

UPORABA BAYESOVIH MREŽ ZA MODELIRANJE TVEGANJ IN DOLOČITEV VARNOSTNIH KAZALNIKOV ZA PREPREČEVANJE NESREČ V INDUSTRIJI – REZULTATI PRAKTIČNEGA PRIMERA

Using Bayesian networks to model risks and define safety indicators for preventing industrial accidents: case study results

Marko Gerbec*, Branko Kontić** UDK 519.226:621.642

Povzetek
Prikazujemo uporabnost ocene tveganja za določanje varnostnih kazalnikov na ravni upravljanja. Obravnavamo primer izliva metanola pri pretovoru z ladje tankerja na terminal za tekoče tovore v Luki Koper, d. d. Na podlagi modela posledic smo izdelali model verjetnosti (Bayesova mreža) za posamezne odpovedi in njihove izide. Rezultate smo prikazali z vidika mogočega iskanja in izbora kvantitativnih varnostnih kazalnikov, ki bi se lahko operativno uporabili pri upravljanju tveganj. Vključena je analiza občutljivosti (glede na vrednosti nekaterih kazalnikov) ter povezane negotovosti. Ugotovili smo, da je pristop primeren za uporabo v industriji, pomembno pa je, da se pogojne verjetnosti med vozlišči modela določijo na pregleden in zaupanja vreden način.

Abstract
The paper presents the use of risk assessment for selecting key performance indicators (KPIs) in the risk management context. The work is based on a case study of methanol unloading operation from a tanker-ship to the liquid cargo terminal at Luka Koper, d.d. By expanding on the potential major accident scenario, the consequence model was used to build the probability model (Bayesian Belief Network). The latter was related to the candidate quantitative key performance indicators that have a potential to be used in the risk management process. A sensitivity analysis (related to the values of some indicators), and related uncertainties are included. The approach has been found suitable for use in the industry. However, the conditional probabilities of the model nodes need to be set in a transparent and trustworthy manner.

Uvod

Varnostni kazalniki [angl. *Key Performance Indicators* – KPIs ali tudi *Safety Performance Indicators* – SPIs] se uporabljajo pri upravljanju tveganj. Povezani so s kvantitativnimi podatki o učinkovitosti varnostnih ukrepov oziroma povezanimi tveganji ter vodstvu omogočajo sprotno, proaktivno spremljanje stanja varnosti/ravni tveganja in opozarjajo na spre-

membe, še preden pride do nesreče. V tej pričakovani povezavi so praktične težave pri širši uveljavitvi uporabe varnostnih kazalnikov; vprašanje je, kako izbrati praktične in pomenske kazalnike, ki so povezani z dejansko varnostjo (tveganji), če upoštevamo, da so začetni vzroki za nesreče odpovedi, napake in pomanjkljivosti v tehnologiji (npr. oprema) in organizaciji (npr. človeške napake). Povezave med sestavinami sistema človek-tehnologija-organizacija so navadno zapletene, zato moramo s pomočjo ocene tveganja izdelati model tveganja, ki obravnava resnične povezave v danem industrijskem ali drugem procesu. Na podlagi modela tveganja, torej ob kvantitativni obravnavi pričakovanih posledic nesreč(e) in verjetnosti, da do njih pride, naj bi izbrali in vpeljali spremljanje ustreznih varnostnih kazalnikov.

* dr., Institut Jožef Stefan, Jamova 39, Ljubljana, marko.gerbec@ijs.si

** dr., Institut Jožef Stefan, Jamova 39, Ljubljana, branko.kontic@ijs.si

V okviru EU-projekta iNTeg-Risk (<http://www.integrisk.eu-vri.eu/>) je bil predlagan in dokumentiran določen pristop k izboru varnostnih kazalnikov. Ta pristop je eden izmed sedemnajstih primerov upravljanja novih ali novoprepoznanih tveganj (angl. *Emerging Risks Reference Applications* – ERRAs). Obravnavani pristop se imenuje ERRA D1 – Definition of KPIs for emerging risks for selected industry case studies, including Corporate Social Responsibility (CSR) aspects of emerging risks oziroma Definicija varnostnih kazalnikov za nova ali novoprepoznana tveganja za izbrane primere iz industrije, vključujoč vidik družbene odgovornosti podjetja (iNTeg-Risk, 2011).

Omenjeni koncept predlaga uporabo Bayesovih mrež namesto uveljavljenih metod, kot sta drevesa odpovedi in drevesa dogodkov. Bayesove mreže izhajajo iz Bayesovega teorema¹ o pogojni verjetnosti med povezanimi dogodki, omogočajo poljubne (vendar ne ciklične) vejitve med začetnimi, vmesnimi in končnimi dogodki oziroma stanji. Omogočajo modeliranje verjetnosti dogodkov na podlagi opredeljenih verjetnosti med posameznimi sosednjimi dogodki oziroma vozlišči v modelu (to omogoča gradnjo in računanje zelo kompleksnih modelov).

Omeniti je treba, da Bayesove mreže v primerjavi z drevesi odpovedi omogočajo modeliranje le verjetnosti dogodkov, ne pa tudi frekvenc; kar ni merodajna omejitev za praktično uporabo.

Avtorja prispevka sta v okviru omenjenega projekta sodelovala pri ocenjevanju predlaganega pristopa za izbor in uporabo varnostnih kazalnikov predvsem v procesni industriji, kjer obstaja nevarnost za večje nesreče z nevarnimi snovmi. Pristop je bil preizkušen v podjetju Luka Koper, d. d. V dogovoru z vodstvom podjetja je bil uporabljen na terminalu za tekoče tovore, točneje pri operaciji raztovarjanja metanola s tankerja.

Ocena tveganja za raztovarjanje metanola

Izhodišča

Luka Koper, d. d., se ukvarja s pretovorom večjih količin nevarnih snovi, zato ima med drugim obveznost izvajanja pravnega reda s področja preprečevanja večjih nesreč (Uredba, 2008), evropska direktiva 96/82/ES in 2003/105/ES (bolj znana kot t. i. Direktiva Seveso II). To pomeni, da je Luka Koper zavezana pripravljati ustrezne ocene tveganja in je bilo Varnostno poročilo za dejavnosti Luke Koper, d. d., (Luka Koper, 2008) ustrezen vir informacij za testiranje obravnavanega pristopa ERRA D1. Omogočilo je vpogled v prepoznane nevarnosti za večje nesreče, nato izbor že omenjene

dejavnosti raztovarjanja metanola (njena reprezentativnost) ter osnovne informacije o nevarnostih, povezanih z omenjeno dejavnostjo.

V tej fazi smo upoštevali naslednje informacije:

- dejavnosti na terminalu za tekoče tovore zaposleni razumejo kot vir nevarnosti za večje nesreče z nevarnimi snovmi, med njimi je tudi metanol, ki je vnetljiva in strupena snov;
- izpust metanola se lahko pripeti zaradi odpovedi procesne opreme (cevovodi, spoji) ali zaradi zunanjih vplivov na stabilnost (integriteto) povezave tanker-terminal (trčenje ladje, premik tankerja);
- podrobnejše intervjuje z osebjem terminala z vpogledom v interne dokumente (podrobnosti Sistema obvladovanja varnosti, posebna delovna navodila, postopki in zapisi), ki so nam omogočili razumevanje dogodkov in stanj, ki bi lahko pripeljali do nesreče.

Scenarij nekontroliranega iztekanja metanola pri pretovoru upošteva tako notranje kot zunanje odpovedi/napake glede na sklop tanker-terminal za tekoče tovore. Operacija raztovarjanja metanola poteka približno desetkrat na leto, traja približno 16 ur, ter vsaka obsega prečrpavanje približno 10.000 ton metanola. Odpovedi znotraj sklopa tanker-terminal obsegajo izpuste metanola med prečrpavanjem iz tankerja v skupino rezervoarjev na obali, kar vključuje povezavo tanker-pomol, spoje na cevovodih (priobnice) in mehansko pretakalno roko med tankerjem in pomolom. Zunanje odpovedi obsegajo preobremenitve pretakalne roke, predvidoma zaradi nenačrtovanih premikov tankerja ali trčenja mimo vozeče ladje v tanker med pretakanjem.

V primeru poškodbe cevovoda ali pretakalne roke pričakujemo, da bo cev dimenzije DN300 v celoti presekana in da iztekanje traja vsaj eno minuto (ocenjeno kot minimalni čas, da prisotno osebje terminala in tankerja reagira in ustavi črpalke na tankerju). Metanol se lahko razlije po kopnem (pomol) ali v morje (spoj tanker-terminal), nastaneta razlita luža oziroma sloj metanola na morju ter vnetljiva zmes metanol-zrak. Zmes metanol-zrak se lahko vžge takoj (npr. zaradi različnih električnih potencialov oziroma statične elektrike) ali pozneje (vir vžiga je lahko električna oprema zunaj območja eksplozijsko ogroženega območja ali celo motorji tankerja). Vžig pričakovano vodi do pojava gorečega oblaka, goreče luže metanola, gorečega curka metanola, dokler teče metanol iz cevovoda in potencialne eksplozije oblaka zmesi metanol-zrak. Metanol je strupena snov, kar je pomembna informacija za prisotno osebje in člane intervencijskih ekip.

Ob izpustu metanola med prečrpavanjem s tankerja na območje terminala pričakujemo večji požar in/ali eksplozijo hlapov zmesi metanol-zrak, kar ima lahko za posledico poškodbe prisotnega osebja, procesne opreme in uničenje tovora.

¹ Glej npr. http://en.wikipedia.org/wiki/Bayes'_theorem.

Ocena tveganja iz Varnostnega poročila je bila za potrebe ERRa D1 dopolnjena, kot je povzeto v nadaljevanju.

Model posledic scenarija

Ocenjevanje posledic smo izvedli s programskim orodjem DNV PHAST, različica 6.53 (DNV, 2014). Pri modeliranju posledic obravnavanega scenarija smo upoštevali:

- med prečrpavanjem je tlak metanola na tlačni strani približno šest barov, premer cevovoda je 300 mm, njegova dolžina do značilne točke izpusta je ocenjena na približno 20 m, trajanje izpusta je 60 sekund;
- potencialni vir vžiga pričakujemo na razdalji približno 50 m od mesta izpusta;
- meteorološki podatki za potrebe modeliranja redčenja hlapov v okoliškem zraku so poletne razmere, hitrost vetra 2 m/s ter stabilnostna kategorija D.

Pomembnejši rezultati modeliranja so:

- povprečni pretok metanola med izpustom je približno 535 kg/s, kar pomeni skupaj približno 32 ton;
- razliti metanol na kopnem blizu pomola na območju terminala bi v obliki luže dosegel premer do približno 50 m; vžig hlapov je mogoč še do razdalje približno 60 m od točke izpusta;
- ob vžigu lahko pričakujemo poškodbe procesne opreme na razdalji do približno 100 m (zaradi toplotnega sevanja goreče luže), kar predvidoma obsega pomol terminala s pripadajočo procesno opremo, cevovod od pomola do rezervoarskega prostora, vključno z delom rezervoarskega prostora. Poškodbe osebja lahko pričakujemo do razdalje približno 200 m.

Model verjetnosti scenarija

Modeliranje smo izvedli skladno s predlaganim pristopom (iNTeg-Risk, 2011) in (Kjaerulff, 2008) ob uporabi programskega orodja Hugin Lite 7.5 (HUGIN EXPERT, 2012). V modelu smo obravnavali verjetnosti dogodkov v okviru posamezne operacije raztovarjanja tankerja na terminalu.

Model verjetnosti upošteva neposredne odpovedi in napake (navajamo angleške izraze, ki so uporabljeni na grafičnem prikazu – slika 1):

- *Pipeline*/cevovod – upoštevamo popolnoma presekanost cev dimenzije DN300, frekvenca odpovedi je $6,7 \times 10^{-8}$ na leto na meter (API, 2000, Tabela 8.1, ne upoštevamo okoljskih dejavnikov), kar za 50 m dolžine pomeni verjetnost $6,2 \times 10^{-9}$ med posamezno 16 ur trajajočo operacijo.
- *Joints*/spoji – odpoved na prirobnicah na šestih ventilih (12 prirobnic), frekvenca odpovedi je $5,7 \times 10^{-7}$ na leto na spoj (AIChE, 1989, stran 184), kar pomeni verjetnost $1,2 \times 10^{-8}$ med 16 ur trajajočo operacijo.

- *Arm*/roka – upoštevamo popolnoma presekanost pretakalne roke med posamezno operacijo, verjetnost je $3,8 \times 10^{-5}$ (HSE, 2012).
- *Hammer*/hidravlični udar – je pričakovan, če je hkrati prisoten zrak v dovodni cevi (neizvedeno ali slabo odzračevanje, dogodek zrak v cevi [angl. *AirInPipe*]) iz tankerja, ter če posadka tankerja napačno hkrati vklopi več centrifugalnih črpalk (ne sledijo točno postopku, da vklapljajo počasi posamezne črpalke, dogodek vklop več črpalk [angl. *MultiplePumpsOn*]). Ocenjujemo, da so takšne napake zelo redke, saj gre za kvalificirane ekipe ob sočasnem nadzoru nadrejenih. Ocenjena verjetnost za človeško napako v tej fazi dela pri normalnih delovnih pogojih je 0,003 (Williams, 1992; tabela 1, naloga tipa F).
- *Move*/premik – premik tankerja med operacijo raztovarjanja. Podrobna diskusija s predstavniki Luke Koper je vodila do ugotovitve, da takšen dogodek potrebuje vsaj eno uro časa, da tri različne ekipe (operaterji terminala, posadka tankerja in posadka vlačilca) tanker odvežejo s priveza. Ugotovljamo, da se takšen dogodek lahko pripeti, njegova verjetnost pa je ocenjena kot zelo nizka, zato smo dogodek v modelu kvalitativno evidencialni, kvantitativno pa je vrednost enaka nič.
- *Collision*/trčenje – druge ladje med vožnjo mimo terminala oziroma pomola med operacijo raztovarjanja. Ocena tveganja za takšen dogodek je že izdelana (Luka Koper, 2010), in sicer z oceno frekvence dogodka $1/26,5$ na leto za celotno območje akvatorija Luke Koper. Drugi luški bazen, kjer poteka obravnavana operacija, obsega približno 4 % omenjenega akvatorija, kar pomeni frekvenco $1,51 \times 10^{-3}$ na leto, med 16-urno operacijo to pomeni verjetnost $2,76 \times 10^{-6}$.
- *Failure*/odpoved – za dogodka premik ali trčenje ocenimo verjetnost, da dejansko pride do odpovedi pretakalne roke na 0,1 (v enem od desetih primerov je cev v celoti presekana).
- *Ignition*/vžig – iz modela posledic dogodka izhaja, da lahko vnetljiva zmes metanol-zrak v eni minuti doseže mejo rezervoarskega prostora (kjer so viri vžiga nadzorovani) in v celoti zajame prostor, kjer je tanker (odvisno od meteoroloških pogojev) z delujočimi motorji za operacijo raztovarjanja. Tako ocenimo verjetnost vžiga na 0,5 (50 %).

V modelu, slika 1, so dogodki cevovod, spoji, in hidravlični udar vhodi v dogodek Failure; premik, trčenje in odpoved so vhodi v dogodek škoda (angl. *Damage*), premik (angl. *Moved*) in naprej v roka-zunanja odpoved (angl. *Arm_External*), ki je z odpovedjo roke (angl. *Arm_fails*) kot dodatna vhoda za glavni dogodek izpust (angl. *Release*). Vsi navedeni vmesni dogodki imajo na vstopu Boolovo logiko OR (ali), dogodek hidravlični udar pa logiko AND (in). Dogodek Fire potrebuje na vhodu dogodka izpust (angl. *Release*) in vžig (angl. *Ignition*).

Vsi do zdaj navedeni dogodki so v modelu opredeljeni z dvema diskretnima stanjema, to sta Da ali Ne (angl.

True ali False), dogodek posledice (angl. *Consequences*) je odvisen od dogodkov izpust (angl. *Release*) in vžig (angl. *Ignition*) in ima štiri stanja: ni razlitja (angl. *No_Spill*), razlitje traja 1 minuto (angl. *Spill_1min*), razlitje traja 5 minut (angl. *Spill_5min*) in razlitje traja 5 minut, sledi požar (angl. *Spill_5min_and_Fire*).

Tako smo izračunali verjetnosti za vse obravnavane dogodke in njihova stanja, v nadaljevanju pa lahko izračunamo še posledice dogodkov na podjetje in okolje, kar ima lahko pomen za oceno posledic za družbeno okolje, v katerem deluje podjetje. V tem smislu v dveh podpornih vozliščih izračunamo povprečno prostornino metanola, razlitega na operacijo, v m³ (angl. *Volume*) ter monetarno vrednost izpostavljenih sredstev v evrih na operacijo (angl. *VAR – Value at Risk*), obe ob upoštevanju pričakovane pretoka in trajanja izpusta metanola ter fizičnega obsega škod na blagu in procesni opremi (na podlagi ocene posledic nesreče). Slednje variira za posamezna stanja posledic (vozlišče posledice/*Consequences*), ob upoštevanju verjetnosti posameznih stanj, ki se upoštevajo kot uteži.

Pri monetarnih vrednostih sredstev smo upoštevali le direktne škode – preglednica 1, kar pomeni, da nismo upoštevali indirektnih škod, kot so potencialni izpad proizvodnje in zaradi tega širša gospodarska škoda, popravila, padec ugleda, odškodnine, kazni in podobno. V tem

Stanje dogodka ^a	Neposredna škoda (€)
ni razlitja (angl. <i>NoSpill</i>)	0
razlitje traja 1 minuto (angl. <i>Spill 1'</i>)	40.125
razlitje traja 5 minut (angl. <i>Spill 5'</i>)	200.625
razlitje traja 5 minut, sledi požar (angl. <i>Spill 5' + Fire</i>)	910.625

Opomba: a – gre za stanja vozlišča posledice/*Consequences* (glej sliko 1 oziroma sliko 2)

Preglednica 1: Upoštrevane monetarne vrednosti direktnih škod
Table 1: Direct damage monetary values considered

smislu je ocena škod delna – nepopolna in bi jo bilo treba v ponovljeni oceni ob aktivnem sodelovanju Luke Koper, d. d., dopolniti. Dopolnitev bi morala prispevati predvsem k specifikaciji dveh komponent:

- vrednost VAR za dele opreme, kot jih vidi Luka Koper, d. d.,
- vrednost indirektnih škod v širšem kontekstu.

Rezultati

Bayesova mreža z rezultati je prikazana na sliki 1.

Zaradi nazornosti ločeno prikazujemo rezultate za podporni vozlišči (prostornina/*Volume* in izpostavljena monetarna vrednost/*VAR*) le za spodnji del slike 1 na ločeni sliki 2. Za dogodek posledice (angl. *Consequences*) so grafično prikazani tudi prispevki posameznih stanj glede na prostornino (angl. *Volume*) in izpostavljena monetarna vrednost (angl. *VAR*), povprečno lahko pričakujemo približno 5 litrov izpuščenega metanola in 22 evrov izpostavljene vrednosti na posamezno operacijo.

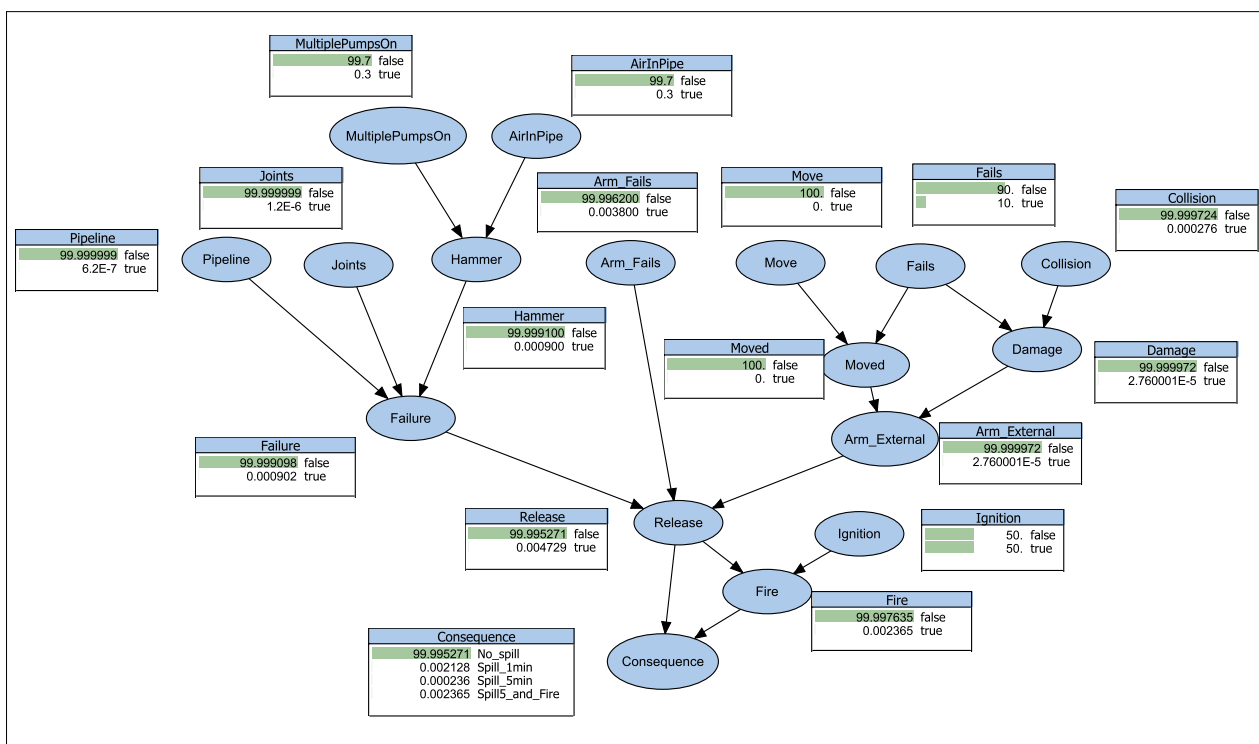
Rezultati kažejo, da je verjetnost za dogodek izpust (angl. *Release*) približno $4,73 \times 10^{-5}$ (0,00473 %), prispevki dogodkov odpoved (angl. *Failure*), odpoved roke (angl. *Arm_Fails*) in roka-zunanja odpoved (angl. *Arm_External*) so 9×10^{-6} , $3,8 \times 10^{-5}$ in $2,8 \times 10^{-7}$, torej odpoved roke (angl. *Arm_Fails*) prispeva približno 80 % verjetnosti, odpoved (angl. *Failure*) pa skoraj vse ostalo.

Prikazano pomeni, da je najpomembnejša zanesljivost pretakalne roke (temelj za določitev ustreznega/ustreznih KPI), zatem procesna oprema terminala – cevovodi. Izkaže se, da vir podatka za odpoved roke (angl. *Arm_Fails*) delno upošteva tudi vplive naletov drugih plovil med operacijo (HSE, 2012), zato smo podrobneje obravnavali okoliščine, ki lahko privedejo do dogodka trčenja (angl. *Collision*). To je povezano z zanesljivostjo opreme in posadke na drugi ladji (osnova za določitev ustreznega/ustreznih KPI), kar je predmet nadzora v okviru t. i. Pariškega memoranduma (Paris MoU, 2012), katerega

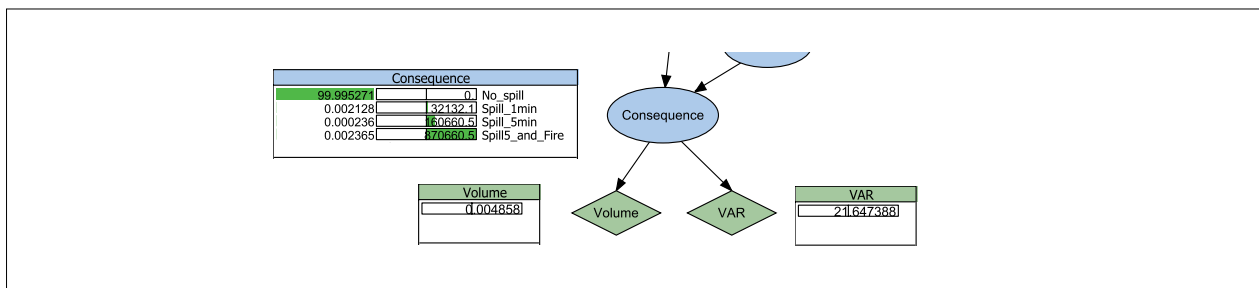
Zap. št. zap.	Podatki		Rezultati ^c				
	odpoved (angl. <i>Fails</i>) ^a	bela zastava ^b	siva zastava ^b	črna zastava ^b	izpust (angl. <i>Release</i>)	prostornina (angl. <i>Volume</i> ; m ³)	VAR (€)
1	0,1	1	0	0	$4,73 \times 10^{-5}$	$4,86 \times 10^{-3}$	21,6
2	1	1	0	0	$4,98 \times 10^{-5}$	$5,10 \times 10^{-3}$	22,8
3	0,1	0,92	0,02	0,06	$4,75 \times 10^{-5}$	$4,87 \times 10^{-3}$	21,72
4	1	0,92	0,02	0,06	$5,14 \times 10^{-5}$	$5,28 \times 10^{-3}$	23,51
5	1	0	1	0	$5,45 \times 10^{-5}$	$5,60 \times 10^{-3}$	24,95
6	1	0	0	1	$7,46 \times 10^{-5}$	$7,66 \times 10^{-3}$	34,16

Opombe: a – verjetnost za dejansko odpoved pretakalne roke zaradi zunanje vpliva (gre za dogodek odpoved (angl. *Fails*), b – deleži drugih ladij glede na barvo zastave skladno po ParisMou (2012), c – navajamo imena vozlišč, glej sliko 2.

Preglednica 2: Podatki in rezultati analize občutljivosti modela o kakovosti drugih ladij in verjetnosti dejanske odpovedi pretakalne roke po trčenju s tankerjem
Table 2: Data and results obtained from a brief sensitivity analysis regarding the quality of other ships and probability of actual failure of unloading arm after a collision with a tanker



Slika 1: Model verjetnosti za obravnavani scenarij nesreče v obliki Bayesove mreže. Verjetnosti so podane v odstotkih.
 Figure 1: Bayesian belief network graph for the considered accident scenario probability model. Please note that probabilities are given in %



Slika 2: Spodnji del modela (s slike 1) z dodatno prikazanimi rezultati za vrednosti podpornih vozlišč Volume (m3) in VAR (€)
 Figure 2: Lower part of graph (in Figure 1) with added utility nodes results for Volume (m3) and VAR (in €)

članice so pristojni organi 27 držav članic na obalah Evrope in severnega Atlantika, od severne Amerike do Evrope. Pristojni organi držav članic in skupnih organov si delijo informacije o inšpekcijah na ladjah, ki uporabljajo pristanišča v EU, rezultate pa razvrščajo v ustrezne kategorije, na primer glede na nacionalno zastavo v razrede bele/sive/črne zastave (črna pomeni najslabšo kakovost). V tem smislu smo po posvetu z avtorji analize (Luka Koper, 2010) uporabili povezavo med omenjeno kakovostjo nacionalne zastave ladij v drugem bazenu ter verjetnostjo trčenja s tankerjem oziroma terminalom. Pred vozlišče trčenja (angl. *Collision*) smo dodali še vozlišče z informacijo o kakovosti drugih ladij (angl. *2nd_Ship_Performance*), pri čemer upoštevamo, da kakovost bele zastave ustreza že uporabljeni vrednosti za verjetnosti dogodka trčenje (angl. *Collision*) $2,76 \times 10^{-6}$, kakovost sive ali črne zastave pa trikrat oziroma desetkrat večji verjetnosti. Upoštevali smo še, da so v obdobju od julija 2011 do avgusta 2012 v Luko Koper

vstopale ladje v sestavi približno 6 % črnih, 2 % sivih in 92 % belih zastav. Upoštevati je treba še negotovost o verjetnosti resnične odpovedi pretakalne roke v primeru trčenja (interpretacija velikosti druge ladje, posvet z avtorji študije Luka Koper, 2010), zato lahko alternativno predpostavimo, da se dogodek odpoved (angl. *Fails*) vedno pripeti.

Pregled podatkov in rezultatov analize občutljivosti modela za vprašanje trčenja predstavljamo v preglednici 2.

Rezultati kažejo, da ob upoštevanju uporabljenih podatkov pričakujemo spremembe verjetnosti dogodka izpust (angl. *Release*; velja tudi za drugi dve prikazani vozlišči) od 0 do +58 %, kar velja za primer večje ladje (npr. odpoved/*Fails* se vedno pripeti), ki ima vedno dodeljeno črno zastavo (bistveno slabša posadka in ladijska oprema) – ekstremen primer (osnova za določitev ustreznega/ustreznih KPI).

Pri interpretaciji rezultatov je treba upoštevati še druge negotovosti v uporabljenih podatkih. Podatek o verjetnosti za dogodek odpoved roke (angl. *Arm_Fails*; HSE, 2012) upošteva skupno osem odpovedi, pri čemer so indikacije, da je prispevek zunanjih vplivov približno 2/3 vrednosti. To pomeni, da je dogodek trčenje (angl. *Collision*) sorazmerno pomembnejši, kot kažejo tu prikazani rezultati (upoštevati pri določitvi KPI). Pri ocenjenih denarnih vrednostih neposrednih škod je treba upoštevati, da so lahko posredne škode za podjetje bistveno višje od direktnih (primer je nesreča v Buncefieldu (MIIIB, 2006), na podlagi katerih bi lahko sklepali o faktorju do približno 15).

Izbor varnostnih kazalnikov na podlagi prikazanega modela

Model verjetnosti izhaja iz pričakovanih neposrednih vzrokov za potencialno nesrečo. Za sledljiv sistem spre-

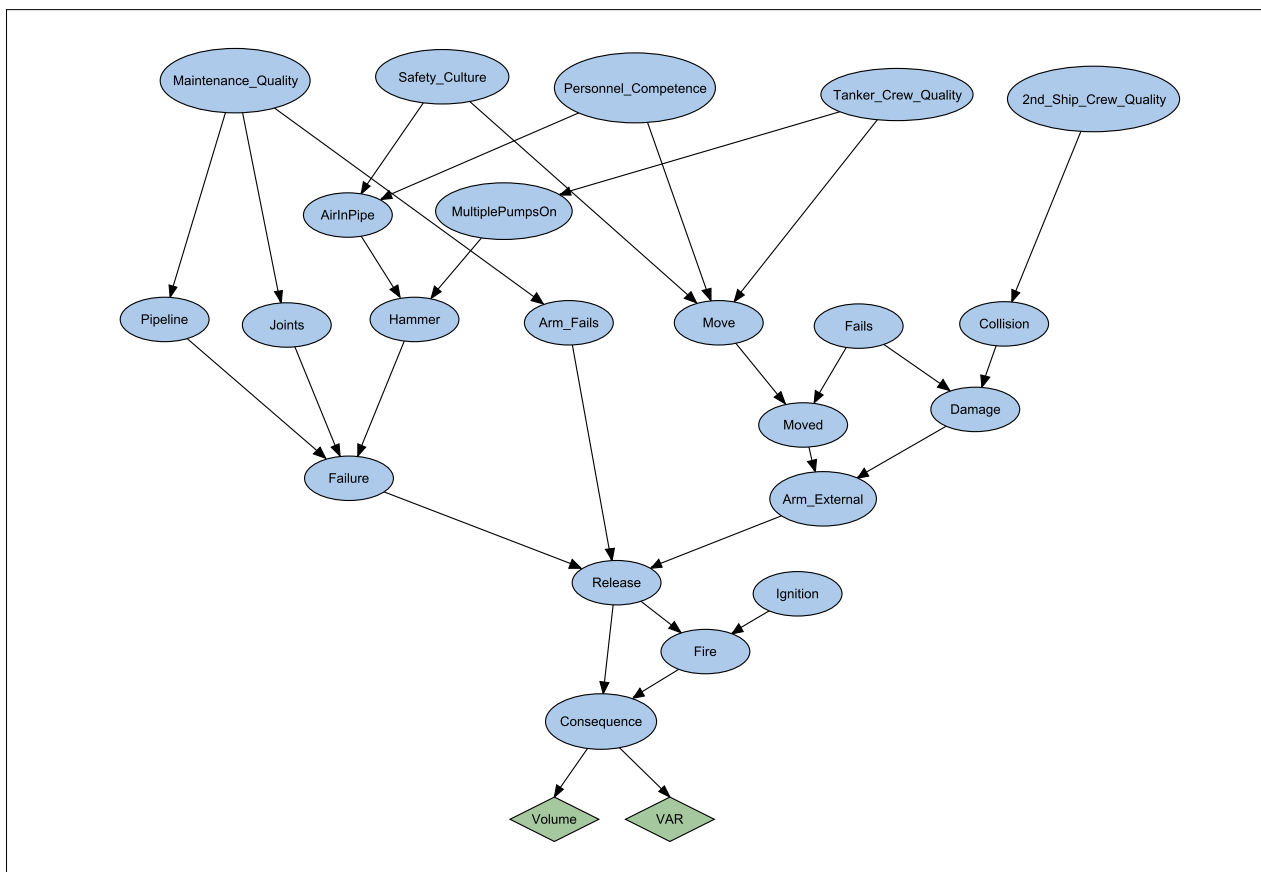
mljanja učinkovitosti upravljanja tveganj je treba povezati pričakovane direktne vzroke z ustreznimi organizacijskimi funkcijami in merljivimi varnostnimi kazalniki. Pričakovane direktne vzroke v modelu lahko strnemo v te skupine:

- odpovedi opreme, ki so povezane s kakovostjo njenega pregledovanja in vzdrževanja, preventivnega in korektivnega;
- napake osebja (lastnega in zunanjih partnerjev), ki so povezane z njihovo kompetentnostjo (izobrazba, specifična usposobljenost ter delovne izkušnje) in varnostno kulturo (dejanski odnos do tega, kako naj bi se delo izvajalo);
- zunanji vplivi/dejavniki, na primer lastnosti ladij, ki manevrirajo na območju pristanišča (na splošno tudi ekstremni naravni pojavi in podobno).

Ob upoštevanju dosegljivih smernic (iNTeg-Risk, 2011; HSE, 2005; OECD, 2008) in intervjujih z osebjem Luke Koper, d. d., in drugimi izvedenci (Luka Koper, 2010) smo oblikovali spisek kandidatov za varnostne kazalnike, ki

Št.	Začetni dogodek	Interni dokumenti	Sedanji varnostni kazalniki (KPI)	Kandidati za dodatne varnostne kazalnike (KPI)
1	cevovod/ <i>Pipeline</i>	Kakovost vzdrževanja: interno navodilo št. 113, realizacija načrta preventivnega vzdrževanja ter korektivno vzdrževanje zunaj pričakovanega roka.		- Kakovost preventivnega/korektivnega vzdrževanja, npr. % pravočasne realizacije, - merjenje napetosti in obremenitev v pretakalni roki.
2	spoji/ <i>Joints</i>			
3	odpoved roke/ <i>Arm_Fails</i>			
4	premik/ <i>Move</i>	Kontrolni seznam za operacijo ladja-obala, vsebine pod št. 3, 4, 22, 23. Meteorološke razmere med delom (veter s hitrostjo nad 25 vozlov). Poročila o poteku raztovarjanja ladij.	Analize okvar, pregledi stroškov in vzdrževanja, dodatni potrebni preizkusi, pregledi, posegi in dobave ter druge vsebine iz preventivnega in kurativnega vzdrževanja se redno obravnavajo na timih za kakovost (izvleček iz Delovnega navodila 113 Luke Koper, Vzdrževanje v profitnem centru). Terminal tekoči tovor, datum veljave 6. 1. 2003. Sklepati je, da se ugotovitve o stanju naprav (okvare, odpovedi ipd.) upoštevajo pri načrtovanju vzdrževanja, ni pa natančnih navedb o tem, da obstajajo varnostni kazalniki, ki bi jih vodstvo Luke Koper, d. d., uporabljalo za upravljanje tveganj na najvišji poslovni ravni.	- Kompetentnost posadk, usklajenost in razumljivost komunikacije med posadkami; ladja-posadka – spisek ladij po beli/sivi/črni zastavi, ki ga objavlja EU, aplikacija na Luko Koper. - Varnostna kultura – interne ankete na ravni Luke Koper.
5	vklop več črpalk/ <i>MultiplePumpsOn</i>	Načrt raztovarjanja tovora (ladja-terminal)		- Kompetentnost posadk, usklajenost in razumljivost komunikacije med posadkami; ladja-posadka – spisek ladij po beli/sivi/črni zastavi, ki ga objavlja EU, aplikacija na Luko Koper. - Periodične interne presoje načrtov in realizacije raztovarjanja tovora (% skladnosti operacij, % medsebojnega učinkovitega sporazumevanja med posadkami, potreben čas za pripravo pretovora)
6	zrak v cevi/ <i>AirInPipe</i>	Interni predpisi in vsebine za usposabljanje zaposlenih s poudarkom na nevarnih delih in delu z nevarnimi snovmi.		- Rezultati internih preizkusov znanja (ocene, npr. % slabih ocen). - Varnostna kultura – interne ankete na ravni Luke Koper
7	Trčenje/ <i>Collision</i>	Evidence o ladjah na območju pristanišča		- Kompetentnost posadk, usklajenost in razumljivost komunikacije med posadkami; ladja-posadka – spisek ladij po beli/sivi/črni zastavi, ki ga objavlja EU, aplikacija na Luko Koper. - % učinkovitega medsebojnega sporazumevanja
8	odpoved/ <i>Fails</i>	Ocena ogroženosti (Luka Koper, 2010)		/
9	vžig/ <i>Ignition</i>	Varnostno poročilo (Luka Koper, 2008)		/

Preglednica 3: Povzetek predlaganih kandidatov za varnostne kazalnike
Table 3: Summary of candidate key performance indicators



Slika 3: Predlagana končna struktura Bayesove mreže, ki na vohodu upošteva vozlišča v obliki predlaganih kvantitativnih varnostnih kazalnikov (zgornjih pet vozlišč)

Figure 3: Proposed final Bayesian network structure considering input performance nodes from the KPIs (top five nodes)

naj jih obravnava vodstvo Luke Koper, d. d. Spisek je v preglednici 3, grafični prikaz predlagane strukture Bayesove mreže [ki upošteva varnostne kazalnike kot začetna vozlišča] je na sliki 3.

Sklepne misli

Testiranje metode ERRA D1 je obsegalo uporabo predlaganega pristopa in orodij na primeru raztovarjanja metanola na terminalu za tekoče tovore v Luki Koper, d. d. Uporaba Bayesovih mrež za modeliranje verjetnosti specifičnih izidov morebitne nesreče v povezavi z neposrednimi vzroki nesreče omogoča dopolnitev varnostnih kazalnikov za upravljanje.

Glede na cilje razvoja in testiranja metode ERRA D1 (iNTeg-Risk, 2011) so ugotovitve naslednje:

- pristop in metoda za določitev/izbor varnostnih kazalnikov za spremljanje in upravljanje tveganj sta primerna za uporabo v industriji;
- pristop prek izdelave Bayesove mreže z upoštevanjem tako neposrednih odповіdi kot tudi dejavnikov, ki vplivajo na potek oziroma verjetnost dogodkov, ter njihova povezava na izbor pomenskih in merljivih varnostnih kazalnikov je primerjalno glede na klasične metode (npr. obravnava neposrednih odповіdi ob uporabi metod dreves odповіdi in dreves dogodkov)

celovit in zapleten postopek, ki zahteva več časa za izvedbo in tudi dodatna znanja;

- pričakovani oviri do široke uporabe testirane metode v industriji sta:
 - ni sistematičnih in rednih usposabljanj,
 - izdelava Bayesovih mrež zahteva opredelitev verjetnosti med začetnimi in končnimi vozlišči. Vsebinsko gre za določitev prepričanja o verjetnosti za vsako takšno povezavo. Naj to ponazorimo s primerom iz tega prispevka: upoštevali smo, da je verjetnost dogodka Collision na podlagi modeliranja $2,76 \times 10^{-6}$ (Luka Koper, 2010); takšna verjetnost ustreza kakovosti ladij, ki so skladne z belo zastavo (Paris Mou, 2012), medtem ko za skladnost s sivo in črno zastavo ni dosegljivih podatkov o verjetnostih. Za analizo smo na podlagi mnenja izvedencev privzeli ustrezne trikrat in desetkrat večje verjetnosti, da smo lahko vzpostavili kvantitativno povezavo. Izkaže se, da so takšne izvedenske ocene [zaradi odsotnosti podatkov] potrebne v večini vozlišč modelov. Pravilna obravnava potrebnih ocen [gre za način poročanja izvedencev, glej npr. Kjaerulff, 2008, sekcija 6.5; Pei-Hui in sod., 2012; Renooij, 2001] je nujna za izdelavo modela tveganja, ki je vreden zaupanja in je lahko koristno operativno orodje za ocenjevanje in upravljanje tveganj.

Zahvala

Zahvaljujemo se Evropski komisiji za financiranje EU-projekta iNTeg-Risk (številka pogodbe 213345), še posebej pa se zahvaljujemo osebjem Luke Koper, d. d., za njihovo sodelovanje pri testiranju metode ERRA D1.

Viri in literatura

1. AIChE, 1989. Guidelines for process equipment reliability data with data tables, Center for Chemical Process Safety of the AIChE, New York.
2. API, 2000. Risk-Based Inspection Base Resource Document, Publication 581, First Edition, American Petroleum Institute.
3. MIIB, 2006. Buncefield Major Incident Investigation Board, The Buncefield Incident, 11 December 2005, The final report of the Major Incident Investigation Board, Volume 1. <http://www.buncefieldinvestigation.gov.uk> (8. 7. 2014).
4. DNV, 2014. http://www.dnv.com/services/software/products/phast_safeti/phast/ (8. 7. 2014).
5. HSE, 2006. Developing process safety indicators, Health and Safety Executive, HSG254.
6. HSE, 2012. Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments [28/06/2012]. <http://www.hse.gov.uk/landuseplanning/failure-rates.pdf> (8. 7. 2014).
7. HUGIN EXPERT A/S, 2012. <http://www.hugin.com/dostopano> 8. 7. 2014).
8. iNTeg-Risk, 2011. D1.5.1 Final Type A report for ERRA D1 – T1.5.1. <http://www.integrisk.eu-vri.eu> (Finished Deliverables; potrebna prijava; 8. 7. 2014).
9. Kjaerulff U.B., Madsen A.L., 2008. Bayesian Networks and Influence Diagrams – A Guide to Construction and Analysis, Springer.
10. Luka Koper d. d., 2008. Varnostno poročilo za projekt podaljšanja terminala za tekoče tovore (Safety Report for Liquid Cargo Terminal extension project), Luka Koper internal document.
11. Luka Koper, d. d., 2010. Ocena ogroženosti Luke Koper, d. d., za vidik industrijskih nesreč na morju (Threat assessment of Luka Koper d.d. for the aspect of industrial accidents – sea), Univerza v Ljubljani, Fakulteta za pomorstvo in promet, Portorož.
12. OECD, 2008. Guidance on developing safety performance indicators related to chemical accident prevention, preparedness and response, guidance for industry. OECD Environment, Health and Safety Publications, Series on Chemical Accidents, No. 19, Paris.
13. Paris MoU, 2012, The Paris Memorandum of Understanding on Port State Control. <http://www.parismou.org/> (8. 7. 2014).
14. Pei-Hui Lin, Daniela Hanea, Ben Ale, Simone Sillem, Coen Gulijk, Patrick Hudson, 2012, Integrating organisational factors into a BBN model of risk. In: Proceedings of PSAM11/ESREL 2012, Helsinki.
15. Renooij S., 2001. Probability elicitation for belief networks: issues to consider, The Knowledge Engineering Review, 16 : 3, 255–269.
16. Uredba, 2008. Uredba o preprečevanju večjih nesreč in zmanjševanju njihovih posledic, Ur. l. RS, št. 71/2008, 105/2010 in 36/2014.
17. Williams, J. C., 1992. A User Manual for the HEART, Human Reliability Assessment Method, DNV Technica.