

ISPITIVANJE ZASNOVANO NA RIZIKU: STANDARDI I PERSPEKTIVE

Vladimir PILIĆ

Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad

Kontakt mejl adresa: vladimir_p@uns.ac.rs

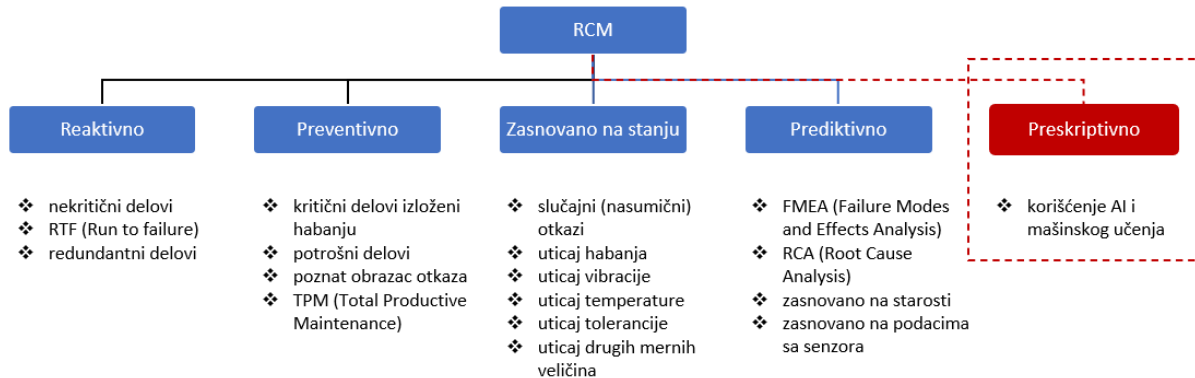
Imajući u vidu da je energija neizostavan faktor koji utiče na dalji razvitak država u svetu, izvlači se logičan zaključak da se prema istoj treba odnositi sa većom pažnjom i posvećenošću nego danas. Smanjenje potrošnje ukupne energije čiji većinski udeo i dalje dolazi iz upotrebe fosilnih goriva, primenom mera energetske efikasnosti ili upotrebom obnovljivih izvora energije poput solarne ili energije vetra, jedan je od načina na koji se prethodno pomenuti razvitak može podstaći. Poslednjih decenija zapažen je trend pogoršanja kvaliteta sirove nafte kao sirovine za preradu ali i uzlazni trend koji se tiče tehnoloških napredaka u oblasti prerade nafte i gasa sa ciljem proizvodnje čistijih i kvalitetnijih naftnih derivata. Takođe, poboljšanja imaju za svrhu i povećanje efikasnosti rafinerijskih procesa u smislu optimizacije prinosa, kvaliteta i svojstava produkata obrade i prerade nafte sa istovremenim smanjenjem na minimum količine otpadnih materija i materija koje ne mogu biti obrađene. Sa druge strane, činjenica je da su petrohemijska postrojenja sve starija, imajući u vidu da su velike rafinerije najvećih svetskih naftnih kompanija izgrađene sredinom ili u drugoj polovini prošlog veka, stvara se prilično plodno tlo za šarolike uzroke otkaza opreme. Životni vek opreme, koja je za potrebe petrohemijske industrije uglavnom jedinstvena i samim tim veoma skupa za izradu i održavanje, primenom metoda ispitivanja moguće je donekle produžiti u smislu dobijanja potvrde da je oprema dovoljno sigurna za rad i da ispunjava zadate radne parametre. Metodologija kojom je moguće uraditi gore navedeno je RBI (engl. *Risk-Based Inspection*, Ispitivanje zasnovano na riziku), čiji se doprinos najviše ogleda u povećanju bezbednosti rada samog postrojenja ali i u dodatnom smanjenju troškova prilikom održavanja. RBI pruža jedan sveobuhvatan inspekcijski plan koji utvrđuje termine ispitivanja a sve prema jedinstvenim karakteristikama postrojenja i procesnih parametara. Korak dalje u primeni klasične danas dobro ustanovljene RBI metodologije koja je razvijana i primenjivana poslednjih 20 godina jeste primena pristupa koji uzimaju u obzir dinamički aspekt rizika, poput dinamičke procene rizika ili proceni rizika koja je zasnovana na praćenju stanja opreme.

Ključne reči: RBI, ispitivanje zasnovano na riziku, procena rizika, dinamička procena rizika

1. Uvod

Početak 20. veka reaktivni pristup je preovladavao kao osnovna strategija održavanja odnosno zamena pohabanog dela vršena je pri otkazu, kada deo više nije bio u stanju da obavlja funkciju za koju je bio projektovan. Razvojem svesti o značaju održavanja 60-tih godina prošlog veka zameni prethodi kriterijum utvrđivanja pohabanosti opreme koji je prvenstveno zasnovan na vizuelnom pregledu. Danas, proaktivne i preskriptivne metode polako prevladaju kao osnovni pristup u strategiji održavanja praćenjem i tačnim definisanjem trenutka kada je potrebno obaviti pregled ili izvršiti preventivnu zamenu pohabanog dela, slika 1. Međutim, ovi moderni pristupi održavanja ne doprinose da postrojenje bude bezbednije i sigurnije u radu.

Dobro poznate i ustaljene aktivnosti koje se sprovode prilikom puštanja postrojenja u rad ili u vidu redovnih (više)godišnjih u kombinaciji sa gore pomenutim pristupom održavanja upravo doprinose bezbednijem i sigurnijem radu postrojenja, u granicama koje zakon propisuje. Takođe, poslednjih 15tak godina metode koje su zasnovane na riziku poput Ispitivanja zasnovanog na riziku (engl. *Risk-Based Inspection*, skraćeno RBI) ili Održavanja zasnovanom na riziku (engl. *Risk-Based Maintenance*, skraćeno RBM) ili poput Održavanja zasnovanog na pouzdanosti (engl. *Reliability Centered Maintenance*, skraćeno RCM) nalaze na sve veću primenu u industrijskim postrojenjima.



Slika 1. Istorijski razvoj RCM procesa

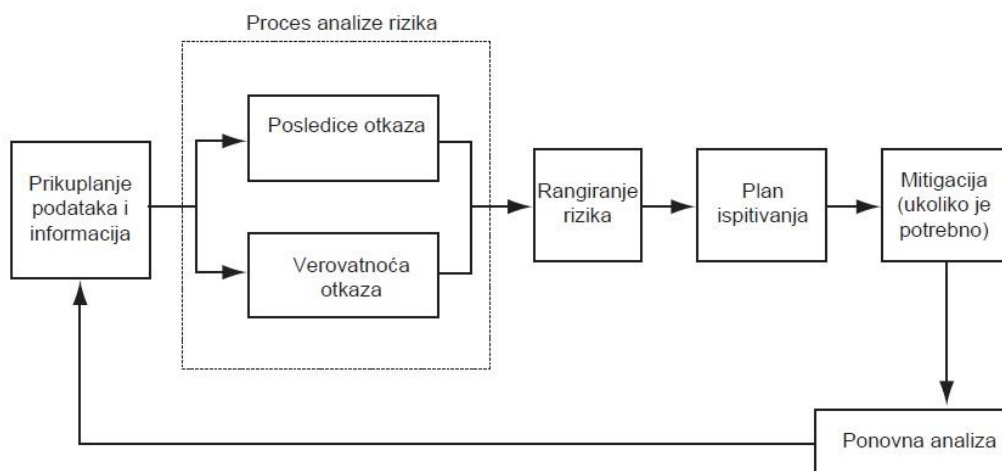
Zahvaljujući ovim metodama, pravljenje plana ispitivanja više se ne zasniva samo na prethodno zabeleženim i poznatim stanjima opreme već je u proces planiranja uključeno i razmatranje o uticaju procesnih i operativnih uslova i shodno tome nastalih mehanizama oštećenja. Ovakvo planiranje i zasnivanje plana ispitivanja doprinosi održavanju programa ispitivanja koji bi dao najveću verovatnoću detektovanja potencijalnog oštećenja. Stoga, plan ispitivanja treba da bude dinamičan i da uzme u obzir sve promene procesnih uslova ali i trenutno stanje opreme [1].

U praksi se u velikom broju slučajeva odigrava scenario da se analizira oprema sa naizgled nepoznatim poreklom oštećenja i gde se ne može sa sigurnošću utvrditi koji je primarni mehanizam oštećenja. Problem se dodatno komplikuje kada se stvore uslovi za delovanje više od dva preovlađujuća mehanizma i u tim slučajevima metode poput RBI, RBM, RCM ili neke druge slične, ne mogu direktno da ponude odgovor na postavljeno pitanje u vezi sa primarnim i preovlađujućim mehanizmom.

2. Osnovni dokumenti u vezi sa RBI - Preporučene norme i standardi

Dokument API RP 580, Ispitivanje zasnovano na riziku [2], opisuje i definiše osnovne elemente potrebne za razvoj, implementaciju i održavanje kredibilnog programa ispitivanja zasnovanog na riziku, prvobitno je nastao kao preporučena norma, koju je razvio i objavio Američki institut za naftu (engl. *American Petroleum Institute* skraćeno API). Reč je o opštem dokumentu o RBI-u koji se može koristiti kao osnov i kojim se može proceniti kvalitet svih RBI metoda i radnih procesa kako bi se utvrdilo da li zadovoljavaju nivo kvaliteta propisan u RP. Proces planiranja RBI prema API RP 580 prikazan je na slici 2. Prva verzija API RP 580 je objavljena 2002. godine posle šest godina pripreme. Danas, 20 godina kasnije dokument je

u trećem izdanju koje je objavljeno u februaru 2016. godine dok se četvrto nalazi u fazi pripreme.



Slika 2. Proces planiranja RBI-ja, prema [2] i [4]

Takođe, API RP 580 je postao “priznata i opšte prihvaćena dobra inženjerska norma” (engl. *Recognized and Generally Accepted Good Engineering Practices* skraćeno RAGAGEP), za upotrebu u petrohemijskoj industriji. RAGAGEP su zasnovane na utvrđenim industrijskim kodeksima, standardima, preporučenim normama, tehničkim izveštajima ili sličnim dokumentima.

Dokument API RP 581, Metodologija ispitivanja zasnovanog na riziku [3], je preporučena norma koju je takođe razvio i objavio API u cilju obezbeđivanja smernica za sprovođenje kvantitativnog RBI-a, a koji podržava opšte smernice predstavljene u API RP 580. Ovaj RP je prvobitno objavljen 2000. godine, a najnovije treće izdanje objavljeno je u aprilu 2016. godine i potom dopunjeno aneksom iz 2020. godine.

API RP 581 detaljno opisuje procedure i metodologiju RBI-a tj. integrisanu metodologiju koja koristi rizik kao osnov za određivanje prioriteta i upravljanje programima ispitivanja opreme u radu analizirajući verovatnoću i posledice otkaza opreme. Rizik se izračunava prema utvrđenom načinu a metodologija RBI-a podržava tri načina izračunavanja rizika: primenom kvalitativnih, polu-kvantitativnih i kvantitativnih metoda koje se razlikuju po tačnosti i kompleksnosti proračuna. Zaključno, pravilno primenjen i definisan RBI program kategoriše pojedinačnu opremu prema rizicima, pravi prioritete prilikom uspostavljanja plana ispitivanja, daje smernice za smanjenje rizika, kao što su promene u konstrukcionom materijalu, dodavanje prevlaka/oblaga, promene uslova rada, itd.

Primeri kvalitativnih nivoa verovatnoće i posledica, ali i nekoliko uobičajenih tipova posledica prema API RP 580 dati su u tabelama 1, 2 i 3

Tabela 1. Primer rangiranja verovatnoće otkaza sa šest nivoa, prema [2]

Kvalitativni nivo	Godišnja otkazna stopa ili frekvencija
Malo verovatna	< 0,00001
Veoma niska	0,00001 - 0,0001

Kvalitativni nivo	Godišnja otkazna stopa ili frekvencija
Niska	0,0001 - 0,001
Srednja	0,001 - 0,01
Visoka	0,01 - 0,1
Veoma visoka	> 0,1

Tabela 2. *Primer rangiranja ekonomskih posledica sa šest nivoa, prema [2]*

Kategorija	Opis	Ekonomski gubitak
I	Katastrofalna	>\$100.000.000
II	Velika	\$10.000.000 - \$100.000.000
III	Ozbiljna	\$1.000.000 - \$10.000.000
IV	Značajna	\$100.000 - \$1.000.000
V	Manja	\$10.000 - \$100.000
VI	Beznačajna	<\$10.000

NAPOMENA: Nivoi ekonomskih gubitaka umnogome zavise od veličine kompanije: ono što manja kompanija smatra velikim gubitkom (npr. kategorija II - \$10.000.000) za veliku kompaniju ta suma bi možda bila \$1.000.000.000 ili čak i više

Tabela 3. *Primer rangiranja bezbednosnih, zdravstvenih i ekoloških posledica sa šest nivoa, prema [2]*

Kategorija	Opis	Bezbednosna, zdravstvena i ekološka kategorija
I	Katastrofalna	Veliki broj smrtnih ishoda i/ili veliki dugotrajni ekološki uticaj
II	Velika	Par smrtnih ishoda i/ili veliki kratkotrajni ekološki uticaj
III	Ozbiljna	Ozbiljne povrede i/ili značajni ekološki uticaj
IV	Značajna	Manje povrede i/ili kratkotrajni ekološki uticaj
V	Manja	Povrede nivoa prve pomoći i/ili minimalni ekološki uticaj
VI	Beznačajna	Bez značajnih posledica

Dokument ASME PCC-3, Planiranje ispitivanja upotrebom metoda zasnovanih na riziku [4], predstavlja standard koji je razvio ASME (engl. *American Society of Mechanical Engineers* - Američko društvo mašinskih inženjera, skraćeno ASME) u saradnji sa API za potrebe korišćenja opreme i komponenti pod pritiskom. ASME PCC-3 pruža vlasnicima, operaterima i projektantima opreme pod pritiskom uputstva i smernice za razvoj i implementaciju programa ispitivanja. Ove smernice sadrže alat za procenu plana i programa ispitivanja. Pristup opisan u standardu posebno naglašava da je krajnji cilj siguran i pouzdan rad opreme koja je podvrgnuta pre svega ekonomičnom i isplativom ispitivanju.

Prethodno prikazane tabele su implementirane i kao iste prikazane u ASME PCC-3 standardu pa se stoga može reći da su API RP 580/581 i ASME PCC-3 metodološki slični, sa posebnim naglaskom da je ASME standard širi u smislu da pokriva i druge grane industrije pored petrohemijske. Takođe, ističe se da je složenost analize rizika funkcija brojnih faktora koji

moгу uticati na rizik i da postoji kontinuirani spektar dostupnih metoda za procenu rizika koje se, kao što je to slučaj u API RP 580/581, kreću od striktno relativnog rangiranja (kvalitativna i donekle polu-kvantitativna analiza rizika) do vrlo složenog i rigoroznog proračuna (kvantitativna analiza rizika).

3. Pomoćni dokumenti

Dokument API RP 571, Mehanizmi oštećenja koji utiču na nepokretnu opremu u petrohemijskoj industriji [5], jeste preporučena norma razvijena od strane API-ja koja pruža detaljan pregled i opis 70tak različitih mehanizama oštećenja koji se mogu javiti u toku rada procesne opreme u petrohemijskoj industriji. Treće izdanje preporučene norme definiše svrhu dokumenta kao potrebu “*da opiše širok spektar mehanizama oštećenja i propadanja izazvanih radom, uključujući koroziju i druge vrste metalurških oštećenja, koji će najverovatnije uticati na stanje konstrukcionog materijala koji se obično koristi u petrohemijskoj opremi*” [5].

API RP 571 je prvobitno objavljen 2003. godine, a treće izdanje je objavljeno u martu 2020. Ovaj RP je namenjen da dopunjava API RP 580/581 i API RP 579 dokumente.

Svaki pojedinačni prikaz mehanizma oštećenja u API RP 571 sadrži:

- opis mehanizma oštećenja;
- listu materijala koji su podložni mehanizmu oštećenja;
- kritične faktore koji utiču na mehanizam tj. stopu oštećenja;
- listu uobičajenog tipa opreme i/ili jedinica koje su podložne mehanizmu oštećenja;
- izgled i/ili morfologiju oštećenja; i
- mere koje se mogu preduzeti da bi se sprečio ili ublažio mehanizam oštećenja.

U mnogim slučajevima, slike ili grafički prikazi su dodati kako bi se bliže i bolje opisao mehanizam oštećenja ali i poboljšalo razumevanje oštećenja i pružio dublji kontekst.

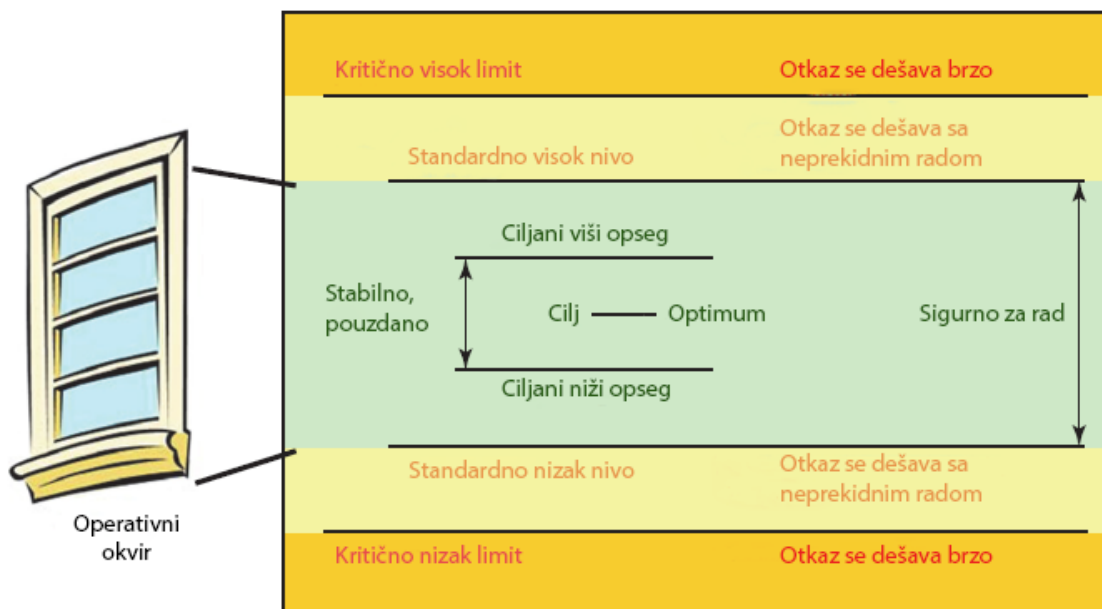
Dokument API RP 584, Operativni okviri celovitosti [1], je takođe preporučena norma razvijena od strane API-ija koja pruža uputstva i preporuke za identifikovanje, usvajanje i implementaciju operativnih okvira celovitosti (engl. *Integrity Operating Windows*, skraćeno IOWs) koji mogu dopuniti i dodatno osnažiti program ispitivanja i stepen procesne sigurnosti tako što bi se identifikovali procesni parametri koji potencijalno mogu ugroziti mehanički integritet i celovitost opreme. Ovaj RP je prvobitno objavljen 2014. godine, a trenutno drugo izdanje objavljeno je u decembru 2021. godine sa većim brojem izmena.

U cilju upravljanja bilo kakvom procesnom opremom, potrebno je utvrditi set operativnih raspona i limita (ili okvira, granica) za ključne procesne promenljive. Ovi limiti se uobičajeno nazivaju operacioni ili radni limiti. Operativni okviri celovitosti su specifični podskup ovih ključnih operativnih limita koji se tiču samo održavanja celovitosti ili pouzdanosti procesne opreme. Tačna definicija IOW-a, prema API RP 584 [1] jeste “*utvrđeni limiti za procesne promenljive koje mogu da utiču na celovitost opreme ukoliko proces odstupi od utvrđenih limita za unapred predviđeni vremenski period*”. Pod pojmom procesne promenljive dokument podrazumeva i hemijske i fizičke parametre. Pod hemijskim parametrima podrazumevaju se: pH vrednost, udeo vode u procesnom fluidu, sadržaj sumpora, soli, NH₃, jačina kiseline, TAN (engl. Total Acid Number), prisustvo određenih inhibitora, udeo kiseonika i sl. Pod fizičkim podrazumevaju se oni parametri koji nisu hemijske prirode ali su značajni u kontroli procesa. Neki od ovih parametara su: različite vrste pritisaka i temperatura poput projektnih i

radnih/operativnih vrednosti, parcijalni pritisak, tačka rose, brzina protoka, količina inhibitora, količina mulja, prisustvo i intenzitet vibracija i sl. Razlikuju se tri primarna limita:

- standardni IOW limit;
- kritični IOW limit; i
- informativni IOW limit.

Standardni limiti su onaj set promenljivih koje kada se prekorače za neki određeni period vremena, može doći do povećane stope degradacije materijala ili se mogu pojaviti novi i/ili neočekivani mehanizmi oštećenja. Kritični limit su oni limiti koji kada se pređu, može doći do naglog propadanja materijala i to na takav način da je potrebna hitna reakcija operatera kako bi se procesne promenljive vratile u normalne okvire i time sprečila značajna potencijalna predviđena oštećenja opreme. Informativni limiti su oni za koje ne postoji potreba za hitnim reagovanjem operatera ali koji se bez obzira na sve moraju pratiti, jer usled prekoračenja ovih limita može doći do ubrzanog procesa korozije ili nekog drugog vida oštećenja. Sve gore navedeno ilustrativno je prikazano na slici 3.



Slika 3. Zone IOW, prilagođeno iz [1]

Dokument API RP 970, Dokument za kontrolu korozije [6], pruža korisniku osnovne elemente za razvoj, implementaciju i održavanje Dokumenta za kontrolu korozije. Dokument za kontrolu korozije je dragoceni dodatak u procesu održavanja Programa za mehaničku celovitost tako što identifikuje mehanizme oštećenja kojima je podložna oprema pod pritiskom, faktore koji utiču na mehanizam oštećenja i predlaže korake kojima i se umanjio rizik od otkaza ili neplaniranih ispada. Dokument je trenutno u svojoj prvoj verziji i objavljen je 2017. godine.

4. Naučna literatura

Članak [7] pruža statistički pregled akcidenata sa ozbiljnim posledicama (engl. *major accidents*) u petrohemijskoj industriji koji su prijavljeni MARS sistemu (engl. *The European Major Accident Reporting System*) od 1985 do 2002. godine. Uzrok *Otkaz opreme* prevladava kao najzastupljeniji neposredan uzrok akcidenata sa ozbiljnim posledicama sa udelom od 44%. Ako se podaci iz članka protumače malo slobodnije ovaj broj može da se povećava i na 69%

ukoliko se u udeo svrstaju i kombinovani uzroci koji kao jedan od elemenata sadrže otkaz opreme kao uzrok. Iz ovoga se može zaključiti da pravilno projektovanje uz poštovanje svih propisa a potom i održavanje i ispitivanje opreme koje kao aktivnosti imaju za cilj održavanje funkcije i celovitosti opreme, igraju ključnu ulogu u sprečavanju akcidenata sa ozbiljnim posledicama. U akcidentu u BP rafineriji u Texas City 2005. godine, naknadnom analizom utvrđeno je čak 83 različite operacione i projektne greške što je u kombinaciji sa ozbiljnim nedostacima vezanim za mehaničku celovitost i procesnu sigurnost dovelo da se ovaj akcident svrstava u najveću tehnološku katastrofu koja se desila u novijoj istoriji SAD [8]. Naravno, pored ovoga može se reći i da je ljudski faktor, koji je prisutan u svim gore navedenim aktivnostima, imao isto tako ključnu ulogu, jer konačno ljudi su ti koji učestvuju u procesu projektovanja, održavanja i ispitivanja opreme, kako tokom same aktivnosti održavanja i ispitivanja tako i pri osmišljavanju procedura za održavanje i ispitivanje.

Članak [9] zaključuje da se opšte pouke koje se mogu izvesti iz akcidenata prijavljenih MARS sistemu svakako moraju poboljšati jer se trenutno samo na osnovu jedne trećine prijavljenih slučajeva dobijaju informacije koje su od neke koristi. I pored ove činjenice, razvoj modela koji ne samo da detaljno objašnjavaju scenarije i razloge zbog kojih je došlo do akcidenta [10] [11] [12], već i na osnovu ranijih analiza razvijaju alate za predikciju sličnih događaja u vidu npr. dinamičke analize rizika koja je bazirana na podacima o već postojećim akcidentima ili “za dlaku izbegnutim” (engl. *near miss*) akcidentima, pružaju nadu da upotrebom istih modela i alata akcidenti sličnih razmera mogu biti sprečeni [13].

Postoje i drugi pristupi za sveukupno smanjenje rizika, npr. identifikovanjem hazarda pri reakcijama za koje se pokazalo da predstavljaju najozbiljniji problem u hemijskoj industriji, poput prikazanog u [14], ili ispitivanjem specifičnih svojstava proizvoda prerade nafte i gasa i sprovođenjem procene rizika, poput prikazanog u [15]. Oba primera su pristupi koji se na vrlo specifičan način bave rizikom, uglavnom utičući na jedan i samo jedan parametar.

Novi ili modifikovani pristupi i/ili metode koji se bave poznatim problemima u vezi sa rizikom nisu novi koncept. Oslanjajući se na prethodno znanje i standardizovanu praksu, potencijalne koristi od primene novih i/ili modifikovanih pristupa postaju lako prepoznatljive. Oba pristupa mogu se baviti i probabilističkim delom rizika, kao i posledičnim delom, ili nekim faktorima koji utiču na verovatnoću ili posledicu događaja. Članak [16] bavi se posledičnim članom rizika razvijanjem i procenom faktora emisije za gasnu turbinu u postrojenju za preradu nafte i gasa u vrlo specifičnim uslovima rada i sa specifičnim karakteristikama goriva. Članak [17] se bavi probabilističkim članom rizika usled nedostatka tačnih podataka o verovatnoći za osnovne događaje.

Potreba za donekle dinamičnim aspektom rizika prepoznata je i dokumentovana u nekoliko istraživačkih članaka. Članak [18] opisuje Dinamičku metodologiju procene otkaza na vrlo specifičnoj procesnoj jedinici baveći se i verovatnoćom otkaza i posledicama otkaza. Članci [19] i [20] takođe se bave dinamičkim rizikom predlažući metodologije koje se uglavnom oslanjaju na API RP 580 i API RP 581 ali primenjeno na postrojenja hemijske industrije. Autor u članku [21] daje obilje informacija u vezi sa budućnošću procene rizika. Zaključak je da su metode poput dinamičke procene rizika i procene rizika zasnovane na praćenju stanja, prikazanim u [22], pristupi na koje će se oslanjati buduće procene. Pregledom relevantne literature dolazi se do zaključka da je ovaj značaj i te kako opravdan i da je dinamički pristup, pravac u kome bi RBI metodologija trebalo da se razvija.

5. Zaključak

Iako je napredak u ovoj oblasti u poslednjih 20 godina izuzetan, a napori na standardizaciji приметni, postoji potreba za daljim istraživanjem u pravcu sistemskog pristupa sa ciljem stvaranja kompletnog praktičnog okvira za procene u primeni RBI. Donošenje odluka zasnovanih na optimizovanom inspekcijskom planu koji je rezultat sprovedene RBI analize omogućava i obezbeđuje racionalnu alokaciju troškova. Ovakva razmatranja su od suštinske važnosti jer svode troškove na minimum i istovremeno omogućavaju dublje poznavanje procesa.

Proaktivni stav u ponovnoj proceni i reevaluaciji procesa RBI kao industrijskog standarda još uvek se ne promovise u trenutno najčešće korišćenom RBI pristupu. U određenom broju slučajeva ovakav stav trenutne prakse može biti pogrešan jer iskustvo na terenu pokazuje da su ponovna procena i ponovna evaluacija RBI periodično potrebna u svom punom obimu. Takođe, razvoj osnovnog metodološkog RBI dokumenta pokazuje tendenciju prema *online* i *onstream* metodama ispitivanja, primenom posrednih metoda praćenja (monitoring kritičnih parametara i IOW-ova) kojima se posredno mogu uočiti i pratiti oštećenja koje fizički nije moguće dugo vremena detektovati ili je detekcija povezana sa destruktivnim uzorkovanjem. Na kraju, sve gore navedeno pruža uvid u pravac u kome će se RBI metodologija razvijati u budućnosti.

6. Literatura

- [1] *Integrity Operating Windows*, API Recommended Practice 584, API Publishing Services, Second edition, December 2021.
- [2] *Risk Based Inspection*, API Recommended Practice 580, API Publishing Services, Third edition, February 2016.
- [3] *Risk Based Inspection Methodology*, API Recommended Practice 581, API Publishing Services, Third edition, April 2016.
- [4] *Inspection Planning Using Risk-Based Methods*, ASME PCC-3–2017, The American Society of Mechanical Engineers, 2017.
- [5] *Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry*, API Recommended Practice 571, API Publishing Services, Third edition, March 2020.
- [6] *Corrosion Control Documents*, API Recommended Practice 970, API Publishing Services, First edition, December 2017.
- [7] Z. Nivolianitou, M. Konstandinidou and C. Michalis, “Statistical analysis of major accidents in petrochemical industry notified to the major accident reporting system (MARS)”, *Journal of hazardous materials*, vol. 137, no. 1, pp. 1-7, 2006.
- [8] K. Kidam, N. E. Hussin, O. Hassan, A. Ahmad, A. Johari, and M. Hurme, “Accident prevention approach throughout process design life cycle”, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 92, no. 5, pp. 412–422, 2014.
- [9] A. Jacobsson, J. Sales, and F. Mushtaq, “Underlying causes and level of learning from accidents reported to the MARS database”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23, no. 1, pp. 39–45, 2010.
- [10] CSB, *Investigation report Refinery Explosion and Fire (15 killed, 180 injured)*, U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board, March 2007.
- [11] The B.P. U.S. Refineries Independent Safety Review Panel, *The Report of The BP U.S. Refineries Independent Safety Review Panel*, January 2007.
- [12] F. I. Khan and P. R. Amyotte, “Modeling of BP Texas City refinery incident,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 20, pp. 387–395, 2007.

- [13] M. Kalantarnia, F. Khan and K. Hawboldt, “Modelling of BP Texas City Refinery Accident Using Dynamic Risk Assessment Approach”, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 88, no. 3, pp. 191–199, 2010.
- [14] Q. Wang, W. J. Rogers and M. S. Mannan, “Thermal risk assessment and rankings for reaction hazards in process safety”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 98, pp. 225-233, 2009.
- [15] M. Kumasaki and Y. Oka, “Risk assessment of potential gas odorants for the storage process”, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 126, no. 3, pp. 1757- 1762, 2016
- [16] D. Kahforoushan and E. Fatehifar, “The Development and Evaluation of Emission Factors for Gas Turbines (Multi-pollutant) in Oil and Gas Processing Plants”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 33, no. 3, pp. 275-282, 2010.
- [17] Y. Halloul, S. Chiban and A. Awad, “Adapted fuzzy fault tree analysis for oil storage tank fire”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 41, no. 8, pp. 948–958, 2019.
- [18] A. Roy, P. Srivastava and S. Sinha, “Dynamic failure assessment of an ammonia storage unit: A case study”, *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 94, pp. 385–401, 2015.
- [19] V. Villa, N. Paltrinieri, F. Khan and V. Cozzani, “Towards dynamic risk analysis: a review of the risk assessment approach and its limitations in the chemical process industry”, *Safety Science*, vol. 89, pp. 77–93, 2016.
- [20] K. Bhatia, F. Khan, H. Patel and R. Abbassi, “Dynamic risk-based inspection methodology”, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 62, 2019.
- [21] E. Zio, “The future of risk assessment”, *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 177, pp. 176–190, 2018.
- [22] Z. Zeng, E. Zio, “Dynamic Risk Assessment Based on Statistical Failure Data and Condition-Monitoring Degradation Data”, *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 67, no. 2, pp. 609-622, 2018.