

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

Miho Kristić

**PRILOG UNAPREĐENJU
PROTUSUDARNOG UZBUNJIVANJA NA
MORU**

DOKTORSKI RAD

Rijeka, 2024.

SVEUČILIŠTE U RIJECI

POMORSKI FAKULTET

Miho Kristić

**PRILOG UNAPREĐENJU
PROTUSUDARNOG UZBUNJIVANJA NA
MORU**

DOKTORSKI RAD

Mentor: izv. prof. dr. sc. Srđan Žuškin

Rijeka, 2024.

UNIVERSITY OF RIJEKA
FACULTY OF MARITIME STUDIES

Miho Kristić

**A CONTRIBUTION TO THE
IMPROVEMENT OF COLLISION
ALERTING AT SEA**

DOCTORAL THESIS

Rijeka, 2024.

Mentor doktorskog rada: izv. prof. dr. sc. Srđan Žuškin

Doktorski rad obranjen je dana _____ u/na _____

_____, pred povjerenstvom u sastavu:

1. _____
2. _____
3. _____

SAŽETAK

Sudari na moru predstavljaju jedne od najtežih vrsta nezgoda s obzirom da mogu dovesti u opasnost ljude i okoliš te nanijeti veliku ekonomsku štetu. Međusobni odnosi brodova te potrebne radnje kako bi se izbjegli sudari uređeni su pravilima o izbjegavanju sudara na moru. Pravila, nastala u prošlom stoljeću, upućena su članovima plovidbene straže koji donose odluke na temelju vlastitog znanja, iskustva i vještina, imajući na umu sigurnost plovidbe. Međutim, pravila kao takva često koriste pojmove koji su nejasni ili neizraziti te njihova kvantifikacija predstavlja poteškoće razvoju modernih inteligentnih navigacijskih sustava. Neizraziti pojmovi mogu se jednostavno matematički opisati koristeći svojstva neizrazitih skupova i neizrazitih sustava. Budući je procjena rizika sudara na moru stvar odluke člana plovidbene straže, u ovom se radu pristupilo modeliranju indeksa rizika sudara koristeći ekspertna znanja uz neizraziti pristup. Istraživanje u svom prvom dijelu određuje čimbenike koje eksperti smatraju bitnima pri procjeni rizika sudara. Rezultati ukazuju da su eksperti kao vrlo važne čimbenike pored uobičajenih odabrali i neke druge čimbenike koji imaju utjecaj na procjenu rizika sudara. Svi odabrani čimbenici, u svojoj naravi neizraziti, predstavljaju lingvističke varijable, te su se u drugom dijelu istraživanja kvantificirali koristeći teoriju neizrazitih skupova. Pri tome su se rasponi i oblik lingvističkih varijabli odredili koristeći ekspertno znanje ispitanika, upotrebom trapezoidnih i Gaussovih funkcija pripadnosti. Koristeći odabrane čimbenike pristupilo se izradi modela neizrazitog sustava zaključivanja za određivanje neizrazitog indeksa rizika sudara. Kako bi se prikazale razlike pri procjeni rizika koje proizlaze iz različitih međusobnih odnosa brodova, potrebno je bilo odrediti više podmodela. Dodatno, s obzirom na mišljenje eksperata, bilo je potrebno kreirati modele u uvjetima smanjene vidljivosti, modelirajući tako poseban oprez kako je on propisan pravilima. Validacijom modela na neovisnom skupu uzoraka odabrani su oni koji su koristili trapezoidne funkcije pripadnosti kao povoljniji. Verifikacijom rezultata studijama slučajeva prikazane se mogućnosti modela neizrazitog sustava zaključivanja. Rezultati indiciraju kako je ostvareno unapređenje protusudarnog uzbunjivanja. Među ostalim, postignuto je pravovremeno uzbunjivanje u nekim situacijama u kojima postojeći sustavi ne bi alarmirali člana plovidbene straže na vrijeme. Dodatno prikazani indeks rizika sudara nije binaran, te dopušta usporedbu brodova s obzirom na neizraziti indeks rizika sudara. Na taj način, model pruža prikaz hijerarhije indeksa rizika sudara. Prikazani neizraziti sustav mogao bi se koristiti kao sustav potpore odlučivanju brodovima s ljudskom posadom. Sustav je također moguće primijeniti za upotrebu autonomnim brodovima. Karakteristike neizrazitih sustava dopuštaju u budućim istraživanjima uvesti dodatne ulazne varijable. Dodatno, moguće je još detaljnije prikazati razlike u procjeni rizika koje proizlaze iz međusobnih odnosa brodova koristeći finiju podjele podmodela u budućim istraživanjima.

KLJUČNE RIJEČI: Rizik sudara na moru, neizraziti sustavi, sigurnost plovidbe, ekspertno znanje

SUMMARY

Collisions at sea represent one of the most serious types of accidents, considering that they can put people and the environment at risk and cause significant economic damage. The mutual relations of ships and the necessary actions to avoid collisions are governed by the International Regulations for Preventing Collisions at Sea. The rules, created in the last century, are addressed to the members of the navigation watch who make decisions based on their own knowledge, experience and skills, keeping in mind the safety of navigation. However, rules often use unclear or vague concepts, and their quantification presents difficulties for the development of modern intelligent navigation systems. Vague concepts can be easily described mathematically using the properties of fuzzy sets and fuzzy systems. Since the assessment of the risk of collision at sea is a matter of the decision of a member of the navigational watch, in this research, the modelling of the index of collision risk was approached using expert knowledge with a fuzzy approach. In its first part, the research determines the factors that experts consider important when assessing the risk of a collision. The results indicate that the experts choose some other factors that impact the collision risk assessment as very important in addition to the usual ones. All selected factors, fuzzy in nature, represent linguistic variables and were quantified in the second part of the research using the theory of fuzzy sets. In doing so, the ranges and shapes of the linguistic variables were determined using the respondents' expert knowledge and trapezoidal and Gaussian membership functions. A fuzzy inference system model was created using the selected factors to determine the fuzzy collision risk index. In order to show the differences in risk assessment resulting from different ship relationships, it was necessary to define several sub-models.

Additionally, considering the opinion of experts, it was necessary to create models in conditions of reduced visibility, thus modelling due regard as prescribed by the rules. By validating the model on an independent set of samples, those that used trapezoidal membership functions were selected as more favourable. The possibilities of the fuzzy inference system model are shown by verifying the results with case studies. The results indicate that the collision alerting has been improved. Among other things, timely alerting was achieved in some situations where the existing systems would not have alerted the navigation watch member in time. The additionally presented collision risk index is not binary and allows the comparison of ships with regard to the fuzzy collision risk index. In this way, the model provides a representation of the hierarchy of collision risk indices. The presented fuzzy system could be used as a decision support system for manned ships. The system can also be used by autonomous ships. The characteristics of fuzzy systems allow the introduction of additional input variables in future research. Additionally, it is possible to show in more detail the differences in risk assessment arising from ship relationships using a finer subdivision of submodels in future research.

KEYWORDS: Risk of collision, Fuzzy systems, safety of navigation, expert knowledge

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Definiranje problema i predmeta istraživanja	3
1.2. Znanstvena hipoteza i pomoćne hipoteze	4
1.3. Svrha i ciljevi istraživanja	5
1.4. Pregled dosadašnjih istraživanja	7
1.5. Znanstvene metode	15
1.6. Struktura rada	16
2. ANALIZA RIZIKA SUDARA NA MORU	18
2.1. Definicija rizika	18
2.2. Rizik u pomorskom prometu	20
2.3. Rizik sudara	21
3. KONCEPT NEIZRAZITE LOGIKE ZA MODELIRANJE SUSTAVA ZAKLJUČIVANJA	25
3.1. Neizraziti skupovi	25
3.2. Neizrazita logika	30
3.3. Neizraziti sustavi	32
4. KVANTIFICIRANJE EKSPERTNOGA ZNANJA U FUNKCIJI ODREĐIVANJA PARAMETARA MODELA	37
4.1. Metodologija prikupljanja podataka putem anketnog upitnika	37
4.2. Rezultati anketnog upitnika prema profilu ispitanika	42
4.2.1. Rezultati anketnog upitnika prema trenutnom zvanju na brodu – PPQ1	42
4.2.2. Rezultati anketnog upitnika prema duljini broda na kojoj ispitanici trenutno plove – PPQ2	43
4.2.3. Rezultati anketnog upitnika prema vrsti broda na kojoj ispitanici trenutno plove – PPQ3	44
4.2.4. Rezultati anketnog upitnika prema radnom iskustvu u trenutnom zvanju na brodu – PPQ4	46
4.2.5. Rezultati anketnog upitnika prema ukupnom radnom iskustvu na brodu – PPQ5	46
4.3. Rezultati ankete i analiza varijabli modela metodama deskriptivne statistike	47
4.3.1. Koncept deskriptivne statistike	48
4.3.2. Deskriptivna statistika za ispitivane varijable	49

4.4. Rezultati ankete i analiza varijabli modela metodama inferencijalne statistike	54
4.4.1. Ispitivanje razlika u prosječnim rezultatima prema trenutnom zvanju na brodu	57
4.4.2. Ispitivanje razlika u prosječnim rezultatima prema duljini broda na kojoj ispitanici trenutno plove	58
4.4.3. Ispitivanje razlika u prosječnim rezultatima prema vrsti broda na kojoj ispitanici trenutno plove	59
4.4.4. Ispitivanje razlika u prosječnim rezultatima prema ukupnom radnom iskustvu na brodu	61
5. NEIZRAZITI SUSTAV ZAKLJUČIVANJA ZA ODREĐIVANJE NEIZRAZITOG INDEKSA RIZIKA SUDARA	63
5.1. Statističko određivanje parametara funkcija pripadnosti ulaznih varijabli	65
5.1.1. Određivanje funkcija pripadnosti varijable <i>CPA</i> – RFQ11 do RFQ15	67
5.1.2. Određivanje funkcija pripadnosti varijable <i>TCPA</i> - RFQ26 do RFQ30	69
5.1.3. Određivanje funkcija pripadnosti varijable <i>BCR</i> - RFQ16 do RFQ20	72
5.1.4. Određivanje funkcija pripadnosti varijable <i>Međusobna udaljenost</i> - RFQ21 do RFQ25	74
5.1.5. Određivanje funkcija pripadnosti varijable <i>Vidljivost</i> - RFQ31 do RFQ35	76
5.2. Statističko određivanje parametara funkcija pripadnosti izlazne varijable	79
5.2.1. Određivanje funkcija pripadnosti izlazne varijable Neizraziti indeks rizika sudara - <i>FCRI</i>	79
5.2.2. Određivanje funkcija pripadnosti izlazne varijable neizraziti indeks rizika sudara pri smanjenoj vidljivosti – <i>FCRI_LV</i>	80
5.3. Određivanje neizrazitih pravila odlučivanja	81
5.4. Modeli neizrazitog sustava zaključivanja s prikazima kontrolnih površina u slučajevima dobre vidljivosti	83
5.5. Model neizrazitog sustava zaključivanja s prikazima kontrolnih površina u okolnostima smanjene vidljivosti	87
6. VALIDACIJA MODELA TE ODABIR NAJPOVOLJNIJEG NEIZRAZITOG SUSTAVA ZAKLJUČIVANJA ZA POTREBE NEIZRAZITE PROCJENE RIZIKA SUDARA	89
6.1. Validacija modela neizrazitog sustava zaključivanja u uvjetima dobre vidljivosti	91
6.1.1. Validacija modela I	91
6.1.2. Validacija modela II	92

6.1.3.	Validacija modela III	92
6.1.4.	Validacija modela IV	93
6.1.5.	Validacija modela V	94
6.1.6.	Validacija modela VI	95
6.1.7.	Validacija modela VII	95
6.1.8.	Validacija modela VIII	96
6.1.9.	Validacija modela IX	97
6.1.10.	Validacija modela X	97
6.1.11.	Validacija modela XI	98
6.1.12.	Validacija modela XII	99
6.2.	Validacija modela neizrazitog sustava zaključivanja u okolnostima smanjene vidljivosti	99
7.	VERIFIKACIJA NEIZRAZITOG INDEKSA RIZIKA SUDARA STUDIJAMA SLUČAJA	101
7.1.	Verifikacija modela prema studijama slučaja dobivenih istraživanjem pomorskih nesreća	102
7.1.1.	Sudar kontejnerskog broda ACX Crystal i ratnog broda USS Fitzgerald	102
7.1.2.	Sudar broda Verity i broda Polesie	103
7.2.	Verifikacija modela studijama slučaja korištenjem baze podataka klasifikacijskog društva DNV	105
7.2.1.	Plovidbeni scenarij DNV 1.	105
7.2.2.	DNV plovidbeni scenarij DNV 2.	107
7.2.3.	Plovidbeni scenarij DNV 3.	108
7.2.4.	Plovidbeni scenarij DNV 4.	110
7.2.5.	Plovidbeni scenarij DNV 5.	111
7.2.6.	Plovidbeni scenarij DNV 6.	113
7.3.	Verifikacija modela u uvjetima gustog prometa	115
8.	KONCEPTUALNI MODEL PRIMJENE NEIZRAZITOG INDEKSA RIZIKA SUDARA U INTEGRIRANINIM NAVIGACIJSKIM SUSTAVIMA	119
9.	DISKUSIJA	126
10.	ZAKLJUČAK	129
	LITERATURA	131
	POPIS TABLICA	145

POPIS SLIKA	149
POPIS KRATICA	152
PRIVITAK 1	155
PRIVITAK 2	168

1. UVOD

Sustavima protusudarnog uzbunjivanja na moru (engl. *Collision Alert System, CAS*) smatraju se sustavi na brodovima ili na kopnu koji upozoravaju članove plovidbene straže ili nadzornike centara za nadzor i upravljanje pomorskim prometom na opasnost od sudara^{1 2 3 4 5 6}. U pomorskoj praksi radi se gotovo isključivo o sustavu automatskog radarskog plotiranja (engl. *Automatic Radar Plotting Aid, ARPA*), koji pored osnovne svrhe automatskog plotiranja i praćenja radarskih objekata pruža i mogućnost protusudarnog uzbunjivanja. Osnovni parametri ARPA sustava na kojima se temelji uzbunjivanje nazivaju se udaljenost točke najbližeg prolaza (engl. *Distance to Closest Point of Approach, DCPA*) i vrijeme najbližeg prolaza (engl. *Time to Closest Point of Approach, TCPA*). U pomorskoj praksi se umjesto kratice DCPA ipak uvriježio izraz CPA (engl. *Closest Point of Approach*) te će se nadalje u radu koristiti takav izraz umjesto izraza DCPA.

ARPA sustav plotira objekte na zahtjev člana plovidbene straže ili automatski ako je postavljen određeni protusudarni sektor, te kao rezultat daje vrijednosti CPA i TCPA. Moderni radarski sustavi uz te dvije vrijednosti pružaju i druge informacije o objektu kao što su udaljenost objekta, pramčani kut ili azimut objekta, brzina objekta, udaljenost mimoilaženja po pramcu, ali i neke druge informacije. Brodovi motreni putem ARPA sustava mogu biti označeni kao opasni prema unaprijed zadanim vrijednostima CPA i TCPA, dok se protusudarni alarm aktivira kada stvarni CPA i TCPA pojedinog broda padne na ili ispod zadanih vrijednosti^{7 8}. Nažalost, velik broj alarma koje stvaraju moderni navigacijski uređaji mogu prouzročiti zamor alarmima (engl. *alarm fatigue*), to jest situaciju kada se časnik više ne obazire alarme, ili ih zanemaruje bez obzira na njihovu važnost. Posebno bi bilo opasno namjerno postavljati niže vrijednosti CPA i TCPA u sustavima uzbunjivanja, kako bi se izbjeglo prečesto uzbunjivanje. Potrebno je,

¹ Goerlandt, F., Montewka, J., Kuzmin, V., & Kujala, P. (2015). A risk-informed ship collision alert system: Framework and application. *Safety Science*, 77, 182–204.

² Du, L., Valdez Banda, O. A., Goerlandt, F., Huang, Y., & Kujala, P. (2020). A COLREG-compliant ship collision alert system for stand-on vessels. *Ocean Engineering*, 218, 107866. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107866>

³ Wu, B., Yip, T. L., Yan, X., & Guedes Soares, C. (2019). Fuzzy logic based approach for ship-bridge collision alert system. *Ocean Engineering*, 187, 106152. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106152>

⁴ Chin, H. C., & Debnath, A. K. (2009). Modeling perceived collision risk in port water navigation. *Safety Science*, 47(10), 1410–1416. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.04.004>

⁵ Szlapczynski, R., Szlapczynska, J. (2021). A ship domain-based model of collision risk for near-miss detection and Collision Alert Systems, *Reliability Engineering & System Safety*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107766>

⁶ Du, L., Valdez Banda, O. A., & Sui, Z. (2022). Available-Maneuvering-Margins-Based Ship Collision Alert System. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), 1123.

⁷ Chin, H. C., & Debnath, A. K. (2009). Modeling perceived collision risk in port water navigation. *Safety Science*, 47(10), 1410–1416. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.04.004>.

⁸ International Maritime Organization. (2004). *Rezolucija MSC.192(79): Adoption of the revised performance standards for radar equipment*.

naravno prvenstveno imati na umu sigurnost plovidbe, te je u svakom slučaju bolje imati jedan nepotreban alarm više nego jedan bitan alarm koji se nije oglasio ili se oglasio kasno.

Pored ARPA sustava, na brodovima u pomorskoj plovidbi postoji i automatski identifikacijski sustav (engl. *Automatic Identification System*, AIS), koji također pored ostalih funkcija ima mogućnost uzbunjivanja korisnika u slučajevima kad su CPA i TCPA niži od zadanih vrijednosti^{9 10}. Važno je napomenuti da se AIS sustav ipak ne smije koristiti kod izbjegavanja sudara na način da bude primarni izvor informacije o riziku sudara. Dakle, oba postojeća sustava koriste vrijednosti CPA i TCPA kako bi detektirali opasnost sudara. Međutim, prema brojnim autorima^{11 12 13 14 15} opasnost od sudara ne može se u potpunosti procijeniti poznavanjem samo tih dviju vrijednosti. Razlog za to leži u izrazitoj kompleksnosti međusobnog odnosa brodova i pripadajućeg pomorskog okoliša, te svaka situacija u kojoj članovi plovidbene straže procjenjuju rizik sudara nosi određene specifičnosti. Budući se opasnost ne može procijeniti korištenjem samo dviju navedenih varijabli, član plovidbene straže mora osobno odlučiti predstavlja li objekt zaista opasnost, bez obzira na dobiveni alarm. Pri tom koristi podatke dobivene vizualno, ali i putem svih njemu dostupnih navigacijskih sustava. S obzirom na navedeno u radu su se odredili čimbenici koje članovi plovidbene straže uzimaju u obzir pri procjeni opasnosti sudara, te se definirako kako i koliko utječu na procjenu rizika sudara.

Dodatno, postojeći sustavi protusudarnog uzbunjivanja na temelju unaprijed postavljenih postavki imaju mogućnost odrediti postojanje ili nepostojanje opasnosti, ne ocijenivši direktno stupanj opasnosti. Članovi plovidbene straže određuju pored postojanja opasnosti i veličinu ili stupanj opasnosti, pa objekti mogu biti manje ili više opasni ovisno o okolnostima. Veličina rizika sudara obrnuto je proporcionalno vezana uz udaljenost točke najbližeg prolaza, te što je udaljenost manja, to je rizik sudara veći. To također vrijedi i za vrijednost vremena najbližeg prolaza, manje dostupnog vremena za poduzeti manevar izbjegavanja znači i veći rizik sudara. Pri tom je vidljivo da su navedeni izrazi

⁹ International Maritime Organization. (2015). *Rezolucija A.1106(29): Revised guidelines for the onboard operational use of shipborne automatic identification system (AIS)*.

¹⁰ Wawruch, R. (2017). Study Reliability of the Information About the CPA and TCPA Indicated by the Ship's AIS. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 10(3), 417–424. <https://doi.org/10.12716/1001.10.03.06>

¹¹ Mou, J. M., Van der Tak, C., & Ligteringen, H. (2010). Study on collision avoidance in busy waterways by using AIS data. *Ocean Engineering*, 37(5-6), 483-490.

¹² Ahn, J. H., Rhee, K. P., & You, Y. J. (2012). A study on the collision avoidance of a ship using neural networks and fuzzy logic. *Applied Ocean Research*, 37, 162-173.

¹³ Bukhari, A. C., Tusseyeva, I., Lee, B. G., & Kim, Y. G. (2013). An intelligent real-time multi-vessel collision risk assessment system from VTS view point based on fuzzy inference system. *Expert Systems with Applications*, 40(4), 1220–1230. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.016>

¹⁴ Zhang, W., Goerlandt, F., Montewka, J., & Kujala, P. (2015). A method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. *Ocean Engineering*, 107, 60-69.

¹⁵ Nguyen, M., Zhang, S., & Wang, X. (2018). A novel method for risk assessment and simulation of collision avoidance for vessels based on AIS. *Algorithms*, 11(12), 204.

poput male udaljenosti prolaza neizraziti u svojoj naravi, budući nije moguće jasno odrediti vrijednosti granica između jako male, male ili umjerene udaljenosti. Bitno je uočiti da i sama pravila o izbjegavanju sudara na moru¹⁶ koriste mnoštvo neizrazitih pojmova kao što je mala udaljenost, slaba vidljivost i druge, budući su pisana za ljude, ljudskim jezikom. Takve varijable nazivamo lingvističkim varijablama. Neizrazite pojmove koji su u svojoj prirodi način ljudskog opisivanja pojmova, moguće je odrediti posebnom vrstom skupova koji se nazivaju neizraziti skupovi. Na osnovi neizrazitih skupova temelji se teorija neizrazite logike i neizraziti sustavi zaključivanja. Neizrazitim sustavima zaključivanja moguće je modelirati ljudsko zaključivanje kada ne postoje jasne i nedvojbene granice između određenih skupova, kao što je slučaj kod modeliranja ekspertnoga znanja o procjeni rizika sudara na moru. U radu se modeliranje ekspertnoga znanja o procjeni rizika udara na moru primijenilo na protusudarno uzbunjivanje, koristeći utvrđene dodatne čimbenike koji utječu na procjenu rizika sudara. Kao krajnji rezultat modela odredio se neizraziti indeks rizika sudara u uvjetima dobre ali i smanjene vidljivosti.

1.1. Definiranje problema i predmeta istraživanja

Osnovni problem istraživanja predstavlja nepotpun prikaz rizika sudara kod postojećih sustava protusudarnog uzbunjivanja u pomorskoj plovidbi. Na brodovima u pomorskoj plovidbi koristi se ARPA sustav samostalno ili kao dio integriranog navigacijskog sustava¹⁷ ¹⁸. Procjena rizika sudara korištenjem ARPA sustava temelji se na vrijednostima CPA i TCPA. U trenutku kada vrijednosti prethodno navedenih parametara nekog plovila istovremeno budu jednake ili niže od zadanih vrijednosti, sustav će alarmirati člana plovidbene straže o opasnosti od sudara. Postavke zadanih minimalnih vrijednosti CPA i TCPA nisu jednoznačno definirane niti postoji opće suglasje o tim vrijednostima¹⁹. Iako uobičajeno zadane internim sustavima upravljanja sigurnošću pojedine brodarske kompanije, podložne su i diskreciji zapovjednika broda. Dodatno, takav sustav uzbunjivanja je u svojoj naravi binaran budući da definira postojanje opasnosti na temelju prethodno postavljenih postavki, ne procijenivši direktno stupanj rizika. Informacija o postojanju opasnosti članu plovidbene straže ne određuje stupanj rizika sudara prema pojedinom plovilu. U plovidbenoj situaciji, član plovidbene straže samostalno procjenjuje rizik sudara i određuje koja su plovila manje ili više opasna. Sama procjena se u takvom slučaju donosi sukladno iskustvu i znanju, prvenstveno znanju

¹⁶ International Maritime Organization. (1972). *The International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972 (COLREGs)*.

¹⁷ Brčić, D., & Žuškin, S. (2018). Towards paperless vessels: A Master's perspective. *Pomorski zbornik*, 55(1), 183-199.

¹⁸ Kristić, M., Žuškin, S., Brčić, D., & Car, M. (2021). ECDIS EHO: Handling the ECDIS failure at sea, *Proceedings of the International Association of Maritime Universities (IAMU) Conference*, 284-295.

¹⁹ Vujičić, S., Mohović, Đ., & Mohović, R. (2017). A model of determining the closest point of approach between ships on the open sea. *Promet-Traffic&Transportation*, 29(2), 225-232.

pravila o izbjegavanju sudara, ali uzimajući u obzir i razne druge čimbenike svojstvene kompleksnom sustavu pomorskog prometa.

Predmet istraživanja predstavlja procjena rizika sudara na moru, u skladu sa prethodno navedenim problemom. Važno je napomenuti da pravila o izbjegavanju sudara na moru nalažu da ukoliko postoji imalo sumnje kod procjene rizika sudara, smatrat će se da rizik sudara postoji²⁰. Prema tome radi se o subjektivnom doživljaju rizika sudara, te će se u ovom radu modelirati uz korištenje ekspertnih znanja. Kako neizraziti sustavi zaključivanja imaju svojstvo modelirati ljudsko zaključivanje koristiti će se u izradi modela sustava protusudarnog uzbunjivanja koji se koriste prethodno navedenim ekspertnim znanjima. Procjene rizika sudara koje se temelje na teoriji vjerojatnosti modeliraju samu vjerojatnost nepovoljnog događaja.

Za razliku od vjerojatnosnog pristupa, kod neizrazite logike modelira se stupanj pripadnosti određenom skupu, odnosno podskupu mogućih vrijednosti neizrazitog indeksa rizika. Dodatno, neizraziti sustavi imaju mogućnost opisati pojmove koje ljudi koriste a koji su u svojoj biti neprecizni ili nejasni. Pravila o izbjegavanju sudara sadrže takve izraze koje je teško jasno ili precizno interpretirati²¹. Upravo svojstvo neizrazitih skupova, te neizrazite logike i neizrazitih sustava da opisuju lingvističke pojmove koje eksperti koriste čine ga prirodnim odabirom za određivanje stupnja rizika sudara na moru.

1.2. Znanstvena hipoteza i pomoćne hipoteze

Iz prethodno definiranih problema i predmeta istraživanja proizlazi hipoteza:

Moguće je unaprijediti protusudarno uzbunjivanje na moru određivanjem neizrazitog indeksa rizika sudara (engl. *Fuzzy Collision Risk Indeks*, FCRI) koristeći ekspertno znanje i neizrazitu logiku.

U skladu s postavljenom hipotezom postavljene su pomoćne hipoteze:

1. Koristeći ekspertna znanja članova plovidbene straže moguće je analizirati skup čimbenika koji utječu na procjenu stupnja rizika sudara na moru.
2. Nesigurnost povezanu s odlučivanjem članova plovidbene straže pri procjeni rizika sudara na moru moguće je izraziti primjenom neizrazitih sustava zaključivanja.
3. Moguće je odrediti neizraziti indeks rizika sudara na moru implementacijom kvantificirane i u najmanju moguću mjeru svedene nesigurnosti u mišljenjima eksperata.
4. Primjenom predloženog neizrazitog indeksa rizika sudara može se unaprijediti proces donošenja odluka o sudarnoj opasnosti i sigurnost plovidbe.

²⁰ International Maritime Organisation. (1972). *The International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972 (COLREGs)*.

²¹ Mohović, Đ., Mohović, R., Suljić, M., & Njegovan, M. (2021). Reducing the risk of collision between ships in a close-quarters situation by simulating collision avoidance actions. *The Journal of Navigation*, 74(3), 558-573.

1.3. Svrha i ciljevi istraživanja

Svrha ove doktorske disertacije je unaprijediti protusudarno uzbunjivanje na moru uzevši u obzir pored dosad korištenih i dodatne čimbenike koji mogu utjecati na procjenu rizika sudara. Kroz dugogodišnju upotrebu sustava protusudarnog uzbunjivanja u pomorskoj plovidbi uočeno je kako oni sustavi koji koriste samo postavke udaljenosti najbliže točke prolaza i vremenskog razdoblja najbliže točke prolaza ne mogu uvijek precizno prikazati rizik sudara^{22 23}. Svaki susret plovila je specifičan s obzirom na mnogobrojne statičke i dinamičke uvjete prisutne u pomorskom okolišu, što postojeći sustavi ne uzimaju u obzir. Članovi plovidbene straže koristeći ekspertna znanja te uzimajući u obzir pravila o izbjegavanju sudara procjenjuju stupanj opasnosti za plovila koje protusudarni sustav označi kao opasne. Dodatno, u sklopu procjene rizika sudara, neka će plovila koja sustav nije označio kao opasne, članovi plovidbene straže smatrati opasnima, dok pojedina plovila koje sustav označi kao opasne neće smatrati takvim. U praksi taj proces dodatnog obrađivanja podataka dobivenih putem protusudarnog sustava povećava radno opterećenje, a dovodi i do zamora alarmima, uslijed čega može doći do kritičnih pogrešaka²⁴.

Pravila o izbjegavanju sudara na moru u članku 7. definiraju da rizik od sudara postoji već onda kad postoji imalo sumnje u opasnost od sudara²⁵. Sukladno pravilima, opasnost postoji u slučaju kad se kompasni smjer broda koji se približava znatno ne mijenja. Dodatno, prema pravilima, procjena rizika sudara može ovisiti i o veličini broda koji se približava te o udaljenosti broda koji se približava. RADAR ARPA sustav pri procjeni rizika sudara, koristeći isključivo CPA i TCPA, zadovoljava dio definicije koji se odnosi na procjenu rizika sudara temeljem promjene kompasnoga smjera broda koji se približava u nekom promatranom periodu. S obzirom da procjena rizika sudara definirana pravilima može ovisiti i o dodatnim varijablama, u radu su se odredile dodatne varijable koje mogu potaknuti sumnju kod članova plovidbene straže prilikom procjene rizika sudara, te njihov utjecaj na samu procjenu.

Postojeći modeli procjene rizika sudara razlikuju se s obzirom na broj čimbenika, na razne kombinacije istih, te na pristup procjeni rizika. Razlike su očekivane uzevši u obzir kompleksnost plovidbenog okružja te širok broj čimbenika koji mogu imati utjecaj na rizik sudara. U ovoj doktorskoj disertaciji ustvrdio se značaj pojedinih čimbenika na procjenu rizika sudara te su se sukladno značaju rangirale. U radu se koriste neizraziti

²² Goerlandt, F., Montewka, J., Kuzmin, V., & Kujala, P. (2015). A risk-informed ship collision alert system: Framework and application. *Safety Science*, 77, 182–204.

²³ Nguyen, M., Zhang, S., & Wang, X. (2018). A novel method for risk assessment and simulation of collision avoidance for vessels based on AIS. *Algorithms*, 11(12), 204.

²⁴ Li, F., Chen, C. H., Lee, C. H., & Khoo, L. P. (2020). A user requirement-driven approach incorporating TRIZ and QFD for designing a smart vessel alarm system to reduce alarm fatigue. *The Journal of Navigation*, 73(1), 212-232.

²⁵ International Maritime Organisation. (1972). *The International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972 (COLREGs)*.

sustavi zaključivanja koji se uspješno primjenjuju u poljima kao što su automatska kontrola, klasifikacija podataka, prepoznavanje govora, te u ekspertnim sustavima. Globalnu pozornost na neizrazite sustave i njihove mogućnosti privukla je upotreba neizrazitog sustava kod kontrole podzemne željeznice u gradu Sendai, Japan 1978. godine²⁶. Model sustava neizrazitog zaključivanja ima mogućnost procijeniti neizraziti indeks rizika sudara korištenjem prethodno definiranih čimbenika koji utječu na doživljaj rizika sudara a postojeći sustavi protusudarnog uzbunjivanja ih ne uzimaju u obzir. Dodatno, proširila su se saznanja o rasponu lingvističkih varijabli i oblika funkcija pripadnosti koje se koriste u sustavima neizrazitog zaključivanja. Neizraziti sustav zaključivanja određuje neizraziti indeks rizika sudara uzimajući u obzir odnos između dva broda, dok kod situacija gdje postoji više brodova tretira situaciju kao višestruki odnos između dva broda. Sukladno navedenom, moguće je definirati ciljeve istraživanja. Glavni cilj istraživanja predstavlja razvoj model neizrazitog sustava zaključivanja u svrhu procjene neizrazitog indeksa rizika sudara koristeći prošireni skup čimbenika. Prošireni skup čimbenika predstavljaju svi čimbenici koje su eksperti ocjenili kao vrlo utjecajne pri procjeni rizika sudara. Upotreba proširenog skupa čimbenika putem neizrazitog indeksa rizika sudara omogućuje detaljnije prikazivanje rizika sudara, pogotovo u onim situacijama gdje postojeći sustavi ne daju adekvatne rezultate. Kako bi se ostvario krajnji cilj istraživanja provelo se kompleksno istraživanje koje se sastoji od više pomoćnih ciljeva:

- Utvrditi koje dodatne čimbenike eksperti uzimaju u obzir pri procjeni rizika sudara, sve u skladu sa pravilima o izbjegavanju sudara, te utvrditi važnosti pojedinih čimbenika pri evaluaciji rizika.
- Rangirati navedene čimbenika uz pomoć statističkih metoda.
- Identificirati i modelirati nesigurnosti u razilaženju mišljenja eksperata vezano uz prethodno navedene čimbenike.
- Utvrditi raspone i oblike pojedinih lingvističkih varijabli za korištenje u sustavu zaključivanja i donošenja odluka, te kvantificirati ekspertna znanja pomoću neizrazitih skupova i neizrazite logike.

Sukladno navedenim ciljevima te pomoćnim ciljevima, postavio se plan istraživanja. Plan istraživanja sastoji se od četiri veća koraka:

Korak 1: Provodi se pregled i analizu literature relevantne za sustave protusudarnog uzbunjivanja, plovidbene domene, neizrazite skupove, neizrazitu logiku, neizrazite sustave, teoriju vjerojatnosti, ekspertne sustave, teoriju rizika, rizika u pomorskom prometu, rizika sudara, sustave autonomnih brodova te drugu literaturu potrebnu za rad.

Korak 2: Pristupa se izradi odgovarajućeg anketnog upitnika imajući na umu sve specifičnosti istraživanja, a pogotovo dijela koji se odnosi na definiranje raspona lingvističkih varijabli. Nakon izrade upitnika izvršila se provjera sa strane etičkog

²⁶ Mazandarani, M., & Li, X. (2020). Fractional Fuzzy Inference System: The New Generation of Fuzzy Inference Systems. *IEEE Access*, 8, 126066–126082. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3008064>

povjerenstva prije nego se pristupilo prikupljanju podataka potrebnih za izradu modela. Nakon što se dobije odgovarajući broj odgovora, potrebno je obraditi dobivene podatke, statistički analizirati rezultate anketnog upitnika i po potrebi izbaciti podatke koji bi se mogli smatrati stršećima. Na temelju statističke analize, vrši se rangiranje varijabli te odabir značajnih varijabli koji utječu na procjenu stupnja rizika sudara. U istom koraku metodama analize varijance ispituju se eventualne razlike u mišljenima između grupa ispitanika.

Korak 3: Izrađuje se neizraziti sustava zaključivanja koji se sastoji od više modela kako bi se prikazale specifičnosti različitih vrsta susreta s obzirom na razlike kursova brodova koji se susreću. Prethodno dobiveni čimbenici predstavljaju ulazne varijable modela dok izlazna varijabla predstavlja neizraziti indeks rizika sudara. Na temelju dobivenih ekspertnih znanja o rasponima lingvističkih varijabli, pristupit će se procjeni funkcija pripadnosti lingvističkih varijabli. Pri tome će se ekspertno znanje ispitanika modelirati koristeći odgovarajuće funkcije pripadnosti. Baza neizrazitih pravila određuje se uz pomoć eksperata simulacijama međusobnih susreta brodova koristeći radarski uređaj i vizualni prikaz okoliša.

Korak 4: U ovom koraku provodi se validacija modela koristeći neovisni skup podataka kako bi se utvrdili i odabrali povoljniji modeli. Odabrani modeli se naknadno verificiraju studijama slučajeva. Verifikacija modela neizrazitog rizika sudara provodi se koristeći dostupne podatke o stvarnim pomorskim nezgodama, kako bi se ispitalo hoće li sustav pravovremeno uzbuniti člana plovidbene straže. Dodatno se verificiraju modeli uspostavljanjem novih navigacijskih situacija i generiranjem pokazatelja uspješnosti modela.

1.4. Pregled dosadašnjih istraživanja

Procjena rizika od sudara na moru predstavlja izrazito aktualan predmet istraživanja kao rezultat sve većeg interesa znanstvene zajednice prema autonomnoj plovidbi, ali i sve većih mogućnosti računalne obrade podataka. Tako je tijekom posljednjeg desetljeća zabilježen znatan skok objavljenih znanstveno istraživačkih radova na temu procjene rizika od sudara²⁷. Budući da se sam pojam rizika različito interpretira, te dodatno uzevši u obzir izrazitu kompleksnost pomorskog prometa jasno je da postoje znatne razlike između predloženih rješenja unutar znanstvene zajednice. Brojan dio istraživanja vezanih uz procjenu rizika od sudara vezan je uz pojam plovidbene domene, te bi se moglo reći da sam pojam predstavlja početak istraživanja rizika od sudara. Mnoga saznanja dobivena prijašnjim proučavanjem plovidbene domene koriste se i dalje u kompleksnijim modelima procjene rizika. U smislu rizika od sudara, plovidbenu domenu mogli bi definirati kao morsku površinu kružnog, eliptičnog ili poligonalnog oblika čije granice dijele sigurno od nesigurnog područja. Unutar same domene područje je neprihvatljivog

²⁷ Ozturk, U., & Cicek, K. (2019). Individual collision risk assessment in ship navigation : A systematic literature review. *Ocean Engineering*, 180, 130–143. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.042>

rizika, te časnici ili zapovjednici ne žele druge brodove ili objekte unutar tog područja. Veličina domene pojedinog broda je u naravi dinamična, te može varirati s obzirom na područje plovidbe i vanjske prilike²⁸. Zabilježene metode određivanja domene su raznolike ali prema Szlapczynki (2017) možemo ih podijeliti na empirijske, ekspertne i analitičke metode, te na kombinacije tih metoda²⁹. Prva zabilježena istraživanja u svojoj naravi su empirijska a temelje se na statistički obrađenim podacima radarskih sustava³⁰

³¹ ³²

Pojam plovidbene domene prvi su u svom radu prikazali Fujii i Tanaka (1971) proučavajući kapacitet plovnog puta u Tokijskom zaljevu. Autori je definiraju kao horizontalnu morsku površinu koja okružuje brod u plovidbi i u koju članovi plovidbene straže drugih brodova izbjegavaju ulaziti. Domena prema autorima predstavlja isključivo mentalni konstrukt, a ne deterministički određenu vrijednost. Dimenzije domene određene su udaljenošću vlastitoga broda od točke gdje gustoća radarski obrađenih prikaza brodova doseže lokalni maksimum. Već nekoliko godina nakon tog istraživanja pojavljuje se i novi model domene temeljen na istraživanju Elizabeth Goodwin (1975). Istraživanje se provodilo u Sjevernom moru, dakle u uvjetima otvorenog mora. Autorica se također koristila statističkim metodama kako bi pomoću radarskih odraza odredila domenu, čija definicija se donekle razlikuje od prethodnih definicija. Oblik domene koji predlaže autor očekivano je znatno drugačiji od modela Fujii i Tanake (1971), prvenstveno zbog razlike u zonama plovidbe, te se sastoji od tri kružna sektora nejednakih polumjera. Domenom u prostorno ograničenim plovidbenim područjima bavi se i Coldwell (1983) u svom radu, koristeći radarske snimke prometa unutar estuarija Humber. S obzirom na karakteristike plovnoga puta autor je bio ograničen na proučavanje pretjecanja i suprotnih kursova, dok križanje kursova nije ni obrađivao. Dobivena domena u položaju suprotnih kursova je asimetrična sa većom udaljenošću broda od desne strane domene, što se objašnjava većim oprezom u slučajevima kad se brodovi ne pridržavaju pravila broj sedam međunarodnih pravila o izbjegavanju sudara na moru. Naime, u slučajevima kada se dva broda nalaze u položaju protukursa kao na Slici 1., postoji mogućnost da jedan od brodova, a u primjeru neka to bude brod B, odluči kako je jednostavnije i praktičnije promijeniti kurs za nekoliko stupnjeva u lijevo kako bi povećao udaljenost prolaza, suprotno pravilima. U istom momentu može se dogoditi da brod A

²⁸ Rudan, I. (2010). *Model ranog otkrivanja opasnosti-doprinos učinkovitosti sustava nadzora i upravljanja pomorskim prometom* (Doktorska disertacije, Sveučilište u Rijeci. Pomorski fakultet, Rijeka).

²⁹ Szlapczynski, R., & Szlapczynska, J. (2017). Review of ship safety domains: Models and applications. *Ocean Engineering*, 145, 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.09.020>

³⁰ Fujii, Y., & Tanaka, K. (1971). Traffic Capacity. *Journal of Navigation*, 24(4), 543–552. <https://doi.org/10.1017/S0373463300022384>

³¹ Goodwin, E. M. (1973). A Statistical Study of Ship Domains. *Journal of Navigation*, 26(1), 130–130. <https://doi.org/10.1017/s0373463300022992>

³² Coldwell, T. G. (1983). Marine Traffic Behaviour in Restricted Waters. *Journal of Navigation*, 36(3), 430–444. <https://doi.org/10.1017/S0373463300039783>

pridržavajući se pravila, promijeni kurs u desno te se oba broda uskoro nađu u opasnoj situaciji.



Slika 1. Pogrešno izbjegavanje brodova u protukursu. Priredio autor

Ovo je posebno opasno kada se brodovi nalaze u bliskoj udaljenosti, te ako je potrebno povećati CPA iznad vrijednosti koju oba broda smatraju sigurnom to treba napraviti na dovoljno velikoj udaljenosti. Iz istraživanja se da zaključiti da pomorci povećavaju CPA pri prolazu desno-desno (engl. *starboard to starboard, green to green*) prije nego li se približe.

Empirijske metode dobivaju znatan poticaj uvođenjem AIS sustava, te se u posljednje vrijeme razvija sve više modela plovidbene domene temeljenih na podatcima dobivenim putem AIS sustava^{33 34 35}. AIS sustav omogućuje jednostavnu dostupnost velikog broja podataka te znatno lakšu analizu podataka, tako da se osim za znanstvena istraživanja koristi i kao izvor službenih statistika³⁶. Ipak, uz sustav su vezana određena ograničenja³⁷³⁸ koja mogu utjecati na činjenicu da informacije dobivene putem AIS sustava možda ne

³³ Pan, W., Xie, X.-lian, Bao, T.-tian, & Li, M. (2021). Ship domain model for ships with restricted manoeuvrability in busy waters. *Journal of Navigation*, 74(3), 673–697. <http://doi.org/10.1017/S037346332000065X>

³⁴ He, Y., Zhang, D., Zhang, J., Wu, B., & Guedes Soares, C. (2020). Dynamic Ship Domain Model Based on AIS Data for Inland Waterways. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 84324.

³⁵ Mou, J. M., Tak, C. van der, & Ligteringen, H. (2010). Study on collision avoidance in busy waterways by using AIS data. *Ocean Engineering*, 37(5–6), 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.01.012>

³⁶ The United Nations Statistics Division. (2020). *Automatic Identification System (AIS) Data Week*. Raspoloživo na: <https://unstats.un.org/unsd/trade/events/2020/AisDataWeek/default.asp>, (pristupljeno 15. srpnja 2023).

³⁷ Emmens, T., Amrit, C., Abdi, A., & Ghosh, M. (2021). The promises and perils of Automatic Identification System data. *Expert Systems with Applications*, 178, 114975. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114975>

³⁸ Kristić, M., Žuškin, S., Brčić, D., & Car, M. (2021a). Overreliance on ECDIS Technology: A Challenge for Safe Navigation. *TransNav: the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 15(2), 277–287. <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.02>

pružaju uvijek vjernu sliku plovidbenog okoliša. Gućma i Marcjan (2012) u svom istraživanju su koristili podatke AIS sustava zabilježene tijekom 2008. godine u obalnom području Baltičkog mora³⁹. Rezultati ukazuju kako ne postoje bitne razlike u domeni s obzirom na tip broda, dok vrsta susreta brodova utječe na veličinu domene. Hörteborn i sur. u svom radu koriste podatke AIS sustava, provodeći istraživanje na 36 lokacija, od kojih su 24 lokacije na otvorenom moru a ostatak u plovidbenim područjima ograničenim širinom⁴⁰. Uočene su očekivane razlike između domene s obzirom na plovidbeno područje. Tip susreta prema autorima također utječe na veličinu domene. Suprotno od prijašnjih istraživanja autori ne nalaze povezanost dužine broda sa veličinom domene. Ustanovljeno je da ni tip broda ne utječe na domenu u skladu sa istraživanjem Gućme i Marcjana (2012), ali u suprotnosti sa nekim drugim istraživanjima. Hansen i sur. u svom radu koriste podatke AIS sustava kako bi proučili pomorski promet i domenu u prostorno ograničenim područjima Danskih voda⁴¹. Dimenzije domena koju su dobili koristeći graf intenziteta približne su mnogo starijem istraživanju Fujia i Tanake (1971). Zhang i Meng (2019). koriste AIS podatke kako bi odredili probabilističku domenu, koja donekle podsjeća na neizrazitu domenu⁴². Granice domene nisu izričite, nego su temeljene na opaženoj distribuciji brodova. Svojim radom autori su izazvali i određene negativne reakcije drugih autora koji se aktivno bave rizikom sudara^{43 44}.

Među ekspertne metode spadaju radovi Pietrzykowski (2008) i Pietrzykowski i Uriasz (2009), u kojima autori koriste neuronske mreže sa neizrazitom logikom služeći se mišljenjima eksperata, kako bi definirali domenu^{45 46}. Ekspertna znanja koristi i Wielgosz u svom istraživanju, uočavajući kako domena znatno mijenja oblik ovisno o plovidbenom

³⁹ Gućma, L., & Marcjan, K. (2012). Examination of ships passing distances distribution in the coastal waters in order to build a ship probabilistic domain. *Zeszyty Naukowe / Akademia Morska w Szczecinie*, nr 32 (104(November 2016)), 34–40

⁴⁰ Hörteborn, A., Ringsberg, J. W., Svanberg, M., & Holm, H. (2019). A Revisit of the Definition of the Ship Domain based on AIS Analysis. *Journal of Navigation*, 72(3), 777–794. <https://doi.org/10.1017/S0373463318000978>;

⁴¹ Hansen, M. G., Jensen, T. K., Lehn-Schioler, T., Melchild, K., Rasmussen, F. M., & Ennemark, F. (2013). Empirical ship domain based on AIS data. *Journal of Navigation*, 66(6), 931–940. <https://doi.org/10.1017/S0373463313000489>

⁴² Zhang, L., & Meng, Q. (2019). Probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment. *Ocean Engineering*, 186, 106130. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106130>

⁴³ Montewka, J., Gil, M., & Wr, K. (2020). Discussion on the article by Zhang & Meng entitled “Probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment” [Ocean Eng. 186. 209(June), 2019–2021. *Ocean Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107527>

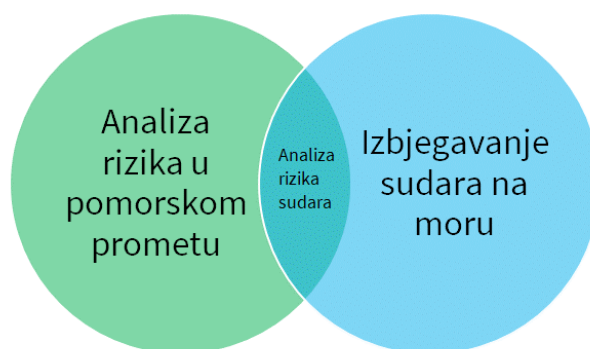
⁴⁴ Zhang, L., & Meng, Q. (2020). Response to the discussion by Montewka Jaku, Gil Mateusz and Wróbel Krzysztof on the article by Zhang & Meng entitled “Probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment [Ocean Eng. 186 (2019) 106130]. *Ocean Engineering*, 209, 107471.

⁴⁵ Pietrzykowski, Z. (2008). Ship’s fuzzy domain - A criterion for navigational safety in narrow fairways. *Journal of Navigation*, 61(3), 499–514. <https://doi.org/10.1017/S0373463308004682>

⁴⁶ Pietrzykowski, Z., & Uriasz, J. (2009). The ship domain - A criterion of navigational safety assessment in an open sea area. *Journal of Navigation*, 62(1), 93–108. <https://doi.org/10.1017/S0373463308005018>

području, ali ovisno i o veličini broda⁴⁷. Analitičke metode određivanja domene manje su zastupljene

Usporedno s teorijom plovidbene domene razvijaju se rješenja koja imaju za cilj definiranje stupnja rizika od sudara, pri tome nerijetko koristeći i istraživanja vezane uz samu domenu. Prema istraživanju⁴⁸ budući rizik sudara na moru predstavlja dio šireg pojma rizika u pomorstvu, a istovremeno je dio šire teorije izbjegavanja sudara na moru, može ga se grafički prikazati Vennovim dijagramom kao na Slici 2. Procjena rizika od sudara na moru ima za rezultat stupanj rizika koji se dalje može koristiti u modelima samog izbjegavanja sudara na moru.



Slika 2. Analiza rizika sudara. Priredio autor prema⁴⁸.

Prema većem broju autora^{49 50 51} pristup samoj analizi rizika mogao bi se podijeliti na realistički, konstruktivistički te proceduralistički. Autori realističkog usmjerenja smatraju da je rizik fizički atribut, dok autori konstruktivističkog usmjerenja vide rizik kao mentalni konstrukt oslanjajući se većinom na mišljenja eksperata. Proceduralisti nastoje pomirit ova dva stajališta balansirajući između ova dva rješenja. Među ranije realističke radove spada rad Hilgerta i sur. (1997) koji predstavlja četvero-stupanjski model rizika od sudara temeljen na udaljenosti najbliže točke prolaza te udaljenosti između brodova⁵².

⁴⁷ Wielgosz, M. (2017). Ship Domain in Open Sea Areas and Restricted Waters: an Analysis of Influence of the Available Maneuvering Area. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 11(1), 99–104. <https://doi.org/10.12716/1001.11.01.11>

⁴⁸ Ozturk, U., & Cicek, K. (2019). Individual collision risk assessment in ship navigation : A systematic literature review. *Ocean Engineering*, 180, 130–143. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.042>

⁴⁹ Ozturk, U., & Cicek, K. (2019). Individual collision risk assessment in ship navigation : A systematic literature review. *Ocean Engineering*, 180, 130–143. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.042>

⁵⁰ Goerlandt, F., & Montewka, J. (2015). Maritime transportation risk analysis: Review and analysis in light of some foundational issues. *Reliability Engineering and System Safety*, 138, 115–134. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.01.025>

⁵¹ Eugene A. Rosa (1998) Metatheoretical foundations for post-normal risk, *Journal of Risk Research*, 1:1, 15-44, DOI: 10.1080/136698798377303

⁵² Hilgert, H., & Baldauf, M. (1997). A common risk model for the assessment of encounter situations on board ships. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 49(4), 531–542. <https://doi.org/10.1007/bf02764347>

Nguyen i sur. (2018) predlažu algoritam čiji rezultat nazivaju indeks rizika sudara (engl. *collision-risk indeks*, CRI)⁵³. Algoritam se temelji na podacima dobivenim putem AIS sustava: vremenu najbližeg prolaza, udaljenosti najbližeg prolaza, međusobnoj udaljenosti objekata i azimutu. Mou i sur. (2010) koriste AIS podatke kako bi razvili linearni regresijski model te definirali dinamički rizik sudara⁵⁴. Dodatno autori su prikazali korelaciju između CPA i veličine broda, brzine te kursa broda. Rezultati ukazuju kako CPA ovisi o razlici kursova između brodova, pa tako brodovi kod pretjecanja imaju CPA manji nego kod ostalih situacija. Također su ustanovili povezanost veličine CPA sa veličinom broda.

Regresijske modele koristi i dio autora konstruktivističkog usmjerenja kako bi definirali stupanj rizika sudara. Chin i sur. (2009) provode kalibriranje modela pomoću upitnika provedenog na 160 peljara. Model koristi kao varijable TCPA, CPA, a uzima u obzir i doba dana⁵⁵. Lopez-Santander i Lawry (2017) koristi tekstualni i grafički upitnik proveden među 425 časnika plovibene straže koji je korišten za analizu, vježbu i validaciju⁵⁶. Yim i sur. (2018) izvršili su ispitivanje koje je uključivalo plovidbu s dva identična broda obalne straže na otvorenom moru kako bi izmjerili doživljaj rizika sudara kod časnika plovibene straže koji upravljaju tim brodovima⁵⁷. Koristili su pet scenarija koji su se razlikovali po azimutu od 0 do 180 stupnjeva i na udaljenostima od 3,0 NM do 0,25 NM, te je izrađen linearni regresijski model.

Među značajnije konstruktivističke radove spadaju radovi autora Zhang i sur. (2015), Zhang i sur. (2016), Zhang i sur. (2017) koji u navedenim radovima razvijaju i poboljšavaju matematički model čiji rezultat nazivaju *Vessel Conflict Ranking Operator* (VCRO)^{58 59 60}. Autori pri tom uzimaju u obzir udaljenost između brodova, brzinu te razliku kursova. Koeficijente matematičkog modela odredili su korištenjem ekspertnih znanja.

⁵³ Nguyen, M., Zhang, S., & Wang, X. (2018). A novel method for risk assessment and simulation of collision avoidance for vessels based on AIS. *Algorithms*, 11(12), 204.

⁵⁴ Mou, J. M., Tak, C. van der, & Ligteringen, H. (2010). Study on collision avoidance in busy waterways by using AIS data. *Ocean Engineering*, 37(5–6), 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.01.012>

⁵⁵ Chin, H. C., & Debnath, A. K. (2009). Modeling perceived collision risk in port water navigation. *Safety Science*, 47(10), 1410–1416. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.04.004>;

⁵⁶ Lopez-Santander, A., & Lawry, J. (2017). An Ordinal Model of Risk Based on Mariner's Judgement. *Journal of Navigation*, 70(2), 309–324. <https://doi.org/10.1017/S0373463316000576>

⁵⁷ Yim, J. Bin, Kim, D. S., & Park, D. J. (2018). Modeling perceived collision risk in vessel encounter situations. *Ocean Engineering*, 166(June), 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.08.003>

⁵⁸ Zhang, W., Goerlandt, F., Montewka, J., & Kujala, P. (2015). A method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. *Ocean Engineering*, 107(October), 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.07.046>

⁵⁹ Zhang, W., Goerlandt, F., Kujala, P., & Wang, Y. (2016). An advanced method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. *Ocean Engineering*, 124, 141–156. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.059>

⁶⁰ Zhang, W., Kopca, C., Tang, J., Ma, D., & Wang, Y. (2017). A systematic approach for collision risk analysis based on AIS data. *The Journal of Navigation*, 70(5), 1117–1132.

Posebno mjesto u analizi rizika sudara zauzimaju radovi autora koji koristi neizrazitu logiku bez obzira na njihov pristup pojmu rizika. Među ranije takve radove spada rad Lee i sur. (1993) u kojem su autori razvili sustav za izbjegavanje sudara⁶¹. Stupanj rizika sudara dobiva se metodom neizrazite logike, a koristi samo dvije ulazne varijable: TCPA i CPA. Varijable su unesene kao bezdimenzijske veličine dijeljenjem sa dužinom i brzinom broda. Model definiranja rizika zasnovan na kružnim domena i neizrazitoj logici predstavljen je u radu Kao i sur. (2007)⁶². Veličina kružnih domena određena je koristeći tri varijable: veličinu broda, brzinu broda i stanje mora, pri čemu autori nisu koristili mišljenja eksperata. Autori nadalje predlažu i sustav uzbunjivanja koji bi se aktivirao u slučaju dodira dvaju domena prilikom susreta brodova. Mišljenje eksperata ne koriste niti Ahn i sur. (2012) budući ih autor smatra subjektivnim⁶³. Vrijednosti TCPA i CPA autori su preuzeli iz prijašnjih istraživanja. Među realističke autore spadaju i radovi Ren i sur. (2011)⁶⁴, Bukhari i sur. (2013)⁶⁵, Chen i sur. (2014)⁶⁶. Ren i sur. (2011) svoj rad temelje na prijašnjem radu Mou i sur. (2010)⁶⁷ te koriste neizrazitu logiku kako bi dopunili SAMSON model (engl. *The Safety Assessment Model for Shipping on the North Sea*, SAMSON). Vrijednosti TCPA i CPA koriste se kao bezdimenzijske vrijednosti dijeljenjem sa dužinom i brzinom broda, kao i u nekim prethodnim istraživanjima. Bukhari i sur. (2013) koriste neizrazitu logiku te uz CPA, TCPA kao ulazne varijable koriste i dodatnu varijablu VCD (engl. *Variation of a Compass Direction*) kako bi izračunali rizik od sudara na moru dok Chen i sur. (2014) predlažu izračun rizika od sudara koristeći kombinaciju neizrazite logike i metode *fuzzy comprehensive evaluation*.

⁶¹ Lee, H. J., & Rhee, K. P. (1993). Development of Collision Avoidance System By Fuzzy Theory. *Japan-Korea Joint Workshop on Ship & Marine Hydrodynamics*, 164–169

⁶² Kao, S. L., Lee, K. T., Chang, K. Y., & Ko, M. Der. (2007). A fuzzy logic method for collision avoidance in vessel traffic service. *Journal of Navigation*, 60(1), 17–31. <https://doi.org/10.1017/S0373463307003980>;

⁶³ Ahn, J. H., Rhee, K. P., & You, Y. J. (2012). A study on the collision avoidance of a ship using neural networks and fuzzy logic. *Applied Ocean Research*, 37, 162–173.

⁶⁴ Ren, Y., Mou, J., Yan, Q., Zhang, F. (2011). Study on assessing dynamic risk of ship collision. *Proceedings of the ICTIS 2011 Multimodal Approach to Sustained Transportation System Development: Information, Technology, Implementation*, Reston, VA, pp. 2751–2757. [https://doi.org/10.1061/41177\(415\)346](https://doi.org/10.1061/41177(415)346)

⁶⁵ Bukhari, A. C., Tusseyeva, I., Lee, B. G., & Kim, Y. G. (2013). An intelligent real-time multi-vessel collision risk assessment system from VTS view point based on fuzzy inference system. *Expert Systems with Applications*, 40(4), 1220–1230. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.016>

⁶⁶ Chen, S., Ahmad, R., Lee, B. G., & Kim, D. H. (2014). Composition ship collision risk based on fuzzy theory. *Journal of Central South University*, 21(11), 4296–4302. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2428-z>

⁶⁷ Mou, J. M., Tak, C. van der, & Ligteringen, H. (2010). Study on collision avoidance in busy waterways by using AIS data. *Ocean Engineering*, 37(5–6), 483–490. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.01.012>

Radovi Zaman i sur. (2014)⁶⁸, Goerlandt i sur. (2015)⁶⁹, Sedov i sur. (2016)⁷⁰ pripadaju po svojoj naravi konstruktivističkim prikazima rizika sudara korištenjem neizrazite logike. Zaman i sur. (2014) se koriste podacima AIS sustava kako bi se evaluirala opasnost od sudara u Malajskom tjesnacu. Autori se koriste i odgovorima 41 časnika palube kako bi definirali funkcije pripadnosti. Rezultati potvrđuju prijašnja istraživanja s obzirom na ovisnost rizika o vrsti susreta brodova. Tako je prema autorima križanje kursova opasnije nego situacija suprotnih kursova ili pretjecanje. Goerlandt i sur. (2015) predlažu okvirno rješenje pomorskog sustava uzbunjivanja (engl. *Maritime Risk-Informed Collision Alert System*, RICAS) koristeći model neizrazite logike, te kao izlaznu vrijednost ima stupanj rizika od sudara. Model je uspoređen sa drugim sistemima uzbunjivanja (ARPA), te je prema autorima pokazao bolje rezultate. Sedov i sur. (2016) koriste model neizrazite logike sa četiri ulazne varijable kako bi definirali rizik od sudara u području gustog prometa. Ulazni podatci su azimut drugog broda, vlastiti kurs, kurs drugog broda te relativna brzina. Izlaznu vrijednost predstavlja rizik od sudara.

Hu i Park (2020)⁷¹ koriste se mišljenjima eksperata kako bi modelirali rizik sudara koristeći pored CPA i TCPA i otegotne okolnosti poput lošeg vremena, zamora članova plovidbene straže, ribarskih zona i druge.

Navedena istraživanja o procjeni rizika sudara na moru, mogla bi se implementirati u razvoju integriranog navigacijskog sustava (engl. *Integrated Navigation Systems*, INS) na brodskom zapovjedničkom mostu koristeći napredna programska rješenja unutar sustava. INS sustav je u osnovi sustav programske podrške koji povezuje Informacijski navigacijski sustav s prikazom elektroničkih karata (engl. *Electronic Chart Display and Information System*, ECDIS) i radarski uređaj s dodatnim izvorima podataka, u koje među ostalim spadaju i sustavi uzbunjivanja⁷². Unapređenje sustava moguće je uz razne koncepte razvoja i integracija s modernim tehnologijama kroz dodatne navigacijske informacijske slojeve te uz novija tehnološka rješenja⁷³. Martelli i sur. (2023) predlažu unaprjeđenje kroz sustav potpore odlučivanju u svrhu prevencije sudara, koji je u skladu

⁶⁸ Zaman, M. B., Kobayashi, E., Wakabayashi, N., Khanfir, S., Pitana, T., & Maimun, A. (2014). Fuzzy FMEA model for risk evaluation of ship collisions in the Malacca Strait: Based on AIS data. *Journal of Simulation*, 8(1), 91–104. <https://doi.org/10.1057/jos.2013.9>

⁶⁹ Goerlandt, F., Montewka, J., Kuzmin, V., & Kujala, P. (2015). A risk-informed ship collision alert system: Framework and application. *Safety Science*, 77, 182–204.

⁷⁰ Sedov, V. A., Sedova, N. A., & Glushkov, S. V. (2016). The fuzzy model of ships collision risk rating in a heavy traffic zone. *Vibroengineering Procedia*, 8, 453–458

⁷¹ Hu, Y., & Park, G. K. (2020). Collision risk assessment based on the vulnerability of marine accidents using fuzzy logic. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12, 541–551.

⁷² Sviličić, B., Rudan, I., Jugović, A., & Zec, D. (2019). A study on cyber security threats in a shipboard integrated navigational system. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 364.

⁷³ Brčić, D., & Žuškin, S. (2018). Towards paperless vessels: A master's perspective. *Pomorski zbornik*, 55(1), 183–199.

sa pravilima o izbjegavanju sudara na moru⁷⁴. Martelli i sur. (2024) koriste AIS podatke pri razvoju sustava potpore odlučivanju, kao dijela integriranog navigacijskog sustava, u situacijama izbjegavanja sudara na moru⁷⁵. Rudan i sur. (2020) u svom radu prikazuju mogućnosti integracije sustava za rano protusudarno uzbunjivanje sa sustavima nadzora i upravljanja pomorskim prometom⁷⁶. Rudan i sur. (2024) razvijaju sustav potpore odlučivanju sukladan pravilima o izbjegavanju sudara na moru, te predlažu njegovo integriranje unutar integriranog navigacijskog sustava⁷⁷. Ostale moguće integracije s INS sustavom navode se i u radu Škrobonja i sur. (2020)⁷⁸ koji predlažu integraciju VHF sustava razmjene podataka unutar ECDIS sustava, dok Žuškin i sur. (2017) predlažu integraciju sustava upravljanja balastnim vodama unutar ECDIS sustava u svrhu zaštite okoliša⁷⁹.

1.5. Znanstvene metode

Prilikom istraživanja i pisanja doktorske disertacije koristile su se brojne znanstvene metode. U prvom dijelu istraživanja bilo je potrebno prikupiti ekspertna znanja članova plovidbene straže kako bi se odredili najutjecajniji čimbenici procjene rizika sudara te definirale funkcije pripadnosti lingvističkih varijabli. Elicitiranje potrebnog ekspertnoga znanja ispitanika provodilo se koristeći metode anketiranja i metodu intervjua. Sva pitanja unutar upitnika kreirana su kao pitanja zatvorenog tipa. S obzirom na relativno velik uzorak ispitanika, prikupljanje podataka za procjenu funkcija pripadnosti provodilo se prilagođenom horizontalnom metodom prikupljanja podataka za ocjenjivanje funkcija pripadnosti⁸⁰. Dobiveni podatci obradili su se i analizirali statističkim metodama koje uključuju dijelove deskriptivne i inferencijalne statistike. Deskriptivnom statistikom određene su bitne karakteristike istraživanih podataka, kako bi se među ostalim rangirali čimbenici sukladno njihovom utjecaju. Nakon toga su ispitani podatci koristeći ANOVA metodu ili Kruskal-Wallis metodu u slučajevima kad ispitivanje homogenosti varijance

⁷⁴ Martelli, M., Žuškin, S., Zaccone, R., & Rudan, I. (2023). A COLREGs-compliant decision support tool to prevent collisions at sea. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 17.

⁷⁵ Martelli, M., Žuškin, S., Cellierino, E., Zaccone, R. (2024). Ship Collision detection and classification employing AIS data. *Proceedings of the Thirty-fourth (2024) International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, June 16–21, 2024.

⁷⁶ Rudan, I., Frančić, V., Valčić, M., & Sumner, M. (2020). Early detection of vessel collision situations in a vessel traffic services area. *Transport*, 35(2), 121-132.

⁷⁷ Rudan, I., Sumner, M., Mohović, Đ., Brčić, D., Gulić, M., Valčić, S., Šakan, D., Strabić, M., Vilić, I., Žuškin, M., Car, M., Kristić, M., Perić Hadžić, A., Žuškin, S. (2024). Dynamic Safety Zone Assessment for COLREG Compliant Navigation DSS in Integrated Navigation Systems. *Proceedings of the Thirty-fourth (2024) International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, June 16–21, 2024.

⁷⁸ Škrobonja, A., Valčić, S., Žuškin, S., & Brčić, D. (2020). On VDES/ECDIS Integration. *Pomorstvo*, 34(1), 195-200.

⁷⁹ Žuškin, S., Brčić, D., & Valčić, S. (2017). ECDIS possibilities for BWE adoption. *TransNav: the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 11(3), 477-482.

⁸⁰ Kristić, M., & Žuškin, S. (2024). Quantification of Expert Knowledge in Describing COLREGs Linguistic Variables. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 849.

Levene testom nije zadovoljeno. Navedenim statističkim metodama analize varijance istražile su se eventualne razlika između odgovora ispitanika s obzirom na njihove profile. Prilikom ocjenjivanja funkcija pripadnosti neizrazitih varijabli koristile su se metode temeljene na teoriji vjerojatnosti te se funkcije pripadnosti modeliraju kao Gaussova krivulja distribucije. Dodatno se koristi i metoda ocjenjivanja funkcija pripadnosti predložena u radu Hasan i Sobhan (2020)⁸¹ koja se temelji na medijanu kao mjeri centralne tendencije. Pri izradi modela neizrazitog sustava zaključivanja čiji rezultat je neizraziti indeks rizika sudara koristila se metoda neizrazite logike, te metoda modeliranja. Izradilo se dvanaest modela neizrazitog sustava zaključivanja u uvjetima dobre vidljivosti te dodatni model koji modelira uvjete smanjene vidljivosti koristeći eksperimentalnu metodu te metode simulacije. Nadalje, pri verifikaciji rezultata koristila se metode studije slučaja gdje su mogućnosti modela ispitane koristeći stvarne nezgode i unaprijed pripremljene scenarije.

1.6. Struktura rada

Doktorski rad pod naslovom Prilog unapređenju protusudarnog uzbunjivanja na moru sastoji se od deset poglavlja.

U uvodnom poglavlju određen je problem i predmet istraživanja, te je postavljena znanstvena hipoteza i pomoćne hipoteze istraživanja. Definirana je svrha, glavni i pomoćni ciljevi istraživanja, te prikazan plan istraživanja. Dodatno, u uvodnom dijelu uz pregled dosadašnjih istraživanja, definirane su metode istraživanja korištene u izradi ovoga rada.

U drugom poglavlju opisan je pojam rizika općenito, te razvoj pojma od samog početka korištenja do današnjih formalnih definicija. Opisano su generalno metode procjene rizike te njihova primjena u praksi. Posebno je obrađen pojam rizika u pomorskom prometu, te je u zadnjem dijelu opisan rizik sudara onako kako je definiran pravilima o izbjegavanju sudara na moru.

U trećem poglavlju prikazan je općenito koncept neizrazitih skupova, neizrazite logike te neizrazitih sustava zaključivanja. Na temelju prikazanih svojstava neizrazitog pristupa određena je i njegova primjena u rješavanju prethodno definiranog problema istraživanja. Četvrto poglavlje u svom prvom dijelu prikazuje metodologiju prikupljanja podataka putem anketnog upitnika. Statističkim metodama se obrađuju prikupljeni podaci kako bi se odredili parametri modela. Pri tome se misli na odabir varijabli koje će se koristiti u modelu, prikaz raspona i oblika funkcija pripadnosti te izrada baze neizrazitih pravila. U drugom dijelu istoga poglavlja prikazuju se odgovori na anketni upitnik koji definiraju profil ispitanika. U trećem dijelu metodama deskriptivne statistike obrađuju se varijable koje utječu na procjenu rizika sudara na moru. Nakon deskriptivne statistike, u četvrtom dijelu ispituju se razlike između određenih grupa s obzirom na prethodno definirane

⁸¹ Hasan, M. F., & Sobhan, M. A. (2020). Describing fuzzy membership function and detecting the outlier by using five number summary of data. *American Journal of Computational Mathematics*, 10(03), 410-424.

kategorije metodama analize varijance. Dobiveni podatci predstavljaju temelj za odabir varijabli koje se dalje koriste u modelu, a koje eksperti smatraju važnima pri procjeni rizika sudara.

Peto poglavlje u svom fokusu ima prikaz izrade neizrazitog sustava zaključivanja. Prvi dio poglavlja predstavlja statističko određivanje parametara funkcija pripadnosti ulaznih varijabli. Statističkim metodama se određuju granice varijabli koje se koriste u modelu te uz pomoć dobivenih podataka određuju rasponi lingvističkih varijabli te parametri funkcija pripadnosti koji se koriste u određivanju oblika funkcija pripadnosti. Drugi dio poglavlja obrađuje statističko određivanje funkcija pripadnosti za izlazne varijable. U trećem dijelu obrađuje se određivanje baze neizrazitih pravila koje će se koristiti u izradi modela. Četvrti dio odnosi se na izradu modela neizrazitog sustava koji će se krositi u slučajevima dobre vidljivost, dok se u petom dijelu obrađuje model koji se koristi u slučajevima smanjene vidljivosti. Navedeni modeli dobiveni su korištenjem prethodno određenih funkcija pripadnosti ulaznih i izlaznih varijabli. Dodatno je prikazan odabir podmodela sustava, te metoda prikupljanja ekspertnoga znanja u funkciji određivanja neizrazitih pravila odlučivanja.

U šestom poglavlju prikazan je postupak validacije modela neizrazitog sustava zaključivanja korištenjem MATLAB programskog rješenja, te odabir najpovoljnijeg neizrazitog sustava zaključivanja za potrebe neizrazite procjene indeksa rizika sudara. Pri tome su se validirali svi podmodeli neizrazitog sustava zaključivanja.

Sedmo poglavlje sadrži ispitivanje i verifikaciju modela neizrazitog sustava zaključivanja uz ocjenjivanje njegove uspješnosti korištenjem studija slučaja. Koristila su se pri tome i istraživanja pomorskih nesreća ali i plovidbeni scenariji baze podataka klasifikacijskog društva DNV.

U osmom poglavlju prikazani su općenito integrirani navigacijski sustavi, te trenutni razvoj inteligentnih navigacijskih sustava u pomorstvu s nekim općim tendencijama. U nastavku su prikazane mogućnosti konceptualnog modela primjene sustava neizrazitog indeksa rizika sudara kod klasičnih ali i autonomnih brodova. Sukladno tome dat je i prijedlog integracije modela u integriranim navigacijskim sustavima.

Deveto poglavlje donosi diskusiju prethodno dobivenih rezultata istraživanja kako bi se ukazalo na uspješnost ali i ograničenja samog modela. Sukladno opaženim ograničenjima predložene su smjernice za buduća istraživanja.

Deseto i posljednje poglavlje donosi zaključak u kojem se u glavnim crtama prikazuju ishodi izvedenih istraživanja, s posebnim osvrtom na mogućnosti modela. Dodatno se navode prijedlozi za buduća istraživanja vezana uz primjenu neizrazitih sustava zaključivanja u procjeni rizika sudara na moru.

2. ANALIZA RIZIKA SUDARA NA MORU

Današnje pomorstvo više nije zamislivo bez formalne procjene rizika za velik broj poslova koji se obavljaju na brodu. Može se reći da je neformalna procjena rizika u pomorstvu postojala oduvijek te se kroz povijest plovidbeni pothvat poduzimao tek nakon pažljivo procijenjenih rizika na plovidbenom putu. Uspješna procjena rizika na moru značila bi i uspješno izvedeno putovanje. Među najbitnije procjene rizika na moru zasigurno spada procjena rizika sudara. Propisana je pravilima o izbjegavanju sudara na moru, koja predstavljaju obvezno znanje svakog člana plovidbene straže. Pažljivim korištenjem pravila moguće je uspješno i sigurno provesti pomorski poduhvat, te izbjeći nepoželjne događaje na moru.

2.1. Definicija rizika

Postoje različite definicije i interpretacije pojma rizika⁸², te postoje mnoge nejasnoće vezane uz pojam, počevši od same etimologije riječi. Porijeklo riječi još uvijek nije jasno potvrđeno, ali ukazuje na to da je ishodište samog pojma vezano uz mogućnost opasnosti na plovidbenom poduhvatu⁸³. Može se reći da je sam pojam iskonski vezan uz pomorstvo i neizvjesnosti u plovidbenom poduhvatu. S druge strane, interpretacija pojma rizika evoluirala u zadnja dva desetljeća, tako da postoje razne interpretacije koje egzistiraju paralelno. Moguće je izdvojiti definicije rizika koje ga opisuju vjerojatnošću neželjenog događaja, definicije koje pored vjerojatnosti događaja uključuju i posljedicu, te definicije koje koriste nesigurnost kako bi opisale pojam rizika. Usporedo s teorijom rizika razvijaju se i različite metode procjene rizika. Kod definicija rizika koje uključuju vjerojatnost, procjene rizika modeliraju vjerojatnost nepovoljnog događaja. Uobičajeno se dijele na one temeljene na relativnoj frekvenciji nepoželjnih događaja i one koje se temelje na subjektivnoj ili ekspertnoj procjeni vjerojatnosti. Međunarodna organizacija za standardizaciju (engl. *International Organisation for Standardization*, ISO) definira rizik kao djelovanje nesigurnosti na ciljeve⁸⁴, što je dovelo do određenih dvojbi u znanstvenoj zajednici⁸⁵, osobito s obzirom na utjecaj na procjenu rizika. Problem pojednostavljenja procjene rizika na način da bude prihvatljiv i jednostavan korisnicima često se rješava korištenjem matrica rizika⁸⁶. Matrice rizika multipliciraju vjerojatnost događaja sa ozbiljnošću posljedice neželjenog događaja (Tablica 1.) te kao rezultat imaju očekivanu

⁸² Mohović, Đ. (2010). *Ocjena prihvatljivosti pomorskih plovidbenih rizika*. (Doktorska disertacija, Sveučilište u Rijeci. Pomorski fakultet, Rijeka).

⁸³ Aven, T. (2012). The risk concept-historical and recent development trends. *Reliability Engineering and System Safety*, 99(0951), 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.11.006>

⁸⁴ International Organization for Standardization. (2018). *Risk management*.

⁸⁵ Terje Aven (2011). On the new ISO guide on risk management terminology. *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 96, Issue 7, 719-726, ISSN 0951-8320,

⁸⁶ Aven, T. (2017). Improving risk characterisations in practical situations by highlighting knowledge aspects, with applications to risk matrices. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 42-48

vrijednost rizika često dodatno izraženu u bojama, gdje zeleno označava niski rizik a crveno visoki rizik.

Tablica 1. Matrica rizika. Priredio i prilagodio autor prema⁸⁷

Vjerojatnost	Posljedice				
	Neznatne	Male	Umjerene	Značajne	Katastrofalne
Iznimno velika	Umjeren rizik	Umjeren rizik	Visok rizik	Vrlo visok rizik	Vrlo visok rizik
Velika	Nizak rizik	Umjeren rizik	Visok rizik	Visok rizik	Vrlo visok rizik
Umjerena	Nizak rizik	Nizak rizik	Umjeren rizik	Visok rizik	Visok rizik
Mala	Vrlo nizak rizik	Nizak rizik	Umjeren rizik	Umjeren rizik	Visok rizik
Iznimno mala	Vrlo nizak rizik	Vrlo nizak rizik	Nizak rizik	Umjeren rizik	Umjeren rizik

Takve matrice su vrlo uobičajene u praksi, te se primjenjuju u raznim industrijama, uključujući i pomorsku^{88 89 90}. Očit problem takvih matrica predstavlja često nepoznata frekvencija opasnosti, ali i nepoznavanje eventualnih konzekvenci neke radnje što kao posljedicu može imati pogrešno procijenjen rizik. U pomorskom prometu bilo bi jako teško odrediti frekvencije sudara na nekim lokalnim područjima zbog nedostatka zabilježenih podataka ili zbog nedovoljnih i nepouzdanih podataka. U tom smislu moguće je koristeći ekspertna znanja procjenjivati rizik sudara. Ekspertna znanja pri procjeni rizika na određenim pomorskim plovidbenim putovima koristi i Međunarodno udruženje uprava pomorske signalizacije i sredstava za pomorsku navigaciju (engl. *The International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities*, IALA), te ih prikuplja putem Delfi metode⁹¹. Navedeni postupak procjene rizika naziva se Sigurnosna procjena plovidbenih putova i luka (engl. *Ports And Waterways Safety Assessment*, PAWSA)

⁸⁷ Atalić, J., & Hak, S. (2014). Procjena rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj – rizik od potresa. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet u suradnji s Ministarstvom graditeljstva i prostornog uređenja i Državnom upravom za zaštitu i spašavanje, Hrvatska.

⁸⁸ Cox, Jr, L. A. (2009). What's wrong with hazard-ranking systems? An expository note. *Risk Analysis: An International Journal*, 29(7), 940-948.

⁸⁹ International Association of Class Societies. (2021). *A guide to risk assessment in ship operations*.

⁹⁰ Ministarstvo rada i mirovinskog osiguranja. (2014). *Pravilnik o izradi procjene rizika*, Narodne novine br. 112/14, 129/19.

⁹¹ International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities. (2024). *Risk analysis and management*. Raspoloživo na: <https://www.iala-aism.org/technical/risk-analysis-and-management/risk-management-tools/qualitative-risk-management-tool-pawsa/>, (pristupljeno 18. travnja 2024).

2.2. Rizik u pomorskom prometu

Pomorski promet predstavlja najvažniji vid prometa tereta globalno, budući se od 80 do 90% volumena svjetske trgovine obavlja pomoću brodova^{92 93 94}. Recentni primjer nasukavanja broda *Ever Given* u Sueskom kanalu pokazao je svu važnost pomorskog prometa, budući su globalni opskrbeni lanci bili blokirani nekoliko dana, uzrokovavši dnevnu štetu od 9,6 milijardi dolara⁹⁵. S obzirom na važnost pomorskog prometa, potrebno je osigurati kako bi rizik nezgoda u pomorskom prometu bio što manji. Rizik u pomorskom prometu je u interesu mnogih znanstvenih istraživanja koja se bave širokim rasponom tema iz pomorskog prometa⁹⁶, sve do aktualnih problema vezanih uz autonomne brodove^{97 98}. S druge strane, procjena rizika u praktičnom smislu, u fokusu je međunarodnih organizacija i pomorskih klasifikacijskih društava^{99 100 101}. Pri eksploataciji broda postoji širok raspon radnji prilikom kojih postoje određeni rizici. Među kategorije radnji svakako spadaju:

- plovidba brodom,
- održavanje broda,
- manipulacija teretom,
- pravne radnje vezane uz teret, brod i posadu,
- radnje koje mogu imati utjecaj na okoliš.

⁹² International Chamber of Shipping. (2024). *Shipping and World Trade: World Seaborne Trade*. Raspoloživo na: <https://www.ics-shipping.org/shipping-fact/shipping-and-world-trade-world-seaborne-trade/>, (pristupljeno 20. lipnja 2024).

⁹³ Det Norske Veritas. (2024). *Ocean's future to 2050*. Raspoloživo na: <https://www.dnv.com/oceansfuture/shipping.html>, (pristupljeno 20. travnja 2024).

⁹⁴ Wang, S., Yin, J., & Khan, R. U. (2020). The multi-state maritime transportation system risk assessment and safety analysis. *Sustainability*, 12(14), 5728.

⁹⁵ Forti, N., d'Afflisio, E., Braca, P., Millefiori, L. M., Willett, P., & Carniel, S. (2021). Maritime anomaly detection in a real-world scenario: Ever Given grounding in the Suez Canal. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(8), 13904-13910.

⁹⁶ Huang, X., Wen, Y., Zhang, F., Han, H., Huang, Y., & Sui, Z. (2023). A review on risk assessment methods for maritime transport. *Ocean Engineering*, 279, 114577.

⁹⁷ Fan, C., Montewka, J., & Zhang, D. (2022). A risk comparison framework for autonomous ships navigation. *Reliability Engineering & System Safety*, 226, 108709.

⁹⁸ Šikić, M., Jančić, A., Jureško, M., & Mohović, Đ. (2023). Analysis of Risks Arising from the Use of Autonomous Vessels. *Pomorski zbornik*, 63, 63-74.

⁹⁹ International Maritime Organization. (2010). *Degree of risk evaluation; SN.1/Circ.296*.

¹⁰⁰ 57. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities. (2009). *O-134: IALA Recommendation on the Risk Management Tool for Ports and Restricted Waterways*. Raspoloživo na: https://www.iala-aim.org/content/uploads/2016/07/o_134_ed2_iala_risk_management_tool_for_ports_and_restricted_waterways_may2009.pdf, (pristupljeno 18. travnja 2024).

¹⁰¹ Lloyds Register. (2014). *Guidance Notes for Risk Based Analysis: Collisions*. Raspoloživo na: <https://www.lr.org/en/knowledge/lloyds-register-rules/guidance-notes/guidance-notes-for-collision-analysis/>, (pristupljeno 5. travnja 2023).

Unutar svake kategorije postoji iznimno veliki broj radnji koje mogu biti nosioci većeg ili manjeg rizika. Postupci procjene rizika na brodovima uređeni su sustavima upravljanja sigurnošću brodarskih kompanija ali i preporukama javnih tijela. U skladu sa internim sustavima pomorskih kompanija, radnje koji se obavljaju na brodu podložne su prethodnoj procjeni rizika. Takve procjene temelje se većinom na matricama rizika, pri čemu pomorci određuju frekvenciju i opasnost za pojedinu radnju. Nakon postupka procjene rizika, a u slučaju velikog rizika, potrebno je poduzeti određene kontrolne mjere kako bi smanjio rizik i doveo do prihvatljivog. Među takve mjere spada i sustav dozvola za obavljanje poslova, kojemu je za cilj propisati slijed radnji koje je potrebno izvršiti kako bi se posao obavio sigurno¹⁰². Dozvole se izdaju za poslove ulaska u zatvorene prostore, poslove rada na visini, rukovanje opasnim tvarima te druge opasne poslove. Osim sustava dozvola, koriste se i provjerni popisi, koji za cilj imaju osigurati adekvatno izvršavanje posebno bitnih radnji. Među takve popise spadaju oni koji se koriste prilikom predaje plovidbene straže, pripreme broda za dolazak u luku, pripreme broda za odlazak iz luke, plovidbe pri smanjenoj vodljivosti, ali i u slučajevima kada dođe do kvara neke bitne opreme, poput sustava kormilaranja. Prema Međunarodnom kodeksu o sigurnom vođenju broda i sprječavanju onečišćenja okoliša (engl. *International Safety Management Code*, ISM Code)¹⁰³, brodarske kompanije obvezne su osim nezgoda, evidentirati i slučajeve kada se nezgoda mogla dogoditi (engl. *near miss*). Ti podatci se dalje koriste kako bi se analizirale nezgode i izbjegnute nezgode te smanjio njihov broj¹⁰⁴. Podatci također mogu poslužiti kako bi se odredile učestalost i posljedice pojedinih nezgoda koje se mogu koristiti dalje u procjeni rizika. Problem ipak predstavlja što su ti podatci često nepouzdan, budući pomorci izbjegavaju iz više razloga prijavljivati nezgode i izbjegnute nezgode^{105 106}. Nepouzdanost tako dobivenih podataka negativno utječe na njihovo korištenje u svrhu procjene rizika ili u svrhu budućih korektivnih radnji.

2.3. Rizik sudara

Rizik sudara predstavlja dio mnogo šireg pojma rizika u pomorskom prometu. Za razliku od gore navedenih neusklađenosti u definicijama pojma rizika, rizik sudara na moru definiran je Pravilima o izbjegavanju sudara na moru¹⁰⁷. Članak 7. pravila propisuje kako rizik od sudara postoji već onda kad postoji imalo sumnje da takav rizik postoji. Prilikom

¹⁰² Maritime and Coastguard Agency. (2022). *Code of Safe Working Practices for Merchant Seafarers 2015 edition, Amendment 7*, October 2022.

¹⁰³ International Maritime Organization. (1993). *The International Safety Management (ISM) Code*

¹⁰⁴ Hasanspahić, N., Vujičić, S., Kristić, M., & Mandušić, M. (2022). Improving Safety Management through Analysis of Near-Miss Reports—A Tanker Ship Case Study. *Sustainability*, 14(3), 1094.

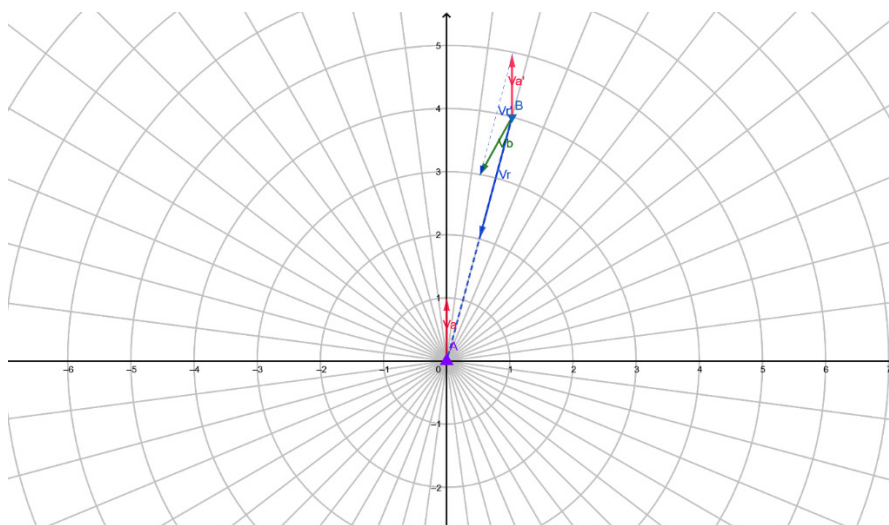
¹⁰⁵ Hasanspahić, N., Frančić, V., Vujičić, S., & Maglić, L. (2020). Reporting as a key element of an effective near-miss management system in shipping. *Safety*, 6(4), 53.

¹⁰⁶ Kristić, M., Žuškin, S., Hasanspahić, N., & Vujičić, S. (2022). Reliability and Acceptance of Near-Miss System in Shipping. In *International Conference on Sustainable Transport (SuTra 2022)* (pp. 47-47).

¹⁰⁷ International Maritime Organisation. (1972). *The International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972 (COLREGs)*.

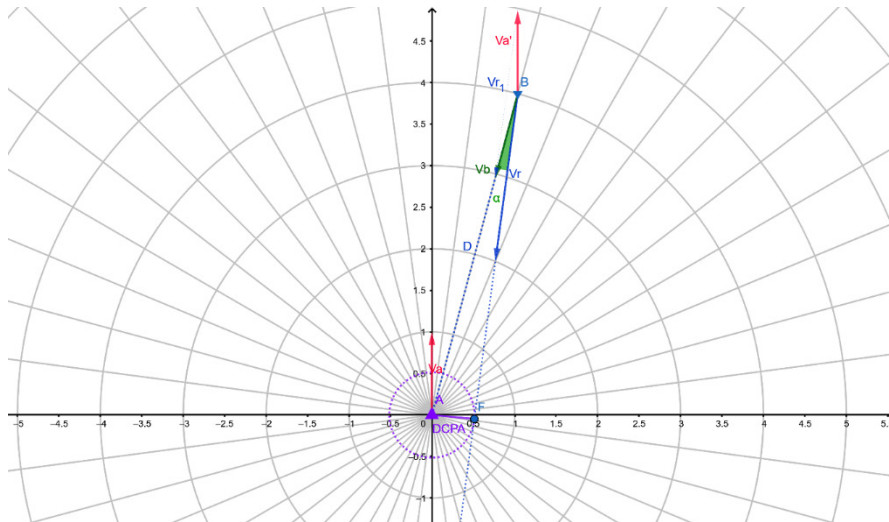
utvrđivanja postojanja rizika sudara, smatra se kako taj rizik postoji u slučaju kad se kompasni smjer broda koji se približava znatno ne mijenja. Takav rizik može postojati čak ako je i očita veća promjena kompasnog smjera, posebno ako se približuje jako velik brod ili tegalj, ili ako je brod koji se približuje na maloj udaljenosti. Može se primijetiti kako pravila umjesto vjerojatnosti neželjenog događaja koristi pojam sumnje ili nesigurnosti u ishod. Ako se rizik ne može utvrditi s potpunom sigurnošću, a postoji sumnja kako rizik postoji, mora se smatrati da takav rizik postoji. Nadalje, rizik sudara onako kako ga opisuju pravila postoji bez obzira na eventualne posljedice sudara, tako da ni neizraziti indeks rizika u ovom radu ne uzima u obzir ozbiljnost eventualnih posljedica sudara.

Opasnost od sudara svakako postoji u slučaju kad se azimut broda koji se približava uopće ne mijenja te u tom slučaju udaljenost najbližeg prolaza iznosi nula to jest dolazi do sudara. Takvu situaciju mogli bi nazvati posebnom situacijom rizika od sudara gdje je nedvojbeno da postoji rizik. Situaciju je moguće prikazati grafički koristeći Kartezijev koordinatni sustav (Slika 3.), prikazujući susret relativnim prikazom. Na slici je vlastiti brod prikazan kao A (koji stoji u središtu koordinatnog sustava), drugi brod kao B dok su relativni kurs i brzina prikazano kao V_r . Iz relativnog prikaza gibanja, vidljivo je kako brod B prolazi kroz točku A to jest kroz poziciju vlastitoga broda.



Slika 3. Prikaz radarskog dijagrama kada se azimut objekta ne mijenja. Priredio autor koristeći GeoGebra programsko rješenje

Međutim, puno su češće situacije kada ipak dolazi do promjene azimuta, te CPA ne iznosi nula, to jest drugi brod prolazi na određenoj udaljenosti od vlastitog broda, ali ipak postoji rizik sudara (Slika 4.).



Slika 4. Prikaz radarskog dijagrama kada se azimut objekta mijenja. Priredio autor koristeći GeoGebra programsko rješenje

Koristeći osnovna trigonometrijska pravila, na osnovu relativnog gibanja drugoga broda, moguće je odrediti osnovne varijable koje se koriste pri procjeni rizika sudara. Udaljenost točke najbližeg prolaza dobije se promatrajući trokut ABF, te koristeći sljedeću formulu:

$$D_{CPA} = D * \sin \alpha \quad [1]$$

Gdje je D_{CPA} udaljenost točke najbližeg prolaza; D udaljenost između dva broda; α kut između linije azimuta i relativnog kursa.

Vrijeme točke najbližeg prolaza možemo dobiti kao kvocijent dužine \overline{BF} koja u naravi predstavlja udaljenost od pozicije drugog broda do točke najbližeg prolaza, i relativne brzine drugog broda:

$$T_{CPA} = \frac{\overline{BF}}{V_r} \quad [2]$$

Dužina \overline{BF} zamijeni se umnoškom kosinusa kuta α i udaljenosti među brodovima te se dobije:

$$\overline{BF} = D \cos \alpha \quad [3]$$

i konačno se dobije:

$$T_{CPA} = \frac{D \cos \alpha}{V_r} \quad [4]$$

Gdje je T_{CPA} vrijeme do točke najbližeg prolaza; V_r = relativna brzina drugog broda α = kut između linije azimuta i relativnog kursa;

Problem koji proizlazi iz situacije na Slici 4. predstavlja definiranje vrijednosti CPA koja bi bila dovoljno sigurna, tj. utvrditi granicu između postojanja i nepostojanja rizika. Svakako se u ovom slučaju radi o neizrazitom pojmu, jer granica između sigurnog i nesigurnog nije izrazita. Ipak, pomorska praksa koristi izrazite vrijednosti CPA i TCPA kako bi izrazila postojanje rizika, na način da pomorske kompanije u svojim internim plovidbenim pravilima definiraju minimalne vrijednosti kojih se članovi plovidbene straže trebaju pridržavati. Problem koji proizlazi iz tako definiranih minimalnih vrijednosti je njihova izrazitost. Ako bi minimalna sigurna vrijednost točke najbližeg prolaza bila 1 nautička milja, vrijednost 0,99 nautičke milje predstavljala bi opasan CPA, dok bi 1 NM predstavljala sigurnu udaljenost. Možemo uočiti da je razlika između te dvije udaljenosti u smislu izbjegavanja sudara na moru potpuno nebitna, jer iznosi samo 18,52 m. Analogiju možemo primijeniti i na vrijeme najbližeg prolaza.

Iz samih pravila o izbjegavanju sudara međutim proizlazi:

1. Pravila određuju pojam znatne promjene kompasnog smjera koji nije moguće jasno odrediti, budući da je pojam *znatno* neizrazit,
2. Vrijednosti CPA i TCPA nisu definirana pravilima; one su izvedene iz pravila. Postoji nesuglasje o njihovim vrijednostima s obzirom na sigurnost, te se i njihove postavke na radarskim uređajima razlikuju,
3. Prilikom procjene rizika od sudara treba uzeti u obzir i one varijable koje bi mogle pobuditi sumnju kod člana plovidbene straže.

Pored toga, pojmovi kao što je pojam *vrlo mala udaljenost* predstavljaju neprecizne ili neizrazite pojmove. Neprecizne i neizrazite pojmove moguće je jednostavno opisati koristeći pravila neizrazitih skupova. Neizraziti skupovi dopuštaju i djelomičnu pripadnost određenom skupu. Na takav je način moguće modelirati lingvističke varijable kao što su *vrlo mala udaljenost*, *vrlo velik brod* i slično.

3. KONCEPT NEIZRAZITE LOGIKE ZA MODELIRANJE SUSTAVA ZAKLJUČIVANJA

Neizrazita logika i neizraziti sustavi zasnivaju se na teoriji neizrazitih skupova koju je predstavio L.A. Zadeh 1965. godine^{108 109 110}. Neizraziti skupovi imaju mogućnost opisivati neizrazite ili lingvističke varijable koje se često koriste u svakodnevnoj ali i pomorskoj komunikaciji. Teorija neizrazitih skupova koristiti će se kako bi se opisale one varijable sustava koje su u svojoj naravi lingvističke, dok će se koncept neizrazite logike i neizrazitih sustava zaključivanja primijeniti kako bi se odredio neizraziti indeks rizika sudara.

3.1. Neizraziti skupovi

Neizraziti skupovi za razliku od klasičnih izrazitih skupova gdje objekt pripada ili ne pripada skupu, sadrže elemente koji imaju određeni stupanj pripadnosti skupu.

Pripadnost elementa nekom skupu možemo opisati funkcijom pripadnosti $\mu_A(x)$, te kod klasičnog skupa može imati vrijednost 1 ili 0¹¹¹:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x \in A \\ 0, & x \notin A \end{cases} \quad [5]$$

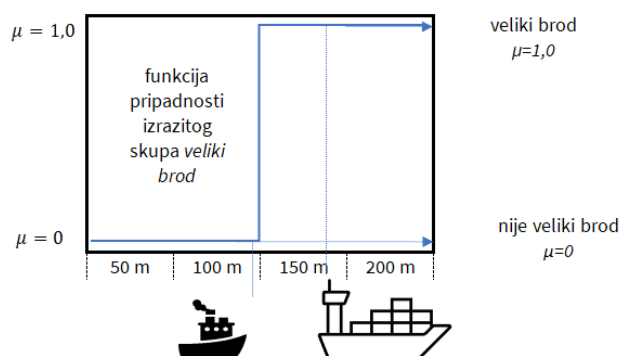
Na Slici 5. prikazana je pripadnost dvaju brodova klasičnom skupu *veliki brod*, gdje određeni brod može imati pripadnost skupu *veliki brod* ovisno o svojoj duljini.

¹⁰⁸ Zadeh, L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*, vol. 8 (1965), 338-353.

¹⁰⁹ Zadeh, L. A. (2015). Fuzzy logic - A personal perspective. *Fuzzy Sets and Systems*, 281, 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2015.05.009>

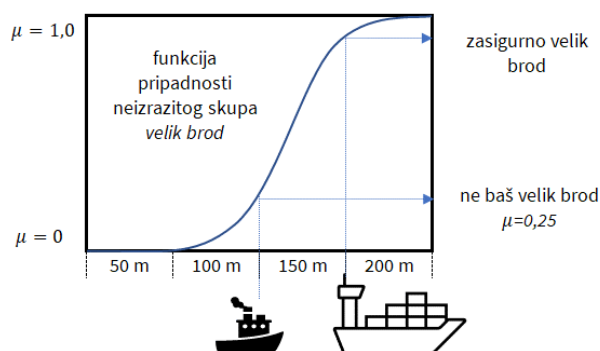
¹¹⁰ López-Guauque, J. A., & Gil-Lafuente, A. M. (2020). Fifty years of fuzzy research: A bibliometric analysis and a long-term comparative overview. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 38(5), 5413–5425. <https://doi.org/10.3233/JIFS-179634>

¹¹¹ Bonato, J., Mrak, Z., & Badurina, M. (2015). Speed regulation in fan rotation using fuzzy inference system. *Pomorstvo*, 29(1), 58-63



Slika 5. Izraziti skup veliki brod. Priredio i prilagodio autor prema¹¹²

Kod klasičnog skupa nije moguća djelomična pripadnost nekom skupu, već kao u gornjem primjeru neki brod može pripadati u potpunosti samo jednom ili drugom skupu, dok su granice između skupova izrazite. Granica u primjeru predstavlja vrijednost 100 metara, te bi svi brodovi manje duljine pripadali skupu malih brodova, dok bi svi veće duljine pripadali skupu velikih brodova. Prema tome brod koji bi imao duljinu 99,9 metara pripadao bi skupu malih brodova, dok bi brod čija je duljina 100,1 metara pripadao skupu velikih brodova, iako je razlika njihovih duljina neprimjetnih 20 centimetara. Kod neizrazitog skupa moguća je djelomična ili stupnjevana pripadnost nekom skupu, a vrijednost funkcije pripadnosti nalazi se unutar intervala $[0,1]$, kao na Slici 6.



Slika 6. Neizraziti skup veliki brod. Priredio i prilagodio autor prema¹¹³

Na gornjem primjeru vidljivo je da kod neizrazitog skupa *veliki brod* ne postoji izrazita granica pripadnosti skupu, te bi brodovi određene duljine imali samo djelomičnu pripadnost skupu, dok bi neki imali potpunu pripadnost skupu. Kod neizrazitih skupova,

¹¹² Kristić, M., & Žuškin, S. (2024). Quantification of Expert Knowledge in Describing COLREGs Linguistic Variables. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 849.

¹¹³ Kristić, M., & Žuškin, S. (2024). Quantification of Expert Knowledge in Describing COLREGs Linguistic Variables. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 849.

također je moguće da isti brod ima djelomičnu pripadnost i nekom drugom susjednom skupu. Ovakva definicija pripadnosti bliža je ljudskom poimanju okoline u slučajevima kad ne postoje jasne granice pripadnosti određenom skupu. Funkcije pripadnosti neizrazitih skupova uvijek su normalizirane, to jest maksimalna vrijednost je 1, dok je neizraziti skup definiran uređenim parom:

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\} \quad [6]$$

Gdje $x \in X$ označava elemente koji pripadaju univerzalnom skupu X , i

$$\mu_{\tilde{A}}(x) : X \rightarrow [0, 1] \quad [7]$$

Neizraziti skup možemo prikazati u njegovom diskretnom ali i kontinuiranom obliku prema ¹¹⁴U slučajevima kada imamo diskretan i konačan set $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ neizraziti podskup \tilde{A} od X može se prikazati kao:

$$\tilde{A} = \sum_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}}(x_i)/x_i \quad [8]$$

dok se u slučajevima u kojima imamo kontinuiran set može prikazati kao:

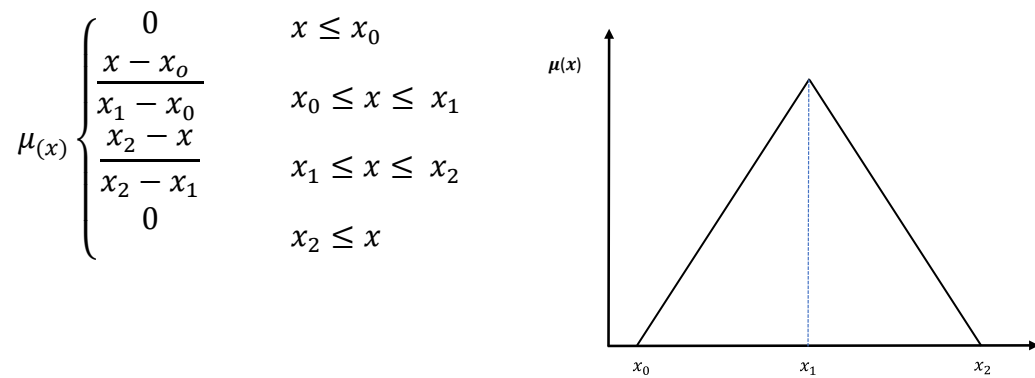
$$\tilde{A} = \int_X \mu_{\tilde{A}}(x)/x \quad [9]$$

gdje oznaka \int označava kako se radi o neprebrojivim elementim skupa X .

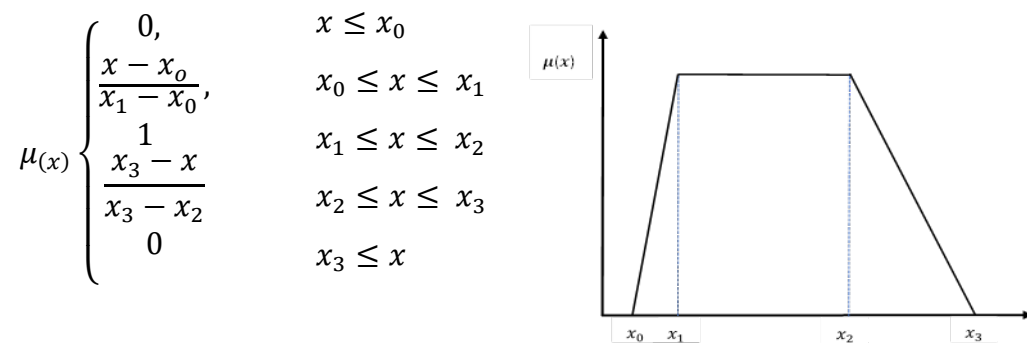
Funkcije pripadnosti neizrazitih skupovi mogu poprimati različite oblike, te se često zbog jednostavnosti koriste trokutaste funkcije pripadnosti (Slika 7.) ili trapezoidne funkcije pripadnosti (Slika 8.)¹¹⁵:

¹¹⁴ Tzeng, G. H., & Huang, J. J. (2014). *Fuzzy multiple objective decision making*. CRC Press.

¹¹⁵ Alavala, C. R. (2008). *Fuzzy logic and neural networks: basic concepts & application*. New Age International.



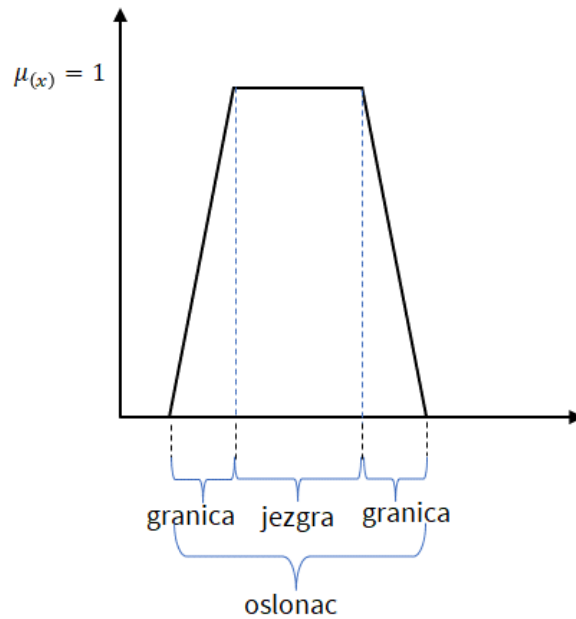
Slika 7. Trokutasta funkcija pripadnosti. Priredio autor prema¹¹⁵



Slika 8. Trapezoidna funkcija pripadnosti. Priredio autor prema¹¹⁵

Karakteristike funkcija pripadnosti opisuju pripadnost elementa x neizrazitom skupa \tilde{A} , te se mogu se prikazati kao na Slici 9.¹¹⁶:

¹¹⁶ Ross, T. J. (2005). *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons.



Slika 9. Karakteristike funkcije pripadnosti. Priredio autor

Područje u kojem funkcija pripadnosti svakog neizrazitog skupa \tilde{A} ima potpunu pripadnost naziva se jezgrom ili srži (engl. *core*) funkcije pripadnosti te se može izraziti kao:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = 1 \quad [10]$$

Za svaki neizraziti skup \tilde{A} , područje unutar kojeg je pripadnost skupu veća od nule naziva se oslonac (engl. *support*), te se sastoji od svih elemenata x koji zadovoljavaju sljedeće:

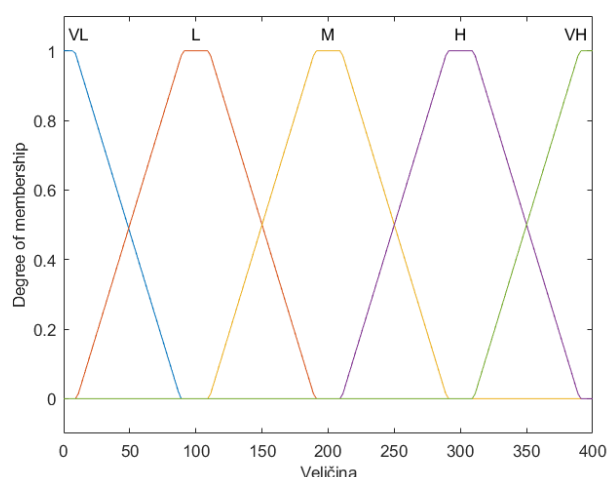
$$\mu_{\tilde{A}}(x) > 0 \quad [11]$$

Za svaki neizraziti skup \tilde{A} , granica (engl. *boundary*) je područje kojeg karakterizira nepotpuna pripadnost skupu, koja je uvijek veća od nule a manja od 1:

$$1 > \mu_{\tilde{A}}(x) > 0 \quad [12]$$

Korištenjem neizrazitih skupova moguće je odrediti i opisati lingvističke varijable, kojima se ljudi redovito uspješno koriste u svakodnevnoj komunikaciji. Pri tome lingvistička varijabla može sadržavati više lingvističkih vrijednosti. Kod gornjeg primjera neizrazitog skupa veliki broda, lingvistička varijabla bi mogla biti *veličina broda*, dok bi lingvističke vrijednosti mogle biti npr.: *vrlo mali brod*, *mali brod*, *srednje velik*, *velik brod*, *jako velik brod*.

Korištenjem neizrazitih skupova, neka lingvistička varijabla, npr. *veličina broda* sa pripadajućim lingvističkim vrijednostima, *VL* - *vrlo mali brod*, *L* - *mali brod*, *M* - *srednje velik*, *H* - *velik brod*, *VH* - *jako velik brod*, mogla bi se izraziti kao na Slici 10.



Slika 10. Primjer lingvističke varijable sa pripadajućim vrijednostima. Priredio autor

Pri tom treba uzeti u obzir da bi oblik funkcija pripadnosti, njene karakteristike i rasponi ovisili o dostupnim podacima o varijabli. Na gornjem primjeru koristili su se proizvoljno rasponi te oblik trapezoidne funkcije sa zadanim (engl. *default*) postavkama u MATLAB programskom rješenju.

3.2. Neizrazita logika

Iz teorije neizrazitih skupova proizlazi nadalje teorija neizrazite logike. Osnovne logičke operacije kod neizrazite logike možemo prikazati na način da neizrazitu logiku definiramo kao nadskup klasične binarne logike¹¹⁷. Kod binarne logike vrijednosti mogu biti samo 1 (potpuno istinito) ili 0 (potpuno neistinito), međutim kod neizrazite logike te vrijednosti mogu biti bilo gdje u rasponu $[0,1]$. Kako bi logičke operacije u onim slučajevima kada neizrazite vrijednosti postižu krajnje vrijednosti (0 ili 1) ostale identične klasičnoj binarnoj logici primjenjuju se operatori \min , \max te $1 - A$, gdje je A neizraziti skup, a $1 - A$ komplement skupa A (Slika 11.).

¹¹⁷ The MathWorks. (2023). *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*. Raspoloživo na: https://uk.mathworks.com/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy Ug.pdf, (pristupljeno 24. listopada 2023).

A	B	A I B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

I

Binarna logika		
A	B	A ILI B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

ILI

A	NEA
0	1
1	0

NE

A	B	min(A,B)
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

I

Neizrazita logika		
A	B	max(A,B)
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

ILI

A	1-A
0	1
1	0

NE

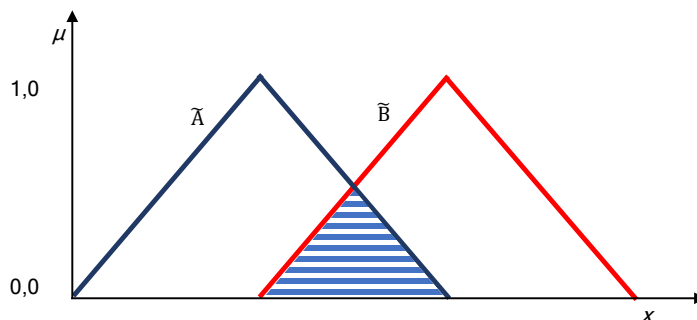
Slika 11. Binarna i neizrazita logička operacija. Priredio i prilagodio autor prema¹¹⁷

Na ovaj način logička operacija I, u izrazu $A I B$ zamijenjena je izrazom $\min(A, B)$. Na isti način logička operacija ILI, kao u izrazu $A ILI B$ zamijenjena je izrazom $\max(A, B)$, te izraz NE zamijenjen je izrazom $1 - A$.

Presjek, uniju te komplement skupa možemo prikazati formulom i grafički prema Ross (2015)¹¹⁸ Tako presjek dva neizrazita broja A i B definiramo kao:

$$(A \cap B)(x) = \min\{A(x), B(x)\} = A(x) \wedge B(x) \text{ za sve } x \in, \quad [13]$$

te je presjek dvaju neizrazitih skupova prikazan na Slici 12.:



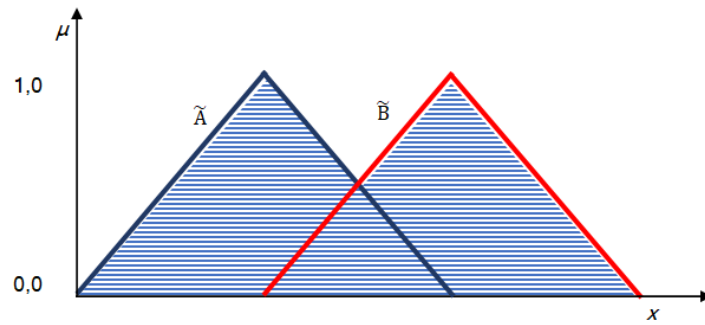
Slika 12. Presjek neizrazitih skupova A i B . Priredio autor prema¹¹⁸

Uniju dva neizrazita broja možemo izraziti kao u formuli:

$$(A \cup B)(x) = \max\{A(x), B(x)\} = A(x) \vee B(x) \text{ za sve } x \in X, \quad [14]$$

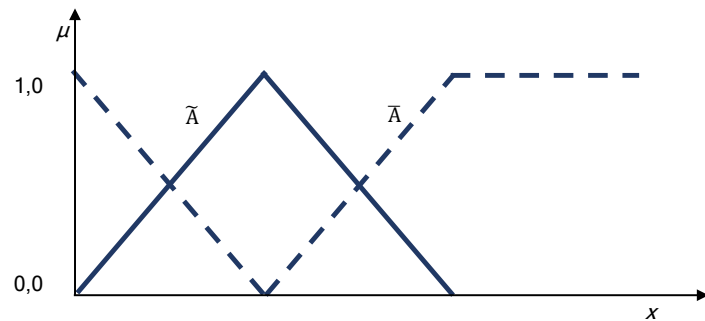
Dok se grafički unija dva neizrazita skupa može prikazati kao na Slici 13.:

¹¹⁸ Ross, T. J. (2005). *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons.



Slika 13. Unija neizrazitih skupova A i B. Priredio autor prema¹¹⁸

Komplement neizrazitog skupa možemo grafički prikazati kao na Slici 14.:



Slika 14. Neizraziti skupi A i komplement skupa A. Priredio autor prema¹¹⁸

Navedene operacije neizrazitih skupova predstavljaju osnovne operacije neizrazitim skupovima.

3.3. Neizraziti sustavi

Neizraziti skupovi zajedno sa neizrazitom logikom čine temelj neizrazitih sustava¹¹⁹. Neizraziti sustavi zaključivanja uspješno se primjenjuju u poljima kao što su automatska kontrola, klasifikacija podataka, prepoznavanje govora, te u ekspertnim sustavima^{120 121}. Aplikacija neizrazitog sustava kod kontrole podzemne željeznice u gradu Sendai, Japan 1978 godine privukla je globalnu pozornost na neizrazite sustave i njihove mogućnosti¹²²

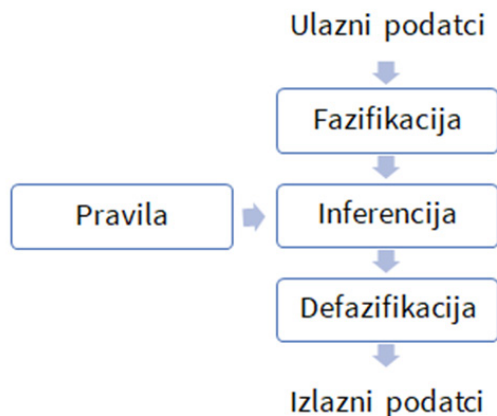
¹¹⁹ Munakata, T., Yashvant, J. (1994). Fuzzy systems: an overview. *Communications of the ACM*, 37(3), 69-77.

¹²⁰ The MathWorks. (2023). *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*. Raspoloživo na: https://uk.mathworks.com/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy Ug.pdf, (pristupljeno 24. listopada 2023).

¹²¹ Zadeh, L. A. (1988). Fuzzy logic. *Computer*, 21(4), 83-93. doi: 10.1109/2.53.

¹²² Mazandarani, M., & Li, X. (2020). Fractional Fuzzy Inference System: The New Generation of Fuzzy Inference Systems. *IEEE Access*, 8, 126066–126082. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3008064>

¹²³ ¹²⁴. Procesi unutar neizrazitih sustava nazivaju se fazifikacija (engl. fuzzification), inferencija (engl. inference) te defazifikacija (engl. defuzzification)¹²⁵, a mogu se jednostavno prikazati blok dijagramom (Slika 15.).



Slika 15. Blok dijagram neizrazitog sustava. Priredio i prilagodio autor prema ¹²⁵

U prvom koraku koji se naziva fazifikacija ili omekšavanje, vrijednosti ulaznih varijabli transformiraju se u ulazne neizrazite skupove. Inferencija ili odlučivanje je sljedeći korak gdje uz pomoć pravila odlučivanja u obliku *ako-onda* dolazi do pretvorbe ulaznih neizrazitih skupova u izlazne neizrazite skupove¹²⁶. Jednostavno neizrazito *ako-onda* pravilo ima oblik:

$$\text{Ako } x \text{ je } A \text{ onda } y \text{ je } B \quad [15]$$

gdje su A i B lingvističke varijable određene neizrazitim skupovima u rasponu X i Y. Neizraziti sustavi mogu se sastojati i od više ulaznih varijabli, te imaju sljedeći oblik:

$$\text{Ako } x_1 \text{ je } A_{1p} \text{ i } x_2 \text{ je } A_{2p} \dots \text{ i } x_n \text{ je } A_{np} \text{ onda } y \text{ je } B_p \quad [16]$$

Pravilo ili implikacija dijeli se na lijevi dio ili premise, dok se desni dio naziva zaključak. Kako se broj ulaznih varijabli u neizraziti sustav povećava, broj pravila raste

¹²³ Zadeh, L. A. (2015). Fuzzy logic - A personal perspective. *Fuzzy Sets and Systems*, 281, 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2015.05.009>

¹²⁴ Alavala, C. R. (2008). *Fuzzy logic and neural networks: basic concepts & application*. New Age International.

¹²⁵ Almasri, M., Elleithy, K., & Alajlan, A. (2015). Sensor fusion based model for collision free mobile robot navigation. *Sensors (Switzerland)*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/s16010024>

¹²⁶ Malyszko, M. (2021). Fuzzy logic in selection of maritime search and rescue units. *Applied Sciences*, 12(1), 21.

eksponencijalno^{127 128}, otežavajući ekspertima kreiranje kompletne baze pravila. Tako velika baza pravila smanjuje računsku učinkovitost neizrazitog sustava, otežava razumijevanje rada neizrazitog sustava i podešavanje parametara pravila te funkcija pripadnosti. Broj neizrazitih pravila R možemo izraziti kao eksponencijalnu funkciju broja ulaznih varijabli X i broja lingvističkih varijabli m za svaku od ulaznih varijabli:

$$R = X^m \quad [17]$$

Budući da kod kompleksnijih sustava postoji veći broj pravila, ona se slažu u bazu pravila. Ako je pojedino pravilo zadovoljeno, u tom slučaju se zaključak izvršava. Pravilo može biti zadovoljeno potpuno ili djelomično, zavisno od vrijednosti ulazne varijable. Tako i zaključak koji se prikazuje kao neizraziti skup može imati samo djelomičnu pripadnost, te se prikazuje kao krnji. Agregacija je proces u kojem dolazi do kombiniranja funkcija svih zadovoljenih pravila u jedan neizraziti skup, te se može prikazati kao¹²⁹:

$$\mu_{agg}(x, y) = \max\{\min\{\mu_{A1}(x), \mu_{B1}(y)\}, \dots, \min\{\mu_{An}(x), \mu_{Bn}(y)\}\} \quad [18]$$

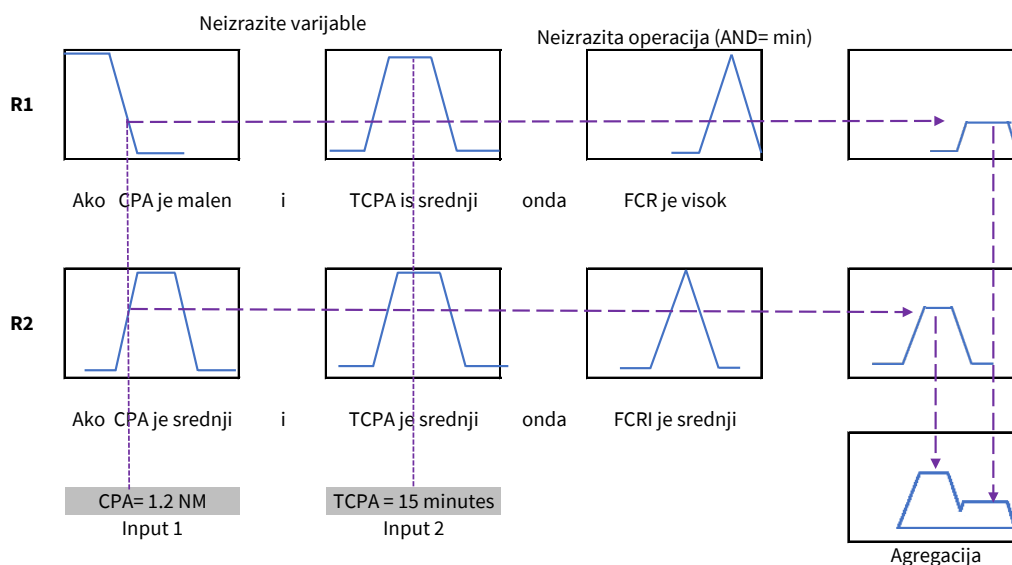
Grafički proces inferencije korištenjem dvije ulazne varijable, mogao bi se prikazati kao na Slici 16¹³⁰. U primjeru su prikazane dvije varijable CPA i $TCPA$, te je izlazna varijabla neizraziti indeks rizika sudara.

¹²⁷ Gegov, A., Sanders, D., & Vatchova, B. (2017). Aggregation of inconsistent rules for fuzzy rule base simplification. *International Journal of Knowledge-Based and Intelligent Engineering Systems*, 21(3), 135-145.

¹²⁸ Siddique, N., & Adeli, H. (2013). *Computational intelligence: synergies of fuzzy logic, neural networks and evolutionary computing*. John Wiley & Sons.

¹²⁹ Ross, T. J. (2005). *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons.

¹³⁰ The MathWorks. (2023). *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*. Raspoloživo na: https://uk.mathworks.com/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy_ug.pdf, (pristupljeno 24. listopada 2023).



Slika 16. Proces inferencije. Priredio i prilagodio autor prema ¹³⁰

Finalni korak je defazifikacija ili izoštravanje, proces u kojem dolazi do transformacije neizrazitih vrijednosti u izrazite izlazne vrijednosti. Sam proces defazifikacije može se provesti korištenjem više metoda:

- metoda težišta (engl. *Center of Gravity*)
- metoda središta ukupne površine (engl. *Center of Area*)
- metoda središnje točke maksimuma (engl. *Mean of Maximum*)

Kod metode težišta izlazna vrijednost se računa ¹³¹ prema formuli:

$$u_0 = \frac{\int y \cdot \mu_{agg}(x, y) dy}{\int \mu_{agg}(x, y) dy} \quad [19]$$

To je najčešće korištena metoda ¹³², te će se u ovom radu koristiti kod defazifikacije izlazne vrijednosti. Prednost navedene metoda je njena jednostavnost, te činjenica da daje dobre i precizne rezultate. Ipak, treba navesti da bi manu moglo predstavljati to što je ponekad potrebno mnogo vremena kako bi se provela računaska operacija izračuna točke težišta ¹³³.

Ovim poglavljem predstavljene su osnovne karakteristike neizrazitih sustava, koji će se koristiti u radu kako bi se razvio model neizrazitog sustava zaključivanja u svrhu procjene neizrazitog indeksa rizika sudara. Teorija neizrazitih skupova koristiti će se kako bi modelirale neizrazite lingvističke varijable koristeći ekspertna mišljenja. Nakon što se

¹³¹ Runkler, T. A. (1997). Selection of appropriate defuzzification methods using application specific properties. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 5(1), 72-79.

¹³² Mitsuishi, T. (2022). Definition of Centroid Method as Defuzzification. *Formalized Mathematics*, 30(2), 125-134.

¹³³ Gilda, K. S., & Satarkar, S. L. (2020). Analytical overview of defuzzification methods. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 6(2), 359-365.

prikupe mišljenja eksperata o rasponima lingvističkih pojmova, odredit će se statističkim metoda lingvističke varijable i njihove lingvističke vrijednosti. Na taj način će se i modelirati nesigurnosti u mišljenjima eksperata. Nadalje će se u radu koristiti teorija neizrazite logike kako bi se kreirala baza neizrazitih pravila. Statistički određene lingvističke varijable i baza neizrazitih pravila koristiti će se kako bi se izradili modeli neizrazitog sustava zaključivanja.

4. KVANTIFICIRANJE EKSPERTNOGA ZNANJA U FUNKCIJI ODREĐIVANJA PARAMETARA MODELA

Kvantificiranje ekspertnog znanja dobivenog tijekom istraživanja provodi se koristeći MATLAB programsko rješenje, te su izvatici računalnog koda dostupni u Privitku 1. Putem programskog rješenja provesti će cjelokupna analiza odgovora ispitanika, deskriptivna te inferencijalna statistika dobivenih podataka. Rezultati dobiveni statističkim metodama koristiti će se kako bi se odredile značajne varijable za kreiranje modela neizrazitog sustava zaključivanja. Za značajne varijable kreiraju se nadalje funkcije pripadnosti lingvističkih varijabli, sve na temelju analize ekspertnog znanja.

4.1. Metodologija prikupljanja podataka putem anketnog upitnika

Mišljenje eksperata o važnosti pojedinih čimbenika koji bi mogli utjecati na procjenu rizika sudara na moru, te njihove procjene raspona određenih lingvističkih varijabli i njihovih lingvističkih vrijednosti čine bitan dio istraživanja. Podatci su prikupljeni koristeći anketni upitnik na engleskom jeziku kreiran putem *LimeSurvey online* programske podrške (Privitak 2.). Navedena programska podrška odabrana je iz razloga što je putem nje bilo moguće kreirati pitanja koja se odnose na raspone lingvističkih vrijednosti koristeći posebno dizajniranu vrstu alata.

Prije same distribucije anketnog upitnika, prijedlog upitnika podnesen je etičkom povjerenstvu Sveučilišta u Dubrovniku. Povjerenstvo je 14 lipnja 2022 zaključilo da anketni upitnik, onako kako je predan, zadovoljava sve etičke kriterije, te da se može dalje distribuirati. Upitnik je distribuiran počevši od rujna 2021 do travnja 2023, te ga je u tom periodu ispunilo 220 ispitanika. Ispitanici su aktivni pomorci, raznih nacionalnosti, s različitim brodarskih kompanija i različitim vrsta brodova. S obzirom da je ispitivanje distribuirano širom svijeta, ono u svojoj naravi ima međunarodni karakter.

Online anketni upitnik sastoji se od četiri dijela:

1. Pitanja o profilu ispitanika (PPQ)
2. Pitanja o važnosti ispitivanih varijabli (IQ)
3. Pitanja o rasponu neizrazitih varijabli (RFQ)
4. Pitanja o poretku izrazitih varijabli (RCQ)

Upute ispitanicima prethode svakom dijelu anketnog upitnika. U predgovoru prvog dijela upitnika uvodi se ispitanike u svrhu i ciljeve istraživanja. U predgovoru drugog dijela objašnjavaju se ispitanicima svrha tog dijela upitnika, te se naglašava kako istraživanje podrazumijeva okolnosti otvorenog mora pri procjeni rizika. Predgovor trećeg dijela upitnika upućuje ispitanike na način ispunjanja pitanja koja definiraju raspon pojedine varijable. Konačno, predgovor četvrtog dijela bavi se rangiranjem neizrazitih varijabli. Prvi dio anketnog upitnika odnosi se na osobne podatke ispitanika vezane uz iskustvo i rad na brodu. U tom dijelu ispitanici odgovaraju na sljedećih pet pitanja:

- PPQ1:** Koje je vaše trenutno zvanje na brodu?
PPQ2: Koja je duljina broda na kojem trenutno plovite?
PPQ3: Koja je vrsta broda na kojem trenutno plovite?
PPQ4: Koje je vaše ukupno radno iskustvo na brodu?
PPQ5: Koje je vaše radno iskustvo u trenutnom zvanju?

Drugi dio anketnog upitnika traži odgovor ispitanika na važnost pojedinih čimbenika koristeći Likertovu skalu od 5 stupnjeva (1-vrlo nisko, 2–nisko, 3-srednje, 4-visoko, 5-vrlo visoko), te se sastoji se od tri podgrupe. U prvoj podgrupi koja se sastoji od pet pitanja (**IQ1** do **IQ5**) ispitanici iznose svoje mišljenje o utjecaju određenih karakteristika drugog broda dostupnih putem AIS uređaja na procjenu rizika sudara:

- IQ1:** Ocijenite utjecaj duljine drugoga broda na doživljeni rizik sudara.
IQ2: Ocijenite utjecaj brzine drugoga broda na doživljeni rizik sudara.
IQ3: Ocijenite utjecaj plovidbenog statusa drugoga broda (nesposoban za manevriranje, usidren i drugo) na doživljeni rizik sudara.
IQ4: Ocijenite utjecaj vrste drugoga broda na doživljeni rizik sudara.
IQ5: Ocijenite utjecaj gaza drugoga broda na doživljeni rizik sudara.

U drugoj podgrupi koja se sastoji od šest pitanja (**IQ6** do **IQ11**) ispituje se mišljenje o važnosti pojedinih čimbenika dostupnih putem ARPA i AIS uređaja koji se tradicionalno uzimaju u obzir pri procjeni rizika sudara:

- IQ6:** Ocijenite utjecaj vrijednosti CPA na doživljeni rizik sudara
IQ7: Ocijenite utjecaj vrijednosti TCPA na doživljeni rizik sudara
IQ8: Ocijenite utjecaj vrijednosti pramčanog kuta drugog broda na doživljeni rizik sudara
IQ9: Ocijenite utjecaj međusobne udaljenosti na doživljeni rizik sudara
IQ10: Ocijenite utjecaj vrijednosti BCR¹³⁴ na doživljeni rizik sudara
IQ11: Ocijenite utjecaj smjera pramčanice drugog broda (izražen u stupnjevima) na doživljeni rizik sudara

Treća podgrupa sadrži tri pitanja (**IQ12** do **IQ14**) koja ciljaju na utjecaj okoliša na procjenu rizika sudara. Utjecaji okoliša koji se ispituju su vidljivost, vremenski uvjeti te utjecaj noćne plovidbe. Navedena pitanja glase:

- IQ12:** Ocijenite utjecaj vidljivosti na doživljeni rizik sudara
IQ13: Ocijenite utjecaj vremenskih uvjeta na doživljeni rizik sudara
IQ14: Ocijenite utjecaj noćne plovidbe na doživljeni rizik sudara

Treći dio anketnog upitnika služi definiranju raspona lingvističkih varijabli a odnosi se na prethodno navedene čimbenike čije vrijednosti nisu izrazite. Svaka podgrupa sastoji se od pet pitanja.

U prvoj podgrupi trećeg dijela (**RFQ1** do **RFQ5**) ispituje se lingvistička varijabla *Duljina drugog broda*. Pitanja određuju minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističkih varijabli *vrlo mali brod*, *mali brod*, *brod srednje veličine*, *veliki brod*, *vrlo veliki brod* izražene u metrima:

¹³⁴ Udaljenost točke prolaza ispred pramca vlastitog broda (engl. Bow Crossing range, BCR)

RFQ1: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo mali brod* izražene u metrima. Koristite raspon od 0 do 400 metara.

RFQ2: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *mali brod* izražene u metrima. Koristite raspon od 0 do 400 metara.

RFQ3: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *brod srednje veličine* izražene u metrima. Koristite raspon od 0 do 400 metara.

RFQ4: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *veliki brod* izražene u metrima. Koristite raspon od 0 do 400 metara.

RFQ5: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo veliki brod* izražene u metrima. Koristite raspon od 0 do 400 metara.

Druga podgrupa (**RFQ6 do RFQ10**) odnosi se na čimbenik *Brzina drugog broda*, te se ispituju rasponi izraza *vrlo spori brod*, *spori brod*, *brod srednje brzine*, *brzi brod* te *vrlo brzi brod*:

RFQ6: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo spori brod* izražene u čvorovima. Koristite raspon od 0 do 35 čvorova.

RFQ7: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *spori brod* izražene u čvorovima. Koristite raspon od 0 do 35 čvorova.

RFQ8: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *brod srednje brzine* izražene u čvorovima. Koristite raspon od 0 do 35 čvorova.

RFQ9: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *brzi brod* izražene u čvorovima. Koristite raspon od 0 do 35 čvorova.

RFQ10: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo brzi brod* izražene u čvorovima. Koristite raspon od 0 do 35 čvorova.

Udaljenost najbliže točke mimoilaženja ispituje se u trećoj podgrupi (**RFQ11 do RFQ15**). Definiraju se vrijednosti *vrlo mali CPA*, *mali CPA*, *umjereni CPA*, *veliki CPA*, *vrlo veliki CPA*:

RFQ11: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo mali CPA* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 5 nautičkih milja.

RFQ12: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *mali CPA* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 5 nautičkih milja.

RFQ13: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *umjereni CPA* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 5 nautičkih milja.

RFQ14: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *veliki CPA* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 5 nautičkih milja.

RFQ15: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo veliki CPA* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 5 nautičkih milja.

Sljedeća podgrupa (**RFQ16** do **RFQ20**) ispituje vrijednost *BCR* kao lingvističke varijable *vrlo mali BCR*, *mali BCR*, *umjereni BCR*, *veliki BCR*, *vrlo veliki BCR*:

RFQ16: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo mali BCR* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 5 nautičkih milja.

RFQ17: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *mali BCR* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 5 nautičkih milja.

RFQ18: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *umjereni BCR* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 5 nautičkih milja.

RFQ19: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *veliki BCR* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 5 nautičkih milja.

RFQ20: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo veliki BCR* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 5 nautičkih milja.

Peta podgrupa (**RFQ21** do **RFQ25**) odnosi se na vrijednost *Međusobna udaljenost* sa podjelom na *vrlo mala međusobna udaljenost*, *mala međusobna udaljenost*, *srednja međusobna udaljenost*, *velika međusobna udaljenost*, *vrlo velika međusobna udaljenost*:

RFQ21: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo mala udaljenost* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 16 nautičkih milja.

RFQ22: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *mala udaljenost* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 16 nautičkih milja.

RFQ23: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *umjerena udaljenost* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 16 nautičkih milja.

RFQ24: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *velika udaljenost* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 16 nautičkih milja.

RFQ25: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo velika udaljenost* izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 16 nautičkih milja.

Nadalje, u šestoj podgrupi ispituju se vrijednosti raspona varijable *TCPA*. Pitanja (**RFQ26** do **RFQ30**) obrađuju vrijednosti *vrlo mali TCPA*, *mali TCPA*, *srednji TCPA*, *veliki TCPA*, *vrlo veliki TCPA*:

RFQ26: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo mali TCPA* izražene u minutama. Koristite raspon od 0 do 30 minuta.

RFQ27: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *mali TCPA* izražene u minutama. Koristite raspon od 0 do 30 minuta.

RFQ28: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *umjereni TCPA* izražene u minutama. Koristite raspon od 0 do 30 minuta.

RFQ29: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *veliki TCPA* izražene u minutama. Koristite raspon od 0 do 30 minuta.

RFQ30: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo veliki TCPA* izražene u minutama. Koristite raspon od 0 do 30 minuta.

Vidljivost kao čimbenik je predmet sedme podgrupe (**RFQ31** do **RFQ35**), dok se rasponi definiraju za vrijednosti *vrlo slaba vidljivost*, *slaba vidljivost*, *umjerena vidljivost*, *dobra vidljivost*, *vrlo dobra vidljivost*:

RFQ31: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo slaba vidljivost* izražene u izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 25 nautičkih milja.

RFQ32: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *slaba vidljivost* izražene u izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 25 nautičkih milja.

RFQ33: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *umjerena vidljivost* izražene u izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 25 nautičkih milja.

RFQ34: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *dobra vidljivost* izražene u izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 25 nautičkih milja.

RFQ35: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo dobra vidljivost* izražene u izražene u nautičkim miljama i dijelovima nautičke milje. Koristite raspon od 0 do 25 nautičkih milja.

U zadnjoj podgrupi trećeg dijela (**RFQ36** do **RFQ40**) definiraju se mišljenja eksperta o rasponima lingvističke varijable *Vremenski uvjeti* izražene u Beaufortovoj skali. Pitanja ispituju sljedeće vrijednosti: *vrlo dobri vremenski uvjeti*, *dobri vremenski uvjeti*, *srednje dobri vremenski uvjeti*, *loši vremenski uvjeti*, *vrlo loši vremenski uvjeti*:

RFQ36: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo dobri vremenski uvjeti* izražene u izražene Beaufortovoj skali. Koristite raspon od 0 do 12 Beaufortove skale.

RFQ37: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *dobri vremenski uvjeti* izražene u izražene Beaufortovoj skali. Koristite raspon od 0 do 12 Beaufortove skale.

RFQ38: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *umjereni vremenski uvjeti* izražene u izražene Beaufortovoj skali. Koristite raspon od 0 do 12 Beaufortove skale.

RFQ39: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *loši vremenski uvjeti* izražene u izražene Beaufortovoj skali. Koristite raspon od 0 do 12 Beaufortove skale.

RFQ40: Odredite minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističke varijable *vrlo loši vremenski uvjeti* izražene u izražene Beaufortovoj skali. Koristite raspon od 0 do 12 Beaufortove skale.

Četvrti dio ispituje mišljenja o utjecaju prethodnih izrazitih varijable, sastoji se od dva pitanja (**RCQ1** do **RCQ2**) a odnosi se na utjecaj vrste broda i utjecaj plovidbenog statusa drugog broda na doživljaj rizika sudara:

RCQ1: Poredajte vrste brodove prema njihovom utjecaju na doživljaj rizika sudara, počevši od 1 (najopasniji) do 5 (najmanje opasan):

- Brod za prijevoz tekućina
- Brod za prijevoz suhog rasutog tereta
- Kontejnerski brod
- Putnički brod
- Ribarica

RCQ2: Poredajte brodove uzevši u obzir odnos njihovog plovidbenog status na doživljaj rizika sudara, počevši od 1 (najopasniji) do 5 (najmanje opasan):

- Brod koji ne može manevrirati
- Brod ograničene mogućnosti manevriranja
- Brod koji je ograničen svojim gazom
- Usidreni brod
- Brod koji riba

Odgovori na navedena pitanja koriste se kako bi odredio profil ispitanika, odredile varijable koje eksperti smatraju utjecajnim pri procjeni rizika te njihov utjecaj. Nadalje je profile ispitanika moguće koristiti kako bi se ispitala razlike u mišljenjima između određenih grupa ispitanika. Odgovori na pitanja koja ispituje granice određenih varijabli koriste se kako bi se odredile lingvističke varijable i njihove vrijednosti. Odgovori će odrediti donje i gornje granice određenog raspona, te će se temeljem toga moći odrediti rasponi, i oblici lingvističkih varijabli.

4.2. Rezultati anketnog upitnika prema profilu ispitanika

Prvi dio anketnog upitnika ima za cilj kategorizirati ispitanika prema više kategorija, kako bi se kasnijom analizom podataka mogli utvrditi profili ispitanika te na temelju profila doći do određenih zaključaka. Profili će se kasnije koristiti i u inferencijalnoj statistici, kako bi odredili postoje li razlike među odgovorima pojedine grupe ispitanika a s obzirom na profil ispitanika.

4.2.1. Rezultati anketnog upitnika prema trenutnom zvanju na brodu – PPQ1

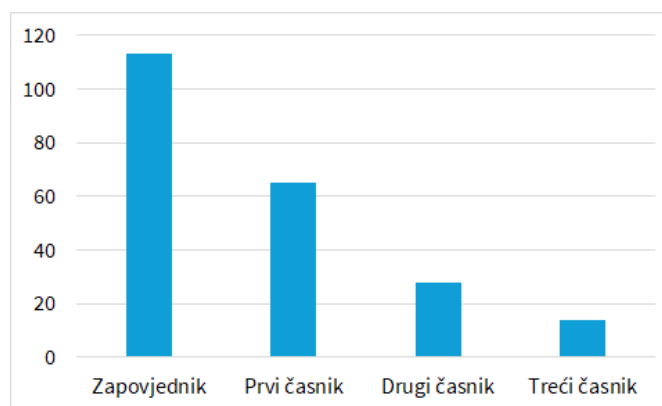
Međunarodno ispitivanje izvršeno je samo među časnicima palube i zapovjednicima, te se nije koristilo mišljenje nekih drugih dionika u pomorskom prometu. Kako bi obrada dobivenih podataka bila statistički jednostavnija, odgovori su bili mogući samo unutar prethodno definiranih kategorija: zapovjednik, prvi časnik palube, drugi časnik palube,

treći časnik palube. Tablicom 2. prikazana je frekvencija i postotak pojedinih kategorija ispitanika.

Tablica 2. Prikaz frekvencije i postotaka ispitanika prema trenutnom zvanju na brodu. Priredio autor

	f	%
Zapovjednik	113	51,4
Prvi časnik	65	29,5
Drugi časnik	28	12,7
Treći časnik	14	6,4
Ukupno	220	100,0

Kategorija s najviše ispitanika je kategorija zapovjednika broda koja iznosi više od 50% svih ispitanika, dok je najmanja kategorija ona trećeg časnika palube sa samo 6.4%. Dobivene podatke možemo prikazati i histogramom kao na Slici 17.



Slika 17. Prikaz distribucije ispitanika prema trenutnom zvanju na brodu PPQ1. Priredio autor

Iz prikazanog se vidi kako više od 80% ispitanika čine osobe na upravljačkim pozicijama, tj. na pozicijama zapovjednika i prvog časnika palube koje u naravi imaju više plovidbenog iskustva od osoba na nižim pozicijama. To bi trebalo pridonijeti tome da ekspertna mišljenja budu odraz stručnosti.

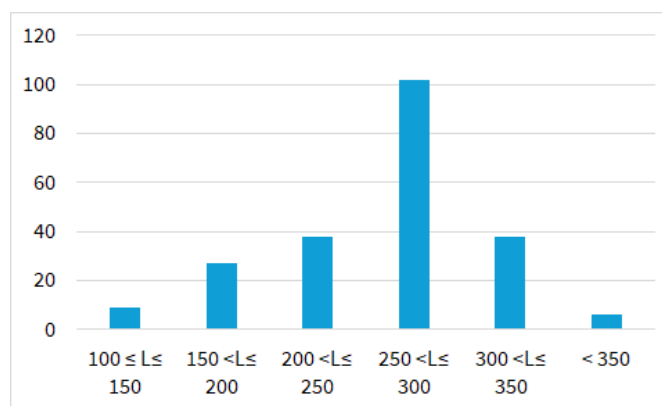
4.2.2. Rezultati anketnog upitnika prema duljini broda na kojoj ispitanici trenutno plove – PPQ2

Drugo profilno pitanje od ispitanika traži da odgovore koje je duljina broda na kojoj trenutno plove. Odgovori ispitanika zadani su odgovori unutar određenih kategorija. Kategorije brodova podijeljene su prema duljinama preko svega (*engl. Length Over All, LOA*) u skladu s tipičnom klasifikacijom: brodovi od 100 m do 150 m, brodovi od 150 m do 200 m, brodovi od 200 m do 250 m, brodovi od 250 m do 300 m, brodovi od 300 m do 350 m, brodovi s više od 350 m. Frekvencija (f) i postotak (%) pojedinih kategorija prikazane su u Tablici 3.

Tablica 3. Prikaz frekvencije i postotka ispitanika prema duljini broda na kojoj trenutno plove – PPQ2. Priradio autor

	f	%
Od 100 do 150	9	4,1
Od 150 do 200	27	12,3
Od 200 do 250	38	17,3
Od 250 do 300	102	46,3
Od 300 do 350	38	17,3
Više od 350	6	2,7
Ukupno	220	100,0

Kategorija s najviše ispitanika je kategorija brodova duljine 250 m do 300 m koja iznosi 46,3%, dok je najmanja kategorija brodova s više od 350 m sa samo 2,7% ispitanika. Podatci su nadalje prikazani i na histogramu kategorije duljina broda na kojoj ispitanik trenutno plovi (Slika 18.).



Slika 18. Prikaz distribucije ispitanika prema duljini broda na kojoj trenutno plove - PPQ2. Priradio autor

Iz obrađenih podataka vidljivo je da više od 80% ispitanika plove na brodovima čija je duljina preko svega veća od 200 metara. Samo 9 ispitanika plovi na brodovima manjim od 150 metara.

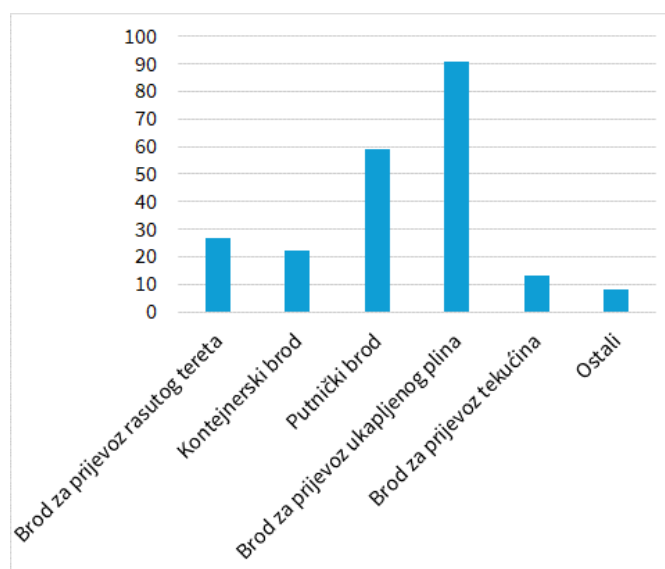
4.2.3. Rezultati anketnog upitnika prema vrsti broda na kojoj ispitanici trenutno plove – PPQ3

Trećim profilnim pitanjem definira se profil ispitanika s obzirom na vrstu broda na kojoj plove. Odgovori na zadano pitanje određeni su kao: brodovi za prijevoz rasutog tereta, kontejnerski brodovi, putnički brodovi, brodovi za prijevoz ukapljenog plina, brodovi za prijevoz tekućina te ostale vrste brodova (Tablica 4.)

Tablica 4. Prikaz frekvencije i postotka ispitanika prema vrsti broda na kojoj trenutno plove – PPQ3. Priredio autor

	f	%
Brod za prijevoz rasutog tereta	27	12,3
Kontejnerski brod	22	10
Putnički brod	59	26,8
Brod za prijevoz ukapljenog plina	91	41,4
Brod za prijevoz tekućina	13	5,9
Ostali	8	3,6
Ukupno	220	100,0

Podatci pokazuju kako najviše ispitanika plovi na brodovima za prijevoz ukapljenog plina 41,4%, dok najmanji broj ispitanika plovi na ostalim vrstama brodova (3,6%). Relativno velika je zastupljenost ispitanika i sa putničkih brodova (26,8%). Prikupljene podatke možemo prikazati i histogramom kao na Slici 19.



Slika 19. Prikaz distribucije ispitanika prema vrsti broda na kojoj trenutno plove - PPQ3. Priredio autor

Možemo zaključiti iz dobivenih podataka da ispitanici koji trenutno plove na brodovima za prijevoz ukapljenog plina i putničkim brodovima zajedno čine nešto više od 68% ispitanika. Važno je uzeti u obzir da su to trenutno brodovi na kojima plove, ne isključujući mogućnost da su prethodno plovili na drugim vrstama brodova. Te dvije kategorije brodova inače spadaju u izrazito reguliranu granu industrije po pitanju sustava upravljanja sigurnošću.

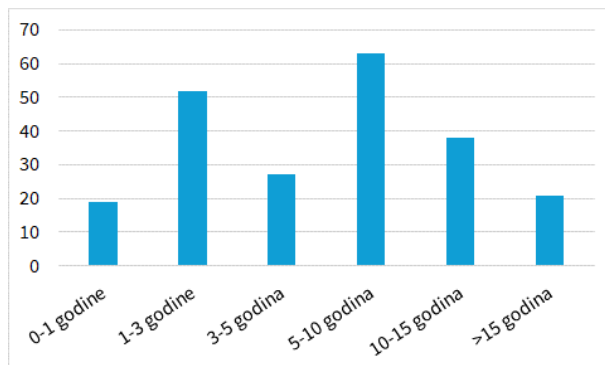
4.2.4. Rezultati anketnog upitnika prema radnom iskustvu u trenutnom zvanju na brodu – PPQ4

Četvrto anketno pitanje ima za cilj saznati koliko dugo ispitanici plove u trenutnom zvanju na brodu. Odgovori na navedeno pitanje su zadani unutar prethodno zadanih kategorija, te je trajanje radnog iskustva kategorizirano kako slijedi: radno iskustvo do 1 godine, radno iskustvo od 1 do 3 godine, radno iskustvo od 3 do 5 godina, radno iskustvo od 5 do 10 godina, radno iskustvo od 10 do 15 godina, te radno iskustvo sa više od 15 godina. Podatci dobiveni istraživanjem prikazani su u Tablici 5.

Tablica 5. Prikaz frekvencije i postotaka ispitanika prema radnom iskustvu u trenutnom zvanju – PPQ4. Priredio autor

	f	%
Do 1 godine	19	8,6
Od 1 do 3 godine	52	23,6
Od 3 do 5 godina	27	12,3
Od 5 do 10 godina	63	28,6
Od 10 do 15 godina	38	17,3
Više od 15 godina	21	9,5
Ukupno	220	100,0

Dobiveni podatci su nadalje grafički prikazani histogramom kao na Slici 20.



Slika 20. Prikaz distribucije ispitanika prema radnom iskustvu u trenutnom zvanju na brodu – PPQ4. Priredio autor

Najveći broj ispitanika ima radno iskustvo u trenutnom zvanju u periodu od 5 do 10 godina (28,6%), dok je najmanji broj najmanje iskusnih u određenoj zvanju s manje od 1 godina iskustva (8,6%).

4.2.5. Rezultati anketnog upitnika prema ukupnom radnom iskustvu na brodu – PPQ5

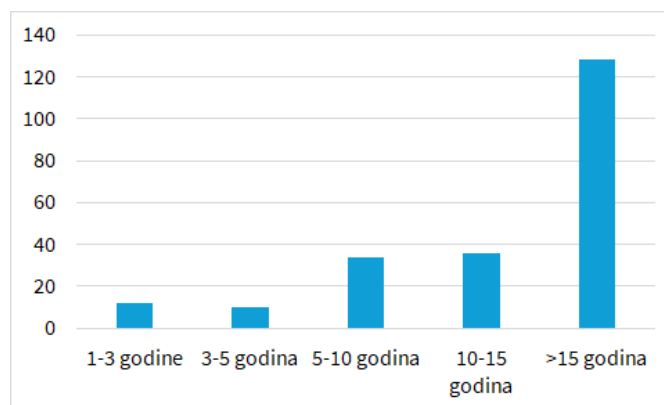
Posljednje pitanje u prvom dijelu anketnog upitnika koji definira profile ispitanika čini pitanje koje traži odgovor ukupno radno iskustvo na brodu. Odgovori na navedeno pitanje zadani su kako slijedi: ukupno radno iskustvo od 1 do 3 godine, ukupno radno iskustvo

od 3 do 5 godine, ukupno radno iskustvo od 5 do 10 godina, ukupno radno iskustvo od 10 do 15 godina, te ukupno radno iskustvo s više od 15 godina (Tablica 6.).

Tablica 6. Prikaz frekvencije i postotaka prema ukupnom radnom iskustvu na brodu – PPQ5. Priredio autor

	f	%
Od 1 do 3 godine	12	5,5
Od 3 do 5 godina	10	4,5
Od 5 do 10 godina	34	15,5
Od 10 do 15 godina	36	16,3
Više od 15 godina	128	58,2
Ukupno	220	100,0

Najviše ispitanika ima radno iskustvo s više od 15 godina (128), dok je najmanji broj (10) pomoraca s iskustvom od 3 do 5 godina. Nadalje podatci su prikazani histogramom (Slika 21).



Slika 21. Prikaz distribucije ispitanika prema ukupnom radnom iskustvu na brodu – PPQ5. Priredio autor

Može se primijetiti usklađenost sa podacima kategoriziranim s obzirom na službu na brodu, gdje se uočio velik broj ispitanika na upravljačkim pozicijama. Udio ispitanika sa više od 10 godina iskustva iznosi čak 74,5%, dok također možemo uočiti kako pomorci sa plovidbenim iskustvom većim od 5 godina čine čak 90% ispitanika.

4.3. Rezultati ankete i analiza varijabli modela metodama deskriptivne statistike

Drugi dio anketnoga upitnika donosi rezultate ispitivanja vezan uz važnost ispitivanih čimbenika na procjenu rizika sudara na moru. Odgovori ispitanika obradit će se metodama deskriptivne statistike kako bi mogli steći opći dojam o važnosti pojedinih varijabli, ali i nekim očekivanim odstupanjima u mišljenjima eksperata.

4.3.1. Koncept deskriptivne statistike

Deskriptivna statistika podrazumijeva područje statistika koja ima za cilj opisati karakteristike istraživanih podataka¹³⁵. Postoje razni elementi deskriptivne statistike, poput onih koje redovito koristimo u svakodnevnom životu kao što su aritmetička sredina, minimum i maksimum neke grupe podataka. Deskriptivna statistika služi kako bi se dobiveni podaci mogli ispravno tumačiti, te kako bi se kategorizirali i grupirali na način da ih je nakon toga moguće jednostavno koristiti. Može se reći da svakoj znanstvenoj analizi prethodi deskriptivna analiza¹³⁶. Deskriptivna analiza predstavlja i bitan prvi korak ka uspješnoj kasnijoj inferencijalnoj statistici¹³⁷. U doktorskom radu koriste se sljedeći elementi deskriptivne statistike:

Min - minimalna vrijednost varijable

Max - maksimalna vrijednost varijable

SD - Standardna devijacija je drugi korijen varijance uzorka. Služi kao mjera prosječnog odstupanja vrijednosti numeričke varijable od njezine aritmetičke sredine te se izražava kao:

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^2}{N}} \quad [20]$$

M - Aritmetička sredina je najviše upotrebljavana potpuna srednja vrijednost. Aritmetička sredina se definira kao omjer zbroja svih vrijednosti numeričke varijable i broja njezinih vrijednosti. Dakle, za odabranu numeričku varijablu X, aritmetička je sredina, za koju se rabi oznaka \bar{x} , dana izrazom:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad [21]$$

Sk - koeficijent asimetrije distribucije¹³⁸ Sk je omjer trećeg momenta oko sredine (M_3) i standardne devijacije na treću potenciju (σ^3). Ako je: $Sk = 0$, distribucija je simetrična, $Sk > 0$, distribucija je pozitivno asimetrična, $Sk < 0$, distribucija je negativno asimetrična. Izračunava se kao:

¹³⁵ Mann, P. S. (2007). *Introductory statistics*. John Wiley & Sons.

¹³⁶ Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2010). *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley & sons.

¹³⁷ Kaur, P., Stoltzfus, J., & Yellapu, V. (2018). Descriptive statistics. *International Journal of Academic Medicine*, 4(1), 60-63.

¹³⁸ Martinez, W. L., & Martinez, A. R. (2001). *Computational statistics handbook with MATLAB*. Chapman and Hall/CRC.

$$Sk = \frac{M_3}{\sigma^3} = \frac{1}{N} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^3}{\sigma^3} \quad [22]$$

Ku - koeficijent spljoštenosti distribucije¹³⁵ je omjer četvrtog momenta oko sredine (M_4) i standardne devijacije na četvrtu potenciju (σ^4). Ako je: $Ku = 3$, distribucija ima zaobljenost normalne krivulje, $Ku > 3$, distribucija je oblikom šiljastija od normalne, $Ku < 3$, distribucija je oblikom plosnatija od normalne.

$$Ku = \frac{M_4}{\sigma^4} = \frac{1}{N} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^4} \quad [23]$$

C – Medijan je vrijednost središnjeg podatka koja po veličini poredane podatke dijeli u dva jednako brojna dijela. Ako je broj podataka neparan medijan je vrijednost središnjeg podatka, a ako je broj podataka paran medijan predstavlja srednju vrijednost dva središnja podatka.

IQR - interkvartilni raspon je mjera disperzije koja pokazuje veličinu raspona varijacije središnjih 50% podataka uređenoga numeričkog niza. Računamo se kao razliku gornjega i donjeg kvartila:

$$IQR = Q3 - Q1 \quad [24]$$

4.3.2. Deskriptivna statistika za ispitivane varijable

Rezultati deskriptivne statistika na pitanja drugog dijela upitnika (**IQ1 do IQ14**) dobiveni ispitivanjem eksperata prikazani su u skladu sa upitnikom na način da su odvojeno prikazani rezultati za prvu, drugu i treću podgrupu varijabli.

Rezultati deskriptivne statistike vezani uz prvu podgrupu podataka (IQ1 do IQ5) prikazani su u Tablici 7., gdje su SD-standardna devijacija, Min-minimalna vrijednost, AS - aritmetička sredina, Max - maksimalna vrijednost, Ku - koeficijent spljoštenosti distribucije, Sk- koeficijent asimetrije distribucije, IQR - interkvartilni raspon, C – medijan. Varijable u tablici su poredane po aritmetičkoj sredini (od najveće do najmanje).

Tablica 7. Deskriptivna statistika za prvu podgrupu varijabli. Priredio autor

Važnost	SD	Min	AS	Max	Ku	Sk	IQR	C
IQ1 Duljina drugog broda	1,0158	1	3,4318	5	3,0196	0,4988	1	4
IQ2 Brzina drugog broda	0,9027	1	3,3273	5	2,6208	0,0182	1	3
IQ3 Plovidbeni status drugog broda	1,1386	1	2,9818	5	2,3726	0,2232	2	3
IQ4 Tip drugog broda	1,0110	1	2,4273	5	2,5150	0,2672	1	2
IQ5 Gaz drugog broda	1,1780	1	2,3818	5	1,9983	0,3033	2	2

Najvišom prosječnom procjenom važnosti ocijenjena je varijabla *IQ1- Duljina drugog broda* (AS=3,43, SD=1,0158), a najnižom varijabla *IQ5 –Gaz drugog broda* (AS=2,38, SD=1,18).

Rezultati deskriptivne statistike vezani uz drugu podgrupu podataka (IQ6 do IQ11) prikazani su u Tablici 8., te se provodi jednaka analiza kao i za prvu grupu podataka. Varijable u tablici su poredane po aritmetičkoj sredini (od najveće do najmanje).

Tablica 8: Deskriptivna statistika za drugu podgrupu varijabli. Priredio autor

Važnost	SD	Min	AS	Max	Ku	Sk	IQR	C
IQ6 CPA	0,8659	2	4,3000	5	3,0608	-1,0059	1	5
IQ7 TCPA	0,8579	2	4,2318	5	2,7319	-0,8162	1	4
IQ10 BCR	0,7729	2	4,0727	5	2,7722	-0,4853	1	4
IQ9 Međusobna udaljenost	0,8048	2	3,9727	5	2,6894	-0,4278	2	4
IQ8 Pramčani kut	0,9416	1	3,6136	5	2,4307	-0,1505	1	4
IQ11 Smjer pramčanice drugog broda	1,0144	1	3,0864	5	2,4839	0,0904	2	3

Najvišom prosječnom procjenom važnosti ocijenjena je varijabla *IQ6-CPA* (AS=4,3, SD=0,87), a najnižom varijabla *IQ11 – Smjer pramčanice drugog broda* (AS=3,09, SD=1,01).

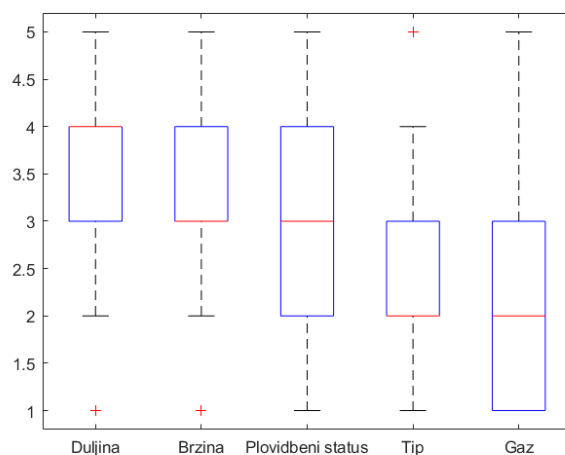
Rezultati deskriptivne statistike kao i za prethodne dvije grupe, prikazuju se i za treću podgrupu podataka (IQ12 do IQ14) u Tablici 9, Varijable u tablici su poredane po aritmetičkoj sredini (od najveće do najmanje).

Tablica 9. Deskriptivna statistika za treću podgrupu varijabli. Priredio autor

Važnost	SD	Min	AS	Max	Ku	Sk	IQR	C
IQ12 Vidljivost	0,7640	1	4,4273	5	5,0739	-1,3951	1	5
IQ13 Vremenski uvjeti	0,9479	1	3,4682	5	2,3534	-0,1513	1	4
IQ14 Noćni uvjeti plovidbe	0,8796	2	3,1727	5	2,4218	0,3458	1	3

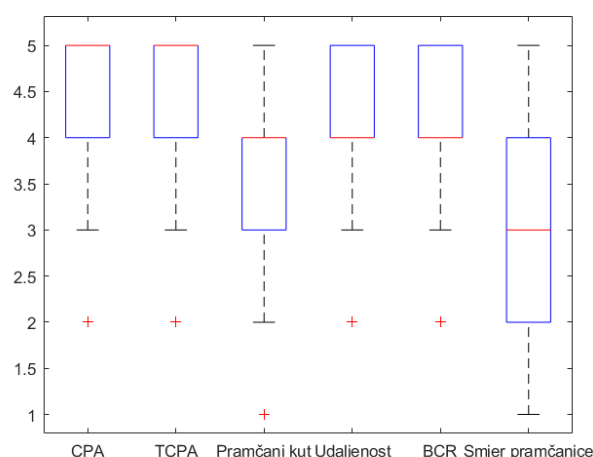
Najvišom prosječnom procjenom važnosti ocijenjena je varijabla *IQ12- Vidljivost* (AS=4,46, SD=0,76), a najnižom varijabla *IQ14 –Noćni uvjeti plovidbe* (AS=3,17, SD=0,88).

Nakon što su dobiveni prvi rezultati deskriptivne statistike potrebno je ispitati postoje li unutar uzorka neke podatci koji bi se mogle definirati stršećim vrijednostima (engl. *outliers*). Stršeće vrijednosti su one vrijednosti mjerenja unutar uzorka koje su statistički značajno male ili velike. Stršeće vrijednosti se vrlo jednostavno mogu prikazati koristeći kutijasti dijagram pojedinih varijabli. Kutijasti dijagram (engl. *box-plot*) je jednostavan graf koji se sastoji od pravokutnika koji prikazuje podatke od donjeg do gornjeg kvartila. Crta po pravokutniku označava medijan. Donji i gornji rubovi kutije prikazuju 25. i 75. percentil, dok se donje i gornje horizontalne linije nazivaju *whiskers* i protežu se do ekstremnih vrijednosti koje nisu stršeće. Stršeće vrijednosti označene su simbolom '+'.
 Na slici 22. prikazan je kutijasti dijagram za prvu podgrupu varijabli (IQ1 do IQ5), na kojemu se mogu jasno vidjeti medijani ispitivanih varijabli te stršeće vrijednosti.



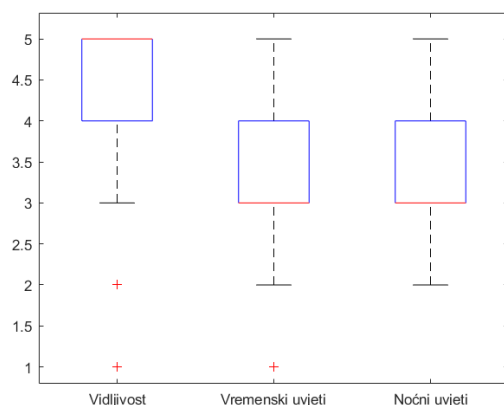
Slika 22. Kutijasti dijagram za prvu podgrupu podataka (IQ1 do IQ5). Priredio autor

Na kutijastom dijagramu za prvu podgrupu podataka vidljive su stršeće vrijednosti na varijablama *IQ1- Duljina drugog broda*, *IQ2-Brzina drugog broda*, *IQ4-Tip drugog broda*. Nadalje se ispituje druga podgrupa varijabli, te je na Slici 23. prikazan kutijasti dijagram za varijable IQ6 do IQ 11.



Slika 23. Kutijasti dijagram za drugu podgrupu varijabli. Priredio autor

Pregledom dijagrama vidljive su stršeće vrijednosti na svim varijablama osim varijable *IQ11 - Smjer pramčanice drugog broda*. Na posljednjem kutijastom dijagramu prikazanom na Slici 24. prikazana je treća podgrupa varijabli (*IQ11 do IQ14*).



Slika 24. Kutijasti dijagram za treću podgrupu varijabli. Priredio autor

Vidljive su stršeće vrijednosti na svim varijablama osim varijable *IQ14 – Noćni uvjeti plovidbe*. Budući da stršeće vrijednosti su one koje statistički značajno odstupaju potrebno ih je ukloniti iz uzorka. Stršeće vrijednosti se uklanjaju, te je izračunata deskriptivna statistika nakon izbacivanja stršećih vrijednosti na navedenim varijablama (prikazana u Tablici 10.).

Tablica 10. Deskriptivna statistika za ispitivane varijable nakon odstranjenih stršćih vrijednosti. Priredio autor

Važnost	SD	Min	AS	Max	Ku	Sk	IQR	C
IQ12 Vidljivost	0,6244	3	4,5213	5	2,8353	-0,9394	1	5
IQ6 CPA	0,6999	3	4,4757	5	2,6264	-0,9622	1	5
IQ7 TCPA	0,7252	3	4,4108	5	2,3094	-0,8014	1	5
IQ 10 BCR	0,6738	3	4,1872	5	2,1825	-0,2404	1	4
IQ9 Međusobna udaljenost	0,7004	3	4,0815	5	2,0481	-0,1125	1	4
IQ10 Pramčani kut	0,9174	2	3,6842	5	2,1227	-0,0779	1	4
IQ1 Duljina drugog broda	0,8697	2	3,5924	5	2,3458	-0,1105	1	4
IQ13 Vremenski uvjeti	0,9354	2	3,4737	5	2,1294	0,0182	1	3
IQ2 Brzina drugog broda	0,8946	2	3,3613	5	2,2250	0,0677	1	3
IQ14 Noćni uvjeti plovidbe	0,8921	2	3,1615	5	2,4196	0,3887	1	3
IQ11 Smjer pramčanice drugog broda	1,0402	1	3,0833	5	2,4154	0,1410	2	3
IQ3 Plovidbeni status drugog broda	1,1233	1	3,0052	5	2,3778	0,3009	2	3
IQ4 Tip drugog broda	0,9346	1	2,3069	4	2,1122	0,1396	1	2
IQ5 Gaz drugog broda	1,1794	1	2,2917	5	2,0687	0,4185	2	2

Pri ovom prikazu uzete su obzir sve varijable bez obzira na podgrupu. Poredak varijabli na temelju prosječnih rezultata nije se promijenio nakon izbacivanja stršćih vrijednosti. Iz distribucija varijabli, kao i indeksa simetričnosti, vidljivo je da su varijable veće važnosti negativno asimetrične, odnosno veća je zastupljenost viših rezultata, dok su varijable manje važnosti pozitivno asimetrične. Koeficijent spljoštenosti je kod svih varijabli manji od 3, što ukazuje kako je distribucija oblikom plosnatija od normalne. Također je važno primijetiti manju standardnu devijaciju kod varijabli veće važnosti što ukazuje na veću suglasnost eksperata kod varijabli koje su označene kao bitnije.

Najvišom prosječnom procjenom važnosti ocijenjena je varijabla *IQ12-Vidljivost* (AS=4,52, SD=0,62), a najnižom varijabla *IQ5-Gaz drugog broda* (AS=2,29, SD=1,18).

Među varijable čija prosječna vrijednost je veća od četiri (aritmetička sredina > 4,0) spadaju varijable: *IQ12 - Vidljivost*, *IQ6 - CPA*, *IQ7 - TCPA*, *IQ10 - BCR*, *IQ9 - Međusobna udaljenost*. U skladu sa rezultatima, utjecajnost tih varijable mogla bi se definirati kao vrlo visoka. S obzirom na vrlo visoki utjecaj navedenih varijable, one će se dalje koristiti u izradi modela neizrazitog sustava. Važno je primijetiti da su navedene utjecajne varijable u svojoj biti neizrazite, te su pogodne za korištenje u neizrazitim sustavima zaključivanja.

Ovim dijelom istraživanja određeno je pet najutjecajnijih varijabli koje su izabrane između četrnaest ispitivanih varijabli, temeljem mišljenja eksperata pomorske plovidbe. Time je postignut cilj ovog dijela istraživanja, utvrđivanjem dodatnih čimbenika koje eksperti uzimaju u obzir pri procjeni rizika sudara. Potrebno je istaknuti kako je vidljivost označena najznačajnijom varijablom. Smanjena vidljivost uzrokuje nesigurnost, što je zaista u skladu sa definicijom Međunarodne organizacije za standardizaciju, ali što je još

bitnije i u skladu sa Pravilima o izbjegavanju sudara na moru. Sljedeće po važnosti su varijabla *CPA*, koja je dobila samo neznatno manju ocjenu, te varijabla *TCPA*. Navedene dvije varijable nisu u biti dodatne, nego osnovne varijable procjene rizika sudara, te su vrlo visoke ocjene eksperata ipak očekivane. Sljedeće dvije varijable koje su eksperti ocijenili vrlo utjecajnim su varijabla *BCR* te *Međusobna udaljenost*.

Odabrane varijable se mogu poredati na temelju aritmetičke sredine, počevši od najutjecajnije:

Neizrazita varijabla1: *Vidljivost (FV1)*

Neizrazita varijabla 2 : *CPA (FV2)*

Neizrazita varijabla 3: *TCPA (FV3)*

Neizrazita varijabla 4: *BCR (FV4)*

Neizrazita varijabla 5: *Međusobna udaljenost (FV5)*

U sljedećem poglavlju će se metodama inferencijalne statistike ispitati razlike u mišljenjima eksperata u odnosu na odabrane varijable.

4.4. Rezultati ankete i analiza varijabli modela metodama inferencijalne statistike

Testiranje značajnosti razlika između određenih grupa ispitanika provodi se analizom varijance. Analiza varijance (engl. *Analysis Of Variance*, ANOVA), koristi se kao test statističke značajnosti razlika između aritmetičkih sredina više grupa, te se zaključuje pripadaju li grupe istoj populaciji. Testom se ispituje međusobni odnos varijabilnosti podataka između grupa s varijabilnosti unutar samih grupa¹³⁹. Pri korištenju ANOVA testa razdvaja se ukupna varijabilnost (SST) na varijabilnost između grupa (SSR) i varijabilnost unutar grupa (SSE), te se pomoću tih vrijednosti može dobiti i F-omjer:

$$SSR = \sum_{j=1}^k N_j (\bar{y}_j - \bar{y})^2 \quad [25]$$

$$SSE = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{N_j} (y_{ij} - \bar{y}_j)^2 \quad [26]$$

$$SST = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_j} (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad [27]$$

¹³⁹ Arnerić, J., & Protrka, K. (2019). Modeli analize varijance (ANOVA). *Matematičko fizički list*, 70(277), 25-32.

$$F = \frac{\frac{SSR}{k-1}}{\frac{SSE}{N-k}} = \frac{MSR}{MSE} \quad [28]$$

pri čemu je \bar{y}_j aritmetička sredina za svaku od k grupa uzoraka veličine N_j , $j = 1, 2, \dots, k$, \bar{y} aritmetička sredina svih grupa zajedno, y_{ij} i -ta vrijednost varijable j -te grupe te $N = N_1 + N_2 + \dots + N_k$.

Budući da analiza varijance, pretpostavlja da su varijance jednake u skupinama ili uzorcima, za provjeru te pretpostavke može se koristiti Levene test^{140 141}. Levene test je statistički test koji se koristi za procjenu jednakosti varijanci za neku varijablu koja se sastoji od dvije ili više skupina. Testira se nulta hipoteza da su varijance populacije jednake. Statistiku Levene testa možemo definirati kao:

$$F = \frac{(N-k) \sum_{i=1}^k N_i (\bar{Z}_i - \bar{Z}_{..})^2}{(k-1) \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{N_i} (Z_{ij} - \bar{Z}_i)^2} \quad [29]$$

, gdje je k broj grupa koje uspoređujemo, N ukupan broj uzoraka, N_i predstavlja broj uzoraka u grupi i , y_{ij} vrijednost varijable u grupi i za slučaj j , \bar{Z}_i je aritmetička sredina grupa od Z_{ij} , dok je $\bar{Z}_{..}$ ukupni srednjak Z_{ij} . Vrijednost Z_{ij} može biti određena na dva načina:

$$Z_{ij} = |y_{ij} - \bar{y}_i| \quad [30]$$

gdje je \bar{y}_i aritmetička sredina i -te podgrupe, te kao:

$$Z_{ij} = |y_{ij} - \hat{y}_i| \quad [31]$$

gdje je \hat{y}_i medijan i -te podgrupe. Obje definicije se podjednako koriste, samo što je verzija koja koristi medijan robusnija s obzirom na moguće vršne vrijednosti.

Ako je rezultirajuća p -vrijednost Levene testa manja od neke razine značajnosti (uobičajeno 0,05), odbacuje se nulta hipoteza o jednakim varijancama i zaključuje se da postoji razlika između varijanci u populaciji.

¹⁴⁰ National Institute of Standards and Technology. (2012). *NIST/Sematech e-Handbook of Statistical Methods*. Raspoloživo na: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3//eda35a.htm>, (pristupljeno 11. kolovoza 2023).

¹⁴¹ Gastwirth, J. L., Gel, Y. R., & Miao, W. (2009). The impact of Levene's test of equality of variances on statistical theory and practice. *Theory and Practice of Statistical Science*, 24 (3), 343–360. <https://doi.org/10.1214/09-STS301>.

U tom slučaju moguće je kao alternativu ANOVA testu koristiti Kruskal Wallis test¹⁴². Kruskal Wallis je neparametrijski test koji se koristi umjesto analize varijance kada njezini uvjeti nisu ispunjeni, te kada imamo 3 ili više nezavisnih uzoraka. U računu se koriste rangovi podataka u uzorku, na način da se svim podacima u uzorku dodijeli odgovarajući rang počevši od najmanjeg do najvećeg:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{N_i} - 3(N+1) \quad [32]$$

Gdje je N ukupan broj uzoraka, k je broj grupa koje uspoređujemo, R_i je zbroj rangova grupe i , te N_i predstavlja broj uzoraka u grupi i .

Budući da ANOVA ne može dati podatke o razlikama između pojedinih grupa potrebno je naknadno ispitati razlike između istih. Testiranja provedena na podskupovima podataka koji su prethodno testirani nazivaju se *post-hoc* testovima. Jedan od njih, i najčešće korišten je Scheffee test¹⁴³.

$$F_s = \frac{(\bar{X}_i - \bar{X}_j)^2}{MSR \left(\frac{1}{N_i} + \frac{1}{N_j} \right)} \quad [33]$$

Gdje je \bar{X}_i aritmetička sredina i -tog uzorka, \bar{X}_j aritmetička sredina j -tog uzorka, N_i broj mjerenja unutar i -tog uzorka, N_j broj mjerenja unutar j -tog uzorka. Scheffee testom utvrditi ćemo među kojim točno grupama postoje razlike.

Testiranje razlika među odgovorima različitih grupa ispitanika provoditi će se na način da se korištenjima profilnih pitanja odrede određene kategorije ispitanika. U testiranju će se koristiti četiri profilna pitanja koja grupiraju ispitanike s obzirom na:

- Trenutno zvanje na brodu
- Duljinu broda na kojoj ispitanici trenutno plove
- Vrstu broda na kojoj ispitanici trenutno plove
- Ukupno radno iskustvo na brodu.

Razlike se neće ispitivati među skupinama kreiranim pitanjem o radnom iskustvu u trenutnom zvanju na brodu, budući se radi o nehomogenim skupinama. U istu skupinu sa radnim iskustvom u trenutnom zvanju od tri do pet godina bi se našli i zapovjednici sa tri do pet godina iskustva kao i drugi časnici palube, te je jasno da se radi o heterogenoj skupini i da nije ni potrebno ispitivati razlike koristeći tu kategoriju.

¹⁴² Ostertagova, E., Ostertag, O., & Kováč, J. (2014). Methodology and application of the Kruskal-Wallis test. *Applied mechanics and materials*, 611, 115-120.

¹⁴³ McHugh, M. L. (2011). Multiple comparison analysis testing in ANOVA. *Biochemia medica*, 21(3), 203-209.

4.4.1. Ispitivanje razlika u prosječnim rezultatima prema trenutnom zvanju na brodu

Jednosmjernom analizom varijance ispitane su razlike u prosječnom rezultatu na prvih pet varijabli poredanih po važnosti (*Vidljivost, CPA, TCPA, BCR, Međusobna udaljenost*) s obzirom na trenutno zvanje na brodu ispitanika. Budući su određene kategorije odgovora bile relativno male, stvorila se potreba grupiranja podatka kako bi dobili statistički relevantne grupe. U Tablici 11. su prikazane frekvencije (f) i postotci (%) za pojedine kategorije odgovora nakon grupiranja određenih kategorija (zapovjednik, prvi časnik palube, časnik plovidbene straže).

Tablica 11. Grupiranje kategorije prema trenutnom zvanju na brodu. Priredio autor

	f	%
Zapovjednik	113	51,4
Prvi časnik palube	65	29,4
Časnici plovidbene straže	42	19,1
Ukupno	220	100,0

Prvi korak predstavlja ispitivanje homogenosti varijance na svim varijablama, te je homogenost ispitana Levene testom. Rezultati za ispitivane varijable su prikazani u Tablici 12.

Tablica 12. Rezultati Levene testa s obzirom na trenutno zvanje na brodu. Priredio autor

	p
Vidljivost	0,6859
CPA	0,8565
TCPA	0,4452
BCR	0,0165
Međusobna udaljenost	0,9515

Iz prikazanog se vidi kako najveću p-vrijednost ima varijabla *Međusobna udaljenost* koja iznosi 0,9515, dok najmanju vrijednost ima varijabla *BCR* koja ima vrijednost 0,0165. Za varijable na kojima je preduvjet homogenosti varijance zadovoljen ($p \geq 0,05$) navedeni su rezultati jednosmjerne ANOVA-e, a za varijable na kojima ovaj preduvjet nije zadovoljen (*BCR*) navedeni su rezultati Kruskal-Wallis testa. U Tablici 13 navedeni su rezultati za gornje varijable: N – broj ispitanika, AS – aritmetička sredina, SD – standardna devijacija, F-F-omjer, df – stupnjevi slobode i p – p-vrijednost).

Tablica 13. Rezultati ispitivanja razlika među grupama s obzirom na zvanje na brodu.
Priradio autor

		N	AS	SD	F	df	p
Vidljivost	1 Zapovjednik	113	4,47	0,64			
	2 Prvi časnik palube	61	4,44	0,67	0,9	2,212	0,41
	3 Časnik pl. straže	41	4,61	0,67			
CPA	1 Zapovjednik	108	4,48	0,74			
	2 Prvi časnik palube	62	4,23	0,73	2,47	2,208	0,09
	3 Časnik pl. straže	41	4,44	0,71			
TCPA	1 Zapovjednik	108	4,33	0,76			
	2 Prvi časnik palube	62	4,18	0,78	2,05	2,209	0,13
	3 Časnik pl. straže	42	4,48	0,67			
BCR	1 Zapovjednik	109	4,21	0,71			
	2 Prvi časnik palube	64	4,05	0,74	3,08	2,211	0,21
	3 Časnik pl. straže	41	4,05	0,59			
Međusobna udaljenost	1 Zapovjednik	113	3,97	0,82			
	2 Prvi časnik palube	65	3,97	0,81	0	2,217	1,0
	3 Časnik pl. straže	42	3,98	0,78			

Rezultata ne otkrivaju statistički značajne razlike između grupa s obzirom na službu na brodu, a u odnosu na ispitivane varijable. Kod varijable *Međusobna udaljenost* vidljivo je da je vrijednost aritmetičkih sredina sve tri ispitivane grupe gotovo jednaka. Na tom pitanju bilježimo i najniži F-omjer koji iznosi 0 ($F(2, 217)=0$, $p=1,0$).

4.4.2. Ispitivanje razlika u prosječnim rezultatima prema duljini broda na kojoj ispitanici trenutno plove

Za potrebe statističkog ispitivanja razlika među grupama, podatci su grupirani na tri veće grupe kao u Tablici 14. U tablici su prikazane frekvencije (f) i postotci (%) grupiranih kategorija: brodovi čija je duljina preko svega manja ili jednaka 250 metara ($LOA \leq 250$), brodovi čija je duljina preko svega veća od 250 metara, a manja ili jednaka 300 metara ($250 < LOA \leq 300$), te brodovi čija je duljina preko svega veća od 300 metara ($LOA > 300$).

Tablica 14. Grupiranje ispitanika prema duljini broda na kojoj trenutno plove.
Priradio autor

	f	%
$LOA \leq 250$	74	33,6
$250 < LOA \leq 300$	102	42,4
$LOA > 300$	44	20

Levene testom ispitivan je preduvjet homogenost varijance, koji je zadovoljen na svim varijablama osim varijable *Međusobna udaljenost* ($P= 0,016 < 0,05$), ostale vrijednosti su iznad 0,05 (Tablica 15.).

Tablica 15. Rezultati Levene testa s obzirom na duljinu preko svega. Priredio autor

	p
Vidljivost	0,6756
CPA	0,8500
TCPA	0,9425
BCR	0,5887
Međusobna udaljenost	0,0157

U Tablici 16. su navedeni rezultati Kruskal Wallis testa za varijablu *Međusobna udaljenost*, koja nije zadovoljila preduvjet homogenosti varijance, i rezultati jednosmjernе ANOVA-e za preostale varijable kao i kod prethodne analize.

Tablica 16. Rezultati ispitivanja razlika među grupama s obzirom na duljinu preko svega. Priredio autor

		N	AS	SD	F	df	p
Vidljivost	1 LOA ≤ 250	72	0,67	4,42	0,8	2,212	0,45
	2 250 < LOA ≤ 300	101	0,66	4,51			
	3 LOA > 300	42	4,57	0,63			
CPA	1 LOA ≤ 250	73	4,34	0,73	0,32	2,208	0,73
	2 250 < LOA ≤ 300	97	4,42	0,73			
	3 LOA > 300	41	4,44	0,78			
TCPA	1 LOA ≤ 250	73	4,18	0,77	2	2,209	0,14
	2 250 < LOA ≤ 300	98	4,41	0,74			
	3 LOA > 300	41	4,34	0,73			
BCR	1 LOA ≤ 250	72	4,06	0,73	0,64	2,211	0,53
	2 250 < LOA ≤ 300	99	4,16	0,67			
	3 LOA > 300	43	4,19	0,73			
Međusobna udaljenost	1 LOA ≤ 250	74	3,89	0,82	3,42	2,217	0,18
	2 250 < LOA ≤ 300	102	4,09	0,72			
	3 LOA > 300	44	3,84	0,94			

Iz rezultata nisu vidljive statistički značajne razlike između grupa s obzirom na duljinu preko svega, budući su sve p-vrijednosti iznad referentne vrijednosti od 0,05. Najveća p-vrijednost zabilježena je kod varijable *CPA*.

4.4.3. Ispitivanje razlika u prosječnim rezultatima prema vrsti broda na kojoj ispitanici trenutno plove

Budući da je i kod podjele ispitanika s obzirom na tip broda na kojem plove uočeno kako postoje manje grupe, za potrebe statističkog ispitivanja razlika među grupama, podatci su

grupirani na tri veće grupe kao u Tablici 17. U tablici su prikazane frekvencije (f) i postotci (%) nakon grupiranja kategorija: brod za prijevoz ukapljenog plina, putnički brod te ostale vrste brodova.

Tablica 17. Grupiranje kategorija ispitanika prema vrsti broda. Priredio autor

	f	%
Brod za prijevoz ukapljenog plina	91	41,4
Putnički brod	59	26,8
Ostalo	70	31,8
Ukupno	220	100,0

Preduvjet homogenost varijance ispitan je Levene testom. Ovaj je preduvjet zadovoljen na svim varijablama (Tablica 18.), gdje je najveća vrijednost razine značajnosti zabilježena kod varijable *BCR* (0,8689), dok je najmanja vrijednost kod varijable *Međusobna udaljenost* (0,0904).

Tablica 18. Rezultati Levene testa s obzirom na vrstu broda. Priredio autor

	p
Vidljivost	0,3866
CPA	0,6208
TCPA	0,5725
BCR	0,8689
Međusobna udaljenost	0,0904

Kako je Levene test zadovoljen na svim varijablama, razlika je dalje ispitana koristeći ANOVA test. U Tablici 19 navedeni su rezultati jednosmjerne ANOVA-e za gornje varijable.

Tablica 19. Rezultati ispitivanja razlika među grupama s obzirom na vrstu broda.
Priradio autor

		N	AS	SD	F	df	p
Vidljivost	1 Brod za prijevoz ukapljenog plina	90	4,47	0,69			
	2 Putnički brod	56	4,48	0,66	0,14	2,212	0,86
	3 Ostali	69	4,52	0,60			
CPA	1 Brod za prijevoz ukapljenog plina	84	4,27	0,76			
	2 Putnički brod	58	4,5	0,71	2,03	2,208	0,13
	3 Ostali	69	4,46	0,72			
TCPA	1 Brod za prijevoz ukapljenog plina	85	4,25	0,79			
	2 Putnički brod	58	4,41	0,75	0,84	2,209	0,43
	3 Ostali	69	4,32	0,72			
BCR	1 Brod za prijevoz ukapljenog plina	87	4,11	0,71			
	2 Putnički brod	58	4,12	0,73	0,09	2,211	0,92
	3 Ostali	69	4,16	0,68			
Međusobna udaljenost	1 Brod za prijevoz ukapljenog plina	91	4,03	0,78			
	2 Putnički brod	59	3,98	0,73	0,67	2,217	0,51
	3 Ostalo	70	3,89	0,89			

Iz rezultata nisu vidljive statistički značajne razlike između grupa s obzirom na vrstu broda, a u odnosu na ispitivane varijable. Najniža vrijednost F- omjera zabilježena je kod varijable *BCR* te iznosi 0,08 ((F(2, 211)=0,09 p=0,92) iz čega se može zaključiti da ja kod te varijable najmanja razlika među ispitivanim grupama. Isto je vidljivo i pregledom aritmetičkih sredina ispitivanih grupa. Najveća vrijednost F-omjera zabilježena kod varijable *CPA* te iznosi 2,03 ((F(2, 208)=2,03 p=0,13), te se može zaključiti da tu postoji najveća razlika među ispitivanim grupama, ali nije statistički značajna.

4.4.4. Ispitivanje razlika u prosječnim rezultatima prema ukupnom radnom iskustvu na brodu

U Tablici 20 prikazane su frekvencije (f) i postotci (%) nakon grupiranja određenih kategorija: manje od 5 godina, od 5 do 15 godina, više od 15 godina.

Tablica 20. Grupiranje kategorija ispitanika prema ukupno iskustvu. Priradio autor

	f	%
Manje od 5 godina	22	10
Od 5 do 15 godina	70	31,8
Više od 15 godina	128	58,2
Ukupno	220	100,0

Preduvjet homogenost varijance ispitan je Levene testom. preduvjet je zadovoljen na svim varijablama osim varijable *BCR* ($PL=0,016 < 0,05$), ostale vrijednosti su iznad 0,05 (Tablica 21.).

Tablica 21. Rezultati Levene testa s obzirom na ukupno iskustvo. Priredio autor

	p
Vidljivost	0,6093
CPA	0,6353
TCPA	0,2481
BCR	0,0016
Međusobna udaljenost	0,2085

U Tablici 22. su navedeni rezultati Kruskal Wallis testa za varijablu *BCR* koja nije zadovoljila Levene test, i rezultati jednosmjerne ANOVA-e za preostale varijable.

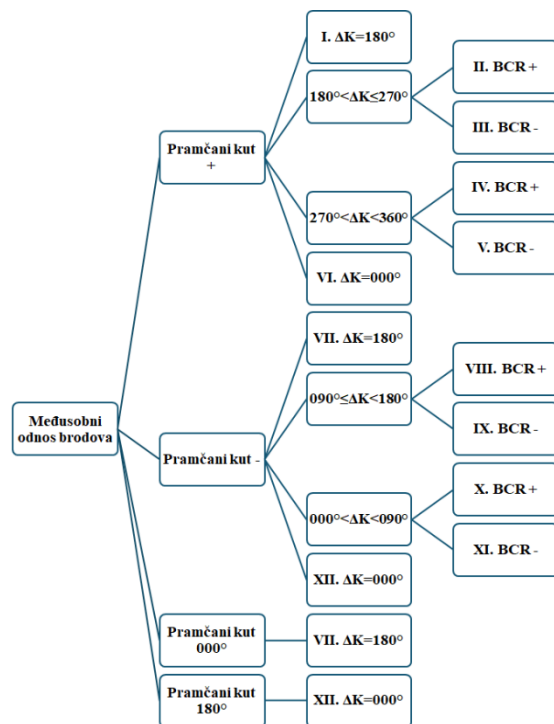
Tablica 22. Rezultati ispitivanja razlika među grupama s obzirom na ukupno iskustvo. Priredio autor

		N	AS	SD	F	df	p
Vidljivost	1 Manje od 5 godina	22	4,55	0,74			
	2 Od 5 do 15 godina	68	4,45	0,68	0,17	2,212	0,84
	3 Više od 15 godina	125	4,55	0,74			
CPA	1 Manje od 5 godina	22	4,23	0,81			
	2 Od 5 do 15 godina	69	4,36	0,70	0,97	2,208	0,38
	3 Više od 15 godina	120	4,45	0,74			
TCPA	1 Manje od 5 godina	22	4,36	0,73			
	2 Od 5 do 15 godina	69	4,35	0,7	0,18	2,209	0,84
	3 Više od 15 godina	121	4,29	0,79			
BCR	1 Manje od 5 godina	21	4	0,55			
	2 Od 5 do 15 godina	69	4,12	0,65	1,34	2,211	0,512
	3 Više od 15 godina	124	4,16	0,75			
Međusobna udaljenost	1 Manje od 5 godina	22	3,77	0,92			
	2 Od 5 do 15 godina	70	4,09	0,72	1,45	2,217	0,237
	3 Više od 15 godina	128	3,95	0,83			

Iz tablice je vidljivo kako nisu dobivene statistički značajne razlike između grupa s obzirom na ukupno iskustvo, a u odnosu na ispitivane varijable. Najniža vrijednost F-omjera zabilježena je kod pitanja *Vidljivost* gdje iznosi 0,17 ($(F(2, 212)=0,17 p=0,84)$). To se može uočiti i pregledom aritmetičkih sredina ispitivanih grupa. Najveća vrijednost F-omjera zabilježena kod varijable *Međusobna udaljenost* te iznosi 1,45 ($(F(2, 217)=1,45 p=0,237)$), iz čega se zaključuje o najvećoj razlici među ispitivanim grupama kod te varijable, koja ipak nije statistički značajna.

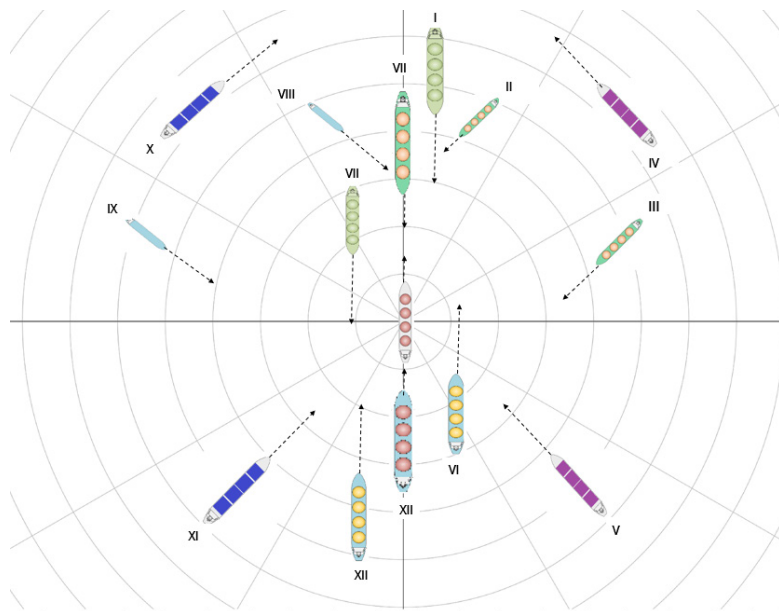
5. NEIZRAZITI SUSTAV ZAKLJUČIVANJA ZA ODREĐIVANJE NEIZRAZITOG INDEKSA RIZIKA SUDARA

Određivanjem značajnih varijabli pri procjeni rizika sudara na moru određene su i ulazne varijable neizrazitog sustava zaključivanja za određivanje neizrazitog indeksa rizika sudara. Sve dobivene varijable su u svojoj biti neizrazite. Pri tome su eksperti u svojim odgovorima usklađeni sa pravilima o izbjegavanju sudara i pomorskom praksom te su odabrane ulazne varijable opravdane. Osnovne varijable *CPA*, *TCPA* su standardne varijable koje se koriste pri procjeni rizika sudara na moru te su prikazane na svim automatskim uređajima za plotiranje. Dodatno na radarskim uređajima dostupne su članovima plovidbene straže varijable *Međusobna udaljenost* i *BCR* dok se varijabla *Vidljivost* određuje promatranjem. Eksperti su odredili varijablu *Vidljivost* kao najznačajniju varijablu pri procjeni rizika sudara. Stanje smanjene vidljivosti prepoznato je kao posebno opasna okolnost pravilima o izbjegavanju sudara ali i pomorskom praksom. Budući je pravilima o izbjegavanju sudara određeno da se uvjetima smanjene vidljivosti treba posvetiti odgovarajuća pozornost, te su i eksperti odredili jednako, potrebno je izraditi poseban model za uvjete smanjene vidljivosti. Na taj način će se dodatno modelirati procjena rizika sudara u uvjetima smanjene vidljivosti, odnosno modelirati lingvistički izraz *Odgovarajuća pozornost*. S obzirom da međusobni odnosi između dva broda mogu poprimiti beskonačan broj mogućnosti, bilo je potrebno odrediti grupe podmodela koje će diskretizirati te uključivati sve plovidbene odnose između dva broda. Kod podjele na karakteristične grupe uzeta je u obzir međusobna razlika kursova, pramčani kut pod kojim se vidi drugi brod te prolaz ispred pramca ili po krmi vlastitog broda. Pri procjeni indeksa rizika sudara u trenutku opažanja broda, određuje se kojoj grupi i pripadajućem podmodelu pripada brod. Definiira se položaj drugog broda u odnosu na pramčanicu vlastitog broda., to jest nalazi li se lijevo ili desno od vlastitog broda, te dodatno mogućnost da se nalazi točno ispred pramca vlastitog broda ili točno po krmi vlastitog broda. Pri tome se pramčani kut mjeri od pramčanice lijevo ili desno od 0° do 180° . Nakon toga definiira se međusobna razlika kursova, na način da su se kod modela definirali rasponi razlike kursova od po 90 stupnjeva: $\Delta K = 000^\circ, 000^\circ < \Delta K < 090^\circ, 090^\circ \leq \Delta K < 180^\circ, \Delta K = 180^\circ, 180^\circ < \Delta K \leq 270^\circ, 270^\circ < \Delta K < 360^\circ$. Finalno se određuje prolazi li drugi brod ispred pramca vlastitog broda ili po krmi vlastitog broda na temelju predznaka varijable *BCR*. U specifičnom slučaju da se u trenutku opažanja drugi brod nalazi točno po pramcu vlastitog broda, dok je razlika kursova 180° , koristi se identični podmodel broda sa razlikom kursova 180° kojega opažamo lijevo od pramčanice. Također, u slučaju da se drugi brod u trenutku opažanja nalazi tako po krmi vlastitog broda da je pramčani kut pod kojim se opaža 180° a razlika kursova je 000° koristi se identični podmodel broda sa razlikom kursova 000° kojeg opažamo lijevo od pramčanice. Na taj način, ukupno je kreirano dvanaest karakterističnih grupa (Slika 25.).



Slika 25: Prikaz grupiranja međusobnih odnosa brodova. Priredio autor

Pripadnost opažanog broda određenoj grupi možemo prikazati i korištenjem polarnog koordinatnog sustava, kao što je uobičajeno na radarskoj slici (Slika 26).



Slika 26: Prikaz grupiranja brodova koristeći polarni koordinatni sustav. Priredio autor

U slučajevima smanjene vidljivosti dodatno se modelira neizraziti indeks rizika sudara korištenjem lingvističkih vrijednosti varijable *Vidljivost*.

Za značajne varijable dobivene istraživanjem potrebno je kreirati funkcije pripadnosti lingvističkih varijabli, sve na temelju analize ekspertnoga znanja. Nakon što se odrede funkcije pripadnosti lingvističkih varijabli te njima pripadajućih lingvističkih vrijednosti pristupa se daljnjem radu na modelu koji podrazumijeva izradu baze neizrazitih pravila. Određivanjem baze neizrazitih pravila za svaki od modela moguće je pristupiti konačnom unošenju i obradi podataka sa MATLAB programskim rješenjem. U programskom rješenju je potrebno u prvom koraku odrediti broj lingvističkih ulaznih varijabli, te parametre svake od varijable, a što podrazumijeva broj lingvističkih vrijednosti, oblik funkcija pripadnosti, te parametre funkcija pripadnosti. U drugom koraku se definiraju vrijednosti izlazne varijable. Nakon toga se pristupa definiranju neizrazitih ako-onda pravila za svaki od podmodela neizrazitog sustava. Kada su bitni elementi sustava uneseni u programsko rješenje, ili programirani moguće je jednostavnim unosom ulaznih vrijednosti provjeriti odziv modela. Dodatno prikazima kontrolnih površina vizualno se mogu provjeriti izlazne vrijednosti modela. Kod jednostavnih modela sa do dvije ulazne i jedne izlazne varijable, moguće je jednostavno putem trodimenzionalnog prikaza kontrolne površine provjeriti rad sustava. Kod višedimenzionalnih sustava, to je nešto otežano, te se prikazi kontrolnih površina izvode uz dvije zadane ulazne i jedne izlazne varijable a uz fiksne vrijednosti daljnjih varijabli.

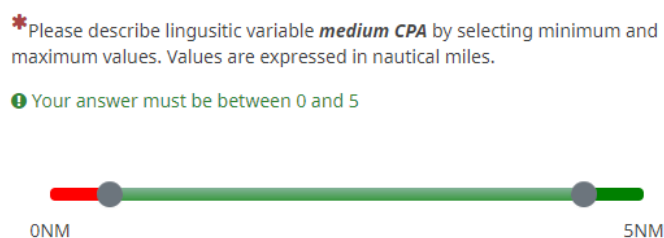
5.1. Statističko određivanje parametara funkcija pripadnosti ulaznih varijabli

Na osnovu prethodnih statističkih podataka odabrane su varijable koje su statistički najznačajnije: *Vidljivost*, *CPA*, *TCPA*, *BCR* i *Međusobna udaljenost*. Aritmetička sredina promatranih varijabli je veća od četiri, te su eksperti ocijenili njihovu važnost na skali kao jako visoku. Funkcije pripadnosti određivane su samo za varijable koje će se koristiti dalje u modelu. Za ostale varijable funkcije pripadnosti nisu određene, te ostaje mogućnost njihova korištenja u nekim budućim radovima. Za odabrane varijable potrebno je statistički analizirati odgovore ispitanika na pitanja trećeg dijela upitnika, ne temelju čega će se definirati rasponi i oblici funkcija pripadnosti. Treći dio upitnika sadrži pitanja na temelju čijih rezultata će biti moguće odrediti raspone i oblike funkcija pripadnosti. U znanstvenoj literaturi vezanoj uz neizrazite sustave, postoji više načina na koji je moguće prikupljati mišljenja eksperata¹⁴⁴ ¹⁴⁵. Budući da se radi o neizrazitim brojevima (skupovima), potrebno je svakako zatražiti mišljenje eksperata o pripadnosti

¹⁴⁴ Cornelissen, A. M. G., van den Berg, J., Koops, W. J., & Kaymak, U. (2003). Elicitation of expert knowledge for fuzzy evaluation of agricultural production systems. *Agriculture, ecosystems & environment*, 95(1), 1-18.

¹⁴⁵ Hasuike, T., Katagiri, H., & Tsubaki, H. (2015). A constructing algorithm for appropriate piecewise linear membership function based on statistics and information theory. *Procedia Computer Science*, 60, 994-1003.

određenih veličina unutar nekog raspona neizrazitom skupu. U ovom je radu odabrana prilagođena horizontalna metoda prema Kristić i Žuškin (2024) koja se temelji na procjeni raspona lingvističke varijable¹⁴⁶. Ovom metodom ispitanik određuje izraziti interval u kojem neka lingvistička varijabla ima vrijednost jedan. Prednost metode je relativna jednostavnost prikupljanja i obrade podataka, što je u ovom radu bilo bitno, uzevši u obzir jako velik broj ispitanika koji su određivali raspone. Pitanja su kreirana na način da traže od ispitanika da odredi granice, to jest minimalne i maksimalne vrijednosti lingvističkih varijabli koristeći dvostruki klizač (Slika 27.). Klizač je dostupan putem GitHub¹⁴⁷ stranice kao program otvorenog koda, te je programiran isključivo za upotrebu putem LimeSurvey upitnika.



Slika 27: Prikaz dvostrukog klizača. Priredio autor koristeći slikovni zapis LimeSurvey programskog rješenja

Sve korištene varijable imale su podjelu na pet lingvističkih vrijednosti. S obzirom da se u neizrazitim sustavima uobičajeno koriste kratice lingvističkih varijabli na engleskom jeziku, tako i ovom radu imamo sljedeću podjelu kod svih varijabli: vrlo malo (engl. *very low*, VL), malo (engl. *low*, L), srednje (engl. *medium*, M), visoko (engl. *high*, H), vrlo visoko (engl. *very high*, VH). Nakon obrade podataka dobivenih putem upitnika dobiju se vrijednosti gornje i donje granice raspona određene varijable. Dobivene vrijednosti potrebno je nadalje koristiti kako bi se odredile vrijednosti unutar granica, te dobio puni skup podataka. Temeljem dobivenih podataka, biti će moguće modelirati mišljenja eksperata o vrijednostima lingvističkih varijabli, te će se dobivenim funkcijama pripadnosti modelirati suglasnosti i razilaženja eksperata. Pregledom dosadašnjih istraživanja uočeno je kako je podjela lingvističkih varijabli redovito vršena na samo manji broj lingvističkih vrijednosti, od dvije do maksimalno tri lingvističke vrijednosti. Naravno to znatno olakšava izradu modela, ali s obzirom da je cilj bio postići što detaljniji opis lingvističkih varijabli, primijeniti će se podjela na pet lingvističkih vrijednosti unutar svake varijable kako bi one što detaljnije reflektirale mišljenje eksperata. Dodatno s obzirom na broj ispitanika, postići će se relevantnost kreiranih funkcija pripadnosti, na način da će se rasponi i oblici funkcija pripadnosti temeljiti na mišljenjima velikog broja

¹⁴⁶ Kristić, M., & Žuškin, S. (2024). Quantification of Expert Knowledge in Describing COLREGs Linguistic Variables. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 849.

¹⁴⁷ GitHub. (2023). *A Range Slider question for LimeSurvey 5.x and 6.x*. Raspoloživo na: <https://github.com/tpartner/LimeSurvey-Range-Slider-5x-6x>, (pristupljeno 2. lipnja 2023).

eksperata. Najčešće korištene funkcije pripadnosti u sustavima neizrazitog zaključivanja su Gaussove, trokutaste te trapezoidne funkcije pripadnosti^{148 149}, te će i u ovom radu koristiti navedene funkcije pripadnosti.

5.1.1. Određivanje funkcija pripadnosti varijable CPA – RFQ11 do RFQ15

Treće pitanje trećeg dijela upitnika odnosi se na definiranje raspona i oblika lingvističkih vrijednosti varijable CPA. Podatci o minimumu i maksimumu raspona varijable dobiveni upitnikom obrađeni su koristeći metode deskriptivne statistike. Stršeće vrijednosti u dobivenim podacima uklonjene su, te su minimalne i maksimalne vrijednosti unutar raspona za lingvističku varijablu CPA prikazane u tablici 23: SD-standardna devijacija, AS - aritmetička sredina, C – medijan, VL CPA (vrlo mali CPA), L CPA (mali CPA), M CPA (umjereni CPA), H CPA (veliki CPA), VH CPA (vrlo veliki CPA).

Tablica 23. Maksimalne i minimalne vrijednosti raspona lingvističke varijable CPA.
Priradio autor

CPA		SD	AS	C
VL	Min	0,202	0,099	0
	Max	0,875	0,69	0,5
L	Min	0,227	0,5	0,5
	Max	0,767	1,185	1
M	Min	0,399	1,035	1
	Max	0,843	2,049	2
H	Min	0,673	1,879	2
	Max	0,833	3,084	3
VH	Min	0,843	2,911	3
	Max	0,528	4,831	5

Budući da navedeni podatci prikazuju samo granice raspona potrebno je odrediti vrijednosti varijable unutar raspona, a u skladu sa podjelom koja je korištena u upitniku. Upitnik je za vrijednost varijable CPA imao mogući raspon od 0 do 5 NM uz podjelu od 1 kabel. Podatci prikazani u Tablici 24. prikazuju osnovne statističke podatke za vrijednosti unutar raspona lingvističke varijable CPA.

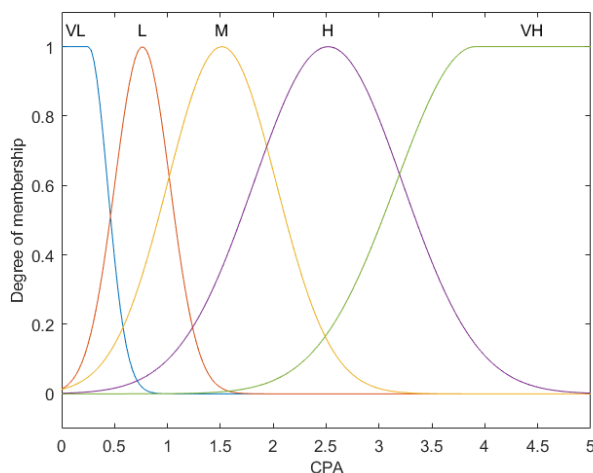
¹⁴⁸ Azam, M. H., Hasan, M. H., Hassan, S., & Abdulkadir, S. J. (2021). A novel approach to generate type-1 fuzzy triangular and trapezoidal membership functions to improve the classification accuracy. *Symmetry*, 13(10), 1932.

¹⁴⁹ Rahim, R. (2017). Comparative analysis of membership function on Mamdani fuzzy inference system for decision making. *Journal of Physics: Conference Series*, 930(1), 12029.

Tablica 24. Rasponi lingvističke varijable CPA. Priredio autor

CPA	SD	AS	C
VL	0,1798	0,2533	0,2
L	0,2607	0,7634	0,7
M	0,5141	1,5146	1,5
H	0,7045	2,5187	2,5
VH	0,7477	3,9091	4

Dobiveni podatci nadalje se koriste kako bi se odredile funkcije pripadnosti koje će se koristiti u neizrazitim sustavima odlučivanja. Funkcije pripadnosti modelirane kao Gaussova krivulja kao najčešće korištena krivulja distribucije u teoriji vjerojatnosti¹⁵⁰ koriste aritmetičku sredinu raspona lingvističke varijable te njenu standardnu devijaciju kako bi definirale funkciju pripadnosti. Na Slici 28. prikazane su funkcije pripadnosti za lingvističku varijablu CPA.



Slika 28: Prikaz lingvističke varijable CPA korištenjem Gaussovih krivulja. Priredio autor

Iz prikazanih funkcija pripadnosti je vidljivo da su uredno distribuirane, bez preklapanja jezgri neizrazitih skupova. Dodatno je vidljivo kako su gušće raspoređene krivulje u prvom dijelu raspona, dok se u krajnjem dijelu raspona može vidjeti kako je vrlo veliki CPA svaki onaj malo iznad 3.5 nautičke milje.

Dodatno, koristeći trapezoidnu funkciju moguće je prikazati lingvističke varijablu uz korištenje četiri karakteristične točke. Karakteristične točke određene su na osnovi

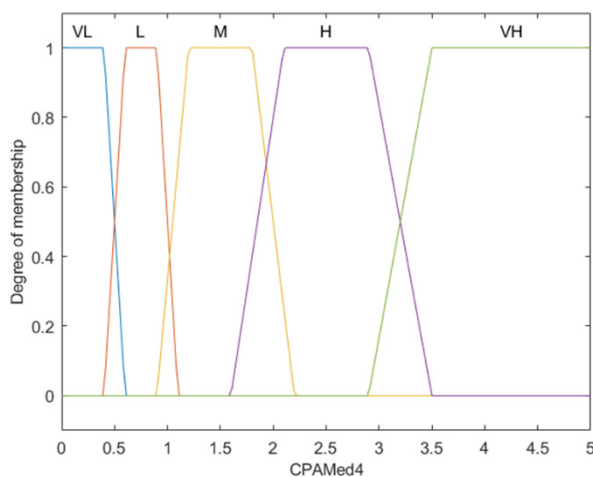
¹⁵⁰ Kumar, A., & Misra, D. K. (2020). A review on the statistical methods and implementation to homogeneity assessment of certified reference materials in relation to uncertainty. *Mapan*, 35(3), 457-470.

medijana kao mjere središnje tendencije po uzoru na rad Hasan i Sobhan (2020)¹⁵¹. Za trapezoidne funkcije pripadnosti lingvističke varijable *CPA* karakteristične točke određene su kao u Tablici 25.:

Tablica 25: Karakteristične točke trapezoidne funkcije lingvističke varijable CPA. Priredio autor

	a	b	c	d
VL	0	0	0,4	0,6
L	0,4	0,6	0,9	1,1
M	0,9	1,2	1,8	2,2
H	1,6	2,1	2,9	3,5
VH	2,9	3,5	5	5

Na temelju dobivenih podataka moguće je prikazati trapezoidnu funkciju pripadnosti kao na Slici 29.



Slika 29: Prikaz lingvističke varijable CPA korištenjem trapezoidnih funkcija. Priredio autor

Iz dobivenih krivulja pripadnosti uočljivo je kako su funkcije distribuirane vrlo slično Gaussovima, znatno gušće u prvom dijelu raspona, te rjeđe u drugom dijelu raspona.

5.1.2. Određivanje funkcija pripadnosti varijable *TCPA* - RFQ26 do RFQ30

Nakon obrade prve varijable obrađuje se sljedeća varijabla *TCPA*. Vrijednosti lingvističkih vrijednosti varijable *TCPA* ispitane su uz mogući raspon od 0 do 30 minuta te podjelu od 1 minute. Osnovni statistički podatci za vrijednosti gornje i donje granice

¹⁵¹ Hasan, M. F., & Sobhan, M. A. (2020). Describing fuzzy membership function and detecting the outlier by using five number summary of data. *American Journal of Computational Mathematics*, 10(03), 410-424.

raspona nakon uklanjanja stršćih vrijednosti prikazane su u Tablici 26: SD-standardna devijacija, AS - aritmetička sredina, C – medijan, VL TCPA (vrlo mali TCPA), L TCPA (mali TCPA), M TCPA (umjereni TCPA), H TCPA (veliki TCPA), VH TCPA (vrlo veliki TCPA).

Tablica 26. Maksimalne i minimalne vrijednosti lingvističke varijable TCPA. Priredio autor

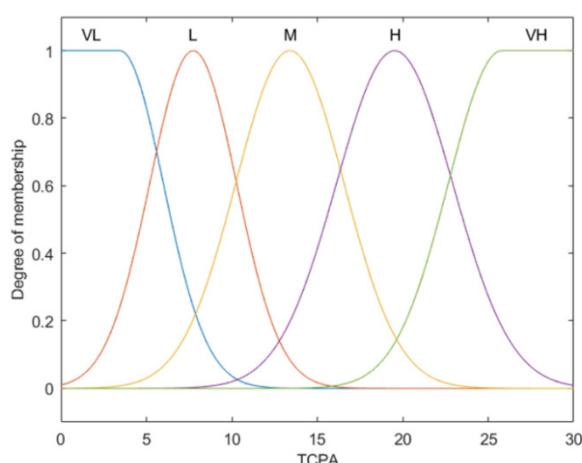
TCPA		SD	AS	C
VL	Min	2,302	1,286	0
	Max	4,453	6,479	5
L	Min	2,615	5,714	5
	Max	4,047	10,896	10
M	Min	2,851	10,234	10
	Max	3,895	16,594	16
H	Min	3,647	15,943	15,5
	Max	3,304	22,448	24
VH	Min	4,28	21,578	23
	Max	2,26	29,365	30

Nakon dobivenih graničnih vrijednosti, pristupilo se obradi vrijednosti varijable unutar raspona. U Tablici 27. prikazani su osnovni statistički podatci za raspon lingvističke varijable TCPA.

Tablica 27. Rasponi lingvističke varijable TCPA. Priredio autor

TCPA	Stdev	Mean	C
VL	2,5419	3,4536	3
L	2,5433	7,7366	8
M	3,1731	13,3963	13
H	3,4022	19,5220	20
VH	3,1261	25,7902	26

Korištenjem gornjih podataka, modelirane su funkcije pripadnosti za lingvističku varijablu TCPA Gausovim krivuljama (Slika 30.).



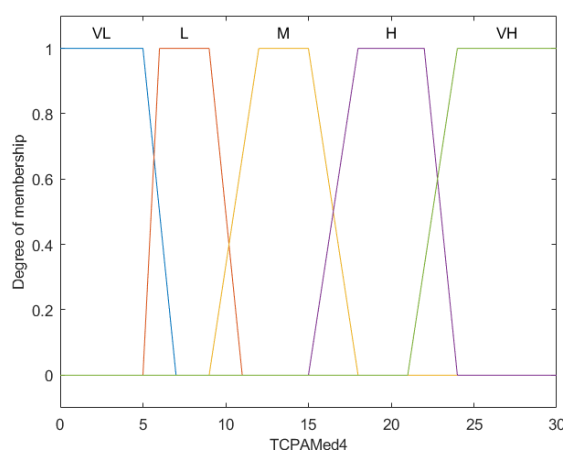
Slika 30: Prikaz lingvističke varijable TCPA Gausovim krivuljama. Priredio autor

Iz prikazanih funkcija pripadnosti vidljivo je da su ravnomjerno distribuirane, bez preklapanja jezgri neizrazitih skupova. Kao i za prethodnu varijablu, određena je i trapezoidna funkcija za varijablu TCPA. Karakteristične točke lingvističkih varijabli određene su kao u Tablici 28.:

Tablica 28. Karakteristične točke trapezoidne funkcije lingvističke varijable TCPA. Priredio autor

TCPA	a	b	c	d
VL	0	0	5	7
L	5	6	6	11
M	9	12	15	18
H	15	18	22	24
VH	21	24	30	30

Nadalje, korištenjem dobivenih podataka, moguće je prikazati varijablu TCPA kao trapezoidnu funkciju (Slika 31.).



Slika 31. Prikaz lingvističke varijable *TCPA* korištenjem trapezoidnih funkcija. Priredio autor

Iz dobivenih trapezoidnih funkcija pripadnosti lingvističke varijable *TCPA*, vidljiva je sličnost sa prethodno prikazanim Gausovim krivuljama, sa ravnomjerno distribuiranim neizrazitim skupovima te bez poklapanja jezgre.

5.1.3. Određivanje funkcija pripadnosti varijable *BCR* - RFQ16 do RFQ20

Sljedeća obrađivana varijabla je varijabla *BCR*. Vrijednosti lingvističke varijable *BCR* ispitane su uz mogući raspon od 0 do 5 nautičke milje te podjelu od 1 kabela. Tablica 29. prikazuje statističke podatke za vrijednosti granica raspona lingvističke varijabli *BCR* nakon uklanjanja stršećih vrijednosti: SD-standardna devijacija, AS - aritmetička sredina, C – medijan, VL *BCR* (vrlo mali *BCR*), L *BCR* (mali *BCR*), M *BCR* (umjereni *BCR*), H *BCR* (veliki *BCR*), VH *BCR* (vrlo veliki *BCR*).

Tablica 29: Maksimalne i minimalne vrijednosti lingvističke varijable *BCR*. Priredio autor

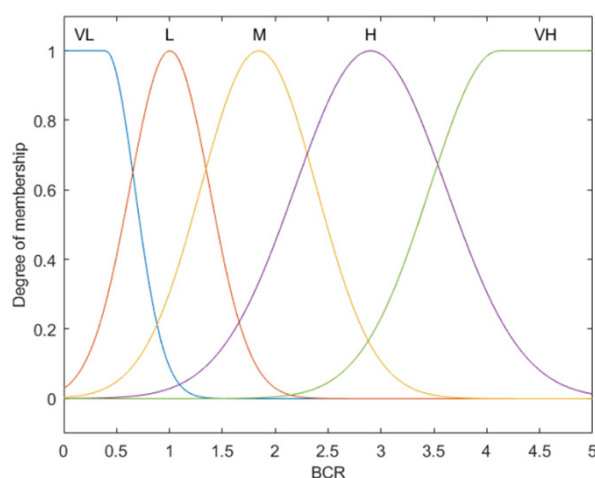
BCR		SD	AS	C
VL	Min	0,257	0,134	0
	Max	0,825	0,846	0,6
L	Min	0,297	0,666	0,6
	Max	0,766	1,407	1,3
M	Min	0,429	1,273	1,2
	Max	0,792	2,306	2,3
H	Min	0,670	2,175	2,1
	Max	0,761	3,407	3,5
VH	Min	0,863	3,241	3,5
	Max	0,497	4,843	5

Određivanjem gornje i donje granice raspona pristupilo se određivanju vrijednosti unutar neizrazitih skupova. Nakon što su obrađeni podatci unutar granica raspona odredili su se i osnovni statistički podatci za ukupan raspon varijable *BCR* kao u Tablici 30.

Tablica 30. Rasponi lingvističke varijable BCR. Priredio autor

BCR	Stdev	Mean	C
VL	0,2574	0,3980	0,4
L	0,3768	1,0029	1
M	0,5466	1,8431	1,8
H	0,7139	2,9004	2,9
VH	0,6521	4,1139	4,2

Funkcije pripadnosti za lingvističku varijablu BCR prikazane su Gausovim krivuljama koristeći prethodno dobivene aritmetičku sredinu i standardnu devijaciju (Slika 32.).



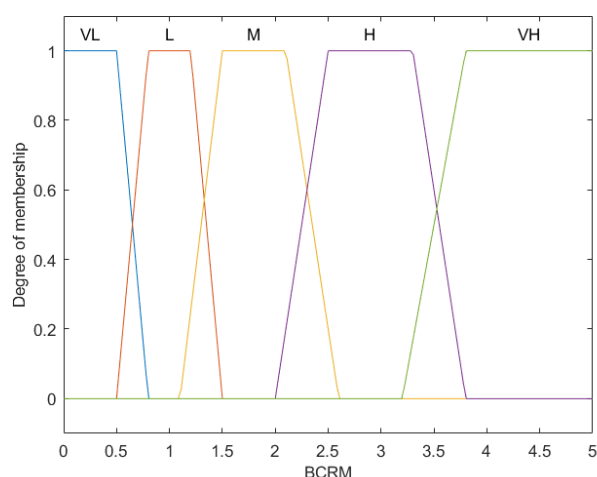
Slika 32. Prikaz lingvističke varijable BCR korištenjem Gausovih krivulja. Priredio autor

Iz dobivenih funkcija pripadnosti vidljivo je da nema preklapanja jezgri neizrazitih skupova, te da su funkcije nešto gušće distribuirane u prvom dijelu raspona, slično kao kod varijable CPA. To je i očekivano uzevši u obzir kako su te dvije varijable pokazatelji blizine prolaza drugog broda. Kako bi se varijabla BCR prikazala i kao trapezoidna funkcija određene su karakteristične točke trapezoidne funkcije kao u Tablici 31.:

Tablica 31. Karakteristične točke trapezoidne funkcije lingvističke varijable BCR. Priredio autor

BCR	a	b	c	d
VL	0	0	0,5	0,8
L	0,5	0,8	1,2	1,5
M	1,1	1,5	2,1	2,6
H	2	2,5	3,3	3,8
VH	0	0	0,5	0,8

Upotrebom dobivenih rezultata određena je i prikazana varijabla BCR kao i trapezoidna funkcija (Slika 33.).



Slika 33: Prikaz lingvističke varijable BCR korištenjem trapezoidnih funkcija. Priredio autor

Iz dobivenih funkcija pripadnosti lingvističke varijable BCR, može se primijetiti sličnost sa Gaussovima krivuljama iste lingvističke varijable. Nema preklapanja jezgre, te nešto gušće distribuirane krivulje u prvom dijelu raspona.

5.1.4. Određivanje funkcija pripadnosti varijable *Međusobna udaljenost* - RFQ21 do RFQ25

Vrijednosti lingvističke varijable *Međusobna udaljenost* ispitane su koristeći dvostruki klizač na rasponu od 0 do 16 nautičkih milja te podjeli od 2 kabela. Tablica 32. prikazuje osnovne statističke podatke za vrijednosti granica raspona lingvističkih vrijednosti nakon uklanjanja stršećih vrijednosti: SD-standardna devijacija, AS - aritmetička sredina, C – medijan, VL međusobna udaljenost (vrlo mala međusobna udaljenost), L međusobna udaljenost (mala međusobna udaljenost), M međusobna udaljenost (umjerena međusobna udaljenost), H međusobna udaljenost (velika međusobna udaljenost), VH međusobna udaljenost (vrlo velika međusobna udaljenost).

*Tablica 32. Maksimalne i minimalne vrijednosti lingvističke varijable *Međusobna udaljenost*. Priredio autor*

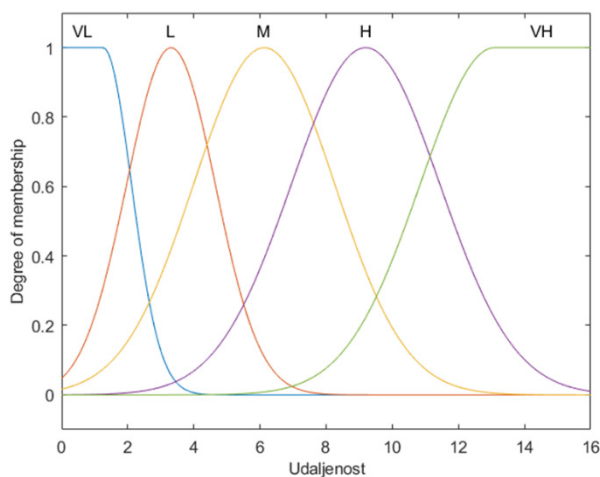
Međusobna udaljenost		SD	AS	C
VL	Min	0,77	0,30	0
	Max	1,79	2,28	2
L	Min	1,03	1,94	2
	Max	2,18	4,30	4
M	Min	1,67	3,93	4
	Max	2,57	7,18	8
H	Min	2,63	6,88	8
	Max	2,83	10,61	12
VH	Min	3,29	10,08	11,8
	Max	2,25	15,12	16

Nakon što su dobiveni i obrađeni podatci unutar granica raspona mogu se odrediti i statistički podatci za ukupan raspon varijable *Međusobna udaljenost* kao u Tablici 33.

Tablica 33. Statističke vrijednosti raspona lingvističke varijable Međusobna udaljenost. Priredio autor

Međusobna udaljenost	SD	AS	C
VL	0,8572	1,2565	1,1
L	1,3406	3,3070	3,3
M	2,1363	6,1252	6,1
H	2,2457	9,1935	9,4
VH	2,2479	13,0903	13,5

Nadalje, koristeći dobivene podatke aritmetičke sredine i standardne devijacije moguće je odrediti lingvističku varijabla *Međusobna udaljenost* prikazanu Gausovim krivuljama kao na Slici 34.



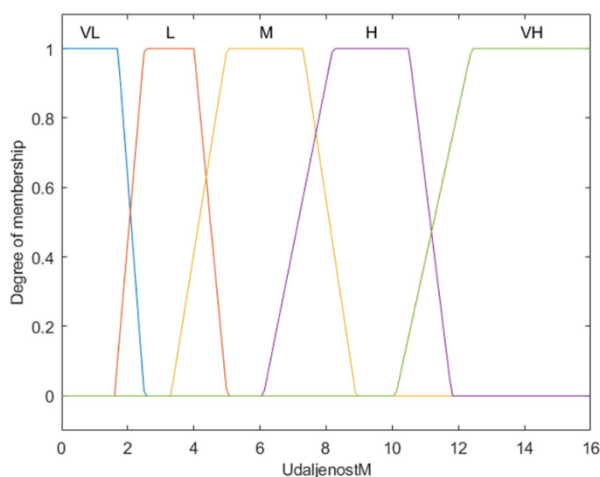
Slika 34: Prikaz lingvističke varijable Međusobna udaljenost korištenjem Gausovih krivulja. Priredio autor

Prikazom kreiranih funkcija pripadnosti može se ustanoviti kako kod varijable *Međusobna udaljenost* nema preklapanja jezgri neizrazitih skupova, te su i funkcije ravnomjerno raspoređene unutar raspona varijable. Karakteristične točke trapezoidne funkcije varijable *Međusobna udaljenost* odredile su se kao u Tablici 34.:

Tablica 34: Karakteristične točke trapezoidne funkcije lingvističke varijable
Međusobna udaljenost. Priredio autor

Međusobna udaljenost	a	b	c	d
VL	0	0	1,7	2,5
L	1,6	2,5	4	5
M	3,3	5	7,3	8,9
H	6,1	8,2	10,5	11,8
VH	10,1	12,4	16	16

te su nadalje određene i trapezoidne funkcije varijable *Međusobna udaljenost* kao na Slici 35.



Slika 35: Prikaz lingvističke varijable *Međusobna udaljenost* korištenjem trapezoidnih funkcija. Priredio autor

Vidljiva je slična distribucija trapezoidne funkcije kao i ranije prikazane Gaussove krivulje, te se može primijetiti nešto gušći raspored funkcija pripadnosti u prvom dijelu raspona od nula do 8 nautičkih milja, dok je u drugom dijelu raspona nešto rjeđi raspored.

5.1.5. Određivanje funkcija pripadnosti varijable *Vidljivost* - RFQ31 do RFQ35

Ulazna varijabla *Vidljivost* sa pripadajućim lingvističkim varijablama određena je na rasponu od 0 do 25 nautičkih milja te podjeli od 1 kabela. Tablica 35. prikazuje osnovne statističke podatke za vrijednosti granica raspona lingvističkih varijabli nakon uklanjanja stršećih vrijednosti: SD-standardna devijacija, AS - aritmetička sredina, C – medijan, te varijabla *Vidljivost* kao VL (vrlo slaba vidljivost), L (slaba vidljivost), M (umjerena vidljivost), H (dobra vidljivost), VH (vrlo dobra vidljivost).

Tablica 35. Maksimalne i minimalne vrijednosti lingvističke varijable Vidljivost.
Priradio autor

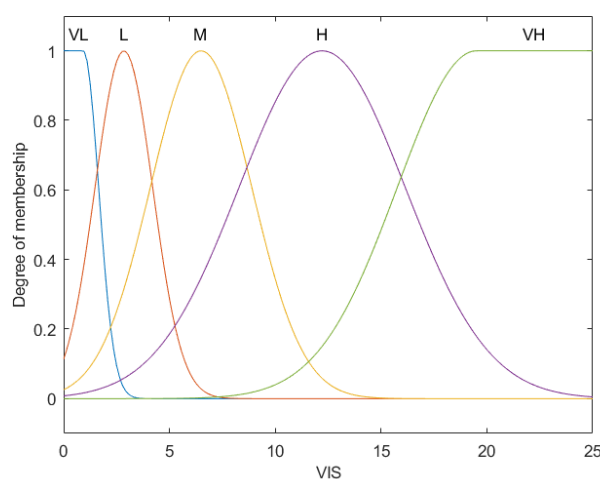
Vidljivost		SD	AS	C
VL	Min	0,3713	0,2203	0
	Max	0,8816	1,9946	2
L	Min	0,8911	1,8984	2
	Max	1,5544	3,9859	4
M	Min	1,6031	3,8942	4
	Max	2,5801	7,1812	8
H	Min	2,6401	6,8781	8
	Max	1,6619	11,3818	12
VH	Min	2,7718	10,4717	12
	Max	0	16	16

Nakon temelju dobivenih podataka o granicama raspona, moguće je odrediti skup vrijednosti varijable *Vidljivost*, te se statističkom obradom skupa vrijednosti dobiju rezultati kao u Tablici 36.

Tablica 36. Rasponi lingvističke varijable Vidljivost. Priradio autor

Vidljivost	SD	AS	C
VL	0,7241	0,9306	0,8
L	1,3644	2,8451	2,7
M	2,4005	6,4940	6,3
H	3,9328	12,2142	12,2
VH	3,7468	19,5007	20

Koristeći aritmetičku sredinu i standardnu devijaciju pojedine lingvističke vrijednosti, moguće je odrediti funkciju pripadnosti koristeći Gaussovu krivulja kao na slici 36.



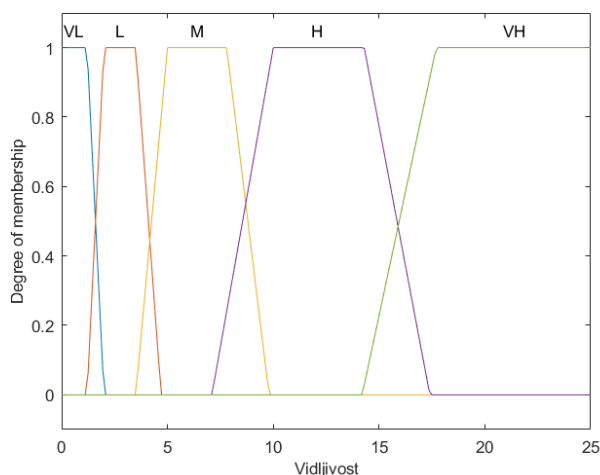
Slika 36. Prikaz lingvističke varijable Vidljivost korištenjem Gaussovih krivulja.
Priradio autor

Trapezoidne funkcije pripadnosti varijable *Vidljivost* određene su koristeći karakteristične točke kao u Tablici 37.

*Tablica 37. Karakteristične točke trapezoidne funkcije lingvističke varijable Vidljivost.
Priradio autor*

Vidljivost	a	b	c	d
VL	0	0	1,2	2
L	1,2	2	3,5	4,7
M	3,5	5	7,8	9,8
H	7,1	10	14,3	17,4
VH	14,2	17,7	25	25

Na temelju dobivenih točaka mogu se odrediti i trapezoidne funkcije pripadnosti kao na Slici 37.



*Slika 37. Prikaz lingvističke varijable Vidljivost korištenjem trapezoidnih funkcija.
Priradio autor*

Uočava se sličnost distribucija trapezoidne funkcije kao i prethodno prikazane Gaussove krivulje, te je prikazan nešto gušći raspored funkcija pripadnosti u prvom dijelu raspona koji se odnosi na vrlo slabu i slabu vidljivost, dok je u drugom dijelu raspona nešto rjeđi raspored

Dobivene funkcije pripadnosti su određene koristeći statističku analizu podataka te se njima modelirale nesigurnost u razmišljanjima eksperata vezano uz lingvističke varijable. Određene se koristeći Gaussovu krivulju, te dodatno uz pomoć nešto jednostavnijih trapezoidnih funkcija pripadnosti. Utvrđeni su rasponi pojedinih lingvističkih varijabli za korištenje u sustavu zaključivanja i donošenja odluka, te je ekspertno znanje modelirano koristeći odgovarajuće funkcije pripadnosti. Nakon određivanja funkcija pripadnosti ulaznih varijabli, potrebno je odrediti funkcije pripadnosti izlazne varijable koja predstavlja indeks rizika sudara.

5.2. Statističko određivanje parametara funkcija pripadnosti izlazne varijable

Izlazna varijabla neizrazitog sustava predstavlja neizraziti indeks rizika sudara koji može imati vrijednost u rasponu od nula do jedan, gdje je jedan najveći indeks rizika a nula najmanji. S obzirom kako su eksperti definirali horizontalnu vidljivost kao najvažniji čimbenik pri procjeni rizika, bilo je nužno izraditi dva odvojena modela. Prvim modelom koji se sastoji od dvanaest podmodela, modelira se neizraziti indeks rizika u okolnostima vidljivosti koja nije smanjena, dok se drugim modelom određuje indeks rizika sudara u okolnostima smanjene vidljivosti. Prvim modelom i njegovim podmodelima dobiva se izlazna varijabla *FCRI*. Kod drugog modela koji opisuje indeks rizika sudara pri uvjetima smanjenje vidljivosti koristiti će se izlazna varijabla prvog modela *FCRI* uz lingvističku varijablu *Vidljivost* kako bi se dobio neizraziti indeks rizika sudara pri smanjenoj vidljivosti (engl. *Fuzzy Collision Risk Index for Low Visibility*, *FCRI_LV*).

5.2.1. Određivanje funkcija pripadnosti izlazne varijable Neizraziti indeks rizika sudara - *FCRI*

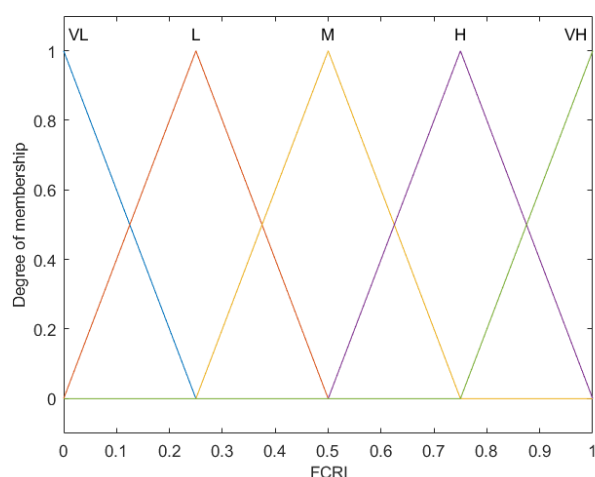
Neizraziti indeks rizika sudara predstavlja izlaznu varijablu neizrazitog sustava zaključivanja, i to u plovidbenim okolnostima u kojima vidljivost nije smanjena. Navedena neizrazita varijabla određena je pomoću pet lingvističkih vrijednosti: *vrlo mali*, *mali*, *umjereni*, *veliki* i *vrlo veliki neizraziti indeks rizika sudara*. Izlazna varijabla određena je u rasponu od nula (minimalni indeks rizika sudara) do jedan (maksimalan indeks rizika sudara), te će se prikazati trokutastom funkcijom pripadnosti i simetričnim funkcijama. Trokutaste funkcije određene su pomoću tri točke kao u Tablici 38.

Tablica 38. Karakteristične točke trokutaste funkcije lingvističke varijable *FCRI*.

Priredio autor

FCRI	a	b	c
VL	-0,25	0	0,25
L	0	0,25	0,5
M	0,25	0,5	0,75
H	0,5	0,75	1
VH	0,75	1	1,25

Koristeći točke prikazane u tablici može se prikazati izlazna varijabla trokutastim funkcijama pripadnosti kao na Slici 38.



Slika 38. Funkcije pripadnosti izlazne varijable FCRI. Priredio autor

Kao što je vidljivo na slici trokutaste funkcije pripadnosti su jednako raspoređene, simetrične, te sa jednakim preklapanjima.

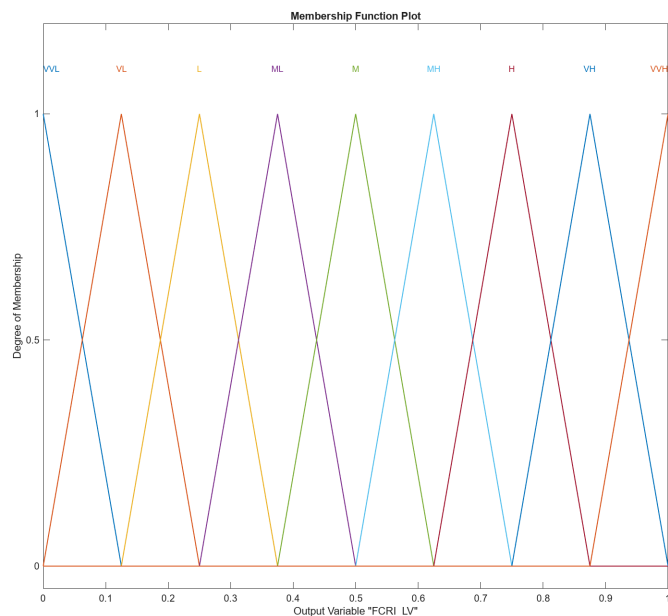
5.2.2. Određivanje funkcija pripadnosti izlazne varijable neizraziti indeks rizika sudara pri smanjenoj vidljivosti – *FCRI_LV*

Izlazna varijabla *FCRI* će se nadalje koristiti kao ulazna varijabla u neizrazitom sustavu za određivanje neizrazitog indeksa rizika sudara pri smanjenoj vidljivosti, uz korištenje varijable *Vidljivost* kao druge ulazne varijable. Izlazna varijabla neizrazitog sustava pri smanjenoj vidljivosti određena je finijom podjelom na devet lingvističkih vrijednosti. Navedene lingvističke vrijednosti su *vrlo-vrlo mali*, *vrlo mali*, *mali*, *umjereno mali*, *umjereni*, *umjereno veliki*, *veliki*, *vrlo veliki*, *vrlo-vrlo veliki neizraziti indeks rizika sudara pri smanjenoj vidljivosti*. Točke funkcija pripadnosti određene kao u Tablici 39.:

Tablica 39. Karakteristične točke trokutaste funkcije lingvističke varijable *FCRI_LV*.
Priredio autor

FCRI LV	a	b	c
VVL	-0,125	0	0,125
VL	0	0,125	0,25
L	0,125	0,25	0,375
ML	0,25	0,375	0,5
M	0,375	0,5	0,625
MH	0,5	0,625	0,75
H	0,625	0,75	0,875
VH	0,75	0,875	1
VVH	0,875	1	1,215

Na temelju definiranih točaka, mogu se i prikazati funkcije pripadnosti kao na Slici 39.:



Slika 39. Funkcije pripadnosti izlazne varijable FCRI_LV. Priredio autor

Na slici je vidljivo kako su trokutaste funkcije pripadnosti jednako raspoređene, simetrične, te sa jednakim preklapanjima.

Ovim poglavljem su definirane funkcije pripadnosti, njihovi rasponi te oblici za ulazne i izlazne varijable koje će se koristiti u modelima sustava neizrazitog zaključivanja. U sljedećem koraku potrebno je odrediti bazu neizrazitih pravila kako bi se izradili modeli neizrazitog zaključivanja.

5.3. Određivanje neizrazitih pravila odlučivanja

Sljedeći dio izrade neizrazitog sustava odlučivanja predstavlja određivanje baze neizrazitih pravila odlučivanja. Nakon što su određene grupe, potrebno je odrediti koje varijable će se koristiti u pojedinoj grupi kao u Tablici 40. Kod međusobnih susreta gdje imamo paralelne kursove kao u slučajevima kada je razlika kursova nula ili u slučajevima kada brodovi imaju recipročne kursove varijabla BCR se ne koristi.

Tablica 40. Odabir varijabli za pojedini model. Priredio autor

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
CPA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TCPA	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
BCR	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗
Međusobna udaljenost	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Nadalje, treba uzeti u obzir sve moguće kombinacije lingvističkih varijabli u određenoj grupi te povezati svaku od kombinacija s odgovarajućim rizikom koristeći procjene eksperata te na taj način stvoriti bazu pravila. Proces stvaranja pravila je u svojoj naravi težak zadatak, pogotovo uzevši u obzir da neizraziti sustav kako je predložen u radu ima

četiri ulazne varijable od koji svaka sadrži pet lingvističkih varijabli, te jednu izlaznu varijablu.

Pri odabiru ekspertne skupine za određivanje neizrazitih pravila moralo se voditi računa o više faktora. Prema tipologiji eksperata prikazanoj u radu Krueger i sur.¹⁵² broj eksperta koji se korišteni u znanstvenim radovima varira, te kod radova koji uključuju eksperte koji nisu znanstvenici, već profesionalni djelatnici kreće se od 1 do 18 eksperata. Dodatno, i sama definicija eksperta je donekle problematična s obzirom da je dosta široka. Literatura koja se bavi prikupljanjem ekspertnog znanja koristi sam pojam eksperta vrlo široko, te često pojmom opisuje bilo koga tko bi imamo nekakva znanja o stvari. Kod određenih vrsta prikupljanja podataka to ima smisla, kao u slučajevima kad se radi o prikupljanju mišljenju neke skupine o nekom proizvodu. Međutim, u ovom radu koji se bavi ekspertnim neizrazitim sustavima podrške u plovidbi, pojam eksperta bi se ograničio na osobe koja imaju znanje, vještine i plovidbenu praksu. Vrijeme provedeno obavljajući određenu djelatnost zasigurno čini temelj ekspertnoga znanja, te se smatra da je desetak godina intenzivnog obavljanja nekog posla potrebno kako bi se postalo ekspert u određenom poslu¹⁵³.

Broj eksperata koji su sudjelovali u simulacijama procjenjivanja rizika je dodatno ograničen s obzirom da je procjena rizika izvođena kroz duži vremenski period te je bilo potrebno više iteracija kako bi se prikazale sve moguće kombinacije susreta. Ekspertni tim uključuje sedam osoba, od toga pet zapovjednika s 20 i više godina iskustva te dva prva časnika palube sa najmanje 15 godina iskustva. Svi eksperti uključeni u skupinu za određivanje neizrazitih pravila sudjelovalo je i ispunjalo prethodnu anketu kojom su određene značajne varijable i njihove lingvističke karakteristike.

Izbor metode kojom bi se prikupljali specifični podatci predstavlja sljedeći zadatak u uspješnom kreiranju modela. Metode koje se koriste pri elicitanju ekspertnog znanja mogli bi podijeliti na one koje se provode individualno te one koje se provode grupno. Također, izvedbeno je moguće podatke dobiti direktno ili na daljinu. Najjednostavnija i najčešća metoda prikupljanja ekspertnog znanja je traženje od eksperata da napišu pravila¹⁵⁴, međutim takva metoda ne bi bila prihvatljiva u ovom slučaju s obzirom na velik broj ulaznih varijabli i njihovih kombinacija. Dodatno, istraživanja Larichev (2002) ukazuju na to da su ekspertna znanja često podsvjesna, te njihovo prikupljanje samo verbalnim ispitivanjem ne daje uvijek zadovoljavajuće rezultate.

S obzirom da navedene metode nose određene prednosti i mane, u radu se koristila varijacija grupne direktne metode sa inovativnim pristupom. Inovativnost se ogleda u tome da su ispitanici sudjelovali u pripremljenim plovidbenim simulacijama te

¹⁵² Krueger, T., Page, T., Hubacek, K., Smith, L., & Hiscock, K. (2012). The role of expert opinion in environmental modelling. *Environmental Modelling & Software*, 36, 4-18.

¹⁵³ Larichev, O. I. (2002). Close imitation of expert knowledge: the problem and methods. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 1(01), 27-42.

¹⁵⁴ Guillaume, S., & Magdalena, L. (2006). Expert guided integration of induced knowledge into a fuzzy knowledge base. *Soft computing*, 10, 773-784.

procjenjivali rizik sudara koristeći radarski uređaj i vizualni prikaz okoliša. Na taj način se izbjeglo da eksperti samo ispunjavaju tablice sa pravilima, nego se pokušalo doći do stvarnog ekspertnog znanja. Pri procjeni rizika sudara za pojedine kombinacije koristio se nautički simulator sa radarskim prikazom, pri čemu su se kreirali karakteristični susreti brodova u svakoj od gore navedenih grupa. Nautički simulator koji se koristio je K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator, proizvođača Kongsber Digital AS. Sistem se sastoji od dvije ECDIS stanice, dva radarska uređaja, centralnog upravljačkog prikaza sa komandama te vizualizacije okoliša putem LCD ekrana.

Scenariji plovidbenih situacija koje su eksperti procijenjivali prethodno su kreirani na nautičkom simulatoru, te su eksperti prije određivanja rizika sudara upoznati sa ciljem istraživanja, i načinom ocjenjivanja. Sudovi eksperata dati su za točno određene trenutke tijekom pojedinog scenarija, koji se odvija od pojave broda na radarskom horizontu. Eksperti prate kretanje brodova, te se u određenim trenutcima scenarij zaustavlja kako bi se odredio rizik sudara. Tijekom scenarija nije predviđeno izbjegavanje sudara, brodovi nastavljaju kretanju istim smjerom i brzinom kretanja, te se i neizraziti indeks rizika sukladno proteklom vremenu može mijenjati. Stupanj rizika sudara određivan je prema podijeli na pet kategorija: *Vrlo mali rizik*, *Mali rizik*, *Umjereni rizik*, *Veliki rizik*, *Vrlo veliki rizik*. Rizik se kontinuirano procjenjivao od trenutka pojave broda na radarskoj slici i vizualno pa do vremena prolaza drugog broda. Pri tome su se u određenim vremenskim intervalima bilježile vrijednosti *CPA*, *BCR*, *TCPA* i *Međusobna udaljenost*, te trenutnog stupnja rizika, ali i dodatno izvan intervala, kada bi eksperti naglasili da je došlo do promjene stupnja rizika kao u tablici. Dobiveni podaci nadalje su se koristili kako bi se kreirala baza neizrazitih ako-onda pravila za svaku od grupa kao u primjeru na Slici 40:

Pravilo	IV1	IV2	IV3	IV4	OV
<i>n</i>	If CPA is small and BCR is high and TCPA is high and Međusobna udaljenost is verysmall than FCRI is medium				
<i>n+1</i>	If CPA is small and BCR is high and TCPA is high and Međusobna udaljenost is small than FCRI is medium				
<i>n+2</i>	If CPA is small and BCR is high and TCPA is high and Međusobna udaljenost is medium than FCRI is medium				
<i>n+3</i>	If CPA is small and BCR is high and TCPA is high and Međusobna udaljenost is high than FCRI is medium				
<i>n+4</i>	If CPA is small and BCR is high and TCPA is high and Međusobna udaljenost is veryhigh than FCRI is medium				

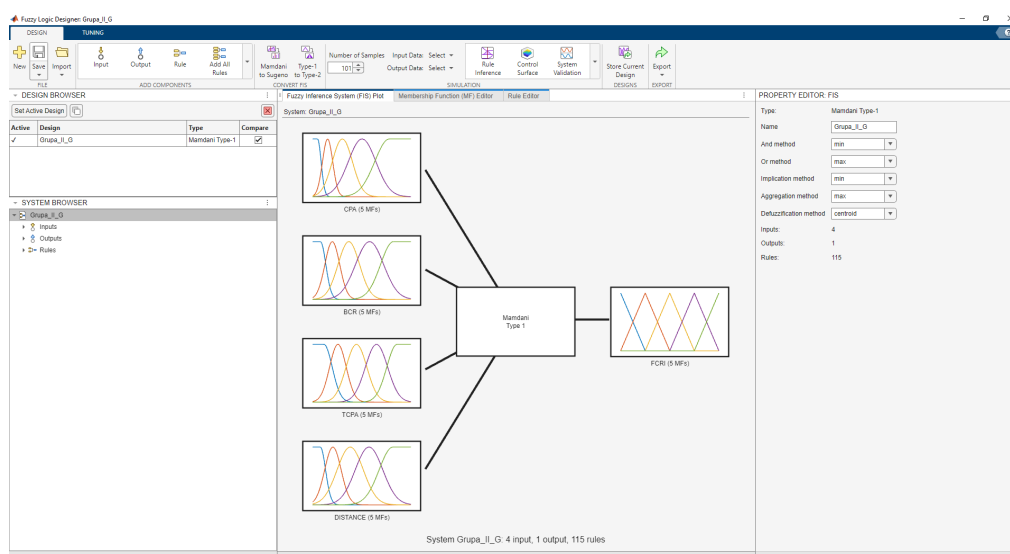
Slika 40. Primjer dijela baze neizrazitih pravila. Priredio autor

Iz primjera je vidljivo da se kod kreiranja pravila koristili I logički operateri te se nisu koristili ILI logički operateri. Dodatno, pri kreiranju su se koristili i NE operateri tamo gdje je bilo potrebno.

5.4. Modeli neizrazitog sustava zaključivanja s prikazima kontrolnih površina u slučajevima dobre vidljivosti

Neizraziti sustavi zaključivanja izrađeni su uz korištenje MATLAB programskog rješenja, na temelju prethodno određenih funkcija pripadnosti i baze pravila. S obzirom

na dvanaest karakterističnih grupa međusobnih odnosa brodova, bilo je potrebno izraditi pripadajuće podmodele za svaku od grupa. Dodatno, za svaki od dvanaest podmodela bilo je potrebno izraditi opciju koji koristi Gaussove funkcije pripadnosti i opciju modela koji koristi trapezoidne funkcije za opisivanje ulaznih varijabli. Tako je neizraziti indeks rizika sudara modeliran izradom dvije opcije od po dvanaest podmodela, ukupno dvadeset četiri podmodela. Prvom opcijom izrađeni su modeli korištenjem ulaznih varijabli opisanih Gaussovima funkcijama pripadnosti. Drugom opcijom izrađeni su modeli koji koriste iste varijable opisane trapezoidnim funkcijama pripadnosti. Pri tome su se koristile samo varijable koje su prethodno određene ekspertnim mišljenjem kao vrlo utjecajne. Pri tome valja primijetiti kako se pored uobičajenih varijabli *CPA* i *TCPA* koriste i varijable *Međusobna udaljenost* te *BCR*. Pri izradi modela koji se koristi u uvjetima dobre vidljivosti nije korištena varijabla *Vidljivost*. Varijabla *Vidljivost* koristiti će kod izrade modela koji daje neizraziti indeks rizika sudara u slučajevima smanjene vidljivosti. Kod izrade modela velika pozornost dana je modeliranju samih varijabli. Ispitivanje dovoljnog broja eksperata bio je jedan od bitnih uvjeta uspješnog modeliranja ulaznih varijabli, kako bi se dobio statistički relevantan rezultat. Naravno, osim toga veći uzorak dopušta i testiranje razlika među grupama, što bi kod malog uzorka bilo teško izvedivo ili bi rezultat bio nepouzdan. Prethodno određene lingvističke varijable i njihove lingvističke vrijednosti uz bazu neizrazitih pravila čine temelj neizrazitog sustava. Dobiveni i obrađeni podatci uneseni su u sučelje programskog rješenja kao na Slici 41.



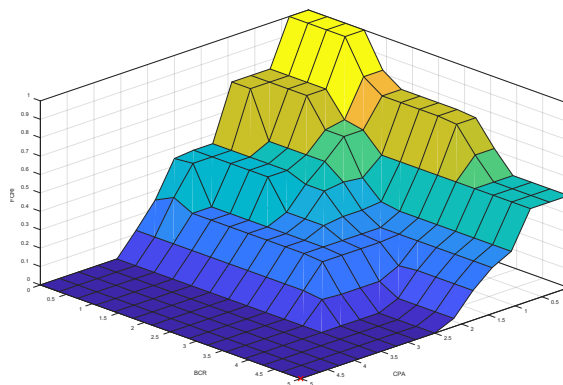
Slika 41. Sučelje programskog rješenja za izradu neizrazitog sustava zaključivanja.
 Priredio autor koristeći slikovni zapis MATLAB programskog rješenja

Programiranjem te unosom lingvističkih varijabli i baze neizrazitih pravila dobiven je neizraziti sustav za svaki od podmodela. Dobiveni podmodeli mogu se nadalje analizirati na način da se određivanjem odabranih ulaznih vrijednosti provjere izlazne vrijednosti modela, izradom kontrolnih površina, te validacijom modela. Model dopušta određenim programskim naredbama očitati vrijednost neizrazitog indeksa rizika sudara za bilo koju

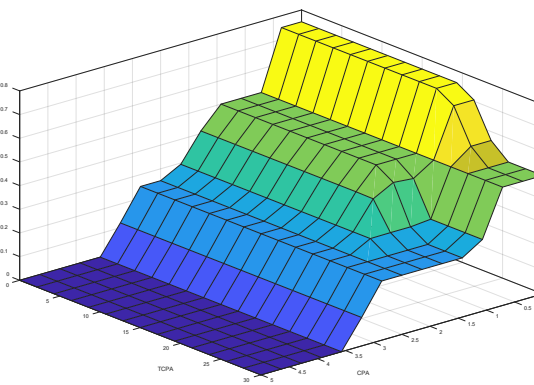
kombinaciju ulaznih varijabli. Koristeći programsku naredbu evaluacije modela, unosom izrazitih vrijednosti ulaznih varijabli unutar naredbe dobije se izlazna varijabla *FCRI* u rasponu od nula do jedan. Programsko rješenje pruža i mogućnost višedimenzionalne vizualizacije prilikom koje je moguće vidjeti kontrolnu površinu izlazne vrijednosti, u našem slučaju *FCRI* za sve kombinacije ulaznih varijabli. Višedimenzionalne vizualizacije predstavljaju problem u svom prikazu, budući je moguće prikazati samo trodimenzionalni prostor. Kod vizualizacije modela neizrazitog indeksa rizika postoji pet dimenzija, te se za svaki određeni model prikazuje odnos dviju odabranih ulaznih varijabli u odnosu na izlaznu vrijednost, pri čemu druge dvije ulazne vrijednosti moraju imati neku fiksnu referentnu vrijednost. Na takav način moguće je prikazati beskonačno mnogo prikaza kontrolnih površina za svaki od dvadeset četiri modela neizrazitog sustava zaključivanja, tako da prikazane površine služe samo kao ilustracija kontrolnih površina programskog rješenja pri nasumično odabranim postavkama.

Na Slici 42. prikazana je kontrolna površina neizrazitog indeksa rizika sudara u odnosu na ulazne varijable *CPA* i *BCR*. Vidljivo je kako manje vrijednosti navedenih varijabli uzrokuju povećanje izlazne varijable *FCRI*.

Slika 43. prikazuje kontrolnu površinu neizrazitog indeksa rizika sudara u odnosu na ulazne varijable *CPA* i *TCPA*. Može se primijetiti kao je kod velikih vrijednosti te dvije varijable neizraziti indeks rizika sudara nizak, dok sa smanjivanjem navedenih varijabli dolazi do porasta izlazne varijable *FCRI*.



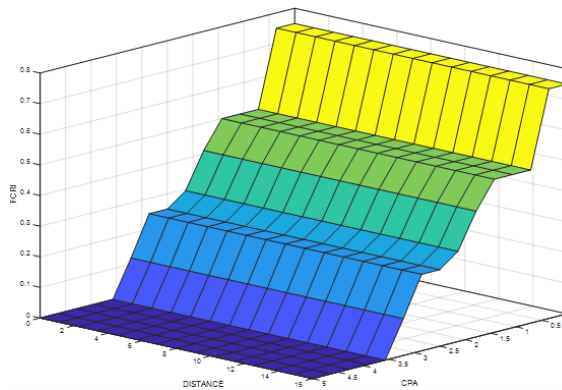
Slika 42. Kontrolna površina za varijable *CPA* i *BCR*. Priredio autor



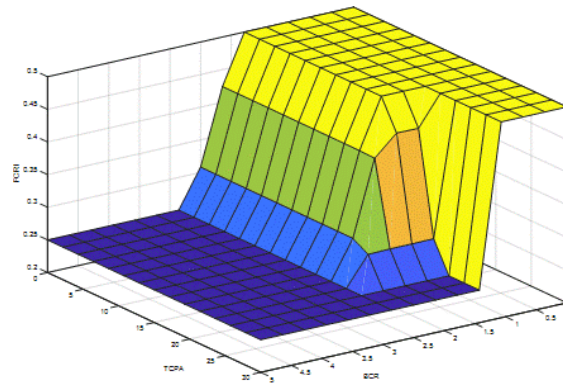
Slika 43. Kontrolna površina za varijable *CPA* i *TCPA*. Priredio autor

Kontrolnu površinu neizrazitog indeksa rizika sudara na Slici 44. odnosi se na ulazne varijable *CPA* i *Međusobna udaljenost*. Može se primijetiti da vrijednost izlazne varijable ovisi samo o ulaznoj varijabli *CPA* pri ispitivanim postavkama.

Na Slici 45. prikazana je kontrolna površina neizrazitog indeksa rizika sudara u odnosu na ulazne varijable *BCR* i *TCPA*. Vidljivo je kako manje vrijednosti navedenih varijabli uzrokuju povećanje izlazne varijable *FCRI* pri zadanim postavkama.



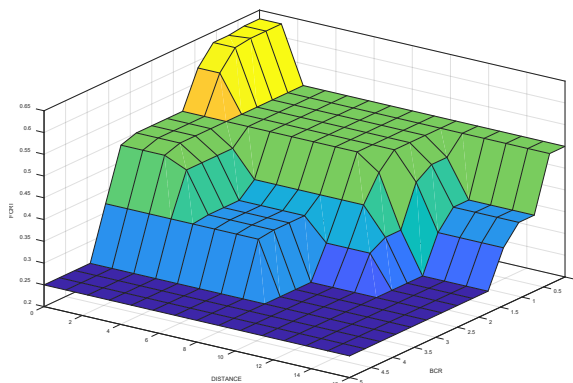
Slika 44. Kontrolna površina za varijable CPA i Međusobna udaljenost. Priredio autor



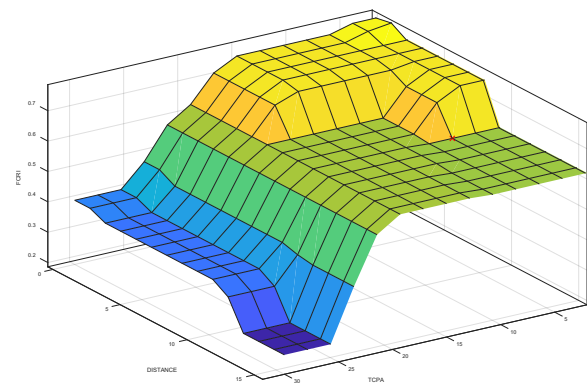
Slika 45. Kontrolna površina za varijable BCR i TCPA. Priredio autor

Slika 46. prikazuje kontrolnu površinu neizrazitog indeksa rizika sudara u odnosu na ulazne varijable BCR i Međusobna udaljenost. Vidljivo je kako se manje vrijednosti navedenih ulaznih varijabli utječu obrnuto proporcionalno na izlaznu varijablu FCRI.

Prikaz kontrolne površine neizrazitog indeksa rizika sudara na Slici 47. odnosi se na ulazne varijable TCPA i Međusobna udaljenost. Prikaz otkriva kako kod većih vrijednosti tih varijabli izlazna varijabla ima malu vrijednost, dok padom vrijednosti ulaznih varijable raste vrijednost izlazne varijable.



Slika 46. Kontrolna površina za varijable BCR i Međusobna udaljenost. Priredio autor



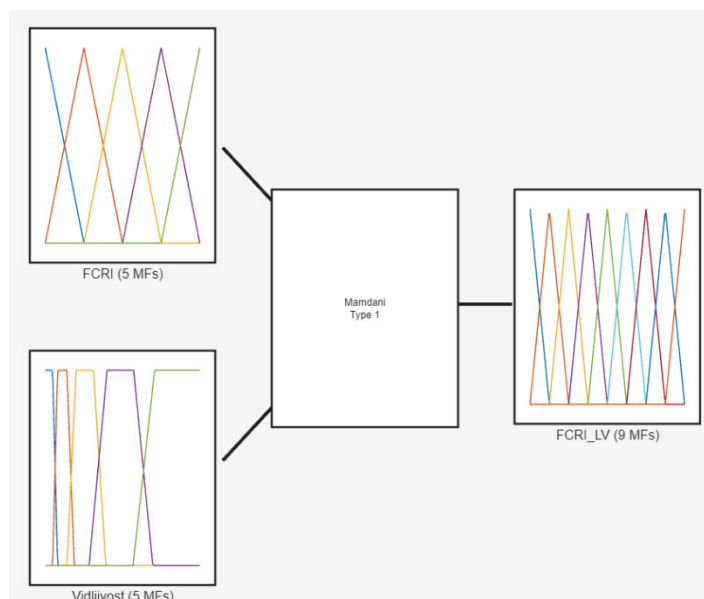
Slika 47. Kontrolna površina za varijable TCPA i Međusobna udaljenost. Priredio autor

Prikazanim slikama predstavljaju grafički prikaz izlaznih vrijednost modela, dok sljedeća mogućnost programskog rješenja predstavlja validacija izrađenih modela neizrazitog sustava zaključivanja. S obzirom da su modeli opisani korištenjem ulaznih varijabli koje su opisane dvama vrstama funkcija pripadnosti potrebno je pristupiti validaciji koristeći neovisne uzorke podataka. Korištenjem trapezoidnih ali i Gaussovih krivulja opisana su mišljenja eksperata te će se daljnjom validacijom modela ispitati koji modeli bolje opisuju mišljenja eksperata. Validacija će se izvršiti skupovima neovisnih uzoraka na oba modela

kako bi utvrdilo koji ostvaruje bolje odziv, te će se time i odabrati povoljniji model za daljnje korištenje.

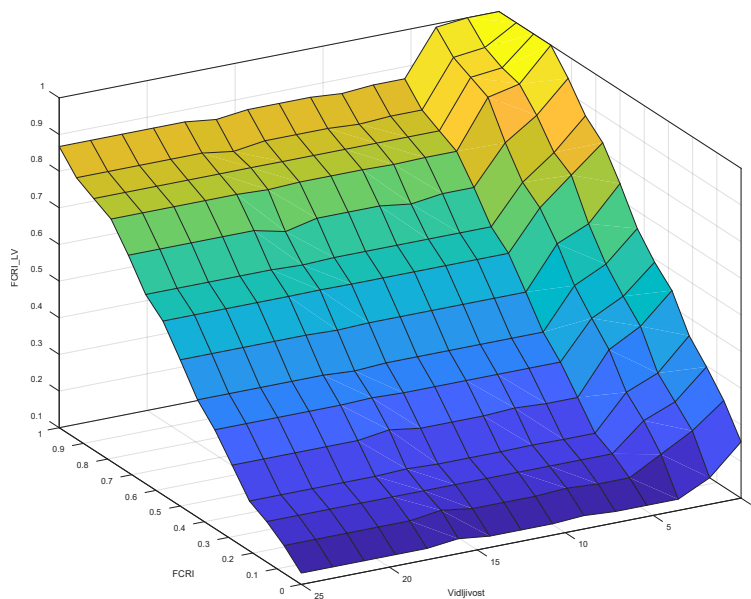
5.5. Model neizrazitog sustava zaključivanja s prikazima kontrolnih površina u okolnostima smanjene vidljivosti

Model neizrazitog sustava zaključivanja u okolnostima smanjene vidljivosti predstavlja nadopunu prethodnog neizrazitog sustava zaključivanja uz korištenje dodatne varijable koja predstavlja horizontalnu vidljivost. Pri izradi modela za uvjete smanjene vidljivosti kao ulazna varijabla koristi se neizraziti indeks rizika sudara *FCRI* dobiven putem prethodnog modela, te ulazna varijabla *Vidljivost*. Ulazna varijabla *Vidljivost* opisat će se primjenom trapezoidnih i Gaussovih funkcije pripadnosti. Na taj način izradit će se dva podmodela, od koji će se daljnjom validacijom odabrati povoljniji. *FCR_LV* predstavlja izlaznu varijablu sustava, te je određen u rasponu od nula do jedan. Neizraziti sustavi izrađen je uz korištenje MATLAB programskog rješenja, koristeći prethodno određene funkcije pripadnosti i bazu neizrazitih pravila. Prikaz modela korištenjem programskog rješenja izgleda kao na Slici 48.:



Slika 48. Sučelje programskog rješenja za izradu neizrazitog sustava zaključivanja pri smanjenoj vidljivosti. Priredio autor koristeći slikovni zapis MATLAB programskog rješenja

Nakon izrade modela moguće je programskim naredbama očitati vrijednost neizrazitog indeksa rizika sudara u okolnostima smanjene vidljivosti za bilo koju kombinaciju ulaznih varijabli. Korištenjem programskog rješenja moguće je također prikazati kontrolne površine kojima se vizualizira odziv modela kao na Slici 49.

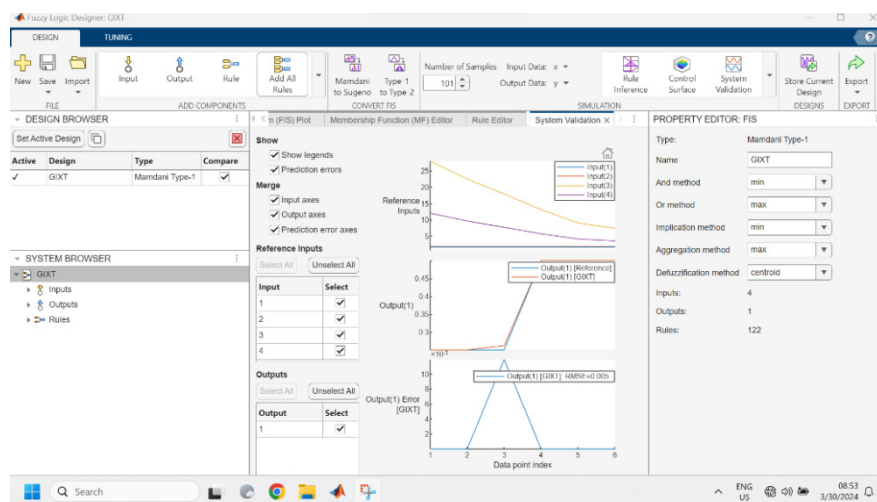


Slika 49. Kontrolna površina za varijable FCR i Vidljivost. Priredio autor

Kod ovog prikaza, s obzirom da se koriste dvije ulazne i jedna izlazna varijabla moguće je prikazati sve moguće kombinacije ulaznih i izlazne varijable samo jednom kontrolnom površinom. Prikazom je vidljivo kako neizraziti indeks rizika sudara raste sa smanjenjem vidljivosti, dok je u područjima dobre, vrlo dobre i umjereno dobre vidljivosti ostao jednak neizrazitom indeksu rizika sudara u uvjetima dobre vidljivosti. Može se primijetiti kako je neizraziti indeks rizika sudara odgovara maksimalnoj vrijednosti u uvjetima vrlo slabe vidljivosti i visokog indeksa rizika sudara. Nadalje se oba dobivena modela trebaju validirati koristeći skupove ulaznih podataka, te će se na temelju daljnje validacije odabrati model koji ima manju pogrešku te u naravi bolje opisuje mišljenja eksperata.

6. VALIDACIJA MODELA TE ODABIR NAJPOVOLJNIJEG NEIZRAZITOG SUSTAVA ZAKLJUČIVANJA ZA POTREBE NEIZRAZITE PROCJENE RIZIKA SUDARA

Validacija te daljnja verifikacija modela provodi se metodom izdvajanja kojom se skup podatak dobivenih tijekom određivanja neizrazitih pravila odlučivanja nasumično podijelio u tri dijela: skup za izradu modela, skup za validaciju te skup za testiranje modela¹⁵⁵. Skup podataka predstavlja u svojoj naravi ulazne i izlazne varijable, koje se u programskom rješenju definiraju na način da ulazne varijable predstavljaju matricu, dok je izlazna varijabla vektor. Redci matrice ulaznih varijabli su vrijednosti ulaznih varijabli kroz neki vremenski period promatranja, dok su redci vektora izlazne varijable vrijednosti procijenjenog rizika sudara. Izrada modela prikazana u prethodnom poglavlju temelji se na nasumično odabranom skupu podataka, kojima se kreirao model neizrazitog indeksa rizika sudara. Skup za validaciju se koristi kako bi procijenila pogreška, dok se skupom za testiranje verificira odabrani model. Pri validaciji modela uspoređuje se vrijednost neizrazitog indeksa rizika sudara onako kako ga određuje sustav neizrazitog sustava zaključivanja sa vrijednostima rizika kako su ga odredili eksperti tijekom određivanja neizrazitih pravila. Validacija modela izvršena je koristeći MATLAB Fuzzy Logic designer Toolbox programsko rješenje (Slika 50.).

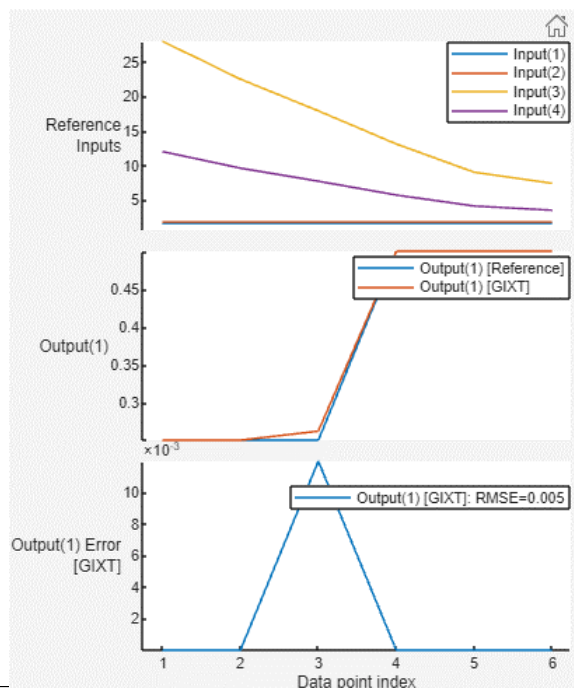


Slika 50. Prikaz validacije modela korištenjem programskog rješenja MATLAB.
Priradio autor koristeći slikovni zapis MATLAB programskog rješenja

Validacijom modela korištenjem programskog rješenja vizualno su prikazane ulazne varijable validacijskog skupa (Slika 51.), i to u prvom prozoru kroz vremenski period

¹⁵⁵ Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H., & Friedman, J. H. (2009). *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction* (Vol. 2, 1-758). New York: Springer.

promatranja. U drugom prozoru grafički je prikazana je usporedba vrijednosti izlazne varijable neizraziti indeks rizika sudara kako ga određuje neizraziti sustav i onako kako su ga odredili eksperti. Treći prozor prikazuje pogrešku modela na odabranom skupu za validaciju .



Slika 51. Prikaz validacije modela putem grafičkog prikaza. Priredio autor koristeći slikovni zapis MATLAB programskog rješenja

U sklopu programskog rješenja kao mjera pogreške modela koristi se korijen srednje kvadratne pogreške modela (engl. *Root Mean Squared Error*, RMSE) ¹⁵⁶:

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum (y_a - \hat{y}_a)^2}{n}} \quad [34]$$

Gdje je y_a stvarna vrijednost mjerenja , \hat{y}_a vrijednost dobivena modelom te je n broj opažanja. Korijen srednje kvadratne pogreške je standardna statistička metoda koja se

¹⁵⁶ Yue, J., Yang, G., Li, C., Li, Z., Wang, Y., Feng, H., & Xu, B. (2017). Estimation of winter wheat above-ground biomass using unmanned aerial vehicle-based snapshot hyperspectral sensor and crop height improved models. *Remote Sensing*, 9(7), 708.

koristi kako bi odredile performanse modela^{157 158}. Vrijednost pogreške se može kretati od nula do beskonačno, s tim da što je vrijednost manja to model daje bolju predikciju.

6.1. Validacija modela neizrazitog sustava zaključivanja u uvjetima dobre vidljivosti

Validacijom modela neizrazitog sustava zaključivanja za određivanje indeksa rizika sudara u uvjetima dobre vidljivosti validirati će se rezultati za svaku podgrupu modela. Pri tome se u svakoj podgrupi validiraju izvedbe modela koji se služe Gaussovom krivuljom i modela koji koristi trapezoidnu funkciju. Model koji bude imao manju pogrešku odabire se kao povoljniji te ga se odabire za daljnju verifikaciju i korištenje.

6.1.1. Validacija modela I

Model I opisuje susret brodova čija je razlika kursova 180°, dakle nalaze se u suprotnim kursovima. Promatrani brod se nalazi desno od pramčanice vlastitog broda, to jest ima pozitivan pramčani kut. Validacija će se izvršiti za dva skupa uzoraka, koji predstavljaju dinamičke promjene ulaznih varijabli promatranog broda kroz vremenski period. U Tablici 41. prikazani su rezultati validacije modela I: D-međusobna udaljenost, EXP – mišljenje eksperata o riziku sudara, FCRI(T) - procjena modela koji koristi trapezoidnu funkciju, RMSE(T) - korijen srednje kvadratne pogreške za trapezoidni model, FCRI(G) - procjena modela koji koristi Gaussovu funkciju, RMSE(G) - korijen srednje kvadratne pogreške za Gaussov model.

Tablica 41. Validacija modela I. Priredio autor

	CPA	TCPA	D	EXP	FCRI(T)	RMSE(T)	FCRI(G)	RMSE(G)
Uzorak 1	0,5	14,8	7,4	0,75	0,78		0,65	
	0,5	12	5,9	0,75	0,78		0,65	
	0,5	7,4	3,6	0,75	0,78	0,032	0,65	0,096
	0,5	4,4	2,2	0,75	0,78		0,65	
	0,5	3,1	1,6	0,75	0,78		0,65	
Uzorak 2	1,6	23,2	7,2	0,25	0,25		0,24	
	1,6	19,5	6	0,25	0,25		0,24	
	1,6	15,5	4,9	0,25	0,25	0	0,24	0,14
	1,6	12,5	4	0,25	0,25		0,24	
	1,6	10,3	3,4	0,25	0,25		0,24	

Iz dobivenih podataka vidljivo je da je korijen srednje kvadratne pogreške manji kod modela koji koristi trapezoidne funkcije pripadnosti od modela koji koristi Gaussovu

¹⁵⁷ Karunasingha, D. S. K. (2022). Root mean square error or mean absolute error? Use their ratio as well. *Information Sciences*, 585, 609-629.

¹⁵⁸ Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific model development*, 7(3), 1247-1250.

krivulju kod oba dva skupa. Može se zaključiti da je trapezoidni model povoljniji od modela koji koristi Gaussovu krivulju kako bi opisao krivulje pripadnosti.

6.1.2. Validacija modela II

Kod modela II promatrani brod se nalazi desno od pramčanice vlastitog broda, dok je razlika kursova veća od 180° a manja ili jednaka od 270° . Promatrani brod prolazi ispred pramca vlastitog broda, to jest BCR varijabla je pozitivna. U Tablici 42. prikazani su rezultati validacije modela II kao i kod prethodnog modela:

Tablica 42. Validacija modela II. Priredio autor

	CPA	BCR	TCPA	D	EXP	FCRI(T)	RMSE(T)	FCRI(G)	RMSE(G)
Uzorak 1	0,4	1,2	20,8	7,7	0,5	0,5		0,554	
	0,4	1,2	16,3	6,6	0,75	0,64		0,64	
	0,4	1,2	12,7	4,7	0,75	0,91	0,104	0,67	0,218
	0,4	1,2	8,8	3,2	1	0,91		0,67	
	0,4	1,2	5,5	2,2	1	0,91		0,67	
Uzorak 2	1,4	3,1	21,6	10,1	0,25	0,25		0,29	
	1,4	3,1	17,5	8	0,25	0,25		0,29	
	1,4	3,1	13,9	6,6	0,25	0,25		0,29	
	1,4	3,1	10,1	4,9	0,25	0,25	0	0,28	0,029
	1,4	3,1	6,6	3,4	0,25	0,25		0,26	
	1,4	3,1	3,4	2,1	0,25	0,25		0,26	
	1,4	3,1	1,5	1,6	0,25	0,25		0,26	

Iz tablice je vidljivo kako je korijen srednje kvadratne pogreške manji kod modela s pripadajućim trapezoidnim funkcijama pripadnosti od modela koji se koristi Gaussovom krivuljom. Trapezoidni model je time povoljniji od modela koji koristi Gaussovu krivulju.

6.1.3. Validacija modela III

Model III promatrani brod se nalazi desno od pramčanice vlastitog broda, dok je razlika kursova veća od 180° a manja ili jednaka 270° . Promatrani brod prolazi po krmu vlastitog broda, to jest BCR varijabla je negativna. U Tablici 43. prikazani su rezultati validacije modela III za dva skupa podataka.

Tablica 43. Validacija modela III. Priredio autor

	CPA	BCR	TCPA	D	EXP	FCRI(T)	RMSE(T)	FCRI(G)	RMSE(G)
Uzorak 1	0,3	-0,6	23,3	9,5	0,5	0,45		0,48	
	0,3	-0,6	18,8	7,6	0,75	0,75		0,69	
	0,3	-0,6	13,9	5,6	0,9	0,91	0,05	0,78	0,179
	0,3	-0,6	10,4	4,2	0,9	0,91		0,72	
	0,3	-0,6	7	2,9	0,9	0,91		0,65	
	0,3	-0,6	4,5	1,8	0,9	0,91		-0,62	
Uzorak 2	1	-2,2	26,1	12,1	0,25	0,23		0,27	
	1	-2,2	21	9,7	0,5	0,4		0,37	
	1	-2,2	16,3	7,6	0,5	0,4	0,085	0,38	0,087
	1	-2,2	12,9	6	0,5	0,4		0,42	
	1	-2,2	9,6	4,5	0,5	0,47		0,49	
	1	-2,2	6,9	3,3	0,5	0,4		0,41	

Validacija modela ukazuje kako model sa trapezoidnim funkcijama pripadnosti daje bolje rezultate od modela koji koristi Gaussovu krivulju, te je dodatno i računski jednostavniji i učinkovitiji. Na temelju rečenoga, usvojiti će se model sa trapezoidnim funkcijama, te će ga se dodatno verificirati.

6.1.4. Validacija modela IV

Kod modela IV promatrani brod se nalazi desno od pramčanice vlastitog broda, dok je razlika kursova veća od 270° a manja ili jednaka od 360° . Promatrani brod prolazi ispred pramca vlastitog broda, to jest BCR varijabla je pozitivna. Dodatno je potrebno naglasiti kako su kod ovog modela teoretski moguće dvije situacije i to: promatrani brod se nalazi u pramčanom kutu do 112.5° te imamo obvezu izbjegavati promatrani brod, te drugi slučaj kada se promatrani brod nalazi i približava iz pramčanog kutu iza 112.5° , te nas pretječe, ali suprotno pravilima ne izvršava obvezu uklanjanja s puta dostignutom brodu. Model obje situacije promatra jednako, iz razloga što bi kod obje situacije u ovom modelu dolazilo do presijecanja vlastitoga kursa, i koriste se sve četiri varijable za procjenu indeksa rizika sudara. U Tablici 44. prikazani su rezultati validacije modela IV:

Tablica 44. Validacija modela IV. Priredio autor

	CPA	BCR	TCPA	D	EXP	FCRI(T)	RMSE(T)	FCRI(G)	RMSE(G)
Uzorak 1	0,6	0,6	28,7	5,4	0,25	0,28		0,33	
	0,6	0,6	23	4,3	0,5	0,38		0,42	
	0,6	0,6	17,6	3,3	0,5	0,57		0,5	
	0,6	0,6	14,4	2,7	0,75	0,75	0,09	0,56	0,18
	0,6	0,6	9,8	1,9	0,9	0,78		0,71	
	0,6	0,6	5,4	1,2	0,9	0,9		0,69	
	0,6	0,6	3,4	0,9	0,9	0,9		0,69	
Uzorak 2	1,2	1,5	30	6,1	0,5	0,5		0,42	
	1,2	1,5	24,7	5,1	0,5	0,5		0,42	
	1,2	1,5	21,4	4,4	0,5	0,5		0,44	
	1,2	1,5	16,9	3,6	0,5	0,5	0	0,5	0,053
	1,2	1,5	12,3	2,7	0,5	0,5		0,52	
	1,2	1,5	8,8	2,1	0,5	0,5		0,52	

Validacija modela ukazuje kako model sa trapezoidnim funkcijama pripadnosti daje bolje rezultate od modela koji koristi Gaussovu krivulju. Na temelju rečenoga, usvojiti će se model sa trapezoidnim funkcijama, te će ga se dodatno verificirati.

6.1.5. Validacija modela V

Modela V promatra plovidbenu situaciju gdje se promatrani brod nalazi desno od pramčanice vlastitog broda, dok je razlika kursova veća od 270° a manja ili jednaka od 360° . Promatrani brod prolazi po krmu vlastitog broda, te je BCR varijabla negativna. U Tablici 45. prikazani su rezultati validacije modela V za dva skupa uzorka:

Tablica 45. Validacija modela V. Priredio autor

	CPA	BCR	TCPA	D	EXP	FCRI(T)	RMSE(T)	FCRI(G)	RMSE(G)
Uzorak 1	0,99	-1,4	28	3,7	0,5	0,41		0,39	
	0,99	-1,4	23,3	3,1	0,5	0,51		0,49	
	0,99	-1,4	19,8	2,7	0,5	0,55		0,51	
	0,99	-1,4	16,4	2,3	0,5	0,55	0,058	0,51	0,044
	0,99	-1,4	12,3	1,8	0,5	0,56		0,51	
	0,99	-1,4	8,5	1,4	0,5	0,56		0,51	
Uzorak 2	1,2	-1,4	29	4,2	0,25	0,25		0,33	
	1,2	-1,4	25,5	3,8	0,25	0,25		0,4	
	1,2	-1,4	21	3,2	0,25	0,25		0,41	
	1,2	-1,4	18	2,8	0,25	0,25	0	0,41	0,15
	1,2	-1,4	13,3	2,2	0,25	0,25		0,41	
	1,2	-1,4	8,8	1,7	0,25	0,25		0,41	

Kod validacije modela V vidljivo je da model sa trapezoidnim funkcijama pripadnosti daje nešto lošiji rezultate od modela koji koristi Gaussovu krivulju u prvom skupu podataka, dok je kod drugog skupa podataka dao bolji rezultat nego model koji koristi Gaussove krivulje pripadnosti. S obzirom da je trapezoidni model računski jednostavniji a rezultati su podjednaki, usvojit će se model sa trapezoidnim funkcijama, te će ga se dodatno verificirati.

6.1.6. Validacija modela VI

Kod modela VI opisuje se plovidbena situaciju gdje se promatrani brod se nalazi desno od pramca vlastitog broda, te je razlika kursova 0° , to jest vlastiti i promatrani brod plove jednakim kursom. Model je validiran koristeći dva seta podataka. U Tablici 46. prikazani su rezultati validacije modela VI:

Tablica 46. Validacija modela VI. Priredio autor

	CPA	TCPA	D	EXP	FCRI(T)	RMSE(T)	FCRI(G)	RMSE(G)
Uzorak 1	0,8	21,9	1,7	0,5	0,5		0,41	
	0,8	18,3	1,5	0,5	0,5		0,56	
	0,8	15,6	1,3	0,75	0,69	0,025	0,62	0,102
	0,8	12,5	1,2	0,75	0,75		0,64	
	0,8	8	1	0,75	0,75		0,64	
	0,8	5,1	0,9	0,75	0,75		0,64	
0,4	23,4	2,4	0,75	0,75	0,63			
0,4	18,9	1,9	0,75	0,83	0,64			
Uzorak 2	0,4	16,2	1,7	0,9	0,91	0,035	0,68	0,153
	0,4	13	1,4	0,9	0,92		0,73	
	0,4	8,7	1	0,9	0,92		0,76	
	0,4	5,2	0,7	0,9	0,92		0,76	
	0,4	5,2	0,7	0,9	0,92		0,76	

Validacije modela VI ukazuje kako model sa trapezoidnim funkcijama pripadnosti daje bolje rezultate od modela koji koristi Gaussovu krivulju pripadnosti. Na temelju rezultata moguće je usvojiti model koji koristi trapezoidne funkcije pripadnosti.

6.1.7. Validacija modela VII

Model VII opisuje susret brodova sa razlikom kursova 180° , dakle nalaze se u suprotnim kursovima. Promatrani brod se nalazi lijevo od pramčanice vlastitog broda. U Tablici 47. prikazani su rezultati validacije modela VII za dva skupa podataka:

Tablica 47. Validacija modela VII. Priredio autor

	CPA	TCPA	D	EXP	FCRI(T)	RMSE(T)	FCRI(G)	RMSE(G)
Uzorak 1	0,4	21,1	8,1	0,75	0,74		0,56	
	0,4	16,7	6,4	0,75	0,75		0,62	
	0,4	12,7	4,8	0,75	0,75	0,01	0,62	0,169
	0,4	10	3,8	0,75	0,75		0,62	
	0,4	6,9	2,6	0,75	0,75		0,64	
	0,4	3,6	1,4	0,9	0,92		0,64	
0,8	25	7,4	0,25	0,25	0,33			
0,8	20,4	5,9	0,5	0,5	0,41			
Uzorak 2	0,8	16,5	4,8	0,5	0,5	0	0,41	0,089
	0,8	13,9	4,1	0,5	0,5		0,41	
	0,8	10,3	3,1	0,5	0,5		0,4	
	0,8	6,6	2	0,5	0,5		0,41	
	0,8	6,6	2	0,5	0,5		0,41	

Podatci dobiveni validacijom modela VII ukazuje kako model sa trapezoidnim funkcijama daje bolje rezultate u oba ispitivana skupa podataka. Na temelju prikazanih rezultata prihvaća se model koji koristi trapezoidne funkcije pripadnosti.

6.1.8. Validacija modela VIII

Plovidbena situacija koje se obrađuje modelom VIII podrazumijeva situaciju gdje se promatrani brod se nalazi lijevo od pramčanice vlastitog broda, razlika kursova je manja od 180 ° a veća ili jednaka od 90°. Promatrani brod prolazi isprede pramca vlastitog broda, to jest BCR varijabla je pozitivna. U Tablici 48. prikazani su rezultati validacije modela VIII:

Tablica 48. Validacija modela VIII. Priredio autor

	CPA	BCR	TCPA	D	EXP	FCRI(T)	RMSE(T)	FCRI(G)	RMSE(G)
Uzorak 1	1,2	2,5	17,3	6,4	0,5	0,56		0,56	
	1,2	2,5	14,4	5,2	0,5	0,56		0,56	
	1,2	2,5	12	4,4	0,5	0,56	0,058	0,56	0,062
	1,2	2,5	9,6	3,6	0,5	0,56		0,56	
	1,2	2,5	7,2	2,8	0,5	0,56		0,56	
	1,2	2,5	6	2,4	0,5	0,56		0,56	
0,3	1	29,6	8,2	0,75	0,75	0,66			
0,3	1	26	7,2	0,75	0,75	0,67			
Uzorak 2	0,3	1	20	5,5	0,75	0,75	0,026	0,68	0,077
	0,3	1	16	4,4	0,75	0,81		0,78	
	0,3	1	13,6	3,8	0,9	0,92		0,82	
	0,3	1	10,8	3	0,9	0,91		0,81	
	0,3	1	10,8	3	0,9	0,91		0,81	

Validacija modela VIII otkriva bolje rezultate modela sa trapezoidnim funkcijama pripadnosti od modela koji koristi Gaussovu krivulju pripadnosti u oba ispitivana skupa podataka. Na temelju dobivenih rezultata prihvaća se model koji koristi trapezoidne funkcije pripadnosti.

6.1.9. Validacija modela IX

Model IX podrazumijeva plovdbenu situaciju gdje se promatrani brod se nalazi lijevo od pramčanice vlastitog broda, razlika kursova je manja od 180 ° a veća ili jednaka od 90°. Promatrani brod prolazi po krmi vlastitog broda, to jest BCR varijabla je negativna. U Tablici 49. prikazani su rezultati validacije modela:

Tablica 49. Validacija modela IX. Priredio autor

	CPA	BCR	TCPA	D	EXP	FCRI(T)	RMSE(T)	FCRI(G)	RMSE(G)
Uzorak 1	1,6	1,8	28	12	0,25	0,25		0,25	
	1,6	1,8	22,5	9,6	0,25	0,25		0,36	
	1,6	1,8	17,9	7,7	0,25	0,26	0,005	0,4	0,103
	1,6	1,8	13,1	5,7	0,5	0,5		0,4	
	1,6	1,8	9	4,1	0,5	0,5		0,4	
	1,6	1,8	7,4	3,5	0,5	0,5		0,4	
0,2	0,3	26	10,2	0,5	0,48	0,45			
0,2	0,3	20,1	8	0,75	0,75	0,65			
Uzorak 2	0,2	0,3	15,2	6,1	0,9	0,89	0,015	0,8	0,127
	0,2	0,3	10,7	4,3	0,9	0,91		0,79	
	0,2	0,3	6,3	2,5	0,9	0,92		0,72	
	0,2	0,3	5,1	2	0,9	0,92		0,72	

Prikazanim podacima validacije modela IX uočljivo je kako model sa trapezoidnim funkcijama pripadnosti ima rezultate koji su bolji od rezultata modela koji koristi Gaussovu krivulju pripadnosti u oba ispitivana skupa podataka. Na temelju prikazanog može se usvojiti model koji koristi trapezoidne funkcije pripadnosti.

6.1.10. Validacija modela X

Model X određuje neizraziti indeks rizika sudara kod plovdbene situaciju gdje se promatrani brod se nalazi lijevo od pramčanice vlastitog broda, razlika kursova je manja od 90 ° a veća 0°. Promatrani brod prolazi ispred pramca vlastitog broda, to jest BCR varijabla je pozitivna. U Tablici 50. prikazani su rezultati validacije modela X:

Tablica 50. Validacija modela X. Priredio autor

	CPA	BCR	TCPA	D	EXP	FCRI(T)	RMSE(T)	FCRI(G)	RMSE(G)
Uzorak 1	0,4	0,5	22,6	5,7	0,5	0,64		0,61	
	0,4	0,5	16,7	4	0,75	0,77		0,67	
	0,4	0,5	13,9	3,3	0,9	0,92	0,064	0,69	-0,08
	0,4	0,5	9,1	2,2	0,9	0,92		0,78	
	0,4	0,5	6,4	1,5	0,9	0,92		0,81	
Uzorak 2	0,9	1	20,3	5,6	0,5	0,5		0,45	
	0,9	1	13,8	3,6	0,75	0,75		0,59	
	0,9	1	10,1	2,6	0,75	0,79	0,02	0,68	0,167
	0,9	1	6,2	1,7	0,9	0,92		0,67	
	0,9	1	4	1,2	0,9	0,92		0,67	

Validacijom modela X dobiju se rezultati koji ukazuju kako su u prosjeku predikcije modela sa trapezoidnim funkcijama bolje od modela koji koristi Gaussovu krivulju pripadnosti u oba ispitivana skupa podataka. Na temelju rezultata, usvaja se model koji koristi trapezoidne funkcije pripadnosti.

6.1.11. Validacija modela XI

Neizraziti indeks rizika sudara kod modela XI određuje se za plovidbene situaciju gdje se promatrani brod se nalazi lijevo od pramca vlastitog broda, te je razlika kursova manja od 90 ° a veća 0°. Promatrani brod prolazi po krmi vlastitog broda, to jest *BCR* varijabla je negativna. U Tablici 51. prikazani su rezultati validacije modela XI:

Tablica 51. Validacija modela XI. Priredio autor

	CPA	BCR	TCPA	D	EXP	FCRI(T)	RMSE(T)	FCRI(G)	RMSE(G)
Uzorak 1	0,4	0,6	28	5,3	0,5	0,5		0,46	
	0,4	0,6	22,6	4,3	0,75	0,63		0,6	
	0,4	0,6	18	3,4	0,75	0,73		0,61	
	0,4	0,6	13,9	2,7	0,75	0,75	0,049	0,63	0,167
	0,4	0,6	8,9	1,8	0,9	0,91		0,68	
	0,4	0,6	5,6	1,2	0,9	0,91		0,64	
Uzorak 2	2,1	2,2	28	7	0,125	0,17		0,2	
	2,1	2,2	22,2	5,7	0,25	0,23		0,22	
	2,1	2,2	17,8	4,7	0,25	0,25		0,25	
	2,1	2,2	13,7	3,9	0,25	0,25	0,019	0,25	0,033
	2,1	2,2	8,7	2,9	0,25	0,25		0,25	
	2,1	2,2	5,5	2,5	0,25	0,25		0,25	

Prikazani rezultati validacije modela XI ukazuju kako su u prosjeku pogreške predikcije modela sa trapezoidnim funkcijama manje od modela koji koristi Gaussovu krivulju

pripadnosti u oba ispitivana skupa podataka. Na temelju validacije usvaja se model koji koristi trapezoidne funkcije pripadnosti.

6.1.12. Validacija modela XII

Modela XII kao rezultat daje neizrazit indeks rizik sudara u plovidbenim situacijama u kojima se promatrani brod nalazi lijevo od pramca vlastitog broda, dok je razlika kursova 0°, to jest vlastiti i promatrani brod plove istim kursom. U Tablici 52. prikazani su rezultati validacije modela XII.

Tablica 52. Validacija modela XII. Priredio autor

	CPA	TCPA	D	EXP	FCRI(T)	RMSE(T)	FCRI(G)	RMSE(G)
Uzorak	0,8	30	1,8	0,5	0,5	0	0,41	0,095
1	0,8	9,5	0,9	0,75	0,75		0,64	
Uzorak	1,3	10,9	1,7	0,5	0,5	0	0,47	0,027
2	1,3	1,4	1,3	0,5	0,5		0,47	

Rezultati validacije modela XII jasno prikazuju znatno bolje performanse modela sa trapezoidnim funkcijama od modela koji koristi Gaussovu krivulju pripadnosti u oba ispitivana skupa podataka. Na temelju validacije usvaja se model koji koristi trapezoidne funkcije pripadnosti. Validacijom svih podmodela neizrazitog sustava zaključivanja usvojeni su podmodeli koji koriste trapezoidne funkcije pripadnosti kako bi opisali ulazne varijable. Rezultati su u skladu i sa istraživanjem ¹⁵⁹ koje ukazuje da trapezoidne funkcije pripadnosti nadmašuju sve druge oblike funkcije pripadnosti u modelima koji se koriste u aplikacijama neizrazitih sustava.

6.2. Validacija modela neizrazitog sustava zaključivanja u okolnostima smanjene vidljivosti

Validacijom modela neizrazitog sustava zaključivanja za određivanje indeksa rizika sudara u uvjetima slabe ispituju se rezultati za modela koji se služe Gaussovom krivuljom i modela koji koristi trapezoidnu funkciju. Povoljniji model se odabire za daljnje korištenje. Model neizrazitog sustava u okolnostima smanjene vidljivosti kao rezultat daje neizraziti indeks rizik sudara pri smanjenoj vidljivosti $FCRI_{LV}$ unutar vrijednost nula do jedan. U Tablici 53. prikazani su rezultati validacije modela.

¹⁵⁹ Kabir, M., & Kabir, M. M. J. (2021). Fuzzy membership function design: An adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) based approach. *Proceedings of the 2021 International Conference On Computer Communication and Informatics (ICCCI) (pp. 1-5). IEEE.*

Tablica 53. Validacija modela neizrazitog sustava zaključivanja u okolnostima smanjene vidljivosti. Priredio autor

FCRI	Vidljivost	EXP	FCRI_LV(T)	RMSE(T)	FCRI_LV(G)	RMSE(G)
0,25	20	0.2500	0,28		0,28	
0,25	1,5	0.3750	0,45		0,42	
0,5	15	0.5000	0,5		0,5	
0,5	4	0.6250	0,58		0,56	
0,5	1	0.7500	0,75	0,032	0,69	0,038
0,5	0,5	0.7500	0,75		0,71	
0,75	8	0.7500	0,75		0,75	
0,75	2	0.8750	0,875		0,89	

Rezultati validacije modela neizrazitog sustava zaključivanja u okolnostima smanjene vidljivosti prikazuju nešto bolje performanse modela sa trapezoidnim funkcijama od modela koji koristi Gaussovu krivulju. Budući da je model koji koristi trapezoidne funkcije pripadnosti računski jednostavnije usvaja se baš taj model.

7. VERIFIKACIJA NEIZRAZITOG INDEKSA RIZIKA SUDARA STUDIJAMA SLUČAJA

Verifikacija modela neizrazitog indeksa rizika sudara izvršit će se studijama slučaja koristeći dvije skupine podataka, te posebnim scenarijom u okolnostima gustog prometa. Navedenim podacima kreirati će plovidbene situacije koristeći ranije navedeni nautički simulatori. Prilikom ispitivanja evidentirati će se mišljenja eksperata o riziku sudara kako bi se modeli mogli verificirati sa novim skupom varijabli.

Prva skupina podataka odnosi se na stvarne pomorske nezgode koristeći dostupne podatke, te će se verificirati samo modeli neizrazitog sustava u uvjetima dobre vidljivosti, budući su se navedene nezgode dogodile u uvjetima dobre vidljivosti.

Drugu skupina podataka čine scenariji korišteni u radu Pedersen 2023¹⁶⁰. Navedeni rad prikazuje metodu i predlaže programsku podršku pri generiranju scenarija susreta brodova, te ima otvoreni pristup svima zainteresiranima u razvoju algoritama povezanih sa izbjegavanjem sudara i nasukavanja. Scenariji iz navedenog rada putem kojih će se verificirati neizraziti sustav temelje se na scenarijima klasifikacijskog društva Det Norske Veritas (DNV)¹⁶¹ dostupnim na stranici GitHub. Putem navedenih scenarija verificirati će se modeli neizrazitog sustava za stanje dobre i smanjene vidljivosti.

Treću scenarij podrazumijeva plovidbenu situaciju u uvjetima vrlo gustog prometa, koja je kreirana na simulatoru Pomorskog Fakulteta u Rijeci. Navedenim podacima verificirati će također modeli neizrazitih sustava u uvjetima dobre i smanjene vidljivosti.

Postavke radarskog uređaja koji čini dio nautičkog simulatora koje su postavljene tijekom verifikacije su sljedeće:

- Radarska orijentacija: North Up
- Vektori: pravi
- Duljina vektora: 15 minuta
- Stabilizacija: kroz vodu
- CPA alarm :1 nautička milja
- TCPA: 12 minuta
- Radarska udaljenost: Sukladno potrebi, 12 ili 6 nautičkih milja.

¹⁶⁰ Pedersen, T. A., Vasanthan, C., Karolius, K., Engelhardtsen, Ø., Houweling, K. P., & Jørgensen, A. (2023). Generating Structured Set of Encounters for Verifying Automated Collision and Grounding Avoidance Systems. *Journal of Physics: Conference Series* 2618(1), 012013.

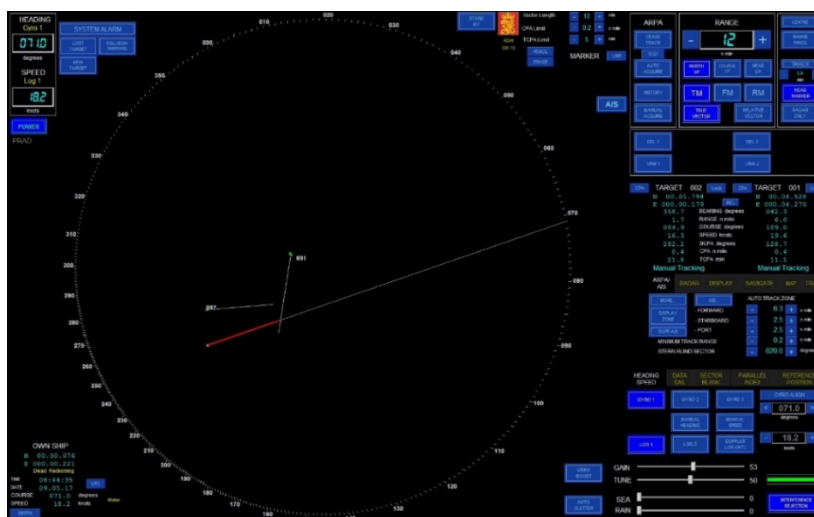
¹⁶¹ GitHub.(2024). *DNV Ship Traffic Generator*. Raspoloživo na: <https://github.com/dnv-open-source/shiptraffic-generator>, (pristupljeno 12. veljače 2024).

7.1. Verifikacija modela prema studijama slučaja dobivenih istraživanjem pomorskih nesreća

Verifikacija modela neizrazitog sustava zaključivanja u ovom dijelu oslanja se na dvije pomorske nezgode. Prva pomorska nezgoda dobila je svojevrjeme velik publicitet budući se radilo o sudara američkog ratnog broda čije je rezultat bi tragičan. Ratni brodovi uobičajeno imaju više članova plovidbene straže na mostu nego brodovi trgovačke mornarice, te je očekivano da bi trebali biti manje skloni nezgodama, pogotovo ovakve vrste. U drugoj plovidbenoj nezgodi obrađuje se recentni događaj, koji je također završio tragično.

7.1.1. Sudar kontejnerskog broda ACX Crystal i ratnog broda USS Fitzgerald

Scenarij se temelji na izvješću japanskog odbora za sigurnost u prometu (*Japan Transport Safety board, JTSB*)¹⁶². Sudar kontejnerskog broda ACX Crystal i ratnog broda USS Fitzgerald dogodio se 17. lipnja 2017. na sjevernom dijelu Tihog oceana, 12,3 nautičkih milja od svjetionika Irouzaki, na geografskoj poziciji 34°31,3' sjeverne geografske širine i 139°04,3' istočne geografske dužine. Prema podacima unesenim u brodski dnevnik, vidljivost je bila dobra, te stanje mora 4 mjereno Beaufortovom skalom. U nesreći je poginulo sedam pomoraca, članova posade ratnog broda USS Fitzgerald. Dostupni podatci su se obradili na način da su u nautički simulator uneseni podatci iz izvješća japanskog odbora, te su kreirane plovidbene situacije koje su promatrane i procjenjivane od grupe eksperata (Slika 52.).



Slika 52. Rekonstrukcija radarske slike u 10:15 temeljene na izvješću JTSB¹⁶³. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator

¹⁶² Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. *Japan Transport Safety Board*. Raspoloživo na: https://www.mlit.go.jp/jtsb/eng-mar_report/2019/2017tk0009e.pdf, (pristupljeno 18. ožujka 2024).

¹⁶³ Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. *Japan Transport Safety Board*. Raspoloživo na: https://www.mlit.go.jp/jtsb/eng-mar_report/2019/2017tk0009e.pdf, (pristupljeno 18. ožujka 2024).

Plovidbena situacija je rekonstruirana i simulirana na način da je vlastiti brod ACX Crystal, koji plovi u kursu 088°, brzinom od 16,4 čvorova, dok se ratni brod USS Fitzgerald približava s lijeve strane u kursu 188°, brzinom 19,9 čvorova.

Varijable korištene u rekonstrukciji plovidbene situacije upotrijebljene su nadalje u neizrazitom sustavu kako bi se odredio *FCRI* (Tablica 54.). *FCRI* se s obzirom na razliku kursova određivao u modelu VIII.

Tablica 54. Verifikacija rezultata za sudar ACX Crystal i USS Fitzgerald. Priredio autor

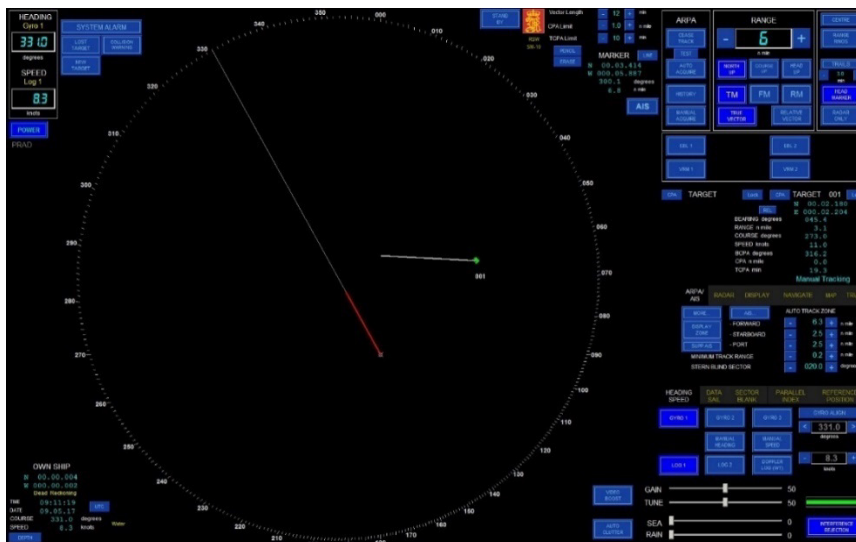
Vrijeme	CPA	BCR	TCPA	Medusobna udaljenost	Ekspertno mišljenje	FIS	ARPA alarm
10:15	0	0,1	17,7	8,2	VH	0,8661	N
10:20	0,4	0,7	11	6	VH	0,84	Y
10:23	0,2	0,4	8	4,4	VH	0,8936	Y
10:26	0	0,05	4,8	2,7	VH	0,9122	Y
10:28	0	0,05	3	1,7	VH	0,9122	Y

Iz dobivenih podataka vidljivo je kako izlazna vrijednost neizrazitog sustava odlučivanja u trenutku 10:15 iznosi 0,8661 ($FCRI=0,8661$), dok ARPA sustav nije oglasio protusudarni alarm. Eksperti su također ocijenili stupanj rizika kao jako visok. Kod sljedećeg opažanja u 10:20, *FCRI* je nešto manji, iako još uvijek jako visok (0,84), budući da je *CPA* porastao na 0,4 nautičke milje. U ovom opažanju bi već i ARPA sustav alarmirao člana plovidbene straže. Bitno je primijetiti da je vrijeme do sudara u tom trenutku samo 11 minuta. Za to vrijeme još uvijek je moguće izbjeći sudar, međutim ako se časnik odluči zvati zapovjednika, ne ostaje mnogo vremena za izvesti manevar izbjegavanja sudara. Sljedeći dostupni podatci su u vremenu 10:23 kad neizraziti sustav procjenjivanja donosi dosad najveću procjenu neizrazitog indeksa rizika sudara koji iznosi 0,8936. Eksperti se također slažu sa donesenom procjenom, te bi i ARPA sustav imao aktivan alarm opasnosti sudara. Kod sljedeća dva opažanja neizraziti indeks rizika sudara bio bi jednak te iznosi 0,9122, s čime postoji konsenzus eksperata. ARPA sustav bi također imala aktivni alarm opasnosti sudara. Verifikacijom modela dokazano je kako bi neizraziti sustav zaključivanja mnogo ranije upozorio članove plovidbene straže na opasnost od sudara čime se mogao izbjeći sudar. Dodatno, sustav vrlo rano ocjenjuje neizraziti indeks rizika sudara kao jako visok te na taj način pravovremeno obavještava člana plovidbene straže da je situacija vrlo ozbiljna.

7.1.2. Sudar broda Verity i broda Polesie

Do sudara brodova Verity i Polesie došlo je 24. studenog 2023. u Sjevernom moru, te je kao posljedica došlo do smrti jedne osobe i nestanka četiri osobe za koje se pretpostavlja da su također preminule. Također je došlo do potonuća broda Verity. Podatci korišteni u verifikaciji modela temelje se na podacima dostupnim putem dostupnih AIS podataka dobivenih putem VesselFinder aplikacije. Nakon što se rekonstruirala plovidbena

situacija na nautičkom simulatoru (Slika 53.), može se odredit skup ulaznih varijabli za verifikaciju neizrazitog sustava odlučivanja. Prilikom procjene rizika koristeći nautički simulator plovidbena situacija je kreirana na način da je vlastiti brod Verity, koji plovi u kursu 331°, brzinom od 8,3 čvorova, dok se brod Polesie približava s lijeve strane u kursu 273°, brzinom 11 čvorova.



Slika 53: Rekonstrukcija radarske slike u 01:39. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator

U procesu verifikacije prikupila su se mišljenja eksperata i dobili rezultati neizrazitog sustava zaključivanja (Tablica 55.).

Tablica 55: Verifikacija rezultata za sudar Verity i Polesie. Priredio autor

Vrijeme	CPA	BCR	TCPA	Medusobna udaljenost	Ekspertno mišljenje	FIS	ARPA alarm
01:39	0,1	0,1	16,7	3,1	H	0,774	N
01:40	0,1	0,1	15	2,8	VH	0,92	N
01:43	0,1	0,1	12,3	2,4	VH	0,92	N
01:47	0,1	0,1	8,5	1,7	VH	0,92	Y
01:50	0,1	0,1	5,5	1,2	VH	0,92	Y

U trenutku 01:39 sati vrijednost neizrazitog indeksa rizika sudara iznosila je 0,774, dok kod navedenih postavki ARPA sustava još uvijek ne bi bilo alarma, budući je *TCPA* relativno velik. Eksperti su ocijenili stupanj rizika kao visok. Kod sljedećeg opažanja u 01:40, *FCRI* je već jako visok, te iznosi 0,92. Eksperti određuju vrijednost rizika sudara kao jako visoku, što je u skladu neizrazitim sustavom. Pri ovom opažanju ARPA sustav još uvijek ne bi alarmirao člana plovidbene straže. Sljedeći podatci obrađeni su u trenutku 01:43 te neizraziti sustav daje nadalje kontinuirano jako visok neizrazitog indeksa rizika sudara koji iznosi 0,92. Eksperti se također slažu sa donesenom procjenom, dok ARPA

sustav još ne daje alarm rizika sudara. Nadalje, kod sljedeća dva opažanja ARPA sustav bi alarmirao člana plovidbene straže, dok bi neizraziti indeks rizika sudara ostao jednako visok te iznosi 0,92, s čime se slažu i eksperti. Kod ove verifikacije, uočava se prednost neizrazitog sustava zaključivanja u odnosu na novitet korištenja dodatne varijable *Međusobna udaljenost*. Navedena prednost se očituje u tome da kada se drugi brod približava iza subočice vlastitoga broda relativna brzina približavanja je često mala. Kao posljedica toga čak i kad se drugi brod nalazi u opasnoj blizini, vrijeme do najbližeg prolaza može biti relativno dugo, te ARPA sustav se ne oglašava. Neizraziti sustav zaključivanja uzima u obzir kako se drugu brod nalazi u opasnoj blizini, iako je ostalo još dosta vremena do najbližeg prolaza. Model neizrazitog sustava zaključivanja značajno bi poboljšao protusudarno uzbunjivanje pravovremenim uzbunjivanjem članova plovidbene straže.

7.2. Verifikacija modela studijama slučaja korištenjem baze podataka klasifikacijskog društva DNV

Verifikacija modela neizrazitog sustava zaključivanja u ovom dijelu prikazuje šest plovidbenih situacija, pri čemu u prve četiri situacije vlastiti brod se susreće sa dva broda, dok se kod druge dvije situacije vlastiti brod susreće sa tri broda. Kod svih šest situacija verificirati će se neizraziti sustav zaključivanja za određivanje neizrazitog indeksa rizika sudara pri uvjetima dobre i smanjene vidljivosti, usporedivši ih s mišljenjima eksperata te dodatno obzirom na ARPA uređaj.

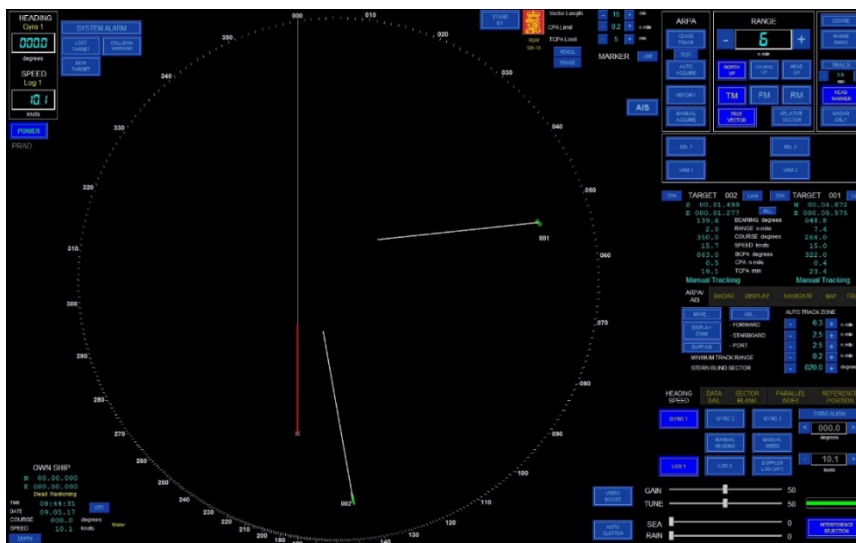
7.2.1. Plovidbeni scenarij DNV 1.

Plovidbeni scenarij DNV 1 opisuje susret vlastitog broda sa 2 broda na otvorenom moru, pri čemu horizontalna vidljivost nije smanjena. Scenarij pretpostavlja nepostojanje zanosa, te kurs i brzina brodova odgovaraju kursu i brzini preko dna. Vlastiti brod plovi u kursu 000°, brzinom od 10,1 čvor. Podatci vezani uz druge brodove prikazani su u Tablici 56.: CTW – kurs kroz vodu, COG – Kurs preko dna, SOG – brzina preko dna, STW – brzina kroz vodu, R – međusobna udaljenost, ω – azimut.

Tablica 56: Plovidbeni podatci za brodove u scenariju DNV 1. Priredio autor

Brod	CTW	COG	SOG	STW	CPA	TCPA	R	ω	BCR
T1	264	264	15	15	0,4	23	7,4	49	0,5
T2	350	350	15,7	15,7	0,48	20	2	140	1,1

Koristeći podatke iz gornje tablice moguće je prikazati plovidbenu situaciju radarskom slikom postavljenom prema gore navedenim postavkama (Slika 54.).



Slika 54. Prikaz radarske slike za scenarij broj DNV 1. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator

Modeli koji se koriste pri izračunu neizrazitog indeksa rizika sudara su za brod T1 model II, te za brod T2 model IV. Podatci dobiveni neizrazitim sustavom, mišljenja eksperata te status alarma ARPA uređaja prikazani su u Tablici 57.

Tablica 57. Verifikacija modela koristeći scenarij DNV 1. Priredio autor

Brod	FCRI	EXP	ARPA
T1	0,5975	M	N
T2	0.6452	H	N

Neizraziti sustav zaključivanja je nešto opasnijim procijenio brod T2 sa vrijednošću neizrazitog indeksa rizika sudara od 0,6452 dok je brod T1 ocijenjen sa 0,5962. Eksperti se slažu sa dobivenim rezultatima. Bitno je napomenuti da se radi o trenutnim vrijednostima, te se one mijenjaju kako se mijenjaju i ulazni podatci, *Međusobna udaljenost* i *TCPA*. ARPA uređaj ne bi oglosio upozorenje za nijednu od meta.

Koristeći dobivene podatke, moguće je verificirati neizraziti sustav zaključivanja u okolnostima smanjene vidljivosti, te će se pri rekonstrukciji scenarija DNV 1 pretpostaviti smanjenje vidljivosti na 2 nautičke milje. Nakon što se unesu varijable u neizraziti sustav, dobiju se rezultati kao u Tablici 58.:

Tablica 58. Verifikacija modela FCRI_LV koristeći scenarij DNV 1. Priredio autor

Brod	FCRI	Vidljivost	FCRI_LV	EXP
T1	0,5975	2	0,73	H
T2	0.6452	2	0,7636	H

Rezultati ukazuju da je u oba slučaja došlo do povećanja rizika, što je i očekivani, dok je i nadalje brod T1 nešto manje opasan od broda T2. Dobivene vrijednost odgovaraju po

svojem iznosu i vrijednostima koje su naznačili eksperti, te možemo reći da postoji suglasnost eksperata po pitanju stupnja rizika.

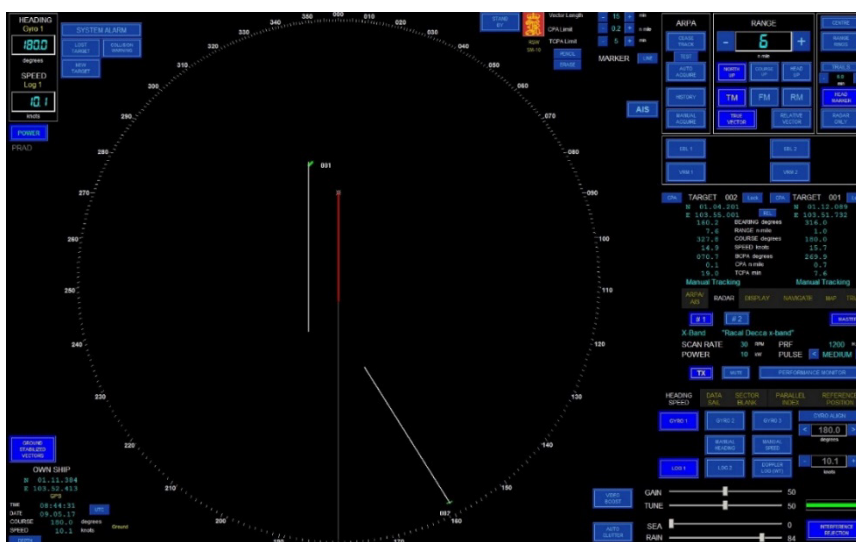
7.2.2. DNV plovidbeni scenarij DNV 2.

Plovidbeni scenarij DNV 2 prikazuje susret vlastitog broda sa 2 broda na otvorenom moru, gdje vidljivost nije smanjena. Pri susretu brodova nema zanosa, te kurs i brzina brodova odgovaraju kursu i brzini preko dna. Vlastiti brod plovi u kursu 180°, brzinom od 10,1 čvor. U Tablici 59. vidljivi su plovidbeni podatci navedenih brodova:

Tablica 59. Plovidbeni podatci za brodove u scenariju DNV 2. Priredio autor

Brod	CTW	COG	STW	SOG	CPA	TCPA	R	ω	BCR
T1	180	180	15,7	15,7	0,68	8	1	317	NA
T2	328	328	15	15	0,11	19	7,6	160	-0,3

Iz podataka je vidljivo kako brod T2 prolazi vlastitom brodu 3 kabela po krmu, dok brod T1 pretječe vlastiti brod. Na temelju podataka moguće je rekonstruirati plovidbenu situaciju kao na Slici 55.



Slika 55. Prikaz radarske slike za scenarij broj DNV 2. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator

Modeli koji se koriste pri izračunu neizrazitog indeksa rizika sudara su za brod T1 model VI, te za brod T2 model IX. Podatci dobiveni neizrazitim sustavom, mišljenja eksperata te status alarma ARPA uređaja prikazani su u Tablici 60.

Tablica 60. Verifikacija modela koristeći scenarij broj DNV 2. Priredio autor

Brod	FCRI	EXP	ARPA
T1	0,75	H	Y
T2	0.75	H	N

Neizraziti sustav zaključivanja procijenio je jednak iznos neizrazitog indeks rizika sudara za oba promatrana broda u datom trenutku. Eksperti se slažu sa dobivenim rezultatima. Bitno je napomenuti da su kod promatranog broda T2 vrijednosti *TCPA* i *Međusobna udaljenost* još relativno veliki, te će se *FCRI* s vremenom povećavati kod navedenog broda. Kod broda T1 vrijednosti *TCPA* i *Međusobna udaljenost* su relativno male te se neizraziti indeks rizika sudara ne bi dalje povećavao. ARPA uređaj je oglasio upozorenje za brod T1, dok za brod T2 upozorenje nije oglašeno s obzirom da je *TCPA* još relativno visok.

Nadalje se koristeći dobivene podatke može pristupiti verifikaciji modela u uvjetima smanjene vidljivosti, te će se verificirati model uz stanje horizontalne vidljivosti od samo pola nautičke milje. Rezultati verifikacije prikazani su u Tablici 61.:

Tablica 61. Verifikacija modela FCRI_LV koristeći scenarij DNV 2. Priredio autor

Brod	FCRI	Vidljivost	FCRI_LV	EXP
T1	0,75	0,5	1	VVH
T2	0,75	0,5	1	VVH

Može se primijetiti kako su oba broda u stanju tako loše vidljivosti ocijenjena s obzirom na stupanj rizika maksimalnom vrijednošću. U situacija jako loše vidljivosti, kao što je 0,5 nautičke milje potrebno je maksimalno izbjegavati pozicije opasnih blizina (engl. *close quarters situations*) te se s obzirom na to i mišljenje eksperata u potpunosti slaže s izlaznom vrijednosti modela.

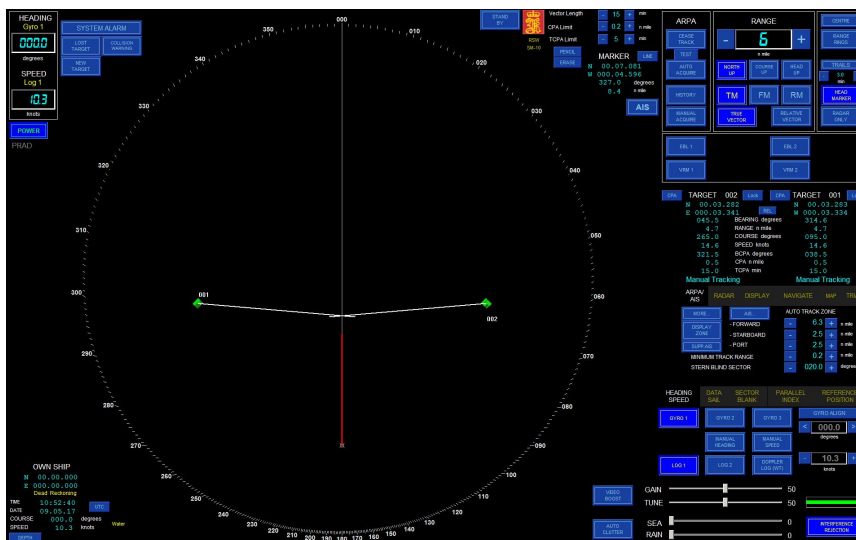
7.2.3. Plovidbeni scenarij DNV 3.

Plovidbeni scenarij DNV 3 prikazuje susret vlastitog broda sa 2 broda na otvorenom moru, gdje vidljivost nije smanjena. Oba broda se nalaze na istoj udaljenosti, imaju jednake vrijednosti *CPA* i *TCPA* te isti iznos ali različit predznak pramčanog kuta. Pri susretu brodova nema zanosa, te kurs i brzina brodova odgovaraju kursu i brzini preko dna. Vlastiti brod plovi u kursu 000°, brzinom od 10,3 čvora. Prikaz osnovnih plovidbenih podataka prikazani je u Tablici 62.:

Tablica 62. Plovidbeni podatci za brodove u scenariju DNV 3. Priredio autor

Brod	CTW	COG	SOG	STW	CPA	TCPA	R	ω	BCR
T1	095	095	14,6	14,6	0,5	15	4,7	314,6	0,5
T2	265	265	14,6	14,6	0,5	15	4,7	045,5	0,5

Koristeći prikazane plovidbene podatke može se prikazati i radarska slika plovidbene situacije (Slika 56.).



Slika 56. Prikaz radarske slike za scenarij broj DNV 3. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator

Modeli koji se koriste pri izračunu neizrazitog indeksa rizika sudara su za brod T1 model VIII, te za brod T2 model II. Podatci dobiveni neizrazitim sustavom, mišljenja eksperata te status alarma ARPA uređaja prikazani su u Tablici 63.

Tablica 63. Verifikacija modela koristeći scenarij broj DNV 3. Priredio autor

Brod	FCRI	EXP	ARPA
T1	0,905	VH	N
T2	0,914	VH	N

Neizraziti sustav zaključivanja procijenio je nešto veći iznos neizrazitog indeksa rizika sudara za brod T2 u trenutku opažanja od broda T1. Eksperti označuju oba broda sa vrlo visokim rizikom, što bi bilo u skladu sa modelom, te se može reći da model daje nešto detaljniju sliku. ARPA uređaj ne bi oglasio upozorenje za nijedan brod. Nadalje se dobivene podatcima može pristupiti verifikaciji modela u uvjetima smanjene vidljivosti, te će se verificirati model uz stanje horizontalne vidljivosti od jedne nautičke milje. Rezultati verifikacije prikazani su u Tablici 64.:

Tablica 64. Verifikacija modela u uvjetima smanjene vidljivosti koristeći scenarij DNV 3. Priredio autor

Brod	FCRI	Vidljivost	FCRI_LV	EXP
T1	0,905	1	1	VVH
T2	0,914	1	1	VVH

Oba broda u stanju smanjene vidljivosti ocijenjena su maksimalnom vrijednošću neizrazitog indeksa rizika sudara. ARPA sustav nije oglasio alarma, iako je rizik jako velik prema ekspertima.

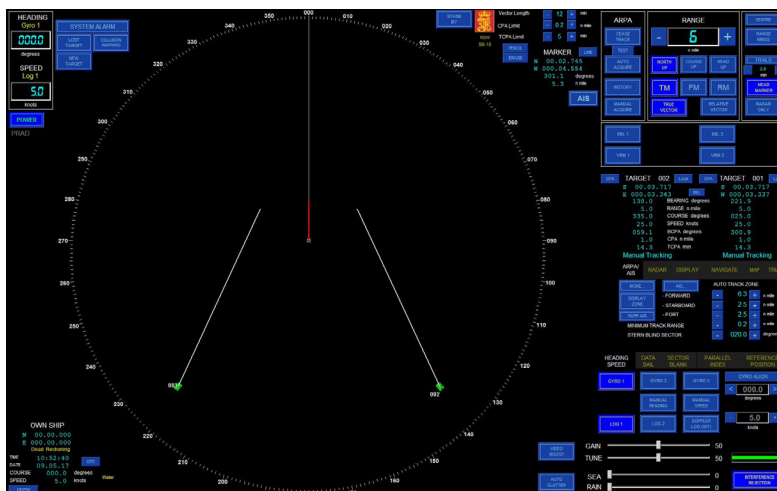
7.2.4. Plovidbeni scenarij DNV 4.

Plovidbeni scenarij DNV 4 prikazuje susret vlastitog broda sa dva broda na otvorenom moru, gdje vidljivost nije smanjena. Pri susretu brodova nema zanosa, te kurs i brzina brodova odgovaraju kursu i brzini preko dna. Vlastiti brod plovi u kursu 000°, brzinom od 5 čvorova. Promatrani brodovi se nalaze na istoj udaljenosti, imaju jednake vrijednosti CPA i TCPA te isti iznos pramčanog kuta, dok se jedan brod nalazi s desne a drugi s lijeve strane. Osnovni plovidbeni podatci prikazani su u Tablici 65.:

Tablica 65. Plovidbeni podatci za brodove u scenariju DNV 4. Priredio autor

Brod	CTW	COG	SOG	STW	CPA	TCPA	R	ω	BCR
T1	025	025	25	25	1	14,3	5	221,9	3,4
T2	335	335	25	25	1	14,3	5	138	3,4

Plovidbeni podatke se nadalje koristi kako bi se rekonstruirala plovidbena situacija (Slika 57.).



Slika 57. Prikaz radarske slike za scenarij broj DNV 4. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator

Modeli koji se koriste pri izračunu neizrazitog indeksa rizika sudara su za brod T1 model X, te za brod T2 model IV. Podatci dobiveni neizrazitim sustavom, mišljenja eksperata te status alarma ARPA uređaja prikazani su u Tablici 66.

Tablica 66. Verifikacija modela koristeći scenarij broj DNV 4. Priredio autor

Brod	FCRI	EXP	ARPA
T1	0,4	M	N
T2	0,65	H	N

Neizraziti sustav zaključivanja procijenio je veći iznos neizrazitog indeksa rizika sudara za brod T2 nego za brod T1. Eksperti se u svojim ocjenama slažu sa dobivenim rezultatima. Nadalje se koristeći dobivene podatke može pristupiti verifikaciji modela u

uvjetima smanjene vidljivosti, te će se verificirati model uz stanje horizontalne vidljivosti od jedne i pol nautičke milje. Rezultati verifikacije prikazani su u Tablici 67.

Tablica 67. Verifikacija modela u uvjetima smanjene vidljivosti koristeći scenarij DNV 4. Priredio autor

Brod	FCRI	Vidljivost	FCRI_LV	EXP
T1	0,4	1,5	0,58	M
T2	0,65	1,5	0,83	VH

Verifikacijom modela u uvjetima smanjene vidljivosti dobivene su očekivano veće vrijednosti indeksa rizika sudara, te je i dalje veći indeks rizika za brod T2 od broda T1. Eksperti su u svojim ocjenama sukladni rezultatu modela.

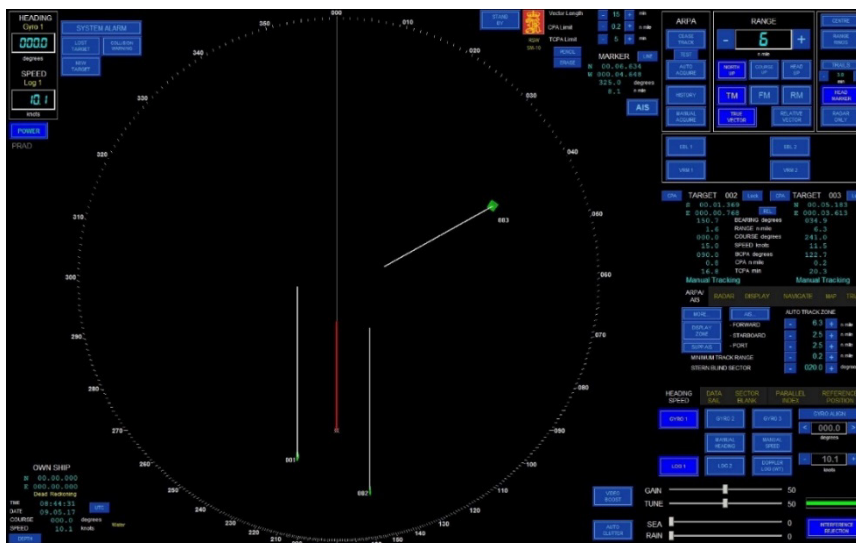
7.2.5. Plovidbeni scenarij DNV 5.

Plovidbeni scenarij DNV 5 prikazuje susret vlastitog broda sa tri broda na otvorenom moru, pri čemu vidljivost nije smanjena. Pri susretu brodova nema zanosa, te kurs i brzina brodova odgovaraju kursu i brzini preko dna. Vlastiti brod plovi u kursu 000°, brzinom od 10,1 čvor. Brodovi T1 i T2 plovi u istom kursu kao vlastiti brod i prestižu ga. Brod T1 plovi brzinom 15,7 čvorova, i pretječe s lijeve strane, dok brod T2 plovi brzinom 15 čvorova i pretječe s desne strane. Brod T3 dolazi s desne strane i prolazi 0,5 nautičke milje ispred pramca vlastitog broda. Neizraziti indeks rizika sudara odrediti će se za brod T1 uz pomoć modela XII, za brod T2 uz pomoć modela VI, te za brod T3 uz pomoć modela II. Plovidbeni podatci promatranih brodova prikazani su u Tablici 68.:

Tablica 68. Plovidbeni podatci za brodove u scenariju DNV 5. Priredio autor

Brod	CTW	COG	SOG	STW	CPA	TCPA	R	ω	BCR
T1	0	0	15,7	15,7	0,94	7	1	235	NA
T2	0	0	15	15	0,78	17	1,6	151	NA
T3	241	241	11,5	11,5	0,24	20	6,3	35	0,5

Na temelju prikazanih podataka moguće je prikazati radarsku sliku navedene plovidbene situacije kao na Slici 58.



Slika 58. Prikaz radarske slike za scenarij broj DNV 5. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator

Podatci dobiveni neizrazitim sustavom zaključivanja, mišljenja eksperata te status alarma ARPA uređaja prikazani su u Tablici 69.

Tablica 69. Verifikacija modela koristeći scenarij DNV 5. Priredio autor

Brod	FCRI	EXP	ARPA
T1	0,7063	H	Y
T2	0,5909	M	N
T3	0,75	H	N

Neizraziti sustav zaključivanja dodijelio je najveći iznos neizrazitog indeksa rizika sudara od 0,75 brodu T3. Poslije njega slijedi brod T1 sa indeksom 0,7063 te najmanje opasan brod T2 kojemu je određen indeks od 0,5909. Mišljenje eksperata u odnosu na promatrane situacije je sukladno sa rezultatima modela. ARPA uređaj bi oglosio upozorenje za brod T1, dok za brod T2 i T3 ne bi bilo upozorenja.

Nadalje se verificira model neizrazitog sustava zaključivanja u okolnostima slabe vidljivosti, koristeći vrijednost horizontalne vidljivosti od 3 nautičke milje. Nakon što se scenarij u potpunosti konstruira na nautičkom simulatoru, moguće je uz vrijednosti koje odrede eksperti odrediti i vrijednosti putem modela kao u Tablici 70.:

Tablica 70. Verifikacija modela u uvjetima smanjene vidljivosti koristeći scenarij DNV 5. Priredio autor

Brod	FCRI	Vidljivost	FCRI_LV	EXP
T1	0,7063	3	0,8133	VH
T2	0,5909	3	0,7266	H
T3	0,75	3	0,875	VH

Dobiveni podatci ukazuju kako je došlo do povećanja stupnja rizika, ali ne toliko znatno kao u prethodnom scenariju. To je i očekivano s obzirom da vidljivost od 3 nautičke milje se često koristi kao referentna vrijednost pri kojoj će časnik plovidbe zvati zapovjednika. Poredak brodova ostao je isti, te se i mišljenje eksperata slaže sa rezultatima dobivenim modelom.

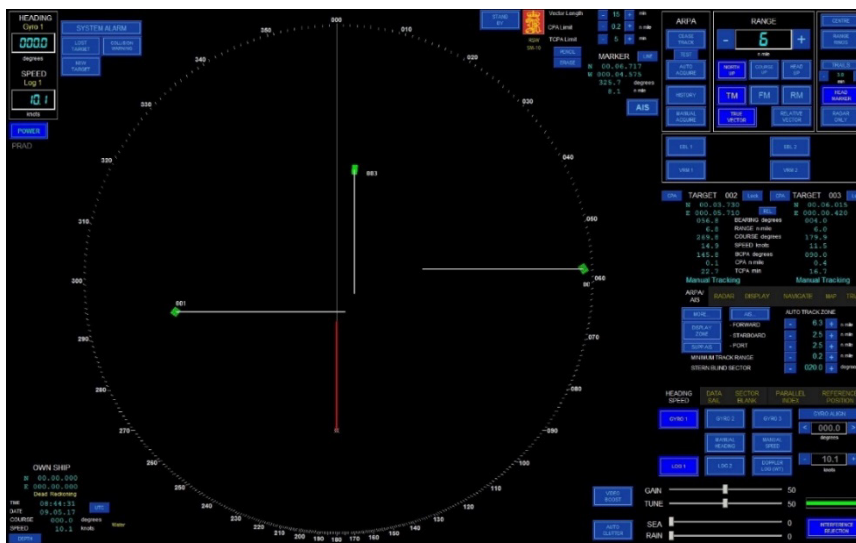
7.2.6. Plovidbeni scenarij DNV 6.

Plovidbeni scenarij DNV 6 prikazuje susret vlastitog broda sa tri broda na otvorenom moru, gdje vidljivost nije smanjena. Scenarij susreta pretpostavlja situaciju bez zanosu, te kurs i brzina brodova kroz vodu odgovaraju kursu i brzini preko dna. Vlastiti brod plovi u kursu 000°, brzinom od 10,1 čvor. Brod T1 plovi u kursu 090°, dolazi s lijeve strane brzinom od 15,7 čvorova te prolazi ispred pramca vlastitog broda na udaljenosti 0,3 nautičke milje. Brod T2 plovi u kursu 270°, brzinom od 15 čvorova te dolazi s desne strane vlastitog broda, prolazi po krmi vlastitog broda na udaljenosti 0,14 nautičke milje. Brod T3 plovi brzinom 11,5 čvorova, u kursu suprotnom od kursa vlastitog broda, to jest u kursu 180°. Osnovni plovidbeni podatci prikazani su u Tablici 71.:

Tablica 71. Plovidbeni podatci za brodove u scenariju DNV 6. Priredio autor

Brod	CTW	COG	SOG	STW	CPA	TCPA	R	ω	BCR
T1	90	90	15,7	15,7	0,23	15	4,6	306	0,3
T2	270	270	15	15	0,14	23	6,8	57	-0,14
T3	180	180	11,5	11,5	0,42	18	6	4	NA

Modeli koji se koriste pri izračunu neizrazitog indeksa rizika sudara su za brod T1 model II, za brod T2 model XI, te za brod T3 model I. Prikaz plovidbene situacije na radarskoj slici koristi se kako bi se utvrdilo mišljenje eksperata u odnosu na plovidbeni scenarij DNV 6 (Slika 59.)



Slika 59. Prikaz radarske slike za scenarij broj DNV 6. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator

Podatci dobiveni neizrazitim sustavom, mišljenja eksperata te status alarma ARPA uređaja prikazani su u Tablici 72.:

Tablica 72. Verifikacija modela koristeći scenarij DNV 6. Priredio autor

Brod	FCRI	EXP	ARPA
T1	0,92	VH	N
T2	0,53	M	N
T3	0,75	H	N

Model kao i eksperti su ocijenili brod T1 kao najopasniji u trenutku opažanja, budući njegov CPA iznosi samo 0,23 NM a preostalo vrijeme iznosi 15 minuta, te je i najbliži od svih promatranih brodova. Brod T2 ima nešto manji CPA od broda T1, ali je preostalo vrijeme 23 minute i nalazi se nešto više od dvije nautičke milje dalje nego brod T1, te se i eksperti slažu da je trenutno opasnost u odnosu na brod T2 umjerena. Brod T3 kojemu vrijednost najbliže točke prolaza iznosi 0,42 je drugi najopasniji. Prema ekspertima tako visok indeks rizika proizlazi iz njegovog položaja, a to je uočeno i u prijašnjim istraživanjima¹⁶⁴. Naime kad se drugi brod nalazi u protukursu desno od pramčanice vlastitog broda, postoji rizik da se brodovi neće pridržavati pravila, te promijeniti kurs u desno, jer se doima jednostavnije izvesti malu promjenu kursa u lijevo kako bi se povećala udaljenost najbližeg prolaza. Prema ekspertima brodovi često dogovaraju takav manevar putem radio uređaja što je izrazito opasno, s obzirom da se može dogoditi da jedan brod pokrene izbjegavanje sukladno pravilima promjenom vlastitog kursa u desno, dok drugi brod odabere neispravan manevar u lijevo. U tom slučaju brodovi se mogu vrlo brzo naći u situaciji kad je izbjegavanje sudara nemoguće. Treba uzeti u obzor da kod situacije

¹⁶⁴ Coldwell, T. G. (1983). Marine Traffic Behaviour in Restricted Waters. *Journal of Navigation*, 36(3), 430–444. <https://doi.org/10.1017/S0373463300039783>

protukursa relativna brzina predstavlja zbroj pojedinačnih brzina, te ako na vrijeme ne poduzme odgovarajući manevar, vremena i prostora postaje sve manje.

Verifikacija model neizrazitog sustava zaključivanja u okolnostima slabe vidljivosti, provodi se dalje koristeći vrijednost neizrazitog indeksa rizika sudara iz gornjeg scenarija, te pretpostavljajući vidljivost od 1 nautičke milje. Rezultati dobiveni model i verifikacija eksperata prikazani su u Tablici 73.:

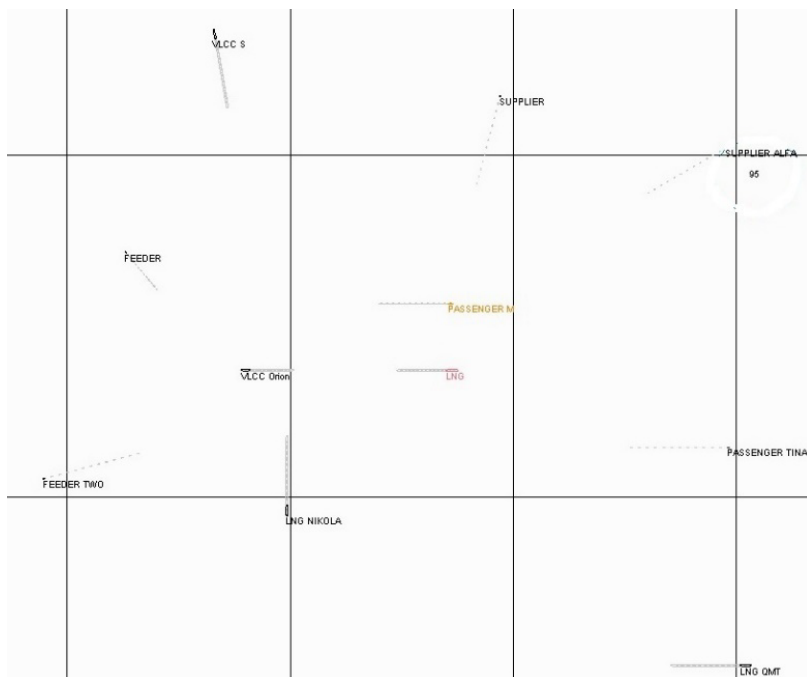
Tablica 73. Verifikacija modela FCRI_LV koristeći scenarij DNV 6. Priredio autor

Brod	FCRI	Vidljivost	FCRI_LV	EXP
T1	0,92	1	1	VVH
T2	0,53	1	0,8	H
T3	0,75	1	1	VVH

Podatci pokazuju da je došlo da značajnog povećanja neizrazitog indeksa rizika sudara, te za brodove T1 i T3 on ima maksimalnu vrijednost, dok za brod T2 ima visoku vrijednost. S obzirom na postavke vidljivosti od samo 1 nautičke milje, to je i očekivano. Eksperti se i u ovom scenariju slažu s vrijednostima modela, te ga svojom procjenom verificiraju.

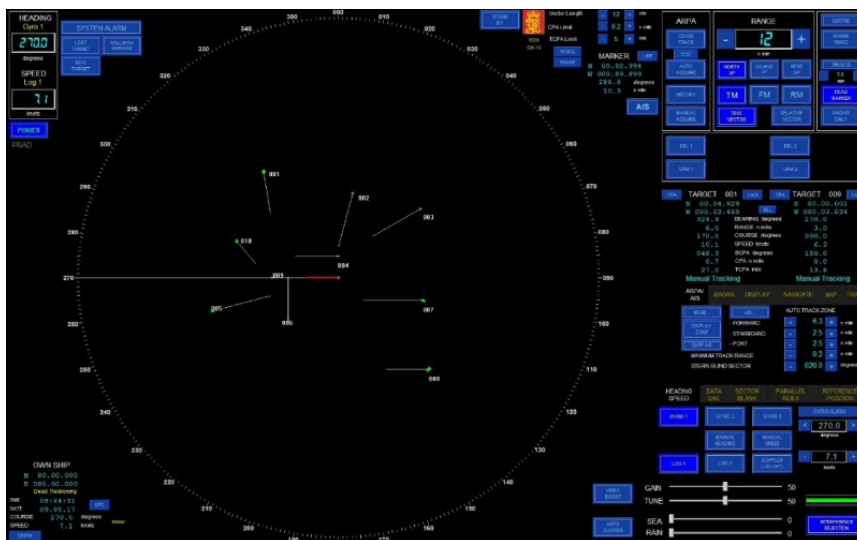
7.3. Verifikacija modela u uvjetima gustog prometa

Iako je primjena ovog neizrazitog sustava prvenstveno zamišljena u uvjetima otvorenog mora, gdje se ne očekuje gusti promet, moguće je testirati i verificirati sustav i u uvjetima gustog prometa. Plovidbeni scenarij u uvjetima gustog prometa opisuje susret vlastitog broda sa deset brodova na otvorenom moru, gdje vidljivost nije smanjena (Slika 60.). Pri susretu brodova nema zanosa, te kurs i brzina brodova odgovaraju kursu i brzini preko dna. Vlastiti brod plovi u kursu 270°, brzinom od 7,1 čvor (na sljedećoj slici prikazan kao LNG).



Slika 60. Prikaz plovidbenog scenarija u uvjetima gustog prometa. Priredio autor prema¹⁶⁵

Navedeni plovidbeni scenarij rekonstruiran je koristeći nautički simulator, te je prikaz radarske slike vidljiv na Slici 61.



Slika 61: Prikaz radarske slike za scenarij u uvjetima gustog prometa. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator

Osnovni plovidbeni podatci vezani uz druge brodove prikazani su u Tablici 74.

¹⁶⁵ SafeNav. (2024). *Towards an Autonomous Future*. Raspoloživo na: <https://www.safenavsystem.com/>, (pristupljeno 22. travnja 2024).

Tablica 74. Plovidbeni podatci za brodove u scenariju u uvjetima gustog prometa.
Priredio autor

Brod	CTW	COG	SOG	STW	CPA	TCPA	R	ω	BCR
FEEDER	140	140	7	7	0,43	23,0	5	290	1,0
FEEDER TWO	75	75	14	14	0,49	17,0	6	255	-3,8
LNG NIKOLA	0	0	10	10	0,77	15,0	3	230	1,0
LNG QMT	270	270	10	10	4,30	90,0	6	135	NA
PASS_M	270	270	10	10	1,00	0	1	0	NA
PASS_TINA	270	270	14	14	1,10	35,0	4,1	105	NA
SUPPLIER	195	195	13	13	1,80	16,0	4	10	-1,9
SUPP_ALFA	240	240	13	13	1,60	38,0	5	50	-2,0
VLCC ORION	90	90	6,3	6,3	0,02	13,0	3	270	NA
VLCC S	170	170	10,1	10,1	0,67	26,0	6	325	-1,0

Modeli koji se koriste pri izračunu neizrazitog indeksa rizika sudara su: brod Feeder model II, brod Feeder Two model IX, brod LNG Nikola model VIII, brod LNG QMT model XII, brod Pass_M model VI, brod Pass_Tina model XII, brod Supplier model V, brod Supp_Alfa model V, brod VLCC Orion model VII te brod VLCC S model III . Podatci dobiveni neizrazitim sustavom, mišljenja eksperata te status alarma ARPA uređaja prikazani su u Tablici 75.

Tablica 75. Verifikacija modela koristeći scenarij u uvjetima gustog prometa. Priredio autor

Brod	FCRI	EXP	ARPA
FEEDER	0,63	H	N
FEEDER TWO	0,75	H	N
LNG NIKOLA	0,92	VH	N
LNG QMT	0,08	VL	N
PASS_M	0,65	H	Y
PASS_TINA	0,25	L	N
SUPPLIER	0,25	L	N
SUPP_ALFA	0,25	L	N
VLCC ORION	0,92	VH	N
VLCC S	0,5	M	N

Korištenjem gore dobivenog neizrazitog indeksa rizik sudara može se pristupiti i verifikaciji ove plovidbene situacije u okolnostima smanjene vidljivosti, određivši za potrebe verifikacije vrijednost varijable *Vidljivost* od 2 nautičke milje. Rezultati dobiveni modelom i mišljenje eksperata prikazani su u Tablici 76.:

Tablica 76. Verifikacija modela koristeći scenarij u uvjetima gustog prometa i smanjene vidljivosti. Priredio autor

Brod	FCRI	Vidljivost	FCRI_LV	EXP
FEEDER	0,63	2	0,75	H
FEEDER TWO	0,75	2	0,88	VH
LNG NIKOLA	0,92	2	0,96	VVH
LNG QMT	0,08	2	0,22	VL
PASS_M	0,65	2	0,77	H
PASS_TINA	0,25	2	0,38	ML
SUPPLIER	0,25	2	0,38	M
SUPP_ALFA	0,25	2	0,38	ML
VLCC ORION	0,92	2	0,96	VVH
VLCC S	0,5	2	0,63	MH

Dobiveni podatci pokazuju kako je došlo do umjerenog povećanja neizrazitog indeksa rizika sudara. Postavka vidljivosti od 2 nautičke milje s kojom se verificirao model predstavlja jezgru lingvističke vrijednosti *slaba vidljivost*, te ne pripada skupu *vrlo slaba vidljivost*, te su i očekivani rezultati u skladu s dobivenim. Mišljenja nautičkih eksperti su općenito u skladu sa procijenjenim neizrazitim indeksom rizika sudara u okolnostima slabije vidljivosti.

8. KONCEPTUALNI MODEL PRIMJENE NEIZRAZITOG INDEKSA RIZIKA SUDARA U INTEGRIRANINIM NAVIGACIJSKIM SUSTAVIMA

Integrirani navigacijski sustavi podrazumijevaju sustave koji integriraju radarski i ECDIS sustav sa dodatnim izvorima podataka korisnih u pomorskoj plovidbi. Svrha integracije navigacijskih sustava je povećanje sigurnosti plovidbe te pružanje dodatne pomoći članovima plovidbene straže¹⁶⁶. Integrirani navigacijski sustavi uključuju sustave koji mogu obaviti plovidbene zadatke kao što su planiranje i praćenja putovanja, izbjegavanje sudara, prikazi podataka o plovidbi te upozorenja vezana uz plovidbu integrirane u jedan navigacijski sustav. Integrirani navigacijski sustavi čine važnu komponentu integriranog navigacijskog mosta (engl. *Integrated Bridge System*, IBS). Moderni brodovi opremljeni su takvim integriranim navigacijskim mostovima, koji predstavljaju tehnološku revoluciju u pomorskoj plovidbi¹⁶⁷. Integrirani navigacijski most može se definirati kao kombinacija međusobno povezanih sustava putem kojih je dostupan centraliziran pristup plovidbenim informacijama te kontrola i upravljanje brodskim sustavima putem radnih stanica, a u svrhu povećanja sigurnosti plovidbe¹⁶⁸. Osim navigacijskih sustava, ostali brodski sustavi mogu predstavljati sustave upravljanja teretom, sustave brodske propulzije, sustave strojarnice broda, sustave gašenja požara, sustave video nadzora (engl. *Closed-circuit Television*, CCTV) te mnogobrojne druge sustave prisutne na suvremenim brodovima. Na takav način omogućuje se časniku plovidbene straže da tijekom straže na plovidbenom mostu ima uvid u brodske sustave, ali i kontrolu nad određenim brodskim sustavima. Takvi sustavi mogu biti dodatno povezani internetom sa obalom zbog nadzora, ali i kako bi se mogla pružiti tehnička podrška. S druge strane to otvara mogućnosti neovlaštenog pristupa¹⁶⁹ ¹⁷⁰ koje mogu ugroziti sigurnost broda. Integrirani navigacijski most predstavlja centralni dio e-navigacije, koncepta koji ima za cilj odgovoriti potrebama pomorske plovidbe danas i u budućnosti kroz harmonizaciju pomorskih navigacijskih sustava i podrške obalnih službi¹⁷¹. Prema aktualnim znanstvenim

¹⁶⁶ International Maritime Organization. (2004). *Rezolucija MSC.252(83): Adoption of the revised performance standards for integrated navigation system*.

¹⁶⁷ Lund, M. S., Gulland, J. E., Hareide, O. S., & Weum, K. O. C. (2018). Integrity of integrated navigation systems. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*. IEEE.

¹⁶⁸ International Maritime Organization. (1996). *Rezolucija MSC.64 (67): Recommendation on performance standards for integrated bridge systems (IBS)*.

¹⁶⁹ Awan, M. S. K., & Al Ghamdi, M. A. (2019). Understanding the vulnerabilities in digital components of an integrated bridge system (IBS). *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 350.

¹⁷⁰ Svilicic, B., Kristić, M., Žuškin, S., & Brčić, D. (2020). Paperless ship navigation: cyber security weaknesses. *Journal of Transportation Security*, 13, 203-214.

¹⁷¹ International Maritime Organization. (2018). *MSC.1/circ.1595: E-navigation strategy implementation plan – update 1*

radovima¹⁷² ¹⁷³ i projektima¹⁷⁴ ¹⁷⁵ ¹⁷⁶ potrebno je postići daljnji napredak integriranih sustava, posebno u plovidbenim situacijama kod kojih postoji rizik sudara na moru. Integracija neizrazitog sustava zaključivanja za određivanje neizrazitog indeksa rizika mogla bi predstavljati znatan doprinos integriranim navigacijskim sustavima. Doprinos se temelji na pravovremenom uzbunjivanju u plovidbenim situacijama kod kojih postoji rizik sudara na moru. Bitni doprinos sustava pored alarmiranja je i uspostavljenje hijerarhije opasnosti od sudara na moru između promatranih brodova. Sustav u svom djelovanju ima potencijal pomoći i olakšati časniku plovidbene straže donošenje odluka kod plovidbenih situacija na otvorenom moru koje uključuju rizik sudara. Kroz alarmiranje i rangiranje opasnosti, sustav u svojoj biti djeluje kao sustav podrške odlučivanju (engl. *Decision Support System*, DSS). Strojno učenje među koje spada i neizraziti sustav zaključivanja¹⁷⁷ te sustavi umjetne inteligencije pružaju sve veći zamah sustavima podrške odlučivanju u pomorstvu¹⁷⁸. Međutim neki autori¹⁷⁹ primjećuju kako znanstveni koncepti predviđeni za korištenje pri sprečavanju nezgoda na moru vrlo često imaju nisku razinu spremnosti za buduće korištenje. Sustavi autonomne plovidbe¹⁸⁰ te s njima povezano korištenje umjetne inteligencije u pomorstvu napreduju posljednjih

¹⁷² Perera, L. P., & Soares, C. G. (2015). Collision risk detection and quantification in ship navigation with integrated bridge systems. *Ocean Engineering*, 109, 344-354.

¹⁷³ van de Merwe, K., Mallam, S., Nazir, S., & Engelhardtsen, Ø. (2024). Supporting human supervision in autonomous collision avoidance through agent transparency. *Safety science*, 169, 106329.

¹⁷⁴ Zaccone, R., & Martelli, M. (2020). A collision avoidance algorithm for ship guidance applications. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 19(sup1), 62-75.

¹⁷⁵ SafeNav. (2024). *Towards an Autonomous Future*. Raspoloživo na: <https://www.safenavsystem.com/>, (pristupljeno 22. travnja 2024).

¹⁷⁶ European Commission. (2024). *Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks*. Raspoloživo na: <https://cordis.europa.eu/project/id/314286>, (pristupljeno 22. travnja 2024).

¹⁷⁷ Jane, J. B., & Ganesh, E. N. (2019). A review on big data with machine learning and fuzzy logic for better decision making. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(10), 1221-1225.

¹⁷⁸ van der Waa, J., Schoonderwoerd, T., van Diggelen, J., & Neerincx, M. (2020). Interpretable confidence measures for decision support systems. *International Journal of Human-Computer Studies*, 144, 102493.

¹⁷⁹ Gil, M., Wróbel, K., Montewka, J., & Goerlandt, F. (2020). A bibliometric analysis and systematic review of shipboard Decision Support Systems for accident prevention. *Safety science*, 128, 104717.

¹⁸⁰ Batista Santos, P. M., & Santos, T. A. (2024). Short Sea Shipping in the Age of Sustainability, Autonomous Navigation and Digitalization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(2), 252.

godina¹⁸¹ ¹⁸² ¹⁸³ ¹⁸⁴ ¹⁸⁵ ¹⁸⁶ ¹⁸⁷ ¹⁸⁸. S obzirom da se radi o novom tehnološkom rješenju, tako postoje i razni pristupi i projekti koji imaju za cilj autonomnu plovidbu morima. Znanstveni pristup izradi modela autonomne plovidbe bi se generalno mogao podijeliti u dvije skupine: deterministički i stohastički¹⁸⁹, dok unutar svake skupine postoji širok raspon raznih modela i pristupa.

Razvoj modela autonomne plovidbe susreće se višestrukim problemima od zakonodavnih¹⁹⁰ do tehnoloških¹⁹¹. Poseban problem u razvoju inteligentnih navigacijskih sustava predstavljaju lingvističke varijable unutar pravila o izbjegavanju sudara. Pravila su pisana za ljudske posade, te su bazirana na ljudskom shvaćanju

¹⁸¹ The Royal Institution of Naval Architects. (2024). *Artificial intelligence steers Orca AI's autonomous maritime odyssey*. Raspoloživo na: <https://rina.org.uk/publications/the-naval-architect/artificial-intelligence-steers-orca-ais-autonomous-maritime-odyssey/>, (pristupljeno 24. svibnja 2024).

¹⁸² Donnarumma, S., Figari, M., Martelli, M., & Zaccone, R. (2020). Simulation of the guidance and control systems for underactuated vessels. *U Modelling and Simulation for Autonomous Systems: 6th International Conference, MESAS 2019, Palermo, Italy, October 29–31, 2019, Revised Selected Papers 6* (pp. 108-119). Springer International Publishing.

¹⁸³ Martelli, M., Faggioni, N., & Zaccone, R. (2019). Development of a navigation support system by means of a synthetic scenario. *Proceedings of the 18th International Congress of the Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2019)*, September 9-11, 2019, Varna, Bulgaria.

¹⁸⁴ Zhang, Y., Zhang, D., & Jiang, H. (2023). A review of artificial intelligence-based optimization applications in traditional active maritime collision avoidance. *Sustainability*, *15*(18), 13384.

¹⁸⁵ Fruzzetti, C., Donnarumma, S., & Martelli, M. (2022). Dynamic target chasing: parameters and performance indicators assessment. *Journal of Marine Science and Technology*, *27*(1), 712-729.

¹⁸⁶ Wang, C., Zhang, X., Yang, Z., Bashir, M., & Lee, K. (2023). Collision avoidance for autonomous ship using deep reinforcement learning and prior-knowledge-based approximate representation. *Frontiers in Marine Science*, *9*, 1084763.

¹⁸⁷ Zhang, X., Wang, C., Jiang, L., An, L., & Yang, R. (2021). Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey. *Ocean Engineering*, *235*, 109380.

¹⁸⁸ Kim, H. G., Yun, S. J., Choi, Y. H., Ryu, J. K., & Suh, J. H. (2021). Collision avoidance algorithm based on COLREGs for unmanned surface vehicle. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(8), 863.

¹⁸⁹ Lazarowska, A. (2019). Research on algorithms for autonomous navigation of ships. *WMU Journal of Maritime Affairs*, *18*(2), 341-358.

¹⁹⁰ Boviatsis, M., & Vlachos, G. (2022). Sustainable operation of unmanned ships under current international maritime law. *Sustainability*, *14*(12), 7369.

¹⁹¹ Males, L., Sumic, D., & Rosic, M. (2022). Applications of multi-agent systems in unmanned surface vessels. *Electronics*, *11*(19), 3182.

plovidbenih situacija^{192 193 194 195 196}. Takva forma pravila predstavlja izazov pri njihovom modeliranju u svrhu korištenja u sustavima autonomne plovidbe. Prema Zhou i sur. potrebno je eliminirati nesigurnosti povezane sa interpretacijom određenih dijelova pravila o izbjegavanju sudara¹⁹⁷. Istraživanje Rødseth i sur. vezano uz interakciju konvencionalnih i autonomnih brodova predlaže reviziju Pravila o izbjegavanju sudara na moru u svrhu povećanja sigurnosti na moru¹⁹⁸. Dong i sur. obrazlažu trendove i potrebe revizije pravila kako bi odgovorila na tendencije razvoja pomorske plovidbe¹⁹⁹. Usprkos problemima pri razvoju inteligentnih autonomnih sustava, Međunarodna pomorska organizacija planira i dalje zadržati postojeća pravila u postojećem obliku²⁰⁰. Chan i sur. u svom pregledu²⁰¹ aktualne literature primjećuju kako postojeća pravila o izbjegavanju sudara predstavljaju značajnu lingvističku barijeru razvoju inteligentne autonomne plovidbe. Kvantificiranje pravila prema drugim autorima^{202 203 204} je neophodan korak i

¹⁹² Benjamin, M. R., Curcio, J. A., Leonard, J. J., & Newman, P. M. (2006). Navigation of unmanned marine vehicles in accordance with the rules of the road. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.* (3581-3587). IEEE.

¹⁹³ Namgung, H., & Kim, J. S. (2021). Collision risk inference system for maritime autonomous surface ships using COLREGs rules compliant collision avoidance. *IEEE Access, 9*, 7823-7835.

¹⁹⁴ Wróbel, K., Gil, M., Huang, Y., & Wawruch, R. (2022). The vagueness of COLREG versus collision avoidance techniques—A discussion on the current state and future challenges concerning the operation of autonomous ships. *Sustainability, 14*(24), 16516. .

¹⁹⁵ Zaccone, R., & Martelli, M. (2023). Interaction between COLREG-compliant collision avoidance systems in a multiple MASS scenario. *Journal of Physics: Conference Series, 2618*(1), 12006. IOP Publishing.

¹⁹⁶ Miyoshi, T., Fujimoto, S., Rooks, M., Konishi, T., & Suzuki, R. (2022). Rules required for operating maritime autonomous surface ships from the viewpoint of seafarers. *The Journal of Navigation, 75*(2), 384-399.

¹⁹⁷ Zhou, X. Y., Huang, J. J., Wang, F. W., Wu, Z. L., & Liu, Z. J. (2020). A study of the application barriers to the use of autonomous ships posed by the good seamanship requirement of COLREGs. *The Journal of Navigation, 73*(3), 710-725.

¹⁹⁸ Rødseth, Ø. J., Wennersberg, L. A. L., & Nordahl, H. (2023). Improving safety of interactions between conventional and autonomous ships. *Ocean Engineering, 284*, 115206.

¹⁹⁹ Dong, W., Li, J., & Tu, X. (2023). A study on the development and trend of COLREGs—A broader perspective. *The Journal of Navigation, 1-13*.

²⁰⁰ International Maritime Organisation (2021). *Outcome of the Regulatory Scoping Exercise for the Use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS)*.

²⁰¹ Chang, C. H., Wijeratne, I. B., Kontovas, C., & Yang, Z. (2024). COLREG and MASS: Analytical review to identify research trends and gaps in the Development of Autonomous Collision Avoidance. *Ocean Engineering, 302*, 117652.

²⁰² Xie, W., Gang, L., Zhang, M., Liu, T., & Lan, Z. (2024). Optimizing Multi-Vessel Collision Avoidance Decision Making for Autonomous Surface Vessels: A COLREGs-Compliant Deep Reinforcement Learning Approach. *Journal of Marine Science and Engineering, 12*(3), 372.

²⁰³ He, Y., Jin, Y., Huang, L., Xiong, Y., Chen, P., & Mou, J. (2017). Quantitative analysis of COLREG rules and seamanship for autonomous collision avoidance at open sea. *Ocean Engineering, 140*, 281-291.

²⁰⁴ Zhang, P., Chen, Q., Macdonald, T., Lau, Y. Y., & Tang, Y. M. (2022). Game change: A critical review of applicable collision avoidance rules between traditional and autonomous ships. *Journal of Marine Science and Engineering, 10*(11), 1655.

prioritet razvoja autonomnih plovidbenih sustava. Kim²⁰⁵ predlaže kvantifikaciju lingvističkih pojmova *uski kanal*, *smanjena vidljivost* te *vrijeme radnje koja će najbolje pridonijeti da se sudar izbjegne* oslanjajući se na manevarske karakteristike brodova i vidljivost brodskih navigacijskih svjetala. Kim i Park²⁰⁶ kvantificiraju lingvističke varijable *pravodobno* i *dovoljna radnja za izbjegavanje sudara* koristeći se Bayesovim neuronskim mrežama. Kristić i Žuškin definiraju lingvističku varijablu *veoma velik brod* prisutnu u pravilu broj sedam, koristeći ekspertna znanja ispitanika te teoriju neizrazitih skupova i linearnu regresiju²⁰⁷. Neizraziti sustav zaključivanja u svojoj biti oslanjaju se upravo na lingvističke varijable, te predstavljaju logičan i prirodan izbor pri modeliranju izraza upućenih ljudskoj posadi. Neizraziti indeks rizika sudara bi se u sustavima autonomne plovidbe mogao koristiti dvojakom. Prvenstveno bi se mogao koristiti kao pomoć pri odlučivanju, gdje bi neizraziti sustav predstavljao dio integriranog navigacijskog mosta. U takvom integriranom sustavu, informacija o neizrazitom indeksu rizika sudara koristila bi sustavu autonomnog broda u situacijama izbjegavanja sudara na moru. Dodatno, neizrazitim sustavom zaključivanja bi se omogućilo inteligentnim sustavima autonomnog broda razumijevanje percepcije rizika broda s ljudskom posadom. Na takav način bi sustav autonomnog broda mogao razumjeti i predvidjeti neke akcije brodova pod ljudskom kontrolom u rizičnim plovidbenim situacijama. Rezultati istraživanja²⁰⁸ ukazuju kako je vrlo bitno kod plovidbenih situacija u kojima sudjeluju autonomni brodovi da ljudska posada može interpretirati odluke autonomnog broda. Prednost neizrazitih sustava je baš u tome što su vrlo razumljivi ljudima, te na taj način olakšavaju eventualnu kontrolu autonomnim sustavima, ali i uočavanje eventualnih pogrešaka autonomnih sustava.

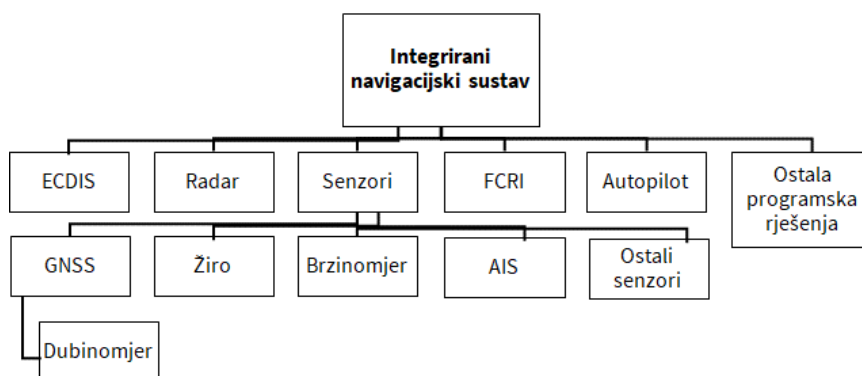
Neizraziti sustav kako je predložen u ovom radu može se vrlo jednostavno integrirati, budući koristi ulazne podatke koji su redovito dostupni na brodovima. Sustav je nužno povezati sa plovidbenim sensorima kako bi mogao dobiti ulazne podatke, te na temelju ulaznih podataka odrediti neizraziti indeks rizika. Integrirani navigacijski most koji bi pored ostalih navigacijskih sustava uključivao i neizraziti sustav zaključivanja za određivanje neizrazitog indeksa rizika sudara mogao bi se prikazati kao na slici 62.

²⁰⁵ Kim, I. (2023). Systematization of Legal Procedures for Collision Avoidance between a Fully Autonomous Ship and a Traditional Manned Ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 1850.

²⁰⁶ Kim, J. K., & Park, D. J. (2023). Determining the proper times and sufficient actions for the collision avoidance of navigator-centered ships in the open sea using artificial neural networks. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), 1384.

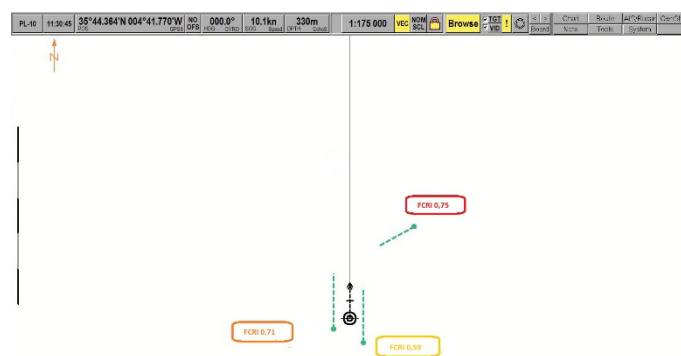
²⁰⁷ Kristić, M., & Žuškin, S. (2024). Quantification of Expert Knowledge in Describing COLREGs Linguistic Variables. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 849.

²⁰⁸ Rostek, D., & Baldauf, M. (2024). Technologies for situational awareness in autonomous shipping and their impact on maritime training and education. *Proceedings of the INTED2024*, 5105-5114.



Slika 62. Prikaz integracije neizrazitog sustava zaključivanja unutar INS-a. Priredio autor

Tako dobiveni indeks rizika sudara mogao bi se putem grafičkog sučelja (engl. *Graphical User Interface*, GUI) prikazati na način da se odabranim brodovima delegira pripadajući indeks rizika sudara. Grafičkim prikazom u sklopu integriranog navigacijskog sustava moguće je hijerarhiju indeksa rizika sudara osim numerički prikazati i koristeći odgovarajuće boje i nijanse boja (Slika 63.).



Slika 63. Grafičko sučelje konceptualnog modela. Priredio autor

Pri tom bi se moglo koristiti uobičajeno i intuitivno kodiranje indeksa rizika, gdje crvena boja predstavlja visoki neizraziti indeks rizika sudara a zelena niski.

Praktični napredci u inteligentnoj autonomnoj plovidbi odvijaju se kontinuirano, iako još uvijek u strogo kontroliranim uvj etima. Možda najaktualniji projekt je Orca umjetna inteligencija²⁰⁹, u sklopu koje je u veljači 2022 testirana autonomna plovidba broda Suzaku. Pri tome je brod Suzaku plovio od Tokijskog zaljeva do luke Tsumatsusaka.

²⁰⁹ Orca Ai. (2022). *World's first autonomous commercial ship voyage in congested water successfully completed*. Raspoloživo na: <https://www.orca-ai.io/resource/worlds-first-autonomous-commercial-ship-voyage-in-congested-water-successfully-completed/>, (pristupljeno 24. svibnja 2024).

Važno je primijetiti da je sustav umjetne inteligencije broda treniran koristeći plovidbene podatke tog istog broda na identičnom području plovidbe. Kongsberg također razvija sustave autonomne plovidbe, te je testirao u svibnju 2023 autonomnu plovidbu broda Eidsvaag Pioner na putovanju od 160 nautičkih milja. Navedeni projekt je dio istraživačkog projekta Europske Unije Horizon 2020²¹⁰. Kongsberg je također iste godine izveo probne vožnje broda Zulu 4 na udaljenosti od devet nautičkih milja, demonstrirajući plovidbu, manevriranje unutar luke te privez i odvez broda²¹¹. Za očekivati je i daljnji napredak u autonomnoj plovidbi brodova, pri čemu bi neizraziti sustavi mogli značajno utjecati na razvoj i implementaciju autonomnih sustava.

²¹⁰ Kongsberg. (2023). *Kongsberg successfully completes autonomous operation of coastal cargo ship as part of EU's AUTOSHIP project*. Raspoloživo na: <https://www.kongsberg.com/maritime/about-us/news-and-media/news-archive/2023/eus-autoship-project/>, (pristupljeno 1. veljače 2024).

²¹¹ Kongsberg.(2023). *Kongsberg successfully demonstrates autonomous vessel operations on Belgium's inland waterway network*. Raspoloživo na: <https://www.kongsberg.com/maritime/about-us/news-and-media/news-archive/2023/trial-of-autonomous-shipping/>, (pristupljeno 1. veljače 2024).

9. DISKUSIJA

Napredak inteligentnih sustava u sustavima izbjegavanja sudara na moru ovisi među ostalim i o kvantifikaciji pravila i lingvističkih pojmova koji uređuju odnose između brodova u pomorskoj plovidbi. Predloženim modelima neizrazitog sustava zaključivanja za određivanje neizrazitog indeksa rizika sudara kvantificirano je ekspertno znanje u svrhu procjene rizika sudara na moru. Rezultati cjelokupnog istraživanja mogli bi se podijeliti u četiri grupe:

- Određivanje profila ispitanika
- Definiranje najutjecajnijih čimbenika pri procjeni rizika sudara na moru
- Kvantifikacija lingvističkih vrijednosti navedenih čimbenika korištenjem neizrazitih skupova
- Kvantifikacija indeksa rizika sudara na moru korištenjem neizrazitog sustava odlučivanja.

Rezultati prve grupe ukazuju kako je relativno velik uzorak od 220 ispitanika sudjelovao u istraživanju, što prvenstveno predstavlja prednost kod modela koji koriste ekspertno znanje. S druge strane, tako veliki broj ispitanika može predstavljati izazov kod obrade podataka što je riješeno korištenjem pitanja zatvorenog tipa. Budući je istraživanje bilo usmjereno prema prikupljanju ekspertnog znanja, ciljanu skupina predstavljali su aktivni časnici plovidbene straže i zapovjednici brodova. Rezultati ukazuju kako se uspjelo dobiti odgovore eksperata, budući oko 80% odgovora čine odgovori zapovjednika brodova i prvih časnika palube. Također 70% ispitanika ima više od deset godina plovidbenog iskustva. Kao određeno ograničenje ispitivane skupine nameće se distribucija ispitanika s obzirom na vrstu i duljini brodova na kojima plove, budući velik broj ispitanika čine pomorci koji plove na brodovima za prijevoz ukapljenog plina te na brodovima čija je duljina između 250 i 300 metara. Navedeno ograničenje samog uzorka može imati određenog utjecaja na dobivene rezultate, te bi buduća istraživanja mogla koristeći drugačiji uzorak ispitati eventualne razlike u rezultatima.

Drugom grupom rezultata odredio se i proširio skup čimbenika koje je potrebno uzeti u obzir pri procjeni rizika sudara na moru. Dosadašnja istraživanja su se većim dijelom oslanjala na *CPA* i *TCPA* pri modeliranju rizika sudara na moru, samo povremeno koristeći i neke druge varijable. Rezultati dobiveni istraživanjem jasno određuju koje čimbenike eksperti smatraju važnima pri procjeni rizika sudara. Kao posebno važan rezultat ovog dijela istraživanja ističe se rangiranje *Vidljivosti* kao najutjecajnijeg čimbenika te eksperti njenu važnost ocjenjuju sa 4,5213. Svaki pomorac, ali čak i vozač automobila zna koliko se povećava percepcija opasnosti kad dođe do smanjenja vidljivosti. Stanje smanjenje vidljivosti predstavlja neizvjesnost bez obzira na moderne radarske uređaje, te direktno utječe na procjenu rizika sudara na moru. Svakako bitno je i naglasiti kako je to u skladu sa pravilima o izbjegavanju sudara na moru, gdje stanja smanjene vidljivosti zahtijevaju poseban oprez. Očekivano eksperti se slažu o vrlo visokoj važnosti varijabli *CPA* sa vrlo visokom važnosti od 4,4757, te *TCPA* sa 4,4108.

Dodatno, vrlo visokim ocjenjuju i još dvije varijable, i to *BCR* sa 4,1872 i *Međusobnu udaljenost* sa 4,0815. Ekspertnim odabirom baš ovih pet varijabli kao najutjecajnijih bilo je moguće izraditi model, te se pokazalo kako je korištenje ekspertnog znanja opravdano. Naime, daljnjom izradom modela uvidjelo se kako pojedine odabrane varijable imaju znatan utjecaj u nekim plovidbenim situacijama. Dodatno su testirane eventualne razlike među odgovorima različitih grupa ispitanika s obzirom na njihove profilne karakteristike koristeći analizu varijance, ali nisu nađene statistički značajne razlike između odabranih grupa.

Treća grupa rezultata odnosi se na kvantificiranje lingvističkih vrijednosti odabranih najutjecajnijih čimbenika. U radu je korištena adaptirana horizontalna metoda prikupljanja podataka koja je jednostavno primjenjiva i na ostale lingvističke varijable prisutne u pravilima o izbjegavanju sudara na moru, a koje nisu korištene u ovom radu. Iako su neizraziti sustavi korišteni u prethodnim istraživanjima, nije dovoljno pozornosti dato samim funkcijama pripadnosti lingvističkih varijabli. Radom je detaljno prikazana metoda prikupljanja podataka, obrada podataka te definiranje funkcija pripadnosti lingvističkih varijabli i njima pripadajućih lingvističkih vrijednosti. Detaljno su definirane lingvističke varijable podjelom na pet lingvističkih vrijednosti oslanjajući se na ekspertna mišljenja velikog broja ispitanika što prethodno nije bio slučaj. Dodatno, obrađene su lingvističke varijable *BCR* i *Vidljivost* koje nisu obrađivane u prethodnim istraživanjima. Svakako je bitno obratiti pozornost na neke od rezultata. Budući smo u ovom dijelu istraživanja matematički odredili važne čimbenike, moguće je usporediti srodne varijable *BCR* i *CPA*. Medijan umjerene vrijednosti *BCR* iznosi 1,8 Nautičke milje dok medijan umjerene vrijednosti *CPA* iznosi 1,5 Nautičke milje, što potvrđuje kako pomorci žele nešto veći prolaz drugog broda ispred pramca vlastitog. Sve lingvističke vrijednosti varijable *BCR* su nešto veće nego lingvističke vrijednosti varijable *CPA*. Medijan umjerene vrijednosti varijable *TCPA* iznosi 13 minuta, što je u skladu s uobičajenom praksom na brodovima. Lingvistička varijabla *Vidljivost* koja nije prethodno obrađivana ima vrijednost medijana lingvističke vrijednosti *Slaba vidljivost* od 2,7 Nautičke milje, te aritmetičku sredinu iste vrijednosti od 2,845. Prednost neizrazitih brojeva predstavlja svojstvo da ne postoji izrazita granica te će i vrijednosti koje su nešto veće od navedenih kao na primjer vidljivost od 3,0 Nautičke milje, i dalje pripadati skupu lingvističke vrijednosti *Slaba vidljivost*. Kvantifikacijom navedenih lingvističkih varijabli matematički su prikazane neizrazite lingvističke vrijednosti, te je predstavljena prednost neizrazitih skupova u usporedbi s klasičnim skupovima.

Četvrta grupa rezultata predstavlja rezultate modela neizrazitog sustava zaključivanja za određivanje neizrazitog indeksa rizika sudara. S obzirom na kompleksnost međusobnih odnosa brodova, bilo je potrebno odrediti određene grupe susreta s obzirom na razliku međusobnih kursova. Budući su stanja smanjene vidljivosti određena kao vrlo važna, tako se i pristupilo i izradi dodatnih modela u uvjetima smanjene vidljivosti. Važno je primijetiti da je to u potpunosti u skladu sa pravilima o izbjegavanju sudara na moru, te je još jednom pokazatelj relevantnosti ekspertnog mišljenja. Validacijom neizrazitih sustava zaključivanja odabrane su jednostavnije trapezoidne funkcije pripadnosti, koje se

dale bolje rezultate u svim promatranim slučajevima. Kod modela IV moguće su dvije različite plovidbene situacije s obzirom na međusobne obveze brodova. Sam model obje situacije promatra jednako, s obzirom da bi kod obje situacije postajale sve četiri ulazne varijable, to jest u obje situacije bi dolazilo do presjecanja kursa ispred pramca vlastitoga broda. Prilikom budućih istraživanja bilo bi potrebno ispitati postoji li razlika u percepciji rizika kod članova plovidbene straže kod ove dvije navedene situacije.

Posebno se treba osvrnuti na rezultate verifikacije modela, koji u biti predstavlja konačni ispit uspješnosti modela. Možda najinteresantniji dio verifikacije predstavlja verifikacija modela na stvarnim nezgodama koristeći dostupne podatke. Rezultati verifikacije modela kod prve grupe studija slučaja koje se temelje na stvarnim nezgodama ukazuje kako je ostvareno unapređenje protusudarnog uzbunjivanja. Neizraziti sustav zaključivanja za određivanje neizrazitog indeksa rizika sudara u oba stvarna slučaja pravovremeno bi uzbunio časnike plovidbe na povećani indeks rizika sudara. U studiji slučaju sudara brodova Verity i Polesie može se primijetiti prednost neizrazitog sustava zaključivanja korištenjem dodatne varijable *Međusobna udaljenost*. Naime kod približavanja drugog broda iza subočice vlastitog broda, može se dogoditi da je vrijeme do sudara relativno daleko, a međusobna udaljenost se ipak kontinuirano smanjuje dovodeći brod u položaj opasnih blizina. To također vrijedi u slučajevima pretjecanja brodova, osobito kad je međusobna razlika brzina mala. Rezultati nadalje ukazuje kako neizraziti sustav odlučivanja pravilno odlučuje i u slučajevima protukursa kada se drugi brod nalazi desno pramčanice vlastitoga broda. U takvim slučajevima postoji opasnost da će jedan od brodova suprotno pravilima pokušati izbjegavati sudar skretanjem u lijevo. Dosadašnji sustavi nemaju mogućnost opažanja navedenog problema, budući se oslanjaju samo na vrijednosti varijabli *CPA* i *TCPA*. U svim ostalim studijama model neizrazitog sustava zaključivanja detaljno opisuje neizraziti indeks rizika sudara, omogućujući usporedbu indeksa rizika sudara između više brodova a na temelju ulaznih varijabli. Time se rješava opaženi problem neadekvatne procjene rizika sudara temeljem samo *CPA* i *TCPA* varijabli. Korištenjem dodatnih varijabli omogućeno je detaljnije određivanje opasnosti od sudara koje u obzir osim *CPA* i *TCPA* uzima čimbenike *Vidljivost*, *BCR* i *Međusobnu udaljenost* ali i međusobne odnose brodova. Ograničenja modela koja se odnose na broj korištenih varijabli, moguće je u daljnjim istraživanjima rješavati kroz hijerarhijske neizrazite sustave, koji omogućuju korištenje većeg broja varijabli. Dodatno, moguće je i jednostavno unaprijediti konceptualni primjer modela prikazan u prethodnom poglavlju koristeći nova saznanja i varijable. Također bilo bi potrebno istražiti mogućnost još detaljnije podjele podmodela gdje bi se dodatno ispitale razlike u percepciji rizika a s obzirom na međusobne odnose brodova.

10. ZAKLJUČAK

U ovom doktorskom radu sustavno je obrađena uvijek aktualna tema određivanja opasnosti sudara na moru. Neizraziti indeks rizika sudara određen je korištenjem neizrazitih sustava koji imaju široku primjenu u raznim industrijama. Prethodna istraživanja su se donekle bavila primjenom neizrazitih sustava u pomorskoj plovidbi i određivanju rizika sudara, međutim modeliranje doživljaja rizika i sumnje člana plovodbene straže nije dovoljno istraživano. S obzirom na svojstva neizrazitih sustava i njihovu mogućnost simuliranja ljudske percepcije, neizraziti sustavi su odabrani kako bi se modelirala procjena rizika sudara na moru koristeći neizrazite varijable. U prvom dijelu istraživanja bilo je potrebno odrediti čimbenike koje eksperti uzimaju kao bitne pri procjeni rizika sudara. Pored uobičajenih varijabli udaljenosti najbližeg prolaza i vremena najbližeg prolaza bilo je potrebno odrediti koji su to drugi čimbenici, te koliki je njihov utjecaj prema mišljenju eksperata. Rezultati prvog dijela istraživanja nisu iznenađujući, ali jesu bitni i vrijedni pozornosti. Određeno je pet čimbenika koje eksperti smatraju vrlo bitnim pri procjeni rizika sudara. Osim udaljenosti točke najbližeg prolaza i vremena najbližeg prolaza eksperti su odredili horizontalnu vidljivost, udaljenost prolaza ispred pramca vlastitog broda te međusobnu udaljenost kao dodatne čimbenike. U drugom dijelu istraživanja korištenjem posebno prilagođenog anketnog alata za prikupljanje ekspertnog znanja ostvarila se mogućnost kreiranja funkcija pripadnosti lingvističkih varijabli koje odražavaju mišljenje eksperata. Pregledom dosadašnjih istraživanja, utvrđeno je kako su funkcije pripadnosti koje su ranije korištene bile nejasno određene ili određene uz vrlo mali broj eksperata. Pri tom su se koristile samo osnovne funkcije pripadnosti, najčešće trokutaste, uz vrlo grubu podjelu ulaznih varijabli, do maksimalno tri jezične vrijednosti. Nakon statističke obrade dobivenih granica lingvističkih vrijednosti pojedine lingvističke varijable, kreirali su se puni rasponi/skupovi lingvističkih varijabli putem kojih je omogućeno odrediti i oblike varijabli. Dobivene su lingvističke varijable koje u svojoj suštini odražavaju mišljenja eksperata, te njihove suglasnosti i razilaženja. Pri tome se koristila vrlo fina podjela na pet jezičnih vrijednosti unutar varijable. Takva podjela predstavljala je znatan izazov, budući otežava kreiranje neizrazitih pravila. Broj pravila znatno se povećava sa povećanjem broja lingvističkih vrijednosti. Ipak, kod finije podjele, moguće je postići detaljnije određenu izlaznu varijablu. U trećem dijelu istraživanja određena su pravila neizrazitog sustava, koristeći inovativni pristup grupnoj direktnoj metodi. Eksperti su procjenjivali rizik sudara simulacijom plovidbe uz pomoć radarskog uređaja i vizualnim prikazom okoliša koristeći nautički simulator. Simulirani su mnogostruki plovodbeni scenariji, te su se promatrali brodovi od pojave na horizontu do prolaza, kako bi se formirala baza neizrazitih pravila. To je posebnost u odnosu na uobičajeno ekspertno određivanje neizrazitih pravila gdje eksperti koriste unaprijed pripremljene tablice sa kombinacijama ulaznih varijabli. Validacijom neizrazitih sustava utvrđeno je kako trapezoidne funkcije pripadnosti daju bolje rezultate u svim promatranim slučajevima, te su se te funkcije odabrale za daljnju verifikaciju modela. Verifikacija modela provedena je koristeći studije slučaja od kojih su neke rekonstrukcije

stvarnih događaja koji su rezultirali sudarom i gubitkom ljudskih života, imovine i štetom po okoliš. Verifikacija kao finalni čin provjere modela, ukazala je kako je ostvareno znatno unapređenje protusudarnog uzbunjivanja na način da je model alarmirao članove plovibne straže znatno ranije nego što bi bili alarmirani koristeći samo ARPA sustav. Prikazano je kako bi kod stvarnih situacija koje su rezultirale sudarom i gubitkom života, model neizrazitog indeksa rizika sudara pravovremeno upozorio člana plovibne straže kako postoji visoki rizik sudara. To je postignuto uključivanjem dodatnih varijabli na koje su eksperti ukazali kao bitne. Korištenje dodatne varijable *Međusobna udaljenost* pokazalo se jako bitnim, pogotovo kod plovibnih susreta u kojima drugi brod dolazi iz krmenog sektora, te se pri tome kursovi križaju. Budući da je u takvim situacijama relativna brzina približavanja često mala, posredno je vrijeme do najbližeg prolaza relativno veliko. Posljedično neće doći aktivacije alarma ARPA uređaja, iako se drugi brod može nalaziti na vrlo maloj međusobnoj udaljenosti. U takvim situacijama neizraziti sustav bi alarmirao člana plovibne straže mnogo ranije, ali što je još bitnije pravovremeno. Varijablom *Udaljenost prolaza ispred pramca* postignuto je razlikovanje situacija koje bi koristeći samo varijable *CPA* i *TCPA* izgledale jednako ali u stvarnosti nisu. Brodovi koji su prolazili na većoj udaljenosti ispred pramca ocjenjivani su kao manje opasni od onih koji su prolazili blizu pramcu. Na taj način osim alarmiranja, model je u pružio hijerarhiju rizika sudara te služi kao potpora odlučivanju članu plovibne straže. Buduća istraživanja trebala bi razmotriti mogućnosti kreiranja neizrazitih sustava određivanja neizrazitog indeksa rizika sudara uz korištenje većeg broja varijabli. Budući da veći broj varijabli nosi kao problem eksponencijalni rast broja pravila, potrebno je istražiti mogućnost korištenja hijerarhijskih neizrazitih sustava kako bi se u model uključilo još neke varijable koje eksperti uzimaju u obzir a nisu uzete u obzir u ovom radu. Dodatno, potrebno je istražiti mogućnost korištenja i nekih drugih funkcija pripadnosti, te proučiti kakav rezultat bi se polučio u određenim plovibnim situacijama. Nadalje s obzirom da su međusobni odnosi brodova u radu podijeljeni u dvanaest karakterističnih susreta i modela, trebalo bi istražiti mogućnost podjele susreta u još više karakterističnih odnosa, to jest u još finiju podjelu s ciljem dobivanja još detaljnijeg modela. Budući da je područje neizrazitih sustava vrlo dinamično, moguće je u daljnjim istraživanjima, a koristeći dobivene podatke istražiti mogućnost korištenja i nekih drugih tipova neizrazitih sustava, poput tipa dva neizrazitog sustava kako bi se modelirala nesigurnost u stupnju pripadnosti određenom neizrazitom skupu. Svakako bi kod budućih istraživanja trebalo obratiti pozornost na percepciju rizika sudara članova plovibne straže kada u rizičnoj plovibnoj situaciji sudjeluje i autonomni brod. Naposljetku, bitno je zaključiti kako je jedan od najbitnijih uvjeta uspješnog izbjegavanja to da je ono izvršeno pravovremeno. Kašnjenje u izbjegavanju često uzrokuje neželjene posljedice te se ovim prilogom unapređenju protusudarnog uzbunjivanja postigao doprinos pravovremenom uzbunjivanju u rizičnim situacijama.

LITERATURA

1. Ahn, J. H., Rhee, K. P., & You, Y. J. (2012). A study on the collision avoidance of a ship using neural networks and fuzzy logic. *Applied Ocean Research*, 37, 162-173.
2. Alavala, C. R. (2008). *Fuzzy logic and neural networks: basic concepts & application*. New Age International.
3. Almasri, M., Elleithy, K., & Alajlan, A. (2015). Sensor fusion based model for collision free mobile robot navigation. *Sensors (Switzerland)*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/s16010024>
4. Arnerić, J., & Protrka, K. (2019). Modeli analize varijance (ANOVA). *Matematičko fizički list*, 70(277), 25-32.
5. Atalić, J., & Hak, S. (2014). Procjena rizika od katastrofa u Republici Hrvatskoj—rizik od potresa. Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet u suradnji s Ministarstvom graditeljstva i prostornog uređenja i Državnom upravom za zaštitu i spašavanje, Hrvatska.
6. Aven, T. (2011). On the new ISO guide on risk management terminology. *Reliability engineering & System safety*, 96(7), 719-726.
7. Aven, T. (2012). The risk concept-historical and recent development trends. *Reliability Engineering and System Safety*, 99(0951), 33–44. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2011.11.006>
8. Aven, T. (2017). Improving risk characterisations in practical situations by highlighting knowledge aspects, with applications to risk matrices. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 42-48
9. Awan, M. S. K., & Al Ghamdi, M. A. (2019). Understanding the vulnerabilities in digital components of an integrated bridge system (IBS). *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(10), 350.
10. Azam, M. H., Hasan, M. H., Hassan, S., & Abdulkadir, S. J. (2021). A novel approach to generate type-1 fuzzy triangular and trapezoidal membership functions to improve the classification accuracy. *Symmetry*, 13(10), 1932.
11. Bonato, J., Mrak, Z., & Badurina, M. (2015). Speed regulation in fan rotation using fuzzy inference system. *Pomorstvo*, 29(1), 58-63
12. Batista Santos, P. M., & Santos, T. A. (2024). Short Sea Shipping in the Age of Sustainability, Autonomous Navigation and Digitalization. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(2), 252.
13. Benjamin, M. R., Curcio, J. A., Leonard, J. J., & Newman, P. M. (2006). Navigation of unmanned marine vehicles in accordance with the rules of the road. *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.* (3581-3587). IEEE.
14. Boviatsis, M., & Vlachos, G. (2022). Sustainable operation of unmanned ships under current international maritime law. *Sustainability*, 14(12), 7369.

15. Brčić, D., & Žuškin, S. (2018). Towards paperless vessels: A Master's perspective. *Pomorski zbornik*, *55(1)*, 183-199.
16. Bukhari, A. C., Tusseyeva, I., Lee, B. G., & Kim, Y. G. (2013). An intelligent real-time multi-vessel collision risk assessment system from VTS view point based on fuzzy inference system. *Expert Systems with Applications*, *40(4)*, 1220–1230. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.016>
17. Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?—Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific model development*, *7(3)*, 1247-1250.
18. Chang, C. H., Wijeratne, I. B., Kontovas, C., & Yang, Z. (2024). COLREG and MASS: Analytical review to identify research trends and gaps in the Development of Autonomous Collision Avoidance. *Ocean Engineering*, *302*, 117652.
19. Chen, S., Ahmad, R., Lee, B. G., & Kim, D. H. (2014). Composition ship collision risk based on fuzzy theory. *Journal of Central South University*, *21(11)*, 4296–4302. <https://doi.org/10.1007/s11771-014-2428-z>
20. Chin, H. C., & Debnath, A. K. (2009). Modeling perceived collision risk in port water navigation. *Safety Science*, *47(10)*, 1410–1416. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2009.04.004>.
21. Coldwell, T. G. (1983). Marine Traffic Behaviour in Restricted Waters. *Journal of Navigation*, *36(3)*, 430–444. <https://doi.org/10.1017/S0373463300039783>
22. Cornelissen, A. M. G., van den Berg, J., Koops, W. J., & Kaymak, U. (2003). Elicitation of expert knowledge for fuzzy evaluation of agricultural production systems. *Agriculture, ecosystems & environment*, *95(1)*, 1-18.
23. Cox, Jr, L. A. (2009). What's wrong with hazard-ranking systems? An expository note. *Risk Analysis: An International Journal*, *29(7)*, 940-948.
24. Det Norske Veritas. (2024). *Ocean's future to 2050*. Raspoloživo na: <https://www.dnv.com/oceansfuture/shipping.html>, (pristupljeno 20. travnja 2024).
25. Dong, W., Li, J., & Tu, X. (2023). A study on the development and trend of COLREGs—A broader perspective. *The Journal of Navigation*, 1-13.
26. Donnarumma, S., Figari, M., Martelli, M., & Zaccone, R. (2020). Simulation of the guidance and control systems for underactuated vessels. *U Modelling and Simulation for Autonomous Systems: 6th International Conference, MESAS 2019*, Palermo, Italy, October 29–31, 2019, Revised Selected Papers 6 (108-119). Springer International Publishing.
27. Du, L., Valdez Banda, O. A., Goerlandt, F., Huang, Y., & Kujala, P. (2020). A COLREG-compliant ship collision alert system for stand-on vessels. *Ocean Engineering*, *218*, 107866. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107866>

28. Du, L., Valdez Banda, O. A., & Sui, Z. (2022). Available-Maneuvering-Margins-Based Ship Collision Alert System. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(8), 1123.
29. Emmens, T., Amrit, C., Abdi, A., & Ghosh, M. (2021). The promises and perils of Automatic Identification System data. *Expert Systems with Applications*, 178, 114975. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114975>
30. Eugene A. Rosa (1998) Metatheoretical foundations for post-normal risk, *Journal of Risk Research*, 1:1, 15-44, doi: 10.1080/136698798377303
31. European Commission. (2024). *Maritime Unmanned Navigation through Intelligence in Networks*. Raspoloživo na: <https://cordis.europa.eu/project/id/314286>, (pristupljeno 22. travnja 2024).
32. Fan, C., Montewka, J., & Zhang, D. (2022). A risk comparison framework for autonomous ships navigation. *Reliability Engineering & System Safety*, 226, 108709.
33. Forti, N., d’Afflisio, E., Braca, P., Millefiori, L. M., Willett, P., & Carniel, S. (2021). Maritime anomaly detection in a real-world scenario: Ever Given grounding in the Suez Canal. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(8), 13904-13910.
34. Fruzzetti, C., Donnarumma, S., & Martelli, M. (2022). Dynamic target chasing: parameters and performance indicators assessment. *Journal of Marine Science and Technology*, 27(1), 712-729.
35. Fujii, Y., & Tanaka, K. (1971). Traffic Capacity. *Journal of Navigation*, 24(4), 543–552. <https://doi.org/10.1017/S0373463300022384>
36. Gastwirth, J. L., Gel, Y. R., & Miao, W. (2009). The impact of Levene’s test of equality of variances on statistical theory and practice. *Theory and Practice of Statistical Science*, 24 (3), 343–360. <https://doi.org/10.1214/09-STS301>.
37. Gegov, A., Sanders, D., & Vatchova, B. (2017). Aggregation of inconsistent rules for fuzzy rule base simplification. *International Journal of Knowledge-Based and Intelligent Engineering Systems*, 21(3), 135-145.
38. Gil, M., Wróbel, K., Montewka, J., & Goerlandt, F. (2020). A bibliometric analysis and systematic review of shipboard Decision Support Systems for accident prevention. *Safety science*, 128, 104717.
39. Gilda, K. S., & Satarkar, S. L. (2020). Analytical overview of defuzzification methods. *International Journal of Advance Research, Ideas and Innovations in Technology*, 6(2), 359-365.
40. GitHub. (2023). *A Range Slider question for LimeSurvey 5.x and 6.x*. Raspoloživo na: <https://github.com/tpartner/LimeSurvey-Range-Slider-5x-6x>, (pristupljeno 2. lipnja 2023).
41. GitHub. (2024). *DNV Ship Traffic Generator*. Raspoloživo na: <https://github.com/dnv-opensource/shiptraffic-generator>, (pristupljeno 12. veljače 2024).

42. Goerlandt, F., & Montewka, J. (2015). Maritime transportation risk analysis: Review and analysis in light of some foundational issues. *Reliability Engineering and System Safety*, *138*, 115–134. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.01.025>
43. Goerlandt, F., Montewka, J., Kuzmin, V., & Kujala, P. (2015). A risk-informed ship collision alert system: Framework and application. *Safety Science*, *77*, 182–204.
44. Goodwin, E. M. (1973). A Statistical Study of Ship Domains. *Journal of Navigation*, *26(1)*, 130–130. <https://doi.org/10.1017/s0373463300022992>
45. Gucma, L., & Marcjan, K. (2012). Examination of ships passing distances distribution in the coastal waters in order to build a ship probabilistic domain. *Zeszyty Naukowe / Akademia Morska w Szczecinie*, nr 32 (104(November 2016)), 34–40
46. Guillaume, S., & Magdalena, L. (2006). Expert guided integration of induced knowledge into a fuzzy knowledge base. *Soft computing*, *10*, 773-784.
47. Hansen, M. G., Jensen, T. K., Lehn-Schioler, T., Melchild, K., Rasmussen, F. M., & Ennemark, F. (2013). Empirical ship domain based on AIS data. *Journal of Navigation*, *66(6)*, 931–940. <https://doi.org/10.1017/S0373463313000489>
48. Hasan, M. F., & Sobhan, M. A. (2020). Describing fuzzy membership function and detecting the outlier by using five number summary of data. *American Journal of Computational Mathematics*, *10(03)*, 410-424.
49. Hasanspahić, N., Vujičić, S., Kristić, M., & Mandušić, M. (2022). Improving Safety Management through Analysis of Near-Miss Reports—A Tanker Ship Case Study. *Sustainability*, *14(3)*, 1094.
50. Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. H., & Friedman, J. H. (2009). *The elements of statistical learning: data mining, inference, and prediction* (Vol. 2, 1-758). New York: Springer.
51. Hasuike, T., Katagiri, H., & Tsubaki, H. (2015). A constructing algorithm for appropriate piecewise linear membership function based on statistics and information theory. *Procedia Computer Science*, *60*, 994-1003.
52. He, Y., Jin, Y., Huang, L., Xiong, Y., Chen, P., & Mou, J. (2017). Quantitative analysis of COLREG rules and seamanship for autonomous collision avoidance at open sea. *Ocean Engineering*, *140*, 281-291.
53. He, Y., Zhang, D., Zhang, J., Wu, B., & Guedes Soares, C. (2020). Dynamic Ship Domain Model Based on AIS Data for Inland Waterways. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 84324.
54. Hörteborn, A., Ringsberg, J. W., Svanberg, M., & Holm, H. (2019). A Revisit of the Definition of the Ship Domain based on AIS Analysis. *Journal of Navigation*, *72(3)*, 777–794. <https://doi.org/10.1017/S0373463318000978>;

55. Hilgert, H., & Baldauf, M. (1997). A common risk model for the assessment of encounter situations on board ships. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift*, 49(4), 531–542. <https://doi.org/10.1007/bf02764347>
56. Hu, Y., & Park, G. K. (2020). Collision risk assessment based on the vulnerability of marine accidents using fuzzy logic. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 12, 541-551.
57. Huang, X., Wen, Y., Zhang, F., Han, H., Huang, Y., & Sui, Z. (2023). A review on risk assessment methods for maritime transport. *Ocean Engineering*, 279, 114577.
58. International Association of Class Societies. (2021). *A guide to risk assessment in ship operations*.
59. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities. (2009). *O-134: IALA Recommendation on the Risk Management Tool for Ports and Restricted Waterways*. Raspoloživo na: https://www.iala-aism.org/content/uploads/2016/07/o_134_ed2_iala_risk_management_tool_for_ports_and_restricted_waterways_may2009.pdf, (pristupljeno 18. travnja 2024).
60. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities.(2024). *Risk analysis and management*. Raspoloživo na: <https://www.iala-aism.org/technical/risk-analysis-and-management/risk-management-tools/qualitative-risk-management-tool-pawsa/>, (pristupljeno 18. travnja 2024).
61. International Chamber of Shipping. (2024). *Shipping and World Trade: World Seaborne Trade*. Raspoloživo na: <https://www.ics-shipping.org/shipping-fact/shipping-and-world-trade-world-seaborne-trade/>, (pristupljeno 20. lipnja 2024).
62. International Maritime Organisation. (1972). *The International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972 (COLREGs)*.
63. International Maritime Organization. (1996). *Rezolucija MSC.64 (67): Recommendation on performance standards for integrated bridge systems (IBS)*.
64. International Maritime Organization. (1993). *The International Safety Management (ISM) Code*.
65. International Maritime Organization. (2004). *Rezolucija MSC.192(79): Adoption of the revised performance standards for radar equipment*.
66. International Maritime Organization. (2004). *Rezolucija MSC.252(83): Adoption of the revised performance standards for integrated navigation system*.
67. International Maritime Organization. (2010). *Degree of risk evaluation; SN.1/Circ.296*.

68. International Maritime Organization. (2015). *Rezolucija A.1106(29): Revised guidelines for the onboard operational use of shipborne automatic identification system (AIS)*.
69. International Maritime Organization. (2018). *MSC.1/circ.1595: E-navigation strategy implementation plan – update 1*
70. International Maritime Organisation. (2021). *Outcome of the Regulatory Scoping Exercise for the Use of Maritime Autonomous Surface Ships (MASS)*.
71. International Organization for Standardization. (2018). *Risk management*.
72. Jane, J. B., & Ganesh, E. N. (2019). A review on big data with machine learning and fuzzy logic for better decision making. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(10), 1221-1225.
73. Kabir, M., & Kabir, M. M. J. (2021). Fuzzy membership function design: An adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) based approach. *Proceedings of the 2021 International Conference On Computer Communication and Informatics (ICCCI) (pp. 1-5)*. IEEE.
74. Kao, S. L., Lee, K. T., Chang, K. Y., & Ko, M. Der. (2007). A fuzzy logic method for collision avoidance in vessel traffic service. *Journal of Navigation*, 60(1), 17–31. <https://doi.org/10.1017/S0373463307003980>
75. Karunasingha, D. S. K. (2022). Root mean square error or mean absolute error? Use their ratio as well. *Information Sciences*, 585, 609-629.
76. Kaur, P., Stoltzfus, J., & Yellapu, V. (2018). Descriptive statistics. *International Journal of Academic Medicine*, 4(1), 60-63.
77. Kim, H. G., Yun, S. J., Choi, Y. H., Ryu, J. K., & Suh, J. H. (2021). Collision avoidance algorithm based on COLREGs for unmanned surface vehicle. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(8), 863.
78. Kim, I. (2023). Systematization of Legal Procedures for Collision Avoidance between a Fully Autonomous Ship and a Traditional Manned Ship. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(10), 1850.
79. Kim, J. K., & Park, D. J. (2023). Determining the proper times and sufficient actions for the collision avoidance of navigator-centered ships in the open sea using artificial neural networks. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), 1384.
80. Kongsberg. (2023). *Kongsberg successfully completes autonomous operation of coastal cargo ship as part of EU's AUTOSHIP project*. Raspoloživo na: <https://www.kongsberg.com/maritime/about-us/news-and-media/news-archive/2023/eus-autoship-project/>, (pristupljeno 1. veljače 2024).
81. Kongsberg.(2023). *Kongsberg successfully demonstrates autonomous vessel operations on Belgium's inland waterway network*. Raspoloživo na: <https://www.kongsberg.com/maritime/about-us/news-and-media/news-archive/2023/trial-of-autonomous-shipping/>, (pristupljeno 1. veljače 2024).

82. Kristić, M., Žuškin, S., Brčić, D., & Car, M. (2021a). ECDIS EHO: Handling the ECDIS failure at sea, *Proceedings of the International Association of Maritime Universities (IAMU) Conference*, 284-295.
83. Kristić, M., Žuškin, S., Brčić, D., & Car, M. (2021b). Overreliance on ECDIS Technology: A Challenge for Safe Navigation. *TransNav: the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 15(2), 277–287. <https://doi.org/10.12716/1001.15.02.02>
84. Kristić, M., & Žuškin, S. (2024). Quantification of Expert Knowledge in Describing COLREGs Linguistic Variables. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 849.
85. Krueger, T., Page, T., Hubacek, K., Smith, L., & Hiscock, K. (2012). The role of expert opinion in environmental modelling. *Environmental Modelling & Software*, 36, 4-18.
86. Kumar, A., & Misra, D. K. (2020). A review on the statistical methods and implementation to homogeneity assessment of certified reference materials in relation to uncertainty. *Mapan*, 35(3), 457-470.
87. Larichev, O. I. (2002). Close imitation of expert knowledge: the problem and methods. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 1(01), 27-42.
88. Lazarowska, A. (2019). Research on algorithms for autonomous navigation of ships. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 18(2), 341-358.
89. Lee, H. J., & Rhee, K. P. (1993). Development of Collision Avoidance System By Fuzzy Theory. *Japan-Korea Joint Workshop on Ship & Marine Hydrodynamics*, 164–169
90. Li, F., Chen, C. H., Lee, C. H., & Khoo, L. P. (2020). A user requirement-driven approach incorporating TRIZ and QFD for designing a smart vessel alarm system to reduce alarm fatigue. *The Journal of Navigation*, 73(1), 212-232.
91. Lloyds Register. (2014). *Guidance Notes for Risk Based Analysis: Collisions*. Raspoloživo na: <https://www.lr.org/en/knowledge/lloyds-register-rules/guidance-notes/guidance-notes-for-collision-analysis/>, (pristupljeno 5. travnja 2023).
92. López-Guauque, J. A., & Gil-Lafuente, A. M. (2020). Fifty years of fuzzy research: A bibliometric analysis and a long-term comparative overview. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 38(5), 5413–5425. <https://doi.org/10.3233/JIFS-179634>
93. Lopez-Santander, A., & Lawry, J. (2017). An Ordinal Model of Risk Based on Mariner's Judgement. *Journal of Navigation*, 70(2), 309–324. <https://doi.org/10.1017/S0373463316000576>
94. Lund, M. S., Gulland, J. E., Hareide, O. S., & Weum, K. O. C. (2018). Integrity of integrated navigation systems. *Proceedings of the 2018 IEEE Conference on Communications and Network Security (CNS)*. IEEE.

95. Males, L., Sumic, D., & Rosic, M. (2022). Applications of multi-agent systems in unmanned surface vessels. *Electronics*, *11*(19), 3182.
96. Malyszko, M. (2021). Fuzzy logic in selection of maritime search and rescue units. *Applied Sciences*, *12*(1), 21.
97. Mann, P. S. (2007). *Introductory statistics*. John Wiley & Sons
98. Maritime and Coastguard Agency. (2022). *Code of Safe Working Practices for Merchant Seafarers 2015 edition, Amendment 7*, October 2022.
99. Martelli, M., Faggioni, N., & Zaccone, R. (2019). Development of a navigation support system by means of a synthetic scenario. *Proceedings of the 18th International Congress of the Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2019)*, Rujan 9-11, 2019, Varna, Bugarska.
100. Martelli, M., Žuškin, S., Zaccone, R., & Rudan, I. (2023). A COLREGs-compliant decision support tool to prevent collisions at sea. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, *17*.
101. Martelli, M., Žuškin, S., Cellerino, E., Zaccone, R. (2024). Ship Collision detection and classification employing AIS data. *Proceedings of the Thirty-fourth (2024) International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, June 16–21, 2024.
102. Martinez, W. L., & Martinez, A. R. (2001). *Computational statistics handbook with MATLAB*. Chapman and Hall/CRC.
103. Mazandarani, M., & Li, X. (2020). Fractional Fuzzy Inference System: The New Generation of Fuzzy Inference Systems. *IEEE Access*, *8*, 126066–126082. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3008064>
104. McHugh, M. L. (2011). Multiple comparison analysis testing in ANOVA. *Biochemia medica*, *21*(3), 203-209.
105. Ministarstvo rada i mirovinskog osiguranja. (2014). *Pravilnik o izradi procjene rizika*, Narodne novine br. 112/14, 129/19
106. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. *Japan Transport Safety Board*. Raspoloživo na: https://www.mlit.go.jp/jtsb/eng-mar_report/2019/2017tk0009e.pdf, (pristupljeno 18. ožujka 2024).
107. Mitsuishi, T. (2022). Definition of Centroid Method as Defuzzification. *Formalized Mathematics*, *30*(2), 125-134.
108. Miyoshi, T., Fujimoto, S., Rooks, M., Konishi, T., & Suzuki, R. (2022). Rules required for operating maritime autonomous surface ships from the viewpoint of seafarers. *The Journal of Navigation*, *75*(2), 384-399.
109. Mohović, Đ. (2010). *Ocjena prihvatljivosti pomorskih plovidbenih rizika*. (Doktorska disertacija, Sveučilište u Rijeci. Pomorski fakultet, Rijeka).
110. Mohović, Đ., Mohović, R., Suljić, M., & Njegovan, M. (2021). Reducing the risk of collision between ships in a close-quarters situation by simulating collision avoidance actions. *The Journal of Navigation*, *74*(3), 558-573.

111. Montewka, J., Gil, M., & Wróbel, K. (2020). Discussion on the article by Zhang & Meng entitled “Probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment” [Ocean Eng. 186 (2019) 106130]. *Ocean Engineering*, 209, 107527.
112. Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2010). *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley & Sons.
113. Mou, J. M., Van der Tak, C., & Ligteringen, H. (2010). Study on collision avoidance in busy waterways by using AIS data. *Ocean Engineering*, 37(5-6), 483-490.
114. Munakata, T., Yashvant, J. (1994). Fuzzy systems: an overview. *Communications of the ACM*, 37(3), 69-77.
115. Namgung, H., & Kim, J. S. (2021). Collision risk inference system for maritime autonomous surface ships using COLREGs rules compliant collision avoidance. *IEEE Access*, 9, 7823-7835.
116. National Institute of Standards and Technology. (2012). *NIST/Sematech e-Handbook of Statistical Methods*. Raspoloživo na: <https://www.itl.nist.gov/div898/handbook/eda/section3//eda35a.htm>, (pristupljeno 11. kolovoza 2023).
117. Nguyen, M., Zhang, S., & Wang, X. (2018). A novel method for risk assessment and simulation of collision avoidance for vessels based on AIS. *Algorithms*, 11(12), 204.
118. Orca Ai. (2022). *World's first autonomous commercial ship voyage in congested water successfully completed*. Raspoloživo na: <https://www.orca-ai.io/resource/worlds-first-autonomous-commercial-ship-voyage-in-congested-water-successfully-completed/>, (pristupljeno 24. svibnja 2024).
119. Ostertagova, E., Ostertag, O., & Kováč, J. (2014). Methodology and application of the Kruskal-Wallis test. *Applied mechanics and materials*, 611, 115-120.
120. Ozturk, U., & Cicek, K. (2019). Individual collision risk assessment in ship navigation: A systematic literature review. *Ocean Engineering*, 180, 130–143. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.03.042>
121. Pan, W., Xie, X.-lian, Bao, T.-tian, & Li, M. (2021). Ship domain model for ships with restricted manoeuvrability in busy waters. *Journal of Navigation*, 74(3), 673–697. <http://doi.org/10.1017/S037346332000065X>
122. Pedersen, T. A., Vasanthan, C., Karoliuss, K., Engelhardtss, Ø., Houwelling, K. P., & Jørgensen, A. (2023). Generating Structured Set of Encounters for Verifying Automated Collision and Grounding Avoidance Systems. *Journal of Physics: Conference Series*, 2618(1), 012013.
123. Perera, L. P., & Soares, C. G. (2015). Collision risk detection and quantification in ship navigation with integrated bridge systems. *Ocean Engineering*, 109, 344-354.

124. Pietrzykowski, Z. (2008). Ship's fuzzy domain - A criterion for navigational safety in narrow fairways. *Journal of Navigation*, 61(3), 499–514. <https://doi.org/10.1017/S0373463308004682>
125. Pietrzykowski, Z., & Uriasz, J. (2009). The ship domain - A criterion of navigational safety assessment in an open sea area. *Journal of Navigation*, 62(1), 93–108. <https://doi.org/10.1017/S0373463308005018>
126. Rahim, R. (2017). Comparative analysis of membership function on Mamdani fuzzy inference system for decision making. *Journal of Physics: Conference Series*, 930(1), 12029.
127. Ren, Y., Mou, J., Yan, Q., Zhang, F. (2011). Study on assessing dynamic risk of ship collision. *Proceedings of the ICTIS 2011 Multimodal Approach to Sustained Transportation System Development: Information, Technology, Implementation*, Reston, VA, pp. 2751–2757. [https://doi.org/10.1061/41177\(415\)346](https://doi.org/10.1061/41177(415)346)
128. Rødseth, Ø. J., Wenersberg, L. A. L., & Nordahl, H. (2023). Improving safety of interactions between conventional and autonomous ships. *Ocean Engineering*, 284, 115206.
129. Ross, T. J. (2005). *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons.
130. Rostek, D., & Baldauf, M. (2024). Technologies for situational awareness in autonomous shipping and their impact on maritime training and education. *Proceedings of the INTED2024*, 5105-5114.
131. Rudan, I. (2010). *Model ranog otkrivanja opasnosti-doprinos učinkovitosti sustava nadzora i upravljanja pomorskim prometom* (Doktorska disertacija, Sveučilište u Rijeci. Pomorski fakultet, Rijeka).
132. Rudan, I., Frančić, V., Valčić, M., & Sumner, M. (2020). Early detection of vessel collision situations in a vessel traffic services area. *Transport*, 35(2), 121-132.
133. Rudan, I., Sumner, M., Mohović, Đ., Brčić, D., Gulić, M., Valčić, S., Šakan, D., Strabić, M., Vilić, I., Žuškin, M., Car, M., Kristić, M., Perić Hadžić, A., Žuškin, S. (2024). Dynamic Safety Zone Assessment for COLREG Compliant Navigation DSS in Integrated Navigation Systems. *Proceedings of the Thirty-fourth (2024) International Ocean and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece, June 16–21, 2024.
134. Runkler, T. A. (1997). Selection of appropriate defuzzification methods using application specific properties. *IEEE transactions on fuzzy systems*, 5(1), 72-79.
135. SafeNav. (2024). *Towards an Autonomous Future*. Raspoloživo na <https://www.safenavsystem.com/>, (pristupljeno 22. travnja 2024).
136. Sedov, V. A., Sedova, N. A., & Glushkov, S. V. (2016). The fuzzy model of ships collision risk rating in a heavy traffic zone. *Vibroengineering Procedia*, 8, 453–458

137. Siddique, N., & Adeli, H. (2013). *Computational intelligence: synergies of fuzzy logic, neural networks and evolutionary computing*. John Wiley & Sons.
138. Sviličić, B., Kristić, M., Žuškin, S., & Brčić, D. (2020). Paperless ship navigation: cyber security weaknesses. *Journal of Transportation Security*, *13*, 203-214.
139. Sviličić, B., Rudan, I., Jugović, A., & Zec, D. (2019). A study on cyber security threats in a shipboard integrated navigational system. *Journal of Marine Science and Engineering*, *7*(10), 364.
140. Szlapczynski, R., & Szlapczynska, J. (2017). Review of ship safety domains: Models and applications. *Ocean Engineering*, *145*, 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.09.020>
141. Szlapczynski, R., Szlapczynska, J. (2021). A ship domain-based model of collision risk for near-miss detection and Collision Alert Systems, *Reliability Engineering & System Safety*, *214*. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.107766>
142. Šikić, M., Jančić, A., Jureško, M., & Mohović, Đ. (2023). Analysis of Risks Arising from the Use of Autonomous Vessels. *Pomorski zbornik*, *63*, 63-74.
143. Škrobonja, A., Valčić, S., Žuškin, S., & Brčić, D. (2020). On VDES/ECDIS Integration. *Pomorstvo*, *34*(1), 195-200.
144. The MathWorks. (2023). *Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*. Raspoloživo na: https://uk.mathworks.com/help/pdf_doc/fuzzy/fuzzy_ug.pdf, (pristupljeno 24. listopada 2023).
145. The Royal Institution of Naval Architects. (2024). *Artificial intelligence steers Orca AI's autonomous maritime odyssey*. Raspoloživo na: <https://rina.org.uk/publications/the-naval-architect/artificial-intelligence-steers-orca-ais-autonomous-maritime-odyssey/>, (pristupljeno 24. svibnja 2024).
146. The United Nations Statistics Division. (2020). *Automatic Identification System (AIS) Data Week*. Raspoloživo na: <https://unstats.un.org/unsd/trade/events/2020/AisDataWeek/default.asp>, (pristupljeno 15. srpnja 2023).
147. Tzeng, G. H., & Huang, J. J. (2014). *Fuzzy multiple objective decision making*. CRC Press.
148. van de Merwe, K., Mallam, S., Nazir, S., & Engelhardtson, Ø. (2024). Supporting human supervision in autonomous collision avoidance through agent transparency. *Safety science*, *169*, 106329.
149. van der Waa, J., Schoonderwoerd, T., van Diggelen, J., & Neerincx, M. (2020). Interpretable confidence measures for decision support systems. *International Journal of Human-Computer Studies*, *144*, 102493.
150. Vujičić, S., Mohović, Đ., & Mohović, R. (2017). A model of determining the closest point of approach between ships on the open sea. *Promet-Traffic&Transportation*, *29*(2), 225-232.

151. Wang, C., Zhang, X., Yang, Z., Bashir, M., & Lee, K. (2023). Collision avoidance for autonomous ship using deep reinforcement learning and prior-knowledge-based approximate representation. *Frontiers in Marine Science*, *9*, 1084763.
152. Wang, S., Yin, J., & Khan, R. U. (2020). The multi-state maritime transportation system risk assessment and safety analysis. *Sustainability*, *12*(14), 5728.
153. Wawruch, R. (2017). Study Reliability of the Information About the CPA and TCPA Indicated by the Ship's AIS. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, *10*(3), 417–424. <https://doi.org/10.12716/1001.10.03.06>
154. Wielgosz, M. (2017). Ship Domain in Open Sea Areas and Restricted Waters: an Analysis of Influence of the Available Manoeuvring Area. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, *11*(1), 99–104. <https://doi.org/10.12716/1001.11.01.11>
155. Wróbel, K., Gil, M., Huang, Y., & Wawruch, R. (2022). The vagueness of COLREG versus collision avoidance techniques—A discussion on the current state and future challenges concerning the operation of autonomous ships. *Sustainability*, *14*(24), 16516.
156. Wu, B., Yip, T. L., Yan, X., & Guedes Soares, C. (2019). Fuzzy logic based approach for ship-bridge collision alert system. *Ocean Engineering*, *187*, 106152. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106152>
157. Xie, W., Gang, L., Zhang, M., Liu, T., & Lan, Z. (2024). Optimizing Multi-Vessel Collision Avoidance Decision Making for Autonomous Surface Vessels: A COLREGs-Compliant Deep Reinforcement Learning Approach. *Journal of Marine Science and Engineering*, *12*(3), 372.
158. Yim, J. Bin, Kim, D. S., & Park, D. J. (2018). Modeling perceived collision risk in vessel encounter situations. *Ocean Engineering*, *166*, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.08.003>
159. Yue, J., Yang, G., Li, C., Li, Z., Wang, Y., Feng, H., & Xu, B. (2017). Estimation of winter wheat above-ground biomass using unmanned aerial vehicle-based snapshot hyperspectral sensor and crop height improved models. *Remote Sensing*, *9*(7), 708.
160. Zaccone, R., & Martelli, M. (2020). A collision avoidance algorithm for ship guidance applications. *Journal of Marine Engineering & Technology*, *19*(sup1), 62-75.
161. Zaccone, R., & Martelli, M. (2023). Interaction between COLREG-compliant collision avoidance systems in a multiple MASS scenario. *Journal of Physics: Conference Series*, *2618*(1), 12006.
162. Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and control*, *8*(3), 338-353.
163. Zadeh, L. A. (1988). Fuzzy logic. *Computer*, *21*(4), 83-93. doi: 10.1109/2.53.

164. Zadeh, L. A. (2015). Fuzzy logic - A personal perspective. *Fuzzy Sets and Systems*, 281, 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2015.05.009>
165. Zaman, M. B., Kobayashi, E., Wakabayashi, N., Khanfir, S., Pitana, T., & Maimun, A. (2014). Fuzzy FMEA model for risk evaluation of ship collisions in the Malacca Strait: Based on AIS data. *Journal of Simulation*, 8(1), 91–104. <https://doi.org/10.1057/jos.2013.9>
166. Zhang, P., Chen, Q., Macdonald, T., Lau, Y. Y., & Tang, Y. M. (2022). Game change: A critical review of applicable collision avoidance rules between traditional and autonomous ships. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(11), 1655.
167. Zhang, W., Goerlandt, F., Montewka, J., & Kujala, P. (2015). A method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. *Ocean Engineering*, 107, 60-69.
168. Zhang, W., Goerlandt, F., Kujala, P., & Wang, Y. (2016). An advanced method for detecting possible near miss ship collisions from AIS data. *Ocean Engineering*, 124, 141–156. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.07.059>
169. Zhang, L., & Meng, Q. (2019). Probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment. *Ocean Engineering*, 186, 106130. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106130>
170. Zhang, L., & Meng, Q. (2020). Response to the discussion by Montewka Jaku , Gil Mateusz and Wrobel Krzysztof on the article by Zhang & Meng entitled “ Probabilistic ship domain with applications to ship collision risk assessment [Ocean Eng . 186]. *Ocean Engineering*, 209, 107471.
171. Zhang, W., Kopca, C., Tang, J., Ma, D., & Wang, Y. (2017). A systematic approach for collision risk analysis based on AIS data. *The Journal of Navigation*, 70(5), 1117-1132.
172. Zhang, Y., Zhang, D., & Jiang, H. (2023). A review of artificial intelligence-based optimization applications in traditional active maritime collision avoidance. *Sustainability*, 15(18), 13384.
173. Zhang, X., Wang, C., Jiang, L., An, L., & Yang, R. (2021). Collision-avoidance navigation systems for Maritime Autonomous Surface Ships: A state of the art survey. *Ocean Engineering*, 235, 109380.
174. Zhou, X. Y., Huang, J. J., Wang, F. W., Wu, Z. L., & Liu, Z. J. (2020). A study of the application barriers to the use of autonomous ships posed by the good seamanship requirement of COLREGs. *The Journal of Navigation*, 73(3), 710-725.
175. Žuškin, S., Brčić, D., & Valčić, S. (2017). ECDIS possibilities for BWE adoption. *TransNav: the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 11(3), 477-482.

POPIS TABLICA

Tablica 1. Matrica rizika. Priredio i prilagodio autor prema	19
Tablica 2. Prikaz frekvencije i postotaka ispitanika prema trenutnom zvanju na brodu. Priredio autor	43
Tablica 3. Prikaz frekvencije i postotaka ispitanika prema	44
Tablica 4. Prikaz frekvencije i postotaka ispitanika prema vrsti broda na kojoj trenutno plove – PPQ3. Priredio autor	45
Tablica 5. Prikaz frekvencije i postotaka ispitanika prema radnom iskustvu u trenutnom zvanju – PPQ4. Priredio autor	46
Tablica 6. Prikaz frekvencije i postotaka prema ukupnom radnom iskustvu na brodu – PPQ5. Priredio autor	47
Tablica 7. Deskriptivna statistika za prvu podgrupu varijabli. Priredio autor	50
Tablica 8: Deskriptivna statistika za drugu podgrupu varijabli. Priredio autor	50
Tablica 9. Deskriptivna statistika za treću podgrupu varijabli. Priredio autor	50
Tablica 10. Deskriptivna statistika za ispitivane varijable nakon odstranjenih stršćih vrijednosti. Priredio autor	53
Tablica 11. Grupiranje kategorije prema trenutnom zvanju na brodu. Priredio autor....	57
Tablica 12. Rezultati Levene testa s obzirom na trenutno zvanje na brodu. Priredio autor	57
Tablica 13. Rezultati ispitivanja razlika među grupama s obzirom na zvanje na brodu. Priredio autor	58
Tablica 14. Grupiranje ispitanika prema duljini broda na kojoj trenutno plove. Priredio autor	58
Tablica 15. Rezultati Levene testa s obzirom na duljinu preko svega. Priredio autor ...	59
Tablica 16. Rezultati ispitivanja razlika među grupama s obzirom na duljinu preko svega. Priredio autor	59
Tablica 17. Grupiranje kategorija ispitanika prema vrsti broda. Priredio autor	60
Tablica 18. Rezultati Levene testa s obzirom na vrstu broda. Priredio autor	60
Tablica 19. Rezultati ispitivanja razlika među grupama s obzirom na vrstu broda. Priredio autor	61
Tablica 20. Grupiranje kategorija ispitanika prema ukupno iskustvu. Priredio autor....	61
Tablica 21. Rezultati Levene testa s obzirom na ukupno iskustvo. Priredio autor.....	62
Tablica 22. Rezultati ispitivanja razlika među grupama s obzirom na ukupno iskustvo. Priredio autor	62
Tablica 23. Maksimalne i minimalne vrijednosti raspona lingvističke varijable CPA. Priredio autor	67
Tablica 24. Rasponi lingvističke varijable CPA. Priredio autor.....	68

Tablica 25: Karakteristične točke trapezoidne funkcije lingvističke varijable CPA. Priredio autor.....	69
Tablica 26. Maksimalne i minimalne vrijednosti lingvističke varijable TCPA. Priredio autor.....	70
Tablica 27. Rasponi lingvističke varijable TCPA. Priredio autor.....	70
Tablica 28. Karakteristične točke trapezoidne funkcije lingvističke varijable TCPA. Priredio autor.....	71
Tablica 29: Maksimalne i minimalne vrijednosti lingvističke varijable BCR. Priredio autor.....	72
Tablica 30. Rasponi lingvističke varijable BCR. Priredio autor.....	73
Tablica 31. Karakteristične točke trapezoidne funkcije lingvističke varijable BCR. Priredio autor.....	73
Tablica 32. Maksimalne i minimalne vrijednosti lingvističke varijable Međusobna udaljenost. Priredio autor.....	74
Tablica 33. Statističke vrijednosti raspona lingvističke varijable Međusobna udaljenost. Priredio autor.....	75
Tablica 34: Karakteristične točke trapezoidne funkcije lingvističke.....	76
Tablica 35. Maksimalne i minimalne vrijednosti lingvističke varijable Vidljivost. Priredio autor.....	77
Tablica 36. Rasponi lingvističke varijable Vidljivost. Priredio autor.....	77
Tablica 37. Karakteristične točke trapezoidne funkcije lingvističke varijable Vidljivost. Priredio autor.....	78
Tablica 38. Karakteristične točke trokutaste funkcije lingvističke varijable FCRI. Priredio autor.....	79
Tablica 39. Karakteristične točke trokutaste funkcije lingvističke varijable FCRI_LV. Priredio autor.....	80
Tablica 40. Odabir varijabli za pojedini model. Priredio autor.....	81
Tablica 41. Validacija modela I. Priredio autor.....	91
Tablica 42. Validacija modela II. Priredio autor.....	92
Tablica 43. Validacija modela III. Priredio autor.....	93
Tablica 44. Validacija modela IV. Priredio autor.....	94
Tablica 45. Validacija modela V. Priredio autor.....	94
Tablica 46. Validacija modela VI. Priredio autor.....	95
Tablica 47. Validacija modela VII. Priredio autor.....	96
Tablica 48. Validacija modela VIII. Priredio autor.....	96
Tablica 49. Validacija modela IX. Priredio autor.....	97
Tablica 50. Validacija modela X. Priredio autor.....	98

Tablica 51. Validacija modela XI. Priredio autor.....	98
Tablica 52. Validacija modela XII. Priredio autor	99
Tablica 53. Validacija modela neizrazitog sustava zaključivanja u uvjetima slabe vidljivosti. Priredio autor.....	100
Tablica 54. Verifikacija rezultata za sudar ACX Crystal i USS Fitzgerald. Priredio autor	103
Tablica 55: Verifikacija rezultata za sudar Verity i Polesie. Priredio autor	104
Tablica 56: Plovidbeni podatci za brodove u scenariju DNV 1. Priredio autor	105
Tablica 57. Verifikacija modela koristeći scenarij DNV 1. Priredio autor	106
Tablica 58. Verifikacija modela FCRI_LV koristeći scenarij DNV 1. Priredio autor .	106
Tablica 59. Plovidbeni podatci za brodove u scenariju DNV 2. Priredio autor	107
Tablica 60. Verifikacija modela koristeći scenarij broj DNV 2. Priredio autor	107
Tablica 61. Verifikacija modela FCRI_LV koristeći scenarij DNV 2. Priredio autor .	108
Tablica 62. Plovidbeni podatci za brodove u scenariju DNV 3. Priredio autor	108
Tablica 63. Verifikacija modela koristeći scenarij broj DNV 3. Priredio autor	109
Tablica 64. Verifikacija modela u uvjetima smanjene vidljivosti koristeći scenarij DNV 3. Priredio autor	109
Tablica 65. Plovidbeni podatci za brodove u scenariju DNV 4. Priredio autor	110
Tablica 66. Verifikacija modela koristeći scenarij broj DNV 4. Priredio autor	110
Tablica 67. Verifikacija modela u uvjetima smanjene vidljivosti koristeći scenarij DNV 4. Priredio autor	111
Tablica 68. Plovidbeni podatci za brodove u scenariju DNV 5. Priredio autor	111
Tablica 69. Verifikacija modela koristeći scenarij DNV 5. Priredio autor	112
Tablica 70. Verifikacija modela u uvjetima smanjene vidljivosti koristeći scenarij DNV 5. Priredio autor	112
Tablica 71. Plovidbeni podatci za brodove u scenariju DNV 6. Priredio autor	113
Tablica 72. Verifikacija modela koristeći scenarij DNV 6. Priredio autor	114
Tablica 73. Verifikacija modela FCRI_LV koristeći scenarij DNV 6. Priredio autor .	115
Tablica 74. Plovidbeni podatci za brodove u scenariju u uvjetima gustog prometa. Priredio autor	117
Tablica 75. Verifikacija modela koristeći scenarij u uvjetima gustog prometa. Priredio autor	117
Tablica 76. Verifikacija modela koristeći scenarij u uvjetima gustog prometa i smanjene vidljivosti. Priredio autor	118

POPIS SLIKA

Slika 1. Pogrešno izbjegavanje brodova u protukursu. Priredio autor	9
Slika 2. Analiza rizika sudara. Priredio autor prema ⁴⁸	11
Slika 3. Prikaz radarskog dijagrama kada se azimut objekta ne mijenja. Priredio autor koristeći GeoGebra programsko rješenje	22
Slika 4. Prikaz radarskog dijagrama kada se azimut objekta mijenja. Priredio autor koristeći GeoGebra programsko rješenje	23
Slika 5. Izraziti skup veliki brod. Priredio i prilagodio autor prema	26
Slika 6. Neizraziti skup veliki brod. Priredio i prilagodio autor prema	26
Slika 7. Trokutasta funkcija pripadnosti. Priredio autor prema ¹¹⁵	28
Slika 8. Trapezoidna funkcija pripadnosti. Priredio autor prema ¹¹⁵	28
Slika 9. Karakteristike funkcije pripadnosti. Priredio autor	29
Slika 10. Primjer lingvističke varijable sa pripadajućim vrijednostima. Priredio autor. 30	
Slika 11. Binarna i neizrazita logička operacija. Priredio i prilagodio autor prema ¹¹⁷ ...	31
Slika 12. Presjek neizrazitih skupova A i B. Priredio autor prema ¹¹⁸	31
Slika 13. Unija neizrazitih skupova A i B. Priredio autor prema ¹¹⁸	32
Slika 14. Neizraziti skupi A i komplement skupa A. Priredio autor prema ¹¹⁸	32
Slika 15. Blok dijagram neizrazitog sustava. Priredio i prilagodio autor prema ¹²⁵	33
Slika 16. Proces inferencije. Priredio i prilagodio autor prema ¹³⁰	35
Slika 17. Prikaz distribucije ispitanika prema trenutnom zvanju na brodu PPQ1. Priredio autor	43
Slika 18. Prikaz distribucije ispitanika prema duljini broda na kojoj trenutno plove - PPQ2. Priredio autor	44
Slika 19. Prikaz distribucije ispitanika prema vrsti broda na kojoj trenutno plove - PPQ3. Priredio autor	45
Slika 20. Prikaz distribucije ispitanika prema radnom iskustvo u	46
Slika 21. Prikaz distribucije ispitanika prema ukupnom radnom iskustvu na brodu – PPQ5. Priredio autor	47
Slika 22. Kutijasti dijagram za prvu podgrupu podataka (IQ1 do IQ5). Priredio autor .	51
Slika 23. Kutijasti dijagram za drugu podgrupu varijabli. Priredio autor	52
Slika 24. Kutijasti dijagram za treću podgrupu varijabli. Priredio autor	52
Slika 25: Prikaz grupiranja međusobnih odnosa brodova. Priredio autor	64
Slika 26: Prikaz grupiranja brodova koristeći polarni koordinatni sustav. Priredio autor	64
Slika 27: Prikaz dvostrukog klizača. Priredio autor koristeći slikovni zapis LimeSurvey programskog rješenja	66

Slika 28: Prikaz lingvističke varijable CPA korištenjem Gaussovih krivulja. Priredio autor.....	68
Slika 29: Prikaz lingvističke varijable CPA korištenjem trapezoidnih funkcija. Priredio autor.....	69
Slika 30: Prikaz lingvističke varijable TCPA korištenjem Gaussovih krivulja. Priredio autor.....	71
Slika 31. Prikaz lingvističke varijable TCPA korištenjem trapezoidnih funkcija. Priredio autor.....	72
Slika 32. Prikaz lingvističke varijable BCR korištenjem Gaussovih krivulja. Priredio autor.....	73
Slika 33: Prikaz lingvističke varijable BCR korištenjem trapezoidnih funkcija. Priredio autor.....	74
Slika 34: Prikaz lingvističke varijable Međusobna udaljenost korištenjem Gaussovih krivulja. Priredio autor.....	75
Slika 35: Prikaz lingvističke varijable Međusobna udaljenost korištenjem trapezoidnih funkcija. Priredio autor.....	76
Slika 36. Prikaz lingvističke varijable Vidljivost korištenjem Gaussovih krivulja. Priredio autor.....	77
Slika 37. Prikaz lingvističke varijable Vidljivost korištenjem trapezoidnih funkcija. Priredio autor.....	78
Slika 38. Funkcije pripadnosti izlazne varijable FCRI. Priredio autor.....	80
Slika 39. Funkcije pripadnosti izlazne varijable FCRI_LV. Priredio autor.....	81
Slika 40. Primjer dijela baze neizrazitih pravila. Priredio autor.....	83
Slika 41. Sučelje programskog rješenja za izradu neizrazitog sustava zaključivanja. Priredio autor koristeći slikovni zapis MATLAB programskog rješenja.....	84
Slika 42. Kontrolna površina za varijable CPA i BCR. Priredio autor.....	85
Slika 43. Kontrolna površina za varijable CPA i TCPA. Priredio autor.....	85
Slika 44. Kontrolna površina za varijable CPA i Međusobna udaljenost. Priredio autor.....	86
Slika 45. Kontrolna površina za varijable BCR i TCPA. Priredio autor.....	86
Slika 46. Kontrolna površina za varijable BCR i Međusobna udaljenost. Priredio autor.....	86
Slika 47. Kontrolna površina za varijable TCPA i Međusobna udaljenost. Priredio autor.....	86
Slika 48. Sučelje programskog rješenja za izradu neizrazitog sustava zaključivanja pri smanjenoj vidljivosti. Priredio autor koristeći slikovni zapis MATLAB programskog rješenja.....	87
Slika 49. Kontrolna površina za varijable FCR i Vidljivost. Priredio autor.....	88

Slika 50. Prikaz validacije modela korištenjem programskog rješenja MATLAB. Priredio autor koristeći slikovni zapis MATLAB programskog rješenja.....	89
Slika 51. Prikaz validacije modela putem grafičkog prikaza. Priredio autor koristeći slikovni zapis MATLAB programskog rješenja.....	90
Slika 52. Rekonstrukcija radarske slike u 10:15 temeljene na izvješću JTSC. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator.....	102
Slika 53: Rekonstrukcija radarske slike u 01:39. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator	104
Slika 54. Prikaz radarske slike za scenarij broj DNV 1. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator	106
Slika 55. Prikaz radarske slike za scenarij broj DNV 2. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator	107
Slika 56. Prikaz radarske slike za scenarij broj DNV 3. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator	109
Slika 57. Prikaz radarske slike za scenarij broj DNV 4. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator	110
Slika 58. Prikaz radarske slike za scenarij broj DNV 5. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator	112
Slika 59. Prikaz radarske slike za scenarij broj DNV 6. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator	114
Slika 60. Prikaz plovidbenog scenarija u uvjetima gustog prometa. Priredio autor.....	116
Slika 61: Prikaz radarske slike za scenarij u uvjetima gustog prometa. Priredio autor koristeći slikovne zapise K-Sim Polaris Ship's Bridge Simulator.....	116
Slika 62. Prikaz integracije neizrazitog sustava zaključivanja unutar INS-a. Priredio autor	124
Slika 63. Grafičko sučelje konceptualnog modela. Priredio autor	124

POPIS KRATICA

AIS	Automatic Identification System	Sustav za automatsku identifikaciju
ANOVA	Analysis Of Variance	Analiza varijance
ARPA	Automatic Radar Plotting Aid	Sustav automatskog radarskog plotiranja
BCR	Bow Crossing Range	Udaljenost točke prolaza ispred pramca vlastitog broda
CAS	Collision Alert System	Sustav protusudarnog uzbunjivanja
CCTV	Closed-circuit Television	Sustav video nadzora
CPA	Closest Point of Approach	Točka najbližeg prolaza
CRI	Collision Risk Index	Indeks rizika sudara
COG	Course Over Ground	Kurs preko dna
CTW	Course Through the Water	Kurs kroz vodu
DCPA	Distance to Closest Point of Approach	Udaljenost točke najbližeg prolaza
DNV	Det Norske Veritas	Det Norske Veritas
DSS	Decision Support System	Sustav podrške odlučivanju
ECDIS	Electronic Chart Display and Information System	Informacijski navigacijski sustav s prikazom elektroničkih karata
FCRI	Fuzzy Collision Risk Index	Neizraziti indeks rizika sudara
GUI	Graphical User Interface	Grafičko sučelje

IALA	The International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities	Međunarodno udruženje uprava pomorske signalizacije i sredstava za pomorsku navigaciju
IBS	Integrated Bridge System	Integrirani navigacijski most
INS	Integrated Navigation Systems	Integrirani navigacijski sustavi
ISO	International Organisation for Standardization	Međunarodna organizacija za standardizaciju
ISM Code	International Safety Management Code	Međunarodni kodeks o sigurnom vođenju broda i sprječavanju onečišćenja okoliša
JTSB	Japan Transport Safety board	Japanski odbor za sigurnost u prometu
LOA	Length Over All	Duljina preko svega
PAWSA	Ports And Waterways Safety Assessment	Sigurnosna procjena plovidbenih putova i luka
RICAS	Risk-Informed Collision Alert System	Sustav protusudarnog uzbunjivanja s informacijom o riziku
RMSE	Root Mean Squared Error	Korijen srednje kvadratne pogreške modela
SAMSON	The Safety Assessment Model for Shipping on the North Sea	Model sigurnosne procjene plovidbe u Sjevernom moru
SOG	Speed Over Ground	Brzina preko dna
STW	Speed Through the Water	Brzina kroz vodu
VCD	Variation of a Compass Direction	Promjena kompasnog smjera

VCRO	Vessel Conflict Ranking Operator	Operator rangiranja brodova prema konfliktu
VHF	Very High Frequency	Vrlo visoka frekvencija

PRIVITAK 1

Izvatci programskog koda korištenog pri stvaranju modela:

DESKRIPTIVNA STATISTIKA:

```
Data=xlsread('COMPL.xlsx');
boxplot(Data(:,1:5), 'Labels',{ 'Duljina', 'Brzina', 'Plovidbeni status',
'Tip', 'Gaz'})
boxplot(Data(:,6:11), 'Labels',{ 'CPA', 'TCPA', 'Pramčani kut',
'Udaljenost', 'BCR', 'Smjer pramčanice'})
boxplot(Data(:,12:14), 'Labels',{ 'Vidljivost', 'Vremenski uvjeti', 'Noćni
uvjeti'})
DS=[std(Data,0,1); min(Data,[],1); mean(Data,1); max(Data,[],1);
kurtosis(Data,0,1);skewness(Data,0,1); iqr(Data,1);median(Data,1)];
DST=array2table(DS);
DST.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};
DST.Properties.RowNames={'Importance of size' 'Importance of speed' '
Importance of nav. status' 'Importance of vessel type' 'Importance of
draft' 'Importance of CPA' 'Importance of TCPA' 'Importance of bearing'
'Importance of distance' 'Importance of BCR' 'Importance of heading'
'Importance of visibility' 'Importance of weather' 'Importance of night
nav.'}
Data2=isoutlier(Data,'quartiles');
[Outlier] = (find(Data2));
Data(Outlier)=NaN;
boxplot(Data(:,1:5), 'Labels',{ 'Size', 'Speed', 'Status', 'Type',
'Draft'})
boxplot(Data(:,6:11), 'Labels',{ 'CPA', 'TCPA', 'BRG', 'Dist', 'BCR',
'HDG'})
boxplot(Data(:,12:14), 'Labels',{ 'Visibility', 'Weather', 'Night'})
DSOF=[nanstd(Data); nanmin(Data); nanmean(Data); nanmax(Data);
kurtosis(Data);skewness(Data); iqr(Data);nanmedian(Data)];
DSTOF=array2table(DSOF);
DSTOF.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};
DSTOF.Properties.RowNames={'Importance of size' 'Importance of speed' '
Importance of nav. status' 'Importance of vessel type' 'Importance of
draft' 'Importance of CPA' 'Importance of TCPA' 'Importance of bearing'
'Importance of distance' 'Importance of BCR' 'Importance of heading'
'Importance of visibility' 'Importance of weather' 'Importance of night
nav.'}
sortrows(DSTOF, 'Mean', 'descend')
```

INFERENCIJALNA STATISTIKA

```
A1=tabulate(EXP);
EXPTbl=cell2table(A1);
EXPTbl.Properties.VariableNames={'Experience' 'f' 'p'}
```

```

histogram(EXP)
A2=tabulate(EXPT);
EXPTTbl=cell2table(A2);
EXPTTbl.Properties.VariableNames={'ExperienceTotal' 'f' 'p'}
histogram(EXPT)
A3=tabulate(Rank);
RankTbl=cell2table(A3);
RankTbl.Properties.VariableNames={'Rank' 'f' 'p'}
histogram(Rank)
A4=tabulate(TYVSL);
TYVSLTbl=cell2table(A4);
TYVSLTbl.Properties.VariableNames={'Type' 'f' 'p'}
histogram(TYVSL)
A5=tabulate(OTH);
OTHTbl=cell2table(A5);
OTHTbl.Properties.VariableNames={'Type' 'f' 'p'}
histogram(OTH)
A6=tabulate(LOA);
LOATbl=cell2table(A6);
LOATbl.Properties.VariableNames={'LOA' 'f' 'p'}
histogram(LOA)

```

Služba na brodu

```

Rank2=mergocats(Rank,{'Second Officer','Third Officer'},'00W');
TRank2= tabulate(Rank2);
Rank2Tbl=cell2table(TRank2);
Rank2Tbl.Properties.VariableNames={'Rank' 'f' 'p'}

```

Cjelokupno iskustvo

```

EXPT2=mergocats(EXPT,{'1 -3 years', '3-5 years'},'Less than 5 years');
EXPT21=mergocats(EXPT2,{'5-10 years', '10-15 years'},'From 5 to 15 years');
tabulate(EXPT21)

```

Vrsta broda

```

TYVSL2=mergocats(TYVSL,{'Container ship', 'Bulk carrier', 'Other', 'Tanker
other'},'Other');
tabulate(TYVSL2)

```

Duljina broda

```

LOA2=mergocats(LOA,{'100 ≤ L ≤ 150', '150 < L ≤ 200', '200 < L ≤ 250'},'L ≤
250');
LOA21=mergocats(LOA2,{'300 < L ≤ 350', 'more than 350'},'L > 300');
tabulate(LOA21)

```

Iskustvo u činu

```
EXP2=mergecats(EXP,{ '0-1 year', '1-3 years'},'Manje od 3 godine');
EXP21=mergecats(EXP2,{ '3-5 years', '5-10 years'},'Između 3 i 10 godina');
EXP22=mergecats(EXP21,{ '10-15 years', '> 15 years'},'Više od 10 godina');
tabulate(EXP22)

CPAout=isoutlier(CPA,'quartiles');
CPAof=CPA(find(~CPAout));
Rank21=Rank2(find(~CPAout));
TCPAout=isoutlier(TCPA,'quartiles');
TCPAof=TCPA(find(~TCPAout));
Rank22=Rank2(find(~TCPAout));
VISout=isoutlier(VIS,'quartiles');
VISof=VIS(find(~VISout));
Rank23=Rank2(find(~VISout));
SIZEout=isoutlier(SIZE,'quartiles');
SIZEof=SIZE(find(~SIZEout));
Rank24=Rank2(find(~SIZEout));
SPEEDout=isoutlier(SPEED,'quartiles');
SPEEDof=SPEED(find(~SPEEDout));
Rank25=Rank2(find(~SPEEDout));
BCRout=isoutlier(BCR,'quartiles');
BCRof=BCR(find(~BCRout));
Rank26=Rank2(find(~BCRout));
DISTout=isoutlier(DIST,'quartiles');
DISTof=DIST(find(~DISTout));
Rank27=Rank2(find(~DISTout));
BRGout=isoutlier(BRG,'quartiles');
BRGof=BRG(find(~BRGout));
Rank28=Rank2(find(~BRGout));

pL1 = vartestn(CPAof,Rank21,'TestType','LeveneAbsolute', 'display','off')
pL2 = vartestn(TCPAof,Rank22,'TestType','LeveneAbsolute', 'display','off')
pL3 = vartestn(VISof,Rank23,'TestType','LeveneAbsolute', 'display','off')
pL4 = vartestn(SIZEof,Rank24,'TestType','LeveneAbsolute', 'display','off')
pL5 = vartestn(SPEEDof,Rank25,'TestType','LeveneAbsolute',
'display','off')
pL6 = vartestn(BCRof,Rank26,'TestType','LeveneAbsolute', 'display','off')
pL7 = vartestn(DISTof,Rank27,'TestType','LeveneAbsolute', 'display','off')
pL8 = vartestn(BRGof,Rank28,'TestType','LeveneAbsolute', 'display','off')

[p1,tbl1,stats1]=anova1(CPAof,Rank21)
Table111=table(Rank21,CPAof);
```

```

Table112=grpstats(Table111, 'Rank21', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Rank', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table112, 'Rank', 'descend')
[p2, tbl2, stats2]=anova1(TCPAof, Rank22)
Table211=table(Rank22, TCPAof);
Table212=grpstats(Table211, 'Rank22', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Rank', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table212, 'Rank', 'descend')
[p3, tbl3, stats3]=anova1(VISof, Rank23)
Table311=table(Rank23, VISof);
Table312=grpstats(Table311, 'Rank23', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Rank', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table312, 'Rank', 'descend')
[p4, tbl4, stats4]=anova1(SIZEof, Rank24)
Table411=table(Rank24, SIZEof);
Table412=grpstats(Table411, 'Rank24', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Rank', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table412, 'Rank', 'descend')
[p5, tbl5, stats5]=anova1(SPEEDof, Rank25)
[p6KW, tbl6, stats6]=kruskalwallis(BCRof, Rank26);
Table611=table(Rank26, BCRof);
Table612=grpstats(Table611, 'Rank26', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Rank', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table612, 'Rank', 'descend')
[p7, tbl7, stats7]=anova1(DISTof, Rank27)
Table711=table(Rank27, DISTof);
Table712=grpstats(Table711, 'Rank27', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Rank', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table712, 'Rank', 'descend')
[p8, tbl8, stats8]=anova1(BRGof, Rank28)
Table811=table(Rank28, BRGof);
Table812=grpstats(Table811, 'Rank28', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Rank', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table812, 'Rank', 'descend')
[Ph8, m8, h8]=multcompare(stats8, 'CType', 'scheffe')
TYVSL21=TYVSL2(find(~CPAout));
[p11, tbl11, stats11]=anova1(CPAof, TYVSL21)
Table111B=table(TYVSL21, CPAof);
Table112B=grpstats(Table111B, 'TYVSL21', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Type', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table112B, 'Type', 'descend')
TYVSL22=TYVSL2(find(~TCPAout));
[p12, tbl12, stats12]=anova1(TCPAof, TYVSL22)

```



```

Table211B=table(TYVSL22,TCPAof);
Table212B=grpstats(Table211B, 'TYVSL22', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Type', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table212B, 'Type', 'descend')
TYVSL23=TYVSL2(find(~VISout));
[p13, tbl13, stats13]=anova1(VISof, TYVSL23)
Table311B=table(TYVSL23, VISof);
Table312B=grpstats(Table311B, 'TYVSL23', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Type', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table312B, 'Type', 'descend')
TYVSL24=TYVSL2(find(~SIZEout));
[p14, tbl14, stats14]=anova1(SIZEof, TYVSL24)
Table411B=table(TYVSL24, SIZEof);
Table412B=grpstats(Table411B, 'TYVSL24', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Type', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table412B, 'Type', 'descend')
TYVSL25=TYVSL2(find(~BCRout));
[p15, tbl15, stats15]=anova1(BCRof, TYVSL25)
Table511B=table(TYVSL25, BCRof);
Table512B=grpstats(Table511B, 'TYVSL25', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Type', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table512B, 'Type', 'descend')
TYVSL26=TYVSL2(find(~SPEEDout));
[p16, tbl16, stats16]=anova1(SPEEDof, TYVSL26)
Table611B=table(TYVSL26, SPEEDof);
Table612B=grpstats(Table611B, 'TYVSL26', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Type', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table612B, 'Type', 'descend')
TYVSL27=TYVSL2(find(~DISTout));
[p17, tbl17, stats17]=anova1(DISTof, TYVSL27)
Table711B=table(TYVSL27, DISTof);
Table712B=grpstats(Table711B, 'TYVSL27', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Type', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table712B, 'Type', 'descend')
TYVSL28=TYVSL2(find(~BRGout));
[p18, tbl18, stats18]=anova1(BRGof, TYVSL28)
Table811B=table(TYVSL28, BRGof);
Table812B=grpstats(Table811B, 'TYVSL28', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Type', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table812B, 'Type', 'descend')

pL11 = vartestn(CPAof, TYVSL21, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')

```

```

pL21      =      vartestn(TCPAof, TYVSL22, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')
pL31      =      vartestn(VISof,      TYVSL23, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')
pL41      =      vartestn(SIZEof, TYVSL24, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')
pL51      =      vartestn(BCRof, TYVSL25, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')
pL61      =      vartestn(SPEEDof, TYVSL26, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')
pL71      =      vartestn(DISTof, TYVSL27, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')
pL81      =      vartestn(BRGof, TYVSL28, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')

EXPT211=EXPT21(find(~CPAout));
[p31,tbl,stats]=anova1(CPAof,EXPT211)
Table111C=table(EXPT211,CPAof);
Table112C=grpstats(Table111C, 'EXPT211', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Total_exp', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table112C, 'Total_exp', 'descend')
EXPT212=EXPT21(find(~TCPAout));
[p32,tbl,stats]=anova1(TCPAof,EXPT212)
Table211C=table(EXPT212,TCPAof);
Table212C=grpstats(Table211C, 'EXPT212', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Total_exp', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table212C, 'Total_exp', 'descend')
EXPT213=EXPT21(find(~VISout));
[p33,tbl,stats]=anova1(VISof,EXPT213)
Table311C=table(EXPT213,VISof);
Table312C=grpstats(Table311C, 'EXPT213', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Total_exp', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table312C, 'Total_exp', 'descend')
EXPT214=EXPT21(find(~SIZEout));
[p34,tbl,stats]=anova1(SIZEof,EXPT214)
Table411C=table(EXPT214,SIZEof);
Table412C=grpstats(Table411C, 'EXPT214', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Total_experience', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table412C, 'Total_experience', 'descend')
EXPT215=EXPT21(find(~BCRout));
[p35KW,tbl135KW,stats35]=kruskalwallis(BCRof,EXPT215)
Table511C=table(EXPT215,BCRof);
Table512C=grpstats(Table511C, 'EXPT215', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Total_exp', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(Table512C, 'Total_exp', 'descend')

```

```

EXPT216=EXPT21(find(~SPEEDout));
[p36,tbl36,stats36]=anova1(SPEEDof,EXPT216)
Table611C=table(EXPT216,SPEEDof);
Table612C=grpstats(Table611C,'EXPT216',{'std','mean'},
'VarNames',{'Total_exp','N','SD','M'});
sortrows(Table612C,'Total_exp','descend')
EXPT217=EXPT21(find(~DISTout));
[p37,tbl37,stats37]=anova1(DISTof,EXPT217)
Table711C=table(EXPT217,DISTof);
Table712C=grpstats(Table711C,'EXPT217',{'std','mean'},
'VarNames',{'Total_exp','N','SD','M'});
sortrows(Table712C,'Total_exp','descend')
EXPT218=EXPT21(find(~BRGout));
[p38,tbl38,stats38]=anova1(BRGof,EXPT218)
Table811C=table(EXPT218,BRGof);
Table812C=grpstats(Table811C,'EXPT218',{'std','mean'},
'VarNames',{'Total_exp','N','SD','M'});
sortrows(Table812C,'Total_exp','descend')

pL112      =      vartestn(CPAof,EXPT211,'TestType','LeveneAbsolute',
'display','off')
pL122      =      vartestn(TCPAof,EXPT212,'TestType','LeveneAbsolute',
'display','off')
pL132      =      vartestn(VISof,      EXPT213,'TestType','LeveneAbsolute',
'display','off')
pL142      =      vartestn(SIZEof,EXPT214,'TestType','LeveneAbsolute',
'display','off')
pL152      =      vartestn(BCRof,EXPT215,'TestType','LeveneAbsolute',
'display','off')
pL162      =      vartestn(SPEEDof,EXPT216,'TestType','LeveneAbsolute',
'display','off')
pL172      =      vartestn(DISTof,EXPT217,'TestType','LeveneAbsolute',
'display','off')
pL182      =      vartestn(BRGof,EXPT218,'TestType','LeveneAbsolute',
'display','off')

LOA211=LOA21(find(~CPAout));
pL212      =      vartestn(CPAof,LOA211,'TestType','LeveneAbsolute',
'display','off')
[pLOA,tblLOA,statsLOA]=anova1(CPAof,LOA211)
TableLOA1=table(LOA211,CPAof);
TableLOA2=grpstats(TableLOA1,'LOA211',{'std','mean'},
'VarNames',{'Duljina_broda','N','SD','M'});
sortrows(TableLOA2,'Duljina_broda','descend')
LOA212=LOA21(find(~TCPAout));
p= vartestn(TCPAof,LOA212,'TestType','LeveneAbsolute', 'display','off')

```

```

[p, tbl, stats]=anova1(TCPAof, LOA212)
TableLOA1A=table(LOA212, TCPAof);
TableLOA1B=grpstats(TableLOA1A, 'LOA212', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Duljina_broda', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(TableLOA1B, 'Duljina_broda', 'descend')
LOA213=LOA21(find(~VISout));
pL213 = vartestn(VISof, LOA213, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')
[p, tbl, stats]=anova1(VISof, LOA213)
TableVIS1=table(LOA213, VISof);
TableVIS2=grpstats(TableVIS1, 'LOA213', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Duljina_broda', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(TableVIS2, 'Duljina_broda', 'descend')
LOA214=LOA21(find(~SIZEout));
pLOA214= vartestn(SIZEof, LOA214, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')
[p, tbl, stats]=anova1(SIZEof, LOA214)
TableSize1=table(LOA214, SIZEof);
TableSize2=grpstats(TableSize1, 'LOA214', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Duljina_broda', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(TableSize2, 'Duljina_broda', 'descend')
LOA215=LOA21(find(~BCRout));
pLOA215= vartestn(BCRof, LOA215, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')
[p, tbl, stats]=anova1(BCRof, LOA215)
TableBCR1=table(LOA215, BCRof);
TableBCR2=grpstats(TableBCR1, 'LOA215', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Duljina_broda', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(TableBCR2, 'Duljina_broda', 'descend')
LOA216=LOA21(find(~SPEEDout));
pLOA216= vartestn(SPEEDof, LOA216, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')
[p, tbl, stats]=anova1(SPEEDof, LOA216)
[Ph8, m8, h8]=multcompare(stats, 'CType', 'scheffe')
TableSPEED1=table(LOA216, SPEEDof);
TableSPEED2=grpstats(TableSPEED1, 'LOA216', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Duljina_broda', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(TableSPEED2, 'Duljina_broda', 'descend')
LOA217=LOA21(find(~DISTout));
pLOA217= vartestn(DISTof, LOA217, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')
[p, tbl, stats]=kruskalwallis(DISTof, LOA217)
TableDIST1=table(LOA217, DISTof);

```

```

TableDIST2=grpstats(TableDIST1, 'LOA217', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Duljina_broda', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(TableDIST2, 'Duljina_broda', 'descend')
LOA218=LOA21(find(~BRGout));
pLOA218=          vartestn(BRGof, LOA218, 'TestType', 'LeveneAbsolute',
'display', 'off')
[p, tbl, stats]=anova1(BRGof, LOA218)
TableBRG1=table(LOA218, BRGof);
TableBRG2=grpstats(TableBRG1, 'LOA218', {'std', 'mean'},
'VarNames', {'Duljina_broda', 'N', 'SD', 'M'});
sortrows(TableBRG2, 'Duljina_broda', 'descend')

```

RASPONI

```

Data=xlsread('RANGEC.xlsx');
DS=[std(Data,0,1); min(Data,[],1); mean(Data,1); max(Data,[],1);
kurtosis(Data,0,1); skewness(Data,0,1); iqr(Data,1); median(Data,1)];
DST=array2table(DS);
DST.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};
DST.Properties.RowNames={'VLmin' 'VLmax' 'Lmin' 'Lmax' 'Mmin' 'Mmax'
'Hmin' 'Hmax' 'VHmin' 'VHmax'}
Data2=isoutlier(Data, 'quartiles');
[Outlier] = (find(Data2));
Data(Outlier)=NaN;
DSOF=[nanstd(Data); nanmin(Data); nanmean(Data); nanmax(Data);
kurtosis(Data); skewness(Data); iqr(Data); nanmedian(Data)];
DSTOF=array2table(DSOF);
DSTOF.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};
DSTOF.Properties.RowNames={'VLmin' 'VLmax' 'Lmin' 'Lmax' 'Mmin' 'Mmax'
'Hmin' 'Hmax' 'VHmin' 'VHmax'}
DataA=xlsread('RANGEC.xlsx', 'CPA');
DSA=[std(DataA,0,1); min(DataA,[],1); mean(DataA,1); max(DataA,[],1);
kurtosis(DataA,0,1); skewness(DataA,0,1); iqr(DataA,1); median(DataA,1)];
DSTA=array2table(DSA);
DSTA.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};
DSTA.Properties.RowNames={'VLmin' 'VLmax' 'Lmin' 'Lmax' 'Mmin' 'Mmax'
'Hmin' 'Hmax' 'VHmin' 'VHmax'}
Data2A=isoutlier(DataA, 'quartiles');
[OutlierA] = (find(Data2A));
DataA(OutlierA)=NaN;
DSOFA=[nanstd(DataA); nanmin(DataA); nanmean(DataA); nanmax(DataA);
kurtosis(DataA); skewness(DataA); iqr(DataA); nanmedian(DataA)];
DSTOFA=array2table(DSOFA);
DSTOFA.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};
DSTOFA.Properties.RowNames={'VLmin' 'VLmax' 'Lmin' 'Lmax' 'Mmin' 'Mmax'
'Hmin' 'Hmax' 'VHmin' 'VHmax'}
DataB=xlsread('RANGEC.xlsx', 'TCPA');

```

```

DSB=[std(DataB,0,1); min(DataB,[],1); mean(DataB,1); max(DataB,[],1);
kurtosis(DataB,0,1);skewness(DataB,0,1); iqr(DataB,1);median(DataB,1)]];
DSTB=array2table(DSB);
DSTB.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};
DSTB.Properties.RowNames={'VLmin' 'VLmax' 'Lmin' 'Lmax' 'Mmin' 'Mmax'
'Hmin' 'Hmax' 'VHmin' 'VHmax'}
Data2B=isoutlier(DataB,'quartiles');
[OutlierB] = (find(Data2B));
DataB(OutlierB)=NaN;
DSOFB=[nanstd(DataB); nanmin(DataB); nanmean(DataB); nanmax(DataB);
kurtosis(DataB);skewness(DataB); iqr(DataB);nanmedian(DataB)]];
DSTOFB=array2table(DSOFB);
DSTOFB.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};
DSTOFB.Properties.RowNames={'VLmin' 'VLmax' 'Lmin' 'Lmax' 'Mmin' 'Mmax'
'Hmin' 'Hmax' 'VHmin' 'VHmax'}
DataC=xlsread('RANGEC.xlsx','BCR');
DSC=[std(DataC,0,1); min(DataC,[],1); mean(DataC,1); max(DataC,[],1);
kurtosis(DataC,0,1);skewness(DataC,0,1); iqr(DataC,1);median(DataC,1)]];
DSTC=array2table(DSC);
DSTC.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};
DSTC.Properties.RowNames={'VLmin' 'VLmax' 'Lmin' 'Lmax' 'Mmin' 'Mmax'
'Hmin' 'Hmax' 'VHmin' 'VHmax'}
Data2C=isoutlier(DataC,'quartiles');
[OutlierC] = (find(Data2C));
DataC(OutlierC)=NaN;
DSOFC=[nanstd(DataC); nanmin(DataC); nanmean(DataC); nanmax(DataC);
kurtosis(DataC);skewness(DataC); iqr(DataC);nanmedian(DataC)]];
DSTOFC=array2table(DSOFC);
DSTOFC.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};
DSTOFC.Properties.RowNames={'VLmin' 'VLmax' 'Lmin' 'Lmax' 'Mmin' 'Mmax'
'Hmin' 'Hmax' 'VHmin' 'VHmax'}
DataD=xlsread('RANGEC.xlsx','DIST');
DSD=[std(DataD,0,1); min(DataD,[],1); mean(DataD,1); max(DataD,[],1);
kurtosis(DataD,0,1);skewness(DataD,0,1); iqr(DataD,1);median(DataD,1)]];
DSTD=array2table(DSD);
DSTD.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};
DSTD.Properties.RowNames={'VLmin' 'VLmax' 'Lmin' 'Lmax' 'Mmin' 'Mmax'
'Hmin' 'Hmax' 'VHmin' 'VHmax'}
Data2D=isoutlier(DataD,'quartiles');
[OutlierD] = (find(Data2D));
DataD(OutlierD)=NaN;
DSOFD=[nanstd(DataD); nanmin(DataD); nanmean(DataD); nanmax(DataD);
kurtosis(DataD);skewness(DataD); iqr(DataD);nanmedian(DataD)]];
DSTOFD=array2table(DSOFD);
DSTOFD.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};

```

```

DSTOFD.Properties.RowNames={'VLmin' 'VLmax' 'Lmin' 'Lmax' 'Mmin' 'Mmax'
'Hmin' 'Hmax' 'VHmin' 'VHmax'}
DataE=xlsread('RANGEC.xlsx','VIS');
DSE=[std(DataE,0,1); min(DataE,[],1); mean(DataE,1); max(DataE,[],1);
kurtosis(DataE,0,1);skewness(DataE,0,1); iqr(DataE,1);median(DataE,1)'];
DSTE=array2table(DSE);
DSTE.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};
DSTE.Properties.RowNames={'VLmin' 'VLmax' 'Lmin' 'Lmax' 'Mmin' 'Mmax'
'Hmin' 'Hmax' 'VHmin' 'VHmax'}
Data2E=isoutlier(DataE,'quartiles');
[OutlierE] = (find(Data2E));
DataE(OutlierE)=NaN;
DSOFE=[nanstd(DataE); nanmin(DataE); nanmean(DataE); nanmax(DataE);
kurtosis(DataE);skewness(DataE); iqr(DataE);nanmedian(DataE)'];
DSTOFE=array2table(DSOFE);
DSTOFE.Properties.VariableNames={'Stdev' 'Minimum' 'Mean' 'Maximum'
'Kurtosis' 'Skewness' 'IQR' 'C'};
DSTOFE.Properties.RowNames={'VLmin' 'VLmax' 'Lmin' 'Lmax' 'Mmin' 'Mmax'
'Hmin' 'Hmax' 'VHmin' 'VHmax'}

```

CPA

```

VL = [];
for i = 1:length(MINVL)
minVL=MINVL(i);
maxVL=MAXVL(i);
rangeVL = minVL:0.1:maxVL;
VL=[VL,rangeVL];
end
DataVL=isoutlier(VL,'quartiles');
[OutlierA] = (find(DataVL));
VL(OutlierA)=NaN;
QVL=quantile(VL,[0.09 .25 .50 .75 0.91])'
VLS=[nanmean(VL);nanstd(VL); min(VL); max(VL); QVL]'
L = [];
for j = 1:length(MINL)
minL=MINL(j);
maxL=MAXL(j);
rangeL = minL:0.1:maxL;
L=[L,rangeL];
end
DataL=isoutlier(L,'quartiles');
[OutlierL] = (find(DataL));
L(OutlierL)=NaN;
QL=quantile(L,[0.09 .25 .50 .75 0.91])'
LS=[nanmean(L);nanstd(L); min(L); max(L); QL]'
M = [];
for k = 1:length(MINM)
minM=MINM(k);
maxM=MAXM(k);

```

```

rangeM = minM:0.1:maxM;
M=[M,rangeM];
end
DataM=isoutlier(M,'quartiles');
[OutlierM] = (find(DataM))';
M(OutlierM)=NaN;
QM=quantile(M,[0.09 .25 .50 .75 0.91])'
MS=[nanmean(M);nanstd(M); min(M); max(M); QM]'
H = [];
for l = 1:length(MINH)
minH=MINH(l);
maxH=MAXH(l);
rangeH = minH:0.1:maxH;
H=[H,rangeH];
end
DataH=isoutlier(H,'quartiles');
[OutlierH] = (find(DataH))';
H(OutlierH)=NaN;
QH=quantile(H,[0.09 .25 .50 .75 0.91])'
HS=[nanmean(H);nanstd(H); min(H); max(H); QH]'
VH = [];
for m = 1:length(MINVH)
minVH=MINVH(m);
maxVH=MAXVH(m);
rangeVH = minVH:0.1:maxVH;
VH=[VH,rangeVH];
end
DataVH=isoutlier(VH,'quartiles');
[OutlierVH] = (find(DataVH))';
VH(OutlierVH)=NaN;
QVH=quantile(VH,[0.09 .25 .50 .75 0.91])'
VHS=[nanmean(VH);nanstd(VH); min(VH); max(VH); QVH]'
CPAV=[VLS; LS; MS; HS; VHS]
CPAT=array2table(CPAV)
CPAT.Properties.VariableNames={'Mean' 'Stdev' 'Minimum' 'Maximum' 'Q0'
'Q1' 'Q2' 'Q3' 'Q4'}
CPAT.Properties.RowNames={'VL' 'L' 'M' 'H' 'VH'}
fis = mamfis('Name', 'CPAMedian');
fis = addInput(fis,[0 5],'Name','CPAMedian');
fis = addMF(fis,'CPAMedian','trapmf',[0 0 0.4 0.6],'Name','VL');
fis = addMF(fis,'CPAMedian','trapmf',[0.5 0.6 0.9 1],'Name','L');
fis = addMF(fis,'CPAMedian','trapmf',[0.9 1.1 1.8 2.2],'Name','M');
fis = addMF(fis,'CPAMedian','trapmf',[1.8 2.1 2.9 3.3],'Name','H');
fis = addMF(fis,'CPAMedian','trapmf',[3 3.4 5 5],'Name','VH');
plotmf(fis,'input',1)
fis2 = mamfis('Name', 'CPA');
fis2 = addInput(fis2,[0 5],'Name','CPA');
fis2 = addMF(fis2,'CPA','gauss2mf',[0.18249 -0.24169 0.18249
0.24169],'Name','VL');
fis2 = addMF(fis2,'CPA','gaussmf',[0.22784 0.73751 ],'Name','L');

```



```
fis2 = addMF(fis2, 'CPA', 'gausmf', [0.48973 1.4954], 'Name', 'M');  
fis2 = addMF(fis2, 'CPA', 'gausmf', [0.64677 2.4748], 'Name', 'H');  
fis2 = addMF(fis2, 'CPA', 'gauss2mf', [0.73956 3.915 0.73956  
5], 'Name', 'VH');  
plotmf(fis2, 'input', 1)
```




A4. Type

- Bulk carrier
- Container ship
- Cruise ship
- LNG tanker
- Tanker other
- Other

Other

A5. Length over all (LOA) in meters of your last ship

- $100 \leq \text{length} \leq 150$
- $150 < \text{length} \leq 200$
- $200 < \text{length} \leq 250$
- $250 < \text{length} \leq 300$
- $300 < \text{length} \leq 350$
- more than 350

Section B: Navigator's opinion: Other ship's parameters

Navigator's opinion:

In this part of research, researcher would like to know if characteristics of other ship affect navigator's experience of collision risk. Please, use your expertise to grade the influence of other ship's characteristics on your experience of the danger. Always consider yourself in open sea condition and sailing on size of vessel as you declared in the first part of the questionnaire. Choose from very low to very high.

B1. Grade the influence of other ship's particulars to the degree of risk experienced.

	Very low	Low	Medium	High	Very high
Other ship's size/length	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Other ship's speed	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Other ship's navigational status (Not under command, at anchor, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



	Very low	Low	Medium	High	Very high
Other ship's type (Cruiser, Tanker, etc.)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Other ship's draft	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Section C: Navigator's opinion: Situational parameters

Third part

In this part use your expertise to grade the influence of situational variables available on ARPA System on your experience of the risk. Choose from very low to very high.

C1. Grade the influence of the following variables to the degree of risk.

	Very low	Low	Medium	High	Very high
CPA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
TCPA	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bearing	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Distance to approaching vessel	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bow Crossing Range (BCR)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Heading of other ship	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Section D: Environmental conditions

Fourth part In this part please use your expertise to grade the influence of environmental conditions on your experience of the risk. Choose from very low to very high.

D1. Grade the importance of environmental conditions to degree of risk experienced

	Very low	Low	Medium	High	Very high
Visibility	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Weather Condition	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Night navigation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



Section E: Describe variable length

Learn machine to understand people's thinking and expression: I need your expertise to describe human expressions such as a small ship or bad weather by choosing a range that properly describes the term. For each variable define minimum and maximum values (borders) of the range. For instance if we want to describe speed of car at road, one could say like this: very slow car is from 0 km/h to 30 km/h, slow is from 30 km/h to 50 km/h, normal speed is from 50 km/h to 80 km/h, fast car is from 80 km/h to 125 km/h, very fast car would be from 125 km/h to 200 km/h, etc. This part is required in order to learn AI (artificial intelligence) the way people describe objects, relations and events.

E1. Please describe linguistic variable *very small ship* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in meters.

MIN

MAX

E2. Please describe linguistic variable *small ship* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in meters.

MIN

MAX

E3. Please describe linguistic variable *medium sized ship* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in meters.

MIN

MAX

E4. Please describe linguistic variable *large ship* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in meters.

MIN

MAX

E5. Please describe linguistic variable *very large ship* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in meters.

MIN

MAX

Section F: Describe variable speed

F1. Please describe linguistic variable *very slow ship* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in knots.

MIN

MAX

F2. Please describe linguistic variable *slow ship* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in knots.

MIN



MAX	
F3. Please describe linguistic variable <i>medium speed ship</i> by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in knots.	
MIN	
MAX	
F4. Please describe linguistic variable <i>fast ship</i> by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in knots.	
MIN	
MAX	
F5. Please describe linguistic variable <i>very fast ship</i> by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in knots.	
MIN	
MAX	
Section G: Describe variable CPA	
G1. Please describe linguistic variable <i>very small CPA ship</i> by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.	
MIN	
MAX	
G2. Please describe linguistic variable <i>small CPA</i> by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.	
MIN	
MAX	
G3. Please describe linguistic variable <i>medium CPA</i> by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.	
MIN	
MAX	
G4. Please describe linguistic variable <i>large CPA</i> by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.	
MIN	
MAX	



G5. Please describe linguistic variable *very large CPA* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

Section H: Describe variable BCR

H1. Please describe linguistic variable *very small BCR* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

H2. Please describe linguistic variable *small BCR* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

H3. Please describe linguistic variable *medium BCR* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

H4. Please describe linguistic variable *large BCR* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

H5. Please describe linguistic variable *very large BCR* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX



Section I: Describe variable distance to approaching vessel

I1. Please describe linguistic variable *very small distance* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

I2. Please describe linguistic variable *small distance* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

I3. Please describe linguistic variable *medium distance* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

I4. Please describe linguistic variable *large distance* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

I5. Please describe linguistic variable *very large distance* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

Section J: Describe variable TCPA

J1. Please describe linguistic variable *very small TCPA* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in minutes.

MIN

MAX



J2. Please describe linguistic variable *small TCPA* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in minutes.

MIN

MAX

J3. Please describe linguistic variable *medium TCPA* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in minutes.

MIN

MAX

J4. Please describe linguistic variable *large TCPA* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in minutes.

MIN

MAX

J5. Please describe linguistic variable *very large TCPA* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in minutes.

MIN

MAX

Section K: Describe variable visibility

K1. Please describe linguistic variable *very poor visibility* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

K2. Please describe linguistic variable *poor visibility* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

K3. Please describe linguistic variable *medium visibility* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX



K4. Please describe linguistic variable *good visibility* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

K5. Please describe linguistic variable *very good visibility* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in nautical miles.

MIN

MAX

Section L: Describe variable weather condition

L1. Please describe linguistic variable *very good weather* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in Beaufort scale.

MIN

MAX

L2. Please describe linguistic variable *good weather* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in Beaufort scale.

MIN

MAX

L3. Please describe linguistic variable *moderate weather* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in Beaufort scale.

MIN

MAX

L4. Please describe linguistic variable *bad weather* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in Beaufort scale.

MIN

MAX

L5. Please describe linguistic variable *very bad weather* by selecting minimum and maximum values. Values are expressed in Beaufort scale.

MIN

MAX



Section M: Rank vessels by the degree of risk
 Final In the last part, please rank different types of vessels by the degree of risk experienced when meeting such a vessel.

M1. Please rank the types of the ships by the experienced level of risk when meeting such a vessel.. Choose from 1 (the most dangerous) to 5 (the less dangerous).

Tanker

Bulk Carrier

Container ship

Cruiser

Fishing boat

M2. Please rank ships considering their navigational status and expernced level of risk connected with that type of vessel. Choose from 1 (the most dangerous) to 5 (the less dangerous).

Not under command

Restricted ability to maneuver

Deep draft

Anchored

Vessel engaged in fishing

Section N: Describe your decision making style

The following are statements about the way you usually make decisions. Read them and circle the appropriate number indicating how much you agree with them. The answer 1 means that you do not agree at all, and 5 means that you completely agree with the statement.

N1. The following are statements about the way you usually make decisions. Read them and circle the appropriate number indicating how much you agree with them. The answer 1 means that you do not agree at all, and 5 means that you completely agree with the statement.

	Strongly disagree	Disagree	Neutral	Agree	Strongly agree
I double-check my information sources to be sure I have the right facts before making decisions.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
When making decisions, I rely upon my instincts.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
My decision making requires careful thought.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



	Strongly disagree	Disagree	Neutral	Agree	Strongly agree
The decisions I make are quality ones.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I generally make decisions that feel right to me.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
When making a decision, I consider various options in terms of a specific goal.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
When I make decisions, I tend to rely on my intuition.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
The decisions I make are good ones.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
When I make a decision, it is more important for me to feel the decision is right than to have a rational reason for it.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I make decisions in a logical and systematic way.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
The decisions I make end up working out well.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
When I make a decision, I trust my inner feelings and reactions.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
I research all possibilities before making decisions.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Section O: Level of expertise

Grade your personal level of expertise, choosing from 1 (beginner) to 5 (expert).

O1. Finally, please try to objectively grade your personal level of expertise, choosing from 1 (beginner) to 5 (expert).

	1 (beginner)	2 (below average)	3 (average)	4 (above average)	5 (expert)
My level of expertise	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Thank you for completing this survey. If you have any question, please contact me on miho.kristic@unidu.hr.