

# Primjena Bayesove mreže u analizama rizika u pomorstvu

## Application of Bayesian Networks in Risk Analysis in Maritime Traffic

Stijepo Lale

Student Sveučilišta u Dubrovniku  
Pomorski odjel

Stjepan Čavar

Sveučilište u Dubrovniku  
Odjel za elektrotehniku i računarstvo  
e-mail: stjepan.cavar@unidu.hr

Dinka Lale

Sveučilište u Dubrovniku  
Odjel za elektrotehniku i računarstvo  
e-mail: dinka.lale@unidu.hr

Srećko Krile

Sveučilište u Dubrovniku  
Odjel za elektrotehniku i računarstvo  
e-mail: srecko.krile@unidu.hr

DOI 10.17818/NM.1.10.2015

UDK 519.2 : 656.61

Stručni rad / Professional paper

Paper accepted / Rukopis primljen: 25. 9. 2014.

### Sažetak

Rad počinje definicijom analize rizika i nužnosti njezine primjene u svakodnevnom životu. Nastavlja definiranjem Bayesovih mreža, njihovim osnovnim i općenitim značajkama, te se posebno ističe Bayesov teorem. Nakon toga slijede primjene Bayesovih mreža u pomorstvu. Najprije je primjer nesreće na brodu koja je analizirana uz pomoć BN-a. Potom se pobliže opisuje SARGOS sustav koji je inovativni sustav zaštite offshore naftnih konstrukcija od pomorskog piratstva koji je postao sve veći problem u pomorskom svijetu. Na kraju se opisuje pet različitih primjera korištenja Bayesovih mreža u gospodarskoj grani pomorstva.

### KLJUČNE RIJEČI

rizik  
analiza rizika  
Bayesova mreža  
nesreća  
SARGOS sustav

### Summary

The paper begins with a definition of the Risk Analysis and the necessity of its application in everyday life. It then goes on to define the term Bayesian Networks, their basic and general characteristics. Special emphasis is put on Bayes' theorem. Examples are then given of application of Bayesian Networks in maritime traffic. First, we give an example of a ship accident which is analysed using Bayesian Networks. Next, there is a detailed description of SARGOS, an innovative system of protecting offshore oil installations from piracy, which is becoming an ever greater problem in maritime traffic. Lastly, we describe five different examples of applications of Bayesian Networks in maritime industry and maritime traffic.

### KEY WORDS

the risk  
the risk analysis  
the Bayesian Networks  
an accident  
SARGOS system

## 1. UVOD / Introduction

Analiza rizika (*Risk Analysis*) predstavlja studiju ispitivanja temeljne neizvjesnosti koja daje smjer određenoj akciji. Analiza rizika omogućava profesionalcima identificirati rizike i umanje ih, ali ne i da ih izbjegnju u potpunosti. Ispravne analize rizika često uključuju i matematičku i statističku programsku opremu.

Analiza rizika kao komponenta upravljanja rizicima sastoji se od:

- utvrđivanja mogućih negativnih eksternih i internih uvjeta, događaja ili situacija;
- određivanja uzročno-posljedičnih odnosa između vjerojatnih

događaja, njihove veličine i vjerojatnosti ishoda;

- evaluacije različitih ishoda pod različitim pretpostavkama, i pod različitim vjerojatnostima;
- primjene kvalitativnih i kvantitativnih tehnika radi smanjenja neizvjesnosti ishoda i povezanih troškova, obaveza ili gubitaka."

Osnovni cilj procjene rizika je sprječavanje nesreća ili katastrofa.

Jednom kada se informacija o riziku kvantificira, analitičar se njom

može koristiti za razvoj odgovarajućeg alata za kontrolu rizika, kao i za izradu odgovarajuće politike, postupaka u incidentnim situacijama. Također, može se koristiti za lociranje izvora nesreća i katastrofa, te kako bi se umanjio i minimalizirao njihov utjecaj. Ukratko, kako bi se posljedice, u slučaju da do nesreće ili katastrofe uistinu i dođe, svele na minimum i maksimalno ublažile.

Jedan od brojnih izazova s kojima se susreću analitičari rizika je i taj što moraju razumjeti svu problematiku i kompleksnost sigurnosnih sustava, posebno u slučajevima rijetkih događaja.

Naime, problem unutar nekog uhdanog sustava najčešće se događa upravo u trenucima nekog izvanrednog događa (u biti, za vrijeme nekog rijetkog događaja). Informacije o riziku za vrijeme takvih izoliranih događaja, u pravilu, kao što je već rečeno, najčešće su jako siromašne detaljnim informacijama. A kad se govori o toj vrsti podataka koji su dostupni u tim slučajima, radi se o tzv. rastrkanim nesistematiziranim podacima. Na sreću, takve se situacije ne događaju često, podaci o njima nisu lako dostupni i zato se često koristi samo pretpostavkama i simulacijama „što u slučaju ako“.

Međunarodna pomorska organizacija (IMO - *International Maritime Organisation*) [30], [31] je specijalizirana organizacija koja poziva na odgovornost svih sudionika pomorskog prometa na sigurnost plovidbe i sprječavanje onečišćenja mora s brodova. Osnovana je konvencijom 1947. god., a stupila je na snagu 1958. god. Čak 158 država su članice IMO-a, odnosno 98,47% svjetske trgovačke flote.

Glavna uloga IMO-a je stvoriti regulatorni okvir za industriju izgradnje brodova koja je pravedna i učinkovita, univerzalno usvojiva i s mogućnošću provođenja. Drugim riječima, uloga IMO-a je, između ostalog, i potaknuti, a nekada i natjerati brodatere da se brinu o sigurnosti i zaštite okoliša. Ovaj pristup također potiče inovativnost i učinkovitost.

Postoji još jedna agencija koja se odnosi na zemlje članice Europske Unije [32], a zove se Europska agencija za pomorsku sigurnost (EMSA - *European Maritime Safety Agency*). EMSA pruža EU-u i državama članicama tehničku pomoć i podršku pri oblikovanju i provedbi zakonodavstva EU-a o pomorskoj sigurnosti i sigurnosnoj zaštiti te onečišćenju povezanom s plovidbom. EMSA je uvela i informacijski sustav THETIS [30], [33] kojim se u zemljama EU vrši inspekcijski nadzor brodova. Taj ekspertni sustav koriste i naše lučke vlasti.

## 2. BAYESOVE MREŽE / *Bayes networks*

Bayesova mreža je vjerojatnosni grafički model [1], [4], [6] koji predstavlja grupu slučajnih varijabli i njihovu uvjetnu ovisnost uz pomoć izravnog neperiodičnog grafa (*Directed Acyclic Graph* – DAG - usmjereni aciklički graf). DAG se sastoji od grupe čvorišta koje predstavljaju varijable, dok krajevi predstavljaju vjerojatnosnu slučajnu

ovisnost između tih varijabli.

Slučajna ovisnost između pojedinih varijabli izražena je uz pomoć strukture čvorova, koja osigurava i snabdijeva kvalitativni dio slučajnog zaključivanja u Bayesovoj mreži (*Bayesian Network* – BN).

Struktura može biti definirana koristeći prvu ili prethodnu informaciju, može biti definirana uz pomoć procjene koja je učinjena na temelju podataka, a može biti kombinacija to dvoje.

BN se sastoji od 3 različite vrste čvorova:

- Čvor slučajnosti – čvorovi koji imaju krajeve usmjerene prema njima se zovu čvorovi „djeca“, a čvorovi koji imaju krajeve koji polaze od njih zovu se čvorovi „roditelji“
- Čvor odluke/rješenja
- Čvor korisnosti/sredstva

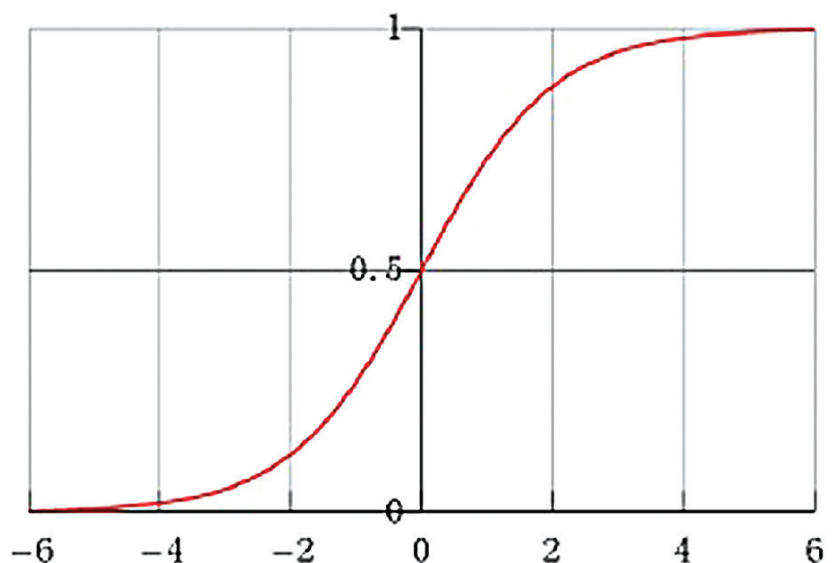
S  $p$  se definira procijenjena vjerojatnost broda koji ima nesreću, te se parametrizira kao eksponencijalna funkcija brodskih operacijskih karakteristika.

$y = 1$  ima nesreće za,  
 $y = 0$  nema nesreće za  $y^* \leq 0$

$$y_i^* = \sum X_i \beta_i + u_i \quad (1)$$

Logistička regresija se koristi za predviđanje vjerojatnosti pojavljivanja događaja, uz pomoć uklapanja događaja u logističku krivulju (slika 1.).

$$p_i = \frac{e^{\sum X_i \beta}}{1 + e^{\sum X_i \beta}} \quad (2)$$



Slika 1. Logistička krivulja [1]  
 Figure 1 The logistic curve

Bayesovo pravilo:

$$P(X = x_{ij} / Y = y_j) = \frac{P(Y = y_j / X = x_{ij}) * P(X = x_{ij})}{P(Y = y_j)} \quad (3)$$

Dokaz valjanosti konstruiranih modela proizlazi iz dva aksioma. Prvi aksiom glasi da bi neznatno povećanje, odnosno smanjenje početnih subjektivnih vjerojatnosti oba roditelja čvora bez ikakve dvojbe trebalo uzrokovati zavisno povećanje, odnosno smanjenje kasnijih vjerojatnosti čvora djeteta. Drugi aksiom glasi da ukupni utjecaj veličina kombinacije vjerojatnosnih oscilacija svojstva varijable  $x$  (dokaz) moraju biti uvijek veći od onih svojstava grupe  $x-y$  (sub-dokaz).

Glavna obilježja BN-a:

- mogućnost da se do zaključka dođe inverznim putem, obrnuto, od kraja;
- mogućnost da se u mrežu uključe nova opažanja;
- svojstvena je klasična i probabilistička semantika, koja uključuje rad s podacima koji nedostaju ili su nepotpuni;
- omogućuje vizualno predočavanje opisujući izvorni slučaj i međuovisne međusobne efekte.

Općenita obilježja BN-a:

- modeliranje domene;
- klasična teorija vjerojatnosti, teorija korisnosti (engl. utility) i teorija odlučivanja
- vjerojatnosti - u što bi agent trebao vjerovati (na temelju dokaza),

- korisnost - što agent dobije (koja je korist) određene akcije,
- odlučivanje - što bi agent trebao učiniti (temeljem vjerojatnosti i korisnosti);
- pomoć ekspertu.

Matematička definicija Bayesove mreže:

Bayesova mreža je usmjereni aciklički graf  $G = (V, E)$ , gdje su:

$V$  = čvorovi, slučajne varijable

$E$  = lukovi, pokazuju izravnu uzročnu vezu (lokalnu zavisnost varijabli).

Postupak oblikovanja Bayesove mreže:

- odabrati skup slučajnih varijabli koje opisuju domenu problema;
- urediti skup varijabli (povlačenjem lukova) tako da se najprije odredi najranije prethodnike (varijable koje nemaju roditelja), a zatim varijable na koje one izravno utječu (neposredne lokalne uzročne veze);
- ponavljati postupak pod prethodnom točkom do krajnjih varijabli (djece);
- definirati tablice lokalnih uvjetnih vjerojatnosti svake varijable (vjerojatnosti te varijable uz uvjet da njezini roditelji zauzmu svoje vrijednosti). Pri tome broj roditelja neke varijable određuje dimenzionalnost njezine lokalne tablice vjerojatnosti. U slučaju diskretnih binarnih varijabli za  $m$  roditelja potrebno je poznavati  $2^m$  vjerojatnosti.

### 3. IMPLEMENTACIJA BN-A U POMORSTVU / *Implementation of BN in marine industry*

#### 3.1 PRIMJERI DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA / *Examples of recent research*

Uz korištenje Bayesovih mreža nesreće, u pomorstvu se može analizirati tako da se prepoznaju najvažniji razlozi i definiraju veze između njih. Rezultati prezentirani u radu [1] omogućavaju pomorsku analizu s dubinom razumijevanja pomorskih nesreća i povezanim faktorima koji utječu na njih. Jednostavno se može utvrditi vjerojatnost nastanka brodske nesreće, ako se uz određeni konkretni slučaj definiraju i poznati faktori utjecaja.

Dani rezultati mogu dati mnogo

dobrobiti pomorstvu, uključujući i organizacije pomorskih osiguranja, kao i klasifikacijska društva i regulatorna tijela u njihovom poslu.

Za početak ćemo spomenuti zavidan broj primjera (uz kratko objašnjenje svakog) koji se bave istraživanjima vezano uz korištenje Bayesovih mreža u analizama u pomorstvu. Potom slijedi širi opis triju istraživanja koja su izabrana između svih ostalih.

Teorija Bayesovih mreža koristi se u proračunima u pomorstvu vezanima za sigurnost. Primjer se može dati iz lit. [10] gdje se, koristeći BN, razmatra karakteristična situacija u slučaju nesreće u kojem je potrebna evakuacija broda, pa se definira model po kojem bi se najlakše izvela. Dvije godine kasnije ista grupa autora bavila se transferom nafte u tanker za prijevoz nafte. U radu [12] je razvijen BN model uz pomoć kojeg se ispituje sigurnost sustava prijenosa nafte.

U radu [15] je predstavljen model upravljanja sigurnosti u pomorstvu. Bayesove mreže su se upotrijebile kao tehnika modeliranja, a parametri modela su dobiveni na osnovi iznošenja stručnjaka i podataka iz prijašnjih situacija. Došlo se do zaključka da, unatoč tome što je sustav upravljanja sigurnošću uistinu dobar i funkcionira, postoje dijelovi kojima je potrebno poboljšanje.

Prepoznavanje i procjena objekata u okolini broda su ključne za sustav nadgledanja i prikupljanja informacija u pomorskom okruženju [16]. A time i za preživljavanje u nestabilnim uvjetima u kojima brodovi plove. Upravo je za prepoznavanje, u radu [16], predložena upotreba svojstvene (opće) Bayesove mreže. Cilj rada je bio standardizirati i pojednostavniti upotrebu BN-a u proračunima. Konstruirana je BN za uočavanje krijumčara u predjelu obale. Rezultati koji su dobiveni su ohrabrujući i primjenjivi u budućnosti i daljnjim istraživanjima.

Autori iz rada [11] su razvili Bayesovu mrežu u svrhu modeliranja sustava pomorskog prometa, a integrirajući ljudski faktor i faktore organizacije u analize rizika.

U radu [20] se posebno ističu dvije prednosti korištenja Bayesovih mreža u analizama sigurnosti u pomorstvu. Prva je ta da su BN modeli jednostavni za razumijevanje i osobama koje nisu stručnjaci u spomenutom području. Druga je ta da BN dozvoljava

neposrednu i jasnu inkorporaciju znanja stručnjaka. Nadalje, u [20] naglašavaju još dvije dodatne prednosti u korištenju BN modela s obzirom na druge modele. Bayesove mreže omogućavaju uvrštavanje i usputnih (manje važnih) odnosa izravno u mrežu. Jednostavno je zaključiti da, s obzirom na sve tri prednosti spomenute ranije, Bayesove mreže je lakše verificirati i potvrditi nego druge tipove modela.

Posebno se ulogom BN-a u analizama sigurnosti u pomorstvu bave eksperti u Finskoj [17] [21].

Osim gore spomenutih primjera, Bayesovom se mrežom koristi i pri analiziranju uvjeta plovidbe za nemirnom mora [18]. Naime, brodovi se, za vrijeme svoje plovidbe, suočavaju s raznim vremenskim uvjetima, a more je oduvijek bilo nepredvidivo. Zbog toga se u spomenutom radu istraživalo na koji način omogućiti bolje uvjete plovidbe na nemirnom moru, kao i sigurnije kretanje brodova. BN se posebno koristila za procjenjivanje i definiranje koji čimbenik najviše utječe na pojavu pomorske nesreće.

U radu [14] se sjedinjuju metoda strukturne stabilnosti i analize koje se koriste stablima događaja za proračune i procjene sigurnosti u pomorstvu. Kao što će biti vidljivo iz primjera iz [4] BN mogu zamijeniti stabla događaja i uvelike proširiti opseg modela, te time omogućiti i šire korištenje dobivenih modela. Bayesove mreže su zato odličan alat koji ima veliku prilagodljivost i mogućnost modeliranja.

U istraživanju Kevin X. LI, Jingbo YIN, Zaili YANG, Jin WANG: „*Bayesian Network with Quantitative Input or Maritime Risk Analysis*“, The Hong Kong Polytechnic University [1] je predstavljen inovativni pristup prema povezivanju logističkih regresija i procjene rizika uz pomoć Bayesove mreže.

- Logističke regresije dokazane su kao snažni alat za modeliranje za predviđanje učestalosti vjerojatnosti nesreće, i to uz pomoć prilagođavanja podataka logičkoj funkciji.
- Metoda Bayesovih mreža je metoda razvijena za slučaj boljeg razumijevanja ovisnosti rizika o različitim uzrocima.

Sve uvjetne vjerojatnosti, kao i prethodne vjerojatnosti koje služe

kao čvorovi BN-a su definirane putem upotrebe binarne logističke regresije.

Studija slučaja analize rizika u pomorstvu provedena je koristeći integraciju logističke regresije i Bayesovih mreža (uklapanje logičke regresije u BN). Pristup je razvijen i primijenjen na takav način da se slučaj studije analize rizika u pomorstvu može primijeniti i u drugim industrijama. Nije definiran samo za pomorstvo.

### 3.2. PRIMJER NESREĆE BRODA ANALIZIRANE UZ POMOĆ BN / An example of disaster of a vessel analysed by means of BN

Kako bi se lakše shvatila uloga Bayesovih mreža u proračunima vezanima za sigurnost na brodu [1], dan je prikaz na slici 2. Radi se o prikazu BN-a za model uz pomoć kojeg se analizira i procjenjuje vjerojatnost pojavljivanja nesreće na brodu. Osnovni ulazni čimbenik je cijena, dok je osnovni izlazni čimbenik gubitak.

Najvažniji unutarnji čimbenik je stanje u kojem se brod nalazi. Pored njega, ostali čimbenici koji utječu na pojavljivanje nesreće na brodu su: klasifikacijsko društvo, vrsta broda, zastava pod kojom brod plovi, veličina broda i starost broda. Kao što je vidljivo na slici 2., većina tih čimbenika međusobno se isprepliće i utječe jedan na drugoga.

Cjelokupni komplet podataka je sastavljen od kombinacije tri pojedinačna kompleta podataka, kako je prikazano na slici 3. Kasnije će biti riječi o kojim se točno podacima radi.

Na slici 3. prikazani su IMO i WCS (World Class Shipping) brojevi, potom podaci o brodu, o kojoj se vrsti broda radi, pod kojom zastavom plovi itd. Nadalje, uvrštene su i konvencije vezane uz sigurnost plovidbe (Paris MoU – Memorandum of Understanding, Indija, Tokyo). Potom se definiraju i moguće žrtve, te inspekcije, nadzor, kao i lokacija nadzora, nedostaci, zadržavanja,

pojednosti broda, lokacija nezgode, druge važnosti itd.

Jednadžba (4) je način kako doći do vjerojatnosti svakog čvora.

$$X\beta_i = \beta_0 + \beta_1VA + \beta_2VS + \sum_{j=1}^5 \beta_{j+2}VT_j + \beta_2CS + \dots + \beta_3FS + \sum_{j=1}^{30} \beta_{j+3}Z_j + \epsilon_i \quad (4)$$

Gdje su:

VA (vessel age) – starost broda

VS (vessel size) – veličina broda

VT (vessel type) – vrsta broda (brodovi za prijevoz suhog tereta, brodovi za prijevoz rasutog tereta, kontejner brodovi, tankeri i putnički brodovi)

CS (the classification society) – klasifikacijsko društvo

FS (flag state) – zastava države pod kojom brod plovi

Z (zone) – zona u kojoj brod plovi (svijet je podijeljen na 30 različitih zona)

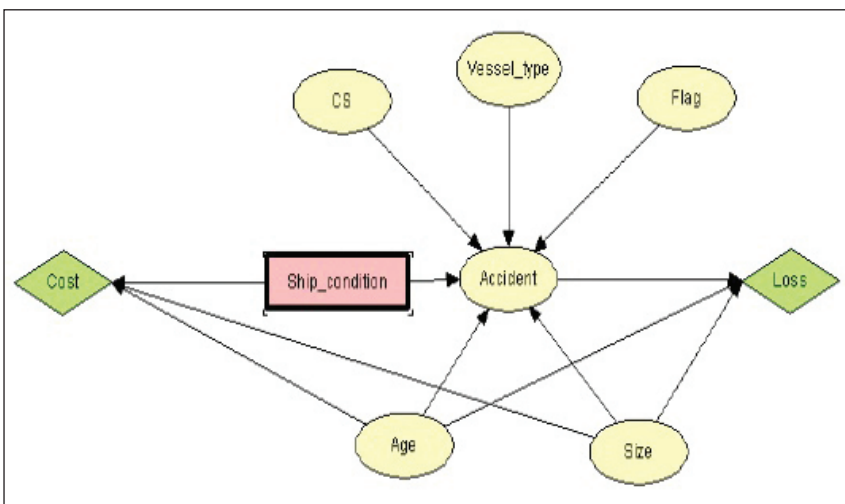
Varijablom  $\epsilon_i$  koristi se za kategorizaciju broda kao standardnog, odnosno nestandardnog.

Unaprijed su definirane uvjetne vjerojatnosti za svaki čvor, i to za različite (prethodno definirane) komponente: CS, FS, VA i VS, a ovisi o vrsti broda, je li standardan ili ne, ovisi o zastavi pod kojom plovi, starosti broda, veličini broda itd. Također, za očekivati je da će stariji brod imati veće troškove održavanja, kao i češće popravke.

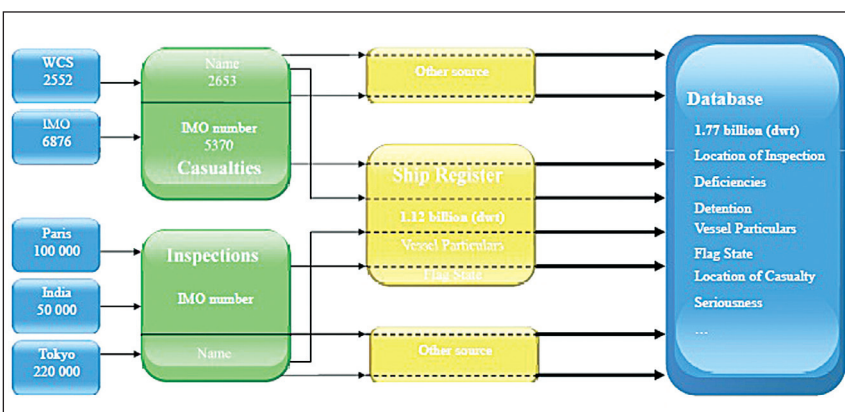
Na slici 2. je, kao što je već spomenuto, prikazana jednostavna skica Bayesove mreže kojom se koristi za procjenjivanje vjerojatnosti pojavljivanja nesreće na brodu. Ako se promatra neki konkretni, specifični brod i podaci o njemu uvrste u shemu sa slike 2. dobiva se slika 4. Sumirajući sve prije spomenute podatke i uvrštavajući ih u shemu BN, može se doći do procjene vjerojatnosti pojavljivanja nesreće na brodu koji se promatra.

Uzimajući u obzir različite sudionike, kao i različite faktore (kao npr. starost broda, veličinu broda itd.) te njihove međusobne utjecaje, ocjena rizika u pomorstvu, koristeći BN, omogućuje identifikaciju faktora koji imaju najveći utjecaj na pojavljivanje nesreće ili nezgode.

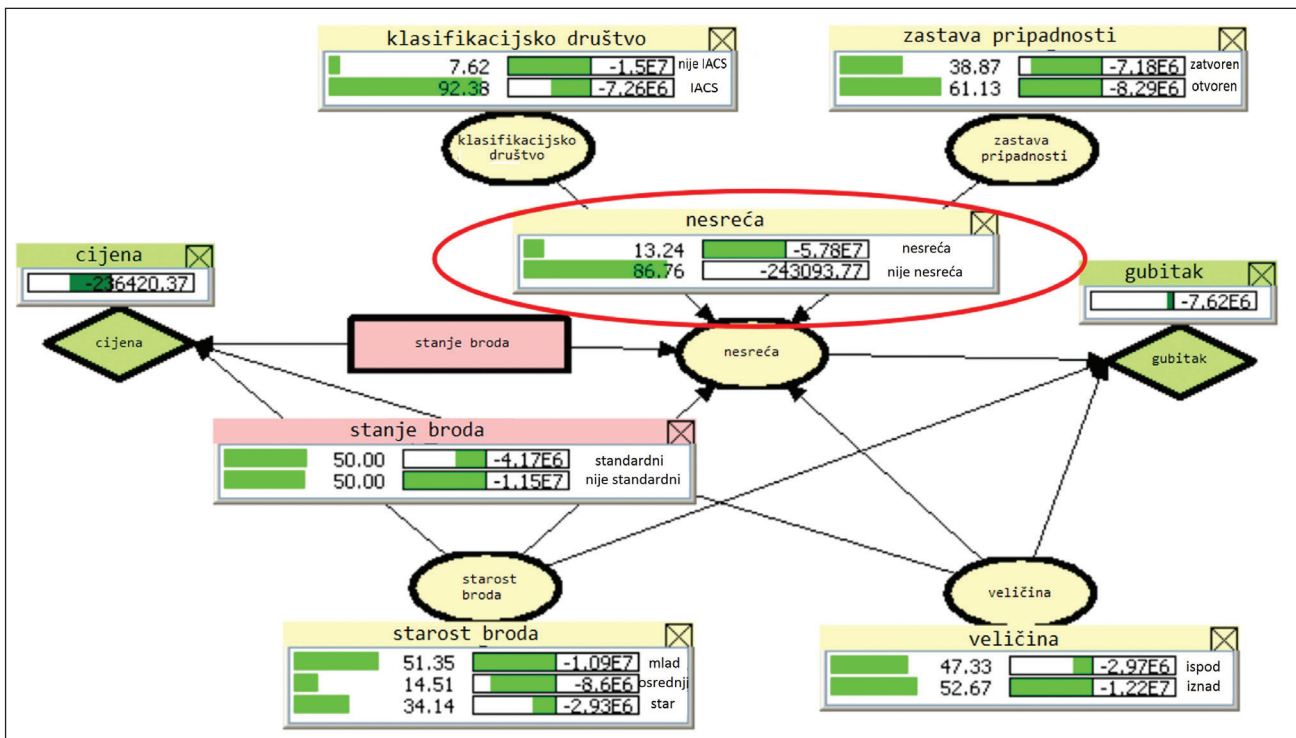
Prateći obavljenju studiju, može se zaključiti da, iako su troškovi za održavanje standardnog broda veći, očekivani cjelokupni troškovi za standardni brod su manji nego oni za nestandardni brod. U smislu doprinosa vjerojatnosti pojavljivanja nesreće, javlja se značajna



Slika 2. Odgovarajuća skica BN-a za model uz pomoć kojeg se analizira i procjenjuje pojavljivanje nesreće na brodu [1]  
Figure 2 The shipping accident model using BN



Slika 3. Cjelokupni komplet podataka je kombinacija podataka iz tri pojedinačna kompleta podataka [1]  
Figure 3 The total dataset is a combination of three individual datasets



Slika 4. BN - Normalizacija grafa i unaprijed procijenjena vjerojatnost pojavljivanja događaja [1]  
 Figure 4 BN – normalization and prior occurrence probability

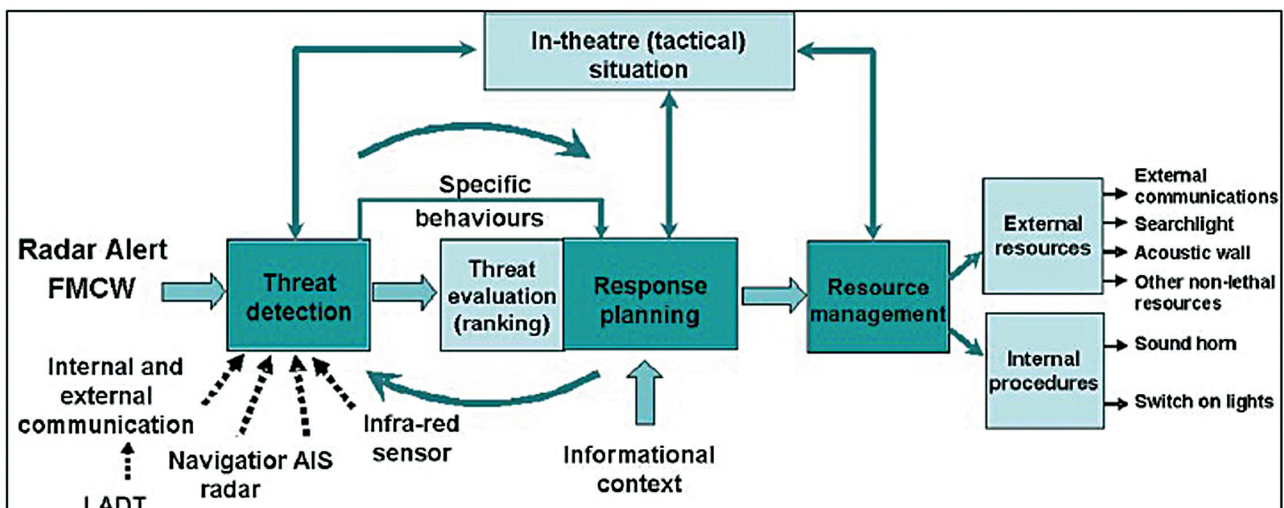
razlika između velikih i malih brodova, a to se osobito odnosi na tankere. Rezultati ovog istraživanja također ukazuju da je povećanje starosti broda u uskoj vezi sa smanjenjem vjerojatnosti pojavljivanja nesreće.

### 3.3. SARGOS SUSTAV / Sargos system

U istraživanju Chaze X., Boueja A., Napoli A., Guarnieri F.: „Integration of a Bayesian network for response planning in a maritime piracy risk management system“ [2] razmatra se inovativni sustav zaštite offshore naftne infrastrukture (konstrukcije na moru) od pomorskog

piratstva (gusari koji djeluju isključivo u privatne svrhe). Offshore sustavi za eksploatacije nafte trenutno proizvode jednu trećinu ukupne svjetske proizvodnje nafte. Od 2005. god. broj djelovanja pirata na tim postrojenjima neprestano raste. Godine 2011. International Maritime Bureau zabilježio ih je čak 552 (riječe je samo o broju prijavljenih slučajeva). Ti napadi generalno značajno povećavaju troškove, kako održavanja, tako i troškove saniranja posljedica napada. O mogućim ljudskim žrtvama nije potrebno ni govoriti, bilo da se dogodi ozljeda nekog člana posade ili najgori mogući scenarij. Za zaštitu posade i infrastrukture ANR (French

National Research Agency) je izradio sustav SARGOS sustav. Cilj je bio izraditi sustav koji će poboljšati zaštitu infrastrukture te ponuditi nove metode koje će prepoznati prijetnje i plan kako odgovoriti na njih, kako reagirati u trenutku kada se problem dogodi, pošto do ovog trenutka nije postojao nijedan cjeloviti sustav koji bi obuhvatio sve spomenute radnje. Da bi se postigli zadani ciljevi, sustav treba biti sposoban, u slučaju potvrđenog upada pirata ili smetnje od strane istih, izazvati alarm, te pokrenuti unutarnje i vanjske radnje prilagođene nivou opasnosti postojeće situacije. Te radnje, tj. odgovori na opasnost, trebaju biti implementirani



Slika 5. Funkcionalni dijagram SARGOS sustava [2]  
 Figure 5 Functional diagram of the SARGOS system

u sustav na način da su razvrstani u neke vrste serija i nivoa.

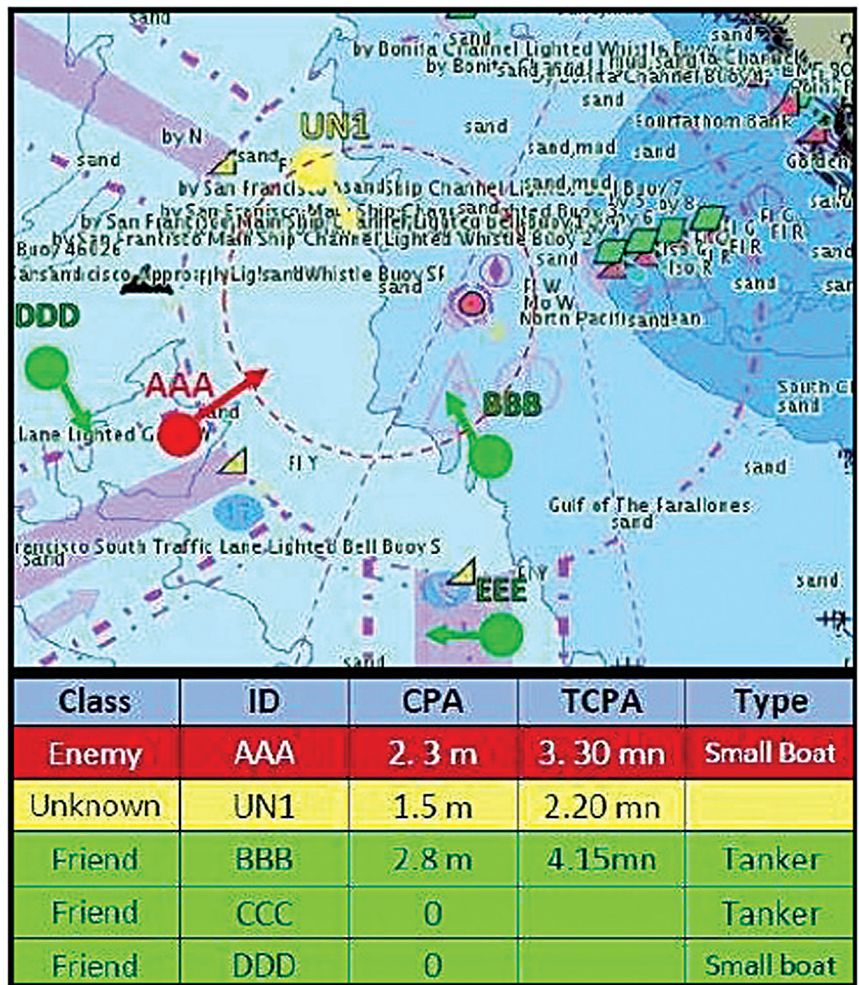
SARGOS sustav upravo je ono sve što je potrebno u spomenutim situacijama. Sastoji se od dva velika podsustava. Prvi podsustav je modul za detektiranje, praćenje i klasificiranje prijetnji u pomorskom okruženju. Drugi podsustav oblikuje i modelira razvrstane odgovore na prepoznate prijetnje. Uzima se u obzir i razvoj trenutne situacije, regulatorni zahtjevi i operacijska infrastruktura, te podatke koji se nalaze u izvješću za uzbunu.

Funkcionalni dijagram SARGOS sustava, prikazan na slici 5., predočava način na koji SARGOS sustav procesira prijetnju. Nakon što se detektira, najprije je potrebno klasificirati o kojoj vrsti prijetnje se radi. Potom se definira na koji način će se na nju odgovoriti, a u međuvremenu izdano je upozorenje ovisno o kojoj vrsti prijetnje se radi. Ovisno o razvoju situacije, vanjskoj podršci i činjenicama koje su poznate, odlučuje se kako će izgledati model postepenog, korak po korak definiranog, odgovora na prepoznatu prijetnju.

### 3.3.1. DOPRINOS BN-A / Contribution of BN

Velika slabost ovog procesa leži u pripremi dijagnoze koja služi za planiranje odgovora, te poduzimanje određenih koraka. Za savladavanje tog nedostatka, upotrijebio se jedan sasvim novi pristup. Detaljno istraživanje ishoda označava bitne zahtjeve koje SARGOS sustav mora uzeti u obzir radi dobivanja potpune slike kompleksnosti trenutne situacije. S jedne strane, potrebno je uključiti veliku količinu varijabli (koje predstavljaju prijetnju, cilj, okoliš itd) te ovisnosti koje mogu postojati između njih, a koje mogu utjecati na razvoj odluka koje donosi pomoćni sustav temeljen na teoriji grafova. S druge strane, prisutne neodređenosti nekih varijabli (identifikacija prijetnje, mogućnosti djelovanja itd.) potvrđuju potrebu za sustavom koji se temelji na teoriji vjerojatnosti i probablističkim izračunima. Na temelju ta dva pristupa istraživani je proces koji bi imao automatsku pripremu reagiranja na uočenu prijetnju, a koja je definirana na temelju podataka koje je dala BN jednadžbom (3).

Teorem se koristi radi statističkog zaključivanja da bi se korigirale



Slika 6. Korisničko sučelje SARGOS sustava [2]  
Figure 6 The user interface of the SARGOS system showing threat prioritisation

vjerojatnosti proračunate putem opažanja i uz pomoć odgovarajućih vjerojatnosnih funkcija koje su primjenjive za ta određena opažanja. BN se naširoko upotrebljava za dijagnoze u različitim granama, kao što su medicina i industrija. Slika 6. pokazuje korisničko sučelje SARGOS sustava koje ima mogućnost istovremeno procesuirati nekoliko različitih prijetnji. Na slici 6. je primjer s dvije istovremene prijetnje. Uočeno je 5 različitih objekata u okolini od čega su tri prepoznata kao Friend, odnosno prijateljski, jedan je prepoznat kao prijetnja (Enemy), a jedan kao nepoznati (Unknown). Dakle, tri prijateljska objekta označena su zelenom bojom, jedan nepoznati objekt je označen žutom bojom, a neprijateljski objekt je označen alarmantnom crvenom bojom.

Prednost korištenja BN-a u SARGOS sustavu je u tome što je na taj način omogućeno uvrštavanje velike količine informacija (i veze među tim istim informacijama) u proračune, procjene i odluke, kao i sve moguće interakcije

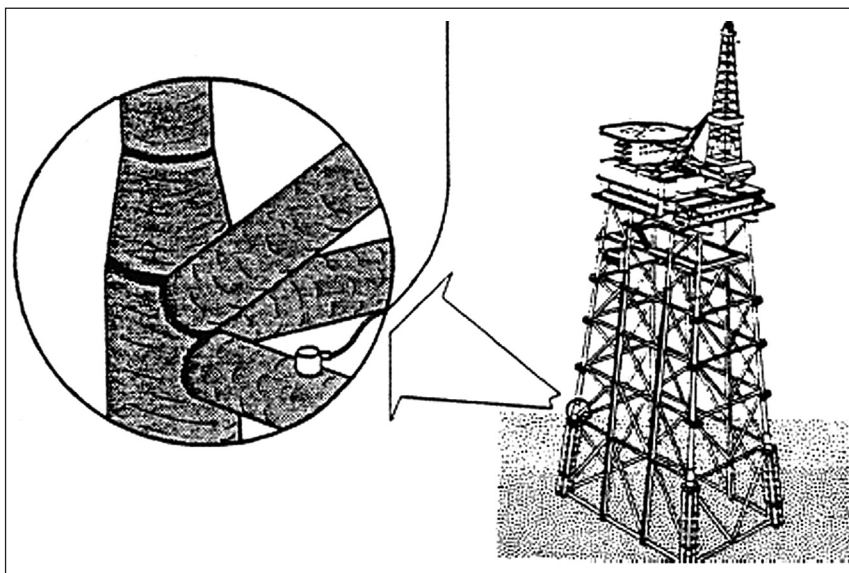
između karakteristika prijetnje, okoliša, ciljeva, posade i objekata. Na taj se način promjene u postupcima mogu prilagoditi promjenama koje se događaju u stvarnom vremenu, ovisno o razini opasnosti pojedine situacije.

### 3.4. PRIMJER KORIŠTENJA BN-A U GOSPODARSKOJ GRANI POMORSTVA / An example of the usage of BN in economic branch of marine industry

Budući da je zaključak da su BN moćna i prilagodljiva probablistička tehnika modeliranja, pojavile su se nove mogućnosti istraživanja i modeliranja. Tema rada Andreas Friis – Hansen „Bayesian Networks as a Decision Support Tool in Marine Applications“ [4] je istražiti kako pomorska industrija može imati koristi od potencijala korištenja BN-a.

Učinjen je presjek kroz pet različitih slučajeva u gospodarskoj grani pomorstva koji su definirani i analizirani uz pomoć BN-a.

Prvi slučaj analizira primjenjivost



Slika 7. Struktura naftne platforme (mjesto spoja i varova, tzv. kritična točka) [4]  
 Figure 7 Jacket structure („critical point“)

dijagrama utjecaja na optimalne troškove planiranja nadzora naftnih platformi (konstrukcija na moru). Naftne se platforme sastoje od općenito previše elemenata da bi se uspio obaviti kompletan nadzor. Zbog toga se uzimaju samo uzorci određenih elemenata za koje se smatra da je vjerojatnije da će podbaciti prije nego neki drugi. Radi se od dijelovima materijala koji su skloniji zamoru materijala, pukotinama i slično. Ti dijelovi materijala nazivaju se kritične točke materijala. Na slici 7. prikazana je tipična kritična točka naftne platforme. Radi se o mjestu spoja konstrukcije, mjestu gdje se varilo. Zbog svojstvenih napuklina i koncentracije naprezanja, zavareni dijelovi cijevi imaju veću vjerojatnost neuspjeha nego cijela čelična cijev. Pregled tih dijelova cijevi na pojedinim dužinama će dati rezultat je li pronađena pukotina na određenoj dužini ili nije. Neovisno o rezultatima pregleda, više će podataka o kritičnim točkama materijala biti dostupno nakon inspekcije, nego što je to bilo prije. Na osnovi rezultata pregleda mora se odlučiti nakon koliko vremena će se obaviti sljedeći pregled.

S namjerom da se predvidi razvoj pukotina na kritičnim mjestima, potrebno je definirati odnos između opterećenja, svojstva materijala i vijeka trajanja. BN se koriste za potvrdu vjerojatnosti povećanja pukotine na kritičnom mjestu.

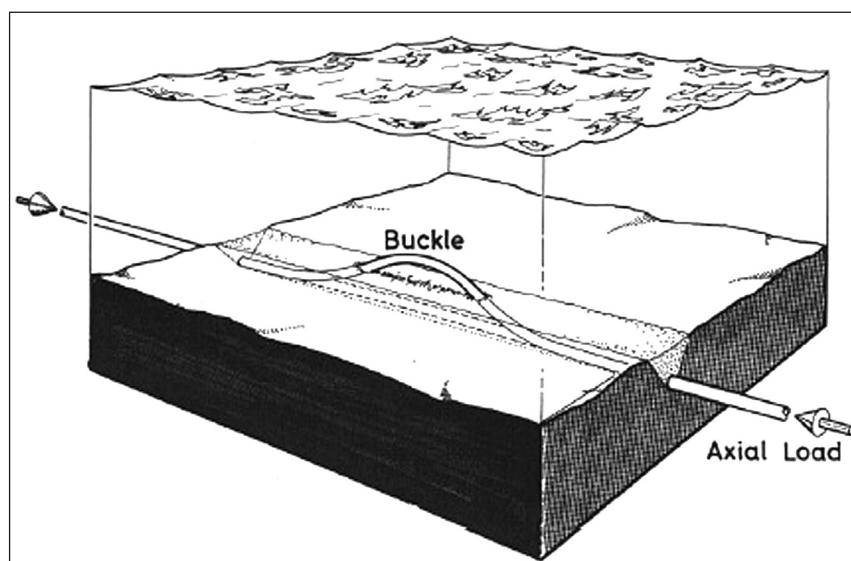
**Drugi slučaj** je vezan za premještanje deformacije, odnosno ispuščenja. Naime, u Sjevernom moru većina transporta nafte i plina odvija se uz pomoć cijevi,

posebno onaj plin i nafta čije su bušotine i crpilišta daleko od obale, a terminali se nalaze na obali. Cijevi su obično zakopane u kanale u podmorju kako bi se zaštitile od valova i opterećenja morskih struja. Većina takvih cijevi u Sjevernom moru dosegla je starost od 20 do 30 godina, te se približava kraj njihovog životnog vijeka. Njihova je zamjena iznimno skupa, te bi bilo dobro produžiti im, na neki način, životni vijek. To je moguće tek nakon cjelokupne i potpune inspekcije i ocjene stanja pojedine cijevi. Transport plina i nafte odvija se na temperaturi od 80 stupnjeva C, a prilikom temperaturne promjene cijev će se rastegnuti, na nekim mjestima i naduti, kao na slici 8.

Ponavljajući ciklusi visoke i niske temperature mogu uzrokovati povećanje

ispupčenja sa slike 8. Razvoj ispuščenja može se spriječiti uz pomoć slaganja slojeva kamena na mjestima iznad ispuščenja. To je učinkovito (i ekonomski isplativo) jedino u slučaju kada se postavi na potencijalno kritičnu lokaciju. Zbog toga je potrebno najprije definirati potencijalno kritična mjesta, a potom i odrediti koliko kamena je potrebno nabaciti na koju lokaciju. Važno je procijeniti kolika je duljina od vrha cijevi do morskog dna, a potom i koliko će biti velik sloj nabacanih kamena, stijenja. Uz pomoć BN-a se definira probabilistički model premještanja ispuščenja cijevi koristeći sve poznate podatke. Također, nakon određivanja potencijalnih kritičnih lokacija i količine potrebnog stijenja, lako je moguće procijeniti troškove sanacije cijevi.

**Treći slučaj** korištenja BN-a je prilikom nadziranja pomorskih dizel motora. Većina komponenti unutar strojarne broda, kao što su npr. pumpe goriva i pumpe ulja imaju pomoćne sustave (standby sustave), u slučaju potrebe, ako jedan sustav otkaže da se osigura nesmetani nastavak operacije. Baza motora s unutrašnjim izgaranjem je komora izgaranja i okolni dijelovi za koje ne postoje pomoćni sustavi u slučaju bilo kakvog problema. Zbog toga su stanja u kojima se nalazi cilindar presudna za nesmetano odvijanje operacije, te je prirodno da je početna točka nadzornog sustava upravo taj dio motora. Ispravna radnja ovisi o nepropusnosti komore za izgaranje, odnosno o brtvenim



Slika 8. Prikaz deformacije cijevi za prijenos nafte i plina uslijed razlike u temperaturi [4]

Figure 8 Illustration of upheaval buckling

površinama ventila i klipnih prstenova. Osim toga ubrizgavanje mora biti precizno upravljano s ispravnom količinom i kutom paljenja. Nadgledanje stanja cilindra uključuje i klip, klipne prstenove, košuljicu cilindra, ispušni ventil, ubrizgač (šprica) i lubrifkatore cilindra. Svaka od ovih komponenata može podbaciti na različite načine. Košuljica cilindra može imati različite oblike korozije. Klipni prsteni mogu se zapeći ili potrošiti. Na ubrizgač se mogu nataložiti razne naslage iz goriva i izgarnih plinova. Svrha ispušnog ventila je da nepropusno zatvori komoru izgaranja za vrijeme kompresije i ekspanzije. Svi spomenuti elementi su presudni da se osigura nepropusnost izgarne komore prilikom izgaranja u svrhu postizanja maksimalnog tlaka izgaranja, a time i maksimalne snage motora. Problem kod ispušnih ventila dolazi ako dođe do njihovog propuštanja. Ako se curenje uoči u ranom stadiju, često je moguće popraviti oštećeni ventil. Međutim, u nekim slučajevima ga je potrebno zamijeniti, osobito ako se curenje detektira prekasno. U oba slučaja, popravak ili zamjena oštećenog ventila, radi se o vremenski ovisnom procesu koji može uzrokovati velike troškove zbog kašnjenja transporta.

Konstruiran je eksperimentalni dizel motor, dvotaktni, s četiri (4) cilindra, unutar kojeg su ugrađena dva senzora, akustični senzor i senzor napreznja. Na slici 9. prikazan je položaj akustičnog senzora i

senzora napreznja na vanjskoj površini ventila.

Prikupljeni podaci sa senzora tijekom rada motora uvršteni su u BN [4], [13]. Na temelju tih i podataka o pojavljivanju oštećenih ventila, koristeći BN, dobila se vjerojatnost pojave problema s ventilima. Tako se regulirao i povećao vremenski interval pregleda i zamjene pojedinih komponenti motora. Time se, naravno, došlo do veće pouzdanosti i uštede.

**Četvrti slučaj** primjera korištenja BN-a u pomorstvu je prilikom procjene sigurnosti zone za slijetanje helikoptera na putničke brodove. Radi se o tipičnom primjeru primjene BN-a u svrhu analize rizika. Analiziran je rizik slijetanja helikoptera na putničke brodove koji imaju i koji nemaju zonu predviđenu za slijetanje helikoptera. Prilikom razmatranja najprije se postavlja pitanje je li postojanje predviđene zone za slijetanje helikoptera smanjuje broj nesreća. Potom slijedi pitanje, ako se smanjuje broj nesreća u slučaju postojanja zone, je li opcija kontrole rizika ekonomski isplativa, uspoređujući je s kriterijem opće prihvaćenog rizika. Osnovni uvjet ove analize je odgovor na pitanje nalazi li se brod u situaciji koja zahtijeva evakuaciju. Uzrok može biti požar koji je izvan kontrole, sudar broda ili potapanje broda, uslijed čega dolazi do prodiranja vode u brod. To su situacije u kojima nije moguće vratiti se u stanje

stabilnosti, te je potrebna evakuacija i pomoć izvana. Ovisno o ozbiljnosti situacije, moguća su dva scenarija. Prvi je da posada i putnici čekaju dolazak pomoći, a drugi je u slučaju da moraju odmah napustiti brod (u tom slučaju se ukrcajavu u spasilačke brodove ili skaču u more). U prvom slučaju helikopter slijeće na brod i odvozi ljude, a u drugom brod koji se nalazi u blizini kupi ljude izravno iz mora ili spasilačkih brodova. Za ovu analizu zanimljiv je slučaj kada je uključeno slijetanje helikoptera. Uspjeh evakuacije najprije ovisi o vremenu od otkrivanja problema do trenutka kada je evakuacija nužna. U tom slučaju svaka je sekunda dragocjena, te je od koristi ako helikopter bez problema može sletjeti na brod. Analize koje se vrše odnose se na tipične putničke brodove. Prije su se u takvim analizama koristila stabla događaja, a danas su se ona transformirala u BN.

Prilikom analize BN-a, postavljaju se pitanja kao što su ozbiljnost situacije, hitnost evakuacije, mogućnosti evakuacije, broja ljudi, broja helikoptera, postojanja zone za slijetanje helikoptera itd. Na temelju odgovora dolazi se do procjene koliko je vremena potrebno za cjelokupnu evakuaciju (priprema zone, područja slijetanja, slijetanje, ukrcaja putnika, polijetanja, leta itd.), procjene kada bi najbliži brod mogao doći u blizinu unesrećenog broda, blizina drugog broda koji ima predviđenu zonu za slijetanje, koliko dugo mogu ljudi preživjeti u moru, brzina helikoptera, kapacitet helikoptera, te se spominju prijedlozi kako je moguće skratiti vrijeme evakuacije te poboljšati sigurnost.

**Peti slučaj** korištenja BN-a je u preliminarnom dizajnu brodova. U ovom slučaju se radi o izgradnji modela broda prema dostupnim podacima, a da taj isti brod ima što bolje performanse. Za primjer će se uzeti brod za prijevoz kontejnera čija se BN skica nalazi na slici 10.

Gdje je:

TEU kapacitet – *Twenty Foot Equivalent Unit* (ekvivalentna jedinica 20 stopa)

V – *service speed* (brzina)

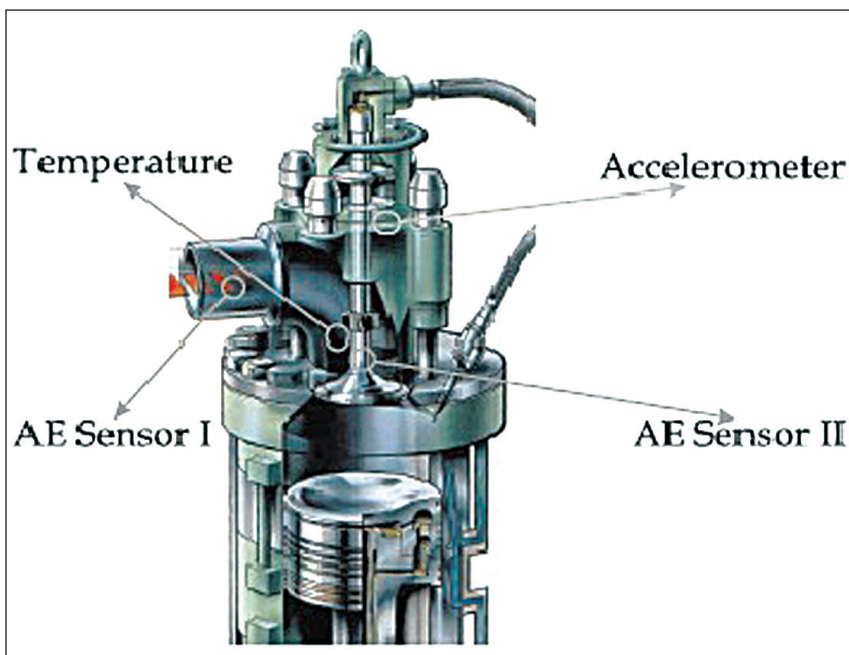
B – *breadth* (profilirana širina)

$\Delta$  – *displacement* (istisnina)

L – *length* (ukupna dužina broda)

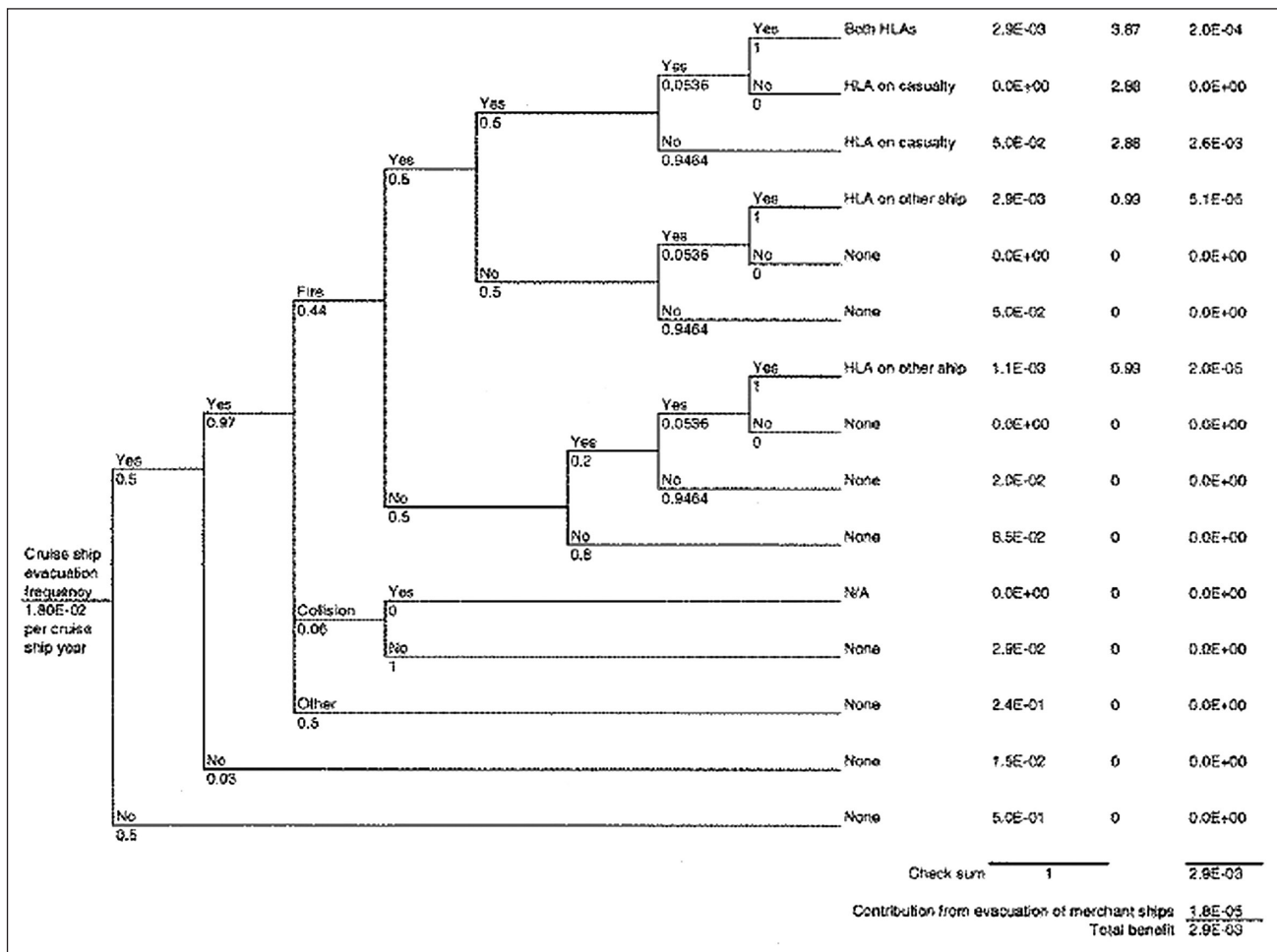
T – *max draught* (maksimalni gaz)

D – *depth* (dubina)



Slika 9. Približan raspored dva senzora na vanjskoj površini ventila [4]  
Figure 9 Approximate positions of the two AE sensors on the outside surface of the valve housing





Slika 10. Definirana BN za brodove za prijevoz kontejnera [4]  
Figure 10 Learned Bayesian network for container vessels

TEU kapacitet mora biti vrijednost čvora roditelja (početnog/ishodišnog čvora, što je vidljivo na slici 10.) pošto je ona najvažnija prilikom izgradnje broda bilo koje vrste. Naime, glavna je karakteristika broda kolika se količina tereta njime može prenijeti (za putničke brodove – koliko ljudi mogu primiti). Prema toj vrijednosti modeliraju se, procjenjuju ostale karakteristike broda, koristeći BN.

Iz slike 10. može se jednostavno zaključiti koja karakteristika broda utječe na neku drugu, odnosno koja uvjetuje neku drugu karakteristiku broda. Npr. dubina D i istisnina  $\Delta$  nisu izravno povezane, ali vrijednost istisnine  $\Delta$  preko vrijednosti dužine broda L utječe na vrijednost dubine D.

Također, koristeći BN moguće je izračunati i pogrešku u procjeni vrijednosti pojedinih parametara broda, pa se onda ta pogreška uzima u obzir pri modeliranju broda prema procijenjenim vrijednostima.

### ZAKLJUČAK / Conclusion

Statistika opisuje samo prošlost, a ponekad je teško na temelju tih rezultata predvidjeti buduće radnje. To pogotovo vrijedi za vrlo rijetke događaje, kao što su nesreće na moru. Ipak ti rezultati mogu biti korisni u predviđanju okolnosti budućeg događaja. Nadalje, prosudbe stručnjaka treba uzimati s oprezom jer mogu pogriješiti ili izostaviti određene utjecaje prilikom razmatranja svih mogućnosti. Također stručnjaci vrlo lako mogu doći pod utjecaj svojeg radnog iskustva (affected by operational experience).

Međutim, statistički podaci mogu omogućiti predviđanje ako ih uključimo u ekspertni sustav koji povezuje brojne veličine u međusobnoj ovisnosti, tj. u obliku mreže nezuvjesnosti. Stoga se Bayesove mreže (BN) mogu smatrati vrlo korisnim alatom u procjenjivanju vjerojatnosti pojavljivanja nesreća i incidenata u pomorstvu, bilo da se radi o problemima u radu brodova i plovlia, za optimizaciju prometa na plovnom putevima i lukama, za konstrukciju

naftnih platformi, za moguće napade pirata na brodove, kao i za mnoge druge situacije. Ovakvi sustavi već danas omogućuju sigurniju plovidbu sve većem broju brodova na svjetskim morima.

### LITERATURA / References

- [1] K., X. Li, J., Yin, Z., Yang, J., Wang: „Bayesian Network with Quantitative Input or Maritime Risk Analysis”, The Hong Kong Polytechnic University
- [2] Chaze X., Bouejla A., Napoli A., Guarnieri F.: „Integration of a Bayesian network for response planning in a maritime piracy risk management system”, MINES ParisTech – CRC, published in “7th International Conference on System Of Systems Engineering - IEEE SOSE 2012, Genoa, Italy (2012)”, DOI: 10.1109/SYSOSE.2012.6384126
- [3] Ren J., Wang J., Jenkinson I., Xu D. L., Yang J. B.: “A Bayesian Network Approach for Offshore Risk Analysis through Linguistic Variables”, School of Engineering, Liverpool John Moores University, Byrom Street, Liverpool, L3 3AF, UK, Manchester Business School, The University of Manchester, Manchester, M60 1QD, UK
- [4] A., Friis-Hansen „Bayesian Networks as a Decision Support Tool in Marine Applications” Technical University of Denmark, Department of Naval Architecture and Offshore engineering, PhD Thesis, December 2000
- [5] P., Weber, G., Medina-Oliva, C., Simon, B., Lung: „Overview on Bayesian networks Applications for Dependability, Risk Analysis and Maintenance areas”, published in “Engineering Applications of Artificial Intelligence 25, 4 (2012)

- 671-682", DOI: 10.1016/j.engappai.2010.06.002
- [6] [www.zemris.fer.hr/predmeti/krep/Bayes.ppt](http://www.zemris.fer.hr/predmeti/krep/Bayes.ppt), Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, posjećeno ožujak 2014.
- [7] [http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-29023-7\\_9#page-1](http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-29023-7_9#page-1), posjećeno ožujak 2014.
- [8] <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2261022>, posjećeno ožujak 2014.
- [9] <http://www.upravljanjerizicima.com/pojmovnik/analiza-rizika/66>, posjećeno svibanj 2014.
- [10] A. G. Eleye-Datubot, A. Wall†, A. Saajedit and, J. Wang†: „Enabling a Powerful Marine and Offshore Decision-Support Solution Through Bayesian Network Technique“, Volume 26, Issue 3, pages 695–721, June 2006
- [11] P. Trucco, E. Cagno, F. Ruggeri, O. Grande: „A Bayesian Belief Network modelling of organisational factors in risk analysis: A case study in maritime transportation“, Reliability Engineering & System Safety, Volume 93, Issue 6, June 2008, Pages 845–856
- [12] A. G. Eleye-Datubot†, A. Wall† and J. Wang†: „Marine and Offshore Safety Assessment by Incorporative Risk Modeling in a Fuzzy-Bayesian Network of an Induced Mass Assignment Paradigm“, Volume 28, Issue 1, pages 95–112, February 2008
- [13] T. L. Fog, L. K. Hansen, J. Larsen, H. S. Hansen, L. B. Madsen, P. Sorensen, E. R. Hansen and P. S. Pedersen: „On Condition Monitoring of Exhaust Valves in Marine Diesel Engines“, in Proceedings of the 1999 IEEE Signal Processing Society Workshop, pp 554-563, 1999
- [14] T. Nilsen, O. T. Gudmestad, J. I. Dalane, W. K. Rettedal and T. Aven: „Utilisation of principles from structural reliability in quantitative risk analysis: example from an offshore transport problem“, Statistics and Computing, 8:159-173, 1998.
- [15] M., Hanninen, O. A., Valdez Banda, P., Kujala: „Bayesian network model od maritime management“, Expert Systems with Applications, 1 Decembre 2014, pages 7837-7846
- [16] M., Kruger, J., Ziegler, K., Heller: „A Generic Bayesian Network for Identification and Assessment of Objects in Maritime Surveillance“, Hochschule Furtwangen University, Germany, Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mhB, Germany, 2309-2316
- [17] Osiris A. Valdez Banda: „Competitive Advantage by Safety: The Bayesian Network Model of Maritime Safety Management (Safety Management and indicators in its use)“, Aalto University, Department of Applied Mechanics, IMISS Conference, 11-12 June 2013, Maritime Center Vellamo, Finland
- [18] F., Qu, F., Wang, Z., Yang, J., Sun: „Navigation Safety Assessment of Ship in Rough Seas Based on Bayesian Network“, Algorithms and Architectures for Parallel Processing, Lecture Notes in Computer Science Volume 8631, 2014, pp 470-478
- [19] M., Rahikainen, A., Lehtikainen, E., Luoma, P., Haapasaaari, P., Levontin, S., Kulmala, J., Kuronen, M., Hanninen, S., Mantyniemi, E., Klemola, S., Kuikka: „Bayesian network – a flexible tool to integrate multidisciplinary knowledge“, Fisheries and Environmental Management Group (FEM), University of Helsinki
- [20] S., Mascaro, K. B., Korb, A. E. Nicholson: „Learning Abnormal Vessel Behaviour from AIS Data with Bayesian Networks at Two Time Scales“ Clayton School of Information Technology, Monash University, August 31, 2010
- [21] F., Goerlandt, J., Montewka: „A Bayesian Network Model for Accidental Oil Outflow in Double Hull Oil Product Tanker Collisions“ Aalto University, Department of Applied Mechanics, Marine Technology, Research Group on Maritime Risk and Safety, P.O. Box 15300, FI-00076 AALTO, Finland
- [22] J., Montewka, P., Krata, F., Goerlandt, A., Mazaheri, P., Kujala, „Marine traffic risk modelling -an innovative approach and a case study“ Proc. Inst. Mech. Eng. Part O J. Risk Reliab., vol. 225, no. 3, pp. 307–322, Sep. 2011.
- [23] F., Goerlandt, K., Ståhlberg, P., Kujala, „Influence of impact scenario models on collision risk analysis,“ Ocean Eng., vol. 47, pp. 74–87, Jun. 2012.
- [24] K., Ståhlberg, F., Goerlandt, S., Ehlers, P., Kujala, „Impact scenario models for probabilistic risk-based design for ship-ship collision“ Mar. Struct., vol. 33, pp. 238–264, 2013.
- [25] T., Helldin, M., Riveiro: „Explanation Methods for Bayesian Networks: review and application to a maritime scenario“, Informatics Research Centre, University of Skovde, Sweden
- [26] M. A. S. Neves, N. A. Pe´rez, L. Valerio: „Stability of small fishing vessels in longitudinal waves“, Department of Ocean Engineering, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, Institute of Naval and Maritime Sciences, Austral University of Chile, Valdivia, Chile, Ocean Engineering 26 (1999) 1389–1419
- [27] A., Mayrargue: „How can science history contribute to the development of new proposals in the teaching of the notion of derivatives?“, Université Paris (France) The Montana Mathematics Enthusiast, ISSN 1551-3440, Vol. 5, nos.2&3, pp.223-230, 2008©Montana Council of Teachers of Mathematics & Information Age Publishing
- [28] W. F., Belknap, A. M., Reed., TEMPEST — A New Computationally Efficient Dynamic Stability Prediction Tool“, Carderock Division, Naval Surface Warfare Center, Proceedings of the 11th International Ship Stability Workshop, 2011.
- [29] Obradović, I., Miličević, M., Žubrinić, K., „Machine Learning Approaches to Maritime Anomaly Detection“ // Naše more : znanstveni časopis za more i pomorstvo. 61 (2014), 5-6; 96-101 (review article)
- [30] [http://europa.eu/about-eu/agencies/regulatory\\_agencies\\_bodies/policy\\_agencies/emsa/index\\_hr.htm](http://europa.eu/about-eu/agencies/regulatory_agencies_bodies/policy_agencies/emsa/index_hr.htm) posjećeno veljača 2015.
- [31] Doc.dr.sc. Vlado Frančić : „Međunarodni sustav sigurnosti plovidbe“, Rijeka, 2014., [http://www.pfri.uniri.hr/~vfrancic/međunarodni\\_sustav\\_pomorske\\_sigurnosti.htm](http://www.pfri.uniri.hr/~vfrancic/međunarodni_sustav_pomorske_sigurnosti.htm)
- [32] <http://emsa.europa.eu/psc-main/thetis.html>, posjećeno veljača 2015.
- [33] <https://portal.emsa.europa.eu/web/thetis/home>, posjećeno veljača 2015.