

Modeliranje uzroka izletanja sa poletno-sletnih staza primenom Bajesovih mreža

DOROTEJA D. TIMOTIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Saobraćajni fakultet, Beograd
FEDA N. NETJASOV, Univerzitet u Beogradu,
Saobraćajni fakultet, Beograd

Pregledni rad
UDC: 656.71.08
DOI: 10.5937/tehnika1901105T

Izletanje vazduhoplova sa PSS se izdvaja kao jedan od glavnih problema bezbednosti operacija na poletno-sletnoj stazi (PSS). Definiše se kao događaj u kome avion ne uspeva da se zaustavi pre kraja PSS (overruns) ili izleti levo ili desno sa nje (veer-offs) tokom operacija poletanja ili sletanja. U ovom radu je predstavljena primena Bayesian Belief Network (BBN) metode za analizu uzroka koji dovode do izletanja vazduhoplova sa PSS. BBN pridapa grupi kvantitativnih uzročnih modela zasnovanoj na probabilističkoj teoriji sa ciljem razumevanja uticaja različitih uzroka na nezgode i nesreće u vazдушnom saobraćaju. Metoda koristi statističke podatke, ili kombinaciju statističkih podataka i uverenja eksperata pri proračunu verovatnoća realizacije uzroka. Cilj rada je identifikacija potencijalnih uzročnih faktora, analiza i određivanje verovatnoća njihove realizacije. Primena BBN metode je prikazana kroz dva modela: jedan za operaciju poletanja i jedan za operaciju sletanja. Na osnovu Ishikawa metode identifikovani su uzročni faktori, a zatim kroz kvalitativni BBN model predstavljene njihove međusobne zavisnosti. Kvantifikacija modela je izvršena kombinovanjem statističkih podataka i uverenja eksperata. Analiza osetljivosti modela je pokazala koji su najkritičniji faktori čije poznavanje omogućava da se razviju određene mere za smanjenje rizika od izletanja sa PSS.

Ključne reči: aerodrom, bezbednost, izletanje vazduhoplova sa PSS, uzročno modeliranje, Bayesian Belief Network

1. UVOD

Vazdušni saobraćaj je složen socio-tehnički i bezbednosno-kritični sistem koji uključuje složenu interakciju između ljudi, procedura i tehničko-tehnološkog dela sistema.

Ovi faktori čine održavanje društveno prihvatljivog nivoa bezbednosti komplikovanim. Svi elementi sistema vazdušnog saobraćaja suočavaju se sa stalnim izazovima po pitanju bezbednosti, bez obzira koliko su oni česti i ozbiljni. Neki od njih mogu proizaći u nesreće, dok se neki zadržavaju na nivou nezgoda. Upravo se zbog potencijalno ozbiljnih posledica nesreća bezbednost oduvek smatrala pitanjem od najvećeg značaja u vazдушnom saobraćaju [1].

Bezbednost operacija na poletno-sletnoj stazi (PPS)

Adresa autora: Doroteja Timotić, Univerzitet u Beogradu, Saobraćajni fakultet, Beograd, Vojvode Stepe 305

e-mail: d.timotic@sf.bg.ac.rs

Rad primljen: 09.10.2018.

Rad prihvaćen: 13.12.2018.

(PSS) postaje značajno polje interesovanja sistema vazdušnog saobraćaja usled sve učestalijih nesreća u okolini aerodroma. Ovo uključuje izletanje vazduhoplova sa PSS (runway excursion - RE), sudar vazduhoplova sa drugim vazduhoplovom, vozilima ili opremom (runway collision), nedozvoljeno prisustvo vazduhoplova, ljudi ili vozila na PSS (runway incursion), kao i sudar vazduhoplova i ptica (bird strike).

Na osnovu postojećih statistika, izletanje vazduhoplova sa PSS predstavlja jedan od najčešćih problema bezbednosti operacija na PSS.

Može se definisati kao događaj u kome avion ne uspeva da se zaustavi pre kraja PSS (overruns, slika 1) ili izleti levo ili desno sa nje (veer-offs, slika 2) tokom operacija poletanja ili sletanja. Posledice RE mogu biti višestruke i vrlo ozbiljne. Pre svega, RE može rezultirati povredom ili smrću putnika, oštećenjem/uništenjem vazduhoplova, povredom/smrću trećih lica (third party fatality), oštećenjem drugog vazduhoplova ili vozila, kao i oštećenjem kolovozne površine PSS.

Na osnovu statistika Međunarodne asocijacije za vazdušni saobraćaj u periodu između 2010. i 2015.

godine [2], od 159 nesreća koje su se dogodile u okolini aerodroma, RE spada u najučestaliju kategoriju nesreća na PSS sa ukupno 87 nesreća (55%). Izletanje vazduhoplova levo ili desno sa PSS se dogodilo u 53% nesreća, dok preostalih 47% nesreća čini izletanje vazduhoplova sa kraja PSS usled nemogućnosti zaustavljanja. RE tokom operacije sletanja se dogodio u 91% nesreća (5% fatalno) i 9% tokom operacija poletanja, posmatrano u odnosu na ukupan broj RE nesreća koje su se dogodile u periodu istraživanja.

Komercijalni mlazni vazduhoplovi su učestvovali u 47 RE nesreća, dok su turboprop vazduhoplovi imali udela u 40 nesreća posmatrano u odnosu na ukupan broj RE nesreća [2].



Slika 1 - Iberia Airbus 340-600 „overrun“ na aerodromu Kito, Ekvador 2007. godine



Slika 2 - Asiana Airlines Airbus 320 „veer off“ na aerodromu Hirošima, Japan 2015. godine

Prema Evropskoj agenciji za bezbednost vazdušnog saobraćaja [3] u periodu između 2007. i 2016. godine, RE događaj je imao 13% udela u nesrećama sa fatalnim ishodom i 30% udela u nesrećama bez fatalnog ishoda. RE je rezultirao sa 503 direktna smrtna slučaja i 35 smrtnih slučajeva trećih lica u okolini aerodroma tokom posmatranog perioda [4]. Prema statistikama Airbus-a [5] RE nesreće se nalaze na trećem mestu po pitanju uzročnika fatalnih nesreća i na prvom mestu među nesrećama koje su prouzrokovale oštećenje trupa vazduhoplova.

Iz svega iznetog zaključuje se da je veoma važno identifikovati i analizirati uzroke koji mogu dovesti do RE događaja kako bi se utvrdile moguće posledice i mere za smanjivanje njihovog uticaja na sistem.

Predmet ovog rada jesu faktori koji uzrokuju RE nesreće, analiza verovatnoće realizacije svakog od njih, kao i uticaj realizacije RE na faktore koji ga uzrokuju kako bi se utvrdila uska grla u sistemu radi određivanja mogućih preventivnih mera za mitigaciju dešavanja nesreća. Cilj rada je identifikacija potencijalnih uzročnih faktora, analiza i određivanje verovatnoća njihove realizacije primenom uzročnih metoda. Kao jedan od specifičnih uzročnih metoda, u ovom radu je izabran „Bayesian Belief Network“ (BBN) metod za potrebu analize međusobne zavisnosti uzročnih faktora. Budući da je pre analize zavisnosti uzročnih faktora RE nesreća, potrebno iste identifikovati, u ovom radu je korišćen jednostavan metod identifikacije faktora pod nazivom „Ishikawa dijagram“. Radi ostvarivanja cilja rada, formirani su zasebni kvalitativni i kvantitativni modeli za operacije poletanja i sletanja primenom BBN metode.

2. BAYESIAN BELIEF NETWORK

Bayesian Belief Network (BBN) metoda, kao jedna od uzročnih metoda, zasnovana na probabilističkoj teoriji, našla je primenu u vazdušnom saobraćaju u oblasti razumevanja uticaja različitih uzroka na rizik od nesreća u vazdušnom saobraćaju.

Metoda je nastala sredinom 1980-ih godina, dok je primena u vazdušnom saobraćaju započeta početkom 2000-ih godina. Ona omogućava prikaz svih mogućih uzroka nesreće kroz dijagramsku strukturu kao kvalitativni model, ili kao kvantitativni model kroz procenu verovatnoće pojavljivanja svakog mogućeg uzroka i procenu rizika od dešavanja nesreće.

BBN metoda je primenjena kao alat za podršku odlučivanju prilikom procene efekata specifičnih promena unutar sistema vazdušnog saobraćaja na ukupan rizik od specifičnog događaja. Takođe, ova metoda se primenjuje i za razvijanje proaktivne politike uvidom u efekte rizika mogućih promena sistema [1]. Znanje koje koristi BBN prikazano je uzročnim vezama između promenljivih i njihovim pridruženim verovatnoćama. Pomenute verovatnoće se mogu dobiti na osnovu klasične teorije verovatnoće, Bajesove verovatnoće ili kombinacijom oba pristupa. Klasična teorija verovatnoće se oslanja na ponovljena ispitivanja kako bi se odredile fizičke verovatnoće dešavanja određenog događaja. To zahteva obradu velikog broja podataka koji vrlo često nisu dostupni. Nasuprot tome, Bajesova verovatnoća koristi stepen uverenja (belief) eksperata o pojavi određenog neželjenog događaja. Ovakvim pristupom prednost se daje uverenju da će doći do određenog događaja pre nego stvarnoj verovatnoći pojave tog događaja.

BBN metoda se najviše ističe prilikom analiza koje zahtevaju odgovarajući statistički zaključak (inference).

Najpre se polazi od činjenice da korisnici metode poznaju neki dokaz (evidence) na osnovu opservacije određenog događaja te žele da u proračun dodaju i svoj sud/uverenje o učestalosti pojavljivanja drugih događaja koji prethodno nisu bili analizirani. Na osnovu svoje strukture, BBN metoda koristi Bajesovu teoremu za efikasan proračun verovatnoća odgovarajućih uzroka određenog događaja, te može koristiti pristup zaključivanja unapred (forward inference) i zaključivanja unazad (backward inference) [6].

Ono što čini ovu metodu jako korisnom jeste mogućnost kombinacije subjektivnih (mišljenje eksperata) i kvantitativnih (podaci dobijeni na osnovu odgovarajućih merenja ili modeliranja) informacija. Fleksibilna priroda BBN metode omogućava lako dodavanje novih informacija i podataka već postojećim, radi detaljnije analize.

Na osnovu toga, BBN metoda omogućava jednostavnu evaluaciju suda eksperata po pitanju domena za koju se vrši analiza kako bi se utvrdila validnost dobijenih rezultata. Takođe, ono što ističe ovu metodu jeste i mogućnost predikcije najočiglednijih posledica nekog budućeg događaja ili scenarija. Ona omogućava bolje razumevanje onoga što bi moglo da se desi u budućnosti [6].

BBN metoda dozvoljava „what-if“ analizu radi testiranja osetljivosti rezultata i predstavlja korisno vizuelno sredstvo za prikaz podataka i objašnjenja u vezi sa događajem koji se analizira. Zahvaljujući ovome, BBN je našla primenu u širokom spektru različitih domena nauke.

3. BBN STRUKTURA

Po definiciji BBN predstavlja direktni aciklični graf koji omogućava proračun zaključka (inference) na osnovu datih verovatnoća. Ako je x_i neka od vrednosti slučajne promenljive X_i i pa_i skup vrednosti „roditelja“ promenljive X_i , onda je $P(x_i/pa_i)$ uslovna raspodela verovatnoća pomenutih promenljivih.

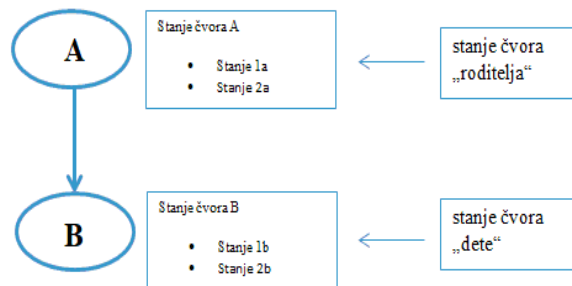
Proračun BBN metodom zasnovan je na zajedničkoj raspodeli promenljivih [7, 8]:

$$P(x_1, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n P(x_i/pa_i)$$

BBN predstavlja graf u kome je svaka promenljiva predstavljena čvorom, a uzročne veze između njih usmerenom strelicom. Struktura BBN metode je sledeća:

a) Čvor predstavlja slučajnu promenljivu i najčešće je grafički predstavljen elipsom. Svaki čvor može imati jedno ili više stanja (vrednosti) u kome se promenljiva može naći tokom modeliranja problema. Na slici 3 je dat primer takvog jednog čvora sa mogućim stanjima.

b) Veze između čvorova - strelice između čvorova predstavljaju uzročnu vezu između dva čvora, pri čemu smer strelice ukazuje na smer uticaja jednog čvora na drugi. Intuitivno, značenje strelice koja polazi od čvora A ka čvoru B ukazuje na to da čvor A ima direktni uticaj na čvor B. Na slici 3 dat je prikaz uzročne veze između čvora A i čvora B. Takođe, kao što je već pomenuto, strelice ukazuju i na to da je čvor A „roditelj“ čvoru B, koji je čvor „dete“ u datom primeru. Čvor „dete“ je zavisen od svog čvora prethodnika, čvora „roditelja“.



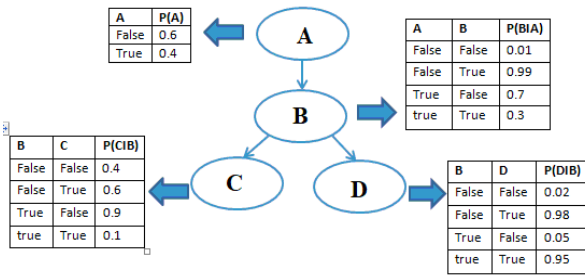
Slika 3 - Primer čvorova sa datim stanjima u BBN modelu [9]

c) Tabele uslovnih verovatnoća - Svakom čvoru unutar mreže pridružuje se tabela uslovnih verovatnoća (Conditional Probability Table - CPT) koja prikazuje stvarni uticaj čvorova „roditelja“ na čvorove „deca“. Za slučaj korenih čvorova (čvorova bez roditelja), vrednosti unutar CPT se dobijaju na osnovu znanja (opservacija) ili uverenja, dok se za ostale čvorove u mreži, vrednosti unutar CPT dobijaju na osnovu znanja ili uverenja pod uticajem njihovih čvorova prethodnika [10].

Matematički, CPT se može objasniti kao: verovatnoća promenljive X_i u stanju x_i dobijena na osnovu roditelja P_1 sa vrednošću p_1 , roditelja P_2 sa vrednošću p_2, \dots , i roditelja P_n sa vrednošću p_n [11]. Na primer, promenljiva A sa „roditeljima“ B_1 i B_2 imaće pridruženu tabelu verovatnoća $P(A|B_1, B_2)$ [12].

Na slici 4 dat je jednostavni primer BBN modela sa četiri čvora i njima pridruženim tabelama verovatnoća. Čvor A utiče na vrednost čvora B, tako da je raspodela verovatnoće čvora B uslovna verovatnoća čvora A, odnosno to je verovatnoća promenljive B pod uslovom da se promenljiva A realizovala. Verovatnoće promenljive B date su u tabeli verovatnoće pridružene čvoru B. Promenljiva B utiče na verovatnoće promenljivih C i D, tako da njihove verovatnoće zavise od verovatnoće promenljive B.

Tabele verovatnoća pridružene čvorovima B, C i D prikazuje znanje ili uverenje o određenim vrednostima verovatnoća. Na primer, uverenje se odnosi na neki događaj ili iskustvo, te iznosi npr. $P(D|B)=0.98$ u slučaju da je B „false“ i D „true“ [10, 13].



Slika 4 - BBN sa četiri čvora A, B, C, D uz pridružene tabele uslovnih verovatnoća (CPT)

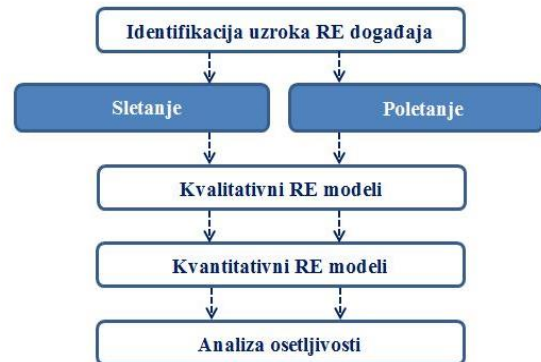
4. MODELIRANJE IZLETANJA SA POLETNO-SLETNE STAZE

Sa ciljem prikazivanja mogućih uzroka RE događaja i identifikacije uskih grla unutar sistema u ovom radu su prikazana dva zasebna modela: jedan za operacije poletanja i jedan za operacije sletanja. Kako bi se bolje razumela povezanost između faktora koji mogu dovesti do RE događaja, kao i njihova međusobna uzročna veza, modeli su formirani korišćenjem BBN metode. Podaci koji su korišćeni prilikom formiranja modela zasnovani su na postojećim studijama [3, 4, 5, 14, 15, 16, 17] i ekspertskom sudu (sudu autora).

Modeliranje mogućih uzroka RE događaja sastoji se iz nekoliko faza (slika 5). U prvoj fazi izvršena je identifikacija uzroka RE događaja (za slučaj poletanja i sletanja, posebno) primenom Ishikawa dijagrama, kao jednog od vrlo korisnih alata za identifikaciju primarnih i sekundarnih uzroka događaja. Identifikacija uzroka je prikazana posebno za operacije poletanja i sletanja uz objašnjenje uzroka koji mogu dovesti do događaja.

U sledećoj fazi je primenom BBN metode utvrđena uzročna veza između faktora. U tu svrhu je formiran kvalitativni model za operacije poletanja i sletanja. Nakon toga, izvršena je kvantifikacija modela

kako bi se dobile verovatnoće uticaja pojedinih faktora na realizaciju RE događaja. Na kraju je potrebno uraditi analizu osetljivosti kako bi se utvrdilo koji od mogućih faktora najviše doprinose realizaciji RE događaja i njihov uticaj na ostale faktore unutar mreže [9].

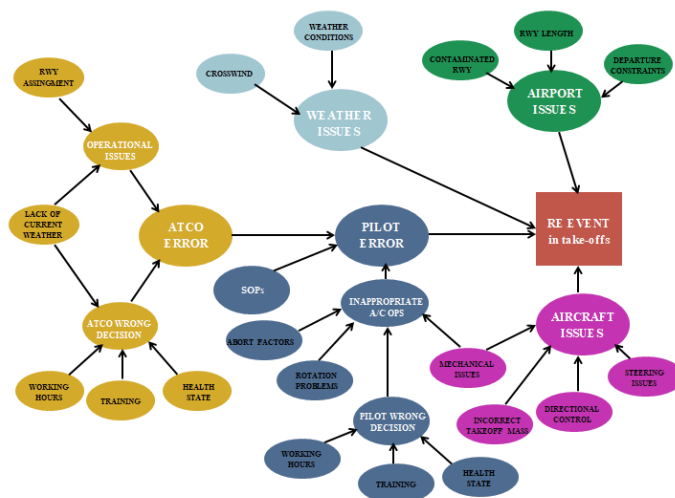


Slika 5 - Faze modeliranja [9]

Razvoj kvalitativnog modela sastoji se od definisanja strukture ili topologije mreže kroz formiranje usmerenog acikličnog grafa. Definisanje kvantitativnog modela je nešto komplikovanije i odnosi se na formiranje tabela verovatnoća, pridruženih svakom čvoru u mreži kroz kvantifikaciju prethodno pomenutih uzroka RE. Ovaj deo konstrukcije BBN mreže je značajno zahtevniji iz razloga što se BBN mreža može sastojati iz velikog broja čvorova (mreža raste eksponencijalno u odnosu na broj čvorova [13]), te bi kvantifikacija istih bila značajno komplikovanija i vremenski zahtevna. Iz tog razloga, poželjno je uzeti u razmatranje samo najvažnije uticajne faktore za analizirani događaj [10].

4.1 Kvalitativni model

Za slučaj poletanja, identifikovano je 30 uticajnih faktora (slika 6) a za slučaj sletanja 32.



Slika 6 - Kvalitativni BBN model za poletanje (take-off) [9]

U oba slučaja faktori su podeljeni u pet kategorija primarnih faktora [9]:

- Greške pilota (Pilot Error),
- Greške kontrolora letenja (ATCO Error),
- Problemi sa vremenom (Weather Issues),
- Aerodromski problemi (Airport Issues),
- Avionski problemi (Aircraft Issues).

4.2 Kvantitativni model

Svatom čvoru u mreži pridružuje se CPT tabela. Vrednosti unutar CPT dobijene su na osnovu uzročne veze između čvorova. Verovatnoće date u CPT se odnose na uticaj čvorova „roditelja“ na čvorove „deteta“. Za slučaj čvorova koji nemaju prethodnike (koreni čvorovi), ona predstavlja znanje ili osnovni sud/uvverenje o datom uzroku. Veza između čvorova predstavlja funkciju kojom se dobija verovatnoća svakog stanja čvorova „deteta“ za svaku moguću kombinaciju vrednosti stanja čvorova „roditelja“.

Drugi bitan aspekt formiranja kvantitativnog BBN modela jeste kompleksnost CPT tabela (odnosno, broj redova i kolona tabele, slika 7). Naime, broj redova je proizvod broja stanja svih čvorova „roditelja“, a broj kolona je broj stanja svakog čvorova „deta“ (čvor kome je pridružena data tabela verovatnoća). Takođe, suma svakog reda treba da bude 1.

Kako dimenzija CPT, vrlo često, ima tendenciju rasta, nekada je komplikovano manuelnim putem doći do traženih verovatnoća. Iz tog razloga u ovom radu je za proračun apriornih i aposteriornih verovatnoća datih

uzročnih faktora korišćen softver NETICA 6.04 (<http://www.norsys.com/>).

Node: RE_EVENT					Apply	OK	
Chance					% Probability	Reset	Close
WEATHER_ISSUES	AIRPORT_ISSUES	AIRCRAFT_ERROR	PILOT_ERROR	TRUE	FALSE		
TRUE	TRUE	TRUE	TRUE	100	0		
TRUE	TRUE	TRUE	FALSE	75	25		
TRUE	TRUE	FALSE	TRUE	75	25		
TRUE	TRUE	FALSE	FALSE	50	50		
TRUE	FALSE	TRUE	TRUE	85	15		
TRUE	FALSE	TRUE	FALSE	50	50		
TRUE	FALSE	FALSE	TRUE	60	40		
TRUE	FALSE	FALSE	FALSE	15	85		
FALSE	TRUE	TRUE	TRUE	75	25		
FALSE	TRUE	TRUE	FALSE	50	50		
FALSE	TRUE	FALSE	TRUE	60	40		
FALSE	TRUE	FALSE	FALSE	25	75		
FALSE	FALSE	TRUE	TRUE	75	25		
FALSE	FALSE	TRUE	FALSE	50	50		
FALSE	FALSE	FALSE	TRUE	25	75		
FALSE	FALSE	FALSE	FALSE	0	100		

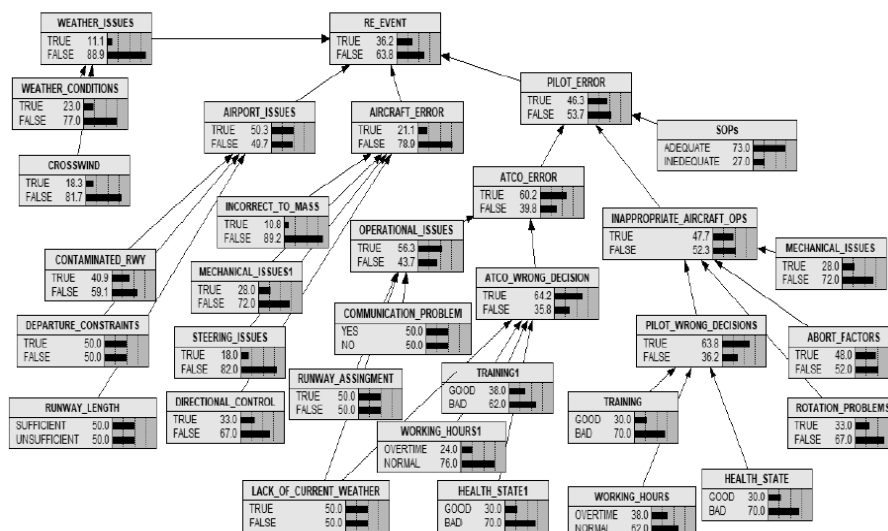
Slika 7 - Deo CPT za "RE Event" - operacija poletanja

Kvantitativni model za slučaj poletanja je prikazan na slici 8 (sličan model je i za slučaj sletanja).

5. ANALIZA OSETLJIVOSTI

Analizom osetljivosti pokazuje se kako potencijalna realizacija RE događaja utiče na promenu verovatnoća njegovih primarnih uzročnih faktora, a zatim i na ostale faktore u mreži koji indirektno mogu uzrokovati RE.

Kako je poznata verovatnoća realizacije RE za operacije poletanja i sletanja, u tu svhu je potrebno izvršiti analizu u suprotnom smeru, odnosno, potrebno je odrediti aposteriorne verovatnoće za svaki od faktora.



Slika 8 - Kvantitativni BBN model - operacija poletanja [9]

Sledeća pitanja su predmet ove analize [9]:

1. Koja grupa faktora najviše utiču na verovatnoću realizacije RE događaja u operacijama poletanja i sletanja?

2. Koji od sekundarnih i korenih faktora najviše utiče na realizacije RE događaja?

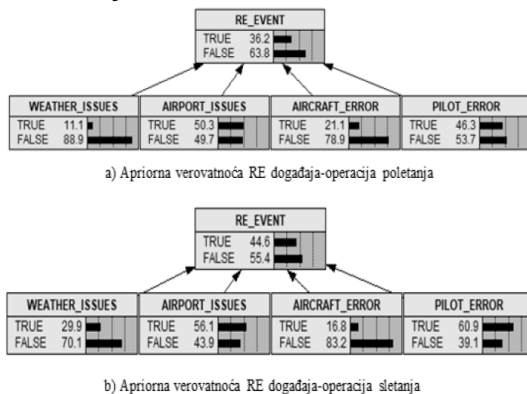
Na osnovu odgovora na prethodna pitanja, treba definisati koja su to uska grla u sistemu i na koje faktore se može uticati s ciljem smanjenja rizika od RE događaja.

Najpre je izvršeno poređenje apriornih verovatnoća realizacije RE za operacije poletanja i sletanja.

Sa slike 9 može se videti da je apriorna verovatnoća realizacije RE tokom poletanja 0,362, dok za operaciju sletanja iznosi 0,446. Takođe, verovatnoće realizacije uzročnih faktora su različite.

Apriorna verovatnoća za „Pilot Error“ tokom operacije poletanja iznosi 0,463, dok je tokom sletanja ona 0,609. Što se tiče „Aircraft Error“, apriorna verovatnoća realizacije ovog uticajnog faktora je veća tokom operacije poletanja i iznosi 0,211. Verovatnoća realizacije „Airport Issues“ je veća tokom operacije sletanja i iznosi 0,561. Takođe, verovatnoća uzročnog faktora „Weather Issues“ je veća tokom operacije sletanja i iznosi 0,299. Time je i dokazano da je operacija sletanja nešto zahtevnija i opasnija od operacije poletanja.

Međutim, sada je potrebno odrediti verovatnoće uzročnih faktora pod uslovom da se RE realizovao, odnosno odrediti aposteriorne verovatnoće za svaki od faktora uzročnika. Na slici 10 dat je prikaz „worst case“ scenarija.



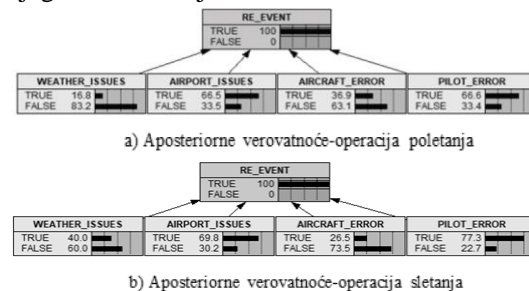
Slika 9 - Apriorne verovatnoće realizacije RE događaja [9]

Pretpostavimo da se RE događaj realizovao sa verovatnoćom 1. Primenom NETICA software-a za operaciju poletanja (slika 10a), uočeno je da faktor koji najviše utiče na RE jeste „Pilot Error“, sa verovatnoćom od 0,666. Međutim, „Airport Issues“ doprinosi realizaciji RE sa verovatnoćom od 0,665. Može se uočiti vrlo mala razlika između aposteriornih verovatnoća ova dva faktora.

Druga dva faktora utiču na RE sa nešto manjom verovatnoćom („Aircraft Error“ - 0,369, „Weather Issues“ - 0,168). To znači, da je pri analiziranju uskih grla u sistemu potrebno izvršiti analizu faktora koji se odnose na pilotsku grešku i probleme na strani aerodroma.

Za operaciju sletanja, na slici 10b, se može uočiti da je faktor koji najviše doprinosi realizaciji RE događaja faktor „Pilot Error“ sa verovatnoćom od 0,773. Pored njega, aposteriorna verovatnoća faktora „Airport Issues“ iznosi 0,698, zatim „Aircraft Error“ 0,265 i „Weather Issues“ 0,40.

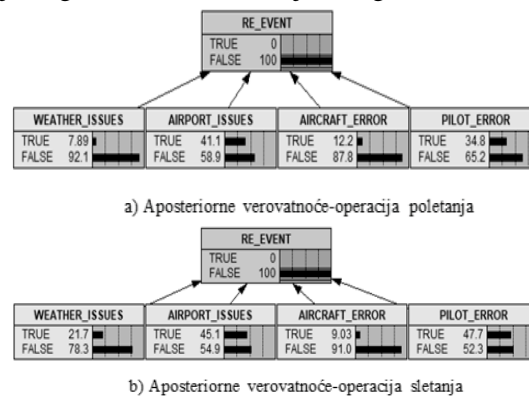
Kako bi se odredila uska grla u sistemu za operaciju sletanja potrebno je uraditi dublju analizu faktora „Pilot Error“ i otkriti koji to faktori najviše utiču na njegovu realizaciju.



Slika 10 - Uticaj realizacije „RE Event“ na njegove uzročne faktore - „worst case“ scenario

Na slici 11 dat je prikaz „best case“ scenarija, odnosno situacije kada ne bi došlo do realizacije RE. U ovoj situaciji, verovatnoća da će doći do greške pilota iznosi 0,348 za operaciju poletanja i 0,477 za operaciju sletanja. Verovatnoća da će se realizovati faktor „Aircraft Error“ iznosi 0,122 za operaciju poletanja i 0,0903 za operaciju sletanja. Faktor „Airport Issues“ će se realizovati sa verovatnoćom od 0,411 za operaciju poletanja i 0,451 za operaciju sletanja, dok je realizacija faktora „Weather Issues“ sa verovatnoćom 0,0789 za operacije poletanja i 0,217 za operacije sletanja.

U situaciji kada se nije realizovao RE, može se zaključiti da tokom operacije sletanja postoji veća verovatnoća da će doći do realizacije uzročnih faktora koji mogu voditi ka realizaciji nekog incidenta.



Slika 11 - Uticaj realizacije „RE Event“ na njegove uzročne faktore „best case“ scenario

Na osnovu prethodnog, može se zaključiti da faktor koji je najosteljiviji u sistemu, kako za operacije poletanja tako i za operacije sletanja jeste faktor „Pilot Error“. Pored njega, veliki uticaj na RE imaju i faktori „ATCo Error“ i „Airport Issues“, te se i oni mogu svrstati u grupu osetljivih faktora unutar sistema [9]. Ovime su dati odgovori na pitanja sa početka analize osetljivosti, tj. ukazano je na koje faktore se može uticati sa ciljem smanjenja rizika od RE.

6. ZAKLJUČAK

Razumevanje faktora koji uzrokuju izletanje vazduhoplova sa PSS, kao i mehanizama njihovog razvoja je od presudnog značaja pri razvijanju mera redukcije rizika i ublažavanja posledica nesreća. Iz tog razloga u ovom radu je prikazana primena BBN metode za slučaj RE nesreća.

U radu su prikazana dva modela: jedan za operacije poletanja, i drugi za operacije sletanja. U svakom modelu je identifikovano pet kategorija uzročnih faktora RE događaja. Identifikacija faktora je izvršena primenom Ishikawa dijagrama. Na osnovu identifikovanih faktora razvijena su dva kvalitativna i dva kvantitativna modela. Poređenjem rezultata kvantifikacije zaključeno je da je rizik od RE nesreća veći tokom operacije sletanja u odnosu na operaciju poletanja.

Za slučaj operacije poletanja pokazano je da faktor „Pilot Error” najviše doprinosi realizaciji RE nesreće. Greška kontrolora letenja je otkrivena kao najveći uzročnik greške pilota. Detaljnijom analizom uočeno je da na grešku kontrolora najčešće utiče njegova pogrešna odluka, a da nedostatak podataka o vremenu na PSS najviše utiče na rezonovanje i donošenje prave odluke kontrolora letenja. Drugi faktor koji doprinosi RE nesreći tokom operacije poletanja jeste „Airport Issues”. Detaljnijom analizom uočeno je da na ove probleme najviše utiču ograničenja pri poletanju, koja se odnose na ograničenja po pitanju buke ili trajektorija u poletanju. U slučaju operacije sletanja, faktor „Pilot Error” se izdvojio kao faktor koji najviše doprinosi realizaciji RE. Na realizaciju ovog faktora najviše utiču neprikladne operacije vazduhoplovom, koje su najviše prouzrokovane nestabilnim prilazom.

Rezultati analize omogućavaju sagledavanje uskih grla u sistemu sa fokusom na delove sistema na koje se može uticati u prevenciji nesreća i smanjenje rizika. Osnovni cilj u smanjenju rizika od RE nesreća trebalo bi da se odnosi na unapređenje proaktivne politike kroz povećanje svesti o ozbiljnosti ovog problema.

7. ZAHVALNICA

Istraživanje je finansirano sredstvima projekta TR 36033 Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

LITERATURA

[1] Netjasov F, Janic M, A review of research on risk and safety modelling in civil aviation, *Journal of Air Traffic Management*, Vol. 14, pp. 213– 220, 2008.

- [2] IATA, *Runway Safety Accident Analysis Report*, Montreal-Geneva, 2015.
- [3] European Aviation Safety Agency, *Annual Safety Review 2017*. Cologne, Germany, 2017.
- [4] Boeing, *Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations, 1959 – 2016*. Seattle, USA, 2017.
- [5] Airbus, *A Statistical Analysis of Commercial Aviation Accidents 1958-2016*. Blagnac, France, 2017 .
- [6] Wooldridge S, *Bayesian Belief Networks*. Australian Institute of Marine Science, 2003.
- [7] Russell S, Norvig P, *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, (3rd ed.). Prentice Hall, 2010.
- [8] Barber D, *Bayesian Reasoning and Machine Learning*. Cambridge University Press, 2012.
- [9] Timotic D, *Modeliranje uzroka izletanja sa poletno-sletnih staza primenom Bajesovih mreža*. Saobraćajni fakultet, Beograd, 2018.
- [10] Greenberg R, Cook S. C, Harris D, A civil aviation safety assessment model using a Bayesian belief network (BBN), *The Aeronautical Journal*, 109 (1102), 557-568, 2005.
- [11] Charles River Analytics, *About Bayesian Belief Networks* (www.cra.com), 2004.
- [12] Krieg L. M, *A Tutorial on Bayesian Belief Networks*. DSTO Electronic and Surveillance Research Laboratory, No 012-084, 2001.
- [13] Wong W. K, *Bayesian Networks, A Tutorial*, Oregon State University, USA, 2005.
- [14] Australian Transport Safety Board, *Final Runway excursions Part 1: A worldwide review of commercial jet aircraft runway excursions*, Canberra, Australia, 2008.
- [15] NLR, *A Study of Runway Excursions from a European Perspective*, NLR-CR-2010-259, NLR Amsterdam, The Netherlands, 2010 .
- [16] Safety Management Specialties, *Report on the Design and Analysis of a Runway Excursions Database*. Hillsboro, USA, 2009.
- [17] Jensen R, *Pilot Judgement: Training and Evaluation*. Department of Aviation. The Ohio State University, Columbus, Ohio. 24(1), 61-73, 2016.

SUMMARY

MODELLING OF RUNWAY EXCURSIONS USING BAYESIAN BELIEF NETWORKS

Runway excursion (RE) is recognized as one of the main Airport Safety Issues. It can be defined as an event in which an aircraft veers-off or overruns the runway surface during either takeoff or landing. In this paper an application of Bayesian Belief Network (BBN) method on RE events is presented. BBN belongs to quantitative class of causal methods. It estimates the risk of incident or accident according to estimation of probability of occurrence of each cause of an event. It might be restricted to pure statistical analysis based on the available data or combine these data with expert judgment (personal beliefs) on the accident causes. The aim of this paper is to identify potential causal factors, analyze and determine the probability of their realization. In order to illustrate BBN application on RE, two models were developed: one for landing and other for take-off. Based on the Ishikawa diagram method, causal factors have been identified, and then through a qualitative BBN model, their interdependencies are presented. The quantification of the model is accomplished by combining statistical data with the expert beliefs. Sensitivity analysis has shown what are the most critical causal factors whose knowledge allows developing certain measures to reduce the risk of RE.

Key words: Airport, Safety, Runway Excursion, Causal Modelling, Bayesian Belief Network