

# Model odlučivanja u brodskoj pogibeljnoj situaciji zasnovan na agentima

---

Sumić, Dean

Doctoral thesis / Disertacija

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Transport and Traffic Sciences / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:119:897958>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Transport and Traffic Sciences -  
Institutional Repository](#)





SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

Dean Sumić

**MODEL ODLUČIVANJA U BRODSKOJ  
POGIBELJNOJ SITUACIJI ZASNOVAN NA  
AGENTIMA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2021.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET PROMETNIH ZNANOSTI

DEAN SUMIĆ

**MODEL ODLUČIVANJA U BRODSKOJ  
POGIBELJNOJ SITUACIJI ZASNOVAN NA  
AGENTIMA**

DOKTORSKI RAD

Mentori:  
prof. dr. sc. Marko Rosić  
doc. dr. sc. Pero Škorput

Zagreb, 2021.



UNIVERSITY OF ZAGREB

FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC SCIENCES

Dean Sumić

# AGENT BASED DECISION-MAKING MODEL OF ON-BOARD DISTRESS SITUATION

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisors:  
prof. dr. sc. Marko Rosić  
doc. dr. sc. Pero Škorput

Zagreb, 2021

# INFORMACIJE O MENTORIMA

## **prof. dr. sc. Marko Rosić**

**Marko Rosić** rođen je u Augsburgu (SR Njemačka) 1. siječnja 1970. godine. Diplomirao je 1996. godine matematiku i informatiku na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Splitu, a magistrirao i doktorirao u području tehničkih znanosti, polje računarstvo na Sveučilištu u Zagrebu, Fakultetu elektrotehnike i računarstva, 2000. odnosno 2004. godine.

Od 1996. godine radi na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Splitu gdje je prošao sva suradnička i znanstveno-nastavna zvanja od mlađeg asistenta do redovitog profesora u trajnom zvanju. Sudjelovao je na šest (6) znanstvenih projekata Ministarstva znanosti i obrazovanja Republike Hrvatske i tri (3) EU projekta. Objavio je više od pedeset (50) radova u časopisima i zbornicima konferencija u području semantičkog weba, primjene inteligentnih agenata i inteligentnih tutorskih sustava.

Član je uredničkih odbora inozemnih znanstvenih časopisa, sudjeluje kao recenzent u većem broju znanstvenih časopisa te kao član programskih odbora međunarodnih znanstvenih konferencija. Član je više stručnih tijela formiranih od strane Vlade Republike Hrvatske.

Mentor je jedne (1) obranjene doktorske disertacije na Fakultetu elektrotehnike i računarstva u Zagrebu i dvije (2) na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu u Splitu.

Od 2011. do 2014. godine je bio dekan Prirodoslovno-matematičkog fakulteta u Splitu, a od 2014. do 2018. prorektor za logistiku, informacijsku infrastrukturu i optimizaciju Sveučilišta u Splitu.

Primio je srebrnu plaketu "Josip Lončar" Fakulteta elektrotehnike i računarstva u Zagrebu za posebno istaknutu doktorsku disertaciju (2014), te županijsko priznanje Splitsko-dalmatinske županije za doprinos u izradi Strategije urbane aglomeracije Splita (2017).

## **doc. dr. sc. Pero Škorput**

**Pero Škorput** je rođen 18. listopada 1976. u Mostaru u Bosni i Hercegovini, oženjen je i otac dvoje djece. Doktorirao je 2014. godine na Fakultetu prometnih znanosti u Zagrebu i stekao akademski stupanj doktora znanosti (tema doktorskog rada: „Model otvorene ontologije kooperativnih inteligentnih transportnih sustava“). Odlukom Vijeća tehničkog područja Sveučilišta u Zagrebu 2017. godine izabran je za docenta u znanstvenom području Tehničkih znanosti polje Tehnologija prometa i transport, a u znanstveno zvanje višeg znanstvenog suradnika izabran je 2020. godine. Predaje na preddiplomskim, diplomskim i poslijediplomskom kolegijima. Na poslijediplomskom doktorskom studiju nositelj je kolegija Semantički sustavi u prometu te je predavač na kolegijima Ekspertni sustavi i Istraživački seminaru iz inteligentnih transportnih sustava. Uz nastavnu djelatnost aktivno se bavi znanstvenim radom. Istražuje u području primjene semantičkih tehnologija u prometu, prometnog inženjerstva, inteligentnih transportnih sustava te računalne sigurnosti u prometu.

### **Popis radova:**

Sumić, Dean; Rosić, Marko; Škorput, Pero. Decision making example for on-board distress situation based on agents. // 29th International DAAAM Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, DAAAM 2018, Zadar, Croatia, 24 October 2018 through 27 October 2018.

Škorput, Pero; Mandžuka, Sadko; Kljaić, Zdenko. Applying of semantic web in the critical infrastructure protection management. // 19th Telecommunications Forum, TELFOR 2011, Belgrade, Serbia, 22 November 2011 through 24 November 2011.

Bošnjak, Ivan; Mandžuka, Sadko; Škorput, Pero. Incident management system development for Croatian tunnels. // 17th World Congress on Intelligent Transport Systems, ITS 2010, Busan Exhibition and Convention Center (BEXCO) Busan, South Korea, 25 October 2010 through 29 October 2010.

Škorput, Pero; Mandžuka, Sadko; Jelušić, Niko. Real-time detection of road traffic incidents. // PROMET - Traffic&Transportation 22, 4(2010), str. 273-283.

Doktorska disertacija pod naslovom

**Model odlučivanja u brodskoj pogibeljnoj situaciji  
zasnovan na agentima**

Deana Sumića

obranjena je 5. siječnja 2021. godine na Fakultetu prometnih znanosti

Sveučilišta u Zagrebu pred Povjerenstvom u sastavu:

- prof. dr. sc. Hrvoje Gold, predsjednik
- doc. dr. sc. Pero Škorput, mentor, član
- prof. dr. sc. Marko Rosić, mentor, član
- prof. dr. sc. Zvonko Kavran, član
- prof. dr. sc. Pero Vidan, vanjski član

ocjenom *magna cum laude* (s velikom pohvalom)

## PODACI I INFORMACIJE O DOKTORANDU

**Ime i prezime:** Dean Sumić, dipl. ing. pom. prom., DS-109/2054

**Datum, mjesto rođenja i OIB:** 29. studenoga 1972., Split, 07377228918

**Naziv završenoga fakulteta i godina diplomiranja:** Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet, 2007.

**Naziv poslijediplomskoga doktorskoga studija:** Tehnološki sustavi u prometu i transportu

## INFORMACIJE O DOKTORSKOJ DISERTACIJI

**Naslov disertacije:** Model odlučivanja u brodskoj pogibeljnoj situaciji zasnovan na agentima

**Fakultet na kojem je rad obranjen:** Sveučilište u Zagrebu, Fakultet prometnih znanosti

## POVJERENSTVA, OCJENA I OBRANA DOKTORSKE DISERTACIJE

**Datum prijave teme:** 19. prosinca 2017.

**Datum prihvaćanja teme:** 13. ožujka 2018.

### **Mentori:**

- doc. dr. sc. Pero Škorput, Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti
- prof. dr. sc. Marko Rosić, Sveučilište u Splitu Prirodoslovno-matematički fakultet

### **Povjerenstvo za ocjenu i obranu doktorske disertacije:**

- prof. dr. sc. Hrvoje Gold, Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti, predsjednik
- doc. dr. sc. Pero Škorput, Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti, mentor, član
- prof. dr. sc. Marko Rosić, Sveučilište u Splitu Prirodoslovno-matematički fakultet, mentor, član
- prof. dr. sc. Zvonko Kavran, Sveučilište u Zagrebu Fakultet prometnih znanosti, član
- prof. dr. sc. Pero Vidan, Sveučilište u Splitu Pomorski fakultet, vanjski član

### **Lektor:**

- Slavica Sumić, profesor logoped

Datum obrane disertacije: 5. siječnja 2021.



## SAŽETAK

Visoki rizik od nesreća na brodovima postoji unatoč tehnološki naprednim podsustavima za zaštitu ljudi i smanjenje materijalne štete. Istraživanja o visokom utjecaju ljudskog faktora pri izazivanju i sanaciji nezgoda pokazala su da se bitan korak naprijed može napraviti supstitucijom i isključivanjem ljudskog faktora u procesu odlučivanja pri pogibeljnoj brodskoj situaciji.

U radu su analizirani elementi sigurnosti na moru, brodske pogibeljne situacije kao i agentne tehnologije koje se mogu primjenjivati u ovakvim situacijama. Požari na brodu su odabrani kao klasa brodskih pogibeljnih situacija na kojoj će se provjeravati mogućnost supstitucije ljudskog faktora korištenjem agentnih tehnologija. Definiran je matematički model protupožarne agentne arhitekture broda te je u simulacijskom okruženju implementiran razvijeni model. Unutar implementiranog modela izvršen je sveobuhvatni eksperiment kako bi se provjerile mogućnosti primjene agentnih tehnologija pri detekciji i gašenju požara na brodu.

**Ključne riječi:** autonomno odlučivanje, inteligentni agenti, višeagentni sustavi, požari na brodu

## SUMMARY

The risk of accidents on board ships is high despite the implementation of technologically advanced subsystems whose basic function is protecting people and reducing material damage. Research of human error analysis indicates that human factor substitution with program agents can achieve significant improvements in decision-making processes in distress ship situation. The paper analyzes the elements of safety at sea, ship distress situations as well as agent technologies that can be applied in such situations. Ship fires have been selected as a class of ship distress situations in which the possibility of human factor substitution using agent technologies will be tested. The mathematical model of the ship's fire-fighting agent architecture was defined and the developed model was implemented in the simulation environment. Within the implemented model, a comprehensive experiment was performed to test the possibilities of applying agent technologies in the detection and extinguishing of fires on board.

**Key words:** autonomous decision making, intelligent agents, multiagent systems, fires onboard ships

## **EXTENDED SUMMARY**

The first chapter discusses the elements of safety at sea and analyzes the ship's distress situations. The same chapter also shows how maritime communications are structured through GMDSS, which distinguishes communication priorities: distress, urgency, safety and routine communications. This mandatory communication system is based on internationally agreed safety procedures, types of communication devices and communication protocols used for easier and faster rescue, thus increasing maritime safety. Emergency maritime communications are organized hierarchically according to IMO-SOLAS-GMDSS rules (ship's crew and master have the mandatory devices and frequencies and protocols that are set in a predetermined order). The distress call sent from the ship should primarily reach the shore search and rescue organizations at sea located closest to the point where the distress occurred.

In the second chapter, agent technologies are analyzed and the possibility of applying available agent paradigms and appropriate technologies is considered, in order to appropriately select the agent technology that optimally corresponds to the research goal. Wooldridge's model of formal description of agent architecture is presented and special emphasis is placed on multi-agent systems in a dynamic environment. This chapter also discusses the method of substituting the human factor with agent technologies in a selected category of ship emergency situations; in detecting and extinguishing fires on board.

The third chapter defines the model of the ship's fire-fighting agent architecture. This model considers the ship as a set of interconnected rooms in which there are elements relevant for fire detection and extinguishing. These elements are managed by agents assigned to each of the five rooms. Within the model, the ship's fire-fighting environment is formally defined, as is the ship's fire-fighting agent architecture itself.

In chapter four, analysis is performed on eighty five simulation environments that were capable of hosting agent models. In this part of the research, the existing solutions that enable programming and simulation of agent, especially multi-agent systems, were

considered. Based on several criteria, Netlogo simulation environment was selected, within which the implementation of the defined model was performed.

The fifth chapter presents the implementation of the decision-making model in Netlogo. An application in the selected simulation environment is created and an example of a fire scenario is given.

The development of the implemented model within the selected programmable environment for the simulation of agent or multi-agent systems enabled the experimental evaluation of the defined model. The experiment simulated various combinations of fire situations within a selected class of incidents and analyzed the behavior of agents according to the developed model. The results of this experiment are presented in Chapter Six.

In the seventh chapter, the concluding considerations and synthesis of the findings obtained during the research are presented. Scientific contributions and applied application are given, as well as possible future research of this concept for application in the field of intelligent transport systems.

## Sadržaj

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 0.     | Uvod.....   | 1  |
| 0.1.   | Cilj i polazna hipoteza istraživanja.....   | 1  |
| 0.2.   | Pregled dosadašnjih istraživanja.....   | 2  |
| 0.3.   | Struktura disertacije.....  | 5  |
| 1.     | Brodске pogibeljne situacije.....   | 7  |
| 1.1.   | Sigurnost na moru.....  | 7  |
| 1.2.   | Sigurnost brodskih sustava.....   | 9  |
| 1.2.1. | Klasifikacijska društva.....  | 10 |
| 1.3.   | Svjetski pomorski sustav za pogibelj i sigurnost.....   | 12 |
| 2.     | Agentne tehnologije.....  | 18 |
| 2.1.   | Definicija i primjena agenata.....  | 18 |
| 2.2.   | Model agentnog djelovanja u okruženju.....  | 22 |
| 2.3.   | Višeagentni sustavi.....  | 26 |
| 2.4.   | Supstitucija ljudskog faktora agentnim tehnologijama pri detekciji i gašenju brodskih požara..... | 28 |
| 3.     | Model protupožarne agentne arhitekture broda.....   | 32 |
| 4.     | Analiza dostupnih agentnih simulacijskih okruženja.....   | 39 |
| 4.1.   | Uvodna razmatranja.....   | 39 |
| 4.2.   | Odabir prikladne agentne platforme.....   | 41 |
| 4.3.   | Sustav NetLogo.....   | 44 |
| 5.     | Implementacija modela odlučivanja u odabranom simulacijskom okruženju.....                        | 47 |
| 5.1.   | Prikaz odabranih elemenata broda Dvina Gulf.....  | 47 |
| 5.2.   | Interpretacija odabranog broda u modelu protupožarne agentne arhitekture broda.....               | 55 |
| 5.3.   | Implementacija modela u NetLogo simulacijskom okruženju.....                                      | 66 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 5.4.   | Pokretanje simulacije u NetLogo simulacijskom okruženju .....                       | 74  |
| 5.4.1. | Primjer simulacije .....  | 76  |
| 6.     | Eksperiment u implementiranom modelu odlučivanja.....                               | 82  |
| 6.1.   | Parametri eksperimenta .....  | 82  |
| 6.2.   | Rezultati eksperimenta .....  | 85  |
| 7.     | Zaključak .....   | 92  |
| 8.     | Literatura .....  | 95  |
| 9.     | Popis slika .....   | 100 |
| 10.    | Popis tablica .....   | 102 |
|        | Prilog 1. - Razvoj promjena stanja elemenata okruženja u primjeru požara.....       | 103 |
|        | Prilog 2. - Rezultati mjerenja vremena potrebnog za detekciju i gašenje požara..... | 107 |
| 11.    | Životopis.....  | 114 |

## 0. Uvod

### 0.1. Cilj i polazna hipoteza istraživanja

Upravljanje incidentnim situacijama u prometu je funkcionalno područje Inteligentnih transportnih sustava (engl. *Intelligent Transport Systems - ITS*) i usko je povezano s upravljanjem prometa. Upravljačke aktivnosti u pomorskom prometu također obuhvaćaju i aktivnosti upravljanja incidentnim situacijama kao i u bilo kojem drugom obliku transporta. Prema [1], detekcija incidenta i verifikacija prvi je korak u učinkovitom procesu menadžmenta incidenata i u tom procesu se javljaju problemi nadzora, algoritma i verifikacije. Upravljanje pogibelnim situacijama u pomorskom prometu, predstavlja potkategoriju ili klasu upravljanja incidentnim situacijama u kojima su neposredno ugroženi ljudski životi te kao takvo treba biti dio tehnologije i upravljačke strategije za povećanje sigurnosti pomorskog prometnog sustava.

U disertaciji se razmatra supstitucija ljudskog faktora u procesu odlučivanja pri pogibelnim brodskim situacijama upogonjavanjem agenata. Agenti su programski ili sklopovski objekti sposobni autonomno primiti informacije iz okoline, djelovati unutar svoje okoline i izvršavati skupove zadataka za koje su predviđeni. Cilj istraživanja je izrada modela višeagentnog sustava potpore odlučivanja pri odabranoj klasi pogibeljne situacije u pomorskom prometu. Razvijeni model će doprinijeti sigurnosti pomorskog prometa primjenom agentne tehnologije u procesu odlučivanja pri pogibelnim situacijama. Izravna posljedica ovako postavljenog cilja je smanjenje utjecaja ljudske pogreške pri odlučivanju u pogibelnim situacijama kako bi se zaštitila posada i putnici te smanjile materijalne štete.

Sukladno postavljenom cilju postavlja se hipoteza:

Višeagentni sustavi primjenjivi su pri odlučivanju u brodskim pogibelnim situacijama kao autonomni izvršni sustavi ili savjetodavni sustavi čijom se primjenom utječe na sigurnost pomorskog prometa.

U disertaciji će se ova hipoteza istražiti kroz razvoj i testiranje višeagentnog modela koji će djelovati u funkciji detekcije i gašenja požara na brodu. Istraživanje obavljeno kroz disertaciju dat će doprinos pri nastojanjima projektiranja sigurnih autonomnih brodova koji bi potpuno anulirali ljudski faktor kao rizik odlučivanja u incidentnim situacijama.

## 0.2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Međunarodna pomorska organizacija (engl. *International Maritime Organisation – IMO*) definirala je Pomorske komunikacije temeljnim dokumentom Zaštita ljudskih života na moru (engl. *Safety of Life at Sea - SOLAS*) u poglavlju IV. Radiokomunikacije te ustrojila kroz Svjetski pomorski sustav za pogibelj i sigurnost (engl. *Global Maritime Distress and Safety System – GMDSS*) [2]. Znanstvena istraživanja su usmjerena u nekoliko glavnih pravaca, od sustavskog pristupa za analizu rizika u pomorskim operacijama [3], do novih hibridnih pristupa za izračun vjerojatnosti ljudske pogreške (engl. *Human Error Probability - HEP*) [4].

Današnji brodovi i brodski sustavi tehnološki su napredni i visoko pouzdani. Pouzdanost brodskih sustava se povećava jer pomorska industrija gradi brodove koji imaju poboljšani trup, odvojene strojarnice te uvježbane i obrazovane posade, a sve kako bi se zaštitila posada i putnici te smanjile materijalne štete [5]. U cilju veće produktivnosti i efikasnosti, poboljšanja su stalan cilj u pomorskoj industriji i IMO. Stalno se unaprjeđuje trup broda, sustavi stabiliteta broda, brodski pogonski sustavi, navigacijska oprema i primjenjuju se visoki standardi kod izobrazbe pomoraca [6]. Gradnja broda i oprema broda kontinuirano se provjerava od samog početka gradnje do eksploatacije, a razvijeni su i standardi i klasifikacijska društva koja to osiguravaju u svrhu očuvanja života, imovine i okoliša [7]. Usprkos navedenom, stopa pomorskih incidenata je još uvijek značajna i unatoč dosad primijenjenoj tehnologiji u svim podsustavima broda, nije se značajno smanjio rizik od nesreća. Bitan razlog toj činjenici je što brod kao sustav uključuje ljude kao elemente sustava [8]. Ljudske pogreške značajno utječu na pomorske incidente, u 76% do 96% incidenata, barem djelomično, utječe neka vrsta ljudske pogreške [9]. Pomorski incidenti razvrstani po događajima iznose: 84-88% tankerski incidenti, 79% nasukanja, 89-96% sudari, 75% udari u nepomični objekt te 75% požari i eksplozije.

Istraživanja u području sigurnosti (engl. *Safety Science*) razvila su Sustav analize i klasifikacije ljudskog faktora (engl. *Human Factor Analysis and Classification System – HVACS*) kako bi se mogla odrediti uloga ljudskog faktora u pomorskim incidentima [10] te kako bi se spriječile materijalne štete i spasili ljudski životi [11]. Pogreške u kompleksnim sustavima koje su izazvane ljudskim faktorom mogu se definirati kategorijom ljudske pogreške [12]. Istraživanja su pokazala da su pomorski incidenti slučajni događaji s malom vjerojatnosti čiji se ishod može predvidjeti pomoću modela za predikciju [13], dok se vjerojatnost ljudske pogreške može predvidjeti analizom pomoću modificirane kognitivne metode (engl. *Cognitive*



*Reliability and Error Analysis Method – CREAM*) i mehanizma odlučivanja temeljenog na dokazima [14].

Pomorska industrija razvila je brojne mjere kako bi se podigla razina sigurnosti i smanjio utjecaj ljudskog faktora. Propisana je standardizirana izobrazba posade u cilju smanjenja utjecaja ljudskog faktora (engl. *Maritime Resource Management - MRM*), uvedena je primjena uputa i procedura za komunikaciju posade na brodovima (engl. *International Safety Management Code – ISM Code*) i razvijena je Međunarodna konvencije o standardima izobrazbe, izdavanju svjedodžbi i držanju straže pomoraca (engl. *International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers - STCW*) od strane IMO. Istraživanja su pokazala utjecaj ljudskog faktora u raznim pogibeljnim situacijama kao npr. sudaru [15], opasnosti od prevrtanja broda [16] ili požaru [17]. Metodologija hibridnog višekriterijskog pristupa odlučivanju može se koristiti za istraživanje pomorskih incidenata nastalih uslijed ljudskih pogrešaka [18].

Iz navedenih podataka o utjecaju ljudskog faktora u incidentnim situacijama vidljivo je da se bitan korak u smanjenju utjecaja ljudskog faktora može napraviti supstitucijom ljudskog faktora; prvo kao djelomična supstitucija ljudskog faktora i konačno do potpune supstitucije ljudskog faktora pouzdanijim rješenjima. Kao područje traženja ovakvog rješenja nameće se primjena informacijske i komunikacijske tehnologije ICT (engl. *Information and Communication Technology*). Tako se komunikacije pomorskih brodova i pomorska e-navigacija temelje na ICT potrebnom za integrirano funkcioniranje brodova (engl. *Integrated Operations of Ships*) uz istovremeno smanjenje broja posade [19]. Naziv integrirano funkcioniranje brodova odnosi se na integriranje ljudi, radnih procesa i tehnologije u cilju boljeg odlučivanja i izvršavanja [20] zasnovanog na učestalom pribavljanju stvarnovremenskih podataka i osiguranju učinkovitog zajedničkog djelovanja.

Manjak pozornosti brodske posade, krive pretpostavke, loše navike, manjak obuke i negativna osobnost uzrok je 93% brodskih incidenata [12]. U cilju smanjivanja broja incidenata uzrokovanih ljudskim faktorom, istraživači su koristili razne simulatore za dodatnu obuku časnika na brodu kako bi se smanjili rizici posade [21].

Programski agenti se danas često primjenjuju pri uporabi informacijske i komunikacijske tehnologije u onim slučajevima kada je potrebno zamijeniti ljudski rad koji je ili preskup, ili zamoran za čovjeka ili opasan za čovjeka. Primjena agenta isključuje ljudske

pogreške koje mogu nastati pri odlučivanju u stresnim situacijama, a pogibeljne situacije su upravo takve.

Agenti su sustavi koji imaju karakteristike *autonomnosti*, odnosno posjeduju sposobnost djelovanja bez direktnih intervencija korisnika ili neke komponente računalnog sustava te imaju nadzor nad svojim akcijama. Agenti posjeduju *sposobnost komunikacije* s drugim agentima ili s korisnikom te posjeduju svojstvo *reaktivnosti* gdje percipiraju svoju okolinu. U cilju izvršavanja svog zadatka agenti ne odgovaraju samo na promjene u okolini već su sposobni preuzeti inicijativu inicirajući promjene okoline, odnosno imaju svojstvo *proaktivnosti* [22].

Agent se može definirati kao objekt koji djeluje samostalno, a koji je sposoban oponašati socijalnu interakciju te može izvršavati zadaće na proaktivan ili reaktivan način. Iz takve definicije agenta proizlazi i agentno orijentirano modeliranje (engl. *Agent Oriented Modeling - AOM*) [23]. AOM je jedna od agentnih metodologija koje se koriste za razvoj agentnih sustava.

Znanje koje agent posjeduje dijeli se na socijalno znanje i na konceptijsko znanje [24]. Socijalno znanje agenta je njegovo znanje o načinima suradnje s okolinom. Ovdje se podrazumijeva suradnja sa svim elementima okoline pa tako i s drugim agentima koji se mogu nalaziti u okolini. Ovakvi sustavi gdje se u okolini nalazi više agenata koji zajednički rade na ostvarivanju zajedničkih ciljeva nazivaju se višeagentni sustavi (engl. *Multi Agent Systems - MAS*) [25]. Prometni i transportni sustavi sastoje se od velikog broja autonomnih i inteligentnih entiteta koji za cilj imaju obavljanje određenih transportnih zadaća. MAS omogućavaju simulacijsko modeliranje prometnih sustava budući da pružaju intuitivno okruženje za opisivanje svakog autonomnog entiteta na individualnoj razini. U takvom multiagentnom simulacijskom okruženju, svaki inteligentni prometni entitet može se modelirati kao agent sa svojim konceptijskim znanjima [26]. Takvo konceptijsko znanje sadrži ciljeve agenata, akcije koje agent može izvršiti te znanje o resursima okoline koji su agentu na raspolaganju [22].

Agentne tehnologije primjenjive su na područje tehnologije prometa i transporta i njihova svojstva autonomnosti, sposobnosti komunikacije i reaktivnosti mogu se koristiti za potrebe izrade transportnih sustava temeljenih na agentima [26]. Modeliranje temeljeno na agentima (engl. *Agent Based Modelling - ABM*) tijekom tehnološkog razvoja rezultiralo je različitim alatima primjenjivim u simulacijskom okruženju [27].

### 0.3. Struktura disertacije

U prvom poglavlju razmotreni su elementi sigurnosti na moru te je provedena analiza brodskih pogibeljnih situacija. U istom je poglavlju prikazano i kako su pomorske komunikacije ustrojene kroz GMDSS koji razlikuje prioritete komunikacija: pogibelj, hitnost, sigurnost i rutinske komunikacije. Ovaj obvezni komunikacijski sustav bazira se na međunarodno dogovorenim postupcima sigurnosti, vrstama komunikacijskih uređaja i protokola komunikacije koji se upotrebljavaju za lakše i brže spašavanje, a time se postiže povećanje sigurnosti pomorskog prometa. Pomorske komunikacije u pogibelji ustrojene su hijerarhijski prema IMO-SOLAS-GMDSS pravilima (brodska posada i zapovjednik imaju propisane uređaje i frekvencije te protokole koji su zadani unaprijed predviđenim redoslijedom). Poziv pogibelji upućen s broda prvenstveno treba doći do kopnenih organizacija za traganje i spašavanje na moru koje se nalaze najbliže točki na kojoj se dogodila pogibelj.

U drugom poglavlju analizirane su agentne tehnologije te je razmotrena mogućnost primjene raspoloživih agentnih paradigmi i odgovarajućih tehnologija kako bi se prikladno odabrala ona agentna tehnologija koja optimalno odgovara cilju istraživanja. Prikazan je Wooldridgeov model formalnog opisa agentne arhitekture te se poseban naglasak stavio na višeagentne sustave u dinamičnom okruženju. U ovom poglavlju je razmotren i način supstitucije ljudskog faktora agentnim tehnologijama u odabranoj kategoriji brodskih pogibeljnih situacija; u detekciji i gašenju požara na brodu.

U trećem poglavlju je definiran model protupožarne agentne arhitekture broda. Ovaj model razmatra brod kao skup međusobno povezanih prostorija u kojima se nalaze elementi relevantni za detekciju i gašenje požara. Svakoj prostoriji se dodjeljuje agent koji upravlja ovim elementima. Unutar modela je formalno definirano protupožarno okruženje broda kao i sama protupožarna agentna arhitektura broda.

U četvrtom je poglavlju provedena analiza dostupnih simulacijskih okruženja unutar kojih je moguće realizirati agentne modele. U ovom dijelu istraživanja razmotrila su se postojeća rješenja koja omogućavaju programiranje rada i simulaciju rada agentnih, a posebice višeagentnih sustava te se odabralo simulacijsko okruženje unutar kojeg se obavilo implementiranje definiranog modela.

U petom poglavlju prikazana je implementacija modela odlučivanja u odabranom simulacijskom okruženju. Ovdje je prikazana izrađena aplikacija u odabranom simulacijskom okruženju te primjer simulacije jednog požara u izrađenoj aplikaciji.

Izrada implementiranog modela unutar odabranog programabilnog okruženja za simulaciju agentnih, odnosno višeagentnih sustava omogućila je eksperimentalno vrednovanje definiranog modela. Eksperimentom su se simulirale razne kombinacije pogibeljnih situacija unutar odabrane klase pogibeljnih situacija te se analiziralo postupanje agenata prema razvijenom modelu. Rezultati ovog eksperimenta su prikazani u šestom poglavlju.

U sedmom poglavlju su iznesena zaključna razmatranja i sinteza spoznaja dobivenih tijekom provedenog istraživanja. Navedeni su znanstveni doprinosi i aplikativna primjena te su navedena moguća buduća istraživanja ovog koncepta za primjenu u području inteligentnih transportnih sustava.

# 1. Brodske pogibeljne situacije

U svjetskoj trgovini pomorski promet ima izuzetno važnu ulogu. Brod je prometni entitet kojim je najjeftinije transportirati velike količine tereta na globalnoj razini. Vodni transport materijalnih dobara bio je stoljećima glavni preduvjet trgovinske razmjene između udaljenih naroda i područja gdje je odigrao važnu ulogu u ekonomskom razvitku. Cijena pomorskog transporta je vrlo konkurentna, ako je usporedimo s cijenama kopnenog i zračnog transporta te je utjecaj cijene transporta u ukupnoj cijeni proizvoda izražen s nekoliko postotaka. Negativna strana obuhvaća dulje vrijeme transporta kao rezultat relativno male brzine kretanja brodova, zagušenje u lukama i relativno slaba integracija s drugim oblicima transporta i distribucije. Suvremeno brodarstvo povremeno trpi napade javnosti zbog neprihvatljivo visokog sigurnosnog rizika i negativnog utjecaja na okoliš. Može se zaključiti da unatoč relativno niskoj cijeni transporta, neka područja brodarstva imaju relativno niske standarde sigurnosti. Učinkovit transport morao bi obuhvatiti i moći financirati sigurnost kako bi se ona podigla na prihvatljivu razinu.

## 1.1. Sigurnost na moru

Brodsko putovanje i danas se službeno naziva plovidbeni pothvat (engl. *maritime venture*) i taj pojam obuhvaća putovanje broda od početka ukrcavanja do završetka iskrcavanja tereta svakoga pojedinog sudionika. Brod je izložen morskom okruženju koje je složeno samo po sebi. To okruženje ima često karakteristike neprijateljskog okruženja uzrokovanog prirodnim silama koje dolaze od vjetera, morskih struja, morskih mijena, leda, stanja mora (valova) i valova nastalih zbog zemljotresa (tsunamiji). Brodovi spadaju u najsloženije sociotehničke sustave koji osim golog trupa sadržavaju složenu opremu raznih podsustava poriva, navigacije, komunikacije, palubne opreme te ljudi raznih zaduženja koji imaju različiti stupanj izobrazbe i naobrazbe.

Pomorski brodovi mogu se podijeliti u:

1. transportne brodove, koji uključuju teretne, opskrbne, kontejnerske i putničke brodove i
2. ne-transportne, koji uključuju ribarske brodove, tegljače te ratne brodove.

Za pomorsku sigurnost u pomorskoj industriji bitne su sigurnosne procedure. Međunarodna pravila koja uključuju konvencije i rezolucije donosi IMO koja je organizacija Ujedinjenih naroda. Brod je podložan zakonima zemlje čiju zastavu vije. Država zastave može, pored minimalnih standarda koje propisuje IMO, zahtijevati dodatne standarde u cilju podizanja sigurnosti. Sam pojam sigurnosti uključuje:

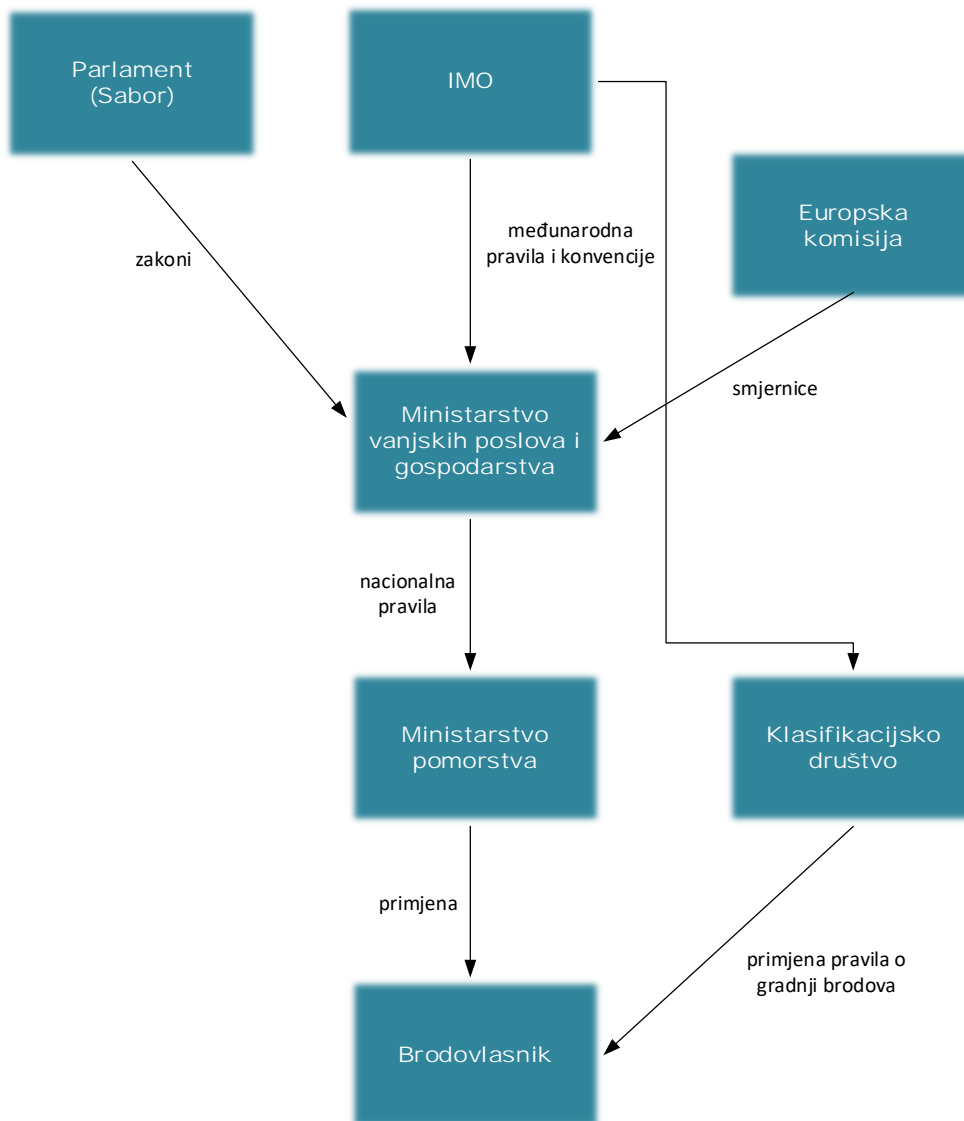
- sigurnost i zdravlje ljudi,
- sigurnost broda ili plovila i
- zaštitu okoliša.

Međunarodna pomorska sigurnost prema Mollandu definirana je na temelju različitih pravnih vrela od kojih ključne prikazuje Slika 1.1. i obuhvaća:

- Međunarodne zakone i pravilnike,
  - Konvencija Ujedinjenih naroda o pravu mora (engl. *The United Nations Convention on Law of the Sea* - UNCLOS) i
  - smjernice Europske unije (EU),
- nacionalne zakone i pravilnike,
- sudsku praksu (presude),
- nacionalna teritorijalna područja,
- IMO konvencije i rezolucije,
- pravila za gradnju klasifikacijskih društava i
- smjernice za inspekcijski nadzor brodova.

Na sigurnost utječu brojni dionici, u prvom redu:

- Zastava pripadnosti određenoj državi,
- IMO, klasifikacijska društva,
- osiguravateljska društva,
- unajmitelj broda ili vlasnik tereta.



Slika 1.1. Propisivanje pomorske sigurnosti [5]

## 1.2. Sigurnost brodskih sustava

Razvitak industrijske revolucije tijekom 19. stoljeća u kojem su se događali veliki materijalni i ljudski gubici u tvorničkim nesrećama, natjerao je ljude da promišljaju mjere za prevenciju šteta i gubitaka. Povećani transport ljudi i industrijskih dobara rezultirao je promišljanjima o pomorskoj sigurnosti.

U današnje vrijeme, podizanje razine sigurnosti postalo je globalni standard za očuvanje ljudi, dobara i zaštite okoliša u koju su uključene vladine i nevladine organizacije na lokalnim, nacionalnim i međunarodnim razinama. Stopa učestalosti i težine nesreća promjenjiva je u ovisnosti o pojedinoj zemlji i vrsti industrije. Brojne nesreće u kemijskoj, naftnoj i plinskoj, pomorskoj i nuklearnoj industriji tijekom godina povećale su javni i politički pritisak za

poboljšanje sigurnosti koja štiti ljude i okoliš. Kako je evoluirao pristup sigurnosti, došlo je do povećanja kretanja prema upravljanju rizicima u svezi s tehničkim rješenjima.

Opasne industrije razvile su standarde sigurnosti radi sprječavanja gubitaka, koristeći poboljšane standarde za izgradnju, inspekciju i tehničku sigurnost opreme kao i utjecaj ljudskog faktora na sigurnost [28].

#### 1.2.1. Klasifikacijska društva

Način gradnje broda treba zadovoljiti pravila klasifikacijskih društava. Klasifikacijsko društvo odabire se tijekom ugovaranja broda u brodogradilištu, a brod se gradi u skladu s pravilima društva. Od 2017. godine Međunarodno udruženje klasifikacijskih društava (engl. *International Association of Classification Societies - IACS*) sastoji se od 12 članica:

1. Američko klasifikacijsko društvo (engl. *American Bureau of Shipping - ABS*), Houston, Sjedinjene Američke Države
2. Francusko klasifikacijsko društvo (engl. *Bureau Veritas - BV*), Pariz, Republika Francuska
3. Kinesko klasifikacijsko društvo (engl. *China Classification Society - CCS*), Peking, Narodna Republika Kina
4. Hrvatski registar brodova (engl. *Croatian Register of Shipping - CRS*), Split, Republika Hrvatska
5. Norveško - njemačko klasifikacijsko društvo DNV GL (engl. *Det Norske Veritas Germanischer Lloyd - DNV GL*), Høvik, Kraljevina Norveška
6. Indijski registar brodova (engl. *Indian Register of Shipping - IRS*), Mumbai, Republika Indija
7. Korejski registar brodova (engl. *Korean register - KR*), Busan, Republika Koreja
8. Britanski registar brodova (engl. *Lloyd's register - LR*), London, Ujedinjeno Kraljevstvo
9. Japansko klasifikacijsko društvo (engl. *Nippon Kaiji Kyokai - NK*), Japan
10. Poljski registar brodova (polj. *Polski Rejestr Statków - PRS*), Gdanjsk, Poljska
11. Talijanski registar brodova (tal. *Registro Italiano Navale - RINA*), Republika Italija



## 12. Ruski pomorski registar brodova (engl. *Russian Maritime Register of Shipping RS*), Rusija

Predsjedanje IACS-a je rotacijsko, gdje svaka članica dolazi na svoj red [29]. Nastanak klasifikacijskog društva DNV-GL veže se uz 1864. godinu i utemeljenje Det Norske Veritas (DNV) koje nastaje kao rezultat dogovora norveških osiguranja koja su krenula u uspostavu jedinstvenih pravila i procedura za korištenje u procjeni rizika vezanih uz osobna plovila. Grupa je težila tome da se obavlja pouzdana i jednoznačna klasifikacija i oporezivanje norveških plovila. Bilo je potrebno stvoriti nacionalno tržište za osiguranje u pomorstvu za rastuću norvešku brodogradnju u to vrijeme koja je prelazila tradicionalno uobičajene granice. Tri godine kasnije, u Njemačkoj se sastala grupa od 600 brodovlasnika, brodograditelja i osiguravatelja na lokaciji hamburške burze. Tada je utemeljen Germanischer Lloyd (GL), novo neprofitno udruženje sa sjedištem u Hamburgu. Klasifikacijska društva obuhvaćaju 79690 klasificiranih brodova u svojoj bazi na dan 17. travnja 2020. [30]. Kategorije incidenata prema Bazi podataka Lloydova pomorskog informacijskog servisa o nezgodama (engl. *Lloyds Maritime Information Services casualty database - LMIS*) razvrstavaju se u slijedeće kategorije:

1. Potonuća – uključivo brodova koji su potonuli uslijed nevremena, propuštanja, polovljenja na dva, itd., ali ne i onih koji su izravna posljedica drugih događaja kao npr. sudara, itd.
2. Nestali brodovi – uključivo brodova koji su nestali bez traga ili svjedoka koji točno znaju što se zbilo u nesreći.
3. Požari/eksplozije – uključivo brodova kod kojih je vatra ili eksplozija nastala kao prvi događaj, ili gdje je vatra ili eksplozija nastala kao posljedica oštećenja trupa ili strojarnice, npr. ova kategorija uključuje požare nastale u strojarnici, ali ne uključuje požare koji nastanu uslijed sudara.
4. Sudar – uključivo brodove koji su udareni ili ih je pogodio drugi brod, nevezano je li brod bio u plovidbi, usidren ili privezan. Ova kategorija ne uključuje brodove koji udare u podvodne olupine drugog broda.
5. Kontakt – uključivo brodove koji su udareni ili ih je pogodio drugi objekt, ali ne drugi brod ili morsko dno. Ova kategorija uključuje platforme za vađenje nafte ili plina iz mora bez obzira jesu li na fiksnoj poziciji ili su u teglju.
6. Olupina broda/nasukani brod – uključuje brodove koji imaju dodir s morskim dnom, obalne ili ronilačke olupine.

7. Gubitak zbog rata ili sukoba – uključuje brodove koji su oštećeni u bilo kakvim neprijateljskim djelovanjima
8. Oštećenja trupa/strojeva – uključuje brodove gdje su trup/strojevi nisu oštećeni uslijed drugih kategorija kao što je sudar, itd.
9. Razno – uključuje izgubljene ili oštećene brodove koji se ne daju razvrstati u nijednu nabrojenu kategoriju od 1. do 8. ili zbog nedostatka informacija (npr. nesreća koja je počela s pomicanjem tereta bi bila tipična za kategoriju razno)

### **1.3. Svjetski pomorski sustav za pogibelj i sigurnost**

Početak suvremenih pomorskih komunikacija na trgovačkim brodovima vezan je uz Svjetski pomorski sustav za pogibelj i sigurnost GMDSS koji je usvojen 1988. godine te se počeo parcijalno primjenjivati od veljače 1992. godine u prijelaznom razdoblju do veljače 1999. godine kada je GMDSS postao potpuno funkcionalan [31].

Uvođenjem GMDSS kao obveze napravljen je radikalan zaokret u na polju pomorskih komunikacija koji nije zabilježen od tragedije RMS Titanic u 1912. godini. Taj nesretni događaj naknadno je analiziran mnogo puta. Značajne kritike bile su na operaciju spašavanja koja je bila još i vrlo učinkovita slijedeći smjernice koje su tada bile na snazi. Tragedija je potaknula proces promjena koje se događaju i danas.

Pomorske sigurnosne procedure recenziraju se na redovitim sastancima Konvencije za zaštitu ljudskih života na moru SOLAS pod patronatom Međunarodne pomorske organizacije koja je utemeljena aktom organizacije Ujedinjenih naroda 1948. godine; prvo pod nazivom *engl. Inter - Governmental Maritime Consultative Organization – IMCO*; današnji naziv je promijenjen 1982. u *engl. International Maritime Organization – IMO*. Prva verzija SOLAS konvencije usvojena je 1914. godine kao odgovor pomorskih država na tragediju RMS Titanic. Konvencija je propisivala broj spasilačkih brodica te druge sigurnosne opreme i sigurnosnih procedura uključujući kontinuiranu obvezu slušanja kanala za pogibelj na radio opremi. Ta prva verzija sporazuma nikada nije stupila na snagu jer je 1914. započeo Prvi svjetski rat. Druga verzija konvencije bila je 1929., treća 1948., četvrta 1960. Važeća SOLAS verzija iz 1974. uključuje pravni instrument prešutnog prihvaćanja – koji predviđa da izmjena i dopuna stupa na snagu na određeni datum, osim ako do tog datuma dovoljan broj zemalja članica istakne prigovor. Konvencija SOLAS 1974. s dopunama usvojena je 1. studenog 1974., a stupila je na

snagu 25. svibnja 1980. te je na snazi i danas. Četvrto poglavlje SOLAS konvencije naziva se Radiokomunikacije (*engl. SOLAS Chapter IV, Radiocommunications*).

Propisano je od strane IMO da putnički brodovi (ako prevoze više od 12 putnika na međunarodnom putovanju) i svi teretni brodovi veće zapremine od 300 bruto registarskih tona – BRT na međunarodnim putovanjima moraju imati odgovarajuću opremu prema morskom području plovidbe i to su tzv. SOLAS brodovi. Ostali brodovi i plovila moraju udovoljavati samo propisima zemlje u kojoj je brod upisan ili propisima „zastave koju brod vije“ te se nazivaju non-SOLAS brodovi. Propisi u Poglavlju IV. SOLAS konvencije obuhvaćaju obveze zemalja ugovornica SOLAS konvencije za uspostavu obalnih radijskih postaja i njihovog opremanja kao i status opreme na brodovima [32].

Pomorske komunikacije temeljni su dio sigurnosne politike koja štiti pomorce u plovidbi na oceanima svijeta i u pravilu se obavljaju radio valovima. Uporabom radio valova moguće je upozoravanje brodova i obalnih, za to ovlaštenih, struktura na nadolazeće katastrofe [33]. Radio valovi imaju različitu propagaciju kroz prostor koje je posljedica domet pa se za najmanje domete u pomorstvu koriste (*engl. Very High Frequency – VHF*) valovi koji se gibaju pravocrtno i imaju domet optičke vidljivosti koja iznosi do 30-tak nautičkih milja (*engl. Nautical Mile – NM*). Limiti ovakvog komuniciranja ograničeni su na vidljivi horizont zbog zakrivljenosti Zemlje ali su vrlo pouzdane i rade u svim vremenskim i klimatskim uvjetima. Radio valovi su elektromagnetski valovi koji se na nekim frekvencijama ogibaju i reflektiraju od ionosfere vraćajući se na Zemlju i u određenim uvjetima mogu prevaliti i tisuće NM što može biti dovoljno za komuniciranje na preookeanskim putovanjima s obalom. Iako je domet ovih tzv. prostornih valova (*engl. Sky-wave*) dovoljan da s preookeanske rute brod može komunicirati s obalnim postajama, pouzdanost komuniciranja ovim valovima nije dovoljna jer propagacija ovisi o raznim faktorima: dobu dana, radnoj frekvenciji, zemljopisnoj širini, temperaturi, vlažnosti jer je postojanost ionosfere vrlo promjenjiva. Da bi pouzdanost komuniciranja na ovim velikim udaljenostima bila postojana lansirani su sateliti kao temeljni dio suvremene pomorske satelitske mreže za komuniciranje. Dva načina komuniciranja zemaljskim (terestričkim) i satelitskim sustavima su i danas u komplementarnoj primjeni jer sustavi ne mogu jedan drugoga zamijeniti nego se nadopunjuju za provođenje pomorskih komunikacija na brodomskom putovanju.

Koncept GMDSS mora zadovoljiti devet specifičnih zadataka prikazanih Slikom 1.1. koje mogu svi brodovi sa svojim postajama obaviti, bez obzira u kojoj su zoni plovidbe.

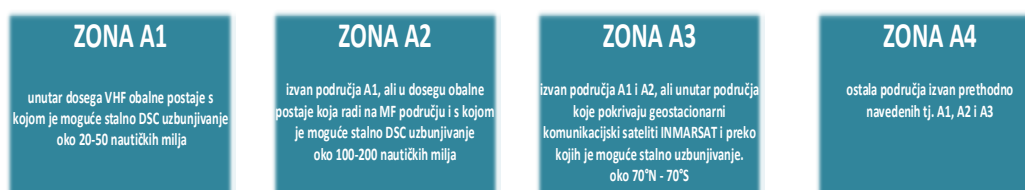
Najvažniji zadatak koji brodska posada treba obaviti preko brodske radio postaje vezan je uz emitiranje za uzbunjivanje u pogibelji u smjerovima brod - kopno i brod – brod, kao i primanje znaka uzbune u smjeru kopno - brod kako je prikazano Slikom 1.1.

U ovisnosti o udaljenosti broda i obale, zbog različite propagacije radio valova u terestričkom sustavu za uzbunjivanje i komunikaciju koriste se pored spomenutih VHF valova, još i valovi srednjih frekvencija (engl. *Medium Frequency – MF*) ili visoke frekvencije (engl. *High Frequency – HF*) frekvencije u različitim zonama plovidbe iza vidljivog horizonta. Komplementarno se koristite i satelitski uređaji.



Slika 1.2. Specifični zadaci GMDSS

Cjelokupno područje plovidbe podijeljeno je u zone engl. *Area* kako je prikazano na Slici 1.3.



Slika 1.3. Morska područja GMDSS

Sustav je hijerarhijski strukturiran pri čemu postoje različiti prioriteti kod pozivanja. Prioriteti su uvedeni kako ne bi zbog zagušenja komunikacijskog kanala došlo do čekanja važnih poruka ili poziva u odnosu na neke poruke koje imaju niži prioritet sa stajališta pomorske sigurnosti.

Primjer za zagušenje u telekomunikacijskom prometu je proslava dočeka Nove godine; zbog mnogobrojnih poziva kojim se neke upućuju čestitke može doći do zagušenja telekomunikacijskog kanala i nemogućnosti ostvarivanja prioritarnog poziva prema službi 112.

Pomorske komunikacije razvrstavaju se prema prioritetima u GMDSS na pogibelj, hitnosti, sigurnost i rutinske komunikacije. Ovaj profesionalno građen sustav primarno namijenjen uzbunjivanju u pogibelji, što znači da je viši prioritet poruke ili poziva ima prednost nad pozivima ili porukama nižih prioriteta.

Poruke pogibelji upućuju se preko brodskog terestričkog uređaja za digitalno pozivanje (engl. *Digital Selective Call – DSC*) kako bi se mogle primiti na okolnim brodovima ili obalnim postajama. U porukama pogibelji sadržana je formalna poruka o kojoj se vrsti pogibelji radi. Vrsta pogibelji može biti prema preporuci Rec. ITU-R M.493-11 Međunarodne telekomunikacijske unije (engl. *International Telecommunication Union – ITU*) [34]:

- požar ili eksplozija; poplava; sudar; nasukanje; naginjanje, opasnost od prevrtanja; potonuće; nesposoban za plovidbu i nošen (strujanjem ili vjetrom); neimenovana pogibelj; napuštanje broda; pirati/oružana pljačka; čovjek u moru; emisija radio-plutače za nuždu.

Sustav uzbunjivanja unutar GMDSS određuje način postupanja u kojem čovjek šalje signal pogibelji preko satelitske ili zemaljske radio opreme do obalnih ovlaštenih službi. Iako su za to osposobljeni svi časnici koji drže stražu na navigacijskom mostu, takvi pozivi se šalju isključivo uz izričito odobrenje zapovjednika broda. Razlog za slanje ovakve poruke je nemogućnost zapovjednika da on i njegova posada sami djeluju u odlučivanju i poduzimaju djelotvorne korake za završetak pogibelji. Na ovaj način se prenosi odgovornost sa zapovjednika broda. Ovakav razvitak događaja nužno proizvodi i dodatne troškove koji se mogu namiriti iz nagrade za spašavanje.

Znanstveni pristup analizi rizika opisan je u [35], a rizici se sustavno analiziraju u istraživanju ugljikovodika u podmorju kroz odobalnu industriju (engl. *Off shore*) ili kroz sustavni pristup analizi pomorskih operacija [3].

Stresna uloga ljudskog faktora prilikom lučkih operacija odnosi se na pitanje fizičkog i mentalnog opterećenja ključnog osoblja broda, primjerice prvog časnika. Organizacijske promjene potrebne za razvitak vještina kako bi se odabrao pravi odgovor u slučajevima

pogibelji kao što su nasukanje, požar ili sudar stvaraju pogreške ljudskog faktora. Postojeće preporuke za prevenciju stresa kod ljudi uključuju propisane vježbe u slučaju pogibelji na brodu i aktivnosti posade za smanjenje onečišćenja. Tehnika procjene i smanjenja ljudskih grešaka (engl. *Human Error Assessment and Reduction Technique – HEART*) primjenjuje se u mnogim industrijama za određivanje vjerojatnosti ljudske pogreške (engl. *Human Error Probability – HEP*). Kod izvođenja radova redovitih i izvanrednih održavanja brodskih sustava, očekuje se ljudska pogreška koja povećava rizik od pomorskih nesreća. Hibridnim HEART pristupom rizik se može preciznije utvrditi, ali ne i značajno umanjiti [36]. Brodovi koji imaju implementirano dinamičko pozicioniranje (engl. *Dynamic Positioning – DP*), koje je suštinski gledano računalno upravljani sustav za automatsko održavanje položaja i zakreta plovila koristeći vlastite propelere i potisnike, pri promjeni režima rada i prelaska s automatiziranog pozicioniranja na manualni način upravljanja izaziva veći utjecaj ljudske pogreške na koju se ipak može utjecati sprovođenjem dodatnih mjera i postupaka [37]. Sve ove mjere i postupci pridonose smanjenju, ali ne i izbjegavanju ljudskih pogrešaka. Integrirani sustavi za analizu i podršku odlučivanju mogu dovesti da se utjecaj ljudske pogreške smanji kod izlivanja ulja kao što je opisano u [38] sprovodeći kvalitativne i kvantitativne analizu uz pomoć neizravne logike. Neke su studije u pomorstvu sprovedene kako bi se ocijenio ljudski faktor kroz utjecaj samoevaluacije posade za predviđanje budućih nesreća [39]. Dodatna istraživanja se provode u [40] gdje je predstavljena metoda zasnovana na numeričkom modelu koja može identificirati i rangirati najznačajnije ljudske čimbenike koji najviše doprinose pomorskim nesrećama. Rezultati se mogu koristiti za predviđanje pomorskih nesreća kao doprinos za poboljšanje sigurnosti na moru.

Supstitucija ljudskog faktora u procesu odlučivanja pri pogibelnim brodskim situacijama nameće se kao logično rješenje za povećanje pomorske sigurnosti i smanjenje broja incidenata uzrokovanih ljudskim faktorom.

Međunarodna pomorska organizacija i pomorska industrija uvodi tehnologiju Pomorskih autonomnih površinskih brodova (engl. *Maritime Autonomous Surface Ships – MASS*) koja će smanjivati broj posade u četiri faze gdje se u završnoj fazi nalazi potpuno automatizirani brod na kojem nema posade i koji je u stanju samostalno donositi odluke i samostalno djelovati [41].

Povećanje pomorske sigurnosti u slučaju poplave ili požara na brodu moglo bi se ostvariti i primjenom dodatka konvenciji SOLAS za putničke brodove Siguran povratak broda

u luku (engl. *Safe Return to Port – SRtP*) [42] uvažavajući preporuke za gradnju svih SOLAS brodova. SRtP propisuje smjernice za gradnju brodova kako bi se putnici mogli sigurno zbrinuti na brodu u slučaju pogibelji i kako bi brodovi mogli doploviti u sigurnu luku pod vlastitim pogonom nakon požara ili poplave, ako se ne prijede „prag nesreće“ (engl. *Casualty threshold*) definiran u ovim novim propisima.

Za potrebe ove disertacije bilo je potrebno odabrati jednu kategoriju brodskih incidentnih situacija kako bi se na njoj moglo razmotriti primjena agenata. Odabrana je klasa brodskih požara zbog kompleksnosti njihovog nastanka, detekcije i gašenja. Štete od požara mogu biti na samom brodu, teretu i brodskoj posadi u vidu ozljeda ili imati fatalni ishod.

Prema LMIS kategorizaciji od devet pogibelnih situacija na brodu na trećem mjestu nalazi se požarna pogibelj. Uvođenjem MASS tehnologije na brodove postupno se smanjuje broj posade do njezinog potpunog ukidanja. Uz smanjenu posadu teško je popuniti protupožarne timove za borbu protiv požara pa je ovo samo po sebi tehnološki izazov za supstituciju ljudi tehnološkim rješenjima.

Požari na brodovima kompleksan su problem koji započinju od različitih uzroka i različite prirode njihovog nastanka. Bujanje požara može započeti od tinjajuće vatre pa sve do eksplozije kao načina nastanka požara. Na ishod požara, uz same uvjete požara, bitnu ulogu imaju tehnologija za detekciju požara, uloga ljudi u ispravnoj detekciji i odlučivanju te konačno tehnologija za gašenje požara.

Prema LMIS požar je klasa pogibeljne situacije na brodu koja uvijek traži stvarnovremensko djelovanje ljudi bez obzira na razmjere požara i udaljenost od obale. Posada broda provodi sigurnosne protokole za detekciju i gašenje požara. Kada sama posada ne može obaviti proceduru gašenja i vraćanja brodskih sustava u stanje nakon kojega je moguća daljnja plovidba, bitno je da članovi posade, uz dozvolu i znanje zapovjednika, znaju pravilno odabrati GMDSS komunikacijsku opremu s obzirom na udaljenost broda od obalnih radijskih postaja kako bi se dobila tuđa pomoć.

Nakon što se u sljedećem poglavlju razmotre agentne tehnologije, treće poglavlje donosi analizu primjene agentnih tehnologija u detekciji i gašenju brodskih požara.

## 2. Agentne tehnologije

### 2.1. Definicija i primjena agenata

Korištenje agenata jedan je od trendova današnje informacijsko komunikacijske tehnologije. Razlog ovome je razvoj umjetne inteligencije koja omogućava autonomno odlučivanje programskim ili sklopovskim objektima koji se nadalje mogu razmatrati kroz razvijene agentne teorije. Razina inteligencije kod agenata varira tako da se u primjeni nalaze i reaktivni agenti koji isključivo reagiraju na događaje za koje su unaprijed programirani, do agenata koji mogu učiti i prilagođavati se novim okruženjima te zahvaljujući umjetnim neuronskim mrežama rezonirati slično ljudskom razmišljanju. Uz pojam agenta se često dodaje pridjev *intelligentan* iako razne definicije agenata ne zahtijevaju posjedovanje određene razine inteligencije koja bi bila nužna da bismo neki entitet smjeli nazvati agentom. U ovakve definicije zasigurno spada i dosta široka definicija *M. Wooldridgea* gdje on agentom naziva svaki računalni sustav koji je smješten u okruženje i koji u tom okruženju može samostalno djelovati kako bi ostvario zadane ciljeve [43]. Intuitivno se pri spomenu agenta podrazumijeva entitet koji samostalno djeluje u nekom okruženju, prilagođava se okruženju u kojem djeluje, ima sposobnosti percipiranja stanja u kojoj se njegovo okruženje nalazi, djelovanjem mijenja stanja okruženja i ima sposobnost učenja.

Ulaganje u istraživanje agenata je opravdano jer smo svjedoci automatizacije mnogih procedura uslijed brzog rasta dostupnih podataka, raspodijeljenosti kako podataka tako i mjesta obrade ovih podataka te povećanja broja usluga koje informacijski sustavi pružaju korisnicima. Upotrebom agenata kod informacijskih sustava izbjegava se ulazak korisnika u stanje informacijskog preopterećenja gdje korisnikova produktivnost pada zbog količine primljene informacije. Produktivnost opada jer korisnik treba više vremena da obradi primljenu informaciju od samog vremena potrebnog za obavljanje onih zadataka unutar kojih mu je trebala ta tražena informacija. Uporabom agenata izbjegavamo ulazak korisnika u ovo stanje angažiranjem agenta u obavljanju dijela radnji koje bi inače trebao odraditi sam korisnik [44].

Agenti se nadalje koriste i kod onih aktivnosti gdje je potrebna brzina reakcije, a isto tako i u kriznim situacijama gdje ljudi zbog raznih razloga prestanu djelovati onako kako su obučavani za djelovanje. Primjer za ovakvu primjenu agenata je trgovina vrijednosnicama



(obveznice ili dionice) na uređenim tržištima vrijednosnica [45]. Kod trgovine vrijednosnicama je često potrebno reagirati unutar vrlo kratkog vremena, bilo kao rezultat pojave nove informacije vezane za objekt kupoprodaje, bilo kao rezultat zadovoljavanja uvjeta koje je korisnik (kupac ili prodavatelj) definirao kao uvjete za početak akcija. Agenti mogu cijelo vrijeme pratiti situaciju i pravodobno djelovati prema nalogima korisnika. No zbog teme ovog rada mnogo su zanimljivije krizne situacije koje mogu nastupiti na tržištima vrijednosnica. Primjer ovakve krizne situacije je ona situacija kada cijena vrijednosnica pada velikom brzinom povlačeći za sobom eventualno i druge vezane vrijednosnice. Jednako tako za primjenu agenata na tržištima vrijednosnica je zanimljiv i slučaj kada vrijednosnice rastu velikom brzinom. Kod ovakvih situacija čovjek često reagira vođen emocijama, u ovim slučajevima emocijama straha i pohlepe. Straha od velikog gubitka ili s druge strane pohlepe za postizanjem još većeg dobitka. U trenutcima kada je kupac ili prodavatelj vođen ovim emocijama bitno je povećana mogućnost pogreške u odluci. Stoga se nameće uporaba agenata koji su lišeni emocija i koji će obaviti akcije prema ranije definiranim procedurama. Također će ovi agenti zasigurno obaviti potrebne operacije brže nego što bi to učinio čovjek.

Kao što je vidljivo agentima je moguće pristupiti unutar mnogih područja. Stoga je i razumljivo da postoje i mnoge definicije agenata počevši od strogo formalnih do deskriptivnih definicija. Ovdje će se navesti dvije definicije koje se najčešće koriste. To su definicije agenata autora *J. Ferbera* i *M. Wooldridgea*. Prema Ferberovoj ovoj definiciji je agent entitet koji ima sljedeća svojstva [46]:

- sposoban je djelovati unutar okruženja,
- sposoban je izravno komunicirati s drugim agentima unutar okruženja,
- posjeduje skup ciljeva koji ga vode u djelovanju,
- posjeduje vlastite resurse,
- sposoban je percipirati stanja okruženja,
- sposoban je nuditi usluge koje je u stanju izvršiti,
- posjeduje mogućnost reproduciranja.

Wooldrige nešto drugačije definira agente. Prema njemu agenti su sustavi koji imaju sljedeće karakteristike [43]:

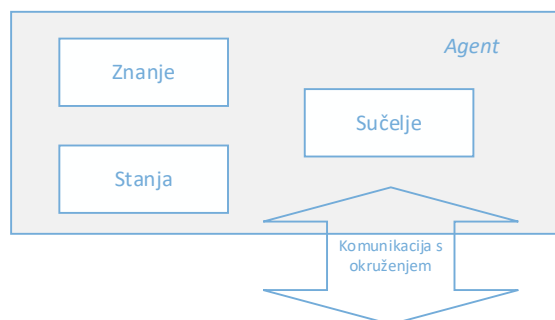
- autonomnost: agenti djeluju bez direktnih intervencija korisnika ili neke komponente računalnog sustava i imaju nadzor nad svojim akcijama i unutarnjem stanju,
- sposobnost komunikacije s drugim agentima ili s korisnikom,

- reaktivnost: agenti percipiraju svoje okruženje (koja može biti realni svijet, korisničko sučelje, kolekcija drugih agenata, internet ili neka druga okolina) i reagiraju na promjene,
- proaktivnost: agenti ne odgovaraju samo na promjene u okruženju već su sposobni u cilju izvršavanja svog zadatka preuzeti inicijativu inicirajući promjene okruženja.

Ovakve definicije agenta dopuštaju da agent bude kako programski tako i fizički entitet. Definicije su dovoljno široke (posebno Wooldridgeova) te se u njih uklapaju i najjednostavniji i najsloženiji oblici agenata. Tako agent može biti neki sklop koji posjeduje senzor i dojavljuje promjene stanja okruženja, ali isto se tako i autonomno vozilo može smatrati agentom. Bez obzira na složenost agenata ono što im je zajedničko je djelovanje u nekom okruženju kojeg imaju mogućnost percipirati, ali isto tako i djelovati na isto okruženje. Okruženje je prezentirano njegovim stanjima. Agent dakle na ulazu ima određeno stanje okruženja, a kroz izlazne funkcije djeluje na isto okruženje mijenjajući njegova stanja prema onom stanju u koje agent želi dovesti okruženje.

Slika 2.1. na najvišoj razini prikazuje strukturu agenta. Sa slike je vidljivo da na najvišoj razini agente možemo razmatrati kao strukture koje čine sljedeća tri elementa:

- sučelje agenta – preko sučelja agent prima informacije o stanju okruženje i djeluje na promjene stanja okruženja,
- interna stanja agenta – svojevrsna memorija agenta gdje je pohranjena agentova slika stanja okoline kao i stanja internih agentovih procesa,
- znanja agenta – agentovo znanje o pravilima okoline, načinima postupanja, akcijama koje agent može izvršiti, strategije rješavanja zadataka i slična znanja.



Slika 2.1. Najviša razina strukture agenta

Kao primjer ovakve konceptualizacije agentnog sustava možemo uzeti sustav grijanja prostorije koji sadrži termostat. Termostat je uređaj za održavanje i reguliranje stalne temperature (u ovom slučaju zraka) u zatvorenom prostoru. Termostat možemo

konceptualizirati kao agenta. Okruženje u kojem djeluje je prostorija koja se zagrijava. Njegovo sučelje čine toplinski senzor, jednostavna tipkovnica kojom korisnik definira željenu temperaturu prostorije te izlaz prema grijaćem tijelu koji prenosi naredbe uključivanja odnosno isključivanja grijaćeg tijela. Stanja koja termostat (agent) posjeduje su trenutna temperatura prostorije te željena temperatura prostorije. U znanje termostata spadaju produkcijska pravila koja mu određuju na koji način će izvršiti zadatak odnosno dovesti (uz pomoć grijaćeg tijela) prostoriju do željene temperature, odnosno pravila kada će uključivati odnosno isključivati grijaće tijelo. Ovaj će se primjer koristiti i kod razmatranja modela agentnog djelovanja u okruženju.

Na najvišoj razini metode kojima agenti odlučuju o svome djelovanju mogu se podijeliti u sljedeće četiri skupine [47]:

- Refleksna odlučivanja zasnovana na produkcijskim pravilima.
- Refleksna odlučivanja zasnovana na praćenju promjena stanja okruženja i produkcijskim pravilima.
- Odlučivanja zasnovana na jednostavnom zaključivanju.
- Odlučivanja zasnovana na funkciji korisnosti.

Agente čiji je proces odlučivanja zasnovan na produkcijskim pravilima razmatramo na jednak način kao sustave s pravilima produkcije. Ovakvi sustavi reprezentirani su uređenim trojkama (D, P, I) gdje je D skup podataka o stanju okruženja, P je skup produkcijskih pravila (dakle pravila tipa "Ako je stanje okruženja = S tada izvedi akciju A"), dok je I interpretator pravila koji određuje redoslijed izvođenja navedenih pravila za koje se utvrdilo da su ispunjeni uvjeti izvođenja.

Kod donošenja refleksnih odluka zasnovanih na praćenju promjena stanja okruženja i produkcijskim pravilima agent mora unutar svoga internog stanja pratiti promjene okruženja kao i pohranjivati svoje prethodne akcije. Ovo su ulazni parametri za produkcijska pravila kojima se zatim odlučuje o akcijama koje će se poduzeti.

Kod jednostavnog zaključivanja, skup mogućih akcija dijeli se na skupove akcija koje će agentovo okruženje dovesti u stanje koje agent smatra zadovoljavajućim, te onih akcija koje će stanje okruženja dovesti do stanja kojeg agent smatra nezadovoljavajućim. Nakon utvrđivanja stanja okruženja agent obavlja neku akciju iz prve skupine akcija.

Kod uvođenja funkcije korisnosti u agentov proces odlučivanja potrebno je uvesti metriku na skup stanja okruženja. Ovom metrikom se mjeri "udaljenost" dva stanja okruženja te se funkcija korisnosti neke akcije definira kao udaljenost stanja u kojeg okruženje dovodi izvođenje te akcije od onog stanja okruženja koje predstavlja cilj agentovog djelovanja. Korištenjem funkcije korisnosti pri odlučivanju agent ima mogućnost rangiranja korisnosti izvođenja pojedine akcije i na taj način odabiranja one akcije koju je u danom trenutku najkorisnije izvršiti.

Prema načinu predstavljanja znanja odnosno orijentacije prema znanju agente možemo klasificirati na skali od reaktivnog do kognitivnog agenta [4]. Oni agenti koji spadaju u klasu reaktivnih agenata nemaju potrebu za kompleksnim sustavima reprezentacije okruženja. Ovakvi agenti su orijentirani na djelovanje kao reakciju na događaje promjene okoline te je ovdje važniji sustav senzora od sustava reprezentacije znanja. Kognitivni agenti su agenti orijentirani prema znanju. Ovakvi agenti trebaju posjedovati sustav reprezentacije znanja unutar kojeg pohranjuju znanja o svome okruženju kao i druga znanja koja su im potrebna u izvršavanju postavljenih ciljeva.

## 2.2. Model agentnog djelovanja u okruženju

Ovdje se razmatra model interakcije agenta i njegovog okruženja zasnovan na Wooldridgeovom formalnom opisu agentne arhitekture. Model formalizira djelovanje agenata kroz nizove koje čine stanja okruženja, akcije koje agent unutar okruženja poduzima te promjene koje nastaju unutar slijeda tih akcija.

Okruženje će se razmatrati kroz njegova stanja. Konačni skup  $E = \{e, e', \dots\}$  predstavlja skup svih mogućih stanja okruženja. U svakom trenutku se okruženje može nalaziti u samo jednom stanju iz skupa  $E$ . Neka je skup  $A_c = \{a, a', \dots\}$  konačni skup akcija koje agent može izvršiti unutar okruženja. Ako bi za primjer uzeli ranije spomenuti sustav za grijanje prostorije tada bi se u skupu  $E$  nalazile temperature zraka prostorije, dok bi skup  $A_c$  imao tri elementa: akciju koja uključuje grijaće tijelo, akciju kojom se grijaće tijelo isključuje te formalno akciju kojom se grijaće tijelo ostavlja u stanju u kojem je zatečeno. Agent i okruženje (sustav za zagrijavanje i prostorija koja se zagrijava) su tako u neprekidnoj interakciji gdje agent svojim djelovanjem (akcijama) mijenja stanje okruženja prema svojem cilju odnosno onom stanju koje mu je definirano kao zadovoljavajuće stanje okruženja. Agentove akcije su zapravo funkcije na skupu stanja okruženja. Agent svojim djelovanjem svakom stanju okruženja

pridružuje novo stanje. Na početku rada agent zatiče okruženje u početnom stanju. Tada nastupa interakcija agenta i okruženja gdje agent akcijama mijenja stanja okruženja sve do željenog stanja okruženja, a zatim do zadržavanja okruženja u željenom stanju. Ovakva interakcija agenta i njegovog okruženja se može formalizirati sljedećim sljedovima interakcije:

$$r: e_0, a_0, e_1, a_1, \dots, a_{n-1}, e_n \quad e_i \in E, a_i \in A_c$$

Stanje okruženja  $e_0 \in E$  se naziva inicijalnim stanjem okruženja. Slijed interakcije dakle počinje s inicijalnim stanjem okruženja, a unutar Wooldridgeove agentne arhitekture koja se ovdje koristi je dozvoljeno da slijed interakcije završi i sa stanjem okruženja i s agentovom akcijom. Stoga se definiraju sljedeći skupovi:

$R^A$  - svi sljedovi interakcije koji završavaju s agentovom akcijom,

$R^E$  - svi sljedovi interakcije koji završavaju sa stanjem okoline.

Neka je nadalje  $R = R^A \cup R^E$  skup svih sljedova interakcije. Kako je već rečeno agent svojim akcijama mijenja stanje okruženja. Stoga se definira funkcija transformacije okruženja koja svakom slijedu interakcije koji završava s agentovom akcijom pridjeljuje stanja u kojima se okruženje može naći nakon izvršavanja zadanog slijeda interakcije. Funkciju promjene stanja okruženja označavamo s  $\tau$ . Domena ove funkcije je dakle skup  $R^A$ , dok se u kodomeni ove funkcije nalazi partitivni skup skupa svih mogućih stanja okruženja bez praznog skupa (jer se okruženje uvijek nalazi u nekom stanju).

Preciznije, funkcija promjene stanja okruženja je funkcija  $\tau: R^A \rightarrow p(E) / \emptyset$ . Bitno je naglasiti da domena funkcije  $\tau$  nije skup  $A_c$  već skup  $R^A$ . Ovo je tako definirano jer se dopušta mogućnost da stanje u kojem će se okruženje naći ne ovisi samo o posljednjoj agentovoj akciji već o cijelom slijedu interakcije. Slično je i sa definicijom kodomene. U kodomeni se ne nalazi skup  $E$  već skup  $p(E) / \emptyset$ . Ovim je definirano da se slijedom interakcije ne definira na jednoznačan način stanje u kojem će se okruženje naći već samo moguća stanja. Ovdje je iz partitivnog skupa  $p(E)$  svih mogućih stanja okruženja isključen prazan skup iz razloga što je potrebno isključiti događaj kada okruženju nije pridruženo stanje. Okruženje su uvijek nalazi u nekom stanju. U praksi je moguće da eventualno iz raznih razloga agent nema mogućnost očitavanja stanja okruženja, ali to ne znači da stanje okruženja ne postoji.

Definicijom skupa svih mogućih stanja okruženja  $E$ , početnog stanja  $e_0$ , te funkcije promjene stanja okruženja  $\tau$ , definirani su svi elementi agentova okruženja. Stoga se agentovo okruženje  $Env$  definira kao uređena trojka  $(E, e_0, \tau)$  te je sada moguće definirati i agenta kao funkciju koja svakom slijedu interakcije, kojem se na kraju nalazi neko stanje okruženja, pridružuje agentovu akciju.

Preciznije, agent  $A_g$  je funkcija  $A_g : R^E \rightarrow A_c$ . Kod domene funkcije  $A_g$  vrijedi slična napomena koja vrijedi i kod definicije domene funkcije  $\tau$ . Kod ovako definirane domene akcija koju agent izvršava ovisi o cijelom njegovom prethodnom djelovanju i o svim prethodnim stanjima okoline, odnosno o sljedovima interakcije. Kod nekih slučajeva ovako široka definicija nije potrebna. Primjer za ovo je prethodno navedeni primjer sustava za grijanje prostorije. Termostat (agent) može uključiti uređaj za grijanje, isključiti ga ili odrediti da se ne mijenja stanje uključenosti tog uređaja. Ova odluka ide prema zadovoljenju tražene temperature prostorije i ona ovisi samo o trenutnoj temperaturi prostorije. Odluka ne ovisi o temperaturama prostorije i akcijama termostata u prethodnim satima već isključivo o trenutnoj temperaturi prostorije.

Stoga je razumna i jednostavnija definicija agenta kroz funkciju kojoj je domena samo skup stanja okruženja  $E$ . U tom slučaju imamo alternativnu definiciju agenta  $A_g' : E \rightarrow A_c$ , gdje ćemo takvog agenta (odnosno funkciju kojom je agent reprezentiran) označavati s  $A_g'$ .

Sada je moguće definirati agentni sustav kao uređeni par  $R(A_g, Env)$  ili alternativno  $R(A_g', Env)$ .

Potrebno je definirati funkciju kojom agent percipira stanje okruženja. Ovu funkciju nazivamo *percepcija*. Domena ove funkcije je skup svih mogućih stanja okruženja  $E$ , dok se u kodomeni nalazi agentovo znanje o stanju okruženja. Agentovo znanje o stanju okruženja ćemo ovdje označavati s  $Per$ .

Dakle definiramo funkciju *percepcija*:  $E \rightarrow Per$ . Kardinalni brojevi skupova  $E$  i  $Per$  ne trebaju biti jednaki. Više elemenata skupa  $E$  funkcija *percepcija* može preslikavati u isti element skupa  $Per$ . Stoga korištenjem funkcije *percepcija* definiramo relaciju ekvivalencije na skupu svih mogućih stanja okruženja  $E$ . Ovu relaciju ekvivalencije definiramo na sljedeći način:

Za  $e_1, e_2 \in E$ ,  $e_1 \approx e_2$  ako vrijedi  $percepcija(e_1) = percepcija(e_2)$ .

Ova relacija ekvivalencije ima onoliko klasa ekvivalencije koliko agent posjeduje stanja kojima percipira svoje znanje o okruženju.

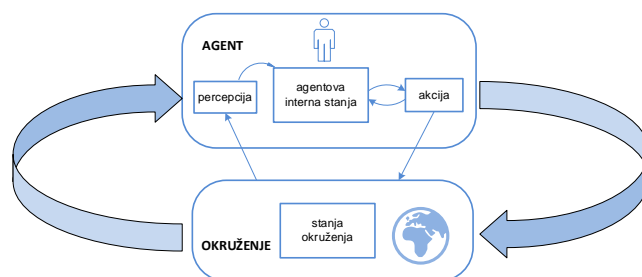
Sada je još potrebno definirati funkciju *akcija* kojom agent odlučuje koju će akciju poduzeti unutar okruženja. Funkcija *akcija* će se ovdje prvo definirati za one agente čije djelovanje ovisi samo posljednjem stanju okruženja, odnosno za one agente koji su definirani pomoću funkcije  $A_g' : E \rightarrow A_c$ . Ovdje je funkcija *akcija* definirana na skupu internog znanja agenta o stanju okruženja *Per*, a područje vrijednosti ove funkcije su akcije koje agent može izvesti odnosno *akcija*:  $Per \rightarrow A_c$ .

Kod onih agenata kod kojih akcija koju će poduzeti ne ovisi samo o posljednjem stanju okoline, tj. kod onih agenata koji su definirani funkcijom  $A_g : R^E \rightarrow A_c$  uvodi se dodatni skup, skup internih stanja *I*. Unutar skupa *I* pohranjuju se prethodne akcije agenta kao i prethodne agentove percepcije stanja okruženja.

Da bi se mogla definirati funkcija *akcija* ovakvog agenta, najprije je potrebno definirati funkciju *sljedeće* :  $I \times Per \rightarrow I$ . Kod ovakvih agenata proces odlučivanja o akciji koja će se poduzeti ide sljedećim koracima:

1. Funkcija *percepcija* mijenja vrijednost agentove percepcije okruženja
2. Funkcija *sljedeće* na osnovu internog stanja agenta kao i agentove percepcije stanja okruženja generira novo interno stanje agenta.
3. Na osnovu ovako promijenjenog internog stanja agent bira odgovarajuću akciju, odnosno funkcijom *akcija*:  $I \rightarrow A_c$  trenutnom internom stanju pridružuje akciju kojom djeluje na okruženje.

Sama definicija načina preslikavanja prethodno navedenih funkcija ovisi o samoj implementaciji agenata. Slika 2.2. prikazuje interakciju agenta i okruženja unutar ovako definiranog modela.



Slika 2.2. Interakcija agenta i okruženja posredstvom funkcija *percepcija* i *akcija* [43]

### 2.3. Višeagentni sustavi

Problemi iz prakse često zahtijevaju korištenje više od jednog agenta unutar istog okruženja. Tako se dolazi do potrebe za istraživanjem višeagentnih sustava koji predstavljaju sustave koji se sastoje od većeg broja agenata koji se mogu nalaziti u međusobnoj interakciji. Kao i kod definicije samostalnog agenta tako se i kod definicije višeagentnih sustava ostavlja sloboda implementacije agenata bilo kao programskih bilo kao fizičkih entiteta. Kao primjer programskih agenata unutar višeagentnog sustava mogu se navesti agentni sustavi gdje agenti zajedničkim radom pretražuju Web. Sustav prometa unutar kojeg djeluju autonomna vozila možemo navesti kao primjer višeagentnog sustava gdje su agenti fizički entiteti. Unutar višeagentnog sustava mogu djelovati agenti različitih vrsta. Tako primjerice u sustavu prometa kojeg obavljaju autonomna vozila, uz sama autonomna vozila, agenti mogu biti i sustavi prometne signalizacije, uređaji pored prometnica i slični entiteti. Također je često moguće i dekomponirati samostalnog agenta na način da se njegovi dijelovi mogu smatrati također agentima te primijeniti metode višeagentnih sustava. Tako bi se i autonomno vozilo moglo dekomponirati te također razmatrati kao višeagentni sustav.

Ferber [46] višeagentni sustav definira kao uređenu šestorku MAS (E, O, A, R, Op, L) gdje je:

E – okruženje u kojem agenti djeluju,

O – skup objekata okruženja,

A – skup agenata. Prema ovoj definiciji svaki agent je ujedno i objekt okruženja odnosno vrijedi da je  $A \subseteq O$ ,

R – Skup relacija na skupu objekata okruženja,

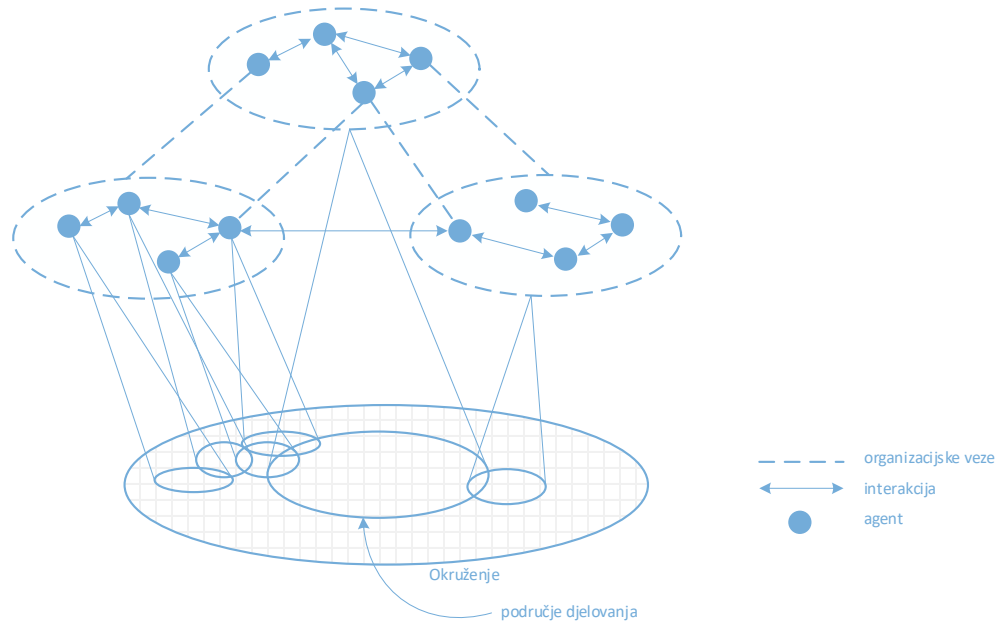
Op – skup operacija kojima agenti percipiraju stanja objekata iz skupa O te kojima mogu ta stanja mijenjati,

L – skup pravila koja vrijede unutar okruženja.

Slika 2.3. prikazuje tipičnu strukturu višeagentnog sustava [48]. Sustav se sastoji od više agenata koji su u interakciji preko komunikacijskih protokola, označenih dvosmjernim strelicama. Agenti djeluju na okruženje (osjenčano područje). Sfere utjecaja (engl. *Spheres of*



*Influence*) prikazuju različite dijelove okruženja na koje agenti mogu utjecati. Te sfere se ponekad mogu preklapati što može povećati suradnju i ovisnost među agentima. Isprekidanom crtom su prikazane organizacijske veze među agentima.



Slika 2.3. Struktura višeagentnog sustava [48]

Prema Vercouteru, Beauneu i Sayettatu [24] u višeagentnom sustavu se razlikuju sljedeće dvije vrste agenata: (i) agenti objekata i (ii) agenti usluga. Agenti objekata nadziru objekte okruženja. Preko ovih agenata drugi agenti pristupaju objektima koje ovi agenti nadziru. Agenti usluga nisu neposredno povezani s niti jednim objektom prisutnim unutar okruženja već je njihova uloga vezana za ostvarivanje zadataka postavljenih pred sustav.

Prelazak s jednoagentnog sustava na uporabu višeagentnog sustava omogućuje korištenje agentnih tehnologija kod mnogo kompleksnijih problema ali ovo otvara i mnoga pitanja koje je potrebno riješiti kod izgradnje ovakvih sustava [49]. Tako se otvara pitanje na koji način dekomponirati funkcionalnosti sustava kojeg se gradi te kako dodijeliti pojedine funkcije agentima. Otvaraju se pitanja koja idu i u drugom smjeru, odnosno kako objedinjavati znanja do kojih dođu pojedini agenti jer se pretpostavlja da agenti imaju samo parcijalni pogled na svoj dio okruženja te na osnovu toga i samo parcijalno znanje o okruženju. Otvaraju se pitanja i načina ostvarivanja komunikacije među agentima kao i načina ostvarivanja zajedničkog načina reprezentacije znanja o okruženju kojeg dijele. Potrebno je definirati i metode rješavanja

konflikata među agentima kao i načine pregovaranja između agenata te načine korištenja zajedničkih resursa.

## **2.4. Supstitucija ljudskog faktora agentnim tehnologijama pri detekciji i gašenju brodskih požara**

Požari na brodu su jedna od bitnih klasa pogibelnih situacija na brodu. U analizi požara na brodu ljudi se pojavljuju kao faktori rizika, ponekad kao uzročnici požara te kao entiteti za gašenje požara. Ovdje se razmatra rješenje supstitucija ljudi rješenjem u kojem bi utjecaj ljudskog faktora bio potpuno izbjegnuto.

Komercijalni brodovi grade se da bi ostvarivali financijsku dobit. Želja je brodovlasnika ili naručitelja broda da napravi brod koji će zadovoljavati namjenu uz što manje troškove izgradnje i eksploatacije. Da bi se brod i teret mogli osigurati na brodskom putovanju, potrebno je da brod već prilikom projektiranja i gradnje prati tehnički standard i nadzor u vidu odgovarajuće klase broda koje propisuje odgovarajuće klasifikacijsko društvo.

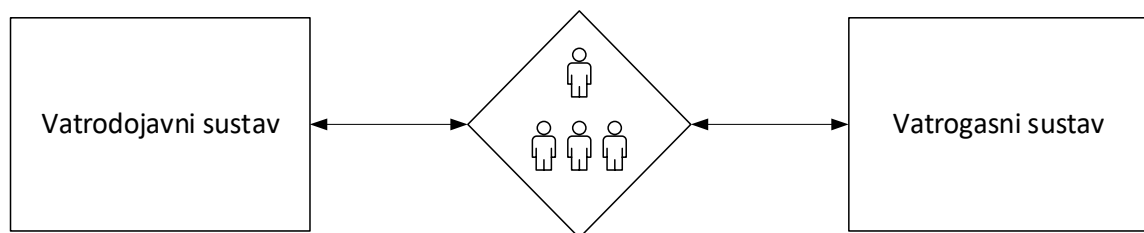
Jedna od čestih incidentnih situacija koje se mogu dogoditi na brodu je požar. Upravo su požari jedan od vodećih uzroka gubitka brodova, tereta ili ozljeda ljudi. Brodska strojarnica je mjesto gdje se nalazi gorivo, ulja, visoki napon, para pod tlakom, kotlovi s gorioncima, motori s unutarnjim izgaranjem, generatori struje, separatori ulja i goriva, spalionica i kao takva strojarnica je potencijalno mjesto požara s najvećim rizikom od njegovog izbijanja.

Navedeni faktori rizika uvjetovali su tehničke standarde i certifikacije brodova. Postoje zahtjevi SOLAS konvencije i tehnički zahtjevi Temeljnih standarda za vatrogasnu sigurnost brodova prema međunarodnom IMO standardu za vatrogasne sigurnosne sustave (engl. *The International Code for Fire Safety Systems - Fire Safety Systems Code - FSSC*) [50]. FSSC uključuje sustave detekcije požara, sustave gašenja požara i certifikaciju posade (engl. *STCW VI/3 Advanced Fire Fighting*), odnosno elementa prikazanih Slikom 2.4.

Uvažavajući zakonske propise i konvencije, kompanija za menadžment posade izrađuje i objavljuje procedure i postupke posade za provođenje odluka o gašenju požara na temelju informacija vatrodojave. Ove procedure uključuju i procedure rukovanja opremom za gašenje. Kompanija koja obavlja menadžment posade dužna je implementirati ove definirane procedure u sve svoje procedure i postupke prema Međunarodnom kodeksu o sigurnom vođenju broda i sprječavanju onečišćenja (engl. *International Safety Management (ISM) Code*) [51]. Naravno,

u ovisnosti o definiranoj klasi broda koju je propisalo klasifikacijsko društvo, primjenjivat će se različiti propisi kako bi se ugrađene procedure na najbolji način prilagodile ciljanoj klasi broda.

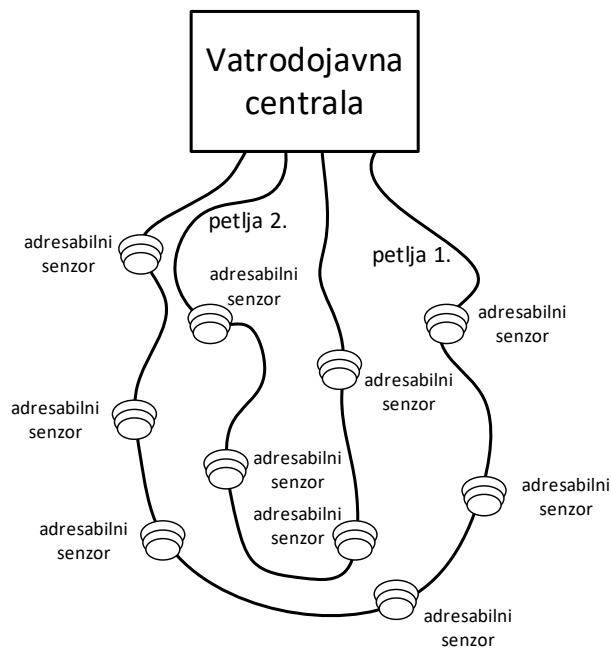
Unutar današnjih praksi ugrađeni fiksni vatrogasni sustav ili sustave manualno pokreću ljudi ukoliko se utvrdi požar. Za ovako nešto je potrebna uvježbanost posade kao i njihova međusobna komunikacija koja je posebno bitna pri reagiranju u incidentnim situacijama. Osoblje na suvremenim brodovima dolazi u multikulturalnu sredinu, govori različitim materinjim jezicima i često mogu imati probleme zbog jezika. Svaki član posade ima svoje zaduženje u slučaju požara (SOLAS Chapter III, Reg. 8 and 37) i taj popis nalazi se izvješen na brodu na engleskom jeziku, ali može biti i na većinskom jeziku posade u skladu s propisima zastave pod kojom brod plovi.



Slika 2.4. Elementi protupožarne zaštite broda

Središnji element vatrodjavnog sustava sa Slike 2.5. je vatrodjavna centrala. Vatrodjavna centrala se sastoji od jedne ili više grupa senzora koji su serijski povezani te gdje svaki senzor ima svoju adresu kako prikazuje Slika 2.5. Nakon aktivacije adresiranog senzora u vatrodjavnom sustavu alarmiraju se ljudi zvučnim ili svjetlosnim alarmom.

Alarm vatrodjave može biti opravdan, odnosno istinit, ili lažan, odnosno neopravdan. Senzori koji se trenutačno najčešće koriste uključuju optičke senzore plamena i ionske senzore dima. Prednost optičkih detektora je točnost, ali je nedostatak mala brzina reagiranja. Kod ionskih detektora je brzina detekcije velika, ali je točnost detekcije manja. Brodska strojarnica izložena je dimu pojačano ako je smjer puhanja vjetra u pravcu krme broda. Tada čestice iz brodskog dimnjaka uđu u ventilaciju strojarnice i daju lažno pozitivna očitavanja ionskih detektora dima.



Slika 2.5. Petlje senzora u vatrodjavnoj centrali

Po alarmiranju posada mora na terenu provjeriti status požara i utvrditi je li se požar dogodio ili nije. Ukoliko je alarm vatrodjave bio opravdan, nakon procjene požara na terenu, ljudi pokreću požarnu uzbunu koja je poziv na okupljanje vatrogasnog tima. Ljudi iz vatrogasnog tima se trebaju potpuno opremiti prije pokretanja akcije. Ovo uključuje oblačenje, stavljanje ili uzimanje izolacijskih aparata za disanje, obuće, odjeće, rukavica, kaciga te raznih alata. Ovako opremljeni vatrogasni tim se treba okupiti na dogovorenoj stanici za prikupljanje (engl. *Muster Station*). Brod obično ima više ovakvih stanica i svaki član posade bi trebao znati gdje mora doći ovisno o zaduženju. U praksi se posada dijeli u različite timove kao što su incidentni tim, tim mosta ili tim strojarnice. Brzina odziva ljudi na požarni alarm ovisi o obučeniosti i stupnju izvježbanosti članova posade što je često slaba karika u pravovremenom reagiranju i donošenju odluka.

Incidentni tim za gašenje pristupa gašenju raspoloživim sredstvima za gašenje. Na raspolaganju su im različiti sustavi za gašenje požara koji najčešće uključuju plinske sustave CO<sub>2</sub> ili sustave ekspanzirajuće pjene. Hidrantski sustavi postoje na brodu ali nisu efikasni za gašenje ulja ili goriva, a za gašenje električnih instalacija se ne smiju ni koristiti. Vodu iz hidranata treba koristiti kao krajnju mjeru za gašenje nekontroliranih požara za čije je gašenje

potrebna potpuna poplava prostora pjenom ili kada treba hladiti konstrukciju broda kako se ne bi narušio integritet trupa.

Ukoliko se utvrdi da je alarm bio lažan, posada će resetirati vatrodajavnu centralu. Učestali lažni alarmi vode dodatnom zamaranju posade što povećava rizik za donošenje krivih odluka, a to je još jedna slaba karika za pravovremeno reagiranje i donošenje odluka.

Posada mora biti u stanju donositi odluke i djelovati u slučaju bilo kakve druge incidentne situacije koja može nastati kao posljedica lošeg vremena, kvara opreme, piratskog napada ili kada ona nastaje uslijed ljudske pogreške. Načini postupanja su strogo definirani ali uslijed ovakvih situacija se ipak javljaju pogreške koje rezultiraju bilo krivim odlukama, bilo nepravovremenim reakcijama što može uzrokovati ljudske i materijalne gubitke. Ljudski faktor često bude uzrok požara na brodu. Ljudi se mogu i ozlijediti kod nastanka požara i prilikom gašenja. Isto tako, ljudi mogu postupati na nesiguran način uslijed krivih odluka pri odlučivanju, uslijed kršenja uobičajenih postupaka ili uslijed neuvježbanosti i premorenosti [11]. Ovdje se otvara prostor za implementaciju agentne tehnologije gdje je cilj reagiranje poštivanjem propisanih procedura ali uz eliminaciju rizika vezanih za ljude, njihov zamor, nepravovremeno djelovanje ili uslijed problema u međusobnoj komunikaciji. Također se eliminira problem potencijalne iracionalne reakcije te nerazumnog odlučivanja od strane pojedinca uslijed osjećaja životne ugroženosti i panike.

U ovakvoj paradigmi agent ne mijenja zakonski propisane procedure djelovanja već jamči njihovu pravodobnu primjenu. Stoga je ovakav agent reaktivni agent kojem informaciju o okruženju pružaju senzori, a koji svoje akcije na osnovi ugrađenog znanja (propisane procedure djelovanja) ostvaruje aktiviranjem odgovarajućih elemenata vatrogasnog sustava broda. Ovakav agent je stalno u pripravi, promatra stanje dodijeljenog mu okruženja te u slučaju incidentne situacije striktno primjenjuje propisane procedure u najkraćem mogućem vremenu. Ovaj agent također u sprezi s dodatnim sensorima može smanjiti i broj lažno pozitivnih alarma te na takav način dodatno povećati razinu sigurnost. Ovakav pristup te uvođenje agentne tehnologije odlučivanja u proces detekcije i vatrogašenja predstavlja i doprinos gradnji autonomnih brodova za koju se već provode istraživanja vezana uz gradnju i eksploataciju.

### 3. Model protupožarne agentne arhitekture broda

Model koji će ovdje biti definiran razmatra brod kao skup prostorija u kojima se nalaze elementi relevantni za detekciju i gašenje požara. Ovi elementi će se nazivati elementima okruženja. Svakoj je prostoriji dodijeljen agent koji prima sliku svijeta (broda) kroz očitavanja svojstava elemenata okruženja, primjerice očitavanjem stanja raznih detektora. Agenti djeluju unutar okruženja koristeći elemente koji imaju mogućnost mijenjanja stanja okruženja kao što su primjerice razni ventili ili generatori sredstava za gašenje. Svaki element okruženja je pridružen jednoj klasi elemenata okruženja, a svaka klasa elemenata okruženja ima pridružena svojstva relevantna za tu klasu. Poglavlje završava definicijom protupožarne agentne arhitekture broda.

U nastavku slijedi definicija modela. Prvo će biti definirano okruženje kroz definiciju prostora kojeg okruženje zauzima, odnosno okruženju će se pridružiti prostorne jedinice koje okruženje posjeduje.

Skup  $PJO = \{pjo_1, pjo_2, \dots, pjo_m\}$ ,  $m \in \mathbb{N}$  nazivamo skupom osnovnih prostornih jedinica okruženja. Elementi  $pjo_i$ ,  $1 \leq i \leq m$  nazivaju se osnovnim prostornim jedinicama okruženja.

Osnovna prostorna jedinica je dakle najmanja prostorna jedinica koju možemo adresirati te će se u nastavku prostorije okruženja definirati kao skupovi kreirani od osnovnih prostornih jedinica. Pri razvoju modela se odlučilo za ovakav pristup kako bi se povećala preciznost pri detekciji lokacije na kojoj se dogodio neki poremećaj u okruženju. Ovakvim pristupom možemo definirati na kojem je mjestu unutar neke prostorije nastupio požar ili na kojem se mjestu unutar neke prostorije nalazi ranjenik, za razliku od sustava gdje bi se lociranje odrađivalo na razini prostorije. Skup osnovnih prostornih jedinica okruženja  $PJO$  je dakle potrebno raspodijeliti u prostorije okruženja, odnosno osnovne prostorne jedinice okruženja se grupiraju u prostorije okruženja.

Neka je  $PJO$  skup osnovnih prostornih jedinica okruženja. Svaku particiju skupa  $PJO$  nazivamo skupom prostorija okruženja i označavamo s  $\mathcal{P}(PJO)$ . Svaki element skupa  $\mathcal{P}(PJO)$  nazivamo prostorijom okruženja.

Klasu elemenata okruženja označavat ćemo s  $Cee$ . Neka je  $CEE = \{Cee_1, Cee_2, \dots, Cee_n\}$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , skup klasa elemenata okoline. Neka je  $e \in Cee$  za bilo koju klasu elemenata okoline  $Cee \in CEE$ .  $e$  nazivamo *elementom okoline* iz klase  $Cee$ .

Primjer skupa  $CEE$  može biti skup  $\{Ventili, Vrata, Zvučni alarmi, Svjetlosni alarmi, Detektori dima, Infracrvene kamere, Generatori CO_2, Generatori pjene\}$ . Ovo su dakle klase elemenata okoline. Svaki element okoline pripada nekoj klasi iz skupa  $CEE$ .

Elementima okruženja je potrebno pridruživati određena svojstva te definirati dozvoljene vrijednosti tih svojstva. Stoga se definira struktura svojstva – vrijednosti kako bi se svakom tipu elementa okruženja pridružile odgovarajuće vrijednosti. Struktura svojstva - vrijednosti koja će to omogućiti definira se nad klasom elemenata okoline kako bi se odgovarajućim tipovima elemenata okruženja pridružila relevantna svojstva i vrijednosti jer primjerice sigurno element okruženja tipa *Vrata* i element okruženja tipa *Detektori dima* nemaju ista svojstva koja je potrebno promatrati.

*Struktura svojstva – vrijednosti nad klasom elemenata okruženja  $Cee$*  je svaki podskup skupa

$$\{(a, b, c) \mid a \in Cee; b, c \in \text{string}[30]\}$$

gdje je  $\text{string}[30]$  skup svih alfanumeričkih nizova maksimalne duljine 30 znakova.

Struktura svojstva - vrijednosti nad klasom elemenata okoline  $Cee$  označava se s  $SV(Cee)$ . Prva komponenta uređene trojke  $(a,b,c)$  iz strukture svojstva – vrijednosti naziva se *ciljani element okruženja*, druga komponenta *naziv svojstva*, dok se treća komponenta naziva *vrijednost svojstva*.

Za  $e \in Cee$  one elemente skupa  $SV(Cee)$  kod kojih je prva koordinata element  $e$  nazivat ćemo *svojstvima elementa  $e$* .

Tablica 3.1. prikazuje primjer jedne interpretacije strukture svojstva – vrijednosti nad klasama elemenata okruženja iz skupa  $\{Ventili, Vrata, Zvučni alarmi, Svjetlosni alarmi, Detektori dima, Infracrvene kamere, Generatori CO_2, Generatori pjene\}$ .

Tablica 3.1. Klase elemenata okoline s pripadajućim strukturama svojstva – vrijednosti

| <i>Naziv klase elemenata okoline</i> | <i>Naziv svojstva</i>            | <i>Dozvoljene vrijednosti svojstva</i>                                     |
|--------------------------------------|----------------------------------|--|
| <b>Ventili</b>                       | tip_ventila                      | „CO <sub>2</sub> “, „pjena“  |
|                                      | koordinate                       | ID osnovne prostorne jedinice okruženja na kojoj se element nalazi         |
|                                      | stanje_otvorenosti               | „otvoren“, „zatvoren“  |
| <b>Vrata</b>                         | koordinate                       | ID dvije prostorije koja vrata povezuju                                    |
|                                      | stanje_otvorenosti               | „otvorena“, „zatvorena“  |
| <b>Zvučni alarm</b>                  | koordinate                       | ID osnovne prostorne jedinice okruženja na kojoj se element nalazi         |
|                                      | aktivnost                        | „alarm aktivan“, alarm neaktivan“  |
| <b>Svjetlosni alarm</b>              | koordinate                       | ID osnovne prostorne jedinice okruženja na kojoj se element nalazi         |
|                                      | aktivnost                        | „alarm aktivan“, alarm neaktivan“  |
| <b>Detektor dima</b>                 | koordinate                       | ID osnovne prostorne jedinice okruženja na kojoj se element nalazi         |
|                                      | stanje_detekcije                 | detektirana razina dima  |
| <b>IC kamera</b>                     | koordinate                       | ID osnovne prostorne jedinice okruženja na kojoj se element nalazi         |
|                                      | stanje_detekcije_požara          | „požar u prostoru“, „bez požara u prostoru“, „podignuta razina opreznosti“ |
|                                      | stanje_detekcije_prisustva_osoba | broj detektiranih osoba u prostoru, „oprez - neodređeno stanje“            |
| <b>Generator CO<sub>2</sub></b>      | aktivnost                        | „u procesu generiranja“, „neaktivan“                                       |
| <b>Generator pjene</b>               | aktivnost                        | „u procesu generiranja“, „neaktivan“                                       |



Kao što je potrebno dodjeljivati određene vrijednosti elementima okruženja, isto je tako i prostorijama okruženja potrebno dodjeljivati prikladna svojstva i njihove vrijednosti kao što su primjerice identifikatori sredstva kojima je dozvoljeno gasiti prostoriju i slična svojstva. Stoga se definira i struktura svojstva – vrijednosti nad skupom prostorija okruženja.

*Struktura svojstva – vrijednosti skupa prostorija okruženja  $\mathcal{P}(PJO)$*  je svaki podskup skupa

$$\{(a, b, c) \mid a \in \mathcal{P}(PJO); b, c \in \text{string}[30]\}$$

gdje je *string*[30] skup svih alfanumeričkih nizova maksimalne duljine 30 znakova.

Struktura svojstva - vrijednosti skupa prostorija okruženja  $\mathcal{P}(PJO)$  označava se s  $SV(\mathcal{P}(PJO))$ . Prva komponenta uređene trojke (a,b,c) iz strukture svojstva – vrijednosti naziva se *ciljana prostorija okruženja*, druga komponenta *naziv svojstva*, dok se treća komponenta naziva *vrijednost svojstva*. Tablica 3.2. prikazuje primjer jedne interpretacije strukture svojstva – vrijednosti skupa prostorija.

Tablica 3.2. Primjer interpretacije strukture svojstva – vrijednosti skupa prostorija

|                   | <i>Naziv svojstva</i>     | <i>Dozvoljene vrijednosti svojstva</i>  |
|-------------------|---------------------------|---|
| <b>Prostorija</b> | ID_prostorije             | Identifikacijski broj prostorije  |
|                   | stanje_požara             | „požar u prostoriji“, „nema požara u prostoriji“, „podignuta razina opreznosti“ |
|                   | dozvoljena_metoda_gašenja | „CO <sub>2</sub> “, „pjena“, „pjena i CO <sub>2</sub> “                         |
|                   | prisutnost_ljudi          | broj ljudi u prostoru   |
|                   | razina_co2                | broj jedinica CO <sub>2</sub>   |
|                   | razina_pjene              | broj jedinica pjene   |

Jedno od svojstva prostorije je i prisutnost ljudi jer je pri gašenju požara potrebno utvrditi prikladan način gašenja u odnosu na činjenicu nalaze li se u opožarenom prostoru ljudi ili se ne nalaze. Također, u nekim slučajevima nije ni moguće započeti proces gašenja prije nego što se izvrši evakuacija svih osoba iz opožarenog područja. Vrijednost ovog svojstva se u realnom vremenu mijenja u ovisnosti o promjeni vrijednosti odgovarajućih detektora.

Slijedi definicija skupa svih elemenata okruženja.

Skup  $EE(CEE) = \{e \in Cee : Cee \in CEE\}$  nazivat ćemo skupom svih elemenata okruženja iz skupa klasa okruženja  $CEE$ .

Dakle skup  $EE(CEE)$  sadrži sve elemente okruženja bez obzira kojoj klasi elemenata okruženja oni pripadali. Sada je potrebno pridružiti elemente skupa  $EE(CEE)$  prostorijama okruženja, odnosno definirati gdje se koji element okruženja nalazi.

Funkciju  $D_{eo}: EE(CEE) \rightarrow \mathcal{P}(PJO)$  nazivamo funkcijom dodjeljivanja elemenata okruženja prostorijama okruženja. Ova funkcija svakom elementu okruženja dodjeli prostoriju u kojoj će se nalaziti.

Nakon prethodnih definicija moguće je definirati protupožarno okruženje broda:

Neka je  $PJO = \{pjo_1, pjo_2, \dots, pjo_m\}$ ,  $m \in \mathbb{N}$ , skup osnovnih prostornih jedinica okruženja i  $CEE = \{Cee_1, Cee_2, \dots, Cee_n\}$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , skup klasa elemenata okruženja.

Protupožarno okruženje broda je uređena petorka

$$\mathcal{O} = (\mathcal{P}(PJO), EE(CEE), SV(\mathcal{P}(PJO)), SV(CEE), D_{eo})$$

gdje je

- $\mathcal{P}(PJO)$  - skup prostorija okruženja,
- $EE(CEE)$  - skup svih elemenata okruženja iz skupa klasa okruženja  $CEE$ ,
- $SV(\mathcal{P}(PJO))$  - struktura svojstva - vrijednosti skupa prostorija okruženja  $\mathcal{P}(PJO)$
- $SV(CEE)$  - struktura svojstva - vrijednosti klasa okruženja  $CEE$ ,
- $D_{eo}$  - funkcija dodjeljivanja elemenata okruženja prostorijama okruženja.

Sada je potrebno u model uvesti agenta:

Agent  $a$  je uređena trojka  $(K, Ac, Z)$  gdje su:

- $K$  - agentovo znanje o okruženju
- $Ac$  - akcije kojima agent može djelovati unutar okruženja
- $Z$  - pravila po kojima agent odlučuje o akcijama kojima će djelovati unutar okruženja

Radi pojednostavljivanja modela ograničimo se na slučaj u kojem će svakoj prostoriji okruženja biti dodijeljen jedan agent. Neka je  $k$  kardinalni broj skupa  $\mathcal{P}(PJO)$ . Definiramo skup  $\mathcal{A}$  svih agenata, odnosno  $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_k\}$  gdje je  $a_i$  agent,  $1 \leq i \leq k$ .

Sada je potrebno definirati funkciju koja će svakom prostoru dodijeliti agenta.

Svaka bijekcija  $D_a: \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{P}(PJO)$  naziva se *funkcijom dodjeljivanja agenata prostorijama okruženja*.

Funkcija  $D_a$  svakoj prostoriji okruženja iz  $\mathcal{P}(PJO)$  dodjeljuje agenta koji će imati zadatak protupožarnog čuvanja te prostorije okruženja. Okruženje ovog agenta je prostorija okruženja koja je dodijeljena tome agentu. Ako pretpostavimo da je osigurana potrebna infrastruktura kojom agent može u realnom vremenu pratiti stanja svih elemenata okruženja koji se nalaze u prostoriji koja je dodijeljena agentu tada znanje  $K$  ovog agenta o okruženju možemo poistovjetiti sa svojstvima svih ovih elemenata okruženja koji su locirani u prostoriji koja je dodijeljena promatranom agentu.

Slično je i s agentovim akcijama  $Ac$ . Uz pretpostavku osigurane potrebne infrastrukture kojom agent komunicira s elementima okruženja unutar iste prostorije, akcije agenta predstavljaju promjene onih stanja elemenata okruženja (odnosno formalno vrijednosti njihovih svojstva) koji imaju mogućnost mijenjati stanje okruženja. Primjerice, ukoliko se u prostoriji kojoj je agent dodijeljen nalazi ventil tada u agentove akcije ulazi mogućnost djelovanja na svojstvo *stanje\_otvorenosti* promatranog ventila što je zasigurno akcija kojom agent može djelovati na svoje okruženje.

Način definiranja pravila  $Z$  po kojima agent odlučuje o akcijama kojima će djelovati unutar okruženja ovisan je o interpretaciji modela ali ta pravila svakako na ulazu imaju stanja elemenata okruženja prostorije kojem je agent dodijeljen, a na izlazu imaju odgovarajuće agentove akcije. Primjerice, ova pravila je moguće definirati produkcijskim pravilima kao što je sljedeće produkcijsko pravilo:

ako je  $detektor\_dima.stanje\_detekcije = \text{“dim u prostoriji”}$  onda

{ ako je  $(ic\_kamera.stanje\_detekcije\_pozara = \text{“pozar u prostoru”}$  ili

$ic\_kamera.stanje\_detekcije\_pozara = \text{“podignuta razina opreznosti”}$ )

onda {

$zvucni\_alarm.aktivnost = \text{“aktivan”}$

$svjetlosni\_alarm.aktivnost = \text{“aktivan”}$

...

}

Sada je moguće definirati protupožarnu agentnu arhitekturu broda.

Neka je  $PJO = \{pjo_1, pjo_2, \dots, pjo_m\}$ ,  $m \in \mathbb{N}$ , skup osnovnih prostornih jedinica okruženja i  $CEE = \{Cee_1, Cee_2, \dots, Cee_n\}$ ,  $i \in \mathbb{N}$ , skup klasa elemenata okruženja.

*Protupožarna agentna arhitektura broda* je uređena sedmorka

$$(\mathcal{P}(PJO), EE(CEE), SV(\mathcal{P}(PJO)), SV(CEE), D_{eo}, \mathcal{A}, D_a)$$

gdje je

- $\mathcal{P}(PJO)$  - skup prostorija okruženja,
- $EE(CEE)$  - skup svih elemenata okruženja iz skupa klasa okruženja  $CEE$ ,
- $SV(\mathcal{P}(PJO))$  - struktura svojstva - vrijednosti skupa prostorija okruženja  $\mathcal{P}(PJO)$
- $SV(CEE)$  - struktura svojstva - vrijednosti klasa okruženja  $CEE$ ,
- $D_{eo}$  - funkcija dodjeljivanja elemenata okruženja prostorijama okruženja,
- $\mathcal{A} = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$  – skup agenata,
- $D_a$  - funkcija dodjeljivanja agenata prostorijama okruženja.

U petom poglavlju ovog rada će biti prikazana jedna interpretacija ovog modela protupožarne agentne arhitekture broda te poslije i odgovarajuća simulacija te interpretacije.

## 4. Analiza dostupnih agentnih simulacijskih okruženja

Vrednovanje modela odlučivanja u pogibeljnim situacijama realizirati će se u programibilnom okruženju za simulaciju agentnih odnosno višeagentnih sustava. U ovom dijelu istraživanja razmotrit će se postojeća rješenja koja omogućavaju programiranje rada i simulaciju rada agentnih, a posebice višeagentnih sustava te će se odabrati ono simulacijsko okruženje unutar kojeg će biti moguće implementirati definirani model. Pred sustave koji će predstavljati kandidate za odabir postavit će se selekcijski uvjeti. Neki od tih uvjeta će biti isključujući dok će neki biti definirani samo kao poželjni uvjeti. Na osnovu ovih uvjeta odabrat će se prikladno agentno okruženje koje će na kraju poglavlja biti ukratko i opisano.

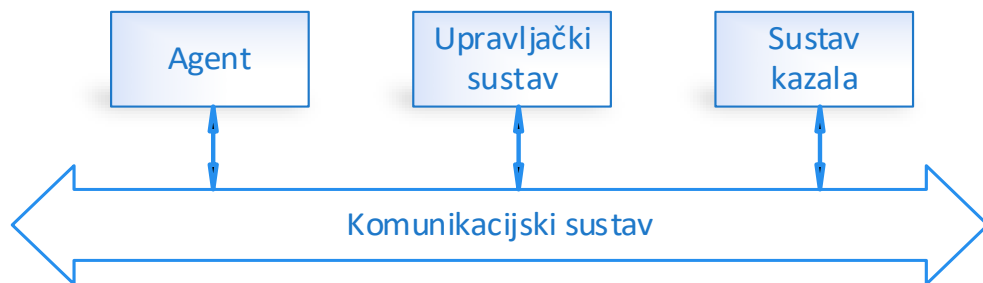
### 4.1. Uvodna razmatranja

Za izradu simulacije moguće je samostalno napraviti cijeli kôd, koristiti razne alate koji se koriste za okruženja adaptivnih aplikacija za primjenu u realnom vremenu [52] ili koristiti neki simulacijski alat. Programiranje cjelokupnog kôda je način koji je tehnički vrlo složen, koji iziskuje prethodna znanja o naprednom programiranju, a rezultat može biti vrlo nefleksibilan za daljnji razvitak ili primjenu. Platforme su gotova rješenja koja imaju tehničku potporu, korisničko sučelje koje je prilagođeno potrebama korisnika i razvojno okruženje koje pojednostavljuje proces modeliranja. Postoje besplatni, edukacijski i/ili komercijalni simulacijski alati i platforme za agentno modeliranje. Izbor određene platforme za oblikovanje i upotrebu višeagentnih sustava nije trivijalan zadatak jer je razvijeno nekoliko desetina sustava koji se mogu nazvati agentnim platformama. Kod nekih platformi ne postoji mogućnost besplatnog pristupa, a neke nisu dovoljno dobro dokumentirane i često se koriste samo unutar institucija gdje su razvijene. Stoga se ovdje za primarnu selekciju agentnih platformi koriste istraživanja drugih istraživača koji su istraživali i klasificirali agentne platforme. Nakon inicijalnog probira za odabranu agentnu platformu (ili skup platformi) provodi se dodatna provjera ispunjenja postavljenih uvjeta.

Svako simulacijsko okruženje za agentne sustave mora osigurati agentnu platformu neophodnu za odvijanje simulacije. Organizacija FIPA (engl. *Foundation For Intelligent Physical Agents*) koja je jedna od začetnica definiranja standarda u svijetu agenata u svojim specifikacijama navodi sljedeće elemente koja ovakve agentne platforme moraju osigurati kao informacijsku infrastrukturu [53]:

- Sustav kazala. Sustav kazala mora osigurati informacije o trenutno aktivnim agentima, njihovim lokacijama kao i uslugama koje trenutno aktivni agenti pružaju.
- Upravljački sustav. Upravljački sustav osigurava kreiranje agenata, dodjeljivanje zadataka agentima kao i premještanje agenata na nove platforme ako se za to ukaže potreba. Nadalje, u usluge upravljačkog sustava ulaze i registracija agenata kao i njihovo deaktiviranje.
- Komunikacijski sustav. Sustav prenošenja poruka među agentima koji se ne trebaju nužno nalaziti unutar iste agentne platforme.

Ispunjavanje prethodno navedenih zahtjeva koji se stavljanju pred okruženja za razvoj i izvršavanje agentnih sustava definira arhitekturu agentnih sustava koja je prikazana Slikom 4.1.



Slika 4.1. Arhitektura agentnog sustava prema modelu *FIPA*

Uz zadovoljavanje posjedovanja ranije navedenih elemenata, simulacijska okruženja za agentne sustave moraju posjedovati još najmanje i odgovarajuće okruženje za definiranje ponašanja agenata kao i sustav monitoringa agenata kojima je omogućeno izvršavanje unutar ciljane agentne platforme.

Prilikom izbora simulacijskog okruženja za agentne sustave potrebno je definirati parametre koji trebaju biti zadovoljeni kako bi neko simulacijsko okruženje dolazilo u obzir za odabir. Ne postoji generalno najbolja platforma za simulacije rada agenata. Neke su platforme prikladnije za proces učenja agentnih tehnologija, neke su prikladnije za simulaciju agenata potrebnih za društvena istraživanja, a neke su prikladnije za istraživanja u tehničkim znanostima. Kod odabira platforme za simulaciju na kojoj će se provesti simulacije potrebne za istraživanje u sklopu ove disertacije postavljeni su odgovarajući uvjeti koji su podijeljeni u dvije skupine, u skupinu obaveznih i skupinu poželjnih uvjeta.

U obavezne uvjete spadaju sljedeći uvjeti:

*Obavezan uvjet 1:* platforma treba omogućavati programski jezik kojim je moguće programirati kako okruženje tako i agente;

*Obavezan uvjet 2:* platforma mora omogućavati implementaciju dovoljno složenih modela kako bi se mogao implementirati model kojeg ova disertacija predlaže;

*Obavezan uvjet 3:* platforma mora omogućavati ekstrakciju internih podataka o stanjima agenata za vrijeme izvršavanja njihovih zadataka – ovaj uvjet je obavezan zbog naknadne analize podataka koji će se dobiti izvršavanjem simulacije kako bi se mogla provjeriti uspješnost razvijenog modela.

Kao što je već rečeno, pri odabiru platforme su uz obavezne uvjete postavljeni i poželjni uvjeti. To su sljedeći uvjeti:

*Poželjan uvjet 1:* platforma mora omogućavati što brži razvoj bez utjecaja na kvalitetu izgrađenog sustava;

*Poželjan uvjet 2:* platforma mora biti dobro dokumentirana;

*Poželjan uvjet 3:* platforma mora biti dokazano korištena u neovisnim istraživanjima i izvan institucije gdje je razvijena;

*Poželjan uvjet 4:* platforma mora biti prilagođena aktualnim verzijama operacijskih sustava (zadnja verzija platforme ne smije biti starija od dvije godine);

*Poželjan uvjet 5:* po mogućnosti platforma treba biti besplatna za korištenju unutar znanstvenih istraživanja;

*Poželjan uvjet 6:* po mogućnosti platforma treba biti otvorenog koda ukoliko se u budućnosti odluči nastaviti razvijati model unutar iste platforme (kako bi se platforma mogla prilagođavati specifičnim zahtjevima koje eventualno daljnji razvoj modela može postaviti pred platformu).

## **4.2. Odabir prikladne agentne platforme**

Pri odabiru prikladne agentne platforme na kojoj će se izraditi simulacija definiranog modela u obzir za odabir se neće uzeti samo simulacijske agentne platforme već općenito

agentne platforme kako bi se povećala mogućnost odabira prikladne platforme, no za očekivati je da će one platforme koje imaju i simulacijske osobine biti u prednosti.

Zbog svojih svojstva agenti su jedan od trendova razvoja informacijske i komunikacijske tehnologije. Stoga je razumljivo da je razvijen veći broj raznih platformi koje omogućavaju rad agenata. Ukupno je 85 agentnih platformi uzeto u razmatranje pri izradi ove disertacije. Ove su agentne platforme prikazane Tablicom 4.1.

Tablica 4.1. Agentne platforme koje su uzete u obzir pri odabiru prikladne platforme za simulaciju modela razvijenog unutar ove disertacije.

| Agent Cell         | Agent Factory  | AgentScript   | AgentSheets        | Altreva Adaptive Modeler |
|--------------------|----------------|---------------|--------------------|--------------------------|
| AnyLogic           | AOR Simulation | Ascape        | Behaviour Composer | Brahms                   |
| Breve              | BSim           | CloudSim      | Cormas             | CRAFTY                   |
| CybelePro          | D-OMAR         | DigiHive      | Echo               | EcoLab                   |
| Envision           | Eve            | ExtendSim     | FLAME              | FLAME GPU                |
| FlexSim            | Framsticks     | GAMA          | GALATEA            | GridABM                  |
| GrowLab            | HLA_AGENT      | HLA_RePast    | IDEA               | Insight Maker            |
| JAMEL              | JAMSIM         | JAnus         | JAS                | JASA                     |
| JAS-mine           | JCASim         | jES           | LSD                | MACSimJX                 |
| MASON              | MASS           | MASyV         | Mathematica        | MATSim                   |
| Mesa               | Mimosa         | MIMOSE        | MOBIDYC            | Mobility Testbed         |
| Modgen             | NetLogo        | OBEUS         | Pandora            | PDES-MAS                 |
| PedSim             | PS-I           | Repast-J      | Repast HPC         | Repast Symphony          |
| Scratch            | SEAS           | SeSAm         | SimAgent           | SimBioSys                |
| SimEvents (MATLAB) | Simio          | SimJr         | SimSketch          | Simul8                   |
| SOARS              | StartLogo      | StartLogo TNG | Sugarscape         | Swarm                    |
| TerraME            | UrbanSim       | VisualBots    | VSEit              | Xholon                   |

Sada slijedi razmatranje ispunjavanja pojedinih uvjeta koji su prethodno postavljeni pred platforme koje kandidiraju za odabir. Prvi obavezni uvjet je bio mogućnost programiranja ponašanja kako agenata tako i okruženja nekim programskim jezikom. U Tablici 4.2. su prikazani sustavi iz Tablice 4.1. koji ispunjavaju ovaj uvjet.

Tablica 4.2. Sustavi koji ispunjavaju Obavezan uvjet 1

| Agent Cell         | Agent Factory  | AgentScript | AgentSheets        | Altreva Adaptive Modeler |
|--------------------|----------------|-------------|--------------------|--------------------------|
| AnyLogic           | AOR Simulation | Ascape      | Behaviour Composer | Brahms                   |
| Breve              | BSim           | CloudSim    | Cormas             | CRAFTY                   |
| CybelePro          | D-OMAR         | DigiHive    | Echo               | EcoLab                   |
| Envision           | Eve            | ExtendSim   | FLAME              | FLAME GPU                |
|                    | Framsticks     | GAMA        | GALATEA            | GridABM                  |
| GrowLab            | HLA_AGENT      | HLA_RePast  | IDEA               | Insight Maker            |
| JAMEL              | JAMSIM         | JAnus       | JAS                | JASA                     |
| JAS-mine           | JCASim         | jES         | LSD                | MACSimJX                 |
| MASON              | MASS           | MASyV       | Mathematica        | MATSim                   |
| Mesa               | Mimosa         |             | MOBIDYC            | Mobility Testbed         |
| Modgen             | NetLogo        | OBEUS       | Pandora            | PDES-MAS                 |
| PedSim             |                | Repast-J    | Repast HPC         | Repast Symphony          |
|                    | SEAS           |             | SimAgent           | SimBioSys                |
| SimEvents (MATLAB) |                | SimJr       | SimSketch          |                          |
| SOARS              |                |             | Sugarscape         | Swarm                    |
| TerraME            |                |             | VSEit              |                          |



Izbacivanjem onih agentnih platformi koje ne omogućavaju programiranje agenata i okruženja nekim programskim jezikom ostalo nam je 70 kandidatskih platformi. Sada se prelazi na provjeru ispunjavanja drugog uvjeta, odnosno uvjeta koji traži da platforma mora omogućavati implementaciju dovoljno složenih modela kako bi se mogao implementirati model kojeg ova disertacija predlaže. Abar, Theodoropoulos, Lemariner, i O'Hara klasificirali su agentne platforme prema njihovim mogućnostima u modeliranju agentnih svjetova [54]. Oni su po ovom kriteriju podijelili agentne platforme u četiri kategorije (slaba, srednja, visoka i ekstremno jaka). To će ovdje biti iskorišteno te će iz tablice preostalih kandidatskih agentnih platformi biti izbačene one platforme koje su Abar, Theodoropoulos, Lemariner, i O'Hara klasificirali kao slabe i srednje u smislu mogućnosti modeliranja agentnih svjetova. Ovo je prikazano Tablicom 4.3.

Tablica 4.3. Agentne platforme koje zadovoljavaju Obavezan uvjet 1 i Obavezan uvjet 2

|                    |                |            |            |                 |
|--------------------|----------------|------------|------------|-----------------|
| Agent Cell         |                |            |            |                 |
| AnyLogic           | AOR Simulation | Ascape     |            | Brahms          |
|                    | BSim           | CloudSim   |            | CRAFTY          |
| CybelePro          | D-OMAR         |            | Echo       | EcoLab          |
|                    |                |            |            | FLAME GPU       |
|                    |                | GAMA       |            | GridABM         |
|                    | HLA_AGENT      | HLA_RePast |            |                 |
|                    |                |            | LSD        |                 |
| MASON              | MASS           |            |            | MATSim          |
|                    | NetLogo        |            | Pandora    | PDES-MAS        |
|                    |                | Repast-J   | Repast HPC | Repast Symphony |
|                    | SEAS           |            |            |                 |
| SimEvents (MATLAB) |                |            |            |                 |
|                    |                |            |            | Swarm           |

Napomena: Redovi u kojima više nema kandidatskih agentnih platformi su izuzeti iz tablice.

Nakon što se primijenila selekcija izostavljanjem onih agentnih platformi koje ne zadovoljavaju *Obavezan uvjet 1* i *Obavezan uvjet 2*, ostala je još 31 agentna platforma koja je u razmatranju za odabir. *Obavezan uvjet 3* zahtjeva mogućnost ekstrakcije internih podataka o stanjima agenata za vrijeme izvršavanja njihovih zadataka kako bi se ovi podaci mogli naknadno obrađivati. Zbog većeg broja kandidatskih platformi koje su preostale ovaj uvjet se neće odmah provjeravati već će se prijeći na poželjne uvjete, s tim da će se *Obavezni uvjet 3* provjeriti na kraju selekcije. Ovakav odabir redosljeda ne utječe na krajnji rezultat selekcije ali utječe na skraćivanje vremena istraživanja jer u dostupnim člancima ne postoji objavljena klasifikacija po ovom kriteriju. Stoga će se daljnja selekcija nastaviti po poželjnim uvjetima.

*Poželjan uvjet 1* traži da platforma omogućava što brži razvoj bez utjecaja na kvalitetu izgrađenog sustava. Po ovom kriteriju Abar, Theodoropoulos, Lemariner, i O'Hara su istraživanje također proveli gdje su platforme klasificirali u tri skupine – laganu, srednju i tešku.

Iz tablice kandidatskih agentnih platformi uklonit će se one koje su svrstane u srednju i tešku kategoriju. Nakon primjene ovog kriterija otpale su sve kandidatske agentne platforme osim platforme NetLogo. Sada je potrebno provjeriti zadovoljava li ova agentna platforma *Obavezan uvjet 3* kako bi definitivno bila odabrana. Ukoliko ovaj uvjet nije zadovoljen bit će potrebno smanjivati kvalitativne kriterije iskazane kod Obaveznog uvjeta 2 i Poželjnog uvjeta 1 kako bi se dobili drugi kandidati za odabir. Definirani *Obavezan uvjet 3* zahtijevao je funkcionalnost ekstrakcije internih podataka o stanjima agenata za vrijeme izvršavanja njihovih zadataka kako bi se poslije mogla provesti analiza ovih podataka. Proučavanjem dokumentacije NetLoga vidljivo je kako sustav omogućava ekstrakciju rezultata u različite izlazne formate, a isto tako omogućava i kreiranje datoteka sa izlaznim tokovima podataka direktno iz programskog koda. Sustav omogućava i spajanje na relacijske baze podataka korištenjem sučelja sustava za upravljanje relacijskim bazama podataka [55]. Sve ovo je i više nego dovoljno da bi se *Obavezan uvjet 3* mogao smatrati zadovoljenim tako da se može zaključiti da je NetLogo odabrana agentna platforma koja će se koristiti za implementaciju, a zatim i za evaluaciju modela koji se razvija unutar ove disertacije.

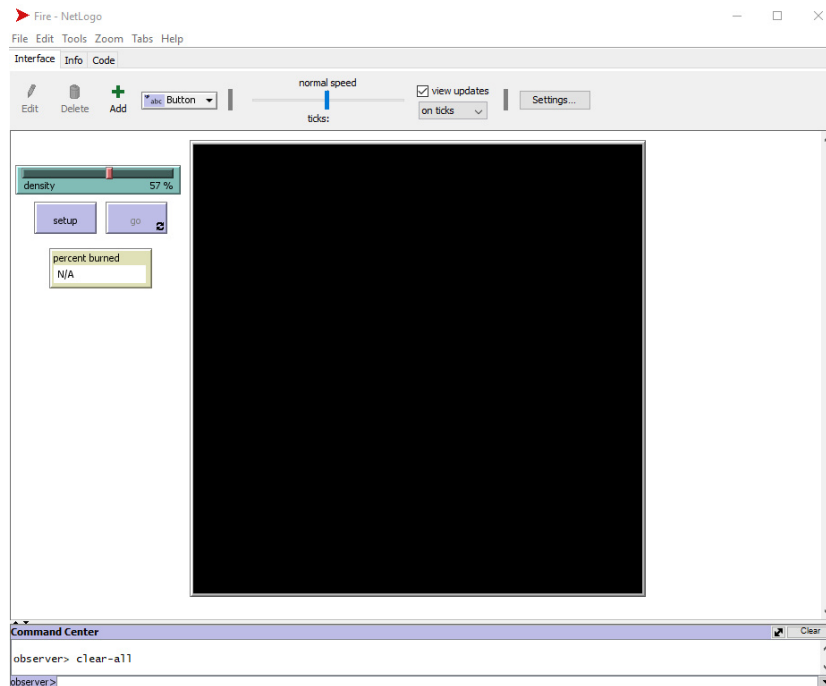
U nastavku se ukratko opisuje sustav NetLogo uz razmatranje preostalih, neisključujućih, poželjnih uvjeta koji su postavljeni pred odabrani sustav.

### **4.3. Sustav NetLogo**

NetLogo je programsko okruženje namijenjeno za izradu višeagentnih simulacija i koristi se za brzu i jednostavnu izradu modela. Arhitektura sustava NetLogo je temeljena na događajima gdje se agentima kroz naizgled jednostavno reaktivno ponašanje mogu prikazati složeni obrasci ponašanja. Kad je sustav NetLogo bio predstavljen 1999. godine, predstavljen je kao programabilno okruženje za modeliranje koje omogućuje simulaciju kompleksnih sustava koji se razvijaju kroz vrijeme [56]. Danas je ovo platforma za istraživanja kod koje se mogu odmah izraditi prototipovi i testirati teorijsko istraživanje uz vizualizaciju rezultata [57].

Sustav se redovito nadograđuje. U trenutku ove analize posljednja nadogradnja sustava je objavljena 26. rujna 2019. čime je zadovoljen ranije definiran *Poželjan uvjet 4* koji traži da odabrana agentna platforma mora biti prilagođena aktualnim verzijama operacijskih sustava odnosno kao mjerilo je zadano da zadnja verzija platforme ne smije biti starija od dvije godine. Korisničko sučelje sustava NetLogo prikazano je na Slici 4.2.

Sustav NetLogo je sustav otvorenog koda koji se besplatno distribuira pod generalnom javnom licencom GPL (akronim od engl. *General Public License*) koja podrazumijeva pravo na korištenje u bilo koju svrhu, pravo na izradu kopija i pravo na proučavanje, mijenjanje i redistribuciju modificiranog programa. Ovim su ispunjeni *Poželjni uvjet 5* i *Poželjniji uvjet 6* koji su upravo zahtijevali besplatnu distribuciju i otvoreni kod.



Slika 4.2. Korisničko sučelje sustava NetLogo

*Poželjan uvjet 2* je tražio od kandidatskih agentnih platformi dobru dokumentiranost. Na web-u se nalazi preko 18.000.000 objavljenih dokumenata (preko 700.000 dokumenata koji sadrže naziv sustava i ključnu riječ *documentation*) o sustavu NetLogo tako da je zadovoljen i ovaj postavljeni uvjet. Izrazita većina ovih dokumenata je kreirana od neovisnih institucija i pojedinaca koji su se odlučili upravo za NetLogo pri izboru simulacijske platforme za svoja istraživanja. Ovo je dokaz ispunjavanja i *Poželnog uvjeta 3* koji je zahtijevao da odabrana platforma bude dokazano korištena i u neovisnim istraživanjima i izvan institucije gdje je razvijena.

Programski jezik Netlogo je lagan za učenje i korištenje, prenosiv je, dokumentacija je opširna, jednostavna je instalacija i besplatno korištenje. Svaki NetLogo model posjeduje dva elementa. To su programski kod i korisničko sučelje. Unutar programskog koda definirano je

ponašanje agenata i okruženja, dok se unutar korisničkog sučelja postavljaju određeni parametri koje kreatori modela odluče dozvoliti korisniku da ih mijenja za vrijeme izvođenja simulacije. Moguće je, koristeći programski alat NetLogo napraviti tisuće agenata čiji rad je unutar simulacije prikazan kao paralelni rad. Koristeći NetLogo može se istražiti djelovanje agenata na mikro razini ali i kako se to djelovanje odražava na cijeli sustav odnosno na makro razinu [58].

Sustav NetLogo osigurava izradu sljedeća četiri različita predefinjirana tipa agenata:

- Zakrpe (engl. *patches*) – polja diskretiziranog svijeta po kojima se agenti kreću. Veličinu polja i broj polja definiraju kreatori modela.
- Pokretni agenti ili kornjače (engl. *turtles*) – ovi agenti obavljaju svoje zadatke locirani na dodijeljenim poljima okruženja. Njihovo glavno svojstvo je mogućnost promjene lokacije, odnosno polja na kojem djeluju.
- Veze (engl. *links*) – ovo su komunikacijski agenti koji osiguravaju komunikaciju između dva ili više agenata ostalih tipova koji djeluju unutar modela.
- Promatrači (engl. *observers*) – agenti kojima je dodijeljena uloga nadzora simulacijskog okruženja.

Osim ovdje navedenih tipova agenata, sustav NetLogo omogućuje korisniku programiranje i vlastitih tipova agenta. Sustav naravno osigurava i vremensku komponentu u modeliranju. Diskretizirano vrijeme omogućeno je uvođenjem takta koji se ovdje mjeri tzv. otkucajima (engl. *ticks*).

Sustav NetLogo je sustav zasnovan na programskom jeziku Java te se izvršava unutar Javinog izvršnog stroja što mu omogućava jednostavnu prenosivost između različitih operacijskih sustava. Čak je omogućeno formatiranje razvijenih modela u formu Java appleta što omogućuje multiplatformsko pokretanje modela i izvan okruženja sustava. Razvijen je i veliki broj gotovih modela s primjenama u različitim područjima znanosti i inženjerstva.

## **5. Implementacija modela odlučivanja u odabranom simulacijskom okruženju**

U trećem poglavlju ove disertacije definiran je matematički model protupožarne agentne arhitekture broda. Ovo poglavlje donosi prikaz implementacije ovog modela u simulacijskom okruženju NetLogo koje je odabrano kao prikladno agentno okruženje u prethodnom, četvrtom poglavlju. Poglavlje počinje odjeljkom unutar kojeg će se razmotriti oni elementi odabranog broda iz prakse (tankera za kemijske i uljne produkte *Dvina Gulf* izgrađenog u *Hrvatskoj brodogradnji Trogir d.o.o.*) koji su zanimljivi području istraživanja disertacije. Slijedi odjeljak u kojem se prilaže interpretacija odabranih elemenata ovog broda kroz sve elemente prethodno definiranog matematičkog modela. Kraj poglavlja sadrži prikaz razvijenog prototipa definiranog modela agentnog sustava koji je izrađen u simulacijskom okruženju NetLogo. Razvijena aplikacija omogućava praćenje promjena varijabli, kako na ručno postavljenim početnim simulacijskim uvjetima, tako i generiranje opsežnog skupa simulacija koje obuhvaćaju cijele segmente početnih uvjeta postavljenih od strane korisnika te praćenje rezultata ovakvih simulacija. Kao primjer bit će prikazano izvršavanje jedne simulacije požara kroz promjenu varijabli koje sustav prati.

### **5.1. Prikaz odabranih elemenata broda Dvina Gulf**

Prije implementacije definiranog modela bilo je potrebno odabrati neki stvarni brod čiji bi elementi poslužili kao podloga za izradu aplikacije koja će simulirati požar odnosno detekciju i gašenje požara na brodu unutar agentne arhitekture. U ovu svrhu je odabran tanker za prijevoz kemijskih i uljnih produkata od 45000 metričkih tona koji je namijenjen za prijevoz IMO II proizvoda u 20 tankova, duljine 183 m i širine 32,2 m. Ovaj brod je dovršen kao Novogradnja 329 u *Hrvatskoj brodogradnji Trogir d.o.o.* za ruskog naručitelja *Viterlef Management Limited* koji ima formalno sjedište na Britanskim Djevičanskim Otocima. IMO broj broda je 9336464, MMSI broda je 312332000, a pozivni znak broda je V3YM4. Proizvođač glavnog motora broda je korejska tvrtka *Hyundai Heavy Industries* i ugrađen je model sa šest cilindara MAN-B&W 6S60MC. Ovaj sporohodni dvotaktni dizel motor ima snagu od 14582 konjskih snaga ili 10725 kW koju razvija pri 97 okretaja u minuti. Opremljen je s dva seta generatora opremljena pomoćnim motorima H. Ceglieski MAN-Diesel 6L28/32H koji razvijaju snagu od po 1260 kW pri 720 okretaja u minuti, a služe kao pogon generatorima električne energije AVK, model

DSG99 L1-10 nazivne snage 1499 kVA, 1923 A 3x450 V, 720 okretaja u minuti uz  $\cos \varphi = 0.8$ , 60 Hz. Brod ima dva uljem ložena kotla za proizvodnju zasićene pare koje je proizvela tvrtka *Aalborg* model OM-13000, svaki kapaciteta od 13 t/h pri 8 bara tlaka. Kada u plovidbi radi glavni motor, može se koristiti osovinski generator snage 1875 kVA. Brod je dovršen 2017. godine te danas plovi pod imenom *Dvina Gulf* i pod zastavom države Belize. Izgrađen je prema pravilima specijalizirane ustanove mjerodavne za tehnički nadzor brodova Det Norske Veritas Germanischer Lloyd DNV-GL [59] u klasi kao tanker za kemijske i uljne produkte oznake:

ESP BMW(T) CCO E0 HL(1.5) LAC NAUT(OC) NAUTICUS (Newbuilding) OPP-F Plus(1) TMON VCS(2) Ship Type 2, a2.3, b3, c3, v3, f2, k, str.0.1.

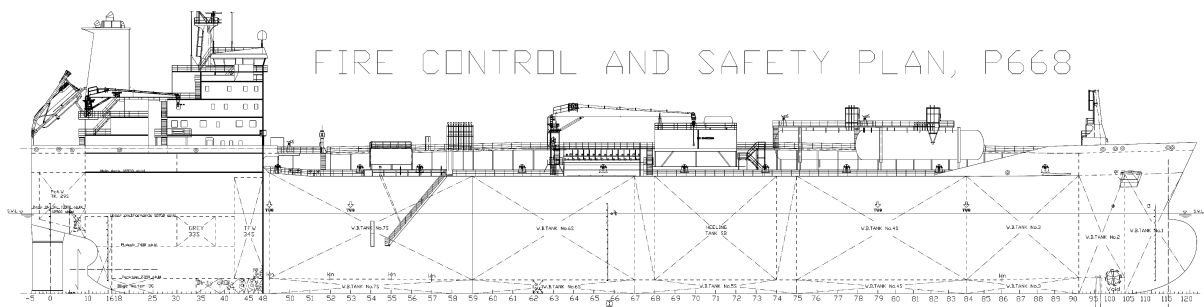
Slika 5.1. prikazuje fotografiju ovog broda u plovidbi.

Brod *Dvina Gulf* je opremljen sustavom za detekciju i alarmiranje požara, kao i sustavima za gašenje požara koji su u skladu s IMO rezolucijom MSC.98(73) [50]. Vatrodojavni sustav za detekciju vatre ugradila je norveška tvrtka *Westcon*. Sama vatrodojavna centrala proizvod je švedskog proizvođača *Consilium*. Model vatrodojavne centrale koji je ugrađen na brodu je Salwico CS4000 Fire Detection System. Ova vatrodojavna centrala dobiva informacije s ugrađenih adresabilnih senzora. Ugrađeni su senzori za detekciju dima, topline, plamena te ručni dojavljivači. Vatrodojavna centrala nakon primanja odgovarajućeg signala s adresabilnog senzora daje svjetlosne i zvučne alarme. Proizvođač ovih adresabilnih senzora je norveška tvrtka *Autronica*.



Slika 5.1. Tanker *Dvina Gulf* u plovidbi [60]

Brod Dvina Gulf posjeduje integrirani funkcionalni sustav kojim je moguće djelovati na pojedine elemente kako bi se djelovalo na ograničavanje požara. Tako je ovim sustavom omogućeno djelovanje na daljinu na magnetne zatvarače vrata kao i na kontrole ventilacije kako bi se uslijed pravodobnog djelovanja postiglo zadržavanje požara u prostoru u kojem je izbio. Pohranjivanje zapisa o alarmima je također osigurano kako bi se ovakve situacije mogle u slučaju potrebe analizirati. Ovo je implementirano kroz sustav zapisivanja relevantnih podataka u svojevrsnu „crnu kutiju“ (engl. *Voyage Data Recorder - VDR*). Slika 5.2. prikazuje dio nacрта sustava vatrodjave te sigurnosnog plana broda.

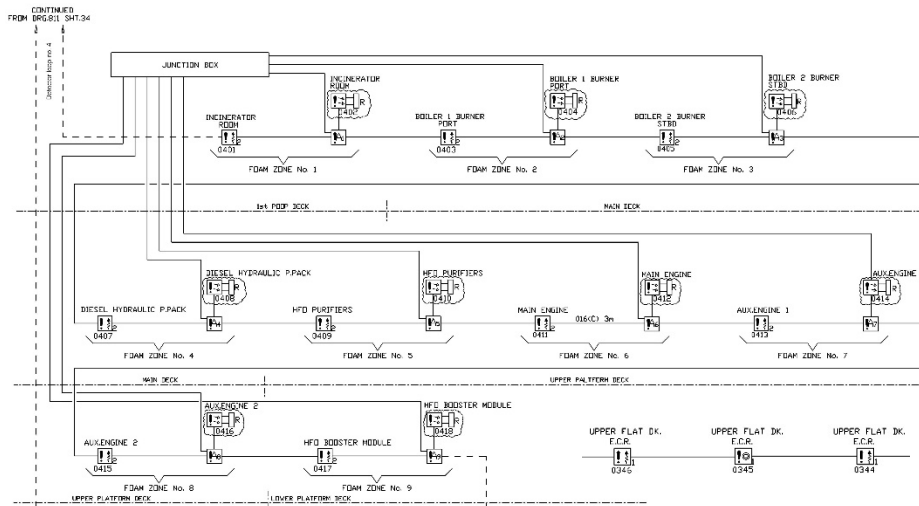


Slika 5.2. Dio nacрта 0-6788 Dvina Gulf, model vatrokontrolne i sigurnosne plan

U trećem poglavlju ove disertacije opisano je kako se vatrodjavska centrala sastoji od jedne ili više grupa senzora koji su serijski povezani. Svaki senzor ima svoju adresu kako bi vatrodjavska centrala mogla detektirati koji je senzor poslao signal o promjeni stanja te pokrenuti odgovarajuće alarme. Slika 5.3. prikazuje detalj spajanja jedne takve petlje senzora na vatrodjavnu centralu. Konkretno, na ovoj je slici prikazana shema spajanja detektorske petlje 4 koja se nalazi u najosjetljivijem dijelu broda što se tiče mogućnosti izbijanja požara – u strojnici broda. Lista elemenata prikazanih Slikom 5.3. nalazi se prikazana u Tablici 5.1. gdje su sadržani nazivi ovih elemenata.

U trećem poglavlju rada su kao protupožarni elementi broda, uz vatrodjavnu centralu, navedeni i posada kao i sustav za gašenje vatre. Kompleksnost detekcije i gašenja požara na realnom brodu obuhvaća aktivnosti članova posade sukladno njihovim zaduženjima usklađenim s Međunarodnim kodeksom kojim se određuju pravila za siguran rad brodova i sprečavanje zagađivanja, ISM kodeks [51] koje je propisala kompanija za menadžment posade [61]. Članovi posade realnog broda koji tvore tim za procjenu, nakon detekcije požara vatrodjavnom centralom koja često ima i lažne detekcije požara, na požarištu utvrđuju razmjere i specifičnosti požara. Potom se na stanici za prikupljanje okuplja posada koja tvori

tim za gašenje požara s opremom za gašenje. Sve navedene aktivnosti koje obavlja posada zahtijevaju vrijeme, stručnost i uvježbanost. Svaki član posade na požarištu mora imati svu potrebnu zaštitnu opremu, mora posjedovati svjedodžbe o osposobljenosti za gašenje požara i aktivno sudjelovati u periodičnim vatrogasnim vježbama na brodu. Unatoč tome, događa se nepravodobno gašenje požara uslijed nedovoljne uvježbanosti, panike, kašnjenja, krive procjene i često umora ili ozljede posade.



Slika 5.3. Detalj spajanja detektorske petlje 4 iz strojarnice

Tablica 5.1. Elementi sa Slike 5.3.

| adresa | engleski nazivi                    | hrvatski nazivi                      |
|--------|------------------------------------|--------------------------------------|
| 0344   | ENGINE CONTROL ROOM SMOKE DET.     | KONTROLNA SOBA STROJARNICE DET. DIMA |
| 0346   | ENGINE CONTROL ROOM SMOKE DET.     | KONTROLNA SOBA STROJARNICE DET. DIMA |
| 0401   | INCENERATOR ROOM SMOKE DETECTOR    | SPALIONICA DETEKTOR DIMA             |
| 0402   | INCENERATOR ROOM FLAME DETECTOR    | SPALIONICA DETEKTOR PLAMENA          |
| 0403   | BOILER 1 BURNER SMOKE DETECTOR     | LOŽ. KOTAO 1 DETEKTOR DIMA           |
| 0404   | BOILER 1 BURNER FLAME DETECTOR     | LOŽ. KOTAO 1 DETEKTOR PLAMENA        |
| 0405   | BOILER 2 BURNER SMOKE DETECTOR     | LOŽ. KOTAO 2 DETEKTOR DIMA           |
| 0406   | BOILER 2 BURNER FLAME DETECTOR     | LOŽ. KOTAO 2 DETEKTOR PLAMENA        |
| 0407   | DIESEL HYDRAULIC P.PACK SMOKE DET. | DIZ. HIDRAULIKA DETEKTOR DIMA        |
| 0408   | DIESEL HYDRAULIC P.PACK FLAME DET. | DIZ. HIDRAULIKA DETEKTOR PLAMENA     |
| 0409   | HFO PURIFIERS SMOKE DET.           | SEPARATOR GORIVA DETEKTOR DIMA       |
| 0410   | HFO PURIFIERS FLAME DET.           | SEPARATOR GORIVA DETEKTOR PLAMENA    |
| 0411   | MAIN ENGINE SMOKE DET.             | GLAVNI MOTOR DETEKTOR DIMA           |
| 0412   | MAIN ENGINE FLAME DET.             | GLAVNI MOTOR DETEKTOR PLAMENA        |
| 0413   | AUX. ENGINE 1 SMOKE DET.           | POMOĆNI MOTOR 1 DETEKTOR DIMA        |
| 0414   | AUX. ENGINE 1 FLAME DET.           | POMOĆNI MOTOR 1 DETEKTOR PLAMENA     |
| 0415   | AUX. ENGINE 2 SMOKE DET.           | POMOĆNI MOTOR 2 DETEKTOR DIMA        |
| 0416   | AUX. ENGINE 2 FLAME DET.           | POMOĆNI MOTOR 2 DETEKTOR PLAMENA     |
| 0417   | HFO BOOSTER MODULE SMOKE DET.      | PUMPE GORIVA DETEKTOR DIMA           |
| 0418   | HFO BOOSTER MODULE FLAME DET.      | PUMPE GORIVA DETEKTOR PLAMENA        |



Sustav za gašenje vatre na brodu Dvina Gulf sastoji se od više podsustava. Sustav za gašenje vatre nadgrađa broda izveden je instalacijom sprinklera koja uključuje i smještajne jedinice za časnike i posadu. Brod ima i dvije požarne pumpe za napajanje hidrantske mreže.

Na brodu su raspoređeni i lokalni ručni uređaji za gašenje požara. Pored ovih uređaja na brodu su ugrađena i dva fiksna vatrogasna sustava. To su sljedeći sustavi:

- sustav za gašenje plinom CO<sub>2</sub> i
- sustav za gašenje pjenom.

Oba prethodno navedena sustava je proizvela i ugradila norveška tvrtka za razvoj, proizvodnju i ugradnju pomorskih vatrogasnih sustava *Wilhelmsen Technical Solutions*.

Sustav za gašenje pjenom ima na ovom brodu dvije izvedbe: sustav niskoekspandirajuće pjene za gašenje palube i palubne opreme te sustav visokoekspandirajuće pjene za gašenje zatvorenih prostora.

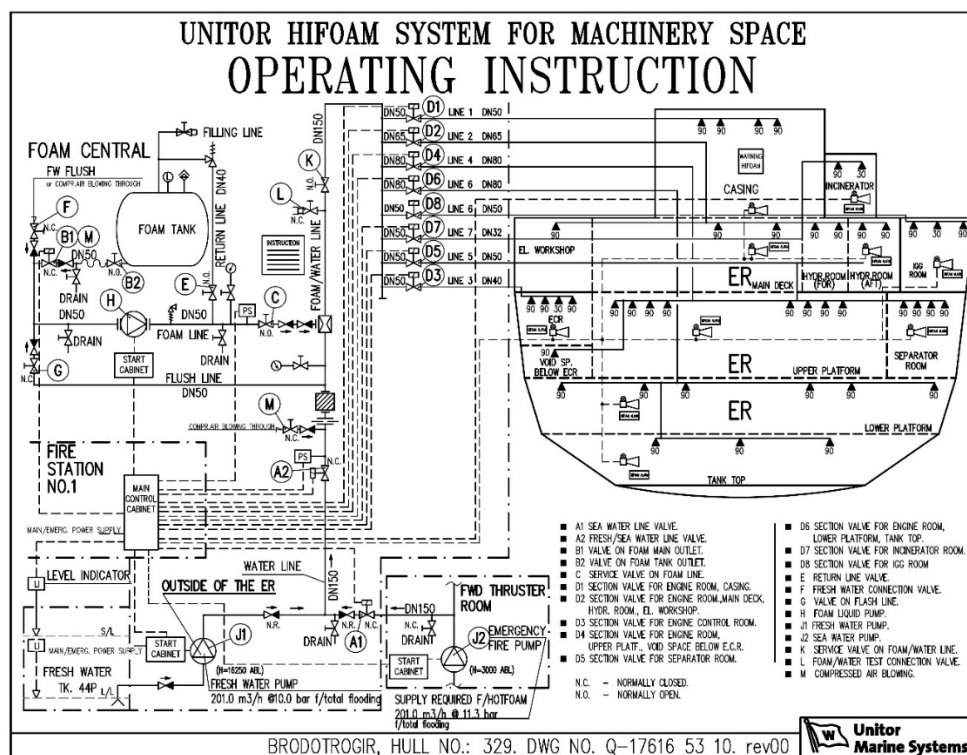
Sustav za gašenje visokoekspandirajućom pjenom Unitor HiFoam ugrađen je za gašenje sljedećih zatvorenih prostora:

- prostor strojarnice iznad glavne palube,
- prostor glavnog motora,
- sobe hidraulike,
- elektrotehničke radionice,
- prostora kotlova,
- prostora strojarnice ispod glavne kontrolne sobe,
- strojarnice gornje platforme,
- prostorije separatora,
- strojarnice donje platforme,
- prostorija tankova strojarnice i
- prostorije generatora inertnog plina.

Sustavom ventila koji se daljinski upravljaju moguće je gasiti prostore strojarnice i skladišne tankove. Slika 5.4. prikazuje detalj uputa za gašenje strojarnice visokoekspandirajućom pjenom. Gašenje požara u strojarnici visokoekspandirajućom pjenom je moguće obavljati na dva načina. Prvi je parcijalni način gdje se pjena aplicira samo na jedan

dio prostora. U drugom slučaju je moguće primijeniti potpuno poplavlivanje strojnarnice visokoekspandirajućom pjenu. Ovo je i vidljivo na Slici 5.4. gdje je prikazano kako se prilikom gašenja požara u strojnarnici visokoekspandirajućom pjenu može upravljati ventilima kako bi se gašenje obavilo po segmentima označenih oznakama od D1 do D8, ali se u slučaju nekontroliranog požara može primijeniti i potpuno poplavlivanje strojnarnice pjenu. Za poplavlivanje visokoekspandirajućom pjenu klasifikacijski zavod DNV-GL zadao je zahtjev da prostor strojnarnice mora biti poplavljen unutar 10 minuta.

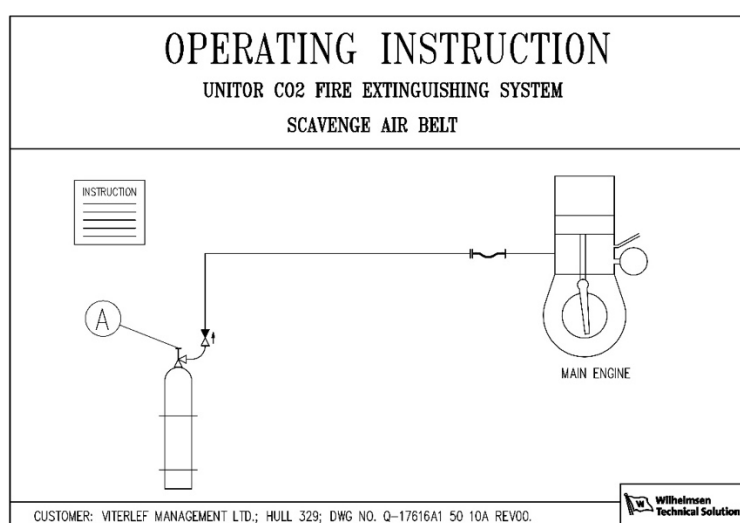
Proizvođač sustava Wilhelmsen Technical Solutions dao je upute za projektiranje i korištenje sustava pjene [62] kojeg je odobrio spomenuti klasifikacijski zavod. U uputama za korištenje sustava pjene priložen je izračun za cijeli sustav gašenja gdje je normiran i broj potrebnih generatora pjene te opisano gašenje svake prostorije s obzirom na sigurnosni faktor i preporuke klasifikacijskog društva. U strojnarnici se koristi dostatan broj generatora pjene za svaki štitićeni prostor prema volumenu prostorije. Ugrađeni Unitor generatori pjene (engl. *Unitor Foam Generator*) UFG-90 pri tlaku tekućine od 6 bara stvaraju s unutarnjim zrakom prostorije visokoekspandirajuću pjenu u omjeru 1:723. Volumen pjene ovisi i o upotrebnoj vodi (slatkoj ili morskoj) i sve to deklarira proizvođač u skladu s preporukama klasifikacijskog društva. Svaki UFG-90 stvara pjenu nominalnog kapaciteta 63 m<sup>3</sup>/min.



Slika 5.4. Upute za gašenje strojnarnice visokoekspandirajućom pjenu

Prostorija glavnog motora volumena 2191 m<sup>3</sup>, površine od 358 m<sup>2</sup> te visine od 4,56 m ima ugrađenih 6 komada UFG-90. Prema proizvođačkoj specifikaciji navedeni generatori pjenom ispune prostoriju u vremenu od 2:54 minute, ali radi sigurnosnog faktora pjenjenje traje do 5:48 minuta.

Prostorije loženog kotla imaju volumen od 1650 m<sup>3</sup>, površinu 125 m<sup>2</sup> i visoke su 13,4 m. Imaju ukupno 4 ugrađena UFG-90 koji obave pjenjenje prostorija u vremenu od 6:03 minute te s primjenom sigurnosnog faktora treba ih pjeniti do 6:33 minute. Totalna poplava strojarnice pjenom traje 7:12 minuta prema podacima dobivenih od proizvođača, a to odgovara postavljenom zahtjevu klasifikacijskog društva da se pjenjenje treba obaviti unutar 10 minuta.



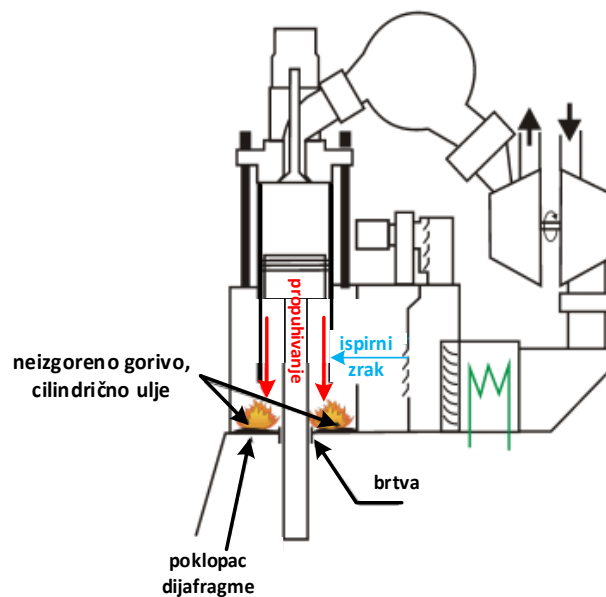
Slika 5.5. Dio uputa za gašenje CO<sub>2</sub> prostora ispirog zraka glavnog motora

Sustav za gašenje plinom koristi se za gašenje kuhinje, prostora ispirog zraka glavnog motora i kontrolne sobe strojarnice. U pitanju je sustav Unitor CO<sub>2</sub> kojega je odobrilo klasifikacijsko društvo. Proizvođačke specifikacije daju podatak za utrošak plina CO<sub>2</sub> u odnosu na volumen prostorije u iznosu od 0,56 kg/m<sup>3</sup>. Praktična uporaba ne zahtjeva stopostotnu koncentraciju plina u zraku, nego se koncentracija kreće u intervalu 30 % do 45 % prema propisima za svaki šticeći prostor [63].

Slika 5.5. prikazuje dio uputa za uporabu Unitor sustava gašenja s CO<sub>2</sub> plinom za prostor ispirog zraka glavnog motora. Prostor ispirog zraka glavnog motora štiti se lokalno iz cilindričnih boca od 45 kg CO<sub>2</sub> pojedinačno za svaki od šest cilindara glavnog motora. Cilindar i sustav za oslobađanje se nalazi u prostoriji glavnog motora na sigurnoj udaljenosti od glavnog motora. Slika 5.6. prikazuje primjer požara u prostoru ispirog zraka glavnog motora koji spada u jedan od najopasnijih požara koji se može dogoditi u strojarnici. Detekcija požara u tom

prostoru složen je proces koji nema jedinstveni senzor, nego se požar uočava posredno preko sljedećih parametara: porast temperature ispirog zraka, nepravilan rad turbine, previsoka temperatura ispušnih plinova, smanjena snaga i smanjeni broj okretaja motora te stvaranje dima u donjem dijelu motora [64].

Pored vatrogasnih sustava ovaj tanker za kemijske i uljne produkte mora biti opremljen prema [50] generatorom zasićenog inertnog plina (engl. *Inert Gas System - IGG*) koji se koristi za sušenje, inertiranje i uklanjanje zapaljivih plinova i kisika iz skladišnih tankova, dakle za ispunu prostora kada nema tereta ili u onim slučajevima kada skladišni tankovi nisu ispunjeni produktima do vrha, a sve u cilju zaštite života i imovine. Izvedeni su zasebni cjevovodi koji dovode inertni plin do skladišnih tankova koji pri tom sadržava 2-4 % kisika, a taj plin se proizvodi u generatoru potpunim izgaranjem goriva bez prisustva čađi. Na brodu Dvina Gulf ugrađen je generator inertnog plina proizvođača *Aalborg* model Smit Gas T, kapaciteta  $3750 \text{ m}^3/\text{h}$  pri 3 %  $\text{O}_2$ .



Slika 5.6. Požar u prostoru ispirog zraka glavnog motora

Prethodno opisane elemente vatrodojavnog sustava te sustava za gašenje broda Dvina Gulf je sada potrebno prikazati kao interpretaciju matematičkog modela protupožarne zaštite. Ovo je tema sljedećeg odjeljka ovog poglavlja.

## 5.2. Interpretacija odabranog broda u modelu protupožarne agentne arhitekture broda

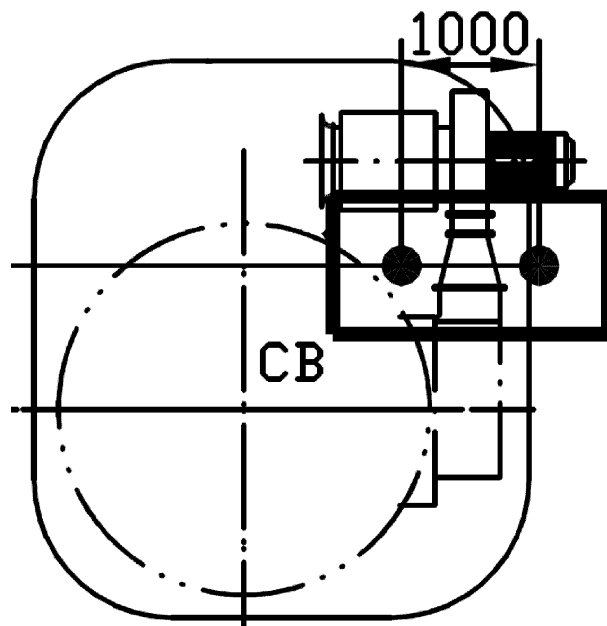
U trećem poglavlju ove disertacije je predstavljen model protupožarne agentne arhitekture broda. Definirani model dekomponira brod na skup prostorija u kojima se nalaze elementi relevantni za detekciju i gašenje požara. Ovi elementi su raspodijeljeni unutar prostorija, a svakoj je prostoriji dodijeljen agent koji nadzire dodijeljenu prostoriju i ukoliko je potrebno reagira. U tom modelu definirani su pojmovi kao što su prostorije okruženja, osnovne prostorne jedinice, klase elemenata okruženja, elementi okruženja te strukture svojstva - vrijednosti pridružene klasama elemenata okruženja i prostorijama okruženja kao i drugi pojmovi modela.

Sada je potrebno brod koji je u prethodnom odjeljku opisan prikazati kroz strukture definiranog modela. Naravno, za potrebe eksperimenta koji se proveo unutar izrade ove disertacije nije bilo potrebno prikazati sve strukture broda, već samo njegov reprezentativni dio koji je modeliran unutar izrađene aplikacije.

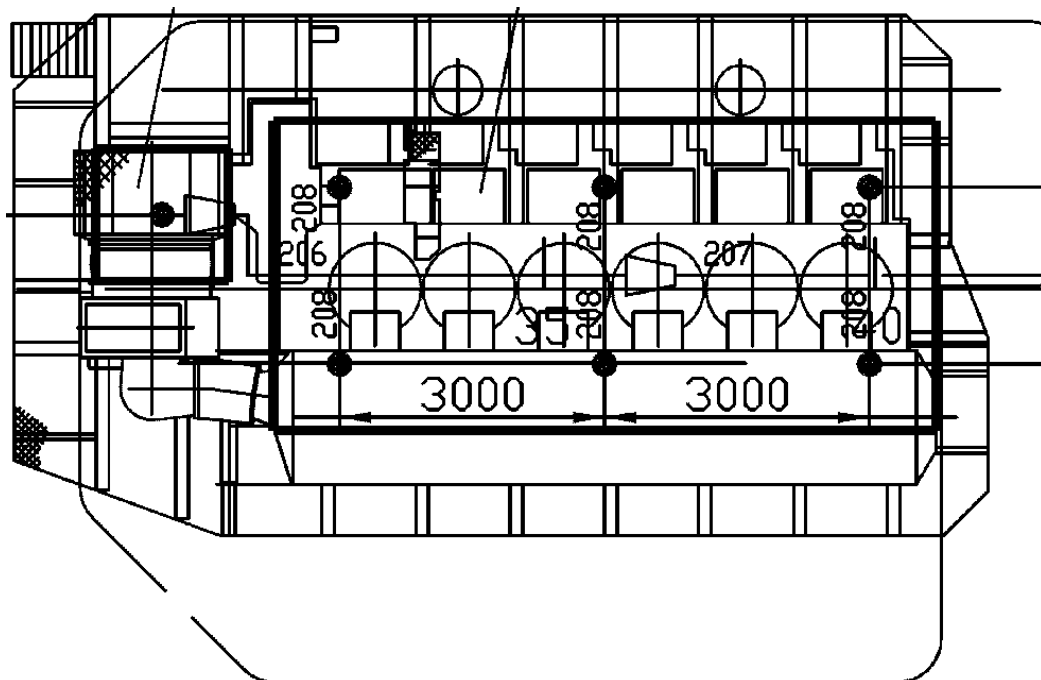
Za reprezentaciju broda je odabrano 5 prostorija unutar brodske strojarnice. To su sljedeće prostorije:

- prostorija loženog kotla 1 i prostorija loženog kotla 2. Ovo su tlocrtno identične prostorije. Tlocrt ovih prostorija prikazuje Slika 5.7.,
- prostorija strojarnice glavnog motora. Tlocrt ove prostorije prikazuje Slika 5.8.,
- kontrolna soba strojarnice. Tlocrt ove prostorije prikazuje Slika 5.9. i
- prostor ispirnog zraka glavnog motora. Tlocrt ove prostorije je prikazan kao Slika 5.10.

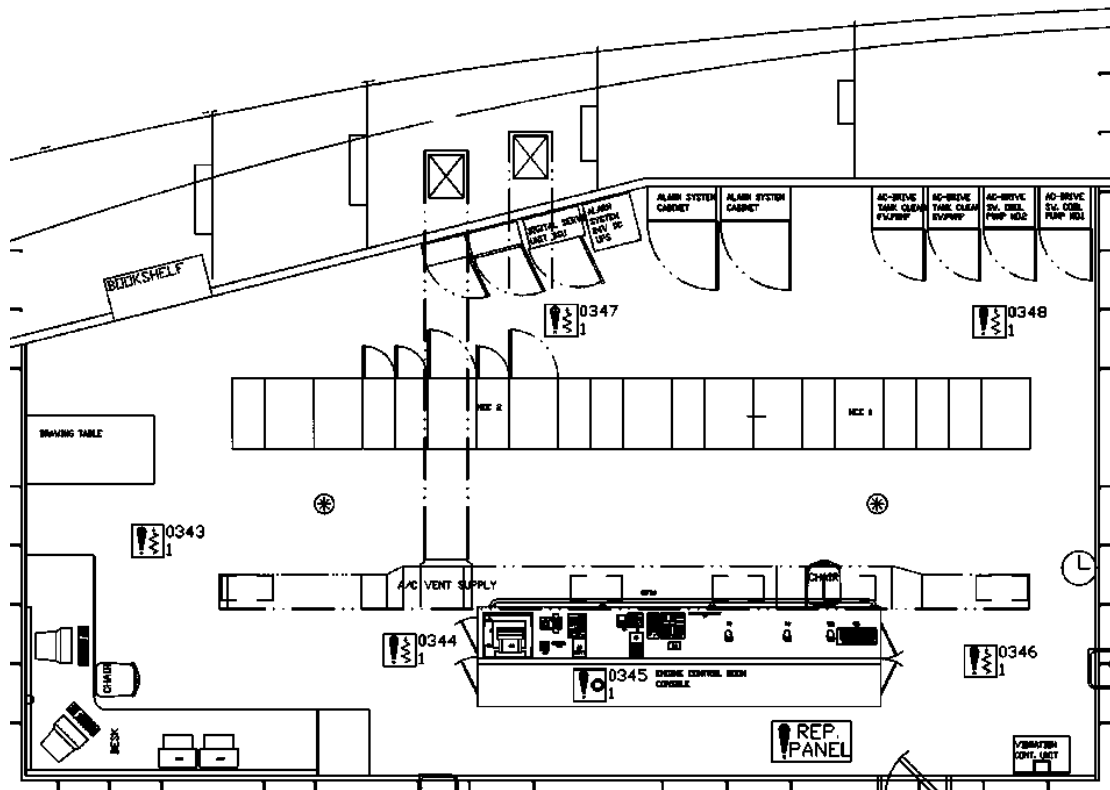
Prostor loženog kotla se pojavljuje kao redundantan. Na realnom brodu redundantnost se koristi zbog eventualnih kvarova. Ukoliko se jedna prostorija loženog kotla uništi požarom postoji druga koja će omogućiti nastavak plovidbe. Tri ostale prostorije nemaju redundanciju ni na realnom brodu ni u modelu, pa će požar većih razmjera u njima dovesti do nesposobnosti broda za daljnju plovidbu ukoliko te prostorije većim dijelom izgore. U simulaciji je to prikazano parametrom izgorenosti, odnosno postotkom izgorenosti prostorije. Taj broj pokazuje koliki je dio prostorije površinom bio izložen požaru te se može definirati postotak izgorenosti nakon kojeg se prostorija smatra neupotrebljivom.



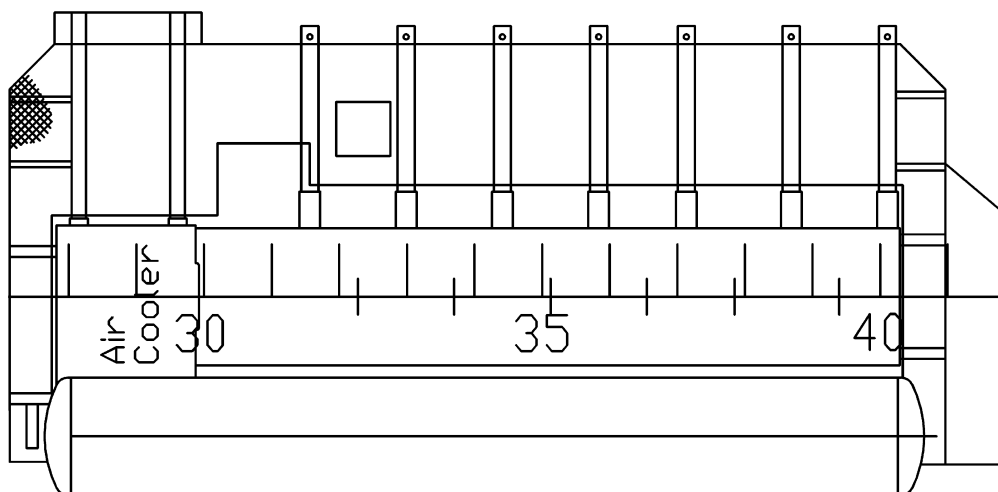
Slika 5.7. Tlocrt prostorija loženog kotla 1. ili 2.



Slika 5.8. Tlocrt strojarnice glavnog motora



Slika 5.9. Tlocrt kontrolne sobe strojarnice



Slika 5.10. Tlocrt prostora ispirnog zraka glavnog motora

Definirani matematički model protupožarne arhitekture broda je predvidio podjele prostorija na sektore kako bi se povećala vjerodostojnost, odnosno kako bi se model mogao testirati u što više slučajeva gdje se u različitim dijelovima prostorije dogodi požar. Ovi su se sektori unutar definiranog modela nazivali osnovnim prostornim jedinicama. Stoga se i ovdje

odabrane prostorije dijele na osnovne prostorne jedinice. Uvođenje osnovnih prostornih jedinica ovdje je omogućeno definiranjem koordinatnog sustava na razini tlocrta svake odabrane prostorije. Tako je svaka prostorija podijeljena na 16 jednakih dijelova gdje je tlocrt same prostorije smješten u prvi kvadrant koordinatne ravnine, a svaka se osnovna prostorna jedinica adresira s uređenim parom  $(m, n)$  gdje su  $m, n \in \{0,1,2,3\}$ .

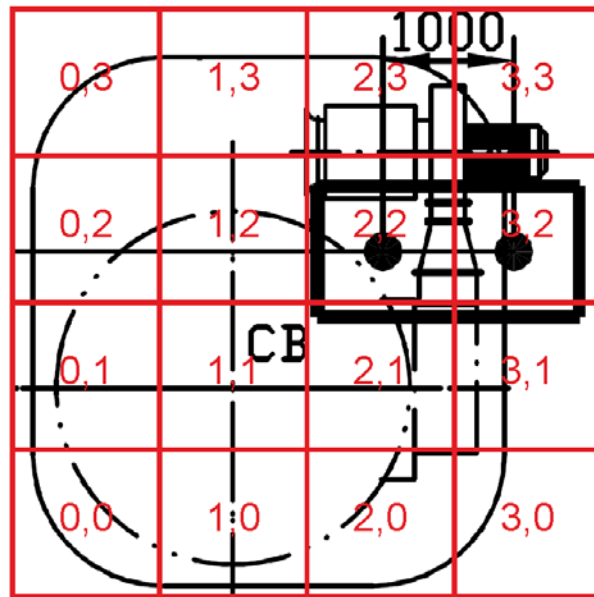
Slika 5.11. prikazuje primjer podjele prostorije loženog kotla 1 na osnovne prostorne jedinice.

Definirani matematički model agentne protupožarne arhitekture broda je predvidio skup klasa elemenata okruženja. To je generički skup unutar kojeg su definirane sve vrste objekata vezanih za vatrodjavu i gašenje požara koji se nalaze u promatranim prostorijama broda. Sada je klase elemenata okruženja potrebno definirati i za odabrane prostorije promatranog broda Dvina Gulf.

Prostorije koje su odabrane posjeduju sljedeće klase elemenata okruženja:

- prekidači napona,
- ventili goriva,
- ventili ventilacije,
- vrata,
- zvučni alarmi,
- svjetlosni alarmi,
- detektori dima,
- detektori plamena,
- IC detektori,
- generatori CO<sub>2</sub>,
- generatori pjene,
- GMDSS alarm.





Slika 5.11. Podjela prostorije br. 1 loženog kotla na osnovne prostorne jedinice

Matematički model agentne protupožarne arhitekture broda za svaku klasu elemenata okruženja je predvidio uvođenje strukture svojstva - vrijednosti kako bi se njima pridruženim objektima mogla opisivati stanja u kojima se nalaze. Tablica 5.2. prikazuje za svaku klasu prethodno definiranih elemenata okruženja odabranih prostorija broda Dvina Gulf strukturu svojstva-vrijednosti.

Tablica 5.2. Klase elemenata okruženja i njima pridružene strukture svojstva - vrijednosti

| <i>Naziv klase elemenata okruženja</i> | <i>Naziv svojstva</i> | <i>Dozvoljene vrijednosti svojstva</i>          |
|--|-----------------------|---|
| <b>Prekidač napona</b>                 | koordinate            | ID prostora unutar kojeg se ventil nalazi       |
|  | stanje_otvorenosti    | „uključen“ ili „isključen“                      |
| <b>Ventil goriva</b>                   | koordinate            | ID prostora unutar kojeg se ventil nalazi       |
|  | stanje_otvorenosti    | „otvoren“ ili „zatvoren“                        |
| <b>Ventil ventilacije - klapne</b>     | koordinate            | ID prostora unutar kojeg se ventil nalazi       |
|  | stanje_otvorenosti    | „otvoren“, „zatvoren“ ili „poluzatvoren“        |
| <b>Vrata</b>                           | koordinate            | ID prostora u kojima se nalaze vrata            |
|  | stanje_otvorenosti    | „otvorena“ ili „zatvorena“                      |
| <b>Zvučni alarm</b>                    | koordinate            | ID prostora unutar kojeg se zvučni alarm nalazi |
|  | aktivnost             | „alarm aktivan“ ili alarm neaktivan“            |

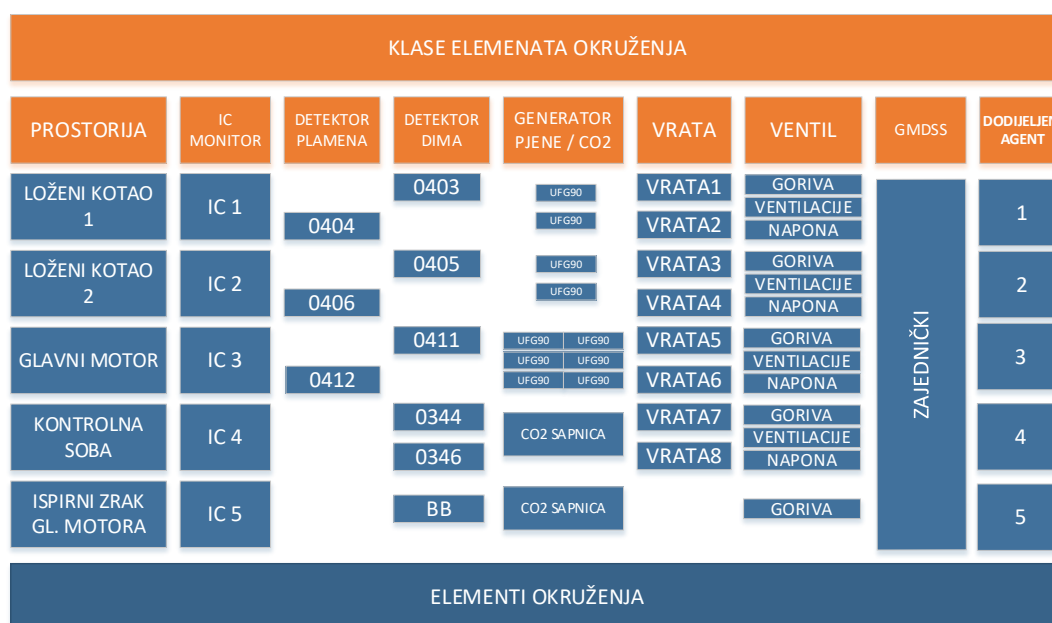
|   |                                  |  |
|---|----------------------------------|--|
| <b>Svjetlosni alarm</b>   | koordinate                       | ID prostora unutar kojeg se svjetlosni alarm nalazi              |
|   | aktivnost                        | „alarm aktivan“ ili alarm neaktivan“                             |
| <b>Detektor dima</b>  | koordinate                       | ID prostora unutar kojeg se detektor dima nalazi                 |
|   | stanje_detekcije                 | „istina“ ili „laž“   |
| <b>Detektor plamena</b>   | koordinate                       | ID prostora unutar kojeg se detektor plamena nalazi              |
|   | stanje_detekcije                 | „istina“ ili „laž“   |
| <b>IC detektor</b>  | koordinate                       | ID prostora unutar kojeg se IC detektor nalazi                   |
|   | stanje_detekcije_topline         | „visoka toplina u prostoru“ ili „niska toplina u prostoru“       |
|   | stanje_detekcije_prisustva_osoba | broj detektiranih osoba u prostoru ili „oprez-neodređeno stanje“ |
| <b>Generator CO<sub>2</sub></b>                                 | koordinate                       | ID prostora unutar kojeg se generator CO <sub>2</sub> nalazi     |
|   | aktivnost                        | „u procesu generiranja“ ili „neaktivan“                          |
| <b>Generator pjene</b>  | koordinate                       | ID prostora unutar kojeg se generator pjene nalazi               |
|   | aktivnost                        | „u procesu generiranja“ ili „neaktivan“                          |
| <b>Global maritime distress and safety system Alarm (GMDSS)</b> | stanje alarma                    | „aktivan“ ili „neaktivan“  |

Model agentne protupožarne arhitekture broda predviđa da i prostorije imaju strukturu svojstva-vrijednosti kako bi se omogućilo i praćenje stanja u kojima se prostorije nalaze. Kod odabranih prostorija promatranog broda to je sljedeća struktura svojstva - vrijednosti kako je prikazano u Tablici 5.3.

Tablica 5.3. Struktura svojstva - vrijednosti prostorija

|                   | <i>Naziv svojstva</i>              | <i>Dozvoljene vrijednosti svojstva</i>   |
|-------------------|------------------------------------|--|
| <b>Prostorija</b> | ID_prostorije                      | Identifikacijski broj  |
|                   | stanje_požara                      | „požar u prostoriji“, „nema požara u prostoriji“ ili „podignuta razina opreznosti“ |
|                   | dozvoljena_metoda_gašenja          | „CO2“ ili „pjena,“   |
|                   | prisutnost_ljudi                   | „istina“ ili „laž“   |
|                   | razina_co2                         | volumen CO2  |
|                   | razina_pjene                       | volumen pjene  |
|                   | maksimalno vrijeme punjenja pjenom | vrijeme u minutama   |

Definiramo sljedeću funkciju dodjeljivanja agenata prostorijama okruženja. Neka je prostoriji 1 dodijeljen agent 1, prostoriji 2 dodijeljen agent 2 i sve tako do prostorije 5 kojoj je dodijeljen agent 5. Sada je potrebno evidentirati sve elemente koji se nalaze unutar odabranih prostorija. Ovo je prikazano na Slici 5.12.



Slika 5.12. Elementi okruženja dodijeljeni prostorijama

Svaki od pet pojedinačnih agenata upotrijebljene arhitekture treba djelovati kao reaktivni agent koji strogo slijedi zadane procedure u ovisnosti o detektiranim promjenama okoline jer

bi djelovanje kroz učenje rezultiralo pokušajima i pogreškama što bi neminovno dovelo do teških posljedica (stradavanje ljudi i imovine). Zato predmetni agentni model mora imati takva ekspertna znanja kako bi djelovao koristeći najbolju praksu za ovo područje.

Kako bi se precizno definirala interpretacija modela potrebno je definirati ponašanje agenata, odnosno način na kojeg agenti odlučuju o akcijama koje će poduzeti. Agent poduzima akcije izdavanjem komandi elementima okruženja za izmjenom njihovih stanja. Agent u svakom trenutku može i očitavati stanja u kojima se nalaze elementi okruženja. U tekstu koji slijedi koristit će se termini „agent mijenja stanje elementu okruženja“ umjesto termina „agent izdaje komandu elementu okruženja za promjenom stanja.“

Sam način odlučivanja agenata bit će opisan na prostoriji loženog kotla 1 odnosno prostoriji loženog kotla 2, a za ostale prostorije će biti navedene razlike u odnosu na definirani način odlučivanja kod prostorija loženog kotla.

Prostorija loženog kotla 1 i prostorija loženog kotla 2 su identične po svome tlocrtu i po elementima okruženja koji se u tim prostorijama nalaze. Stoga će se ovdje prikazati način vatrodojave i gašenja prostorije loženog kotla 1, a vatrodojava i gašenje prostorije loženog kotla 2 je identično.

Slika 5.13. prikazuje UML dijagram aktivnosti odlučivanja odnosno djelovanja vezano za vatrodojavu i gašenje u prostoriji 1 odnosno unutar prostorije loženog kotla strojarnice. Ova prostorija predstavlja okruženje agenta broj 1. Elementi tog okruženja su:

- Detektor dima,
- Detektor plamena,
- IC detektor,
- Generator pjene 1,
- Generator pjene 2,
- Vrata 1,
- Vrata 2,
- Ventil goriva,
- Ventil ventilacije i
- Prekidač napona.

Uz ove elemente okruženja agent ima pristup i zvučnom te svjetlosnom alarmu kao i GMDSS alarmu te ima mogućnost zapisivanja svojih stanja odnosno akcija koje obavlja.

Svojstvo *dozvoljena\_metoda\_gašenja* za prostoriju loženog kotla ima vrijednost „*pjena*“, dok je inicijalna vrijednost svojstva *stanje\_požara* vrijednost „*nema požara u prostoriji*“. Takvom stanju prostorije odgovaraju sljedeće stanja elemenata njenog okruženja:

- Svojstvo *stanje\_detekcije* detektora dima ima vrijednost „*laž*“,
- Svojstvo *stanje\_detekcije* detektora plamena ima vrijednost „*laž*“,
- Svojstvo *stanje\_detekcije\_topline* IC detektora ima vrijednost „*niska toplina u prostoru*“.

Agent neprestano percipira svoje okruženje kroz nadzor promjena vrijednosti svojstava elemenata tog okruženja, odnosno elemenata prostorije loženog kotla 1. Ukoliko se vrijednost stanja *stanje\_detekcije* detektora dima i/ili detektora plamena promjeni u vrijednost „*istina*“, agent mijenja vrijednost svojstva prostorije *stanje\_požara* iz inicijalne vrijednosti „*nema požara u prostoriji*“ u vrijednost „*podignuta razina opreznosti*“. Kako bi se potvrdio požar u prostoriji agent očitava vrijednost svojstva IC detektora *stanje\_detekcije\_topline*. Ukoliko je utvrđena vrijednost ovog svojstva „*niska toplina u prostoru*“, radi se o lažnoj detekciji požara i agent mijenja vrijednost svojstva *stanje\_detekcije* onog detektora koji je prijavio postojanje dima ili plamena u „*laž*“ uz prijavljivanje potrebe za provjerom tog detektora. U ovom slučaju prostoriji loženog kotla se svojstvo *stanje\_požara* mijenja u vrijednost „*bez požara u prostoriji*“.

Ako agent prilikom dodjele vrijednosti „*podignuta razina opreznosti*“ svojstvu *stanje\_požara* prostorije očita za svojstvo *stanje\_detekcije\_topline* IC detektora vrijednost „*visoka toplina u prostoru*“ tada se radi o pozitivnoj detekciji požara. Tada prostorija loženog kotla za svojstvo *stanje\_požara* dobiva vrijednost „*požar u prostoriji*“. Agent tada oglašava zvučni i svjetlosni alarm mijenjajući odgovarajućim elementima okruženja (zvučnom i svjetlosnom alarmu) vrijednost svojstva *aktivnost* u vrijednost „*alarm aktivan*“ što je i komanda eventualno prisutnim ljudima da napuste prostoriju. Informaciju o postojanju ljudi u prostoriji agent čuva u svojstvu prostorije *prisutnost\_ljudi*, a ovu informaciju percipira korištenjem odgovarajućeg IC detektora.

Agent zatvara dotok goriva, električne energije te zraka koristeći ventil goriva, prekidač napona te ventil ventilacije na način da ovim elementima okruženja mijenja vrijednost svojstva *stanje\_otvorenosti* u „*zatvoren*.“

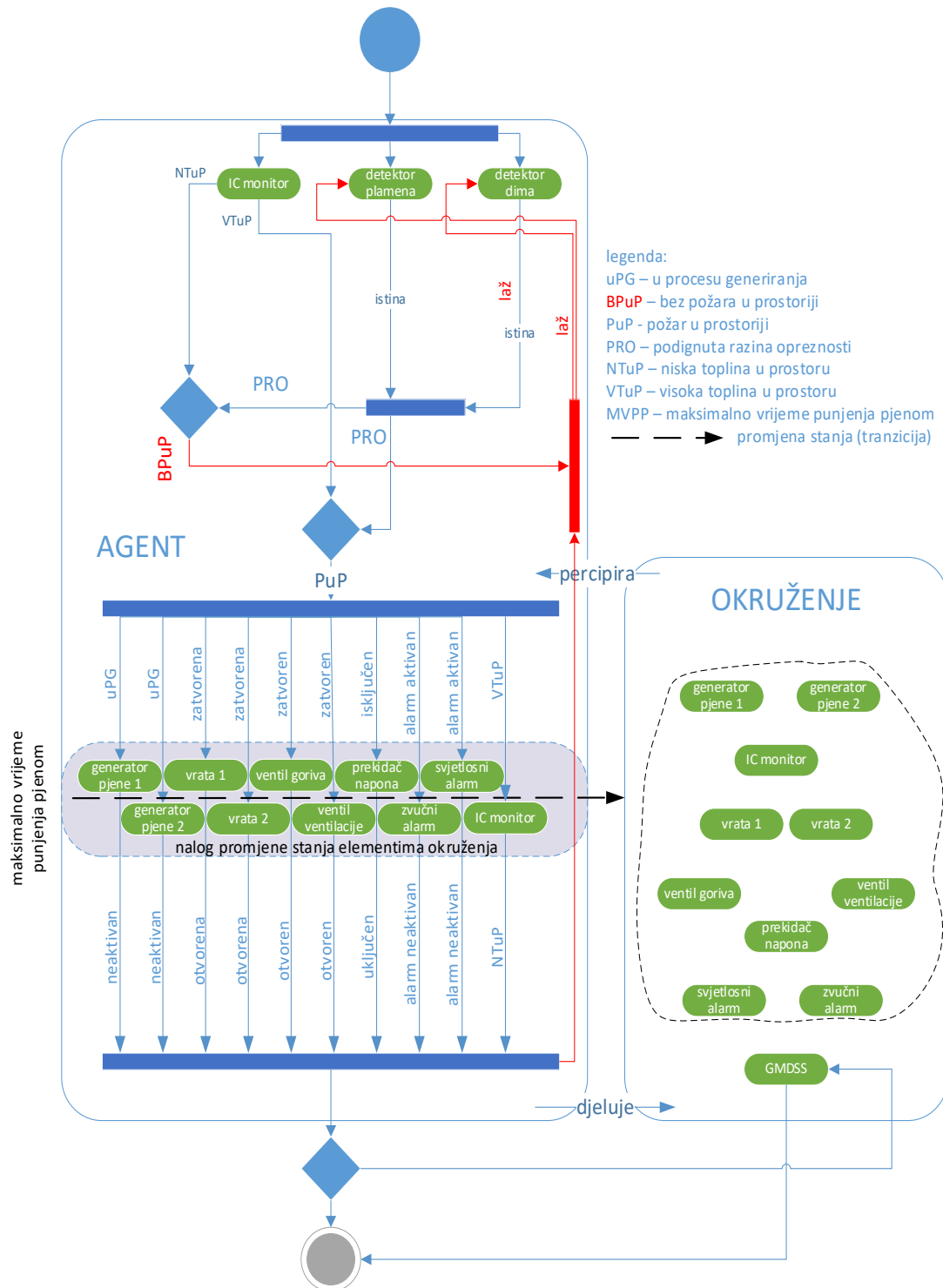
Požar u prostoriji loženog kotla se gasi pjenom, preko dva ugrađena generatora pjene, a pjenjenje prestaje nakon isteka vremena koje uključuje sigurnosni faktor, a određeno je na razini svojstva prostorije kao *maksimalno\_vrijeme\_punjenja\_pjenom*. Stoga agent pokreće generatore pjene djelujući na njihovo svojstvo *aktivnost* definiranjem vrijednosti „*u procesu generiranja*“. Ukoliko više nema ljudi u prostoriji agent zatvara vrata prostorije mijenjanjem stanja svojstva *stanje\_otvorenosti* u vrijednost „*zatvorena*“. Agent vraća svojstvo generatora *aktivnost* u vrijednost *neaktivan* kada zaključi da je požar ugašen ili kad istekne vremenska vrijednost zapisana u svojstvu *maksimalno\_vrijeme\_punjenja\_pjenom* prostorije. Agent po potrebi aktivira GMDSS alarm, a sve svoje aktivnosti pohranjuje.

Način agentnog odlučivanja i djelovanja u slučaju ostalih prostorija je sličan kao prethodno opisano odlučivanje i djelovanje. Kod vatrodjave i gašenja prostorije glavnog motora ovo odlučivanje i djelovanje je identično s razlikom što se ovdje u okruženju ne nalaze dva generatora pjene kao u prethodno opisanom slučaju, već njih šest.

Kod vatrodjave i gašenja prostorije kontrolne sobe strojarnice te prostorije ispirnog zraka glavnog motora postoji bitna razlika u odnosu na prethodne tri prostorije. Ona se ogleda u dozvoljenom načinu gašenja ovih prostorija. Kod ovih dviju prostorija to je gašenje plinom CO<sub>2</sub>. Stoga kod ovih prostorija nije moguće započeti gašenje požara sve dok svi ljudi nisu napustili prostoriju, odnosno sve dok svojstvo *prisutnost\_ljudi* ne poprimi vrijednost „*laž*“. Razlika ovih dviju prostorija u odnosu na prostorije loženih kotlova te na prostoriju glavnog motora je što prostorija kontrolne sobe strojarnice i prostorija ispirnog zraka glavnog motora nemaju detektore plamena. Kontrolna soba strojarnice ima dva detektora dima, dok prostorija ispirnog zraka glavnog motora ima jedan takav uređaj. Prostorija ispirnog zraka glavnog motora nema vrata i prekidač napona te u njoj ne mogu boraviti ljudi.

Agent započinje proces gašenja prostorije uz uvjet da su ljudi napustili prostoriju i da su svi elementi okruženja (prekidač napona, ventil goriva i klapne) zatvoreni. Tada se generatoru CO<sub>2</sub> izdaje nalog za izmjenom stanja *aktivnost*, odnosno prelaskom ovog stanja u vrijednost „*u procesu generiranja*“.

Prostorija se gasi sustavom plina CO<sub>2</sub>, preko generatora CO<sub>2</sub>, a gašenje prestaje potpunim pražnjenjem plina iz boca. Nakon toga se daje nalog za prelaskom stanja svojstva *stanje otvorenosti ventila ventilacije* u stanje „*otvoren*“.



Slika 5.13. UML dijagram aktivnosti kod gašenja požara u prostoriji loženog kotla

### 5.3. Implementacija modela u NetLogo simulacijskom okruženju

U ovom će se odjeljku opisati simulacijski prototip definiranog modela agentnog sustava za odlučivanje u odabranoj klasi brodskih pogibeljnih situacija. Agentni sustav potpuno će zamijeniti ljude u mehanizmu odlučivanja. U poglavlju Analiza dostupnih simulacijskih okruženja odabrana je platforma NetLogo kao okruženje unutar kojeg će se izraditi model temeljen na realnom okruženju odabranog broda i interpretaciji odabranog broda u modelu protupožarne agentne arhitekture broda. Model je implementiran u NetLogo okruženju koje je istodobno i na agentima zasnovana simulacijska platforma i programski jezik. Verzija na kojoj je izrađen simulacijski prototip je u verziji 6.0.4. koja je objavljena u lipnju 2018., dok je u rujnu 2019. objavljena zadnja, 6.1.1. verzija za operacijske sustave Windows. Mac OS X korisnici imaju na raspolaganju posljednju 5.0.4. verziju NetLogo instalacijskog paketa. Budući da je NetLogo temeljen na Java okruženju može se izvršavati na raznim operacijskim sustavima koji podržavaju Javin virtualni stroj (engl. *Java Virtual Machine*).

Model je implementiran unutar diskretne simulacije gdje su dinamički koraci programirani unutar *vremenskih jedinica simulacije* (u NetLogo terminologiji *tick*) koje odgovaraju realnim vremenskim odnosima potrebnim za obavljanje pojedine akcije. Kada model pokrenemo u simulaciji, vrijeme simulacije nije mjereno stvarnim vremenskim jedinicama, već je mjereno *vremenskim simulacijskim jedinicama* kojima je predstavljen protek vremena unutar kojeg se izvršava cijela simulacija. Ovo nipošto nije nedostatak, jer se na ovaj način pojam vremena relativizira, pa je simulacijom bilo moguće izvoditi duge vremenske intervale u simulaciji brže od realnog vremena [65]. Maksimalna brzina izvođenja u simulaciji ovisi o brzini i broju procesora u računalu na kojem se izvodi NetLogo aplikacija.

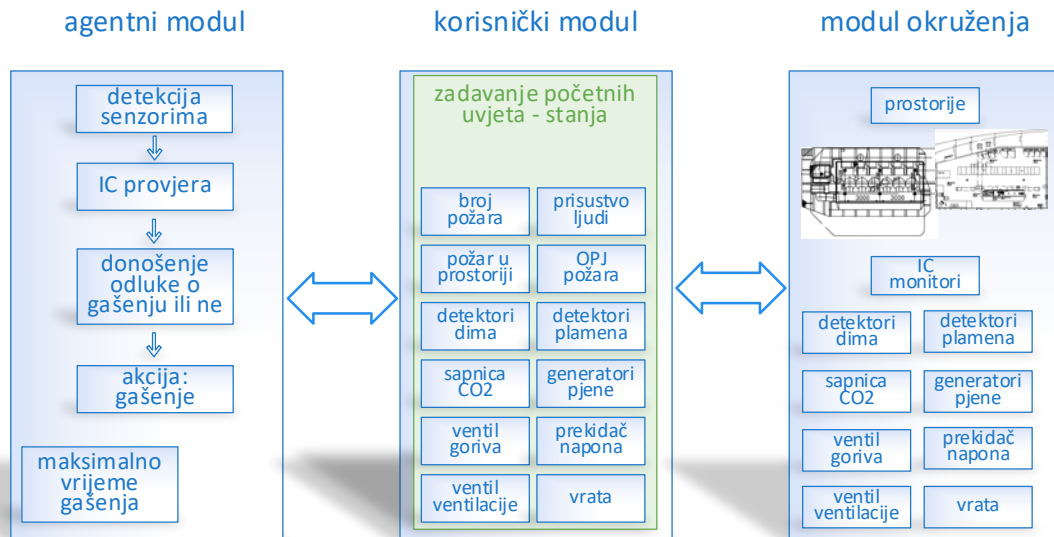
U svakoj *vremenskoj jedinici simulacije* agent na razini svake prostorije detektira eventualnu pojavu požara, provjerava je li požar stvaran ili je lažno stanje elemenata okoline detektora dima ili plamena dovelo lažnu vatrodojavu agentu prostorije. Na temelju odluke o stanju detekcije požara, agent prostorije donosi odluku o gašenju u skladu sa svojstvima prostorije koja uključuju dozvoljenu metodu gašenja prostorije (koja u modelu može biti CO<sub>2</sub> ili pjena), prisutnost ljudi, razinu CO<sub>2</sub>, razinu pjene i maksimalno vrijeme punjenja prostorije pjenom.

Slika 5.14. prikazuje konceptualnu arhitekturu izrađenog simulacijskog modela koji se sastoji od sljedeća tri modula:



- Agentni modul,
- Modul okruženja i
- Korisnički modul.

Agentni modul podržava ponašanja agenata, modul okruženja služi za interpretaciju okruženja i njegovih stanja, dok korisnički modul omogućuje korisniku postavljanje raznih početnih uvjeta pri ispitivanju ponašanja razvijenog modela.



Slika 5.14. Arhitektura izrađenog simulacijskog modela

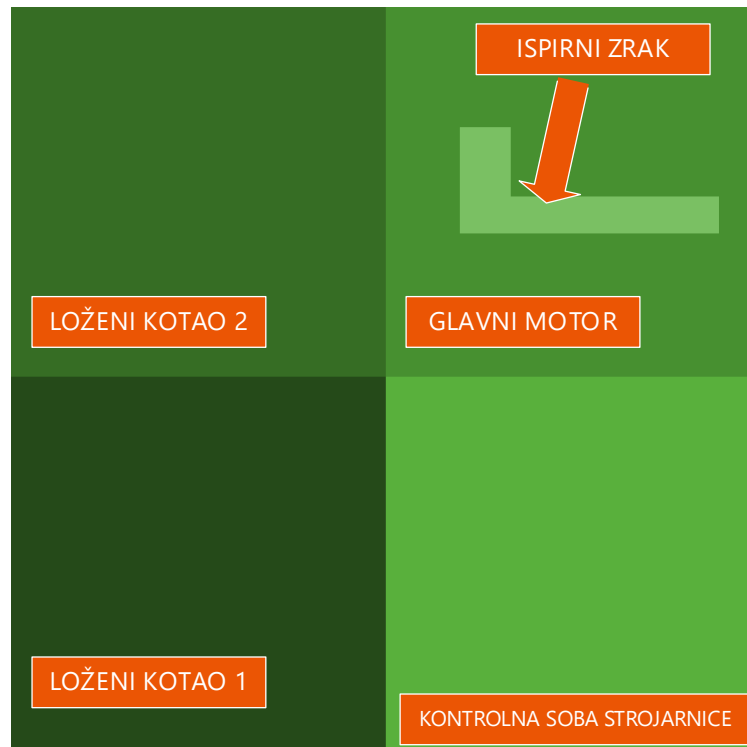
U nastavku se razmatraju ova tri modula.

Modul okruženja je u terminologiji sustava NetLogo svijet (engl. *world*) veličine 160x160 polja (engl. *patches*) što čini 25600 polja na kojima se razmjestilo pet prostorija strojarnice realnog broda opisanih u prethodnom odjeljku. Slika 5.15. prikazuje inicijalni razmještaj ovih prostorija unutar NetLogo svijeta i to prije nego što će unutar ovih objekata biti raspoređeni odgovarajući simulacijski elementi. Prostorije su prikazane uz pomoć različitih boja (nijanse zelene). Prostorije su smještene u svijetu u odgovarajućim poljima kako se može prikazati u NetLogo kôdu pomoću članova (engl. *item*):

```
set rooms-area [[1 0 80 0 80 52 150] [2 0 80 81 160 53 150] [3 81 160 81 160 54 100]
[4 81 160 0 80 55 20] [5 97 107 112 134 56 20] [5 107 152 112 119 56 20]]
```

(5.1.)

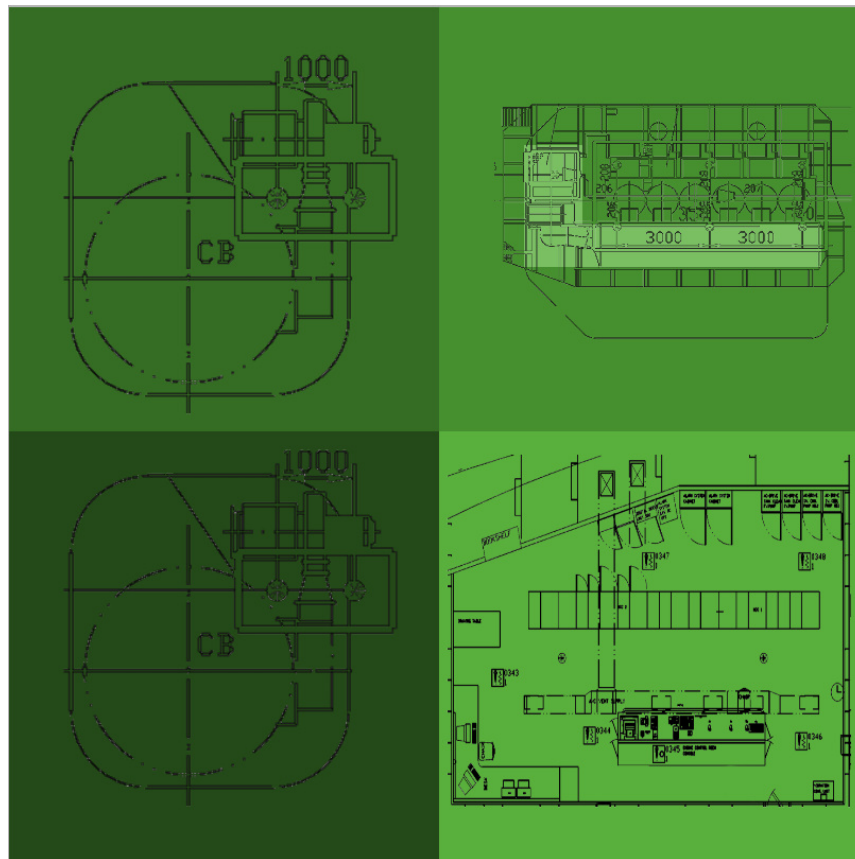
Ovdje je prvi element člana identifikacijska oznaka za prostoriju, drugi i treći član su intervali x koordinata, četvrti i peti član su intervali y koordinata, šesti član je boja prostorije, a sedmi član je koeficijent punjenja pjenom prostorije.



Slika 5.15. NetLogo svijet s izgrađenim prostorijama

Model čije su dimenzije definirane stvaranjem svijeta u NetLogo okruženju bit će podijeljen na sektore unutar odabranih prostorija koji se nazivaju osnovnim prostornim jedinicama kako je bilo prikazano na Slici 5.11. Tako je u svakoj prostoriji definirano 16 sektora.

Za realističan prikaz prostorija budućeg modela iskorišteni su nacrti strojarne realnog broda koji predstavljaju pozadinu u okruženju svijeta NetLoga kako je prikazano na Slici 5.16.



Slika 5.16. NetLogo okruženje s realnim tlocrtima odabranih prostorija

Sada je potrebno prostorno rasporediti detektore dima i detektore plamena kao elemente okruženja gdje im smještaj i broj odgovara razmještaju na realnom brodu. U NetLogo kôdu kod modeliranja detektora dima i detektora plamena definirano je da se u svakoj prostoriji nalazi po jedan detektor dima i detektor plamena te je svaki od njih adresabilan u svojoj petlji vatrodojave.

Ventili goriva, prekidač napona i klapne predstavljani su u obliku NetLogo monitora u kojima je predstavljeno njihovo stanje. Slika 5.17. prikazuje primjer konfiguracije stanja klase elemenata okruženja *ventili* gdje klapne za naziv svojstva otvorenosti mogu poprimiti vrijednost iz skupa [0,1,2] tj. „zatvorene“, „otvorene“ ili „poluotvorene“, ventili goriva stanja „istina“ ili „laž“ i prekidač napona „istina“ ili „laž“.

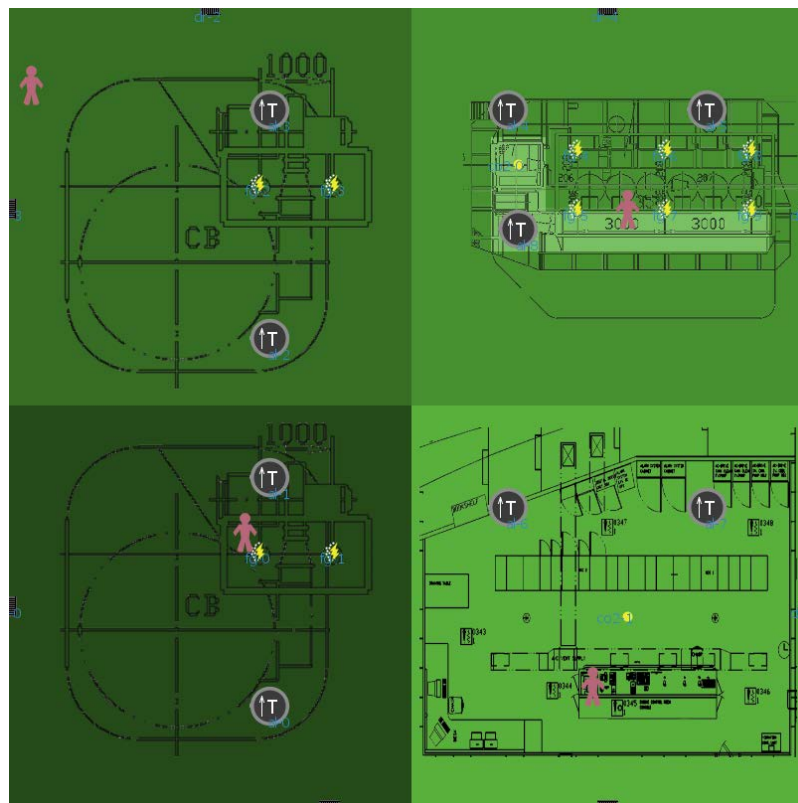
|        |               |                 |
|--------|---------------|-----------------|
| klapne | ventil goriva | prekidač napona |
| 2      | false         | false           |

Slika 5.17. Primjer konfiguracije stanja ventila u grafičkom monitoru NetLogo

Kako bi se ljudi uvijek sigurno mogli evakuirati iz prostorije u kojoj je požar, svaka prostorija gdje mogu boraviti ljudi opremljena je s dvoja vrata, dok je prostorija ispirnog zraka dio glavnog motora bez vrata.

Sapnice za plin CO<sub>2</sub> smještene su u prostor ispirnog zraka i u kontrolnu sobu strojarne jer je tako određeno prema svojstvu *dozvoljene\_metode\_gašenja* prostorije koje za ove prostorije ima vrijednost „CO<sub>2</sub>“.

Za prostorije kod kojih je svojstvo *dozvoljena\_metoda\_gašenja* prostorije „pjena“, generatori pjene se prostorno nalaze na mjestima prema brodskom nacrtu i odgovaraju njihovim realnim brojem po prostorijama; svaki kotao po dva generatora te glavni motor šest generatora koji proizvode dostatno pjene prema zahtjevima klasifikacijskog društva i proračunu proizvođača.



Slika 5.18. Model okruženja brodske strojarne

Konačno, Slika 5.18. prikazuje NetLogo grafički izgled brodske strojarne s implementiranim elementima okruženja na svojim koordinatama prema realnim nacrtima broda.

U agentnom modulu sadržana je baza znanja agenata koja uključuje njegovo viđenje svijeta kao i njegove modele odlučivanja.

Agent svake prostorije nadzire je i u slučaju požara treba pokrenuti proceduru gašenja. Zadovoljeni uvjeti gorenja, iako trivijalni, vrijedni su isticanja kako prikazuje Slika 5.19.



Slika 5.19. Uvjeti gorenja

Na temelju očitanih *stanja\_detekcije* iz elemenata okruženja detektori dima i detektori plamena te *stanja\_detekcije\_topline\_u\_prostoru* na IC detektoru, agent mijenja vrijednosti stanja požara u prostoriji na „požar u prostoriji“, „nema požara u prostoriji“ ili „podignuta razina opreznosti“.

Požar će se širiti brže ako je ventil goriva otvoren jer će se dobavljati goriva tvar. Prestankom dotoka goriva požar neće biti ugašen, jer je količina goriva u samom stroju strojarnice i cijevima koje dobavljaju gorivo uvijek dovoljna za izgaranje prostorija strojarnice. Ako je ventil goriva zatvoren požar će se širiti sporije. Aktivni ventilatori strojarnice preko ventilacijskih otvora – klapni dobavljaju kisik u strojarnicu koja je za više od jednog bara pod tlakom u odnosu na okolinu. Ako se ventilacija isključi i ako se zatvore klapne, požar se neće sam ugastiti jer je volumen prostorija strojarnice dovoljno velik, ali će se širenje požara znatno usporiti. Ako se ventilacija ne isključi i ako se klapne potpuno ne zatvore, požar će se širiti brže.

Prisustvo ljudi koji se mogu nalaziti u prostorijama agenti prostorije trebaju detektirati IC detektorima i mijenjati odgovarajuće stanje svojstva *prisutnost\_ljudi*.

Svaka prostorija ima predefinirane sustave za gašenje koji se pokreću na način da im agent mijenja stanja ako su zadovoljeni preduvjeti. Sustavi za gašenje moraju djelovati po primanju odgovarajućih promjena stanja. Ako preduvjeti nisu zadovoljeni potrebno je djelovanje agenta na njih kako bi se stvorili preduvjeti.

Ako je prostoriji dodijeljeno svojstvo *dozvoljene\_metode\_gašenja* „CO<sub>2</sub>“ ljude će agent prostorije aktivnim svjetlosnim i zvučnim alarmom potaknuti na evakuaciju i to treba biti potvrđeno agentu promjenom stanja na IC detektoru prije aktivacije CO<sub>2</sub> sustava.

Ako je prostoriji dodijeljeno svojstvo *dozvoljene\_metode\_gašenja* „pjena“ ljude će agent prostorije aktivnim svjetlosnim i zvučnim alarmom potaknuti na evakuaciju ali će agent pokrenuti proces generiranja pjene neovisno o tome jesu li ljudi već napustili prostoriju.



Sustav CO<sub>2</sub> smanjuje utjecaj dvaju uvjeta gorenja sa Slike 5.19.; toplinu i kisik. Ekspanzijom plina iz boce plin predaje toplinu okolini i na taj način hladi prostor u kojeg se ispušta i vlastitom ekspanzijom eliminira kisik iz prostorije. Da bi se ispunili uvjeti za ispuštanje CO<sub>2</sub>, odgovarajući agent prostorije mora djelovati na zvučne i svjetlosne alarme da bi se evakuirali ljudi, zatvorili ventili goriva, ventilacija, prekidači napona te vrata kako bi se stvorili preduvjeti za ispuštanje CO<sub>2</sub>. Nužan preduvjet je da ljudi nisu u prostoriji gdje se pokušava djelovati na požar s CO<sub>2</sub> plinom. Tek nakon što ljudi napuste prostoriju, klapne zatvore i vrata se zatvore, agent prostorije može djelovati na sapnicu CO<sub>2</sub> mijenjajući stanje. Ovaj način djelovanja agenta prostorije kako bi se ispunili preduvjeti za ispuštanje CO<sub>2</sub> predstavlja jedan diskretni događaj.

Sustav pjene smanjuje utjecaj uvjeta gorenja sa Slike 5.19. ne dopuštajući kisiku iz zraka da dođe do gorive tvari generirajući pjenu kao izolirajući agens između gorive tvari i kisika. Agent prostorije može djelovati na generatore pjene u prostoriji da promjene stanje u „u procesu generiranja“ i počnu stvarati visokoekspandirajuću pjenu. Pjenjenje može započeti s prisutnim ljudima u prostoriji i nije uvjet početku gašenja, ali je potrebno da napuste prostor što prije za što će agent djelovati na promjenu stanja u „*aktivan*“ zvučnom i svjetlosnom alarmu. Ventili goriva, ventilacije, prekidači napona i vrata trebaju biti zatvoreni, ali nisu nužan preduvjet kao kod gašenja CO<sub>2</sub>. Požar će se širiti brže jer će se dobavljati više gorive tvari i kisika koje prikazuje Slika 5.19., ali neće biti nužan preduvjet početku gašenja prostorije. Pjena se širi do trenutka koji je vremenski predviđen kao vrijeme punjenja visokoekspandirajućom pjenom i nakon što se volumen prostorije popuni, jer je proizvođač sustava za gašenje ugradio sigurnosni faktor u vidu dodatnog vremena pjenjenja [62].

$$t_{ukupno} = t_{detekcije} + t_{gašenja} + t_{sigurnosno} \quad (5.2.)$$

U realnim uvjetima ukupno vrijeme detekcije, aktiviranja te apliciranja sredstva gašenja uz dodatni vremenski faktor ne prelazi 7 minuta i 51 sekundu, odnosno 471 sekundu. Ovo maksimalno vrijeme je određeno kod slučaja gašenja pjenom [62]. U simulaciji jedan vremenski odsječak je definiran na 3 sekunde tako da je iz ovog vidljivo da maksimalni broj vremenskih jedinica simulacije unutar kojih se pojedinačna simulacija mora izvršiti iznosi 157 vremenskih jedinica simulacije. Ostali parametri požara postavljeni su u realnim odnosima prema prethodno definiranim veličinama [66] [67].

Tablica 5.4. Konfiguracijske postavke aplikacije

| Grafička oznaka   | Varijable u aplikaciji        | Značenje  |
|---|-------------------------------|---|
|    | setup                         | procedura setup – inicijaliziranje simulacije u aplikaciji      |
|    | go                            | procedura go – pokretanje simulacije u aplikaciji               |
|   | [config_fires]                | konfiguriranje broja i lokacija požara po prostorijama          |
|  | [power_valve]                 | stanje prekidača napona   |
|  | [fuel_valve]                  | stanje ventila goriva   |
|  | [flaps_valve]                 | stanje ventila ventilacije (klapni)                             |
|  | [config_persons]              | postojanje ljudi u prostoriji                                   |
|  | [config_closed_doors_in_room] | stanje otvorenosti/zatvorenosti prolaza (vrata) po prostorijama |
|  | [axis_x1]                     | horizontalna koordinata prvog požara os_x1                      |
|  | [axis_y1]                     | vertikalna koordinata prvog požara os_y1                        |
|  | [axis_x2]                     | horizontalna koordinata drugog požara os_x2                     |
|  | [axis_y2]                     | vertikalna koordinata drugog požara os_y2                       |

Gašenje fiksnim sredstvom CO<sub>2</sub> je brže nego generiranom pjenom tako da će broj potrebnih *vremenskih jedinica simulacije* za pjenu biti dostatan i za CO<sub>2</sub>. Propis za gašenje sredstvom CO<sub>2</sub> daje podatak za ispuštanje polovice proračunatog plina unutar jedne minute.

Kvar na instalacijama ili električnim strojevima može biti uzrok požaru ili još jedno mjesto za širenje požara. U slučaju požara bilo bi potrebno isključiti napon u prostoriji gdje je nastao požar. Ako se napon isključi požar se neće ugaziti jer će gorjeti neka goriva tvar, ali će se širenje požara usporiti i smanjiti mogućnosti nastanka sekundarnih požara. Nadalje, ako se napon ne isključi, požar će se širiti brže ili će čak nastati požar na novim mjestima što je uvaženo kod algoritma širenja požara u aplikaciji.

U korisničkom modulu korisnik aplikacije može zadavati početna stanja za izvođenje simulacije, primjerice odabrati prostoriju u kojoj će izbiti požar i broj požara u prostoriji.

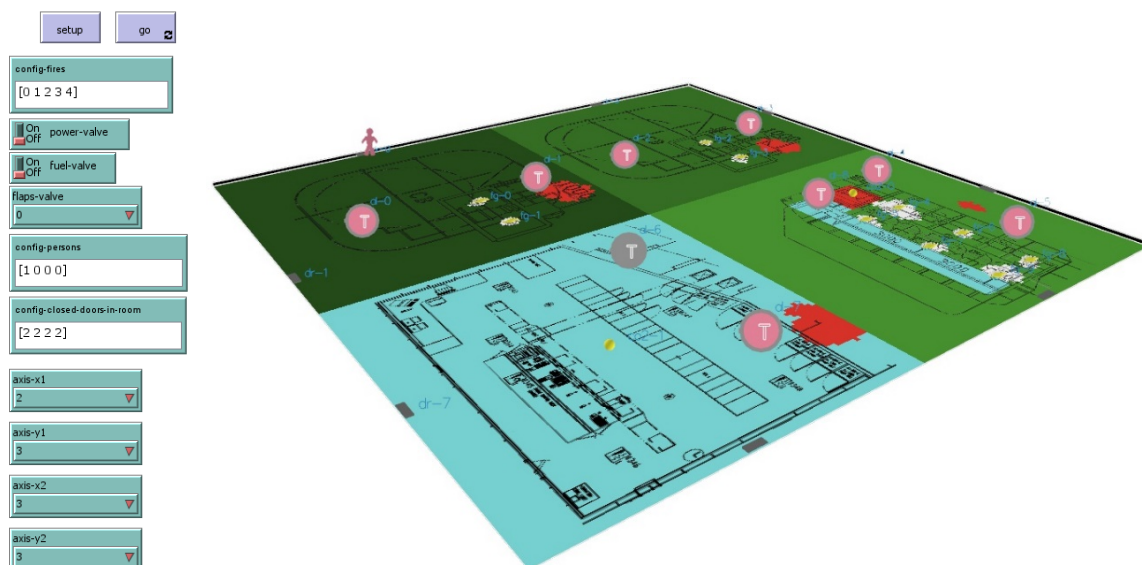
U Tablici 5.4. je prikazano što korisnik unutar korisničkog modula izrađene aplikacije može konfigurirati bez ulaska u kôd aplikacije.

#### **5.4. Pokretanje simulacije u NetLogo simulacijskom okruženju**

Kako je navedeno u prethodnom odjeljku, ponašanje implementiranog modela se može istraživati na način da se zadaju željena početna stanja okruženja te je nakon toga moguće pratiti razvoj situacije. Na Slici 5.20. prikazan je aktivan požar u svih pet prostorija istodobno, što je realnom svijetu statistički izuzetno rijedak događaj, ali ga u simulaciji možemo lako simulirati uz odgovarajuće zadane početne uvjete koje mijenjamo kroz korisnički modul. Zadane početne uvjete možemo mijenjati (Tablica 5.4.) kako bi mogli vizualizirati i izmjeriti sve rubne događaje na siguran način.

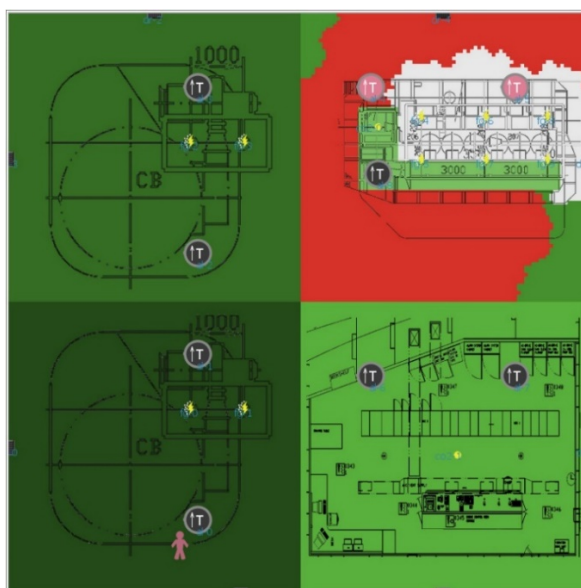
Pokrenuta simulacija sa Slike 5.20. prikazuje aktivne detektore dima i plamena koji mijenjaju svoja stanja nakon kojih agenti prostorija detektiraju požar; jednog čovjeka u prostoriji kotla broj 1, započeto gašenje pjenom i gašenje CO<sub>2</sub> u svim prostorijama okruženja.





Slika 5.20. Požar u svim prostorijama, alarmi aktivirani i procedura gašenja započeta

Simulacija može pokazati da je neki prostor neadekvatno zaštićen jer bi pravovremena vatrodajava i odgovarajuća brzina gašenja trebala spriječiti razvitak događaja sa Slike 5.21. koja prikazuje požar koji je „progutao“ cijelu prostoriju iako su se alarmi aktivirali i ugrađenih šest generatora pjene počelo pjeniti. U aplikaciji će se zato mjeriti i *izgorenost* koja će pokazati koliko je polja prostorije uništeno požarom, bez obzira na to što je požar ugašen. Kod primjera sa Slike 5.21. brzom širenju požara pogodovala su otvorena vrata i otvoreni ventili goriva, ventilacije te prekidači napona koji su doveli do rapidne ekspanzije vatre.

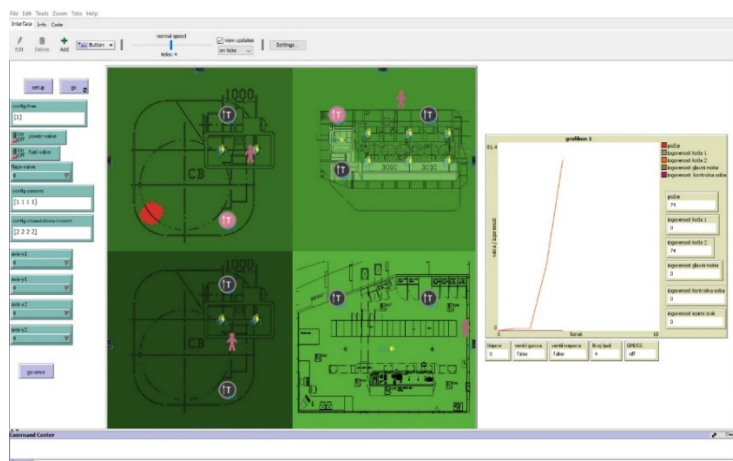


Slika 5.21. Požar u prostoriji glavnog motora na vrhuncu



- Lažni alarm za požar u drugoj prostoriji (Glavni motor) za vrijeme primarnog požara.
- Detektiranje lažnog alarma
- Gašenje primarnog požara.

Cjeloviti prikaz stanja unutar ovog primjera je priložen u Prilogu 1, a jedan trenutak simulacije (stanje za vremenskoj jedinici simulacije=4) je prikazan na Slici 5.23.



Slika 5.23. Požar u prostoriji loženog kotla u vremenskoj jedinici simulacije 4

U Tablici 5.5. prikazane su vrijednosti koje su promatrane varijable poprimale u reprezentativnim trenucima odvijanja simulacije ovog primjera pri čemu su plavom bojom označene vrijednosti za postavke koje su unesene kroz korisničko sučelje, a zelenom bojom su označene vrijednosti koje su izmjerene u aplikaciji za pojedine, reprezentativne trenutke. Ovdje su izdvojeni samo reprezentativni trenutci vezani za primarni požar.

Tablica 5.5. Vrijednosti varijabli aplikacije

| [br. izvod. simulacije] | požar prostorije | os_x1 | os_y1 | prekidač_napona | ventil_goriva | klapne | broj_zatvorenih_vrata_prostorija | ljudi_u_prostoriji | vremeska_jedinica_simulacije | požar |
|-------------------------|------------------|-------|-------|-----------------|---------------|--------|----------------------------------|--------------------|------------------------------|-------|
| 1                       | [1]              | 0     | 0     | LAŽ             | LAŽ           | 0      | [2 2 2 2]                        | 1                  | 0                            | 0     |
| 1                       | [1]              | 0     | 0     | LAŽ             | LAŽ           | 0      | [2 2 2 2]                        | 1                  | 1                            | 1     |
| ...                     | ...              | ...   | ...   | ...             | ...           | ...    | ...                              | ...                | ...                          | ...   |
| 1                       | [1]              | 0     | 0     | LAŽ             | LAŽ           | 0      | [2 2 2 2]                        | 0                  | 11                           | 15    |
| ...                     | ...              | ...   | ...   | ...             | ...           | ...    | ...                              | ...                | ...                          | ...   |
| 1                       | [1]              | 0     | 0     | LAŽ             | LAŽ           | 0      | [2 2 2 2]                        | 0                  | 60                           | 1181  |
| ...                     | ...              | ...   | ...   | ...             | ...           | ...    | ...                              | ...                | ...                          | ...   |
| 1                       | [1]              | 0     | 0     | LAŽ             | LAŽ           | 0      | [2 2 2 2]                        | 0                  | 118                          | 0     |

Tablica 5.5. prikazuje stanja u sljedećim odabranim trenutcima simulacije:

- *vremenska jedinica simulacije 0* - početak simulacije u kojem je početna vrijednost varijable *požar* 0, jer je broj izmjerenih polja požara 0. Ljudi su prisutni u prostoriji.
- *vremenska jedinica simulacije 1* - vrijednost varijable *požar* u promatranoj prostoriji je 1 - početak požara.
- *vremenska jedinica simulacije 11* - vrijednost varijable *požar* je 15. U prostoriji više nema ljudi.
- *vremenska jedinica simulacije 60* - vrijednost varijable *požar* iznosi 1181 što je najveći broj izmjerenih polja požara u ovoj simulaciji,
- *vremenska jedinica simulacije 118* - vrijednost varijable *požar* se vraća na nulu – završetak požara.

Kako je najavljeno u definiciji početnih uvjeta ova simulacija uključuje i pojavu lažnog alarma za požar u drugoj prostoriji za vrijeme primarnog požara. U simulaciji se ovo dogodilo u prostoriji glavnog motora u kojoj nema požara. U prostoriji glavnog motora nalaze se detektor dima i detektor plamena. Aktivirao se detektor plamena, dok je detektor dima ostao pasivan. Način na koji je agent ove prostorije djelovao vidljiv je iz Tablice 5.6. gdje se mogu očitati za obje promatrane prostorije (za prostoriju s primarnim požarom te za prostoriju u kojoj je oglašen lažni alarm) vrijednosti reprezentativnih elemenata okruženja kao što su detektori dima i plamena, IC detektori kao i stanja na generatorima pjene.

Tablica 5.6. Stanja reprezentativnih elemenata okruženja u simulaciji

| <i>vremenska jedinica simulacije</i> | <i>požar</i> | <i>požar u prostoriji 1</i> | <i>izgorenost u prostoriji 1</i> | <i>detektor dima al-2</i> | <i>detektor plamena al-3</i> | <i>detektor plamena al-4</i> | <i>detektor ic-1</i> | <i>detektor ic-3</i> | <i>zvučni i svjetlosni alarm</i> | <i>pokrenuto-gašenje</i> | <i>broj ljudi u prostoriji 1</i> | <i>ventil goriva 1</i> | <i>prekidač napona 1</i> | <i>Klapne 1</i> | <i>vrata dr-2</i> | <i>vrata dr-3</i> | <i>generator pjene fg-2</i> | <i>generator pjene fg-3</i> | <i>GMDSS</i> |
|--------------------------------------|--------------|-----------------------------|----------------------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------|--------------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------|
| 0                                    | 0            | 0                           | 0                                | 0                         | 0                            | 0                            | 0                    | 0                    | 0                                | 0                        | 1                                | 1                      | 1                        | 1               | 1                 | 1                 | 0                           | 0                           | ne           |
| 1                                    | 29           | 29                          | 29                               | 0                         | 0                            | 0                            | 1                    | 0                    | 0                                | 0                        | 1                                | 1                      | 1                        | 1               | 1                 | 1                 | 0                           | 0                           | ne           |
| 2                                    | 62           | 62                          | 62                               | 0                         | 0                            | 0                            | 1                    | 0                    | 0                                | 0                        | 1                                | 1                      | 1                        | 1               | 1                 | 1                 | 0                           | 0                           | ne           |
| 3                                    | 130          | 130                         | 130                              | 0                         | 0                            | 0                            | 1                    | 0                    | 0                                | 0                        | 1                                | 1                      | 1                        | 1               | 1                 | 1                 | 0                           | 0                           | ne           |
| 4                                    | 212          | 212                         | 212                              | 0                         | 1                            | 1                            | 1                    | 0                    | 0                                | 0                        | 1                                | 1                      | 1                        | 1               | 1                 | 1                 | 0                           | 0                           | ne           |
| 5                                    | 231          | 231                         | 231                              | 0                         | 1                            | 0                            | 1                    | 0                    | 1                                | 1                        | 1                                | 1                      | 0                        | 0               | 1                 | 0                 | 0                           | 0                           | ne           |

| vremenska jedinica simulacije | požar | požar u prostoriji 1 | izgorenost u prostoriji 1 | detektor dima al-2 | detektor plamena al-3 | detektor plamena al-4 | detektor ic-1 | detektor ic-3 | zvučni i svjetlosni alarm | pokrenuto -gašenje | broj ljudi u prostoriji 1 | ventil goriva 1 | prekidač napona 1 | Klapne 1 | vrata dr-2 | vrata dr-3 | generator pjene fg-2 | generator pjene fg-3 | GMDSS |   |
|-------------------------------|-------|----------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|---------------|---------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|-----------------|-------------------|----------|------------|------------|----------------------|----------------------|-------|---|
| 6                             | 242   | 242                  | 242                       | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 1                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 0                    | 0                    | ne    |   |
| 7                             | 256   | 256                  | 256                       | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 1                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 1                    | 1                    | ne    |   |
| 8                             | 268   | 268                  | 268                       | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 1                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 1                    | 1                    | ne    |   |
| 9                             | 288   | 288                  | 288                       | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 1                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 1                    | 1                    | ne    |   |
| 10                            | 303   | 303                  | 303                       | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 1                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 1                    | 1                    | ne    |   |
| 11                            | 320   | 320                  | 320                       | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 1                    | 1                    | ne    |   |
| :                             | :     | :                    | :                         | :                  | :                     | :                     | :             | :             | :                         | :                  | :                         | :               | :                 | :        | :          | :          | :                    | :                    | :     | : |
| 59                            | 1179  | 1179                 | 1203                      | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 1                    | 1                    | ne    |   |
| 60                            | 1181  | 1181                 | 1216                      | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 1                    | 1                    | ne    |   |
| 61                            | 1178  | 1178                 | 1237                      | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 1                    | 1                    | ne    |   |
| :                             | :     | :                    | :                         | :                  | :                     | :                     | :             | :             | :                         | :                  | :                         | :               | :                 | :        | :          | :          | :                    | :                    | :     | : |
| 74                            | 813   | 813                  | 1328                      | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 1                    | 1                    | ne    |   |
| 75                            | 782   | 782                  | 1331                      | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 1                    | 1                    | ne    |   |
| 76                            | 741   | 741                  | 1331                      | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 1                    | 1                    | ne    |   |
| :                             | :     | :                    | :                         | :                  | :                     | :                     | :             | :             | :                         | :                  | :                         | :               | :                 | :        | :          | :          | :                    | :                    | :     | : |
| 105                           | 1     | 1                    | 1331                      | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 1                    | 1                    | ne    |   |
| 106                           | 0     | 0                    | 1331                      | 1                  | 1                     | 0                     | 1             | 0             | 1                         | 0                  | 0                         | 1               | 0                 | 0        | 0          | 0          | 1                    | 1                    | ne    |   |

U Tablici 5.6. prikazano je:

- *vremenska jedinica simulacije* - broj vremenske jedinice simulacije,
- *požar* - zbroj trenutno opožarenih polja u svim prostorijama,
- *požar u prostoriji 1* - broj trenutno opožarenih polja u prostoriji loženog kotla 1,
- *izgorenost u sobi 1* - maksimalna dostignuta vrijednost opožarenih polja za prostoriji loženog kotla 1,
- *detektor dima al-2* - stanje detektora dima u prostoriji loženog kotla 1,
- *detektor plamena al-3* - stanje detektora plamena u prostoriji loženog kotla 1,
- *detektor plamena al-4* - stanje detektora plamena u prostoriji glavnog motora,
- *detektor ic-1* - stanje detektora ic u prostoriji loženog kotla 1,
- *detektor ic-3* - stanje detektora ic u prostoriji glavnog motora,

- *zvučni i svjetlosni alarm* - stanje alarma u prostoriji loženog kotla 1,
- *pokrenuto gašenje* - indikator aktivnosti gašenja prostorije loženog kotla 1,
- *broj ljudi u prostoriji 1* - broj detektiranih ljudi u prostoriji loženog kotla 1,
- *ventil goriva 1* - stanje zatvorenosti goriva u prostoriji loženog kotla 1,
- *prekidač napona 1* - stanje prekidača napona u prostoriji loženog kotla 1,
- *klapne 1* - stanje ventilacijskih klapni u prostoriji loženog kotla 1,
- *vrata dr-2* - stanje otvorenosti vrata 1 prostorije loženog kotla 1,
- *vrata dr-3* - stanje otvorenosti vrata 2 prostorije loženog kotla 1,
- *generator pjene fg-2* - aktivnost generatora pjene 1 u prostoriji loženog kotla 1,
- *generator pjene fg-3* - aktivnost generatora pjene 2 u prostoriji loženog kotla 1 i
- *GMDSS* - aktivnost GMDSS alarma.

Iz Tablice 5.6. je moguće očitati reprezentativne trenutke simulacije kao što su primjerice sljedeći trenutci:

*vremenska jedinica simulacije 0* - početak simulacije u kojoj požar još nije nastupio, a ljudi su prisutni u prostoriji;

*vremenska jedinica simulacije 1* - detektor ic u prostoriji loženog kotla javlja visoku toplinu u prostoru iako detektori dima i plamena još ništa ne javljaju;

*vremenska jedinica simulacije 4* – detektor plamena u prostoriji glavnog motora signalizira plamen u prostoriji dok detektor dima ove prostorije ništa ne signalizira;

*vremenska jedinica simulacije 5* – (1) pokretanje gašenja prostorije loženog kotla 1; isključivanje napona i ventilacije; neuspješan pokušaj zatvaranja dotoka goriva → posljedično će se požar brže širiti u nastavku simulacije; (2) provjera ic detektora u prostoriji glavnog motora rezultira utvrđivanjem lažnog alarma u toj prostoriji;

*vremenska jedinica simulacije 6* – oglašava se i detektor dima u prostoriji loženog kotla;

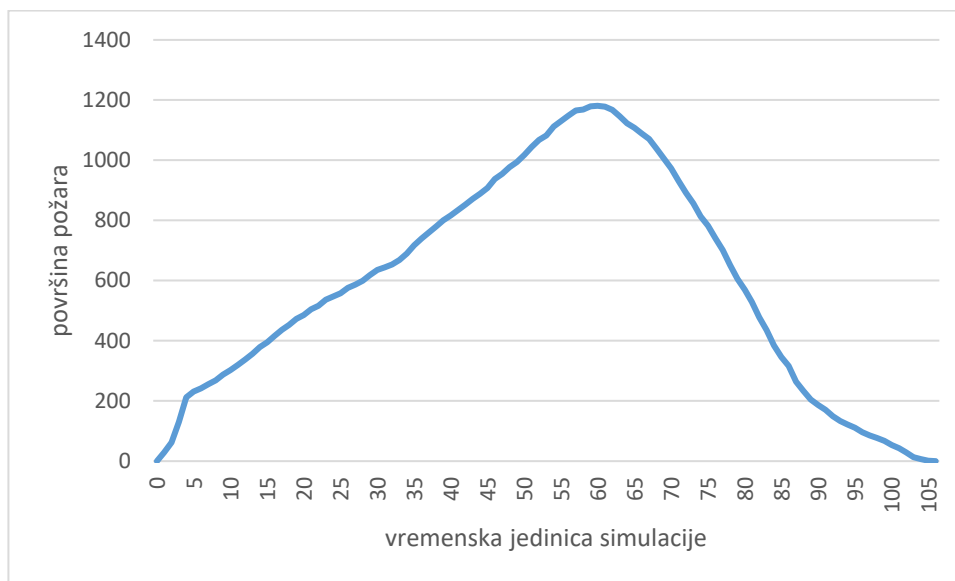
*vremenska jedinica simulacije 7* – pokretanje pjenjenja prostorije loženog kotla 1;

*vremenska jedinica simulacije 60* - po prvi put površina požara nije jednaka opožarenoj površini već je manja od nje → djelovanje pjene;

vremenska jedinica simulacije 75 - opožarena površina dostiže svoj maksimum → nakon ovoga je požar stavljen pod kontrolu odnosno zaustavljeno je širenje požara;

vremenska jedinica simulacije 106 - površina požara je pala na vrijednost 0 → požar je ugašen.

Vrijednosti varijable *požar* kod izvođenja ove simulacije osim tabličnog prikaza daju se prikazati grafom kako je prikazano na Slici 5.24. Na ovoj slici se mogu primijetiti karakteristični trenutci koji su istaknuti u interpretaciji Tablice 5.6.



Slika 5.24. Vremenski razvoj površine požara

Zaključak primjera: U ovoj primjer simulaciji je generiran jedan požar u prostoriji loženog kotla 1, na osnovnoj prostornoj jedinici s koordinatama  $os\_x1 = 0$  i  $os\_y1 = 0$ . Ovaj požar je uspješno detektiran te je pokrenuto gašenje. Paralelno se dogodio i lažni alarm u prostoriji glavnog motora. Ovaj lažni alarm je također ispravno detektiran. Požar prostorije loženog kotla 1 se uspješno ugasio pjenom u 106 vremenskih jedinica simulacije što odgovara realnom vremenu od 318 sekundi, pri čemu je izgorenost prostorije dosegla 1331 polja prostorije što predstavlja oko 15,8% od ukupno 8400 polja prostorije loženog kotla 1. Ova prostorija je mogla i potpuno izgorjeti i to ne bi dovelo do uključivanja GMDSS alarma i traženja tuđe pomoći jer je prostorija redundantna u definiranom modelu.

Ovdje je simuliran samo jedan mogući primjer požara. Cilj je simulirati sve požare koji se mogu razviti, a to je tema sljedećeg poglavlja ove disertacije.

## 6. Eksperiment u implementiranom modelu odlučivanja

Ovo poglavlje prikazuje provedeni eksperiment koji testira model odlučivanja unutar brodske pogibeljne situacije zasnovane na agentima koji je sproveden u djelo izgradnjom prototipa autonomnog sustava detekcije i gašenja požara korištenjem agentne arhitekture.

Prototip opisan u prethodnom poglavlju koristit će se za provođenje eksperimenta. Zadavanje početnih uvjeta – stanja bit će napravljeno kroz već opisani korisnički modul kojem će se zadati sva moguća inicijalna stanja te će se promatrati reakcija agentnog sustava. Primarni cilj provedenog eksperimenta je utvrditi kako će reagirati predloženi model kod pojave požara na bilo kojem mjestu i u bilo kojim stanjima okruženja. Drugim riječima, simulacijsko ispitivanje mora generirati sve moguće požare gdje se parametrizacija požara odvija po prostornim komponentama i komponentama okruženja kao što je stanje otvorenosti pojedinih ventila, vratiju te prisutnost ili nepresutnost ljudi u prostoriji u trenutku izbijanja požara. Također će se u simulaciji provesti ispitivanje ponašanja modela kada se u isto vrijeme dogode dva požara unutar promatranog okruženja. Dakle, potrebno je pokrenuti simulaciju za svako moguće početno stanje te mjeriti tijek gašenja požara unutar vremenskih jedinica simulacije. Ovdje će se posebno razmatrati vrijeme gašenja svakog požara koji može izbiti na jednom ili dva mjesta unutar bilo koje osnovne prostorne jedinice svake od pet prostorija strojarnice kao i konačan broj opožarenih osnovnih prostornih jedinica. Prostorije strojarnice u simulaciji označene su brojevima od 1 do 5. Prostorije 1 i 2 su prostorije kotla i redundantne su u simulaciji, dok ostale prostorije nisu redundantne i u slučaju njihovog uništenja brod mora tražiti tuđu pomoć, jer ne može samostalno nastaviti plovidbu.

### 6.1. Parametri eksperimenta

Kako bi se ispitale sve varijante požara koji se mogu razviti u provedenom eksperimentu, bitno je bilo utvrditi veličinu skupa mogućih događaja. Vezano za prostorno pojavljivanje požara u sustavu su moguće sljedeće kombinacije (u uglatim zagrada ma je navedena prostorija/prostorije unutar kojih se dogodio požar):



- (A) za jedan požar u prostoriji: [1], [2], [3], [4] i [5];
- (B) za dva požara u istoj prostoriji: [1 1], [2 2], [3 3], [4 4], [5 5] ili
- (C) za dva požara u različitim prostorijama: [1 2], [1 3], [1 4], [1 5], [2 3], [2 4], [2 5], [3 4], [3 5] i [4 5].

U nastavku se razmatra broj požara za svaku od prethodno navedenih grupa pojavnosti požara.

(A) Požar u jednoj prostoriji - eksperiment obuhvaća da u sustavu izbije jedan požar, u bilo kojoj od prostorija koje su obuhvaćene modelom. Tablica 6.1. prikazuje sva moguća stanja za scenarij požara u jednoj prostoriji. Iz tablice je vidljivo da unutar jedne prostorije postoji ukupno 1152 varijanti požara, a kada se uzme u obzir svih 5 prostorija dolazi se do ukupnog broja od 5.760 različitih varijanti požara koji mogu pojedinačno planuti unutar sustava.

Tablica 6.1. Moguća stanja elemenata okruženja za scenarij jednog požara u prostoriji

| parametri                               | stanje | stanje | stanje | stanje | stanje | ukupni      |                                    |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|------------------------------------|
|   |        |        |        |        |        | broj stanja | opis                               |
| oznaka prostorija                       | [1]    | [2]    | [3]    | [4]    | [5]    | 5           | broj požara i id prostorije        |
| os_x                                    | 0      | 1      | 2      | 3      | -      | 4           | apscisa prvog požara               |
| os_y                                    | 0      | 1      | 2      | 3      | -      | 4           | ordinata prvog požara              |
| prekidač_napona                         | laž    | istina | -      | -      | -      | 2           | stanje prekidača napona            |
| ventil_goriva                           | laž    | istina | -      | -      | -      | 2           | stanje ventila goriva              |
| ventil_ventilacije                      | 0      | 1      | 2      | -      | -      | 3           | stanje ventila ventilacije         |
| broj_zatvorenih_vrata_u_prostoriji      | 0      | 1      | 2      | -      | -      | 3           | broj zatvorenih vrata u prostoriji |
| prisustvo-ljudi                         | laž    | istina | -      | -      | -      | 2           | stanje ljudi u prostoriji          |
| ukupno varijanti u jednoj prostoriji    |        |        |        |        |        | 1.152       |                                    |
| ukupno varijanti za svih pet prostorija |        |        |        |        |        | 5.760       |                                    |

(B) Dva požara u istoj prostoriji – Tablica 6.2. prikazuje sva moguća stanja elemenata okruženja za scenarij dva požara u istoj prostoriji. Kako je iz ove tablice vidljivo, ovaj scenarij obuhvaća ukupno 92.160 različitih varijanti požara.

Tablica 6.2. Moguća stanja elemenata okruženja za scenarij dva požara u istoj prostoriji

| parametri                               | stanje | stanje | stanje | stanje | stanje | ukupni      |                                    |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|-------------|------------------------------------|
|   |        |        |        |        |        | broj stanja | opis                               |
| oznake prostorija                       | [1 1]  | [2 2]  | [3 3]  | [4 4]  | [5 5]  | 5           | broj požara i id prostorije        |
| os_x1                                   | 0      | 1      | 2      | 3      | -      | 4           | apscisa prvog požara               |
| os_y1                                   | 0      | 1      | 2      | 3      | -      | 4           | ordinata prvog požara              |
| os_x2                                   | 0      | 1      | 2      | 3      | -      | 4           | apscisa drugog požara              |
| os_y2                                   | 0      | 1      | 2      | 3      | -      | 4           | ordinata drugog požara             |
| prekidač napona                         | laž    | istina | -      | -      | -      | 2           | stanje prekidača napona            |
| ventil goriva                           | laž    | istina | -      | -      | -      | 2           | stanje ventila goriva              |
| ventil ventilacije                      | 0      | 1      | 2      | -      | -      | 3           | stanje ventila ventilacije         |
| broj_zatvorenih_vrata_u_prostoriji      | 0      | 1      | 2      | -      | -      | 3           | broj zatvorenih vrata u prostoriji |
| prisustvo-ljudi                         | laž    | istina | -      | -      | -      | 2           | stanje ljudi u prostoriji          |
| ukupno varijanti u jednoj prostoriji    |        |        |        |        |        | 18.432      |                                    |
| ukupno varijanti za svih pet prostorija |        |        |        |        |        | 92.160      |                                    |

(C) Dva požara u različitim prostorijama – Tablica 6.3. prikazuje sva moguća stanja okruženja za scenarij događanja dva istovremena požara koji buknu u različitim prostorijama. U sustavu je moguće događanje ukupno 552.960 ovakvih požara.

Zbrajanjem broja mogućih požara u scenarijima (A), (B) i (C) dolazi se do ukupnog broja od 650.880 mogućih požara. Unutar simulacije je potrebno pokrenuti svaki od ovih 650.880 požara. Za svaki od tih požara je potrebno od trenutka nastanka do gašenja u svakoj vremenskoj jedinici simulacije zabilježiti stanje sustava kako bi se mogla analizirati učinkovitost gašenja.

U svakoj vremenskoj jedinici simulacije se bilježi i vrijednost opečene površine pojedine prostorije. Tako je moguće i definirati veličinu izgorene površine neredundantne prostorije nakon koje se uzima da je požar uništio strojeve smještene unutar te prostorije i ta se prostorija nakon gašenja ne može ponovno koristiti. Tada brod za nastavak plovidbe treba koristiti tuđu pomoć koja je u simulaciji označena GMDSS alarmom.

Tablica 6.3. Moguća stanja elemenata okruženja za scenarij dva požara u različitim prostorijama

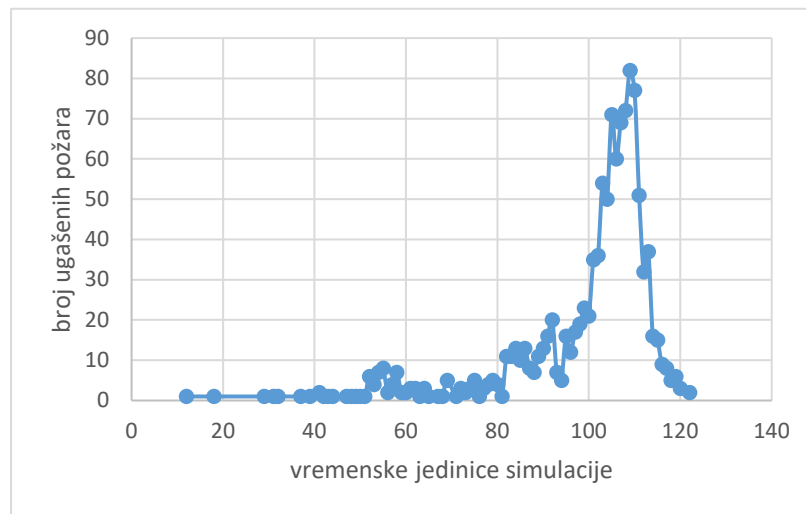
| parametri  | stanje | stanje | stanje | stanje | stanje | ukupni broj stanja | opis                               |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------------------|------------------------------------|
| oznake prostorija                                    | [1 2]  | [1 3]  | [1 4]  | [1 5]  | [2 3]  | <b>10</b>          | broj požara i id prostorije        |
|  | [2 4]  | [2 5]  | [3 4]  | [3 5]  | [4 5]  |                    |                                    |
| os_x1  | 0      | 1      | 2      | 3      | -      | <b>4</b>           | apscisa prvog požara               |
| os_y1  | 0      | 1      | 2      | 3      | -      | <b>4</b>           | ordinata prvog požara              |
| os_x2  | 0      | 1      | 2      | 3      | -      | <b>4</b>           | apscisa drugog požara              |
| os_y2  | 0      | 1      | 2      | 3      | -      | <b>4</b>           | ordinata drugog požara             |
| prekidač_napona                                      | laž    | istina | -      | -      | -      | <b>2</b>           | stanje prekidača napona            |
| ventil_goriva  | laž    | istina | -      | -      | -      | <b>2</b>           | stanje ventila goriva              |
| ventil_ventilacije                                   | 0      | 1      | 2      | -      | -      | <b>3</b>           | stanje ventila ventilacije         |
| broj_zatvorenih_vrata_prve_prostorije                | 0      | 1      | 2      | -      | -      | <b>3</b>           | broj zatvorenih vrata u prostoriji |
| broj_zatvorenih_vrata_druge_prostorije               | 0      | 1      | 2      | -      | -      | <b>3</b>           | broj zatvorenih vrata u prostoriji |
| prisustvo-ljudi                                      | laž    | istina | -      | -      | -      | <b>2</b>           | stanje ljudi u prostoriji          |
| ukupno varijanti za dva požara – jedna manifestacija |        |        |        |        |        | <b>55.296</b>      |                                    |
| ukupno varijanti za svih deset manifestacija         |        |        |        |        |        | <b>552.960</b>     |                                    |

Za provedbu eksperimenta, mjerenja i izradu rezultata korišten je modul BehaviorSearch koji je ugrađen u NetLogo [68].

## 6.2. Rezultati eksperimenta

Eksperiment je obavljen na računalu koje je dovoljno brzo da završi simulaciju u razumnom roku od nekoliko dana neprekidnog rada. Kako je već ranije izračunato, potrebno je bilo simulirati ukupno 650.880 različitih požara. Za svaki od ovih požara zabilježeno je stanje okruženja u svakoj vremenskoj jedinici simulacije. Ovi podaci se bilježe u bazi podataka

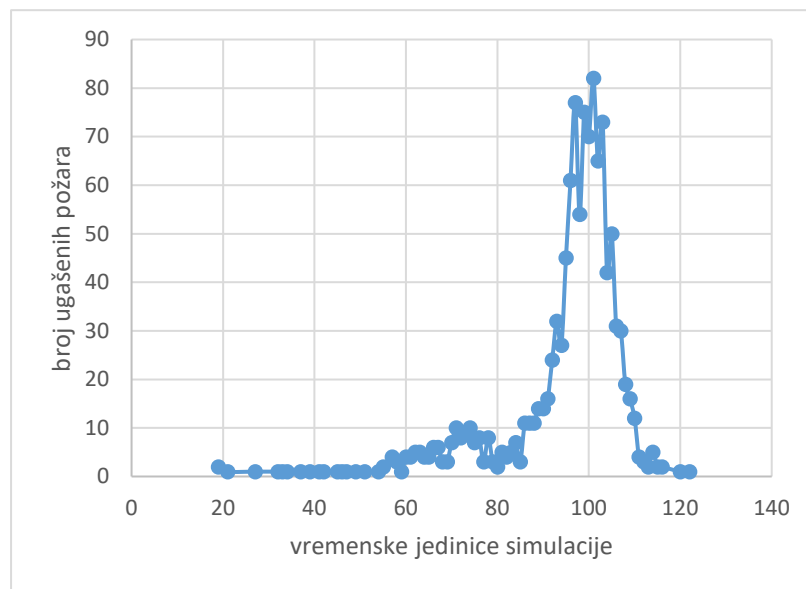
(korišten je sustav za upravljanje bazama podataka Microsoft SQL Server) gdje svaka vremenska jedinica simulacije unutar svakog požara ima svoj redak u odgovarajućoj tablici baze podataka. Tako rezultirajuća baza podataka sadrži 49.594.497 redaka. Odavde su se dalje SQL upitima radile potrebne selekcije i grupiranja podataka kako bi se rezultati obrade mogli grafički prikazati unutar proračunskih tablica. Ovo je bilo potrebno napraviti zbog ograničenja dostupnih sustava za obradu proračunskih tablica (primjerice, Microsoft Excel ima ograničenje od 1.048.576 redaka po tablici).



Slika 6.1. Simulacija požara u prvoj prostoriji loženog kotla strojarnice: broj ugašenih požara prema vremenu potrebnom za njihovo gašenje

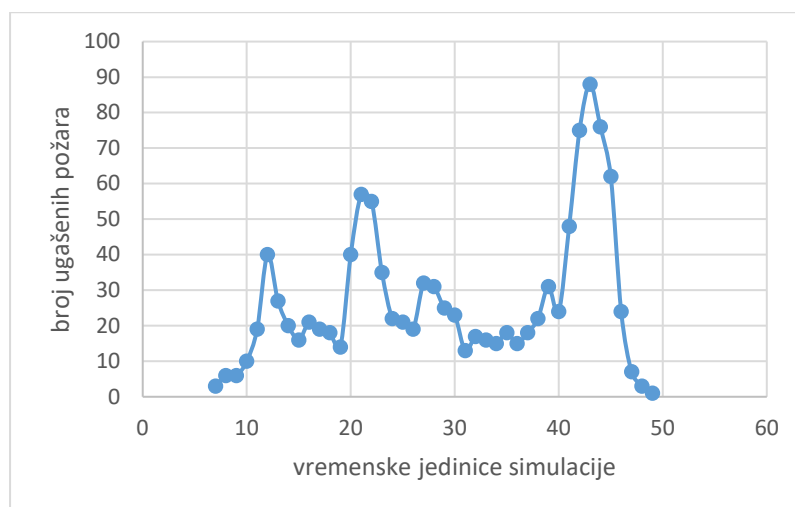
Slika 6.1. prikazuje rezultate izvođenja simulacije svih mogućih požara unutar prve prostorije loženog kotla strojarnice. Kako je već ranije izračunato, u ovisnosti o lokaciji požara unutar ove prostorije te o stanju elemenata okruženja, u ovoj je prostoriji moguće izbijanje ukupno 1152 različita požara. Požari unutar ove prostorije su grupirani prema vremenu koje je bilo potrebno da se ugaše. Slikom 6.1. prikazane su frekvencije te je vidljivo da je većina požara (precizno 726 od 1152) bila ugašena u vremenu između 101. i 113. vremenske jedinice simulacije što odgovara realnom vremenu gašenja između 303. i 339. sekunde. Maksimalno vrijeme potrebno za gašenje u prvoj prostoriji loženog kotla strojarnice iznosi 366 sekundi. Srednja vrijednost vremena potrebnog za gašenje požara u ovoj prostoriji iznosi 299,7 sekunda, dok je medijan 315 sekundi.

Na Slici 6.2. prikazan je rezultat eksperimenta gašenja redundantne, druge prostorije loženog kotla u kojoj je izbio jedan požar te je mjerenjem utvrđeno u kojoj je vremenskoj jedinici simulacije ugašen požar za ukupno 1152 požara pokrenutih unutar simulacije. Prikazani rezultati se neznatno razlikuju od prostorije loženog kotla 1 radi proizvoljnog mjesta izbivanja požara unutar pojedine definirane osnovne prostorne jedinice. Svi požari su ugašeni te se trenutak ugašenja za njih 814 dogodio između 93. i 107. vremenske jedinice simulacije kako je prikazano na Slici 6.2. Maksimalno vrijeme potrebno za gašenje u drugoj prostoriji loženog kotla strojarnice iznosi 366 sekundi. Srednja vrijednost vremena potrebnog za gašenje požara u ovoj prostoriji iznosi 284,9 sekunda, dok je medijan 297 sekundi.



Slika 6.2. Simulacija požara u drugoj prostoriji loženog kotla strojarnice: broj ugašenih požara prema vremenu potrebnom za njihovo gašenje

Na Slici 6.3. prikazan je rezultat simulacije gašenja prostorije glavnog motora kroz prikaz broja ugašenih požara za pojedine vremenske jedinice simulacije. Kako je sa slike vidljivo većina požara, njih 1055, je ugašena prije 45 vremenske jedinice simulacije (precizno 91,58% požara) što odgovara vremenu gašenja manjem od 135 sekundi.

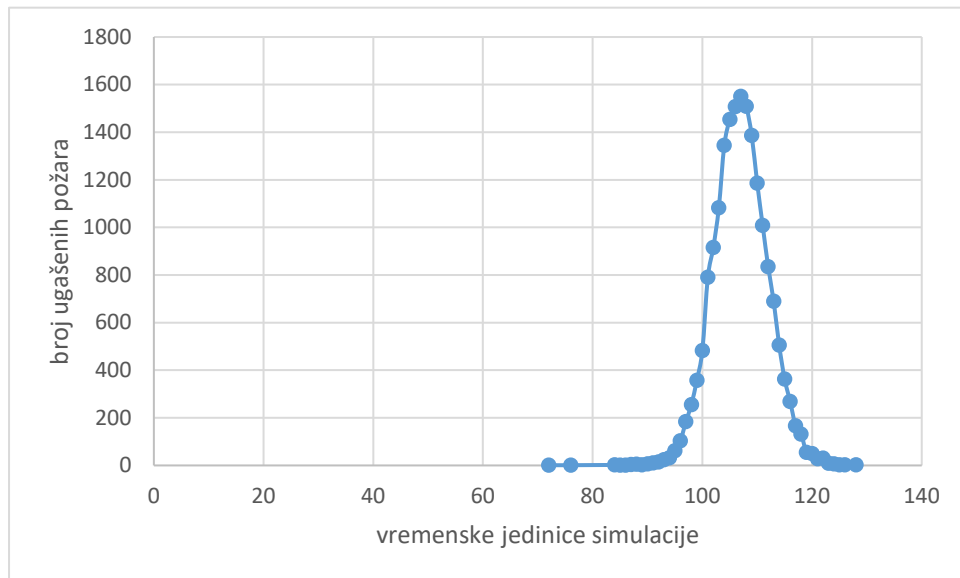


Slika 6.3. Simulacija požara u prostoriji glavnog motora: broj ugašenih požara prema vremenu potrebnom za njihovo gašenje

Kao što je već naglašeno, u pokrenutoj simulaciji provedenim eksperimentom je pored jednog požara u prostoriji obuhvaćeno i mjerenje rezultata za dva požara u istoj prostoriji. Dobiveni rezultati svih simuliranih požara su prikazani u Prilogu 2, a ovdje se prikazuju samo reprezentativni primjer kao i konačni rezultati.

Na Slici 6.4. prikazani su rezultati simulacije dva požara u prostoriji loženog kotla 1 te je prikazan broj parova ovakvih požara prema vremenu potrebnom za njihovo gašenje. Ovdje postoji 18.432 različitih parova dvostrukih požara. Najraniji trenutak gašenja para dva požara u ovoj prostorije je bio u 72. vremenskoj jedinici simulacije, a najkasniji u 128. vremenskoj jedinici simulacije, što odgovara vremenima od 216 sekundi i 384 sekundi. Najraniji trenutak gašenja kod slučaja jednog požara u ovoj prostoriji je bio u 12. vremenskoj jedinici simulacije,

a najkasniji u 122. vremenskoj jedinici simulacije što odgovara vremenima od 36 sekunda i 366 sekunda.



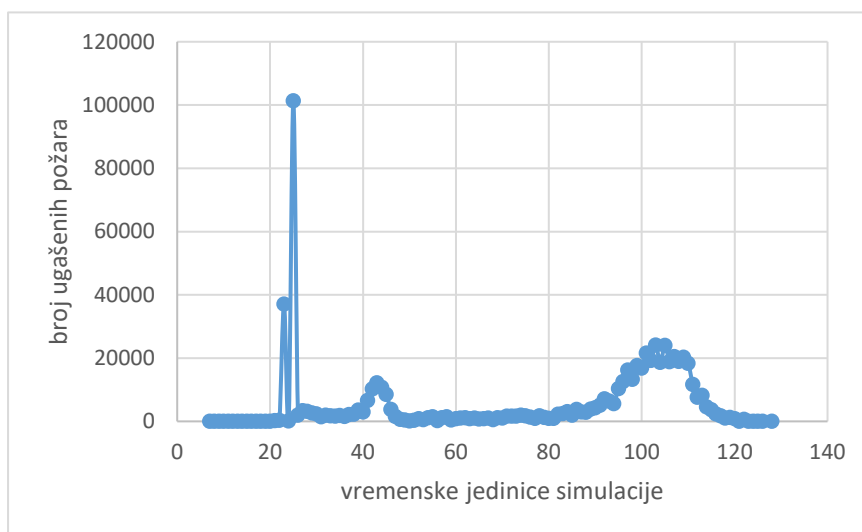
Slika 6.4. Simulacija dva požara u prostoriji loženog kotla 1: broj ugašenih parova požara prema vremenu potrebnom za njihovo gašenje

Tablica 6.4. prikazuje minimalno i maksimalno vrijeme gašenja za sve prostorije i sve kombinacije požara iz simulacije. Najbrže su se gasili požari koji se gase CO<sub>2</sub> sredstvom kod kojih je trenutak gašenja predvidljiv. Najdulje je trajalo gašenje kombinacije dva požara koji su simulirana unutar prostorije loženog kotla 1. Simulacija je ukazala na gašenje dva požara unutar ove prostorije koje je trajalo 128 vremenskih jedinica simulacije odnosno nešto kraće od 384 sekundi.

Provedeni eksperiment pokazao je da su svi pokrenuti požari u simulaciji, od ukupno 650.880 požara, zaista i ugašeni. Pokazani diskretni trenutci u 23. vremenskoj jedinici simulacije pokazuju da je u njoj ugašeno 37.058, a diskretni trenutak 25. vremenske jedinice simulacije pokazuje da je u njoj ugašeno 101.320 požara. Ti trenutci se odnose na gašenje požara s CO<sub>2</sub> jer je trenutak gašenja ovim sredstvom predvidljiv obzirom na trenutak aktivacije. Slika 6.5. prikazuje vremena potrebna za gašenje svih 650880 simuliranih požara. Najranije su požari ugašeni u 7. vremenskoj jedinici simulacije (tri požara), a najkasnije u 128. vremenskoj jedinici simulacije (dva požara).

Tablica 6.4. Minimalna i maksimalna vremena gašenja požara u ovisnosti o lokaciji požara i broju požara

| požar | vremenska jedinica simulacije gašenja_min | vremenska jedinica simulacije gašenja_max | požar | vremenska jedinica simulacije gašenja_min | vremenska jedinica simulacije gašenja_max |
|-------|---|---|-------|---|---|
| [1 1] | 72  | 128                                       | [4 2] | 25  | 122                                       |
| [1]   | 12  | 86  | [4 3] | 25  | 49  |
| [2 1] | 31  | 122                                       | [4 4] | 23  | 23  |
| [2 2] | 73  | 120                                       | [4]   | 25  | 25  |
| [2]   | 19  | 122                                       | [5 1] | 25  | 122                                       |
| [3 1] | 12  | 122                                       | [5 2] | 25  | 122                                       |
| [3 2] | 12  | 122                                       | [5 3] | 25  | 49  |
| [3 3] | 12  | 51  | [5 4] | 25  | 25  |
| [3]   | 7   | 49  | [5 5] | 23  | 23  |
| [4 1] | 25  | 122                                       | [5]   | 25  | 25  |



Slika 6.5. Potrebna vremena za gašenje svih 650880 simuliranih požara

Ekspérimentom se mjerio i postotak izgorenosti prostorije, odnosno veličina opožarenog područja prostorije. Kriterij neupotrebljivosti prostorije za uporabu razmatran je u petom poglavlju. GMDSS alarm se oglašava kada brod treba tuđu pomoć za nastavak plovidbe nakon požara jer je vatra opožarila neko područje koje se ugasilo, ali su strojevi i oprema uništeni te brod ne može nastaviti plovidbu bez tuđe pomoći.



Mjerenje ukupne izgorenosti prostorije za cijeli provedeni eksperiment daje rezultate prikazane Tablicom 6.5. gdje je prikazana potreba za aktiviranjem GMDSS-a. Ovdje je kao okidač aktiviranja GMDSS-a definirana vrijednost 50% izgorenosti prostorije.

Tablica 6.5. Postotak aktiviranja GMDSS

| GMDSS | Apsolutno | Postotno |
|-------|-----------|----------|
| ne    | 415290    | 63,804%  |
| da    | 235590    | 36,196%  |
|       | 650880    | 100,000% |

Rezultati pokazuju da brod za nastavak plovidbe uslijed posljedica opožarenosti, odnosno izgorenosti uslijed djelovanja požara nije trebao tuđu pomoć u 63,804% slučajeva, dok je u 36,196% slučajeva brod trebao tuđu pomoć za nastavak plovidbe nakon požara jer je vatra opožarila neko područje koje se ugasilo, ali su strojevi i oprema uništeni te brod nije mogao nastaviti plovidbu bez tuđe pomoći.

Tablica 6.6. Postotak aktiviranja GMDSS kod požara u obje prostorije loženog kotla

| požar | GMDSS | Apsolutno | Postotno |
|-------|-------|-----------|----------|
| [1 2] | ne    | 39426     | 71,30%   |
| [1 2] | da    | 15870     | 28,70%   |
|       |       | 55296     | 100,00%  |

Kako su prostorije loženog kotla redundantne opožarenost jedne prostorije iznad definirane vrijednosti ne aktivira GMDSS ukoliko u redundantnoj prostoriji loženog kotla nije izbio požar.

Tablica 6.6. prikazuje postotak aktiviranja GMDSS-a za istodobni požar u prostorijama oba ložena kotla. Iz ove tablice je vidljivo da se u slučaju istodobnog izbijanja požara u oba ložena kotla u 28,70% slučajeva događa da brod mora tražiti tuđu pomoć za nastavak plovidbe i oglašava se znak pogibelji GMDSS.

## 7. Zaključak

Polazeći od hipoteze da su višeagentni sustavi primjenjivi pri odlučivanju u brodskim pogibeljnim situacijama kao autonomni izvršni sustavi ili savjetodavni sustavi čijom se primjenom utječe na sigurnost pomorskog prometa, znanstveno istraživanje u okviru izrade ove disertacije uključivalo je sljedeće aktivnosti:

- Analizirani su elementi sigurnosti na moru, brodske pogibeljne situacije te pomorske komunikacije u pogibelji (prikaz u prvom poglavlju);
- Analizirane su agentne tehnologije te je razmotren način supstitucije ljudskog faktora agentnim tehnologijama u odabranoj kategoriji brodskih pogibeljnih situacija. Odabrane su situacije brodskih požara kao klasa brodskih pogibeljnih situacija unutar koje su se u ovoj disertaciji analizirale mogućnosti primjene agentnih tehnologija u cilju supstitucije ljudskog faktora (prikaz u drugom poglavlju);
- Definiran je model agentne protupožarne arhitekture broda sa svim relevantnim elementima potrebnim za detekciju i gašenje požara na brodu (prikaz u trećem poglavlju);
- Analizirana su dostupna agentna simulacijska okruženja te je odabrano agentno simulacijsko okruženje unutar kojeg je realiziran eksperimentalni dio ovog istraživanja (prikaz u četvrtom poglavlju);
- U odabranom agentnom simulacijskom okruženju je implementiran razvijeni model protupožarne arhitekture broda (prikaz u petom poglavlju);
- Nad prethodno spomenutim implementiranim modelom napravljen sveobuhvatni eksperiment kako bi se potvrdila postavljena hipoteza (prikaz u šestom poglavlju).

Ova disertacija rezultirala je sljedećim doprinosima:

- Razvijen je matematički model protupožarne agentne arhitekture broda. U ovom modelu su formalizirani elementi kao što su osnovne prostorne jedinice okruženja, prostorijske okruženja, elementi okoline, strukture svojstva - vrijednosti nad elementima okoline i nad prostorijama okruženja, funkcije

dodjeljivanja elemenata okruženja prostorijama okruženja, protupožarno okruženje broda, funkcije dodjeljivanja agenata prostorijama okruženja i drugi elementi. Kao primjer interpretacije razvijenog modela odabran je realni brod (Dvina Gulf) te je reprezentativni skup njegovih prostorija i protupožarnih uređaja prikazan kroz razvijeni matematički model protupožarne agentne arhitekture broda.

- Provedena je meta-analiza dostupnih agentnih simulacijskih okruženja te je na osnovu provedenog vrednovanja odabrano prikladno okruženje za implementaciju modela protupožarne agentne arhitekture broda.
- U odabranom simulacijskom modelu izrađena je aplikacija koja je uključila sve elemente razvijenog modela protupožarne agentne arhitekture broda upogonjavanjem prikladnog tipa agenata; reaktivnih agenata koji su dodijeljeni svakoj prostoriji broda sa zadatkom nadzora, detekcije te upravljanja gašenjem nastalih požara. Korištenjem razvijene aplikacije moguće je zadavati početne uvjete okruženja požara te pratiti način detekcije, širenje te gašenja zadanog požara.
- Proveden je sveobuhvatni eksperiment unutar kojeg su simulirane sve kombinacije pojedinačnih i dvostrukih požara koji se u modeliranom okruženju mogu dogoditi u odnosu na lokaciju pojavljivanja te različita stanja elemenata okruženja. Ovim je analizirano ukupno 650.880 različitih požara. Za svaki od ovih požara zabilježena je svaka promjena stanja. Svi pokrenuti požari su i ugašeni i to u vremenu između 7. vremenske jedinice simulacije i 128. vremenske jedinice simulacije što odgovara vremenima potpunog gašenja između 21. sekunde i 384. sekunde od nastanka požara. Prosječno vrijeme od nastanka do trenutka potpunog gašenja požara je bilo 75 vremenske jedinice simulacije što odgovara vremenu od 225 sekundi. Rezultatima simulacije implementiranog modela potvrđena je hipoteza da su višeagentni sustavi primjenjivi pri odlučivanju u brodskim pogibeljnim situacijama kao autonomni izvršni sustavi ili savjetodavni sustavi čijom se primjenom utječe na sigurnost pomorskog prometa.

Izravna posljedica upogonjavanja agentnih tehnologija pri djelimičnoj ili potpunoj supstituciji ljudskog faktora u brodskim pogibeljnim situacijama je smanjivanje ili potpuna eliminacija utjecaja ljudske pogreške pri odlučivanju u pogibeljnim situacijama kako bi se

zaštitila posada i putnici te smanjile materijalne štete. Buduća istraživanja mogu ići u više različitih smjerova. Prostorno određenje elemenata okruženja, pored klasičnog dizajniranja, može se dizajnirati temeljem agentne simulacije i mjerenja. Kod klasičnog proračuna, elementi okruženja za vatrodojavu i gašenje postavljaju se tamo gdje se požar očekuje, primjerice blizu ložišta parnog kotla gdje je izbijanje požara najizglednije, ali sam požar može izbiti i na mjestima gdje se pojavljivanje zanemaruje, primjerice na podsustavu goriva ili na električnim instalacijama. Kroz mjerenje unutar simulacije mogu se dodavati ili oduzimati elementi okruženja kako bi se dobilo optimizirano rješenje broja i pozicije elemenata okruženja. Također je ova projektiranja moguće izvesti s tipovima agenata koji imaju mogućnost učenja kako bi se pri izradi brodova uvažila iskustva s brodova u praksi.

Daljnje usavršavanje i poboljšavanje razvijenog modela može se usmjeriti prema budućim istraživanjima pomorskih autonomnih površinskih brodova. Doprinos ove tehnologije može se primijeniti već na prvu fazu u kojoj se razmatraju brodovi sa automatiziranim procesima i podršci odlučivanju. Unutar četiri definirane faze, četvrtom fazom je predviđen potpuno automatizirani brod na kojem nema posade i koji je u stanju samostalno donositi odluke i samostalno djelovati.

Daljnjim razvojem ovog dvodimenzionalnog modela i njegovom nadogradnjom može se razviti odgovarajući trodimenzionalni model. Primjena trodimenzionalnog modela omogućila bi još bolji uvid u simulacijsko ispitivanje jer bi se postigla još realnija simulacija širenja i gašenja požara, a sve s ciljem razvijanja što sigurnijih sustava koji će štititi kako ljudske živote tako i materijalna dobra.

## 8. Literatura

- [1] K. Ozbay and P. Kachroo, *Incident management in intelligent transportation systems* (Artech House ITS library). Boston: Artech House, 1999, pp. xv, 248 p
- [2] International Maritime Organization, "GMDSS manual : manual of the global maritime distress and safety system," ed. London: International Maritime Organization, 2007
- [3] B. Rokseth, I. B. Utne, and J. E. Vinnem, "A systems approach to risk analysis of maritime operations," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O-Journal of Risk and Reliability*, vol. 231, no. 1, pp. 53-68, Feb 2017, doi: 10.1177/1748006x16682606
- [4] Y. T. Xi, Z. L. Yang, Q. G. Fang, W. J. Chen, and J. Wang, "A new hybrid approach to human error probability quantification-applications in maritime operations," *Ocean Engineering*, vol. 138, pp. 45-54, Jul 2017, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.04.018
- [5] T. Molland, "The Maritime Engineering Reference Book A Guide to Ship Design, Construction and Operation Preface," (in English), *Maritime Engineering Reference Book: A Guide to Ship Design, Construction and Operation*, pp. xvii-xviii, 2008
- [6] S. Lupu, A. Pocora, F. Nicolae, C. Katona, and E. C. Lupu, "The Role of the Maritime Simulators in Evaluating the Practical Competencies of Graduated Students in Order to Accomplish Officer of the Watch Duties Onboard Vessels," (in English), *Elearning Vision 2020!, Vol I*, pp. 216-222, 2016, doi: 10.12753/2066-026X-16-031
- [7] "Det Norske Veritas Germanischer Lloyd." <https://www.dnvgl.com/> (accessed 10.10.2017)
- [8] T. Bielić, P. Vidan, and R. Mohović, "PODLOŽNOST KAO BITAN ČIMBENIK POMORSKIH NEZGODA," *Pomorstvo: Scientific Journal of Maritime Research*, vol. 24, no. 2, pp. 247-260, 2010.
- [9] B. Corovic and P. Djurovic, "Research of Marine Accidents through the Prism of Human Factors," (in English), *Promet-Zagreb*, vol. 25, no. 4, pp. 369-377, 2013, doi: 10.7307/ptt.v25i4.1210
- [10] M. Celik and S. Cebi, "Analytical HFACS for investigating human errors in shipping accidents," (in English), *Accident Anal Prev*, vol. 41, no. 1, pp. 66-75, Jan 2009, doi: 10.1016/j.aap.2008.09.004
- [11] E. Akyuz, "A marine accident analysing model to evaluate potential operational causes in cargo ships," (in English), *Safety Sci*, vol. 92, pp. 17-25, Feb 2017, doi: 10.1016/j.ssci.2016.09.010
- [12] W. A. Wagenaar and J. Groeneweg, "Accidents at Sea - Multiple Causes and Impossible Consequences," (in English), *Int J Man Mach Stud*, vol. 27, no. 5-6, pp. 587-598, Nov-Dec 1987, doi: Doi 10.1016/S0020-7373(87)80017-2
- [13] J. N. Zhao and J. Lv, "Comparing prediction methods for maritime accidents," (in English), *Transport Plan Techn*, vol. 39, no. 8, pp. 813-825, Dec 2016, doi: 10.1080/03081060.2016.1231901
- [14] B. Wu, X. P. Yan, Y. Wang, and C. G. Soares, "An Evidential Reasoning-Based CREAM to Human Reliability Analysis in Maritime Accident Process," (in English), *Risk Anal*, vol. 37, no. 10, pp. 1936-1957, Oct 2017, doi: 10.1111/risa.12757
- [15] C. Chauvin, S. Lardjane, G. Morel, J. P. Clostermann, and B. Langard, "Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS," (in English), *Accident Anal Prev*, vol. 59, pp. 26-37, Oct 2013, doi: 10.1016/j.aap.2013.05.006

- [16] M. Lin, Q. Z. Wu, and S. B. Liu, "Implementation and Verification of an Advanced the Galileo System Search and Rescue Service Signal Simulator," (in English), *International Conference on Space Information Technology 2009*, vol. 7651, 2010, doi: Unsp 76512b 10.1117/12.855431
- [17] O. Soner, U. Asan, and M. Celik, "Use of HFACS-FCM in fire prevention modelling on board ships," (in English), *Safety Sci*, vol. 77, pp. 25-41, Aug 2015, doi: 10.1016/j.ssci.2015.03.007
- [18] U. Ozdemir and A. Guneroglu, "Strategic Approach Model for Investigating the Cause of Maritime Accidents," (in English), *Promet-Zagreb*, vol. 27, no. 2, pp. 113-123, 2015, doi: 10.7307/ptt.v27i2.1461
- [19] L. Mu and A. Prinz, "Delay-oriented data traffic migration in maritime mobile communication environments," in *2012 Fourth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, 4-6 July 2012 2012, pp. 417-422, doi: 10.1109/icufn.2012.6261741
- [20] L. P. Mu, A. Prinz, and F. Reichert, "Towards Integrated Operations for Ships," (in English), *Int Wirel Commun*, pp. 941-946, 2013
- [21] R. Hanzu-Pazara, E. Barsan, P. Arsenie, L. Chiotoroiu, and G. Raicu, "Reducing of maritime accidents caused by human factors using simulators in training process," *Journal of Maritime Research*, no. 1, pp. 3-18%V 5, 2008-04-25 2008
- [22] M. Wooldridge and N. R. Jennings, "Intelligent Agents - Theory and Practice," (in English), *Knowl Eng Rev*, vol. 10, no. 2, pp. 115-152, Jun 1995
- [23] L. Sterling and K. Taveter, *The art of agent-oriented modeling* (Intelligent robotics and autonomous agents). Cambridge, Mass.: The MIT Press, 2009, pp. xix, 367 p.
- [24] L. Vercoouter, P. Beaune, and C. Sayettat, "Towards open distributed information systems by the way of a multi-agent conception framework," in *Working Notes of the AAI-2000 Workshop on Agent-Oriented Information Systems (AOIS-2000)*, 2000: Citeseer, pp. 29-38.
- [25] W. van der Hoek and M. Wooldridge, "Logics for Multiagent Systems," (in English), *Ai Mag*, vol. 33, no. 3, pp. 92-105, Fal 2012
- [26] B. Chen and H. H. Cheng, "A Review of the Applications of Agent Technology in Traffic and Transportation Systems," (in English), *Ieee T Intell Transp*, vol. 11, no. 2, pp. 485-497, Jun 2010, doi: 10.1109/Tits.2010.2048313
- [27] A. Rob, "A survey of agent based modelling and simulation tools," *Technical Report DL-TR-2010-07*, *Science and Technology Facilities Council*, 2010
- [28] V. M. Trbojevic and C. G. Soares, "Risk based methodology for a vessel safety management system," (in English), *Foresight and Precaution, Vols 1 and 2*, pp. 483-488, 2000. [Online]. Available: <Go to ISI>://000088745600068
- [29] M.-I. Roh, *Computational ship design*, 1 ed. New York, NY: Springer Singapore, 2017, pp. XV, 377
- [30] "Vessels in Class Document," in "IACS members to Equasis," 2020. Accessed: 21.4.2020. [Online]. Available: <http://www.iacs.org.uk/ship-company-data/vessels-in-class/>
- [31] International Maritime Organization, "GMDSS manual: manual of the global maritime distress and safety system," 2019 ed ed. London: International Maritime Organization, 2019, p. 816
- [32] I. M. Organization, *SOLAS, Consolidated Edition 2014: Consolidated Text of the International Convention for the Safety of Life at Sea, 1974, and Its Protocol of 1988 : Articles, Annexes and Certificates*. International Maritime Organization, 2014
- [33] L. Tetley and D. M. Calcutt, *Understanding GMDSS : the global maritime distress and safety system*. London: E. Arnold, 1994, pp. viii, 311 p.

- [34] S. G. 5, "Digital selective-calling system for use in the maritime mobile service," in "M Series, Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services " International Telecommunication Union ITU, Geneva, Recommendation M.493-15 (01/2019), 2019-01-30 2019. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/recommendation.asp?lang=en&parent=R-REC-M.493-15-201901-I>
- [35] F. Goerlandt and J. Montewka, "Maritime transportation risk analysis: Review and analysis in light of some foundational issues," *Reliab Eng Syst Safe*, vol. 138, pp. 115-134, 2015
- [36] R. Islam, M. Anantharaman, F. Khan, R. Abbassi, and V. Garaniya, "A hybrid human reliability assessment technique for the maintenance operations of marine and offshore systems," (in English), *Process Safety Progress*, vol. 39, no. S1, p. e12118, Mar 2020, doi: 10.1002/prs.12118
- [37] P. Nosov, G. Krapivko, A. Ben, M. Safonov, and S. Zinchenko, "Disabling the dynamic positioning of the vessel as a cause of the negative influence of human factor in maritime transport," 2019. [Online]. Available: <http://rep.ksma.ks.ua/jspui/handle/123456789/490>
- [38] X. Ye, B. Chen, K. Lee, R. Storesund, and B. Zhang, "An integrated offshore oil spill response decision making approach by human factor analysis and fuzzy preference evaluation," *Environmental Pollution*, p. 114294, 2020, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114294
- [39] L. R. Hjellvik and B. Sætrevik, "Can Survey Measures Predict Subsequent Key Performance Indicators of Maritime Safety? Confirmatory and Exploratory Analyses of the Association between Self-report and Objective Indices," 2020
- [40] A. Coraddu, L. Oneto, B. N. de Maya, and R. Kurt, "Determining the most influential human factors in maritime accidents: A data-driven approach," *Ocean Engineering*, vol. 211, p. 107588, 2020
- [41] Y. Li, Z. Duan, and Z. Liu, "Study on Risk-based Operators' Competence Assessment of Maritime Autonomous Surface Ships," 2019: IEEE, doi: 10.1109/ictis.2019.8883599. [Online]. Available: <https://dx.doi.org/10.1109/ICTIS.2019.8883599>
- [42] A. Vicenzutti, V. Bucci, G. Sulligoi, and R. Pelaschiar, "Impact of Safe Return to Port rules on passenger ships power systems design," (in English), *2016 Aeit International Annual Conference (Aeit) - Sustainable Development in the Mediterranean Area: Energy and Ict Networks of the Future*, 2016
- [43] M. Wooldridge, "Intelligent agents, Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence," ed: MIT Press, Cambridge, MA, 1999, pp. 15-46
- [44] M. Rosić, "Poučavanje na daljinu zasnovano na raspodijeljenim semantičkim mrežama," PhD PhD, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Sveučilište u Zagrebu, 2004.
- [45] L. Fievet and D. Sornette, "Calibrating emergent phenomena in stock markets with agent based models," *PloS one*, vol. 13, no. 3, p. e0193290, 2018
- [46] J. Ferber, *Multi-agent systems : an introduction to distributed artificial intelligence*. Harlow: Addison-Wesley, 1999, pp. xviii, 509 p.
- [47] S. J. Russell and P. Norvig, *Artificial intelligence: a modern approach*. Malaysia; Pearson Education Limited, 2016
- [48] N. R. Jennings, "On agent-based software engineering," (in English), *Artif Intell*, vol. 117, no. 2, pp. 277-296, Mar 2000, doi: 10.1016/S0004-3702(99)00107-1
- [49] R. H. Bordini, M. Dastani, and M. Winikoff, "Current Issues in Multi-Agent Systems Development," in *7th International Workshop, ESAW 2006, Dublin, Ireland, September 6-8, 2006*, Berlin, Heidelberg, G. M. P. O. H. A. Ricci and M. J. O. G. O. g. Dikenelli, Eds., 2007: Springer Berlin Heidelberg, in Engineering Societies in the Agents World VII, pp. 38-61

- [50] "FSS code: international code for fire safety systems: Resolution MSC.98(73)," 2007 edition. ed. London: International Maritime Organization, 2007
- [51] International Maritime Organization., *ISM code : International safety management code with guidelines for its implementation*, 2014 edition, Fourth edition. ed. London: International Maritime Organization, 2014, pp. vi, 71 pages
- [52] G. Rzevski, P. Skobelev, and V. Andreev, "MagentaToolkit: A set of multi-agent tools for developing adaptive real-time applications," in *International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems*, 2007: Springer, pp. 303-313
- [53] M. Tucac and A. J. García, "Design and implementation of a FIPA based agent communication model for a logic programming framework," in *XIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 2007
- [54] S. Abar, G. K. Theodoropoulos, P. Lemarinier, and G. M. P. O'Hare, "Agent Based Modelling and Simulation tools: A review of the state-of-art software," (in English), *Comput Sci Rev*, vol. 24, pp. 13-33, May 2017, doi: 10.1016/j.cosrev.2017.03.001
- [55] S. L. Lytinen and S. F. Railsback, "The evolution of agent-based simulation platforms: a review of NetLogo 5.0 and ReLogo," in *Proceedings of the fourth international symposium on agent-based modeling and simulation*, 2012, p. 19
- [56] U. Wilensky, "NetLogo," in *NetLogo Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*, ed. Evanston, IL: Northwestern University, 1999, p. 449
- [57] I. Sakellariou, P. Kefalas, and I. Stamatopoulou, "Enhancing NetLogo to Simulate BDI Communicating Agents," in *Artificial Intelligence: Theories, Models and Applications*, (Lecture Notes in Computer Science: Springer Berlin Heidelberg, 2008, ch. Chapter 24, pp. 263-275
- [58] S. Tisue and U. Wilensky, "Netlogo: A simple environment for modeling complexity," in *International conference on complex systems*, 2004, vol. 21: Boston, MA, pp. 16-21
- [59] *Rules for classification: Ships — DNVGL-RU-SHIP Pt.1 Ch.2. Edition July 2019*, Rules for classification D. N. V. G. Lloyds, 1363 Høvik Norway, July 2019 2019. [Online]. Available: <http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/DNVGL/RU-SHIP/2019-07/DNVGL-RU-SHIP-Pt1Ch2.pdf>
- [60] H. v. Rijn. "Photo of Dvina Gulf." [https://www.fleetmon.com/vessels/dvina-gulf\\_9336464\\_12944040/photos/2298497/](https://www.fleetmon.com/vessels/dvina-gulf_9336464_12944040/photos/2298497/) (accessed Feb 2 2019)
- [61] "N08-PL-001-Plano De Resposta à Emergências Emergency Response Plan," in "Maritime Unit NORBE VIII," Marine, plano 13.12.2017 2017
- [62] *Hi expansion foam systems*, Revision No.: 00 ed. (VESSEL NAME/HULL NO.: 329 PROJECT NO.: Q-17616A2). Wilhelmsen Technical Solutions for VITERLEF MANAGEMENT LTD, 2016, p. 112
- [63] *Unitor CO2 HP system*, Revision No.: 00 ed. (VESSEL NAME/HULL NO.: 329 PROJECT NO.: Q-17616A1). Wilhelmsen Technical Solutions for VITERLEF MANAGEMENT LTD, 2016, p. 144
- [64] N. E. Chell, *The operation and maintenance of machinery in motorships* (MEP series ; v 1, pt 18.). London: Institute of Marine Engineers, 1999, p. 205
- [65] R. Goldstein and A. Khan, "A taxonomy of event time representations," in *Proceedings of the Symposium on Theory of Modeling & Simulation*, 2017: Society for Computer Simulation International, p. 6
- [66] D. Drysdale, *An introduction to fire dynamics*, 3rd ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2011, p. 574
- [67] J. Wikman *et al.*, "Study investigating cost effective measures for reducing the risk from fires on ro-ro passenger ships (FIRESAFE)," European Maritime Safety Agency, Lisbon, 2017 2017.



Accessed: 2017-05-02t09:01:27.342+02:00. [Online]. Available:  
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-29418>

- [68] F. Stonedahl and U. Wilensky, "BehaviorSearch [computer software]," *Center for Connected Learning and Computer Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL. Available online: <http://www.behaviorsearch.org>*, 2010

## 9. Popis slika

|   |    |
|---|----|
| Slika 1.1. Propisivanje pomorske sigurnosti [5] .....   | 9  |
| Slika 1.2. Specifični zadaci GMDSS .....  | 14 |
| Slika 1.3. Morska područja GMDSS.....   | 14 |
| Slika 2.1. Najviša razina strukture agenta .....  | 20 |
| Slika 2.2. Interakcija agenta i okruženja posredstvom funkcija percepcija i akcija [43] ..... | 25 |
| Slika 2.3. Struktura višeagentnog sustava [48] .....  | 27 |
| Slika 2.4. Elementi protupožarne zaštite broda.....   | 29 |
| Slika 2.5. Petlje senzora u vatrodojavnoj centrali .....                                      | 30 |
| Slika 4.1. Arhitektura agentnog sustava prema modelu FIPA .....                               | 40 |
| Slika 4.2. Korisničko sučelje sustava NetLogo .....   | 45 |
| Slika 5.1. Tanker Dvina Gulf u plovidbi [60] .....  | 48 |
| Slika 5.2. Dio nacрта 0-6788 Dvina Gulf, model vatrokontrole i sigurnosni plan .....          | 49 |
| Slika 5.3. Detalj spajanja detektorske petlje 4 iz strojarnice.....                           | 50 |
| Slika 5.4. Upute za gašenje strojarnice visokoekspandirajućom pjenom.....                     | 52 |
| Slika 5.5. Dio uputa za gašenje CO <sub>2</sub> prostora ispirnog zraka glavnog motora .....  | 53 |
| Slika 5.6. Požar u prostoru ispirnog zraka glavnog motora .....                               | 54 |
| Slika 5.7. Tlocrt prostorija loženog kotla 1. ili 2.....                                      | 56 |
| Slika 5.8. Tlocrt strojarnice glavnog motora.....   | 56 |
| Slika 5.9. Tlocrt kontrolne sobe strojarnice .....  | 57 |
| Slika 5.10. Tlocrt prostora ispirnog zraka glavnog motora.....                                | 57 |
| Slika 5.11. Podjela prostorije br. 1 loženog kotla na osnovne prostorne jedinice .....        | 59 |
| Slika 5.12. Elementi okruženja dodijeljeni prostorijama .....                                 | 61 |
| Slika 5.13. UML dijagram aktivnosti kod gašenja požara u prostoriji loženog kotla.....        | 65 |
| Slika 5.14. Arhitektura izrađenog simulacijskog modela .....                                  | 67 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 5.15. NetLogo svijet s izgrađenim prostorijama .....  | 68 |
| Slika 5.16. NetLogo okruženje s realnim tlocrtima odabranih prostorija .....  | 69 |
| Slika 5.17. Primjer konfiguracije stanja ventila u grafičkom monitoru NetLogo .....   | 69 |
| Slika 5.18. Model okruženja brodske strojarnice .....   | 70 |
| Slika 5.19. Uvjeti gorenja.....   | 71 |
| Slika 5.20. Požar u svim prostorijama, alarmi aktivirani i procedura gašenja započeta .....   | 75 |
| Slika 5.21. Požar u prostoriji glavnog motora na vrhuncu .....  | 75 |
| Slika 5.22. Uključena funkcija praćenja stanja elemenata okruženja .....  | 76 |
| Slika 5.23. Požar u prostoriji loženog kotla u vremenskoj jedinici simulacije 4 .....   | 77 |
| Slika 5.24. Vremenski razvoj površine požara.....   | 81 |
| Slika 6.1. Simulacija požara u prvoj prostoriji loženog kotla strojarnice: broj ugašenih požara prema vremenu potrebnom za njihovo gašenje .....  | 86 |
| Slika 6.2. Simulacija požara u drugoj prostoriji loženog kotla strojarnice: broj ugašenih požara prema vremenu potrebnom za njihovo gašenje ..... | 87 |
| Slika 6.3. Simulacija požara u prostoriji glavnog motora: broj ugašenih požara prema vremenu potrebnom za njihovo gašenje .....                   | 88 |
| Slika 6.4. Simulacija dva požara u prostoriji loženog kotla 1: broj ugašenih parova požara prema vremenu potrebnom za njihovo gašenje .....       | 89 |
| Slika 6.5. Potrebna vremena za gašenje svih 650880 simuliranih požara.....  | 90 |

## 10. Popis tablica

|  |    |
|--|----|
| Tablica 3.1. Klase elemenata okoline s pripadajućim strukturama svojstva – vrijednosti.....  | 34 |
| Tablica 3.2. Primjer interpretacije strukture svojstva – vrijednosti skupa prostorija.....   | 35 |
| Tablica 4.1. Agentne platforme koje su uzete u obzir pri odabiru prikladne platforme za simulaciju modela razvijenog unutar ove disertacije..... | 42 |
| Tablica 4.2. Sustavi koji ispunjavaju Obavezan uvjet 1 .....   | 42 |
| Tablica 4.3. Agentne platforme koje zadovoljavaju Obavezan uvjet 1 i Obavezan uvjet 2 ....   | 43 |
| Tablica 5.1. Elementi sa Slike 5.3. ....   | 50 |
| Tablica 5.2. Klase elemenata okruženja i njima pridružene strukture svojstva-vrijednosti.....  | 59 |
| Tablica 5.3. Struktura svojstva-vrijednosti prostorija .....   | 61 |
| Tablica 5.4. Konfiguracijske postavke aplikacije .....   | 73 |
| Tablica 5.5. Vrijednosti varijabli aplikacije .....  | 77 |
| Tablica 5.6. Stanja reprezentativnih elemenata okruženja u simulaciji .....  | 78 |
| Tablica 6.1. Moguća stanja elemenata okruženja za scenarij jednog požara u prostoriji .....  | 83 |
| Tablica 6.2. Moguća stanja elemenata okruženja za scenarij dva požara u istoj prostoriji.....  | 84 |
| Tablica 6.3. Moguća stanja elemenata okruženja za scenarij dva požara u različitim prostorijama .....  | 85 |
| Tablica 6.4. Minimalna i maksimalna vremena gašenja požara u ovisnosti o lokaciji požara i broju požara .....                                    | 90 |
| Tablica 6.5. Postotak aktiviranja GMDSS .....  | 91 |
| Tablica 6.6. Postotak aktiviranja GMDSS kod požara u obje prostorije loženog kotla.....  | 91 |

## Prilog 1. - Razvoj promjena stanja elemenata okruženja u primjeru požara

| vremensko jedinica simulacije | vremensko jedinica simulacije |                      |                           |                      |                         |                         |               | vremensko jedinica simulacije |                           |                   |                           |                |                 |        |              |              |                        |                        |       |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|-------------------------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|----------------|-----------------|--------|--------------|--------------|------------------------|------------------------|-------|
|                               | požar                         | požar u prostoriji 1 | izgorenost u prostoriji 1 | detektor dima "al-2" | detektor plamena "al-3" | detektor plamena "al-4" | detektor ic-1 | detektor ic-3                 | zvučni i svjetlosni alarm | pokrenuto-gašenje | broj ljudi u prostoriji 1 | ventili goriva | prekidač napona | klapne | vrata "dr-2" | vrata "dr-3" | generator pjene "fg-2" | generator pjene "fg-3" | GMDSS |
| 0                             | 0                             | 0                    | 0                         | 0                    | 0                       | 0                       | 0             | 0                             | 0                         | 0                 | 1                         | 1              | 1               | 1      | 1            | 1            | 0                      | 0                      | ne    |
| 1                             | 29                            | 29                   | 29                        | 0                    | 0                       | 0                       | 1             | 0                             | 0                         | 0                 | 1                         | 1              | 1               | 1      | 1            | 1            | 0                      | 0                      | ne    |
| 2                             | 62                            | 62                   | 62                        | 0                    | 0                       | 0                       | 1             | 0                             | 0                         | 0                 | 1                         | 1              | 1               | 1      | 1            | 1            | 0                      | 0                      | ne    |
| 3                             | 130                           | 130                  | 130                       | 0                    | 0                       | 0                       | 1             | 0                             | 0                         | 0                 | 1                         | 1              | 1               | 1      | 1            | 1            | 0                      | 0                      | ne    |
| 4                             | 212                           | 212                  | 212                       | 0                    | 1                       | 1                       | 1             | 0                             | 0                         | 0                 | 1                         | 1              | 1               | 1      | 1            | 1            | 0                      | 0                      | ne    |
| 5                             | 231                           | 231                  | 231                       | 0                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 1                         | 1              | 0               | 0      | 1            | 0            | 0                      | 0                      | ne    |
| 6                             | 242                           | 242                  | 242                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 1                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 0                      | 0                      | ne    |
| 7                             | 256                           | 256                  | 256                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 1                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 8                             | 268                           | 268                  | 268                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 1                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 9                             | 288                           | 288                  | 288                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 1                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 10                            | 303                           | 303                  | 303                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 1                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 11                            | 320                           | 320                  | 320                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 12                            | 338                           | 338                  | 338                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 13                            | 357                           | 357                  | 357                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 14                            | 379                           | 379                  | 379                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 15                            | 395                           | 395                  | 395                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 16                            | 416                           | 416                  | 416                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 17                            | 437                           | 437                  | 437                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 18                            | 453                           | 453                  | 453                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 19                            | 473                           | 473                  | 473                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 20                            | 486                           | 486                  | 486                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 21                            | 505                           | 505                  | 505                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 22                            | 516                           | 516                  | 516                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 23                            | 537                           | 537                  | 537                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 24                            | 547                           | 547                  | 547                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 25                            | 558                           | 558                  | 558                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 26                            | 576                           | 576                  | 576                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 27                            | 587                           | 587                  | 587                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                 | 0                         | 1              | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |

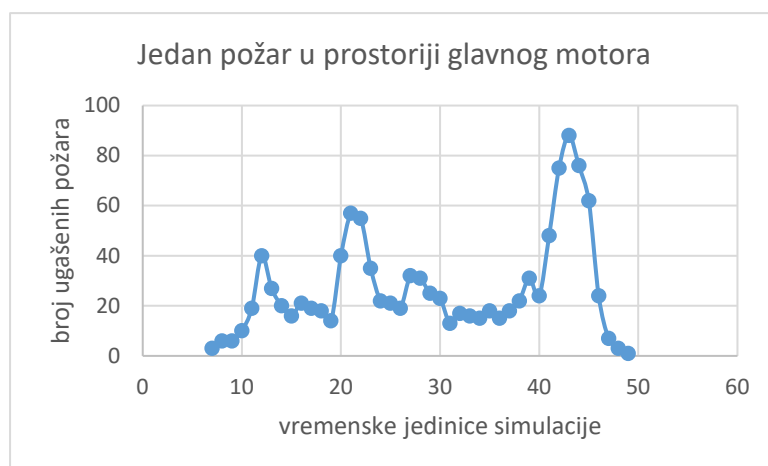
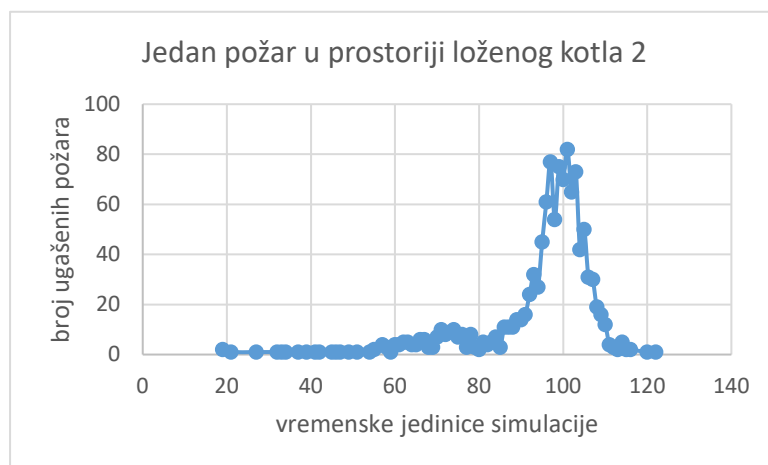
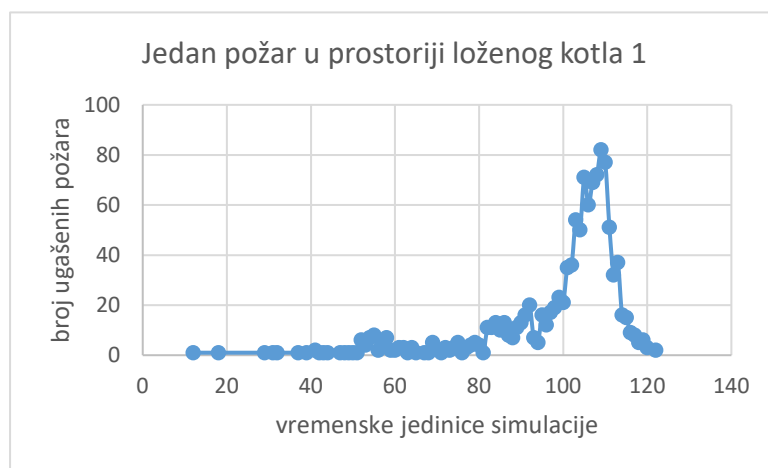
| <i>vremenska jedinica simulacije</i> | požar | požar u prostoriji 1 | izgorenost u prostoriji 1 | detektor dima "al-2" | detektor plamena "al-3" | detektor plamena "al-4" | detektor ic-1 | detektor ic-3 | zvučni i svjetlosni alarm | pokrenuto -gašenje | broj ljudi u prostoriji 1 | ventil goriva | prekidač napona | klapne | vrata "dr-2" | vrata "dr-3" | generator pjene "fg-2" | generator pjene "fg-3" | GMDSS |
|--------------------------------------|-------|----------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|---------------|-----------------|--------|--------------|--------------|------------------------|------------------------|-------|
| 28                                   | 599   | 599                  | 599                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 29                                   | 619   | 619                  | 619                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 30                                   | 636   | 636                  | 636                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 31                                   | 644   | 644                  | 644                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 32                                   | 654   | 654                  | 654                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 33                                   | 668   | 668                  | 668                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 34                                   | 690   | 690                  | 690                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 35                                   | 717   | 717                  | 717                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 36                                   | 740   | 740                  | 740                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 37                                   | 760   | 760                  | 760                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 38                                   | 780   | 780                  | 780                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 39                                   | 800   | 800                  | 800                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 40                                   | 816   | 816                  | 816                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 41                                   | 835   | 835                  | 835                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 42                                   | 853   | 853                  | 853                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 43                                   | 872   | 872                  | 872                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 44                                   | 889   | 889                  | 889                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 45                                   | 908   | 908                  | 908                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 46                                   | 938   | 938                  | 938                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 47                                   | 955   | 955                  | 955                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 48                                   | 977   | 977                  | 977                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 49                                   | 994   | 994                  | 994                       | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 50                                   | 1017  | 1017                 | 1017                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 51                                   | 1044  | 1044                 | 1044                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 52                                   | 1067  | 1067                 | 1067                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 53                                   | 1082  | 1082                 | 1082                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 54                                   | 1112  | 1112                 | 1112                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 55                                   | 1130  | 1130                 | 1130                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 56                                   | 1148  | 1148                 | 1149                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 57                                   | 1165  | 1165                 | 1167                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 58                                   | 1169  | 1169                 | 1185                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 59                                   | 1179  | 1179                 | 1203                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |

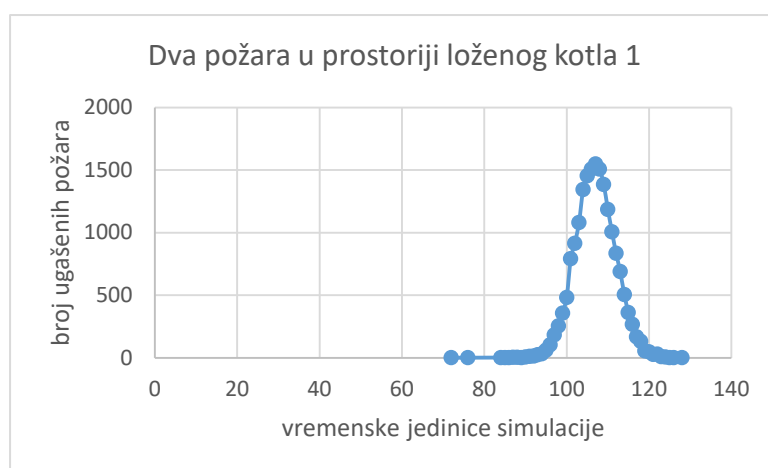
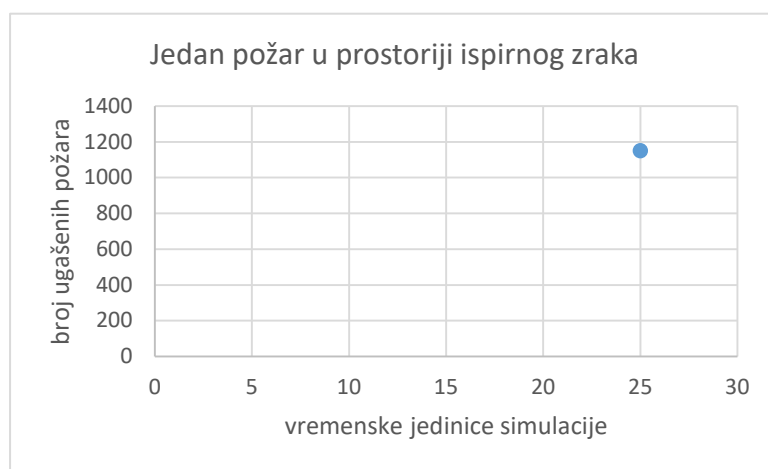
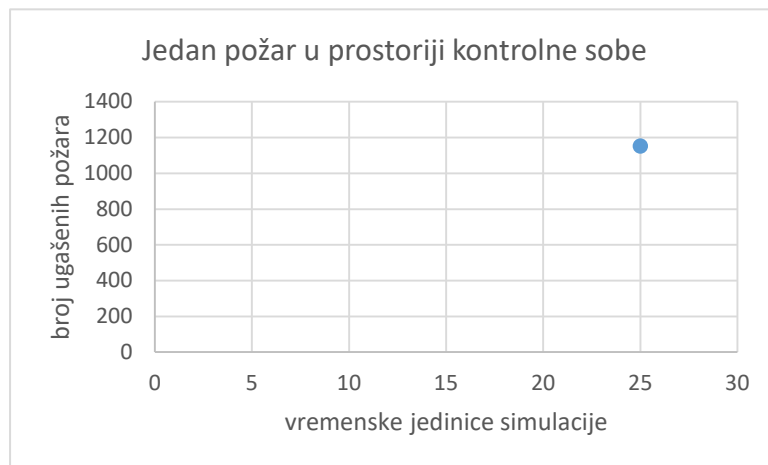
| vremenska jedinica<br>simulacije | vremenska jedinica simulacije |                      |                           |                      |                         |                         |               | vremenska jedinica simulacije |                           |                    |                           |               |                 |        |              |              |                        |                        |       |
|----------------------------------|-------------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|---------------|-----------------|--------|--------------|--------------|------------------------|------------------------|-------|
|                                  | požar                         | požar u prostoriji 1 | izgorenost u prostoriji 1 | detektor dima "al-2" | detektor plamena "al-3" | detektor plamena "al-4" | detektor ic-1 | detektor ic-3                 | zvučni i svjetlosni alarm | pokrenuto -gašenje | broj ljudi u prostoriji 1 | ventil goriva | prekidač napona | klapne | vrata "dr-2" | vrata "dr-3" | generator pjene "fg-2" | generator pjene "fg-3" | GMDSS |
| 60                               | 1181                          | 1181                 | 1216                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 61                               | 1178                          | 1178                 | 1237                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 62                               | 1168                          | 1168                 | 1254                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 63                               | 1146                          | 1146                 | 1264                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 64                               | 1123                          | 1123                 | 1276                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 65                               | 1108                          | 1108                 | 1287                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 66                               | 1089                          | 1089                 | 1295                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 67                               | 1071                          | 1071                 | 1305                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 68                               | 1039                          | 1039                 | 1307                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 69                               | 1006                          | 1006                 | 1311                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 70                               | 973                           | 973                  | 1313                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 71                               | 931                           | 931                  | 1319                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 72                               | 892                           | 892                  | 1319                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 73                               | 857                           | 857                  | 1322                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 74                               | 813                           | 813                  | 1328                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 75                               | 782                           | 782                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 76                               | 741                           | 741                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 77                               | 701                           | 701                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 78                               | 652                           | 652                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 79                               | 606                           | 606                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 80                               | 570                           | 570                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 81                               | 529                           | 529                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 82                               | 478                           | 478                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 83                               | 436                           | 436                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 84                               | 384                           | 384                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 85                               | 346                           | 346                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 86                               | 316                           | 316                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 87                               | 264                           | 264                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 88                               | 233                           | 233                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 89                               | 205                           | 205                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 90                               | 187                           | 187                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 91                               | 171                           | 171                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0                             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |

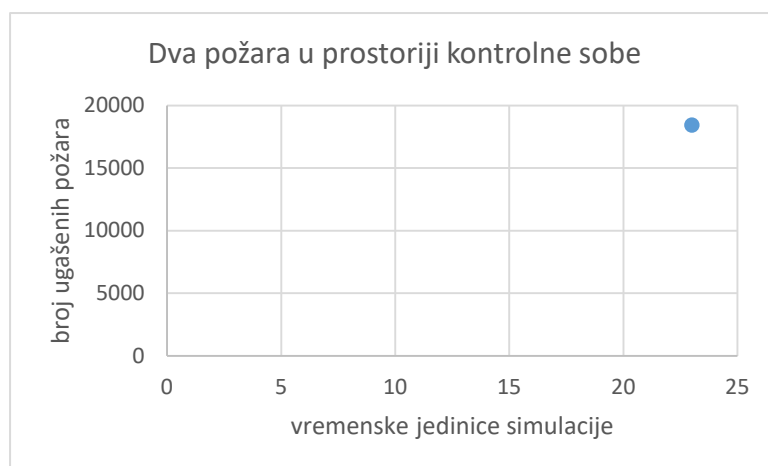
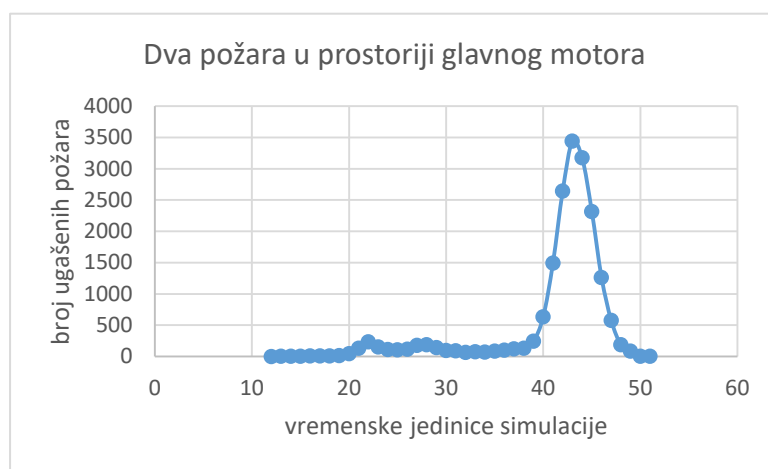
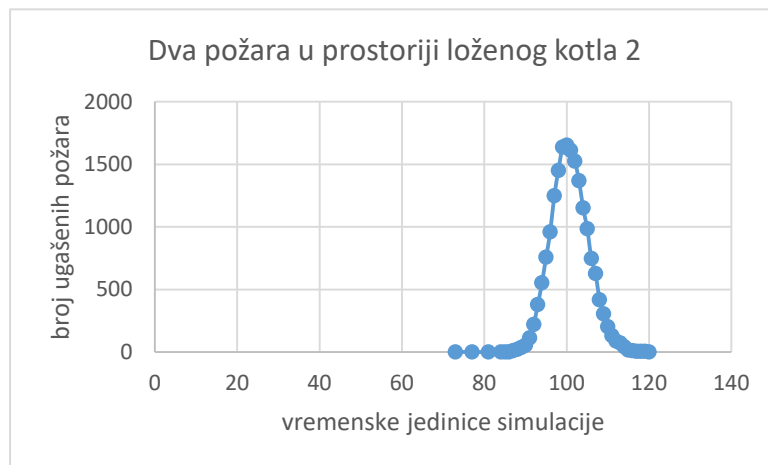
| <i>vremenska jedinica simulacije</i> | požar | požar u prostoriji 1 | izgorenost u prostoriji 1 | detektor dima "al-2" | detektor plamena "al-3" | detektor plamena "al-4" | detektor ic-1 | detektor ic-3 | zvučni i svjetlosni alarm | pokrenuto -gašenje | broj ljudi u prostoriji 1 | ventil goriva | prekidač napona | klapne | vrata "dr-2" | vrata "dr-3" | generator pjene "fg-2" | generator pjene "fg-3" | GMDSS |
|--------------------------------------|-------|----------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|---------------|-----------------|--------|--------------|--------------|------------------------|------------------------|-------|
| 92                                   | 149   | 149                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 93                                   | 133   | 133                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 94                                   | 122   | 122                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 95                                   | 111   | 111                  | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 96                                   | 96    | 96                   | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 97                                   | 85    | 85                   | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 98                                   | 77    | 77                   | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 99                                   | 67    | 67                   | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 100                                  | 54    | 54                   | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 101                                  | 43    | 43                   | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 102                                  | 29    | 29                   | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 103                                  | 13    | 13                   | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 104                                  | 7     | 7                    | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 105                                  | 1     | 1                    | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |
| 106                                  | 0     | 0                    | 1331                      | 1                    | 1                       | 0                       | 1             | 0             | 1                         | 1                  | 0                         | 1             | 0               | 0      | 0            | 0            | 1                      | 1                      | ne    |

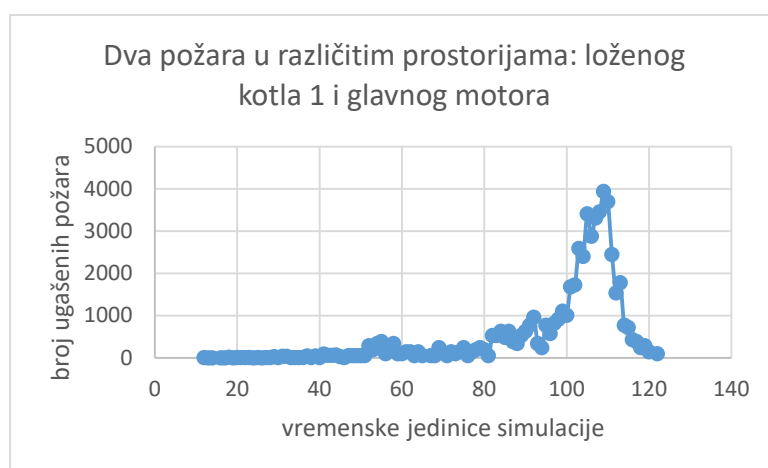
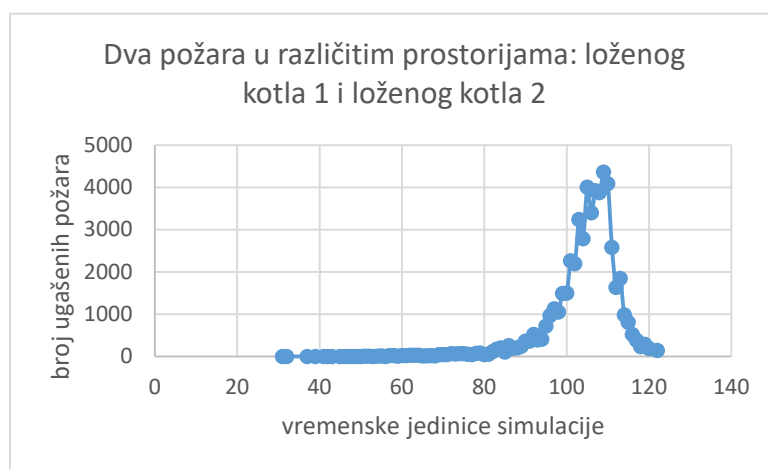
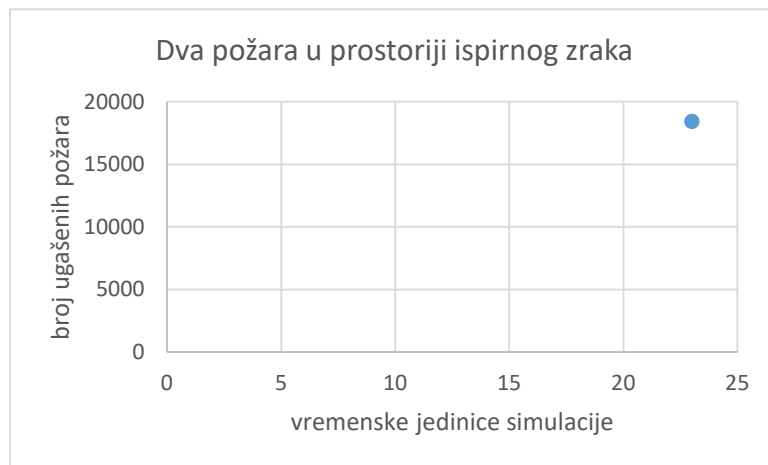


## Prilog 2. - Rezultati mjerenja vremena potrebnog za detekciju i gašenje požara

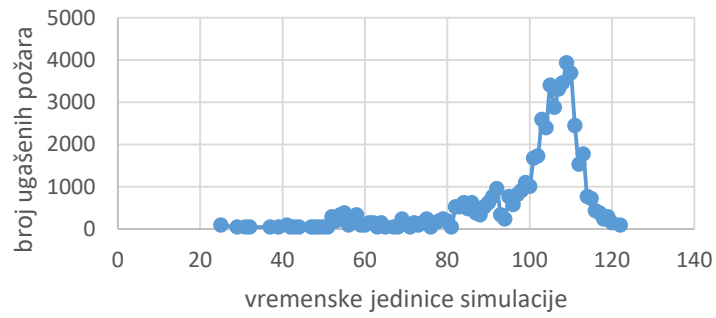




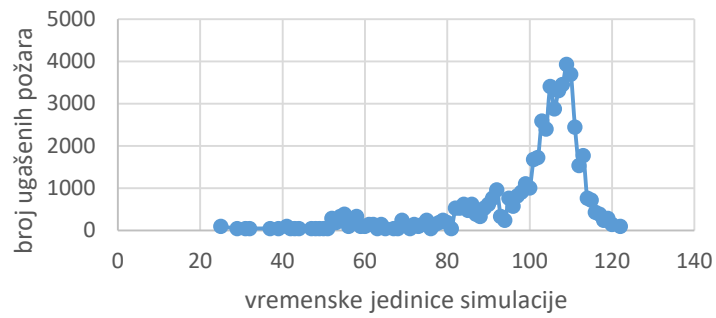




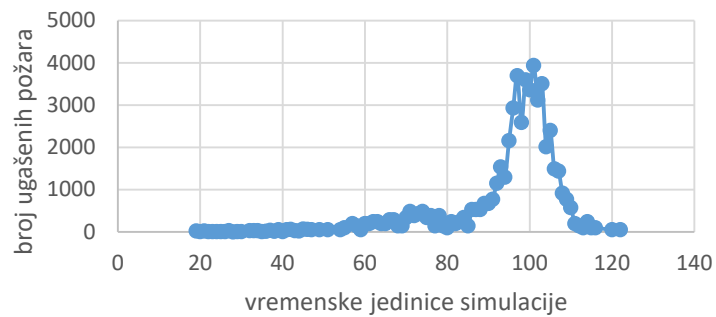
Dva požara u različitim prostorijama: loženog kotla 1 i kontrolne sobe



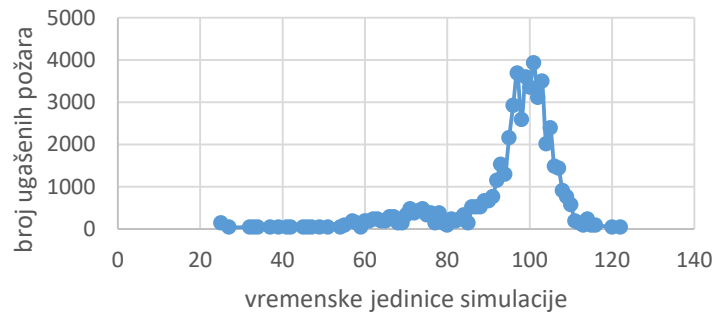
Dva požara u različitim prostorijama: loženog kotla 1 i ispirnog zraka



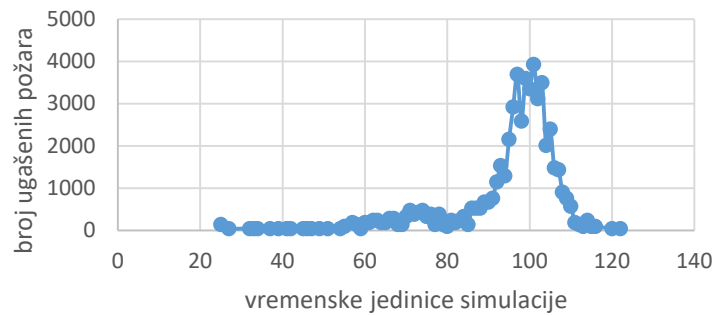
Dva požara u različitim prostorijama: loženog kotla 2 i glavnog motora



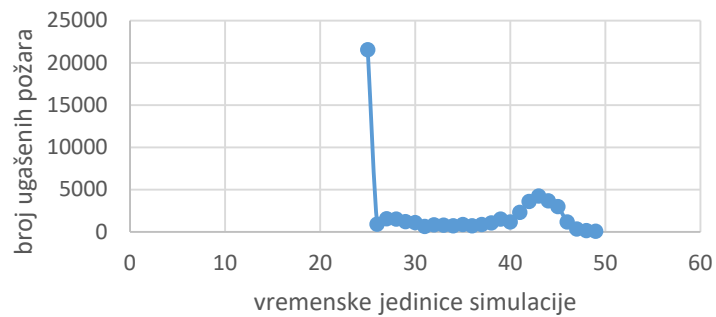
Dva požara u različitim prostorijama: loženog kotla 2 i kontrolne sobe



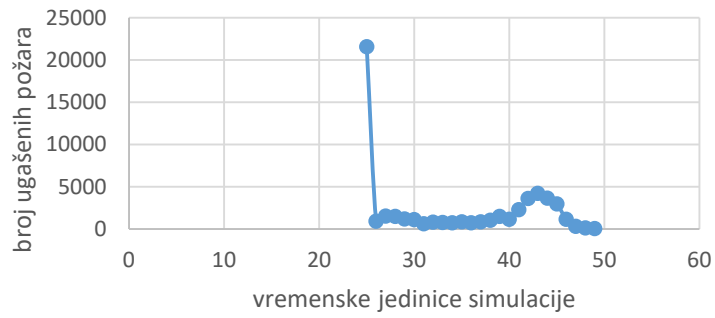
Dva požara u različitim prostorijama: loženog kotla 2 i ispirnog zraka



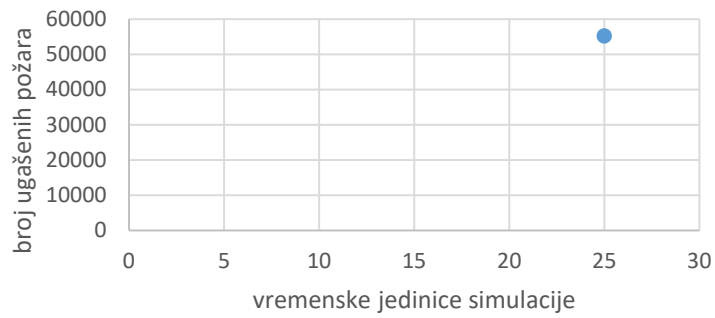
Dva požara u različitim prostorijama: glavnog motora i kontrolne sobe



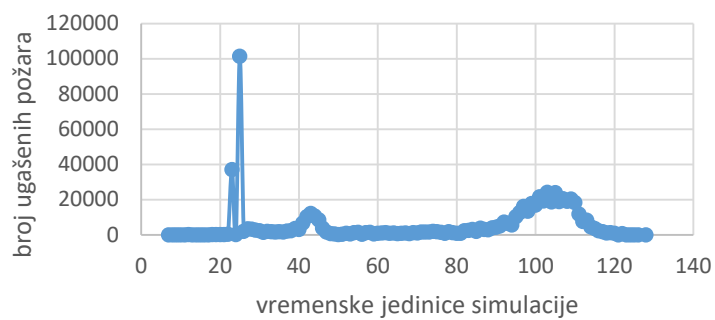
Dva požara u različitim prostorijama: glavnog motora i ispirnog zraka



Dva požara u različitim prostorijama: kontrolne sobe i ispirnog zraka



Ukupan rezultat mjerenja svih simuliranih požara



## 11. Životopis

Dean Sumić rođen je 29. studenog 1972. godine, oženjen i otac troje djece. Na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Splitu diplomirao je 1997. na Odjelu brodske elektroenergetike i elektronike stekavši stručni naziv Inženjer pomorskog prometa. Na istom fakultetu diplomirao je 2007. na studiju Pomorskog menadžmenta te stekao zvanje diplomiranog inženjera pomorskog prometa. Na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Splitu diplomirao je i 2016. i stekao zvanje sveučilišnog prvostupnika inženjera nautike.

Nakon diplomiranja 1997. radio je kao brodski elektroničar na Mediterranean Shipping Company sveukupno godinu dana na dugoj plovidbi. Nakon plovidbe bio je ročni vojnik-vatrogasac godinu dana pri Ministarstvu obrane RH. Na Pomorskom fakultetu je honorarno zaposlen od 2001. godine, a na stalnom radnom mjestu kao Viši informatički referent je zaposlen od 2003. godine. Od akademske godine 2004./2005. je stručni suradnik i izvodi vježbe iz kolegija Pomorske komunikacije na studijima Pomorskog fakulteta u Splitu. Zaposlen je 2009. kao suradnik u suradničkom zvanju i radnom mjestu asistent za znanstveno područje tehničkih znanosti, polje tehnologija prometa i transport, grana pomorski i riječni promet na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Splitu. Autor je i koautor niza znanstvenih radova. Prvi izbor u zvanje i na radno mjesto predavača za znanstveno područje tehničkih znanosti, polje tehnologija prometa i transport, grana pomorski i riječni promet na Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Splitu obavljen je u veljači 2015., a zadnji izbor u zvanje predavača obavljen je u veljači 2020.

Posjeduje diplomu Centra za učenje stranih jezika Split o aktivnom znanju Engleskog jezika iz 1988., položen ispit za vojnog vatrogasca pri Hrvatskoj vojsci 1998., član je Hrvatske komore inženjera tehnologije prometa i transporta od 2012. i ima položen stručni ispit. Na Pomorskom fakultetu u Splitu obavlja od 2016. funkciju voditelja studija Pomorske nautike. Posjeduje niz svjedodžbi za obavljanje službe na brodu pri čemu se ističu ona za voditelja jahte kategorije B i časnika elektrotehnike.