijeme kada se operacija obustavlja dok uvjeti za odgovarajući vremenski okvir ne postanu povoljni. Vrijeme čekanja računa se na isti način kao vrijeme zastoja. Projekt se sastoji od jedne operacije koja zahtijeva vremensko razdoblje najmanje duljine neto trajanja. Vremenski rizik predstavljen je kao raspodjela vremena čekanja prije nego što se projekt može izvršiti. Kod ove vrste projekta, postotak obradivosti ne odražava realno vrijeme zastoja, odnosno postotak ne uzima u obzir postojanost uvjeta.

### 2.3.3. Složeni projekti

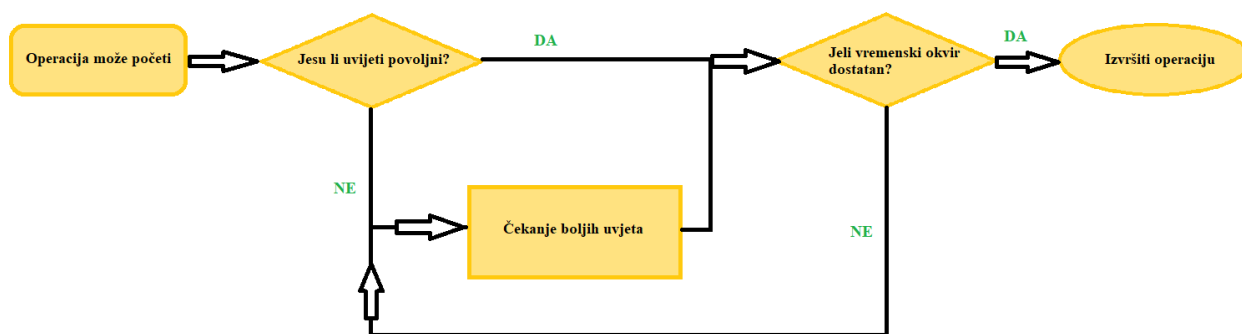
Projekt se sastoji od više operacija, koje se izvode uzastopno. Kontinuirane operacije obično nisu dio složenog projekta. Umjesto razmatranja vremena zastoja ili vremena čekanja po operaciji, češće se gleda ukupno vrijeme zastoja tijekom projekta. Međutim, vremena zastoja po operaciji su bitna kako bi se identificirale operacije koji su najosjetljivije na vremenske uvjete i imaju veću vjerojatnost odgode projekta.



*Slika 2. 7. Naftna platforma*

## 2.5. Shema ishoda

Shema ishoda promatra operacije i njihove prekide zasebno u odnosu na kampanju, a funkcionira na način da nakon realizacije nekog početnog događaja promatra njegove posljedice i utjecaj na operaciju. Može se kvantificirati kako bi se dobila procjena vjerojatnosti svakog ishoda. Slično je dijagramu strukture toka u kojoj svaki unutarnji čvor predstavlja 'test' na atributu. Razvijen je model sheme pomoću kojeg se određuju vjerojatnosti približavanja pučini i očekivanih kašnjenja za održavanje vjetroturbina, a bavi se neplaniranim popravcima i pitanjem je li pristup moguć odmah ili nakon toga kašnjenja. Očekivane vrijednosti kašnjenja zbog stanja mora mogu se izraziti kao izrazi zatvorenog oblika ovisno o distribucijama vjerojatnosti za trajanje mirnog ili nemirnog stanja mora. Čvorovi u stablu događaja sadrže provjere za procjenu jesu li uvjeti mora dovoljno dobri i ako je vremenski period povoljan. Prednosti pristupa stabla događaja su da je proces transparentan, a izračunavanje obično prilično brzo, što olakšava istraživanje utjecaja različitih ulaznih parametara. Međutim, stablo događaja može postati vrlo komplicirano što otežava proračun ako je niz operacija analiziran. Ishod je također vrlo osjetljiv na distribucije vjerojatnosti na granama.



Slika 2. 8. Shema ishoda

## 2.6. Prikupljanje podataka

Simulacijska analiza zahtijeva dovoljno dugu evidenciju meteoceanskih uvjeta da bi se postigla niska nesigurnost simulacije. Podatke treba uzorkovati najmanje svaka 3 sata i interpolirati između intervala uzorkovanja, ovisno o operacijama. Najočitiiji način uzorkovanja podataka simulacija je s vremenskom serijom stvarnih mjernih podataka ili vremenskom serijom podataka mjerenih u prošlosti temeljen na modelima vala.

Postoji niz tehnologija za mjerenje oceanskih valova uključujući mikrovalove iz svemira, razne vrste radara i mjerenja na točki odozdo ili s površine. Međutim mjerenja na licu mjesta s instrumentima i/ili plutačama obično su prikladna za mjerenje i drugih relevantnih parametara, kao morskih struja, vjetra, temperature, saliniteta, čestica i kisika, što informacije koje treba uzeti u obzir kod realiziranja velikih projekata.

Valovi variraju na vremenskim skalama od sekundi do minuta do sati. Za dobivanje pouzdanih informacija o dinamici valova potrebni su instrumenti koji su instalirani i mjere kontinuirano tijekom dužih vremenskih razdoblja. Budući da su valovi promjenjivog karaktera, preporučuje se minimalno razdoblje izračuna od 15 minuta za procjenu prevladavajućih uvjeta.



*Slika 2. 9. Senzor za mjerenje stanja mora*

Najčešće korišteni sustavi za mjerenje oceanskih valova na licu mjesta su samostalni senzori postavljeni na male plutaće platforme. Većina mjerenja kombinira se s mjerenjima vjetra, struje i kvalitete vode, a njima se upravlja u stvarnom vremenu. Senzori imaju inovativne elektroničke i mehaničke filtre koji omogućuju točna mjerenja valova s površinskih platformi bilo koje veličine i oblika. Primjeri upotrebe na platformama trećih strana kreću se od malih autonomnih površinskih vozila do čeličnih plutača promjera 10 metara. Općenito, površinska mjerenja valova daju najkvalitetnije informacije o valovima i mogućnost istovremenog razlikovanja energije i spektra od valova koje stvara vjetar i valova iz različitih smjerova.



### 3. SIMULACIJA ANALIZE VREMENA NERASPOLOŽIVOSTI

Računalni kod rađen je u programskom jeziku *Python* verzije 3.8. Umjesto da svu funkcionalnost ugradi u svoju jezgru, *Python* je dizajniran da bude visoko proširiv korištenjem sadržanih biblioteka. Sve korištene biblioteke instalirane su pomoću *Anaconda Navigator*-a, i pobliže pojašnjene u nastavku.

#### 3.1. *Python* biblioteke

##### 3.1.1. *NumPy*

*NumPy* je *Python* biblioteka koja se koristi za računanje s nizovima, a također ima funkcije za rad u domeni linearne algebre, Fourierove transformacije i matrica. *NumPy* je kratica za numerički *Python*. U programu je nakon pozivanja u konzolu, korišten za učitavanje podataka iz ts tablice i pretvaranje istih u zasebne liste podataka. Pomoću *NumPy*-ja također je računat relativan smjer plovila u odnosu na valove.

##### 3.1.2. *Pandas*

*Pandas* se definira kao biblioteka otvorenog koda koja pruža visokoučinkovitu manipulaciju podacima u *Python*-u. Ime *Pandas* izvedeno je iz riječi 'Panel Dana', što znači ekonometrija iz višedimenzionalnih podataka.. *Pandas* modul uglavnom se koristi za rad s tabličnim podacima, dok *NumPy* modul vrši računanja s numeričkim podacima. *Pandas* pruža neke skupove alata kao što su *DataFrame* i *Series* koji se uglavnom koriste za analizu podataka, a nakon pozivanja u konzolu, u programu je korišten za učitavanje podatkovne tablice operacija.

##### 3.1.3. *Matplotlib*

*Matplotlib* je višeplatformska biblioteka za vizualizaciju podataka i grafičko crtanje. U radu je ova biblioteka korištena za izradu slika dijagrama kako bi dobiveni izlazni podaci bili vizualno jasniji.

##### 3.1.4. *SciPy*

*SciPy* je zbirka matematičkih algoritama i praktičnih funkcija izgrađenih na *NumPy* ekstenziji *Pythona*. U programu je korišten objekt *SciPy interpolate* pomoću kojeg su podaci linearno interpolirani, što je objašnjeno u nastavku.

### 3.1.5. Data classes

*Data classes* prikladne su za pohranu podatkovnih objekata. Radi lakše organizacije podataka u kodu, ali i prikaza izračuna kampanja i operacija, u programu je izrađena vlastita klasa *Operation*. *Operation*, koja sadrži liste podataka od broju operacije, vremenu trajanja, periodu, smjeru, srednjoj visini valova te broju linija kojima su se označavali pogodna vremena izvršavanja operacija. Tako pohranjeni podaci bili su temelj za sav daljnji izračun i vizualizaciju.

## 3.2. Ulazni podaci

Kao što je spomenuto, za obavljanje pomorskih operacija meteorološko-oceanski parametri jedni su od ključnih podataka za proračun i predviđanje ishoda projekta, stoga se naredni proračun, bavi analizom stanja mora kroz 30 godina, te određivanjem zastoja, ali i ovisnosti čekanja o definiranim ograničenjima.

### 3.2.1. Tablica mjerenja stanja mora

Mjerenja su rađena u vremenskom rasponu od 1. siječnja 1979. godine do 31. prosinca 2009. godine, svaka 3 sata, a zabilježeni parametri su:

1. Značajna visina vala izražena u metrima
2. Period vala izražen u sekundama
3. Smjer valova u odnosu na objekt mjerenja izražen u stupnjevima

Datum	Sati	Visina vala [m]	Period vala [s]	Smjer vala [°]
1.1.1979.	00:00	0	3.39	30.03
1.1.1979.	03:00	0.27	3.39	30.03
1.1.1979.	06:00	0.42	3.72	45.65
1.1.1979.	09:00	0.39	3.83	47.18
1.1.1979.	12:00	0.45	3.89	44.42
1.1.1979.	15:00	0.35	3.92	45.77
1.1.1979.	18:00	0.24	3.91	43.97
1.1.1979.	21:00	0.28	3.52	5.72
2.1.1979.	00:00	0.38	3.7	26.48
2.1.1979.	03:00	0.55	3.88	35.4
2.1.1979.	06:00	0.73	4.09	44.66
2.1.1979.	09:00	0.94	4.31	37.12
...				
31.12.2009.	18:00	2.31	12.89	329.57
31.12.2009.	21:00	2.32	12.49	327.31

Tablica 3. 1. Tablica stanja mora

### 3.2.2. Popis operacija i definiranih varijabli

Kampanja se sastoji od osam operacija koje se moraju izvršiti jedna za drugom, zadanim redoslijedom. U tablici je navedeno vrijeme trajanje svake operacije, u kojem smjeru je orijentiran plovni objekt u odnosu na sjever, te maksimalna dopuštena visina valova, određena relativnim smjerom plovila i periodom valova. Kako bi se operacija mogla izvršiti visina valova mora biti niža od granične u vremenskom periodu izvršavanje pojedine operacije.

ID operacije	Vrijeme trajanja u satima	Smjer broda	Limit
OPERACIJA 1	21	45°	Zadan u tablicama ograničenja srednje visine vala
OPERACIJA 2	15	45°	
OPERACIJA 3	11.8	60°	
OPERACIJA 4	37.2	60°	
OPERACIJA 5	37.2	45°	
OPERACIJA 6	15	45°	
OPERACIJA 7	11.8	60°	
OPERACIJA 8	37.2	45°	

Tablica 3. 2. Popis operacija

### 3.2.3. Tablica ograničenja srednje visine vala s obzirom na smjer i period vala

Svaka operacija ima zadana ograničenja koja ovise o stanju mora, stoga je broj tablica za određivanje granične visine vala jednaki broju operacija, odnosno, limit svake operacije očitava se iz pripadne tablice ograničenja od ukupno osam tablica navedenog formata.

$T_p/Dir$	0°	45°	90°	135°	180°
8	1.25	2.25	2.02	2.25	2.25
9	1.25	1.35	1.55	1.96	2.25
10	1.69	1.61	1.89	1.02	1.25
11	1.69	1.61	1.89	1.02	1.25
12	1.15	1.15	1.89	1.02	1.42
13	1.15	1.15	1.89	1.02	1.42
14	2.15	1.15	1.89	1.02	1.42
15	2.15	1.15	1.89	1.02	1.42

Tablica 3. 3. Tablica ograničenja srednje visine vala za operaciju 1

Gdje je  $T_p$  kratica za period valova, dok oznaka  $Dir$  predstavlja smjer valova.

### 3.3. Proračun zastoja pri izvođenju pomorskih operacija

Prvi korak nakon učitavanja spomenutih Python knjižnica, je kreiranje klasa:

```
16. @dataclass
17. class Operation:
18.     ID: str
19.     duration: float
20.     heading: float
21.     Hs_Period: list      #Hs_Tp (period vala) [sekunde]
22.     Hs_Smjer: list      #Hs_TheH (heading u odnosu na sjever)
23.     Hs_Visina: list     #Hs_Hs (visina vala) [metri]
24.     lines: int
25.     Op_num: int
```

Pomoću kojih se zatim definira funkcija klasa iz mape *Operation*, te se sati mjerenja, radi lakšeg proračuna pretvaraju u linije, na način da jedna linija predstavlja 3 sata, što je vremenski razmak između svakog mjerenja stanja mora.

```
26. def create_dataclass(operation, number):
27.     duration = operation[0]
28.     heading = operation[1]
29.     file = 'data/' + operation[2]
30.     name = operation[3]
31.
32.     duration_lines = 0
33.     while (duration_lines * 3) < duration:
34.         duration_lines += 1
```

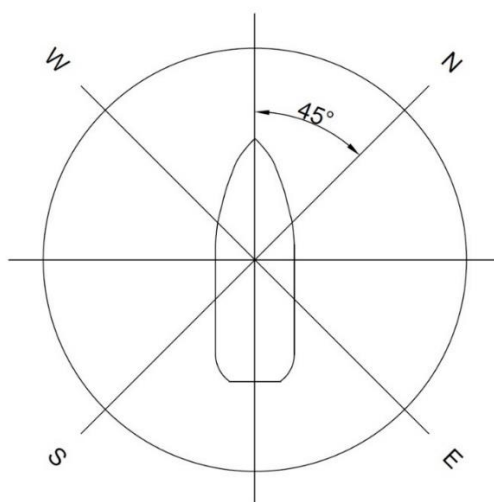
Povratno se u mapu *Operation* pohranjuju ime i trajanje operacije, smjer plovila s kojeg se vrši operacija, period, smjer i ograničenja visine valova te broj linija koje predstavljaju trajanje operacije.

```
54. return Operation(name, duration, heading, tps, TheH_appended, hs_appended,
    duration_lines, number)
```

#### 3.3.1. Određivanje relativnog smjera valova u odnosu na plovni objekt

Zadani smjerovi plovila, ali i valova, izraženi su u kutnim stupnjevima u odnosu na sjever stoga je prvo bilo potrebno izračunati relativan smjer valova u odnosu na plovni objekt s kojeg se vrše operacije. Zbog jednostavnosti proračuna, tablične vrijednosti ograničenja visine vala, prilagođene su smjeru plovila s kojeg se vrše operacije kao početne vrijednosti na način da je kut plovila

zbrojen sa zadanim kutovima u tablicama ograničenja pripadne operacije pri čemu su sami limiti sačuvali početne vrijednosti. Na taj način  $0^\circ$  plovila postavlja se kao koordinatni sustav za izračun relativnog smjera valova u odnosu na plovilo.



Slika 3. 1. Položaj plovila u odnosu na valove

Pri izvođenju prve operacije u kampanji, plovni objekt okrenut je za  $45^\circ$  u odnosu na sjever, odnosno sve vrijednosti kutova tablice ograničenja visine vala, zbrajaju se s  $45^\circ$ , te sada tablica izgleda ovako: °

$T_p/Dir$	$45^\circ$	$90^\circ$	$135^\circ$	$180^\circ$	$225^\circ$
8	1.25	2.25	2.02	2.25	2.25
9	1.25	1.35	1.55	1.96	2.25
10	1.69	1.61	1.89	1.02	1.25
11	1.69	1.61	1.89	1.02	1.25
12	1.15	1.15	1.89	1.02	1.42
13	1.15	1.15	1.89	1.02	1.42
14	2.15	1.15	1.89	1.02	1.42
15	2.15	1.15	1.89	1.02	1.42

Tablica 3. 4. Tablica ograničenja srednje visine vala nakon zakretanja

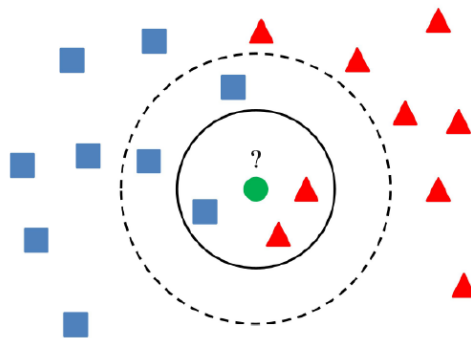
Vrijednosti perioda i smjera valova zadane u Tablici 3.3. ne poklapaju se s izmjerenim podacima iz Tablice 3.1. te su interpolirani metodom najbližeg susjeda koji kao druge interpolacije ne računa vrijednosti prema kriterijima težine niti generira među-vrijednosti, već jednostavno određuje "najbližu" susjednu vrijednost ili piksel i pretpostavlja vrijednost njegovog intenziteta.

```

58. def find_nearest_angle(heading, operacija):
59.     size = len(operacija.Hs_Smjer)
60.
61.
62.     if (operacija.Hs_Smjer[-1] <= heading and heading <=
operacija.Hs_Smjer[0]):
63.         if (abs(operacija.Hs_Smjer[0] - heading) <= 22.5):
64.             return 0
65.         else:
66.             return size-1
67.     else:
68.         for i in range(1, size):
69.             if(operacija.Hs_Smjer[i-1] <= heading and heading <=
operacija.Hs_Smjer[i]):
70.                 if (abs(operacija.Hs_Smjer[i] - heading) <= 22.5):
71.                     return i
72.                 else:
73.                     return i-1

```

Traži se najbliža vrijednost izmjerenog smjera vala iz Tablice 3.1. u odnosu na zadane vrijednosti smjera u Tablici ograničenja 3.4. Funkcija je definirana na način da ako je vrijednost zadnje vrijednosti u tablici ograničenja, manja od smjera u tablici realnih vrijednosti i ako je smjer u tablici realnih vrijednosti manji od prve vrijednosti smjera u tablici ograničenja, najbliži susjed je posljednja, odnosno prva vrijednost smjera vala. Za sve ostale vrijednosti funkcija traži najbližu vrijednost kuta u tablici ograničenja, te pamti njezinu poziciju.

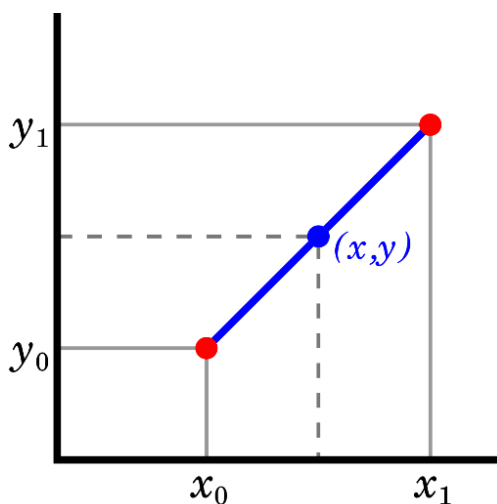


Slika 3. 2. Interpolacija po 'najbližem susjedu'

Sve vrijednosti kutova u tablici mjerenih stanja mora, zaokružuju se na navedene vrijednosti kutova i spremaju kao nova lista. Pošto je broj podataka u novoj listi kutova isti kao i u tablici mjerenja stanja mora, uzastopno po indeksima redova dobiva se druga dimenzija, odnosno periodi valova. Nakon što je po principu najbližeg susjeda odabran stupac, pripadni period vala linearno

se interpolira u rasponu od 8 do 15 sekundi kako bi odredili i redak, te u konačnici ograničenje visine vala za zadane vrijednosti.

Linearna interpolacija je metoda prilagođavanja krivulje pomoću linearnih polinoma za konstruiranje novih podatkovnih točaka unutar raspona diskretnog skupa poznatih podatkovnih točaka.



Slika 3. 3. Linearna interpolacija

Formula za linearnu interpolaciju glasi:

$$\frac{y - y_0}{x - x_0} = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}$$

$$y = y_0 + (x - x_0) \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}$$

Gdje su:

- $x, y$  koordinate tražene točke
- $x_0, y_0$  koordinate prve točke
- $x_1, y_1$  koordinate druge točke

Nakon dobivanja tablice izmjerenih visina valova i izračunatih ograničenja visine, zadaje se uvjet da za obavljanje operacije, izmjerena vrijednost mora biti manja od izračunatog ograničenja, što se pohranjuje u obliku vrijednosti *True* za pogodno i *False* za nepogodno stanje mora.

```

134.     def compare_limits(visina_TS, visina_HS):
135.         if visina_TS <= visina_HS:
136.             return True
137.         return False

```

Nakon pokretanja programa po svim vrijednostima smjerova valova i perioda, rezultat je lista ograničenja visina vala za dana stanja mora. Zatim se u *while* petlji simulira izvršavanje operacija tako sto se pronade prvo povoljno vrijeme za početak izvršavanja prve operacije kampanje.

```

139. def check_future(start, operacija):
140.     end = start + operacija.lines
141.     true_start = start
142.     tmp = start
143.     all_operation_Hs = []
144.     while start <= end:
145.
146.         if start >= total:
147.             tmp = start - total
148.             Hs_X = find_nearest_angle(ts_dirs[tmp], operacija)
149.             Hs_Y = find_nearest_period(ts_tp[tmp], operacija, int(Hs_X))
150.         else:
151.             Hs_X = find_nearest_angle(ts_dirs[start], operacija)
152.             Hs_Y = find_nearest_period(ts_tp[start], operacija, int(Hs_X))
153.
154.         TF = compare_limits(ts_hs[a], Hs_Y)
155.         all_operation_Hs.append(Hs_Y)
156.         if(TF == False):
157.             return False, start, -1
158.         start += 1

```

Nakon toga se ulazi u *check\_future* funkciju koja provjerava da li će se operacija moći izvršiti bez prekida. Ako se operacija uspjela izvršiti bez prekida prelazi se na sljedeću operaciju u nizu kampanje te se ponovo provjerava prvo povoljno vrijeme za početak izvršavanja druge operacije kampanje, provjeravanje neprekidnog izvršavanja i tako dalje. Kada završi cijela kampanja, odnosno kada se uspješno izvrše sve operacije u kampanji, algoritam krene ponovo provjeravati za jedan *timestamp* kasnije nego je započelo uspješno izvršavanje prve operacije prethodnog ciklusa kampanje.

```

246. for start_month_line in start_date_lines:
247.     a = start_month_line
248.
249.     while a < total:
250.         Hs_X = find_nearest_angle(ts_dirs[a], limits[op])
251.         Hs_Y = find_nearest_period(ts_tp[a], limits[op], int(Hs_X))
252.         TF = compare_limits(ts_hs[a], Hs_Y)

```



```

253.         if (TF == True):
254.             operation_finished, line, minimum_operation_Hs = check_future(a, limits[op])
255.             if (operation_finished == True):
256.                 if (op == 0):
257.                     anchor = a + 1

```

Algoritam je dodatno optimiziran da u slučajevima kada prva operacija nema mogućnosti započeti ili izvršiti se do kraja bez prekida, „veliko sidro“ (varijabla *anchor*) se pomiče na jedno mjesto nakon posljednjeg neuspješnog izvršavanja prve operacije čime startna linija novog ciklusa pomiče dalje u izvršavanje operacije kampanje. Svi podaci o vremenu početka, završetka, *timestamp* liniji početka/završetka zadatka se zapisuju u *result\_dump dictionary* (riječnik) koji se dalje koristi za obradu tih podataka i zapis u *csv output* datoteku.

ID operacije	Status	Trajanje (sati)	Srednja visina vala	Period vala	Smjer valova	Operacijsko ograničenje visine vala	Datum početka kampanje
OPERACIJA 1	START	21	0	3.39	30.03	1.25	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 1	END	21	0.28	3.52	5.72	1.25	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 2	START	15	0.28	3.52	5.72	1.25	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 2	END	15	1.02	4.49	40.62	1.25	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 3	START	11.8	0.57	4.44	44.9	0.8	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 3	END	11.8	0.48	5.86	355.42	0.8	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 4	START	37.2	0.48	5.86	355.42	1.25	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 4	END	37.2	0.58	5.88	344.93	1.25	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 5	START	37.2	0.58	5.88	344.93	1.5	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 5	END	37.2	0.61	7.07	183.6	1.5	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 6	START	28	0.61	7.07	183.6	1.2	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 6	END	28	2.24	12.93	343.74	1.2	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 7	START	21	1.71	6.75	340.85	2.13	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 7	END	21	1.67	6.78	340.34	2.13	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 8	START	14	1.22	8.2	326.38	1.68	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 8	END	14	1.01	8.1	308.75	1.68	1/1/1979 0:00
OPERACIJA 1	START	21	1.13	19.15	211.37	1.15	2/1/1979 0:00
OPERACIJA 1	END	21	1.96	16.59	208.6	1.15	2/1/1979 0:00
...							

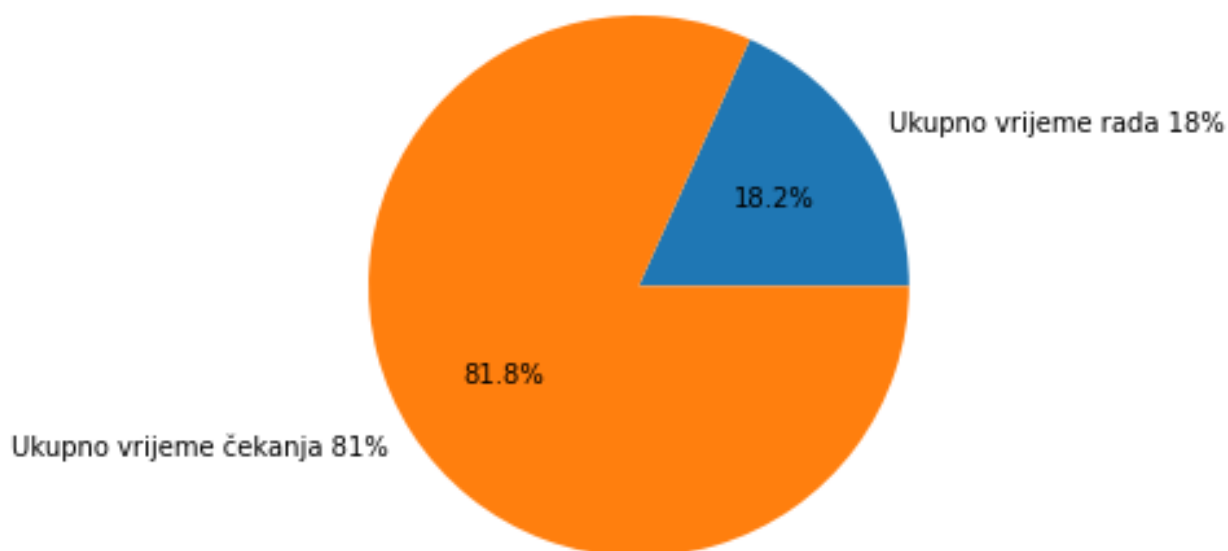
Tablica 3. 5. Tablica s podacima o početku i kraju operacija

Kreiranjem funkcije „*compare limits*“ dobivene vrijednosti zatim se uspoređuju s stvarnim, izmjerenim vrijednostima koje moraju biti manje od dobivenih kako bi program tu iteraciju prepoznao kao pogodnu i pohranilo vrijednost „*True*“ u listu početaka, ili u suprotnom slučaju „*False*“. Za simulaciju pogodnih početaka, bilo je potrebno napraviti petlju za koju se provjerava slučaj kada je pogodna vrijednost „*True*“, ali i da mora vrijediti da je broj podataka manji od

maksimuma kako bi imalo smisla uopće započinjati operaciju. Za svaki pogodni početak operacije, polje se označava s malim slovom „a“, što predstavlja malo sidro. Petlja funkcionira na način da za svaka tri sata, koliki je korak mjerenja stanja mora, za pogodno vrijeme izvršavanja operacije ucrtta liniju, a zatim se malo sidro pomiče za jedan kako bi se označilo vrijeme kraja trenutne operacije.

Zatim se računa prosječno vrijeme čekanja za svaku godinu, na način da je prvo svaka godina definirana kao pojam vrijednosti nula. Nakon toga, unutar *while* petlje pod uvjetom da je indeks ulazne vrijednosti manji od ukupnog broja podataka, radi se *if* petlja koja pokriva tri slučaja realizacije, čime se u konačnici vizualizira vrijeme izvršavanja i ukupnog čekanja za obavljanje kampanje na razini podatka iz mjerenja stanja mora svih 30 godina.

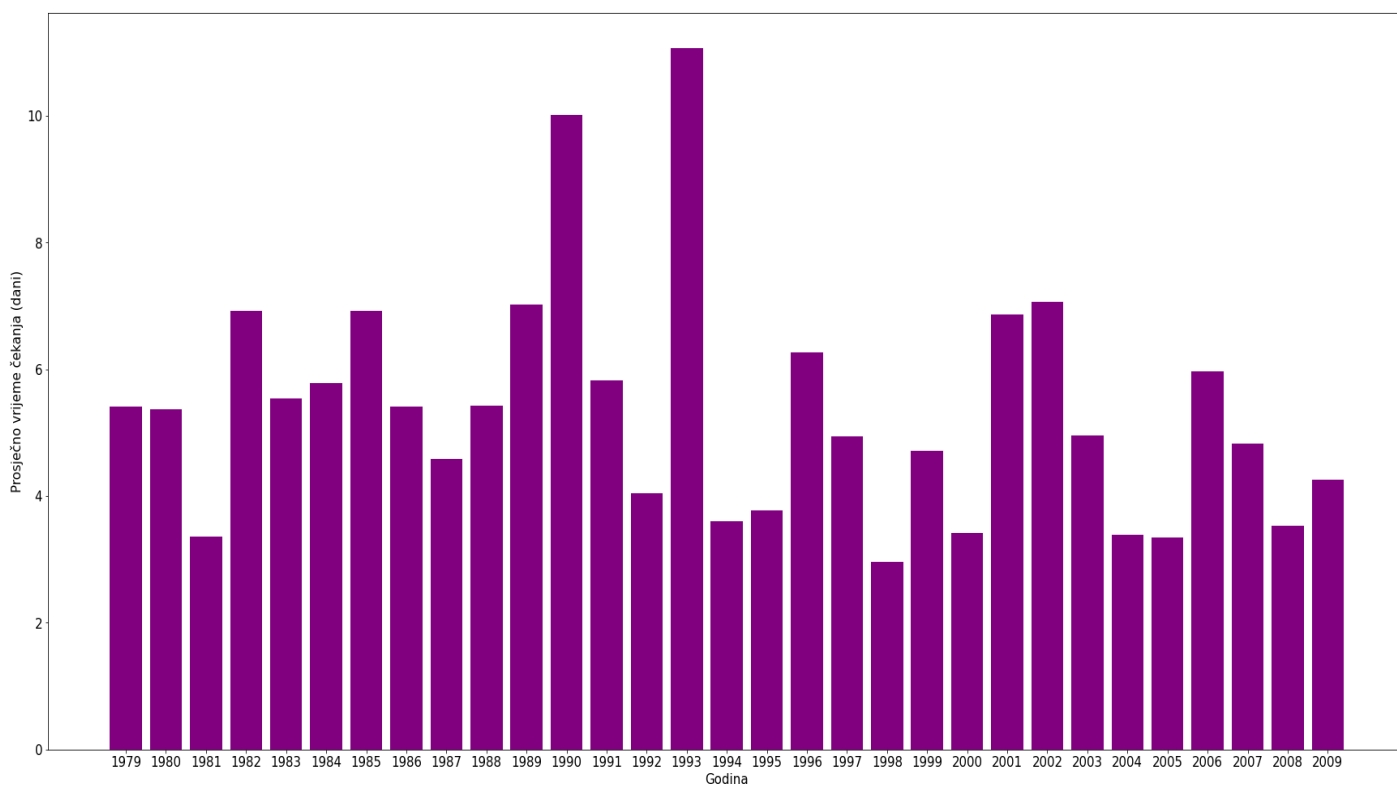
### 3.3.2. Prosječno vrijeme čekanja operacija



Slika 3. 4. Usporedba vremena rada i čekanja

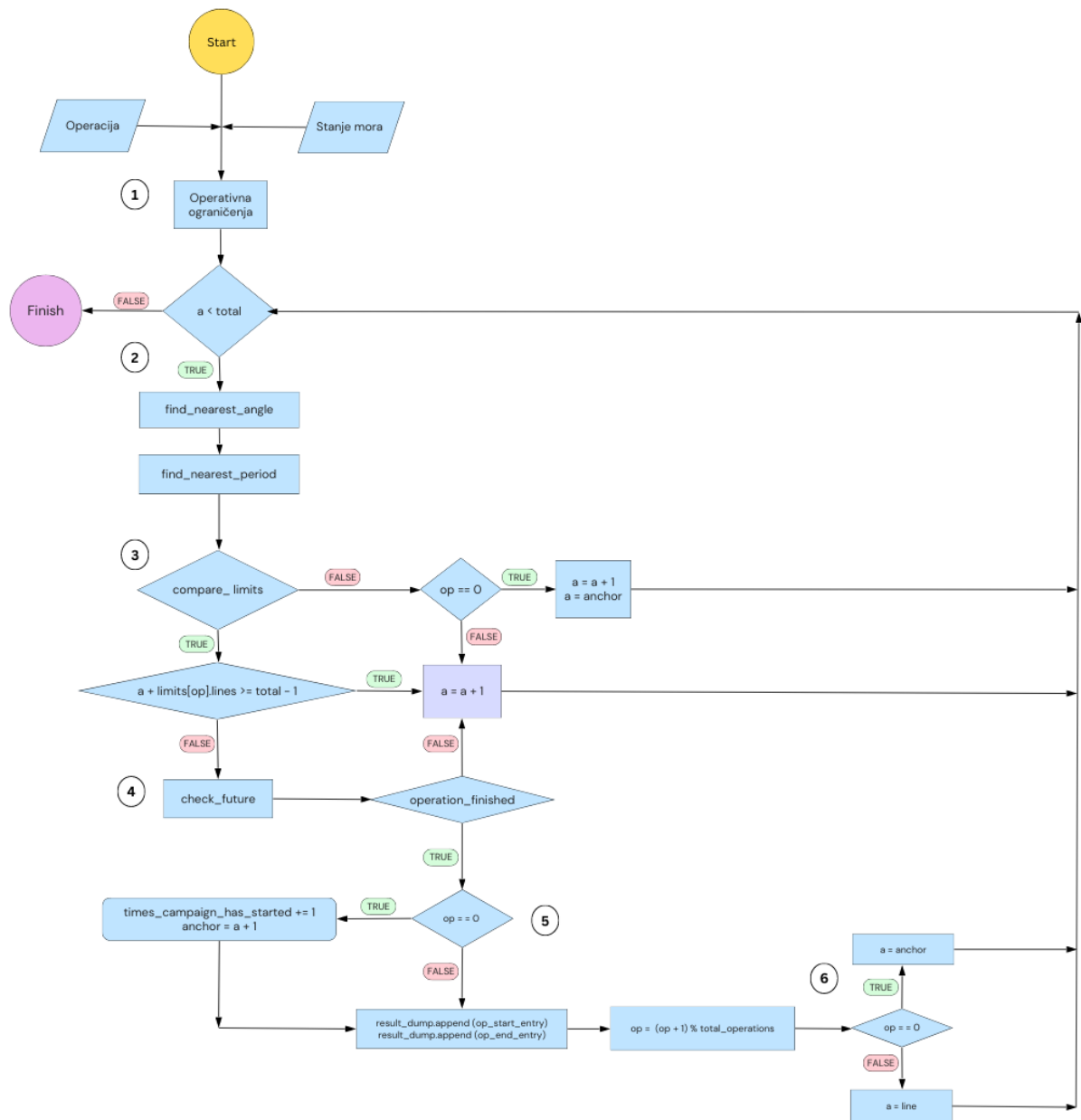
Uzevši u obzir realizaciju svih kampanja koje su se mogle izvršiti, ukupno vrijeme čekanja iznosilo bi četiri puta više nego vrijeme samog izvođenja operacija, što znači da su ograničenja visine vala jako niska u odnosu na prosječno stanje mora.

Slijedom navedenog, prikazan je graf prosječnog čekanja za svaku operaciju u kampanji na godišnjoj razini, kada je kampanja već započela, odnosno, čekanje za prvu operaciju nije uključeno:



*Slika 3. 5. Prosječno vrijeme čekanja za svaku operaciju na godišnjoj razini*

Iz dijagrama se može vidjeti da je 1982., 1985., 1989. i 1990. godine stanje mora bilo nepogodnije u odnosu na ostale godine, kada je prosječno vrijeme čekanja za svaku operaciju otprilike bilo 4 sata. Najveće razlike u visini valova za te godine u odnosu na druge bile su u zimskim mjesecima, kada se za neke operacije čekalo i nekoliko tjedana.



Slika 3. 6. Dijagram toka funkcije

① Nakon pokretanja programa, kombinirajući podatke o stanju mora, te vrijeme trajanja operacije sa zadanim usmjerenjem, dobivaju se operativna ograničenja, odnosno vrijednosti granične visine valova iznad kojih se operacija ne može izvršavati. Zatim su vremena trajanja izražena u linijama, gdje jedna linija predstavlja tri sata obavljanja operacije, te se na liniju gdje operacija počinje postavlja „sidro“ [a]. Ako je indeks pozicije sidra veći od ukupnog broja mjerenja znači da više nema daljnjih podataka na kojima se mogu provjeravati izvršavanja operacija te program završava s računanjem.

② Dok je indeks pozicije sidra, manji od broja mjerenja, računanje se nastavlja, metodom najbližeg susjeda računa se kut između valova i plovila, dok se linearnom interpolacijom određuje period, i u konačnici ograničenje visine valova za pripadnu operaciju s početkom na toj liniji.

③ Dobivena ograničenja uspoređuju se sa izmjerenim vrijednostima. Ako je visina valova u izabranom vremenu manja od granične, provjerava se je li broj linija trajanja operacije manji ili jednak barem za jedan manje od ukupnog broja podataka. Ako je, sidro se postavlja na liniju nakon i s podacima koji se odnose na taj sat mjerenja ulazi ponovno u početak programa. Ako visina valova prelazi graničnu i ako se radi o prvoj operaciji, veliko sidro koje označava početak kampanje pomiče se na liniju nakon mjesta gdje se prva operacija nije mogla izvršiti. Ako se radi o bilo kojoj drugoj operaciji, malo sidro koje označava početak operacije pomiče se za liniju nakon prethodnog početka.

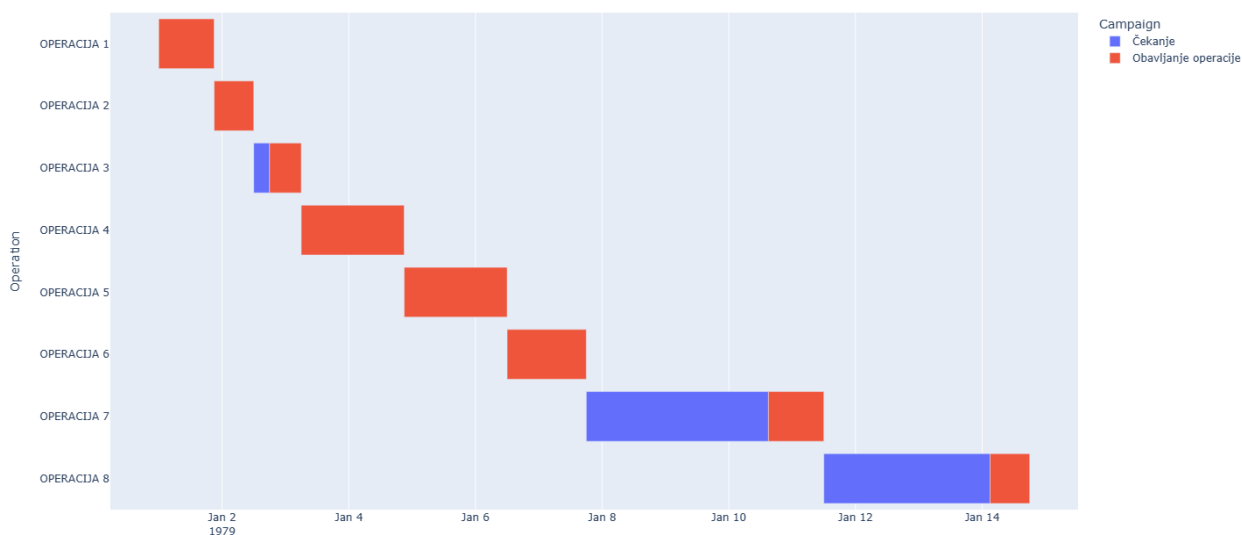
④ Funkcija *check\_future* testira ako će se operacija započeta na liniji a, završiti bez prekida, odnosno provjerava se jesu li visine valova niže od graničnih za sve linije trajanja operacije s početkom a. Ako visina valova prelazi graničnu, linija početka postavlja se na vrijednost nakon linije gdje je visina vala prešla graničnu i program se ponovno pokreće.

⑤ Ako je time operacija završena, provjerava se radi li se o prvoj operaciji. Ako je riječ o prvoj operaciji veliko sidro pomiče se za liniju nakon prethodnog početka. Vrijeme početka i kraja operacije, kao i linija početka i kraja, visine valova i operativnih ograničenja pohranjuje se u zasebnu datoteku.

⑥ Zatim se računa postotak izvršenih operacija u kampanji, te se veliko sidro, ukoliko se radi o prvoj operaciji, postavlja na liniju početka iste, kako bi se time označio početak kampanje, dok se za ostale operacije linija početka pamti kao sidro pripadne operacije.

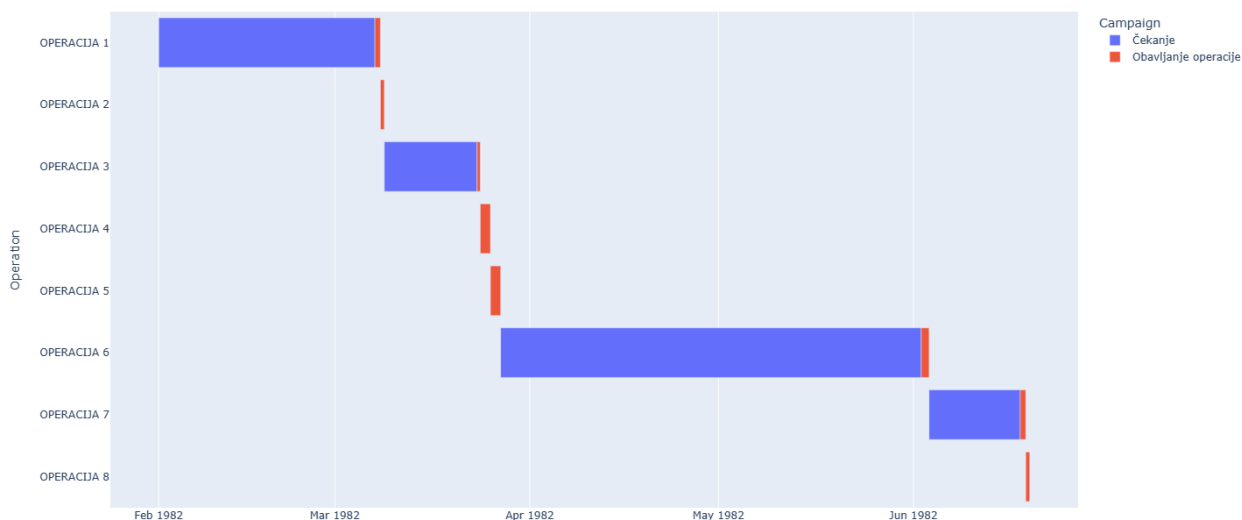
### 3.3.3. Tijek kampanje za odabrani datum

Definirana je funkcija pomoću koje je vizualiziran tijek kampanje na temelju proizvoljnog datuma. Program funkcionira na način da korisnik upiše izabrani datum i godinu iz raspona mjerenja, nakon čega se iz *True and False* tablice „broje“ linije koje predstavljaju pogodno stanje mora, što znači da je srednja izmjerena visina vala za određeni smjer i period valova bila niža od srednje granične visine.

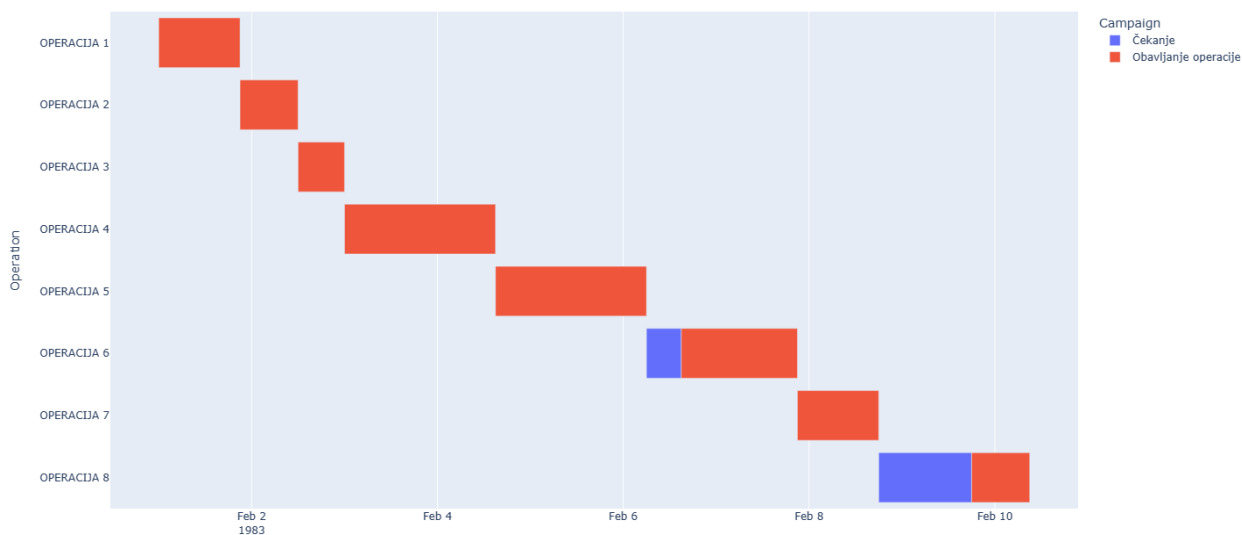


Slika 3. 7. Kampanja s početkom 1. siječnja 1979.

Na slici je prikaza tijek prve kampanje s početkom 1. siječnja 1979. godine. Čekanje u kampanji prikazano je plavom bojom, dok je vrijeme provedeno izvršavajući operacije označeno crvenom. Kao što se vidi iz priloženog, kampanja je mogla početi odmah u ponoć na dan zadanog datuma. Nakon kraja prve operacije, bez čekanja, odmah kreće druga operacija s početkom istog dana u 21 sat, te završava naredni dan u 12 sati što odgovara njezinom trajanju od 15 sati. Zatim dolazi do čekanja od 6 sati, te treća operacija počinje 2. siječnja u 18 sati i završava narednog dana u 6 sati ujutro. Odmah nakon njezinog kraja počinje četvrta i nakon nje peta i šesta operacija. Nakon čekanja od 3 dana, sedma operacija počinje se izvršavati 10. siječnja, te završava idući dan, nakon čega opet dolazi do zastoja, te 14. siječnja počinje posljednja, osma operacija. Cijela kampanja završava u momentu kada je završila zadnja operacija, što je 14. siječnja u 18 sati,. Kampanja je ukupno trajala četrnaest dana, što je u usporedbi s narednim primjerima jako brzo izvršavanje iste.

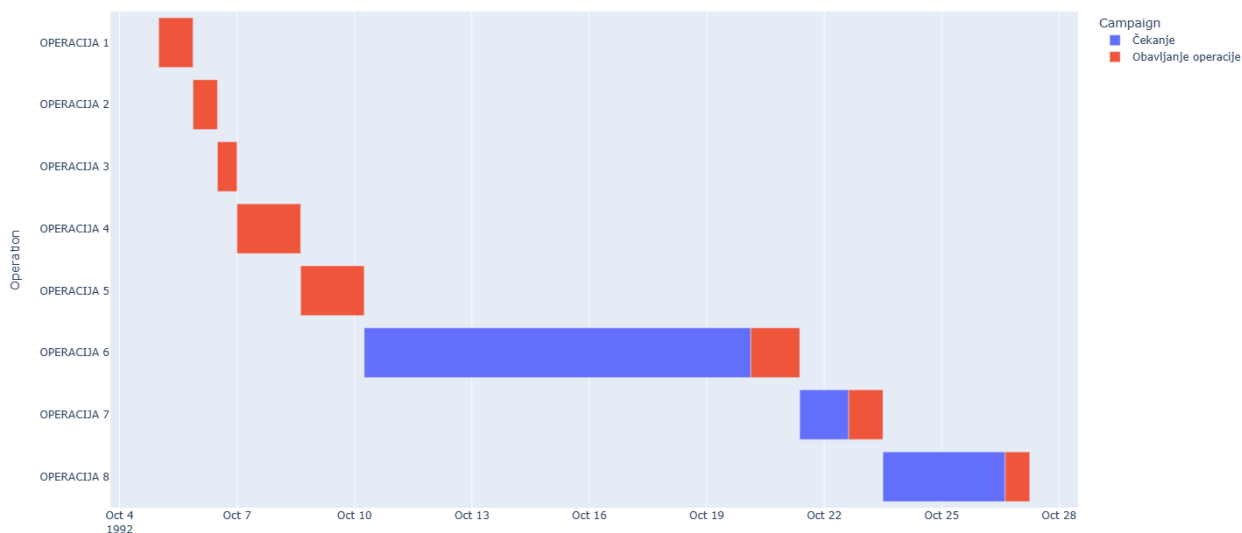


Slika 3. 8. Kampanja s početkom 1. veljače 1982.

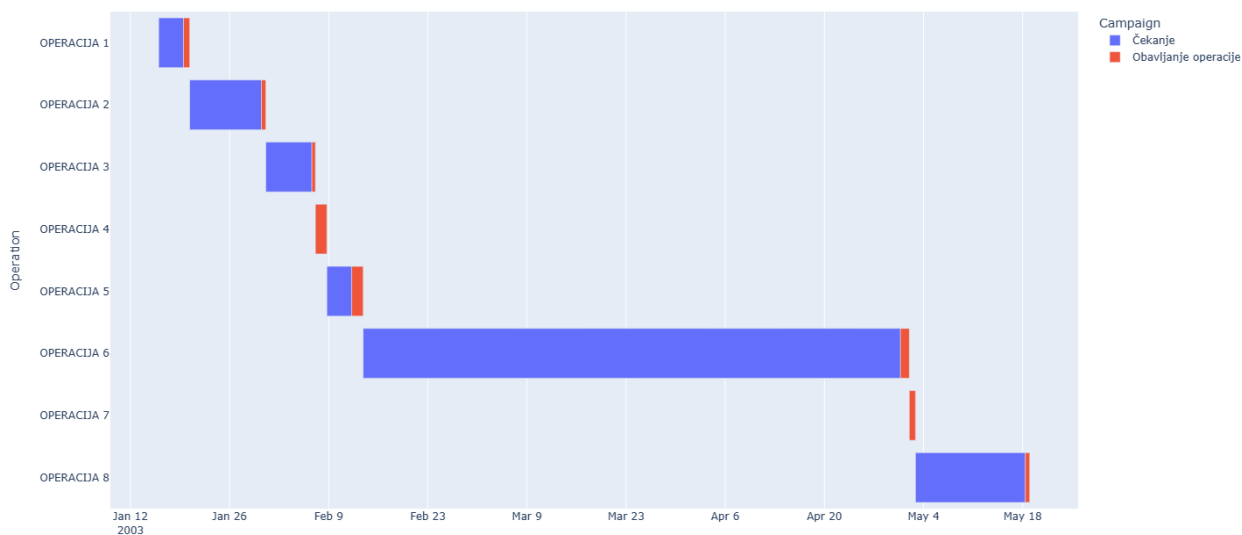


Slika 3. 9. Kampanja s početkom 1. veljače 1983.

Kampanje su započele istog dana 1. veljače, samo godinu dana razlike, a razlike u trajanju su velike, što se moglo pretpostaviti i zbog podataka sa Slike 3.5. gdje je prosječno čekanje za 1982. godinu iskakalo u odnosu na ostale stupce. Dok je kampanja započeta 1. veljače 1983. godine trajala svega deset dana, ona započeta 1. veljače 1982. godine završila je tek u lipnju zbog velikih vremenskih gubitaka na čekanju prve, šeste i sedme operacije.



Slika 3. 10. Kampanja s početkom 5. listopada 1992.

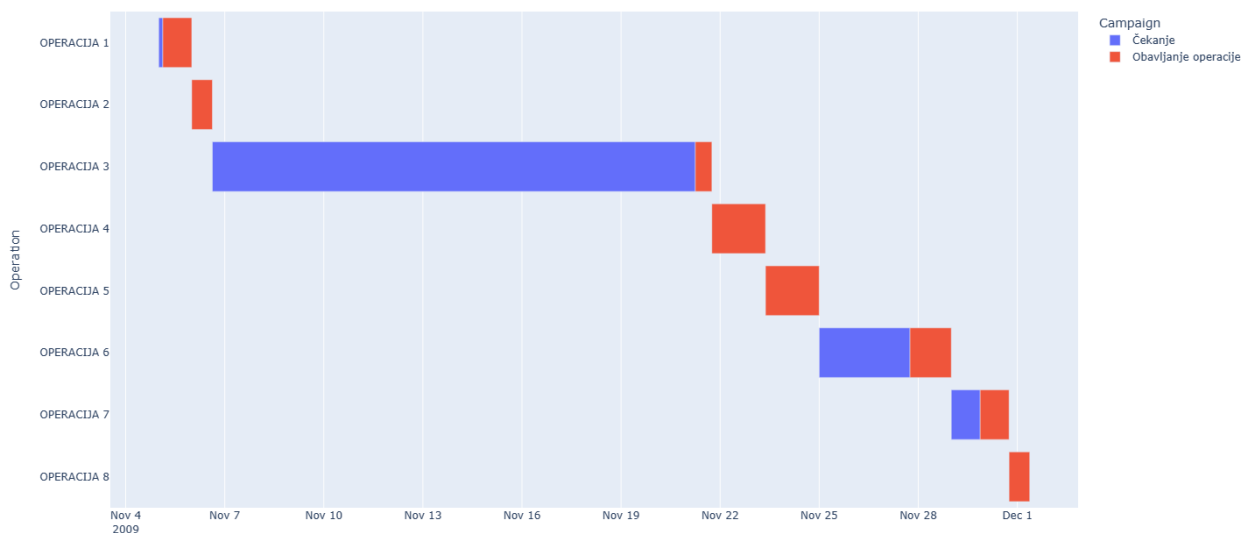


Slika 3. 11. Kampanja s početkom 16. siječnja 2003.

Čekanje kampanje s početkom na današnji datum, prije dvadeset godina, otešlo se do sredine mjeseca svibnja.

Na temelju priloženih slika, može se zaključiti da je na ukupno čekanje kampanje najviše utjecalo čekanje za šestu i osmu operaciju.



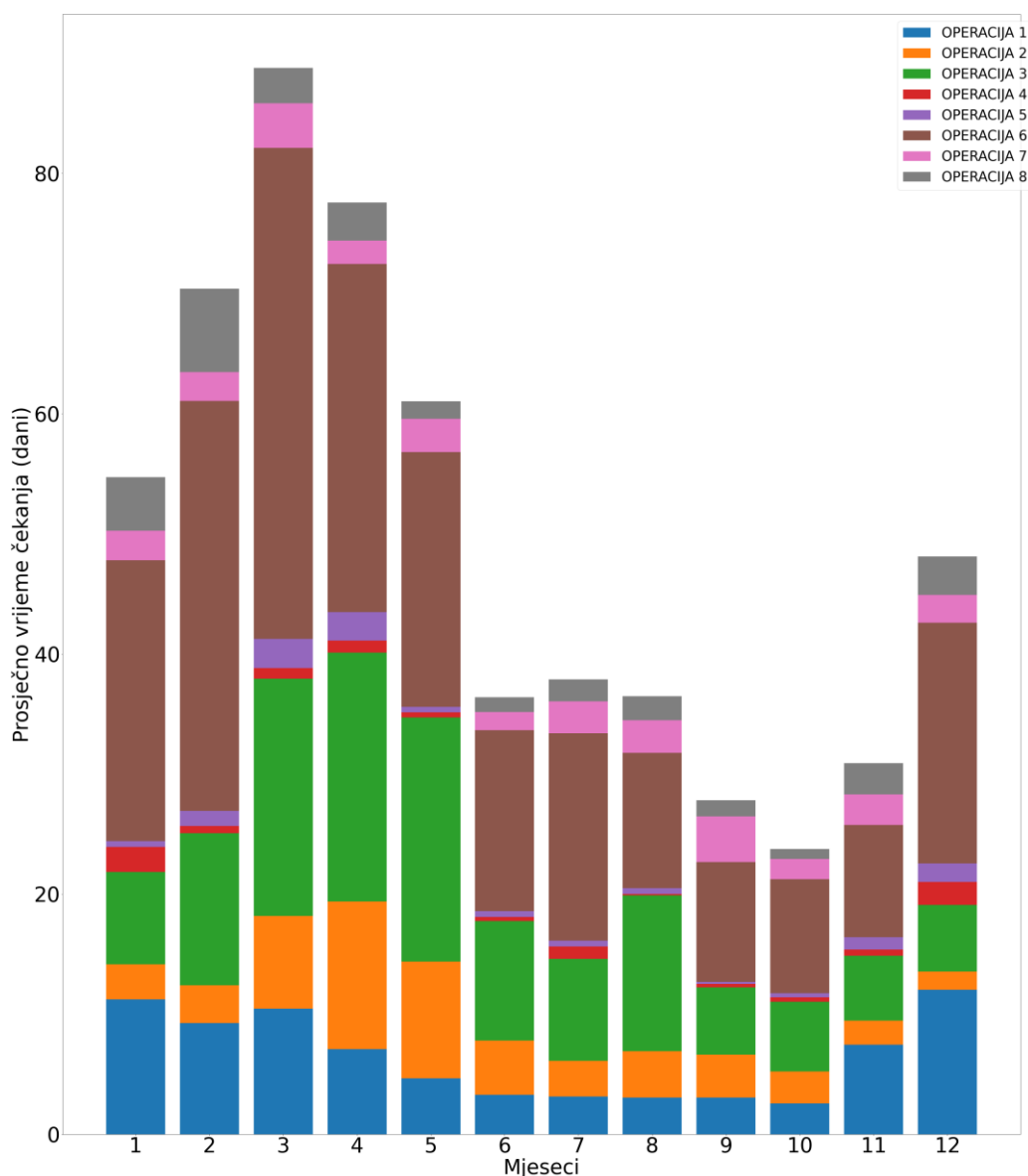


*Slika 3. 12. Kampanja s početkom 5. studenog 2009.*

Kampanja s početkom 5. studenog 2009. godine, posljednja je kampanja koja se mogla započeti i završiti u zadnjoj godini mjerenja, jer su svi kasniji datumi početka prelazili u 2010. godinu za koju nema podataka mjerenja. Također se može vidjeti da je čekanje, za do sada ne problematičnu, treću operaciju, u ovoj kampanji izazvalo najveći zastoje od 15 dana.

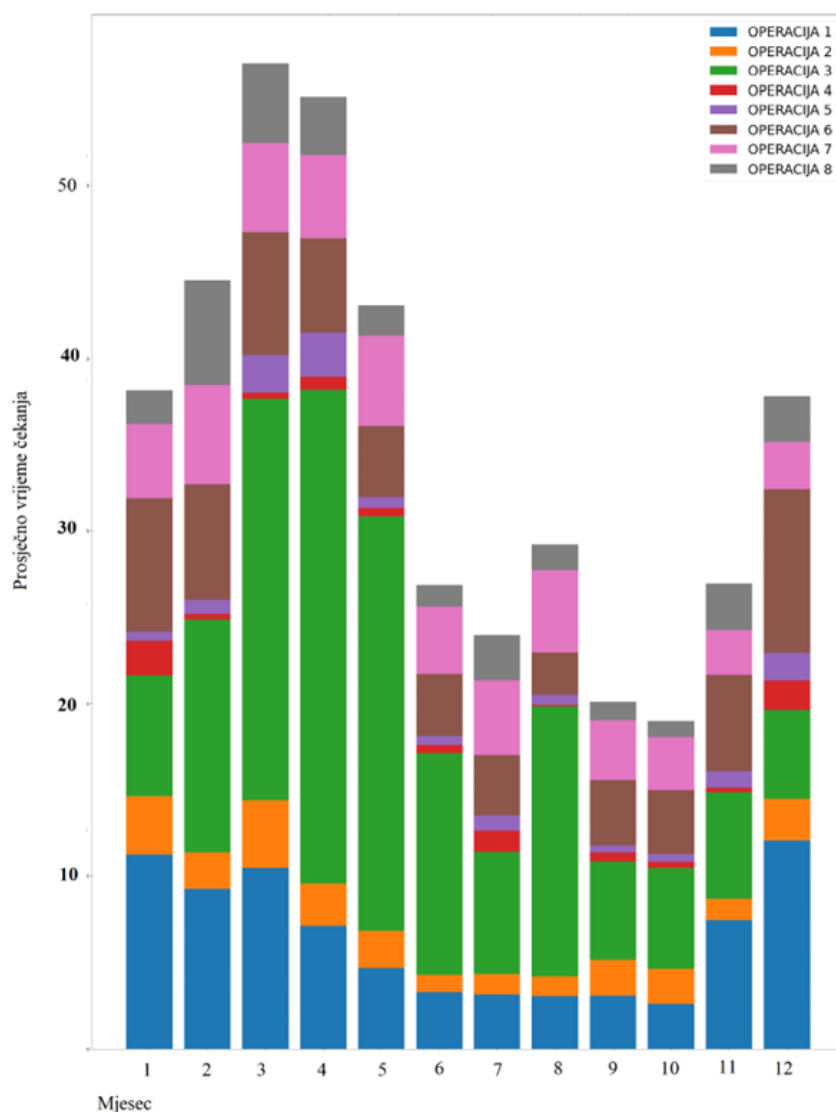
### 3.3.4. Ovisnost zastoja o ograničenju srednje visine vala

Nakon kreiranja klase *Operation* sa podacima o broju operacije, trajanju, smjeru, periodu, visini vala te linijama pogodnih izvršavanja, definira se funkcija...



Slika 3. 13. Prosječno vrijeme čekanja za operacije u kampanji

Na Slici 3.13. je prikazano prosječno vrijeme čekanja izraženo u danima za svaku operaciju, ali i cijelu kampanju, za svaki mjesec. Može se očitati da je operacija „šest“ uzrokovala najveće čekanje u kampanji, ali veliki utjecaj je imala i operacija „tri“. Sveukupno čekanje za izvršetak kampanje varira između četrdesetak dana, u toplijim mjesecima godine, te čak devedeset dana u hladnijim.



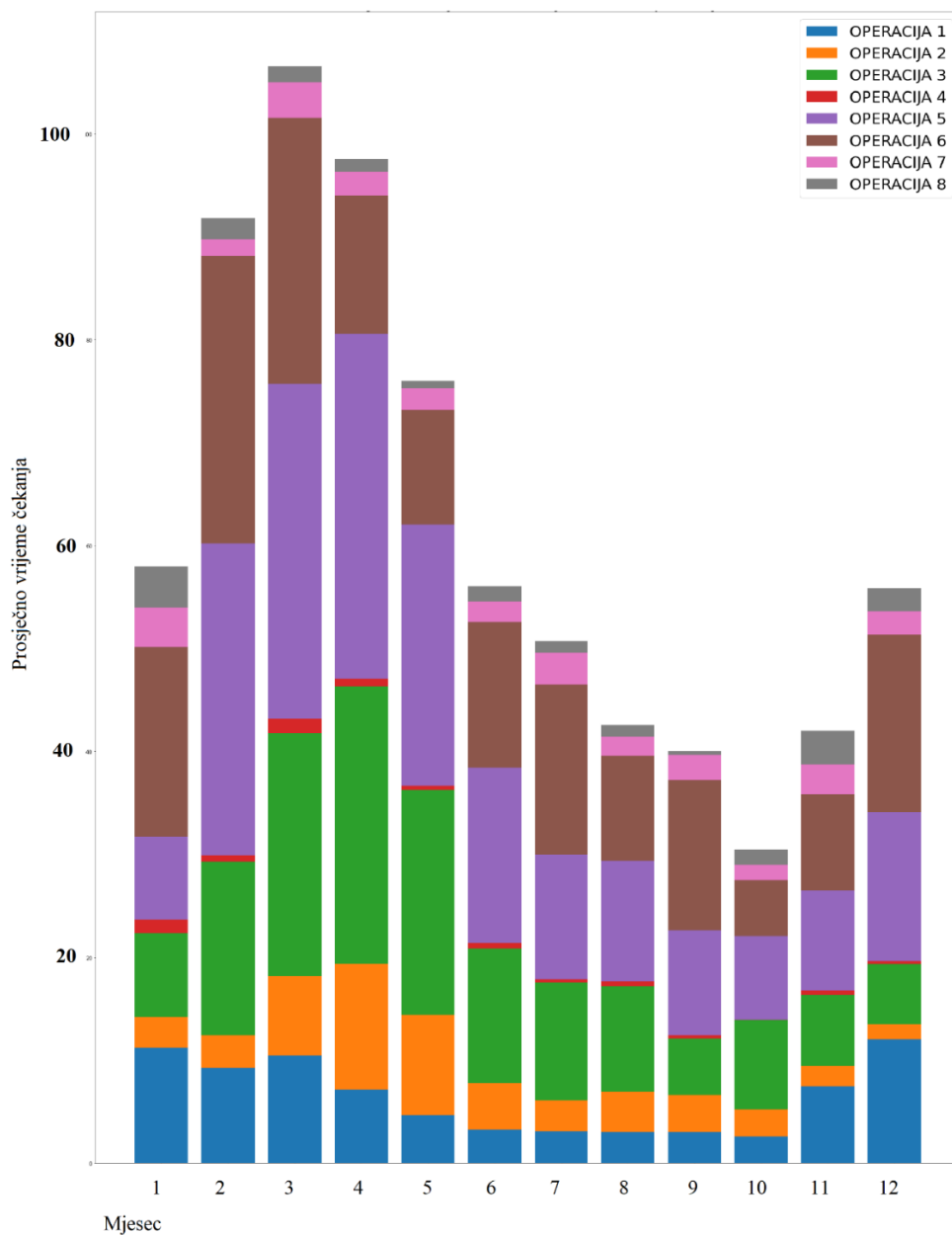
Slika 3. 14. Prosječno vrijeme čekanja kada je ograničenje OP 6 i 2 izjednačeno s ograničenjem OP 1

S obzirom na prethodnu sliku 3.13., u ovom primjeru 3.14. ograničenje operacija koja su doprinosila do najvećih čekanja, a to su operacije tri i šest, zamijenjena su ograničenjima operacije jedan, čiji je utjecaj na sveukupno čekanje u kampanji bio tek 13%.

Sada kada su ograničenja povećana, čekanja za operacije uglavnom ne prelaze tjedan dana, te se cijela kampanja izvršava u otprilike mjesec dana.

Sada je čekanje pojedine operacije podijeljeno uniformno, čemu se pri analizi i planiranju uglavnom teži, iako se na to ne može uvijek utjecati.

Faktor utjecaja ograničenja na čekanje, može se dobiti na način da se zbroje postoci čekanja pojedinih operacija koje imaju jednaka ograničenja, što su u pripadnom slučaju operacije šest, tri i jedan, a njihov utjecaj uzrokovalo je 45% ukupnog čekanja u kampanji.



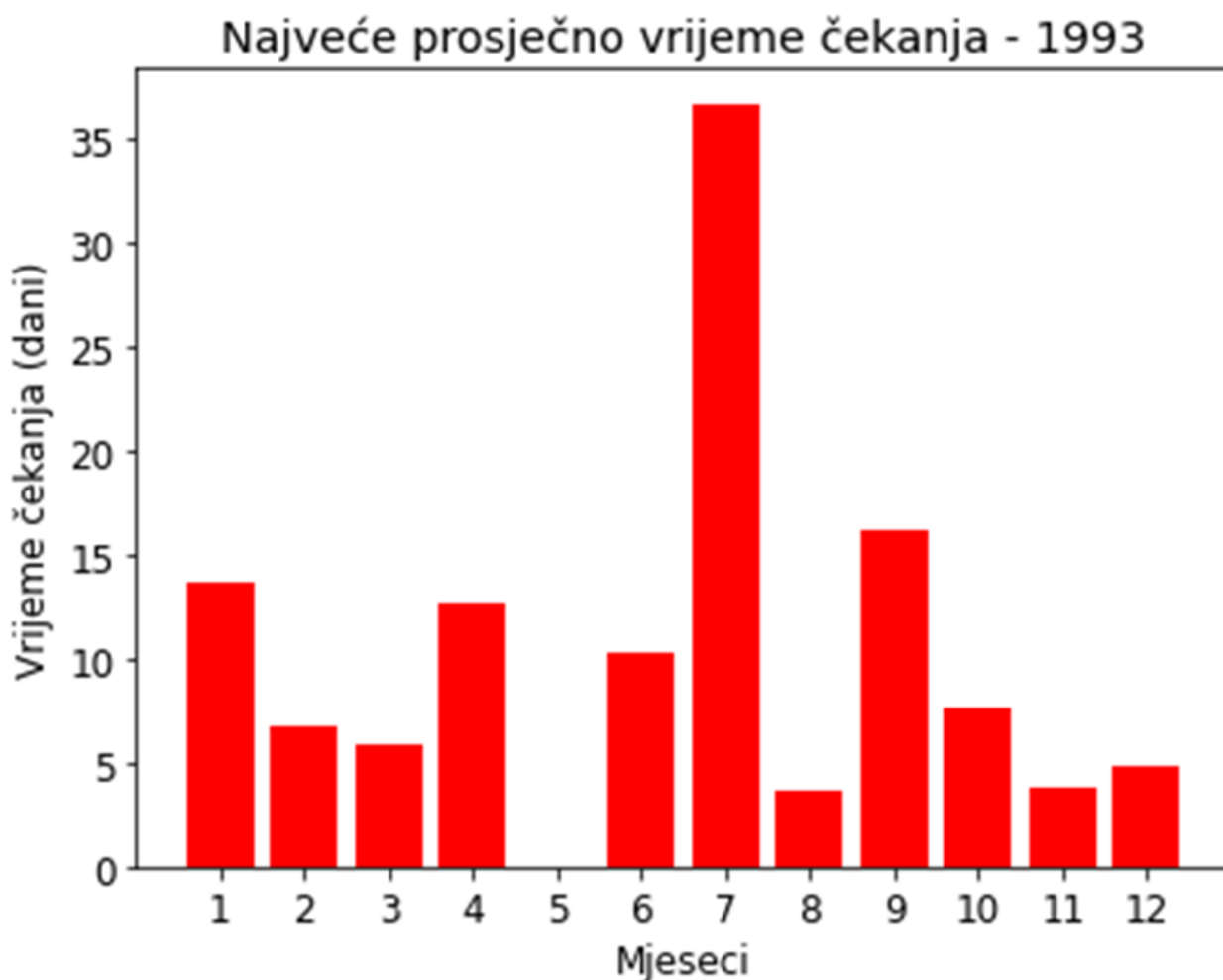
Slika 3. 15. Prosječno vrijeme čekanja kada je ograničenje OP 2 i 5 izjednačeno s ograničenjem OP 6

Na slici 3.15. prikazan je suprotan primjer, kada je ograničenje operacije šest, koja je uzrokovala najveće zastoje, zamjenilo ograničenja operacija dva i pet, te se može zaključiti da se je ukupno vrijeme trajanja kampanje gotovo udvostručilo.

Faktor utjecaja ograničenja na čekanje, može se dobiti na način da se zbroje postoci čekanja pojedinih operacija koje imaju jednaka ograničenja, što su u pripadnom slučaju operacije dva, pet i šest.

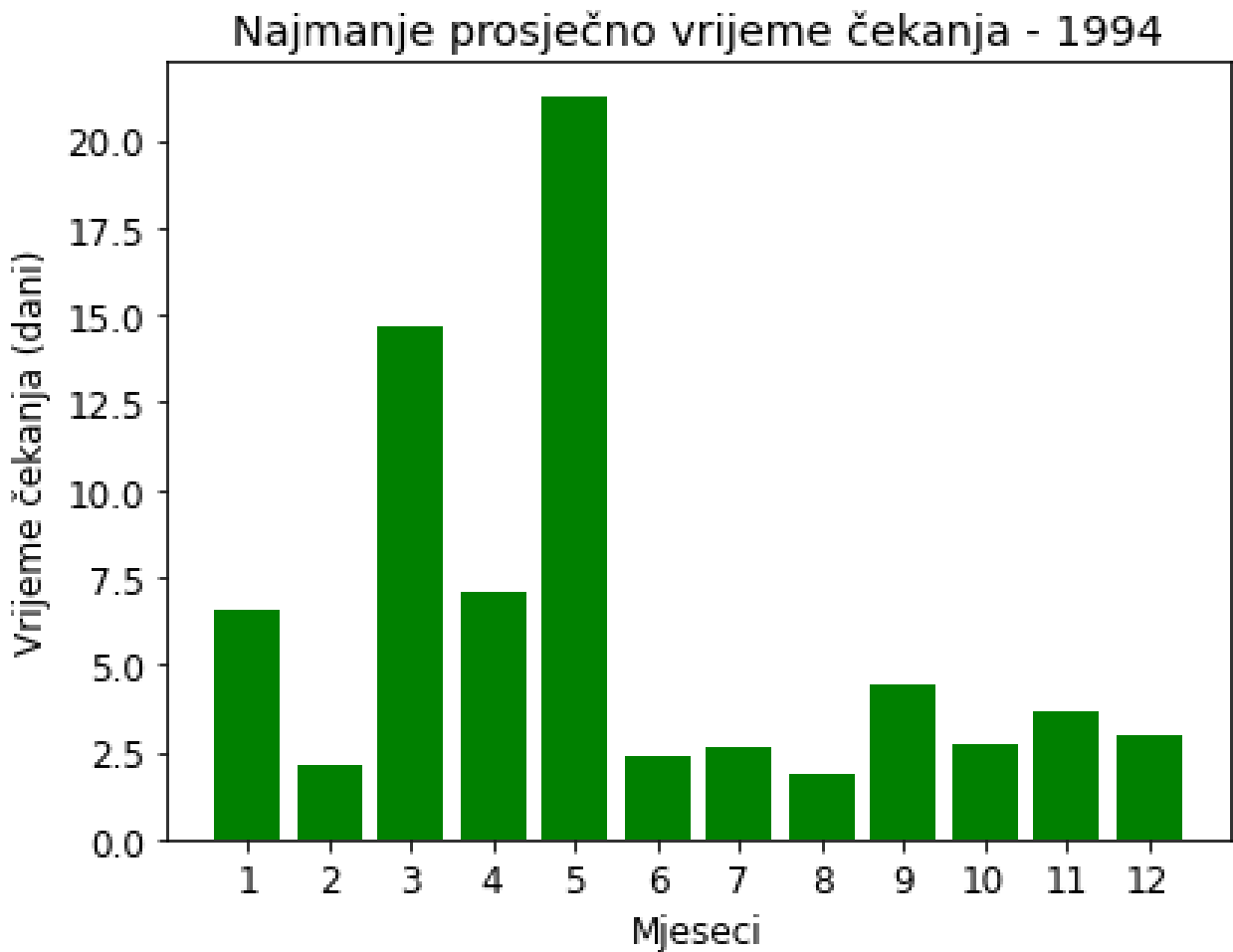
Dakle, ograičenje je imalo utjecaj od 71.5% čekanja u odnosu na ostatak operacija u kampanji.

### 3.3.5. Ovisnost zastoja u graničnim slučajevima vrijednosti ograničenja



*Slika 3. 16. Maksimalno vrijeme čekanja u kampanji*

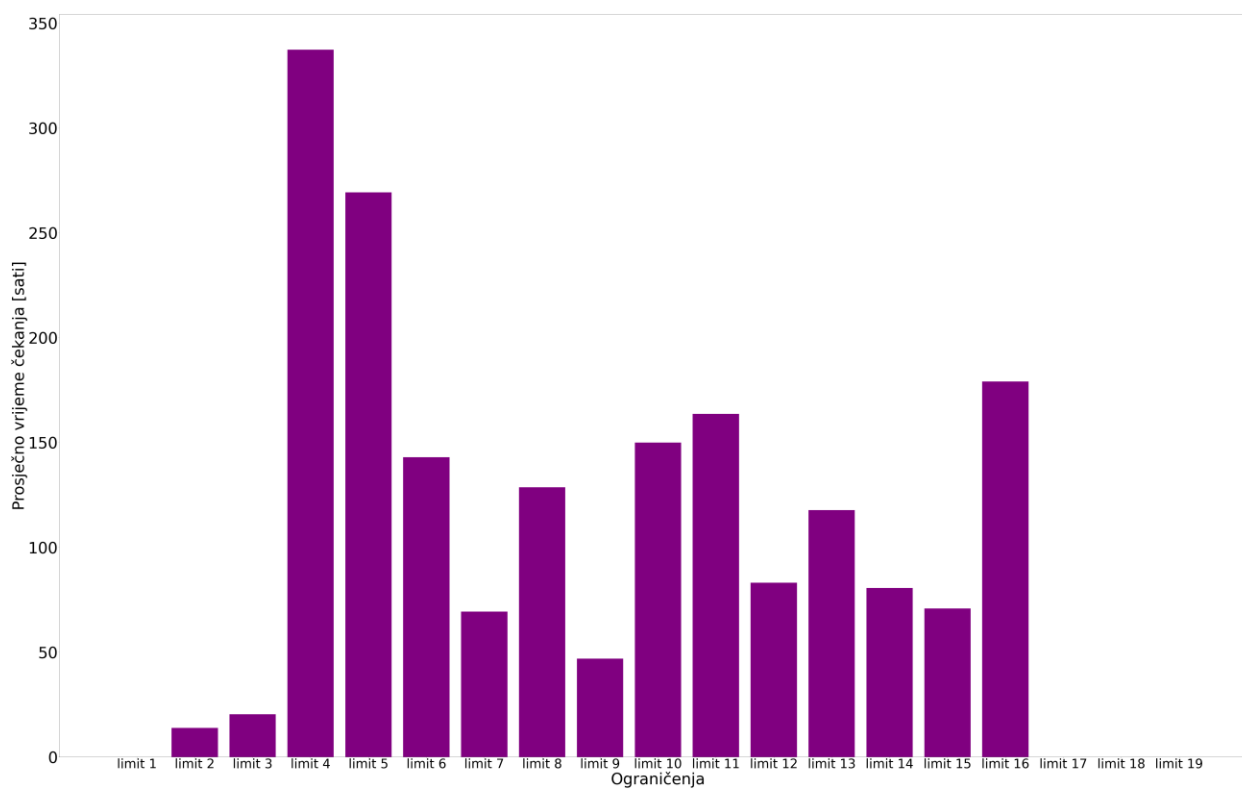
Na slici 3.16. prikazan je dijagram za slučaj uzimanja najrigoroznijih vrijednosti ograničenja iz svake od zadanih tablica ograničenja, što znači da visine valova nisu smjele prelaziti 0.5 metara. Može se zaključiti da bi tada kampanja od samo osam operacija trajala godinu dana, osim ukoliko se započela i uspjela izvršiti u toplijim mjesecima godine, iako se može očitati da i tada čekanja za šestu operaciju traju čak po dva mjeseca.



*Slika 3. 17. Minimalno vrijeme čekanja u kampanji*

Dijagram na slici 3.17. prikazuje da je najmanje čekanje za izvršenje operacije u kampanji bilo 1993. godine. U mjesecu svibnju, more je bilo nepogodnije nego u ostalim mjesecima godine, te se za izvršenje kampanje, u prosjeku čekalo 20 dana, što je tek prosjek čekanja u prethodnoj godini.

### 3.3.6. Vrijeme čekanja određeno rasponom ograničenja

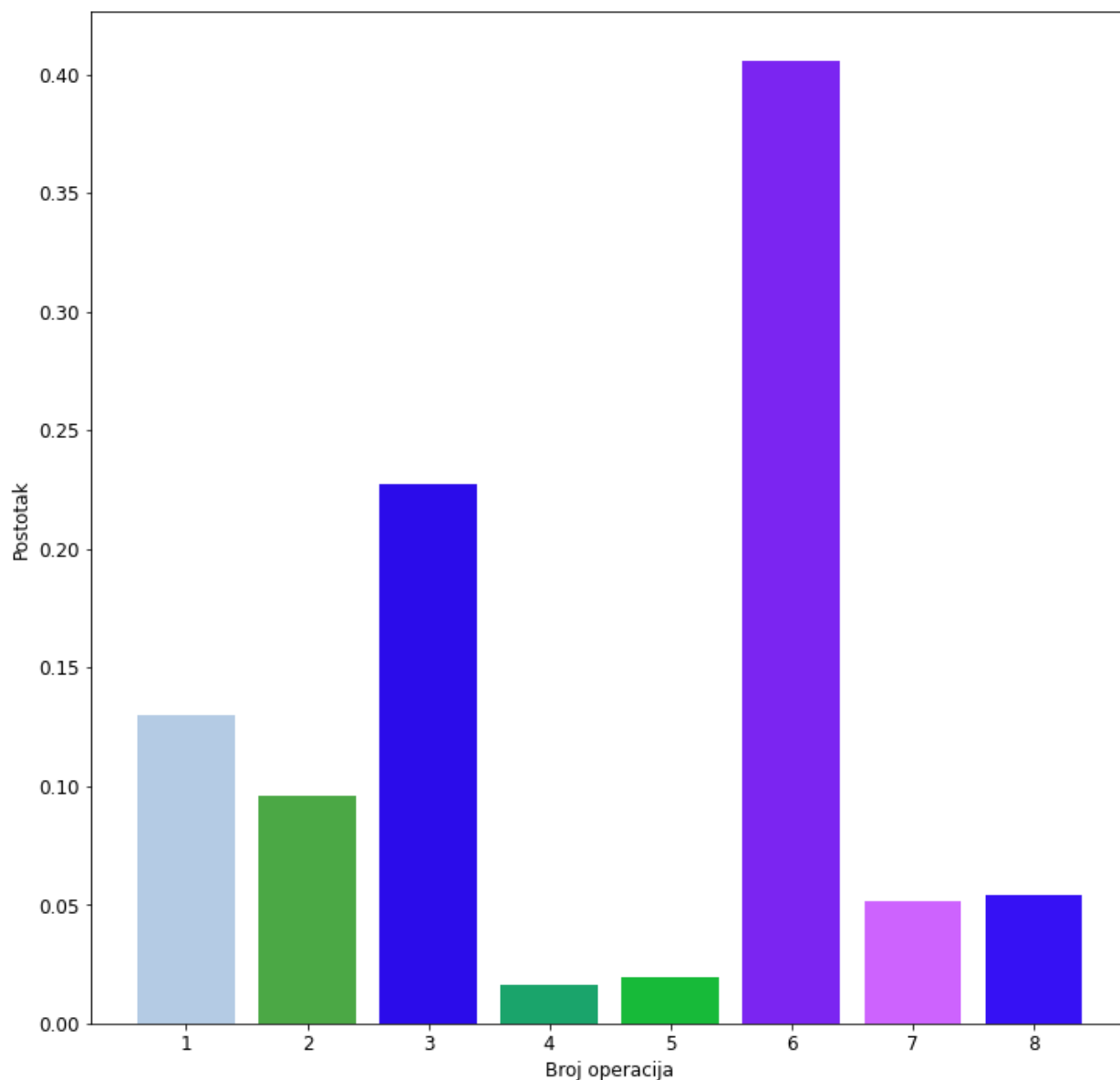


Slika 3. 18. Prosječno vrijeme čekanja za definirano ograničenje

Ograničenja zadanih operacija, kreću se između 0.5 i 2.5 metara srednje visine vala, stoga su na slici 3.18. podijeljena u grupe s korakom od 0.1 metara te je za svaku grupu određena prosječna vrijednost čekanja za izvršavanje operacija. Vrijednosti čekanja dobivene su iz tablice u koju su pohranjivani maksimalna ograničenja visine valova a da se operacija mogla izvršavati, što znači da su se operacija i za sve visine valova manje od ograničavajuće mogle izvršiti, također je pohranjeno i čekanje koje su ta ograničenja uzrokovala. Za velik broj operacija koje su se mogle izvršiti ali koja su morala čekati da visine valova padnu ispod 1.4 metra, čekanja su trajala 10 do 12 dana, dok su za operacije s većim dopuštenim visinama ta čekanja trajala otprilike 4 dana.

### 3.3.7. Persistency operacije

Persistency ili postojanost operacije je karakteristika operacije kojom se definira mogućnost prekida uslijed izvršavanja iste. U osnovi su svi dosadašnji proračuni rađeni uz pretpostavku da su operacije persistent, odnosno da se jednom nakon pokretanja, ne smiju prekidati. S obzirom na činjenicu da je operacija šest uzrokovala najveća čekanja, u nastavku je dana usporedba čekanja kada bi operacija šest imala mogućnost prekida.

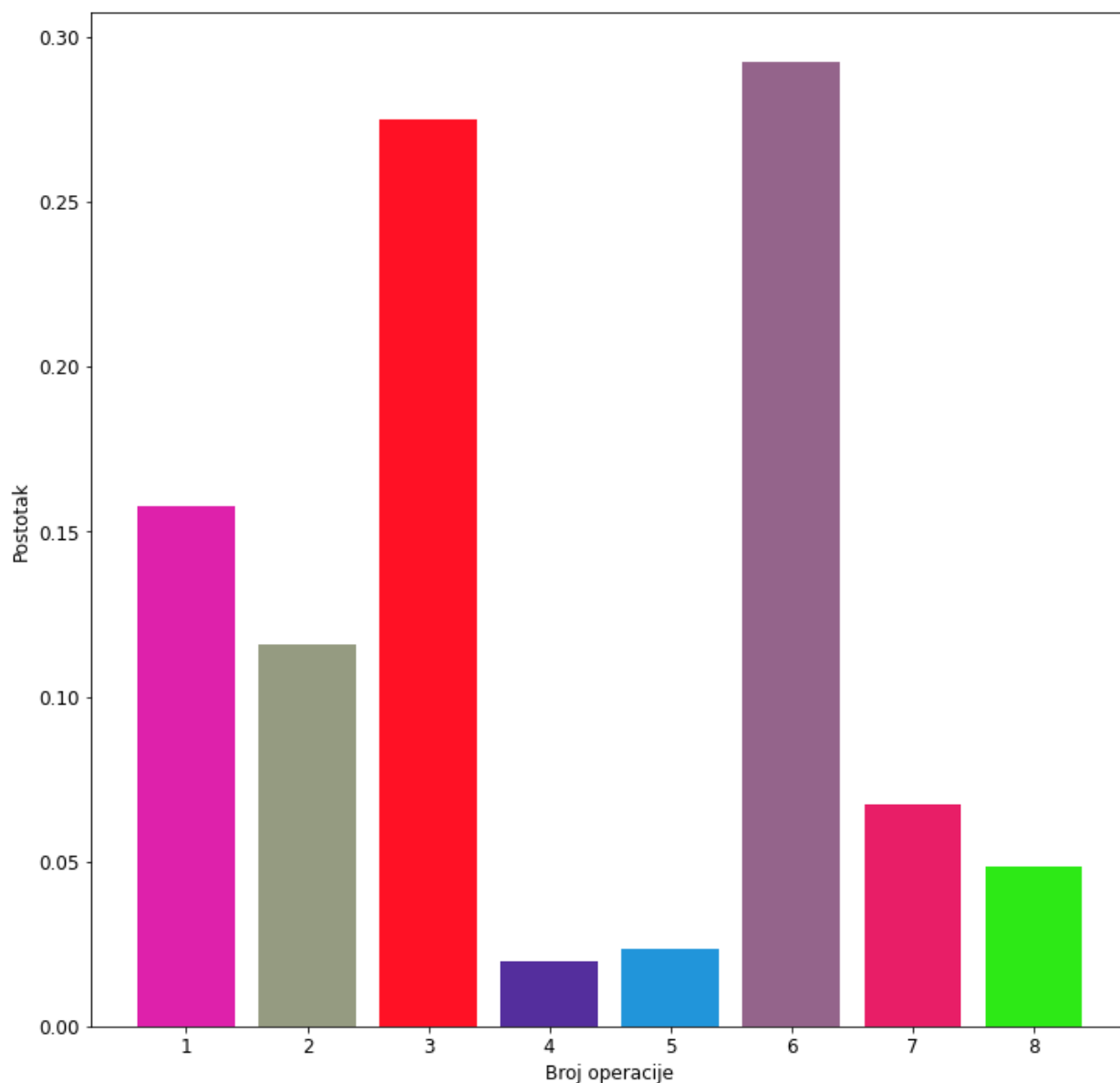


*Slika 3. 19. Čekanje po operacijama u kampanji kada su sve operacije postojane*

Slika 3.19. prikazuje utjecaj ograničenja svake operacije na čekanje u kampanji, iz čega se može očitati da najveći ograničavajući faktor srednje visine vala na sveukupnoj razini ima operacija šest, a njezin faktor iznosi čak 40.6, odnosno na sveukupno čekanje u kampanji od osam



operacija, šesta operacija uzrokovala je gotovo pola vremena zastoja, dok su operacija četiri i pet imale niti 10% utjecaja operacije šest.



*Slika 3. 20. Čekanje po operacijama u kampanji kada sve operacije nisu postojane*

Na slici 3.20. vidljiva je velika promjena u čekanju za izvršenje operacije šeste operacije, kod koje je prosječno čekanje pod uvjetom da se ne smije prekidati imalo utjecaj iznad 40% na ukupno čekanje u kampanji. Sada do izražaja dolazi i čekanje za treću operaciju, koja se nakon početka ne smije prekidati. Sveukupno čekanje u kampanji uvelike bi se smanjilo kada bi sve operacije imale mogućnost prekida, ali to nije česti slučaj u praksi, stoga je i u ovoj kampanji za primjer uzeta samo jedna od osam operacija.

## 4. ZAKLJUČAK

Kampanja zadana u ovom radu, sastojala se od tek osam operacija, što je olakšalo preglednost, proračun i organizaciju podataka, no u stvarnosti se kampanje sastoje od stotina operacija, te je sama analiza i plan realizacije puno kompleksniji. Cilj ovog rada bio je provjera utjecaja ograničenja na zastoje, kombinacijom različitih ograničenja dobivena su puno veća ili manja vremena čekanja za izvršavanje kampanje.

Predviđanje zastoja uslijed nepovoljnih vremenskih prilika uvelike ovisi o raspoloživosti meteoroloških podataka na lokaciji izvođenja radova. Zbog sve naprednije tehnologije, podaci stanja mora, ali i vremenskih parametara postaju sve dostupniji i precizniji. U ovom proračunu korišteni su samo podaci o visini, period i smjeru valova, dok je u praksi potrebno u obzir uzeti i utjecaj vjetera i morskih struja, te ovisno o kompleksnosti projekta, još mnoštvo parametara.

Složeni pomorski projekti zahtijevaju pažljivu procjenu vremena zastoja i čekanja. Dobeni rezultati prikazuju realnu sliku o utjecaju ograničenja visine vala na sveukupno trajanje kampanje, te vremenski zastoj za svaku od osam operacija, ali i cijelu kampanju, na temelju čega se mogu izdvojiti operacije s najutjecajnijim ograničenjima.

Kako bi proračun postao učinkovitiji i pouzdaniji, potrebna je što preciznija definicija meteorološko-oceanskih karakteristika, zajedno s operativnim granicama, ali i veći broj ulaznih podataka, odnosno, duži period mjerenja istih.

## **Sažetak**

Tema ovog završnog rada je analiza vremena neraspoloživosti pri izvođenju pomorskih projekata. Zadani projekt ili kampanja sastoji se od osam operacija. U uvodnom dijelu predstavljena je početna problematika, zatim su opisani pojmovi i mjerenja stanja mora. Ulazni podaci dani su u tablicama, te su opisane korištene Python biblioteke. Računalni program je simulacija vremena čekanja i utjecaja operacijskih ograničenja na tijek kampanje.

Ključne riječi: Python, analiza vremena neraspoloživosti, zastoj, simulacija, kampanja

## **Summary**

The subject of this final thesis is weather downtime analysis for offshore projects. Given project or campaign consists of eight operations. The idea of this thesis was to make a simulation of limit impact factor based on the input data that is given in tables and that was obtained by sea monitoring in a period of 30 years. Simulation was made in programming language Python using its libraries which are described in the same chapter. The final result was visualization of standby time of each operation and impact of limitations on the standby time of campaign.

Keywords: Python, downtime analysis, downtime, simulation, campaign

## **Popis tablica**

Tablica 3. 1. Tablica stanja mora .....	17
Tablica 3. 2. Popis operacija .....	18
Tablica 3. 3. Tablica ograničenja srednje visine vala za operaciju 1 .....	18
Tablica 3. 4. Tablica ograničenja srednje visine vala nakon zakretanja .....	20
Tablica 3. 5. Tablica s podacima o početku i kraju operacija .....	24

## Popis slika

Slika 2. 1. Nevrijeme uslijed izvođenja kampanje .....	7
Slika 2. 2. Tijek izvršavanja kampanje .....	8
Slika 2. 3. Pogodnost izvršavanja operacije ovisno o ograničenju visine vala .....	9
Slika 2. 4. Period i visina vala .....	9
Slika 2. 5. Shema kraj-početak odnosa .....	10
Slika 2. 6. Shema početak-početak odnosa .....	11
Slika 2. 7. Naftna platforma .....	13
Slika 2. 8. Shema ishoda .....	14
Slika 2. 9. Senzor za mjerenje stanja mora .....	15
Slika 3. 1. Položaj plovila u odnosu na valove.....	20
Slika 3. 2. Interpolacija po 'najbližem susjedu' .....	21
Slika 3. 3. Linearna interpolacija .....	22
Slika 3. 4. Usporedba vremena rada i čekanja .....	25
Slika 3. 5. Prosječno vrijeme čekanja za svaku operaciju na godišnjoj razini .....	26
Slika 3. 6. Dijagram toka funkcije.....	27
Slika 3. 7. Kampanja s početkom 1. siječnja 1979.....	29
Slika 3. 8. Kampanja s početkom 1. veljače 1982.....	30
Slika 3. 9. Kampanja s početkom 1. veljače 1983.....	30
Slika 3. 10. Kampanja s početkom 5. listopada 1992. ....	31
Slika 3. 11. Kampanja s početkom 16. siječnja 2003.....	31
Slika 3. 12. Kampanja s početkom 5. studenog 2009. ....	32
Slika 3. 13. Prosječno vrijeme čekanja za operacije u kampanji .....	33
Slika 3. 14. Prosječno vrijeme čekanja kada je ograničenje OP 6 i 2 izjednačeno s ograničenjem OP 1.....	34
Slika 3. 15. Prosječno vrijeme čekanja kada je ograničenje OP 2 i 5 izjednačeno s ograničenjem OP 6.....	35
Slika 3. 16. Maksimalno vrijeme čekanja u kampanji .....	36
Slika 3. 17. Minimalno vrijeme čekanja u kampanji.....	37
Slika 3. 18. Prosječno vrijeme čekanja za definirano ograničenje.....	38
Slika 3. 19. Čekanje po operacijama u kampanji kada su sve operacije postojane.....	39
Slika 3. 20. Čekanje po operacijama u kampanji kada sve operacije nisu postojane.....	40

## Popis literature

- [1] J.Rip, Probabilistic downtime analysis for complex marine projects, MSc thesis Hydraulic Engineering
- [2] Bertsche, B., 2008. Reliability in automotive and mechanical engineering: determination of component and system reliability. Springer Science & Business Media.
- [3] Century Dynamics-ANSYS Inc., 2011. AQWA Reference manual Version 14.0.
- [4] Clauss, G., Riekert, T., 1990a. Operational limitations of offshore crane vessels. In: Offshore Technology Conference OTC 6217. Houston, Texas.
- [5] Clauss, G., Riekert, T., 1990b. Seakeeping Characteristics and Related Workability of Offshore Crane Vessels.
- [6] Det Norske Veritas, Modelling and Analysis of Marine Operations, Det Norske Veritas, 2013.
- [7] M. Drago, A. del Guzzo, L. Vitali i R. Bruschi, Weather Stand-by Assessment in Offshore Operations Using Motion Limit Criteria, The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference , San Francisco, 2017.
- [8] M. Drago i M. Venturi, Probabilistic evaluation of performance and weather stand-by in offshore pipeline laying, Proc. IMCA annual seminar, New Orleans, Louisiana, 2011.
- [9] K. Anastasiou, C. Tsekos, Operability analysis of marine projects based on Markov theory, Applied Ocean Research
- [10] Det Norske Veritas, Dnv-rp-h103: Modeling and analysis of marine operations, (2011).
- [11] J. Feuchtwang and D. Infield, Offshore wind turbine maintenance access: a closed-form probabilistic method for calculating delays caused by sea-state, Wind Energy 16, 1049 (2013).