



UNIVERZITET U NOVOM SADU
FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
DEPARTMAN ZA INDUSTRIJSKO
INŽENJERSTVO I MENADŽMENT



GORAN TEPIĆ

mast.inž.menadžm.

**RAZVOJ METODOLOŠKOG KONCEPTA
ZA UPRAVLJANJE RIZIKOM U SISTEMU OPASNIH
MATERIJA**

DOKTORSKA DISERTACIJA

Novi Sad, 2019.



УНИВЕРЗИТЕТ У НОВОМ САДУ ● ФАКУЛТЕТ ТЕХНИЧКИХ НАУКА
21000 НОВИ САД, Трг Доситеја Обрадовића 6

КЉУЧНА ДОКУМЕНТАЦИЈСКА ИНФОРМАЦИЈА

| | |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Редни број, РБР : | |
| Идентификациони број, ИБР : | |
| Тип документације, ТД : | Монографска документација |
| Тип записа, ТЗ : | Текстуални штампани материјал |
| Врста рада, ВР : | Докторска дисертација |
| Аутор, АУ : | Горан Тепић |
| Ментор, МН : | др Бојан Лалић, ванредни професор |
| Наслов рада, НР : | Развој методолошког концепта за управљање ризиком у систему опасних материја |
| Језик публикације, ЈП : | Српски |
| Језик извода, ЈИ : | Српски |
| Земља публикавања, ЗП : | Република Србија |
| Уже географско подручје, УГП : | Војводина |
| Година, ГО : | 2019. |
| Издавач, ИЗ : | Факултет техничких наука |
| Место и адреса, МА : | Нови сад, Трг Доситеја Обрадовића 6 |
| Физички опис рада, ФО : | 8 поглавља/250 страна/44 табеле/42 слике/5 прилога |
| Научна област, НО : | Индустријско инжењерство и инжењерски менаџмент |
| Научна дисциплина, НД : | Производни и услужни системи, организација и менаџмент |
| Предметна одредница/Кључне речи, ПО : | Управљање, ризик, опасне материје |
| УДК | |
| Чува се, ЧУ : | Библиотека Факултета техничких наука у Новом Саду |
| Важна напомена, ВН : | |
| Извод, ИЗ : | Увођењем нових технологија расте потреба за додатним ресурсима, што се одражава на перманентни пораст броја опасних материја. Индустриски ризик је интерпретиран кроз феномен фрагментације процесне опреме, док су транспортни ризици анализирани кроз модел очекивања акцидентата услед исклизнућа воза. Неизвесност фрагментационе процене се креће око 12,5%. Висок проценат неизвесности транспортних акцидентата показује да поуздана процена ризика захтева примену напредних метода, попут Демпстер-Схафер теорије. |
| Датум прихватања теме, ДП : | 24.03. 2016. |
| Датум одбране, ДО : | |
| Чланови комисије, КО : | Председник: др Драган Јовановић, ред. професор |
| | Члан: др Милан Костелац, ван. професор |
| | Члан: др Стеван Милисављевић, ван. професор |
| | Члан: др Синиша Сремац, ван. професор |
| | Члан, ментор: др Бојан Лалић, ван. професор |
| | Потпис ментора |



UNIVERSITY OF NOVI SAD ● FACULTY OF TECHNICAL SCIENCES
21000 NOVI SAD, Trg Dositeja Obradovića 6

KEY WORDS DOCUMENTATION

| | |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Accession number, ANO : | |
| Identification number, INO : | |
| Document type, DT : | Monographic publication |
| Type of record, TR : | Textual material printed |
| Contents code, CC : | Ph. D. Thesis |
| Author, AU : | Goran Tepic |
| Mentor, MN : | Ph. D. Bojan Lalic, Associate Professor |
| Title, TI : | Development of a methodological concept for risk management in the system of hazardous substances |
| Language of text, LT : | Serbian |
| Language of abstract, LA : | Serbian |
| Country of publication, CP : | Serbia |
| Locality of publication, LP : | Vojvodina |
| Publication year, PY : | 2019. |
| Publisher, PB : | Faculty of Tehnical Sciences |
| Publication place, PP : | Novi Sad, Trg Dositeja Obradovica 6 |
| Physical description, PD : | 8 chapters/250 pages/44 tables/42 pictures/ 5 appendixes |
| Scientific field, SF : | Industrial engineering and engineering management |
| Scientific discipline, SD : | Production Systems, Organization and Management |
| SUBJECT/KEY WORDS, S/KW : | Management, risk, hazardous substances |
| UC | |
| Holding data, HD : | Library of the Faculty of Technical Sciences, Trg Dositeja Obradovica 6, Novi Sad |
| Note, N : | |
| Abstract, AB : | Introduction of new technologies creates a growing need for additional resources, which affects the permanent increase in the number of dangerous materials. Industrial risk is interpreted through the phenomenon of process equipment fragmentation, while transport risks are analyzed through the model of accidents expectation caused by train derailment. The fragmentation estimates uncertainty is around 12.5%. A high percentage of uncertainties in transport accidents show that reliable risk assessment requires the use of advanced methods, such as Dempster-Shafer theory. |
| Accepted by the Scientific Board on, ASB : | 24.03. 2016. |
| Defended on, DE : | |
| Defended Board, DB : | President: Ph. D. Dragan Jovanovic, Full Professor |
| | Member: Ph. D. Milan Kostelac, Associate Professor |
| | Member: Ph. D. Stevan Milisavljevic, Associate Professor |
| | Member: Ph. D. Sinisa Sremac, Associate Professor |
| | Member, Mentor: Ph. D. Bojan Lalic, Associate Professor |
| | Mentor's sign |

SADRŽAJ

| | |
|---------------------------------------------------------------------|-------------|
| REZIME..... | IV |
| ABSTRACT | V |
| SPISAK SLIKA | VI |
| SPISAK TABELA | VII |
| SPISAK SKRAĆENICA..... | XIII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 1.1. KONCEPT DISERTACIJE | 1 |
| 1.2. PREDMET ISTRAŽIVANJA | 2 |
| 1.3. CILJEVI ISTRAŽIVANJA..... | 3 |
| 1.4. STRUKTURA DISERTACIJE..... | 4 |
| 2. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA U SISTEMU OPASNIH MATERIJIA | 6 |
| 2.1. RIZICI PROCESNE INDUSTRIJE..... | 6 |
| 2.2. TRANSPORTNI RIZICI..... | 26 |
| 2.3. RIZICI SKLADIŠTENJA | 27 |
| 3. OPASNE MATERIJIE | 44 |
| 3.1. OPŠTE KARAKTERISTIKE OPASNIH MATERIJIA | 44 |
| 3.1.1. Požarno-eksplozivne osobine | 46 |
| 3.1.2. Toksične osobine | 49 |
| 3.1.3. Radioaktivne osobine | 53 |
| 3.1.4. Korozivne osobine..... | 58 |
| 3.2. PODELA I KLASIFIKACIJA OPASNIH MATERIJIA | 62 |
| 3.3. GLOBALNO HARMONIZOVAN SISTEM (GHS)..... | 65 |
| 4. HEMIJSKI UDESI | 69 |
| 4.1. HEMIJSKI UDESI..... | 69 |
| 4.1.1. Klasifikacija i kategorizacija hemijskih udesa | 71 |
| 4.1.2. Faze hemijskih udesa..... | 71 |
| 4.1.3. Rizik od hemijskih udesa..... | 75 |
| 4.2. TRANSPORT OPASNIH MATERIJIA | 77 |
| 4.3. ZAKONSKA REGULATIVA I PROPISI..... | 78 |
| 4.4. ANALIZA HEMIJSKIH UDESA NA PRAKTIČNIM PRIMERIMA | 81 |
| 4.4.1. Eksplozija skladišta u Kini (Tianjin)..... | 81 |
| 4.4.2. Fukushima nuklearni akcident | 82 |
| 4.4.3. Akcidenti procesne opreme | 87 |

| | |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.4.4. Eksplozija para tečnosti u stanju ključanja (BLEVE) | 88 |
| 4.4.5. Princip maksimuma entropije | 90 |
| 5. METODE PROCENE RIZIKA | 92 |
| 5.1. KVALITATIVNE METODE PROCENE RIZIKA | 93 |
| 5.1.1. Matrice rizika | 94 |
| 5.1.2. Singapurska metoda (OHSAS standard) | 95 |
| 5.1.3. MIL – STD – 822C standard | 96 |
| 5.1.4. Standard AS/NZS 4360:2004 | 97 |
| 5.2. POLUKVALITATIVNE METODE PROCENE RIZIKA | 98 |
| 5.2.1. Matrična metoda | 99 |
| 5.2.2. Tabelarna metoda | 101 |
| 5.2.3. Kinney metoda | 101 |
| 5.2.4. Pilz metoda | 102 |
| 5.2.5. Guardmaster metoda | 104 |
| 5.2.6. Fine metoda | 105 |
| 5.2.7. Grafička metoda | 107 |
| 5.3. KVANTITATIVNE METODE PROCENE RIZIKA | 110 |
| 5.3.1. Ček lista | 111 |
| 5.3.2. Analiza “šta-ako” | 111 |
| 5.3.3. Bezbednosna revizija | 112 |
| 5.3.4. Analiza zadatka | 112 |
| 5.3.5. STEP tehnika | 113 |
| 5.3.6. HAZOP tehnika | 113 |
| 5.3.7. PRAT tehnika | 115 |
| 5.3.8. DMRA tehnika | 116 |
| 5.3.9. Kvantifikacija društvenog rizika | 117 |
| 5.3.10. QRA tehnika | 119 |
| 5.3.11. QADS tehnika | 119 |
| 5.3.12. CREA tehnika | 120 |
| 5.3.13. PEA tehnika | 121 |
| 5.3.14. WRA tehnika | 122 |
| 5.3.15. HEAT (HFEA) tehnika | 124 |
| 5.3.16. FTA tehnika | 125 |
| 5.3.17. ETA tehnika | 127 |
| 5.3.18. RBM tehnika | 128 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6. DOMINO EFEKAT KOD HEMIJSKIH AKCIDENATA | 133 |
| 6.1. BAJESOVA MREŽA | 142 |
| 6.2. VEROVATNOĆA NASTANKA DOMINO EFEKTA..... | 146 |
| 6.3. DOMINO EFEKAT USLED EKSPLOZIVNE FRAGMENTACIJE | 147 |
| 6.4. ANALIZA RIZIKA USLED FRAGMENTACIJE REZERVOARA..... | 147 |
| 6.4.1. Metodološki pristup..... | 148 |
| 6.5. CILINDRIČNI REZERVOAR ZA TNG..... | 150 |
| 6.5.1. Kritične zone rezervoara..... | 150 |
| 6.5.2. Procena frakturalnih linija | 151 |
| 6.5.3. Fragmentacioni mehanizam..... | 152 |
| 6.5.4. Idealna fragmentacija rezervoara | 154 |
| 6.5.5. Probabilistički maseni metod | 154 |
| 6.5.6. Zavisnost broja i mase fragmenata | 157 |
| 6.5.7. Dinamika leta fragmenta | 160 |
| 6.5.8. Inercijalni model početnih uslova | 160 |
| 6.5.9. Jednačina kretanja fragmenta | 161 |
| 6.5.10. Raspodela dometa frgmenata | 163 |
| 6.6. PROCENA FRAGMENTACIONOG RIZIKA | 167 |
| 6.7. REKAPITULACIJA ISTRAŽIVANJA..... | 169 |
| 6.8. KOMPARATIVNA ANALIZA REZULTATA | 170 |
| 7. ANALIZA TRANSPORTNIH RIZIKA | 172 |
| 7.1. ANALIZA RIZIKA ŽELEZNIČKOG TRANSPORTA..... | 172 |
| 7.1.1. Faktori koji utiču na iskliznuće | 174 |
| 7.1.2. Probabilistički model procene rizika | 176 |
| 7.2. MODEL PROCENE RIZIKA USLED ISKLIZNUĆA VOZOVA | 179 |
| 7.2.1. Verovatnoća železničke nesreće..... | 180 |
| 7.2.2. Model očekivanja nesreće | 182 |
| 8. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA | 185 |
| LITERATURA | 190 |
| PRILOG | 202 |
| Prilog A. Procedura izvođenja jednačina..... | 202 |
| Prilog B. Jednačine kretanja fragmenta | 204 |
| Prilog C. Raspodela dometa fragmenta | 205 |
| Prilog D. Postupak implementacije metode Tejlorovih redova..... | 209 |
| Prilog E. Odstupanje trajektorija | 210 |

REZIME

Civilizacijska težnja za društvenim napretkom je uslovljena tehnološkim dostignućima koje prati rizik od materijalnih gubitaka. Savremene tehnološke inovacije zahtevaju da sistemi opasnih materija čine znatan udeo proizvodnih i logističkih kapaciteta. Geopolitičke strategije vodećih svetskih sila se značajno oslanjaju na sisteme opasnih materija u ostvarivanju svojih strateških ciljeva. Uvođenjem novih tehnologija raste potreba za dodatnim resursima, što se odražava na permanentni porast broja opasnih materija. Tehnologije budućnosti neće smanjiti broj opasnih materija i uticaće na otkirvanje novih materija manifestovanih fizičkim poljem.

U ovoj disertaciji je razmatrana procena industrijskih i transportnih rizika na konkretnim studijama slučaja. Industrijski rizik je interpretiran kroz fenomen fragmentacije procesne opreme, dok su transportni rizici analizirani kroz model očekivanja akcidenata usled iskliznuća voza. Rezultati ovih istraživanja su prezentovana široj naučnoj zajednici, a njihova sistematska verifikacije je izvršena na bazi raspoloživih akcidentnih podataka. Fragmentaciona analiza je bazirana na originalno razvijenom metodološkom pristupu za procenu geometrijskih i kinematskih parametara fragmenata. Definisane su raspodele broja i mase generisanih fragmenata usled BLEVE efekta. Procenjeni su najverovatniji oblici generisanih fragmenata i pravci inicijalnih brzina. Trajektorije fragmenata su određene preko inercijalnog modela uzimajući u obzir fluktuacioni uticaj otpora vazduha i potiska. Fragmentacioni model je generalno primenjiv za sve tipove eksplozija koje su posledica prekoračenja kritičnog pritiska, nezavisno od oblika procesne opreme. Fragmentacioni rizik na distancama između 400 m i 600 m po $1m^2$ ugroženog objekta (mete) iznosi $(1,45-1,9) \cdot 10^{-6}$. Aleatorička neizvesnost karakteriše generisanje jednog elementa (nezavisno od njegove mase) i delimično slučaj generisanja dva fragmenata (ako su zbirne mase između 1300 kg i 2225 kg). Neizvesnost fragmentacione procene se kreće oko 12,5%. Železnički transportni akcidenti su analizirani Bayes-ovim klasifikatorom čiji uticajni parametri ovuhvataju bruto masu voza, brzinu voza i temperaturu vazduha. Analiza transportnih rizika je sprovedena na uzorku od 38 akcidenata iz FRA baze podataka, a koji su se desili u periodu 2006-2015. Verovatnoća nastanka transportnih akcidenata sa opasnim materijama usled iskliznuća voza se kreće između $(2-4) \cdot 10^{-5}$, a verovatnoća da neće doći do akcidenta u opsegu (0,05052-0,11427). Neizvesnost železničkih transportnih akcidenata sa iskliznućem voza se kreće između 88,57 % i 94,93 %. Visok procenat neizvesnosti transportnih akcidenata pokazuje da pouzdana procena rizika zahteva primenu naprednih metoda, poput Dempster-Shafer teorije.

Kompleksnost procene rizika zahteva dobro organizovan i osmišljen metodološki pristup za identifikaciju aleatoričke i epistemičke neizvesnosti. Procena graničnih vrednosti verovatnoća je baza za uključivanje neizvesnosti u proceni rizika i dalji pravci razmatranja ove tematike zahtevaju primenu Dempster-Shafer teorije.

ABSTRACT

The tendency of civilization towards social progress is conditioned by technological advances that are followed by the risk of material losses. Modern technological innovations require that hazardous materials systems make a significant share of production and logistics capacities. The geopolitical strategies of the leading world powers rely significantly on hazardous materials systems in achieving their strategic goals. Introduction of new technologies creates a growing need for additional resources, which affects the permanent increase in the number of dangerous materials. Technologies of the future will not reduce the number of dangerous materials and will affect the discovery of new materials manifested by physical field.

This dissertation examines the assessment of industrial and transport risks in concrete case studies. Industrial risk is interpreted through the phenomenon of process equipment fragmentation, while transport risks are analyzed through the model of accidents expectation caused by train derailment. The results of these studies were presented to wider scientific unions, and their systematic verification was performed on the basis of available accidents. Fragmentation analysis is based on the originally developed methodological approach for the assessment of geometric and kinematic parameters of fragments. Distribution of the number and mass of the generated fragments due to the BLEVE effect is defined. The most probable forms of generated fragments and the initial velocity directions are estimated. Fragments trajectories are determined by an inertial model taking into account the fluctuation effect of air and thrust resistance. The fragmentation model is generally applicable to all types of explosions resulting from the exceeded critical pressure, regardless of the process equipment shape. Fragmentation risk at distances between 400 m and 600 m per $1m^2$ of the endangered object (target) is $(1.45-1.9) \cdot 10^{-6}$. Aleatory uncertainty is characterized by generating one element (regardless of its weight) and partly by the case of generating two fragments (if the aggregated mass is between 1300 kg and 2225 kg). The fragmentation estimates uncertainty is around 12.5%. Railway transport accidents were analyzed by Bayes's classifier whose influential parameters include train gross weight, train speed and air temperature. Transport risk analysis was conducted on the sample of 38 accidents from the FRA database, which occurred in the period 2006-2015. The probability of transport accidents occurrence with dangerous materials due to train derailments ranges between $(2-4) \cdot 10^{-5}$, and the probability of nonoccurrence of an accident is in the range (0.05052-0.11427). The uncertainty of rail transport accidents with train derailment ranges between 88.57% and 94.93%. A high percentage of uncertainties in transport accidents show that reliable risk assessment requires the use of advanced methods, such as Dempster-Shafer theory.

The complexity of risk assessment requires a well-organized and designed methodological approach to identify aleatory and epistemic uncertainties. Evaluation of probability limit values is a basis for inclusion of uncertainty in risk assessment, and further consideration of this topic requires the application of the Dempster-Shafer theory.

SPISAK SLIKA

| | | |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Slika 3.1. | Požar procesne opreme izazvan zemljotresom u rafineriji nafte Ichihara, Japan..... | 46 |
| Slika 3.2. | Iniciranje hemijskih udesa..... | 49 |
| Slika 3.3. | Dejstvo radioaktivnosti preko α - čestica, β - čestica i γ - zraka..... | 55 |
| Slika 3.4. | Praktična upotreba osiromašenog urana..... | 56 |
| Slika 3.5. | Internacionalna skala nuklearnih i radioloških događaja (INES)..... | 57 |
| Slika 3.6. | Korozivno (nagrizajuće) delovanje sumporne kiseline na ploči aluminijuma..... | 61 |
| Slika 3.7. | Implementacija GHS u zemljama širom sveta..... | 65 |
| Slika 3.8. | Razvojni put u implementaciji CLP Uredbe (1272/2008/EC)..... | 67 |
| Slika 4.1. | Elementi hemijskog udesa..... | 74 |
| Slika 4.2. | Potpuno uništeno skladište opasnih materija (Tianjin, 2015)..... | 82 |
| Slika 4.3. | Šematski prikaz reaktora u nuklearnoj elektrani Fukushima..... | 84 |
| Slika 4.4. | Uticaj društveno-ekonomskog razvoja na rizik od hemijskih udesa..... | 85 |
| Slika 4.5. | Histogram broja poginulih i povređenih u Kini za period 1995-2015..... | 86 |
| Slika 4.6. | Histogram broja poginulih i povređenih u Kini za period 1995-2015..... | 86 |
| Slika 5.1. | Podela metoda za procenu rizika..... | 92 |
| Slika 5.2. | Generalna konfiguracija matrice rizika..... | 94 |
| Slika 5.3. | Nomogram za analizu rizika..... | 108 |
| Slika 5.4. | Nomogram za analizu opravdanosti troškova..... | 109 |
| Slika 5.5. | Procedura HAZOP metode..... | 115 |
| Slika 5.6. | Primer F-N krive i kriterijumske funkcije društvenog rizika..... | 118 |
| Slika 5.7. | Osnovni koraci i alati CREA metode..... | 121 |
| Slika 5.8. | Stablo otkaza..... | 127 |
| Slika 5.9. | Stablo događaja..... | 128 |
| Slika 5.10. | Arhitektura RBM tehnike..... | 129 |
| Slika 6.1. | Simbolički prikaz domino efekta..... | 135 |
| Slika 6.2. | A priori verovatnoća nastanka hemijskog udesa..... | 145 |
| Slika 6.3. | A posteriori verovatnoća nastanka hemijskog udesa..... | 146 |
| Slika 6.4. | Algoritam metodološkog pristupa za procenu fragmentacionog rizika posuda pod pritiskom | 149 |
| Slika 6.5. | Horizontalni cilindrični rezervoar sa eliptičkim dancima prema DIN 28013..... | 150 |
| Slika 6.6. | Potencijalne frakturalne linije rezervoara..... | 152 |
| Slika 6.7. | Softverska simulacija kritičnih zona rezervoara..... | 155 |
| Slika 6.8. | Raspodela broja generisanih fragmenata usled eksplozije cilindričnog rezervoara.... | 157 |
| Slika 6.9. | Verovatnoća generisanja fragmenata u funkciji raspodele mase..... | 158 |
| Slika 6.10. | Kinematski parametri i sile nakon fragmentacije..... | 162 |
| Slika 6.11. | Funkcija gustine verovatnoća za doet generisanih fragmenata | 165 |
| Slika 6.12. | Komparativna analiza rezultata inercijskog modela naspram [214] | 165 |
| Slika 6.13. | Vizuelizacija simulacionih vrednosti dometa usled fragmentacije cilindričnog rezervoara..... | 165 |
| Slika 6.14. | Verifikacija fragmentacionih gustina prema akcidentnim podacima [208] | 165 |
| Slika 7.1. | Šema uzročno-posledičnog odnosa uslovnih verovatnoća kod iskliznuća voza..... | 177 |
| Slika 7.2. | Raspodela pozicije iskliznuća u vozu..... | 178 |
| Slika 7.3. | Raspodela ukupnog broja iskliznutih vagona..... | 178 |
| Slika 7.4. | Raspodela broja iskliznutih HAZMAT vagona..... | 178 |
| Slika 7.5. | Raspodela broja vagon-cisterni sa ispuštanjem..... | 179 |
| Slika 7.6. | Posledični događaji izazvani iskliznućem..... | 180 |

SPISAK TABELA

| | | |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 3.1. | Klasifikacija opasnih materija prema vrsti opasnosti..... | 45 |
| Tabela 3.2. | Grupisanje industrijskih otrova prisutnih u vazduhu..... | 51 |
| Tabela 3.3. | Kumulativni efekat individualnih supstanci..... | 52 |
| Tabela 3.4. | Posledice izlaganja i uticaja pojedinih toksičnih materija..... | 53 |
| Tabela 3.5. | Korozivne supstance bez dodatnog rizika..... | 59 |
| Tabela 3.6. | Korozivne supstance sa dodatnim rizikom..... | 60 |
| Tabela 3.7. | Klasifikacija opasnih materija prema propisu NFPA 704..... | 64 |
| Tabela 3.8. | Obeležavanje na osnovu klasifikacije hemikalija..... | 68 |
| Tabela 4.1. | Zone ugroženosti prema klasama opasnih materija..... | 74 |
| Tabela 4.2. | Zastupljenost opasnih supstanci pri akcidentima uzrokovanim poplavama.. | 84 |
| Tabela 5.1. | OHSAS standard..... | 95 |
| Tabela 5.2. | Matrica procene rizika MIL-STD-882C standard..... | 96 |
| Tabela 5.3. | Matrica rizika prema AS/NZS 4360:2004..... | 97 |
| Tabela 5.4. | Kvalitativno-kvantitativni odnos izloženosti i bezbednosti..... | 99 |
| Tabela 5.5. | Podmatrice posledica i verovatnoće sa uslovima izloženosti i bezbednosti.. | 100 |
| Tabela 5.6. | Matrica rangiranja rizika prema AUVA i BG metodama..... | 100 |
| Tabela 5.7. | Kvalitativno-kvantitativna zavisnost za faktore rizika prema KINNEY metodi..... | 101 |
| Tabela 5.8. | Kriterijumi za rangiranje rizika prema Kinney metodi..... | 102 |
| Tabela 5.9. | Kvalitativno-kvantitativna zavisnost za faktore rizika prema PILZ metodi... | 103 |
| Tabela 5.10. | Klasifikacioni nivoi za rangiranje rizika prema PILZ metodi..... | 104 |
| Tabela 5.11. | Kvalitativno-kvantitativna zavisnost za faktore rizika prema GUARDMASTER metodi..... | 105 |
| Tabela 5.12. | Numeričke vrednosti za posledice P prema GUARDMASTER metodi..... | 105 |
| Tabela 5.13. | Kvalitativno-kvantitativna zavisnost za faktore rizika prema FINE metodi... | 106 |
| Tabela 5.14. | Kriterijumi za rangiranje rizika prema Kinney metodi..... | 106 |
| Tabela 5.15. | Kvalitativno-kvantitativna zavisnost za faktore rizika prema FINE metodi... | 107 |
| Tabela 5.16. | Gradacija vrednosti rizika sa urgentnošću zahtevanih mera..... | 116 |
| Tabela 5.17. | Matrica rizika prema DMRA tehnici..... | 117 |
| Tabela 5.18. | Kvantifikacija funkcionalne osetljivosti sistema u zavisnosti od uticaja operabilnosti..... | 130 |
| Tabela 6.1. | Značajni hemijski udesi u svetu [205] | 141 |
| Tabela 6.2. | Mehanička i hemijska svojstva za S355J2G3 prema EN 10025-2..... | 151 |
| Tabela 6.3. | Varijante oštećenja segmenata..... | 154 |
| Tabela 6.4. | Konvergenција numeričkih rezultata u ANSYS-u | 155 |
| Tabela 6.5. | Uslovna verovatnoća segmenata i fragmentaciona verovatnoća rezervoara..... | 156 |
| Tabela 6.6. | Tipični oblici fragmenata rezervoara..... | 158 |
| Tabela 6.7. | Zavisnost fragmentacionih parametara od uticaja temperature za masu fragmenta ($m_{fr} = 1300 \text{ kg}$)..... | 161 |
| Tabela 6.8. | Kinematski parametri trajektorija prikazanih na slici C1..... | 164 |
| Tabela 6.9. | Raspodele dometa fragmenata po sektorima u funkciji fiksnih i varijabilnih parametara..... | 164 |
| Tabela 6.10. | Uticaj kinematičkih parametara na visinu objekta..... | 166 |
| Tabela 6.11. | Verovatnoće fragmenacije na segmentima rezervoara u funkciji broja fragmenata..... | 167 |
| Tabela 6.12. | Polusektorski uglovi fragmentacionih sektora..... | 167 |
| Tabela 6.13. | Bezbedne zone za pojedine vrste eksplozivne fragmentacije..... | 168 |
| Tabela 7.1. | Broj železničkih vagona koji odgovaraju događajima iskliznuća | 181 |
| Tabela 7.2. | Verovatnoća železničkih akcidenata preko verovatnoće rednih događaja | 181 |
| Tabela 7.3. | Karakteristični akcidentni parametri: 2006-2015 | 183 |
| Tabela 7.4. | Verovatnoće katastrofalnih akcidenata..... | 184 |

SPISAK SKRAĆENICA

Opšte oznake

| | |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ADN | Evropski sporazum o međunarodnom transportu opasnog tereta unutrašnjim plovnim putevima |
| ADR | Evropski sporazum o međunarodnom drumskom transportu opasne robe |
| AEF | Učestalost abnormalnih događaja |
| AFETAC | Softver Analiza efekata požara na vagon cisternama |
| AHP | Analitičko hijerarhijski proces |
| AIChE | Američki institut hemijskih inženjera |
| ALARP | Onoliko nisko koliko je razumno izvodljivo |
| API | Američki institut za naftu |
| API RP 571 | Mehanizmi štete koji utiču na fiksnu opremu u rafinerijskoj industriji, preporučena praksa koju je razvio i objavio API |
| ARS | Akutni radijacijski sindrom |
| ATHEANA | Tehnika za analizu ljudske greške |
| ASME | Američko društvo mašinskih inženjera |
| ASP | Akcidenti prekursori |
| AUVA | Metoda Austrijskog udruženja proizvođača celuloze i papira |
| B | Broj osoba koje su istovremeno izložene opasnostima |
| bar | Jedinica mere za pritisak |
| BLEVE | Eksplozija para tečnosti u stanju ključanja |
| Bpd | Barela po danu |
| BPR | Britanske rafinerije nafte |
| BG | Metoda udruženja nemačkih inženjera |
| CF | Faktor troškova |
| CFD | Računarska fluidna dinamika |
| CI | Indeks posledica |
| COMAH | Propis o sprečavanju značajnih akcidentnih hazarda |
| CSB | Komisija za hemijsku bezbednost SAD |
| CREA | Metodološki pristup za kvantitativnu analizu rizika |
| CREAM | Kognitivna pouzdanost i metod analize greške |
| DC | Stepen korigovane vrednosti |
| DMRA | Tehnika procene rizika matricom odlučivanja |
| DSEAR | Regulativa o eksplozivnoj atmosferi zapaljivih supstanci |
| DyPASI | Dinamička procedura za identifikaciju atipičnih scenarija |
| EA | Agencija za životnu sredinu |
| ETA | Analiza stabla događaja |
| F | Faktor ekspozicije (izloženosti) štetnom uticaju |
| FACTS | Baza podataka |
| FFTA | Fuzzy analiza stabla otkaza |
| FHIA | Integrisana FMEA analiza |
| FMEA | Analiza načina, efekata i kritičnosti otkaza |

| | |
|------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| FMECA | Vrsta otkaza, efekti i kritična analiza |
| FRA | Federalna Uprava Železnica SAD |
| FTA | Analiza stabla grešaka |
| GD | Gausova disperzija |
| GHS | Globalno harmonizovani sistem |
| HAZID | Identifikacija hazarda |
| HAZOP | Studija opasnosti i operativnosti |
| HEAT | Tehnika analize ljudske greške |
| HEART | Analiza ljudske greške i tehnika redukcije |
| HEIST | Identifikacija ljudske greške i sistemski alati |
| HFACS | Analiza ljudskog faktora i sistem klasifikacije |
| HFEA | Analiza događaja ljudskog faktora |
| HPI | Hemijska procesna industrija |
| HRS | Hronični radijacijski sindrom |
| HSE | Zdravlje, bezbednost i životna sredina |
| HTA | Hijerarhijska analiza zadataka |
| ICAOTI | Tehnička uputstva za bezbedan transport opasne robe u vazдушnom saobraćaju |
| IFCE | Alat procene inherentnih posledica požara |
| ILO | Međunarodna organizacija rada |
| IMDG-CODE | Međunarodni kod za transport opasne robe pomorskim brodovima |
| JAFSE | Japansko udruženje vatrogasnih nauka i inženjerstva |
| LOPA | Nivoi analize zaštite |
| MADM | Višeatributno odlučivanje |
| MAH | Glavni akcident |
| MARS | Baza podataka |
| MCAA | Akcidentna analiza maksimalne verodostojnosti |
| MHIDAS | Baza podataka |
| MIMAH | Metodologija za identifikaciju značajnih akcidentnih hazarda |
| NFPA | Nacionalna asocijacija za zaštitu od požara |
| OSH | Bezbednost i zdravlje na radu |
| P(HS)R | Propis o planiranju (opasnih supstanci) |
| PAA | Analiza prošlih akcidenata |
| PAR | Proporcionalna starosna redukcija |
| PBM | Probabilističko maseni metod |
| PEHD | Polietilen visoke gustine |
| PHA | Analiza procesnih hazarda |
| PHAST | Softver za verifikaciju dobijenih rezultata primenom AFETAC |
| PID | Dijagram koji se koristi u procesnoj industriji |
| PRAT | Proporcionalna tehnika procene rizika |
| PRHI | Procesna procena zdravstvenog indeksa |
| QADS | Kvantitativna procena domino scenarija |
| QRA | Kvantitativna procena rizika |
| R | Rizik |

| | |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| RBD | Blok dijagram pouzdanosti |
| RBI | Rizik baziran na nadzoru |
| RBI&M | Pregled baziran na riziku i održavanje |
| RBM | Održavanje bazirano na riziku |
| RED | Rizik u ranom projektovanju |
| RID | Pravilnik za međunarodni železnički transport opasnog tereta |
| S | Ozbiljnost oštećenja |
| SEVESO I/II | Direktive Evropske unije koje imaju za cilj da kontrolišu glavne opasnosti od hemijskog udesa |
| SFHI | Požarno hazardni indeks supstance |
| SHIPP | Identifikacija hazarda sistema, predviđanje i prevencija |
| SMP | Procedura stepenaste matrice |
| SRFT | Tabela faktora bezbednosnog rizika |
| SMP | Procedura stepenaste matrice |
| SSA | Simulacija slučajnih nesreća |
| STEP | Planiranje sekvencijalnih vremenskih događaja |
| THERP | Tehnike za ocenu predviđanja ljudske greške |
| UN | Ujedinjene nacije |
| VCE | Eksplozija gasnog oblaka |
| V | Verovatnoća pojave nepoželjnog događaja |
| U | Učestalost i vreme izlaganja opasnosti |
| P | Posledice nastanka incidenta |
| WRA | Ponderisana (težinska) analiza rizika |

Hemijski simboli (elementi)

| | |
|------------------------------------|--------------------|
| H₂S | Hidrogen-sulfat |
| H₂SO₄ | Sumporna kiselina |
| LNG | tečni prirodni gas |
| N | Azot |
| Ni | Nikl |
| O | Kiseonik |
| Pt | Platina |
| Re | Renijum |
| S | Sumpor |
| SO₂ | Sumpor-dioksid |
| TNG | Tečni naftni gas |
| TNT | Eksploziv |
| V | Vanidijum |

Fizičke veličine

| | | |
|----------------------|---------------------|---------------------------------------------------------|
| A_D | $[m^2]$ | Normalna projekcija površine fragmenta |
| a_{fr} | $[m/s^2]$ | Ubrzanje fragmenta |
| A_L | $[m^2]$ | Tangentalna projekciona površina fragmenta |
| C | $[m/s]$ | Brzina talasa |
| C_D | $[-]$ | Koeficijent vučne sile |
| C_L | $[-]$ | Koeficijent sile podizanja |
| δ | $[mm]$ | Debljina zida rezervoara |
| D | $[mm]$ | Spoljni prečnik rezervoara |
| E | $[MPa]$ | Modul elastičnosti |
| F | $[N]$ | Dozvoljeni stres |
| G | $[N]$ | Gravitaciona sila |
| h | $[mm]$ | Visina eliptične glave |
| k_D | $[m^{-1}]$ | Koeficijent otpornog ubrzanja |
| k_L | $[m^{-1}]$ | Koeficijent potisnog ubrzanja |
| m_{fr} | $[kg]$ | Masa fragmenta |
| p | $[bar]$ ili $[psi]$ | Radni pritisak rezervoara ($1 psi \approx 0,069 bar$) |
| p_{cr} | $[bar]$ | Kritični pritisak rezervoara |
| R_e | $[MPa]$ | Gornja čvrstoća čelika |
| R_m | $[MPa]$ | Zatezna čvrstoća čelika |
| v_{fr} | $[m/s]$ | Brzina fragmenta |
| W_D | $[N]$ | Sila otpora vazduha |
| W_L | $[N]$ | Potisna sila |
| Δt | $[s]$ | Vremenski period |
| ε_θ | $[-]$ | Radijalna deformacija rezervoara |
| λ | $[m^{-1}]$ | Koeficijent - lambda |
| ρ_{air} | $[kg/m^3]$ | Gustina vazduha |
| σ_x | $[MPa]$ | Aksijalni napon rezervoara |
| σ_θ | $[MPa]$ | Cirkulacioni napona rezervoara |
| φ | $[^\circ]$ | Polarni ugao |
| φ_0 | $[^\circ]$ | Polazni ugao fragmenta |
| V | $[m^3]$ | Zapremina posude |
| Q_c | $[m^3/h]$ | Trajni protok curenja |
| Q_i | $[m^3/h]$ | Periodični protok curenja |
| t | $[h]$ | Vremenski period |
| t_i | $[h]$ | Vremensko trajanje intervala |

1. UVOD

Privreda se uveliko nalazi u fazi intenzivne globalizacije. To ne znači samo povećanje međuzavisnosti regionalnih ekonomija i nivoa tehnološke integracije, već i značajne strukturne promene u oblasti visokorazvijene tehnike i njenog načina funkcionisanja. Savremeni tehnološki razvoj nije, niti će biti moguć bez razvoja opasnih materija. Opasne materije nisu samo produkti tradicionalnih tehnologija, već preduslov za dalji tehničko-tehnološki razvoj društva. Težnja za većim društvenim razvojem, povlači primenu savremenijih tehnologija, a one se ne mogu implementirati u praktične okvire, ako ne postoje odgovarajući vidovi materije. Materija u formi supstance ili fizičkog polja egzistira kroz različite tehnologije, koje često proizvode štetne nuspojave po život i zdravlje ljudi, kao i životnu sredinu. Zato se takve materije klasifikuju kao opasne, jer ih prate povećani hazardi u odnosu na uobičajene materije.

Opasne materije u zavisnosti od vrste mogu pripadati različitim proizvodnim i logističkim sistemima. Česti su slučajevi kada jedna vrsta opasne materije prolazi iz jednog u drugi sistem, kao i kroz više podсистema unutar jednog sistema (npr. transport, skladištenje i distribucija unutar logističkog sistema). Iako je većina opasnih materija u obliku supstanci, nikako ne treba zanemariti ni one opasne materije koje se manifestuju kroz fizičko polje u formi zračenja (radioaktivnost, elektromagnetno polje i sl.). Kada se ove činjenice imaju u vidu, kao i težnja za novim tehnologijama, onda stalni porast opasnih materija postaje neminovnost. Laičko shvatanje da savremene inovacije donose čiste (zelene) tehnologije, upravo demantuje činjenica da se broj opasnih materija iz dana u dan povećava. Savremene inovacije samo pomeraju težište primene opasnih materija iz sfere supstanci ka fizičkom polju, stvarajući tako privid da nove tehnologije doprinose smanjenju hazarda.

Rizik je merljivi parametar hazarda kojima je neki proces ili fenomen izložen. Rizik nije fizička veličina, već apstraktan pojam koji objedinjuje pretnju, verovatnoću pojave neželjnog događaja (neizvesnost), ranjivost, izloženost i posledice. S obzirom da rizik objedinjuje različite fizičke kategorije, on po svojoj prirodi i ne može biti klasična fizička veličina. Pretanja, neizvesnost, ranjivost, izloženost i posledice su različite kategorije vezane za hazard nekog događaja i ukoliko bi rizik bila fizička veličina, ovi parametri bi zahtevali posebne skale za implementaciju u formi rizika. Međutim, ukoliko se rizik posmatra kao apstraktan pojam, onda prethodno navedene faktore rizika (pretnju, neizvesnost, ranjivost, izloženost i posledice) možemo jednostavno pomnožiti i izraziti u normalizovanom obliku preko matrice rizika. Najviše poteškoća u analizi rizika zadaje neizvesnost pojave nekih događaja, pa je težište ove disertacije upravo fokusirano na identifikaciji aleatoričke i epistemičke neizvesnosti.

1.1. KONCEPT DISERTACIJE

Problematika obrađena u doktorskoj disertaciji se može okarakterisati kao multidisciplinarna, jer prevashodno obuhvata tri naučne discipline: industrijsko, hemijsko-tehnološko i transportno inženjerstvo. Konceptcija disertacije je zasnovana na potpuno originalnom metodološkom pristupu koji je razvijen za analizu fragmentacionog rizika. Ovaj metodološki pristup je izložen na studiji slučaja horizontalnog cilindričnog rezervoara, namenjenog za skladištenje TNG-a. U pogledu postavljenih ciljeva, konceptcija ove disertacije je usmerena na rešavanju konkretnih inženjerskih problema u domenu procene rizika i poboljšanju efikasnosti industrijskih postrojenja sa procesnom opremom. Način na koji je to urađeno prevazilazi dosadašnje metode i pristupe, pa je u tom kontekstu posebna pažnja posvećena konceptijskom definisanju disertacije. Konceptijsku podlogu disertacije čine opšte naučno-istraživačke metode među kojima se posebno ističu induktivno-deduktivna metoda, kao i metode apstrakcije i idealizacije. Konceptijski pristup ove disertacije je posebno specifičan po načinu približavanja realnom stanju na fizičkom modelu i identifikaciji neizvesnosti. Konceptijski okvir disertacije je vezan za dve nezavisne problematike: rizik i opasne materije. Kompilacija ovih pojmova zahteva njihovo integrisanje kroz odgovarajuću metodologiju iz čega je proistekao sam naziv disertacije. Podlogu za konceptijsko definisanje disertacije čine sledeće pretpostavke (hipoteze):

- Lakozapaljive supstance su čest uzrok akcidenata,
- Rizik je kvantitativni parametar neizvesnosti,
- Aleatorička neizvesnost se ne može otkloniti,
- Epistemička neizvesnost nestaje sa znanjem i iskustvom,
- Tip neizvesnosti određuje stepen rizika i
- Implementacija metode procene rizika zavisi od vrste problema.

Disertacija je konceptijski podeljena u četiri celine: i) Opasne materije i hazardi, ii) Metode procene rizika, iii) Analiza transportnih akcidenata i iv) Domino efekat i fragmentaciona analiza. Takva konceptcija disertacije je pokazala da je većina standardnih metoda procene rizika teško upotrebljiva za analizu akcidenata sa opasnim materijama. Razlog takve situacije je posledica nedovoljno razvijenih istraživačkih metoda i inženjerskih tehnika integrisanih u metodološki okvir za identifikaciju neizvesnosti. Ne može se govoriti o proceni rizika, a da se pritom ne znaju koji tipovi neizvesnosti prate neki proces. Koncept disertacije je baziran na pronalaženju metodičkog načina koji treba da otkloni glavne nepoznanice o onim fenomenima koji ceo problem uvlače u domen neizvesnosti. Ova disertacija eksplicitno pokazuje da se aktivnost procene rizika, suštinski svodi na identifikaciju tipova neizvesnosti. Nedostatak podataka o nekom procesu ne daje opravdanje da se on razmatra po stohastičkom procesu. Stohastiku prati aleatorička neizvesnost, pa je zato analiza vrste neizvesnosti jedna od najbitnijih aktivnosti tokom procene rizika. Konceptijski pristup na kome je zasnovana ova disertacija nije šablonskog tipa, ali se za jednu grupu problema može svesti pod istu metodologiju, kao što je pokazano na studiji slučaja sa procesnom opremom. Pošto svaki problem prate različiti uslovi u pogledu neizvesnosti, primena probabilističkih metodologija i simulacionih tehnika se nameće kao sasvim logično rešenje u cilju otklanjanja epistemičke neizvesnosti. Identifikacija aleatoričke neizvesnosti je posebno značajna za analizu stohastičkih procesa.

1.2. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Predmet istraživanja disertacije obuhvata fragmentacionu analizu procesne opreme radi procene rizika od potencijalnog nastanka domino efekta. Realizacija ovog obimnog i kompleksnog istraživanja nije bila moguća bez sagledavanja mogućnosti prevashodno postojećih kvantitativnih metoda procene. Iscrpan literaturni pregled u oblasti fragmentacione analize je autoru ove disertacije pokazao da se za ozbiljne rezultate procene rizika mora razviti potpuno novi metodološki pristup zasnovan na jednostavnim, logički jasnim i lako dokazivim pretpostavkama (hipotezama). Kvalitet ove disertacije se ogleda pre svega u predmetu istraživanja, jer ona svoje ciljeve postavlja vrlo visoko i izvan uobičajenih metodoloških obrazaca koji su prisutni u svakodnevnoj teoriji i praksi.

Predmet istraživanja ove disertacije je zasnovan na opštim inženjerskim principima koji su usmereni prema inovativnim rešenjima u domenu projektovanja i eksploatacije procesne opreme. Procesna oprema je neizostavni deo savremenog industrijsko-energetskog i transportnog sistema koji pokreće svet. Težnja za smanjenjem fosilnih goriva u budućnosti neće značajnije doprineti manjoj upotrebi procesne opreme, kada se ima u vidu stalni porast broja opasnih materija i veliki broj tehnoloških inovacija u polju hemijskog inženjerstva. Zato su procesne instalacije bile glavni pokretač industrijskog razvoja u prošlosti i snažan oslonac tehnoloških inovacija sadašnjosti koje će u budućnosti značajno promeniti tehničko-tehnološku i društvenu sferu života. Predmet istraživanja disertacije je baziran na klasičnim metodama naučno-istraživačkog rada uz korišćenje najsavremenijih inženjerskih alata i verifikacionih postupaka. Osnovna naučna metoda koja je primenjena u realizaciji predmeta istraživanja ove disertacije je induktivno-deduktivnog tipa. Predmet istraživanja je generalno fokusiran u dva domena: i) procenu rizika i ii) opasne materije. Rizik nije fenomen koji je samo vezan za opasne materije, već čini sastavni deo svakodnevnih aktivnosti. Život sam po sebi nosi neizvesnost, a tamo gde je neizvesnost, tu je i rizik. Što je veći stepen neizvesnosti, to je mogućnost za pouzdanu procenu rizika manja. Pogrešno je shvatanje da između neizvesnosti i rizika postoji proporcijalna podudarnost. Svakako da se jedna od osnovnih hipoteza disertacije upravo odnosila na prethodni stav. Svaka nepoznanica o nekom procesu proizvodi neizvesnost (neodređenost), pa iz takvog nepoznavanja proističe rizik. Svaki pokušaj da se proceni rizik bez prethodne analize neizvesnosti onih događaja koji stvaraju rizik, vodi istraživača na pogrešan put. Zato se u ovoj disertaciji sa posebnom oprežnošću pristupa neizvesnosti svih procesa koji prate krajnji ishod – akcident. Iako je cilj istraživanja analiza rizika, suštinski predmet istraživanja je fokusiran na neizvesnosti. Rizik je apstraktna kategorija osmišljena radi lakšeg poimanja realnih fizičkih fenomena koje su prekrivene velom neizvesnosti. Dakle, neizvesnost je fizička kategorija koja proističe iz mističnosti pojava i procesa usled nedovoljnog saznanja ili same njihove prirode. Zanimljivo je da se sa aspekta rizika na neizvesnost uvek gleda negativno. Međutim, ako svi scenariji koje prati neizvesnost donose dobit, onda nema rizika, bez obzira što postoji neizvesnost (ne znamo šta će se desiti). Ovo najbolje ilustruje stav koliko je rizik apstraktan pojam, stvoren ljudskom fikcijom uz osećaj lične i/ili društvene koristi ne zalazeći mnogo u svoj osnovni faktor – neizvesnost. Literatura mnoge fizičke procese posmatra preko stohastičke raspodele, polazeći od pogrešne hipoteze da su svi nepoznati fenomeni stohastički. Ova disertacija na konkretnom primeru daje odgovor na ovo pitanje, ukazujući da procena rizika najviše zavisi od neizvesnosti procesa.

1.3. CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Osnovni cilj istraživanja koji je sporveden u ovoj disertaciji tiče se fragmentacione analize horizontalnih cilindričnih rezervoara namenjenih za skladištenje TNG-a. Ovaj cilj je proistekao iz značajne zastupljenosti procesne opreme kod akcidenata sa opasnim materijama i poslužio je kao potpora za postavljanje dopunskih istraživačkih ciljeva. Dopunski ciljevi su pre svega značajni za generalnu kvantifikaciju rizika i identifikaciju neizvesnosti. Kvantifikacija rizika je način merenja neizvesnosti i zahteva primenu odgovarajuće metodologije za svaku vrstu problema. Izbor metodološkog pristupa za analizu rizika zavisi od kompleksnosti razmatranog problema. Kompleksne probleme karakteriše hijerarhijska povezanost rizika kroz različite nivoe fizikalnosti procesa, pa se u takvim slučajevima ne može primeniti jednostavna metoda kvalitativne procene rizika.

Polazna osnova svih istraživačkih ciljeva za razmatranje rizika je funkcionalno-strukturna dekompozicija sistema na elementarne celine. Rizik je apstraktan fenomen koji je jedino merljiv preko neizvesnosti, dok je neizvesnost mogućnost pojave nekog ishoda. Zato je najcelishodnija interpretacija neizvesnosti preko probablističkih metoda, jer je verovatnoća formalni način definisanja neizvesnosti. Ako se ove činjenice uzmu u obzir, onda su probablističke metodologije sasvim logičan izbor u analizi rizika. Međutim, probablistika je samo potreban uslov, ali ne i dovoljan. Istraživački ciljevi u domenu procene rizika opasnih materija su vrlo jednostavni, logički jasni i odavno poznati u teoriji i praksi. Ono što nimalo nije jednostavno je realizacija istraživanja u okvirima tako postavljenih ciljeva.

Realizacija osnovnog cilja nikako nije moguća bez identifikacije fenomena neizvesnosti. Dakle, ono što prethodi svakom riziku je neizvesnost, jer kada ne bi postojala neizvesnost, ona ne bi mogla ni proizvesti rizik. Rizik postoji samo zbog neizvesnosti, a neizvesnosti nije moguće analizirati nekim šablonskim i rutinskim postupkom. Preko ovog stava se može izraziti osnovna ideja ove disertacije, a iz nje proističu istraživački ciljevi vezani za stanje rizika u sistemu opasnih materija. Shodno tome, dodatni istraživački ciljevi obuhvataju:

- Klasifikaciju neizvesnosti kod procesne opreme,
- Identifikaciju fragmentacionog mehanizma,
- Ponašanje fragmenata usled rasprskavajućeg efekat i
- Procenu fragmentacionog rizika.

Ovako postavljene ciljeve nije bilo moguće realizovati postojećim QRA metodama, niti postojećim metodologijama dostupnim u literaturi. Razlog zašto je to tako se nalazi pre svega u fenomenu neizvesnosti. Termin neizvesnosti sam po sebi nosi nedovoljno poznavanje fenomena koji proizvode rizik, pa da bi se mogla napraviti pouzdana procena rizika, potrebno je prvo pokušati otkloniti neizvesnost. To znači da se ne može svaka neizvesnost otkloniti, pa zato treba pokušati. Da li se neizvesnost koja prati neki proces može ukloniti ili ne zavisi od kvaliteta primenjene metodologije i prirode problema. Dakle, metodološki pristup koji je razvijen u ovoj disertaciji je imao ulogu da utvrdi stepene neizvesnosti koje prate mehanizam fragmentacije procesne opreme, pa tek onda da te stepene neizvesnosti kvantifikuje u formi hazarda preko matrice rizika. U pogledu istraživačkih ciljeva, disertacija se može sagledati kroz tri koraka. Prvi korak u realizaciji ovog problema je bio sistematski pregled literature iz oblasti procene rizika u sistemu opasnih materija, posebno u delu fragmentacije procesne opreme.

U tom pogledu se izdvajaju radovi iz sledećih časopisa:

- Journal of Hazardous Materials,
- Journal of Loss Prevention in the Process Industries,
- Proces Safety and Environmental Protection,
- Accident Analysis and Prevention,
- Safety Science,
- Reliability Engineering and System Safety,
- Probabilistic Engineering Mechanics i dr.

Drugi korak je obuhvatio analizu opasnih materija, rizika, teorijsku analizu akcidenata i karakteristike akcidenata sa tipičnim opasnim materijama. U okviru ovog koraka posebno treba pomenuti pregled metoda procene rizika i osnovne fenomene kod domino efekata. Za razliku od prethodnog koraka koji je ukazivao na šarenolikost oblasti procene rizika sa opasnim materijama, ovaj korak je imao za cilj da fokusira istraživačku pažnju prema suštinskim problemima ove tematike.

Treći korak se tiče primene konkretnih metodoloških pristupa, istraživačkih i inženjerskih tehnika usmerenih prema konkretnim problemima u industrijskom i transportnom inženjerstvu. U okviru ovog koraka pristupilo se realizaciji osnovnih ciljeva ove disertacije, vodeći računa o postavljenoj koncepciji i predmetu istraživanja. Finalni rezultati disertacije nisu samo značajni za konkretne inženjerske primere u domenu industrije i transporta, već i za upoznavanje stručne i naučne zajednice sa verifikovanim pristupima za analizu neizvesnosti i rizika.

1.4. STRUKTURA DISERTACIJE

U ovoj disertaciji su shodno postavljenim ciljevima realizovana istraživanja kroz 8 poglavlja. U nastavku su taksativno navedene osnovne karakteristike ovih poglavlja.

U prvom poglavlju je definisan koncept disertacije, predmet i ciljevi istraživanja kao i struktura disertacije. Definisane su osnovne hipoteze disertacije u skladu sa postavljenim ciljevima istraživanja.

Posebno je ukazano na primenjene metode naučno-istraživačkog rada, kao i na suštinske elemente istraživanja koje su realizovane u okviru disertacije.

U drugom poglavlju je dat sistematski pregled 250 referenci koje pokrivaju tematiku opasnih materija, procene rizika i analize akcidenata, među kojima se nalazi znatan broj iz procesne opreme. Ovo poglavlje je imalo ulogu da sagleda sve moguće metodološke pristupe pri analizi industrijskih i transportnih akcidenata, bez obzira na vrstu opasne materije. Iz takve analize je proistekao stav da ne postoji jedinstvena metodologija za analizu rizika sa opasnim materijama i da je suštinski problem vezan za neizvesnost. Ova literaturna saznanja su imala ključnu ulogu u daljem toku kreiranja disertacije.

Treće poglavlje analizira osnovne karakteristike opasnih materija ukazujući na sve specifičnosti pojedinih klasa. Posebno su razmatrane požarno-eksplozivne, toksične, radiokativne i korozivne osobine u okvirima globalno harmonizovanog sistema opasnih materija.

Četvoro poglavlje definiše osnovne pojmove, daje klasifikaciju i kategorizaciju hemijskih udesa, analizira njegove faze nastanka i prikazuje zone ugroženosti po vrstama opasnih materija. U okviru ovog poglavlja su analizirani uslovi nastanka hemijskih akcidenata na tipičnim primerima koji su obeležili noviju istoriju. Definisane su neke metode koje su primenjive za analizu pojedinih akcidenata, kao i pregled svih zakonskih odredbi koje regulišu oblast opasnih materija.

U petom poglavlju je data klasifikacija metoda procene rizika sa posebnim osvrtom na kvalitativne, polukvalitativne i kvantitativne. Ustanovljeno je da bez obzira na veliki broj ovih metoda, njihova primena u analizi akcidenata mora biti krajnje selektivna. To se posebno odnosi na one situacije kada se raspolaže sa oskudnim podacima ili kada su oni neprovereni.

Šesto poglavlje analizira domino efekat hemijskih udesa i ukazuje da sve akcidente ogromnih razmera upravo prati ovaj fenomen. Posebno se stavlja akcenat na lakozapaljive i eksplozivne materije kod kojih je fragmentacija neizostavan proces. U ovom poglavlju je predstavljena originalno razvijena metodologija za procenu fragmentacionog rizika sa lakozapaljivim supstancama. Iako je ova metodologija prezentovana kroz studiju slučaja sa horizontalnim cilindričnim rezervoarom, njena primenjivost nije ograničena oblikom procesne opreme. Osnova takvog metodološkog pristupa je sadržana u probabilističko masenoj metodi, koja je razvijena specijalno za potrebe ove disertacije, a verifikovana je kroz originalni naučni rad pod nazivom *Identification of fragmentation mechanism and risk analysis due to explosion of cylindrical tank*. Značaj takvog istraživanja ne treba sagledavati samo kroz finalne rezultate, već upravo preko kompleksnosti fenomena koji proizvode neizvesnost i otežavaju procenu rizika.

Sedmo poglavlje tretira problematiku transportnih rizika, naročito u delu železničkog transporta. Ovo je posebno važno ako se zna da znatan udeo transporta opasnih materija pripada ovom vidu saobraćaja. U ovom poglavlju je izložen probabilistički model procene rizika, zasnovan na direktnoj primeni *Bayes-ove* formule. Pouzdana procena diskretnih raspodela je realizovana na bazi dovoljno velikog statističkog uzorka iz FRA baze podataka. Značaj ovog poglavlja se ogleda u tome što predstavljeni probabilistički model transportnog rizika daje mogućnost procene verovatnoće transportnih akcidenta za unapred definisane uslove. Model očekivanja nesreća pruža informacije o graničnim verovatnoćama za pojedine akcidentne scenarije, što je osnovni preduslov implementacije ekspertskih sistema.

Osmo poglavlje je rezervisano za zaključna razmatranja i pravce daljih istraživanja ove problematike. Zaključeno je da ova disertacija nije mogla obuhvatiti sve slučajeve procene rizika u sistemu opasnih materija, ali je eksplicitno ukazala na principe kojim se treba rukovoditi pri razvoju konkretnih metodoloških pristupa. Posebno je ukazano na značaj ekspertskih sistema u savremenom načinu rešavanja ove kompleksne problematike, prevazilazeći okvire statističkih metoda i *Bayes-ove* mreže.

Na kraju disertacije je dat pregled citirane literature sa neophodnim priložima.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U SISTEMU OPASNIH MATERIJIA

Hemijsko industrijski kompleksi su vrlo složeni sistemi koji obuhvataju različitu opremu, upravljačko-kontrolne uređaje i operativne procedure, neophodne za normalno odvijanje proizvodno-prerađivačkih procesa. Industrijska postrojenja iz ove branše koriste veliki broj različitih opasnih materija koje mogu biti u vidu sirovina i/ili gotovih proizvoda. Prisustvo opasnih materija u industrijskim postrojenjima, skladištima, transportnim sredstvima ili pri odvijanju manipulativnih aktivnosti se manifestuje preko odgovarajućih hazarda i rizika od nastanka hemijskog udesa. Ispunjenje svih normativa i standarda koji su propisani zakonskom regulativom u cilju prevencije od potencijalnog delovanja hazarda, ne obezbeđuje potpunu sigurnost od nastanka hemijskog udesa. Međutim, da bi došlo do hemijskih udesa moraju biti ispunjena dva opšta uslova (potreban i dovoljan). Potreban uslov se tiče potencijalnog delovanja hazarda, dok se dovoljan uslov odnosi na nepovoljan ishod između svih faktora rizika. Potreban uslov je uvek prisutan u sistemu opasnih materija, a čiji stepen delovanja varira u zavisnosti od vrste hazarda. Dovoljan uslov zavisi od interakcije četiri osnovne grupe faktora rizika: procesne materije, sredstava rada, ljudskog faktora i menadžmenta. Svaka situacija u sistemu opasnih materija je kreirana kao posledica interakcije faktora iz ove četiri kategorije, a čiji je vremenski i prostorni tok definisan u skladu sa njenom osetljivošću prema devijacijama tehnološkog procesa. Procesne situacije neadekvatne upravljivosti karakteriše izrazita osetljivost na devijantno delovanje faktora rizika i pod određenim uslovima mogu dovesti do neželjenog ishoda. Stepem osetljivosti procesnih situacija definiše potencijalnu eskalaciju neželjenih događaja, pošto je u direktnoj korelaciji sa vrstom i obimom posledica usled hemijskih udesa. Devijacija procesne situacije je inicijalni događaj koji narušava normalan način funkcionisanja sistema, a usled eskalacije procesa može dovesti do ozbiljnih posledica u vidu incidenata ili akcidenata. Kategorizacija hemijskih udesa se vrši prema kvalitativnim pokazateljima na bazi kvantifikovanih vrednosti koje reprezentuju intenzitet posledica. Upravljanje rizikom u sistemu opasnih materija je izuzetno zahtevna aktivnost koja se može validno sprovesti samo uz primenu adekvatno razvijene metodologije i multidisciplinarnu analizu svakog podsistema. U okviru ove disertacije se razmatraju sledeći podsistemi opasnih materija: industrijska proizvodnja, transport i skladištenje. Ova podela je izvršena prema osnovnim faktorima rizika koji su prisutni u sistemu opasnih materija i u potpunosti je kompatibilna sa literaturom. Nastavak ovog poglavlja je rezervisan za detaljan pregled najznačajnije svetske literature koja tretira problematiku upravljanja i procene rizika u prethodno pomenutim podsistemima opasnih materija. Potpuno sagledavanje rizika od opasnih materija je moguće samo uz sistemski pristup i fleksibilni metodološki koncept.

2.1. RIZICI PROCESNE INDUSTRIJE

Procesna industrija zauzima centralno mesto u distributivnoj mreži snabdevanja, zbog svoje specifične uloge u sistemu opasnih materija. Generalno, savremena industrijska proizvodnja se ne može zamisliti bez produkata procesne industrije koji u drugim industrijskim granama uglavnom služe kao sirovinska baza. Tendencije porasta industrijske proizvodnje i povećanje asortimana proizvoda su samo dodatno učvrstile pozicije industrijskih procesnih kompleksa. Funkcionisanje procesne industrije je vezano za upotrebu opasnih materija kroz proizvodne pogone, kao i njihovo prisustvo u skladištima repromaterijala i gotovih proizvoda. Opasne materije se u većini pogona procesne industrije koriste kao bazne sirovine i/ili sredstva za aktivaciju hemijskih reakcija, dok se finalni proizvodi ne moraju uvek deklarirati kao opasne materije. Takvi produkti se tretiraju kao proizvodi koji u sebi sadrže opasne materije i ne zahtevaju posebne uslove vezane za transport i skladištenje. Mora se uzeti u obzir da ovi proizvodi sadrže minorne količine opasnih supstanci za koje su poželjne izvesne mere predostrožnosti, naročito ukoliko se radi o transportu i skladištenju veće količine robe. U literaturi postoje vrlo oskudna istraživanja oko razvoja metodološki orjentisanih konceptata namenjenim za upravljanje rizikom kod industrijskih kompleksa, transportnih procesa različitih vidova, skladišnih kapaciteta i menadžmenta. Međutim, kada se radi o metodama procene rizika situacija je potpuno drugačija, što najbolje pokazuje činjenica da je u periodu od 2000. do danas publikovano preko 400 radova i to samo u šest vodećih svetskih časopisa relevantnih za analizu rizika kroz različite aspekte istraživanja:

- Journal of Hazardous Materials (JHM),
- Journal of Loss Prevention in the Process Industries (JLPPI),
- Process Safety and Environmental Protection (PSEP),
- Safety Science (SS),
- Accident Analysis and Prevention (AAP),
- Journal of Safety Research (JSR),
- Reliability Engineering and System Safety (RESS) i
- International Journal of Industrial Ergonomics (IJIE).

U ovom odeljku je izvršen pregled dosadašnjih istraživanja i izvan okvira prethodno navedenih časopisa koji su uglavnom vezani za procenu rizika kod industrijskih postrojenja sa fokusom na postrojenja procesne industrije. Prisustvo ogromne količine opasnih materija različitih klasa opasnosti u vidu sirovina, poluproizvoda, finalnih proizvoda i nusprodukata odlikuje tehnološke procese industrijsko hemijskih kompleksa, kao što su rafinerije nafte, petrohemijska i farmaceutska industrija, itd. Tehnološki procesi ovih kompleksa se najčešće odvijaju hemijskim reakcijama koje su praćene ekstremnim uslovima eksploatacije pri visokim pritiscima i/ili temperaturama radnih medijuma i mogu dovesti do akcidenata sa velikim ljudskim i materijalnim gubicima. Hemijska procesna industrija (HPI) je kompleks postrojenja čije je funkcionisanje omogućeno upotrebom visoko hazardnih supstanci tokom odvijanja različitih faza u okvirima operativnih procesa. Iako se intenzivan istorijski razvoj procesne industrije odvija više od 150 godina, zakonski propisi koji regulišu aspekt bezbednosti ove oblasti su nastali u zadnjih 30 godina i to uglavnom nakon velikih akcidenata, kao što su Flixborough (1974), Seveso (1976), Three Mile Island (1979) i Bhopal (1984). Savremena tehnološka dostignuća u oblasti sistema procesne tehnike, automatskog regulisanja i informacionih tehnologija su omogućila veću primenu inteligentnih sigurnosnih sistema kod postrojenja procesne industrije u poslednjih desetak godina.

Međutim, primena sigurnosnih sistema ne isključuje potpunu pojavu akcidenata, već ima svrhu da unapredi upravljanje rizikom u sistemu opasnih materija. Ovu činjenicu najbolje ilustruje podatak da prisustvo sigurnosnih sistema u rafinerijama nafte nije sprečilo mnoge akcidente, koji su samo na području SAD tokom proteklih deset godina prčinili ukupnu materijalnu štetu veću od 10 milijardi \$ [1]. Vrednost materijalnih gubitaka usled akcidenta zavisi od obima proizvodnje i za većinu pogona procesne industrije se kreće između 3-8% u odnosu na ukupnu proizvodnju postrojenja [2]. Glavni problemi savremene procesne industrije u pogledu njihove bezbednosti obuhvataju sledeće faktore [3]:

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U SISTEMU OPASNIH MATERIJIA

- Organizacione strukture nemaju istorijski pregled akcidenata,
- Nedovoljno posvećena pažnja na indikatore glavnih faktora akcidenata,
- Veća kompleksnost tehnoloških procesa kod novijih postrojenja i
- Rastuća potreba za boljim rešenjima i pristupima.

Da su ovi problemi procesne industrije ozbiljno shvaćeni najbolje pokazuje publikacija novijeg datuma koja pravi retrospektivu akcidenata nastalih na Evropskom kontinentu [4]. Dosadašnja istraživanja sigurnosnih aspekata u procesnoj industriji su bazirana na dva osnovna pristupa [5]:

- a) Analizi prošlih akcidenata (Past Accident Analysis –PAA) i
- b) Eksperimentalnim aktivnostima.

Međutim, ova oblast je vrlo specifična što se tiče primene ekperimentalnih postupaka u formiranju, rekonstrukciji i verifikaciji postojećih teorijskih okvira naspram većine drugih naučnih i tehnoloških disciplina [6]. Rizik je apstraktan pojam koji reprezentuje nesigurnost odvijanja procesa usled delovanja brojnih latentnih faktora, što u značajnoj meri ograničava svrsishodnost eksperimenata za predviđanje i prevenciju akcidenata. Ovo je glavni razlog zašto PAA ima prioritetan značaj u HPI i shodno tome predstavlja osnovni alat za analizu akcidenata. Najveći deo literature koji se u prethodnom periodu bavio akcidentnom analizom je koristio PAA koncept, pošto je pažljivom rekonstrukcijom događaja omogućavao identifikaciju aktivizatora, sekvencijalnih događaja i njihovih posledica. PAA koncept je dao značajan doprinos u sticanju korisnih zaključaka na bazi utvrđenih nedostataka abnormalnih situacija, a čiji su indikatori bili baza za razvoj značajnih metodologija i tehnika analize rizika, kao i strategija za prevenciju akcidenta [7-8]. Međutim, uloga PAA koncepta je u dobroj meri anulirana usled niza poteškoća vezanih za sistematizovano evidentiranje svih vrsta akcidenata u prethodnom periodu, a među kojima se posebno ističu sledeći problemi [5]:

- Nedostatak pogodnog mehanizma za izveštavanje o akcidentima i održavanje postojećih arhiva u mnogim zemljama, a naročito tokom XX veka;
- Frizirani izveštaji akcidenata u industrijskim postrojenjima pod državnim kontrolom, radi redukovanja ili potpunog oslobađanja odgovornosti vladinih predstavnika;
- Kontradiktorne verzije toka akcidenta i njihovih uzročnika, kao i nemogućnost forenzičke analize za rešavanje neizvesnosti usled nedostaka nepobitnih dokaza;
- Inherentna nepreciznost kao posledica grube podele evidentiranih akcidenata, pa tako npr. akcidente koje prati požar i eksplozija mogu biti evidentirani prema generičnom osećaju u požar ili eksploziju, bez adekvatnog sagledavanja specifičnosti situacije i
- Nedostatak ili nejasna dokumentacija oko akcidentnih posledica.

U tom smislu evidentiranje i analiza akcidenata predstavlja značajan korak u preventivnom delovanju, ali to u mnogim situacijama procesne industrije nije dovoljno da se spreči nastanak akcidenata. Sumnja u validnost akcidentnih izveštaja nije samo odlika prošlog vremena, jer je pitanje kvaliteta evidentiranih akcidenata današnjice značajno radi implementacije PAA koncepta, sa posebnim osvrtom na tačnost podataka vezanih za prirodu akcidentne situacije i nastale posledice. Odstupanje od ovog principa su tokom poslednjih nekoliko godina obeležili pojedini registrovani akcidenti nastali u razvijenim i tehnološki naprednim zemljama, što je u značajnoj meri izazvalo devalvaciju PAA koncepta i tehnika procene rizika zasnovanih na bazama podataka.

Osnovni predmet istraživanja akcidentne analize se odnosi na stalno aktuelno pitanje nastanka akcidenta iz rutinskih operacija i na prvi pogled sasvim uobičajenih aktivnosti u sistemu opasnih materija. Uprkos velikim ulozenim naporima na identifikaciji mehanizma za nastanak akcidenta i primenu najsavremenijih indikatora nisu stvoreni svi uslovi za potpunu eliminaciju akcidenata u HPI. U tom smislu je posebno značajna identifikacija događaja koji prethode neposrednoj opasnosti od akcidenta (tkz. *prekursora*), fokusirajući se pritom na ograničene resurse sa kojima raspolaže organizacija HPI [8]. U ovom istraživanju je predložen sedmofazni protokol koji na eksplicitan i proaktivan način inicira bezbednosni rizik u postrojenju HPI i pritom ukazuje na upravljivost latentnih parametra koji mogu uzrokovati nastanak akcidenta.

Prednost predloženog protokola je što organizacije HPI mogu direktno svojim resursima poboljšati bezbednost tehnoloških procesa uz sagledavanje izvornih uzroka oštećenja, a ne samo onih koji su bili akteri nekih prethodnih akcidenata. Kada se govori o indikatorima procesne sigurnosti treba imati u vidu da su najznačajna dosadašnja istraživanja sistematizovano izložena od strane [9]. Dosadašnja praksa je pokazala da se odgovor na ovo pitanje može dobiti samo uz multidisciplinarni pristup problema i uključivanje eksperata iz više disciplina postojeće naučno-istraživačke zajednice. Osnovni faktor koji stvara poteškoće pri proceni rizika u savremenoj procesnoj industriji se odnosi na sve veću kompleksnost postrojenja HPI usled tehnološki složenijih i zahtevnijih proizvodnih procesa. Kontinualni tehnološki i sveukupni društveni razvoj na svetskom nivou prate rastući kvantitativni i kvalitativni zahtevi za energijom, hranom, raznim artiklima i hemijskim proizvodima. Ispunjenje ovih zahteva podrazumeva proširenje prerađivačkih kapaciteta i uvođenje novih tehnologija u postrojenja HPI. Međutim svaka modernizacija proizvodnih pogona i primena inovativnih tehnologija stvara uslove za generisanje novih hazarda i samim tim se stvara dodatni akcidentni rizik u okviru kompleksa HPI [10]. Zato deo ostvarene ekonomske dobiti kompanije HPI moraju usmeriti na prevenciju i otklanjanje hazarda koji mogu dovesti do akcidenta. Stopa akcidenata u HPI nema tendenciju smanjenja, bez obzira što je identifikovano oko 95% glavnih uzročnika [11]. Preventivno delovanje na pojavu akcidenata podrazumeva korišćenje postojeći saznanja i iskustava dobijenih primenom PAA koncepta [12]. Osnovni razlog za visoku stopu akcidenata u HPI je neadekvatno izvođenje zaključaka iz akcidentnih izveštaja, pošto je samo $\frac{1}{3}$ akcidenata predmet opsežne analize [13]. Sprovedena istraživanja su pokazala da je najslabija veza povratne sprege upravo u segmentu onih iskustvenih podataka koji se odnose na diseminaciju akcidentnih informacija [14].

Ove publikacije nedvosmisleno govore da postojeći sistem povratnih informacija u kojima su sadržana iskustva i pouke iz akcidenata treba modifikovati, kako bi se na jedan sistematičan način mogle integrisati u metode za analizu rizika. Jedan od preduslova za realizaciju ove ideje obuhvata razvoj metoda za detekciju grešaka u HPI koji je baziran na iskustvu i dobijenim saznanjima iz akcidenata tokom prethodnog perioda [15]. Sporvedeno istraživanje od strane istih autora je pokazalo da značajan doprinos na pojavu akcidenata imaju greške nastale pri projektovanju opreme za HPI [16]. Nuklearna postrojenja, vazdušni i železnički saobraćaj karakteriše najmanja procentualna zastupljenost grešaka nastalih usled projektovanja koje iniciraju generisanje izvornih uzročnika u pojavi akcidenata i iznosi 46% [17]. Konstrukcione projekte odlikuje najveća procentualna zastupljenost greška nastalih pri projektovanju koja utiču na pojavu akcidenata i to u 80 % evidentiranih razmatranih slučajeva [18]. Procentualno učešće konstrukcionih grešaka na pojavu akcidenata u HPI se shodno korišćenom izvoru kreće u opsegu od 50-79 % [11,19-23]. Iako je doprinos konstrukcionih grešaka u pojavi akcidenata očigledno prisutan u mnogim industrijskim oblastima, formiranje njihove jasne slike prati sumnja u validnost sprovedene analize kao posledica subjektivističke procene i uticaja brojnih latentih faktora. Savremena postrojenja HPI obuhvataju vrlo složene tehnološke sisteme čije ponašanje zavisi od dinamičkih procesnih parametara, kao što su: oprema, organizaciona struktura, odluke menadžmenta, operativni radni uslovi, osposobljenost rukovaoca, spoljašnji uslovi okruženja, kao i njihove različite interakcije. Procesne sisteme odlikuje visok stepen interaktivnosti između dinamičkih parametara koji su ujedno i glavni uzročnici brojnih akcidenata. Sigurno funkcionisanje postrojenja HPI zahteva temeljnu analizu ljudskog faktora, tehničkih sredstava, okruženja i organizacionih uslova unutar proizvodnog sistema, kao i sagledavanje njihovih međusobnih odnosa [20]. Akcidentna analiza HPI kompleksa pokazuje da postoji tendencija rasta akcidenata u većem delu sveta, a u prilog lošoj statistici svakako ide i interaktivna kompleksnost između dinamičkih procesnih parametara [21].

Detaljno sagledavanje akcidentnih karakteristika i jasno izražavanje zavisnosti između uzroka i posledica zahteva primenu modela akcidentnog toka. Uloga ovih modela je da obezbede adekvatno objašnjenje o razlogu pojave akcidenata i predstavljaju korisnu tehniku procene rizika. Tok razvoja akcidenata prati lanac ili sekvencijalni niz događaja koji su prouzrokovani oštećenjem jedne ili više fizičkih komponenti i abnormalnom pojavom procesnih parametara [22]. Akcidentni tok obično prate tri koraka: inicijalizacija, propagacija i terminacija, tako da svaki od njih može dovesti do hazardnih situacija [23]. Akcidentni modeli imaju značajnu ulogu u istraživanju i analizi akcidenata, pošto na sistematičan način dovode u vezu uzročne i posledične događaje. Primarni cilj akcidentnih modela je da daju odgovor na dva pitanja:

- a) Zašto se dešavaju akcidenti? i
- b) Kako se javljaju akcidenti?

U literaturi je identifikovano nekoliko vrsta akcidentnih modela koji su prema savremenoj kategorizaciji svrstani u tri podklase: sistematske, formalne i dinamičke [24]. Prve dve podklase predstavljaju kvalitativne modele koji su najčešće deskriptivnog karaktera i predviđene su za mali broj specifičnih situacija. Osnovni nedostatak ovih modela se ogleda u nemogućnosti primene prethodnih akcidentnih podataka u razvoju preventivnih strategija. Međutim, potpuno drugačija situacija je kod dinamičkih akcidentnih modela koje odlikuje jednostavnost usled sekvencijalnog aranžmana i mogućnost predstavljanja nelinearnih interakcija između parametara dinamičkih procesa [25]. U tom smislu, značajan doprinos ima akcidentni model koji je zasnovan na konceptu sigurnosnih barijera, a razvijen je za potrebe naftnih kompanija [26]. Ograničenja ovoga modela se tiču njegove primene koja je rezervisana samo za operativne i tehničke otkaze, kao i na nemogućnost razmatranja drugih događaja inicijalizacije akcidenta, osim ispuštanja ugljovodonika [27].

Nastanak novog akcidentnog modela, poznatim pod nazivom Identifikacija hazarda sistema, predviđanje i prevencija (System Hazard Identification, Prediction and Prevention – SHIPP), ima za cilj da eliminiše ograničenja odnosno nedostatke prethodnog modela uz istovremeno njegovo proširenje kroz inkorporaciju sa drugim faktorima, kao što su organizacija i menadžment [28]. Glavne osobnosti SHIPP metodologije obuhvataju modeliranje svih faktora koji doprinose nastanku akcidenta kroz sedam sigurnosnih barijera, dok se prethodni akcidentni podaci koriste za ažuriranje verovatnoća otkaza svake sigurnosne barijere primenom *Bayes*-ove tehnike. Implementacija SHIPP metodologije je svoju delotvornost potvrdila kroz dve studije slučaja sa TNG postrojenjima i verifikovani rezultati treba da posluže kao podstrek njene masovnije primene u narednom periodu [31-33]. Međutim, najnovija istraživanja u oblasti razvoja i primene dinamičkih akcidentnih modela pokazuju da SHIPP metodologija ima neke nedostatke koji mogu uticati na tačnost dobijenih podataka, a posledica su sledećih uvedenih aproksimacija [25]:

- Eksterni hazardi nisu razmatrani u modelu;
- Model pretpostavlja nezavisnost između uzročnika otkaza unutar sigurnosnih barijera;
- Drugi uticajni faktori koji nisu obuhvaćeni stablom otkaza sigurnosnih barijera se ne razmatraju prema SHIPP metodologiji i
- Nije razmatrana nelinearna interakcija između različitih faktora.

Publikacija koja ukazuje na nedostatke SHIPP metodologije istovremeno predlaže novi akcidentni model koji je zasnovan na nesekvecijalnom tipu barijera, dok se faktori koji doprinose nastanku akcidenta razmatraju kao međusobno zavisni uz njihovu nelinearnu interakciju unutar sigurnosnih barijera [25]. Specifičnost ovog modela se ogleda u sposobnosti procene donjih i gornjih graničnih verovatnoća otkaza sigurnosnih barijera, što je sa aspekta definisanja preventivnih strategija izuzetno značajno. Praveći rekapitulaciju za sva tri dinamička akcidentna modela može se zaključiti da su njihovi zajednički imenitelji vezani sa sledeće činjenice:

- Nastali su u periodu od 2010. do 2016. godine;
- Tradicionalna metoda stabla otkaza je integrisana u akcidentnim modelima;
- Zasnovani su na principu sigurnosnih barijera;
- Ukazuju na kreiranje drugačijih preventivnih strategija u odnosu na tradicionalne načine;
- Polaze od pretpostavke da akcidentni modeli nastali u ranijem periodu (pre 2010. godine) nisu adekvatno odgovorili zadatku i
- Koriste *Bayes*-ovu tehniku, bez kritika u literaturi na njihovu ulogu u modelu.

Prethodno navedene činjenice nedvosmisleno ukazuju da kvalitativni akcidentni modeli koji su uglavnom deskriptivnog karaktera i usko specijalizovani za određeni slučaj primene u praksi, nisu dali zadovoljavajuće rezultate, niti se na bazi njih mogu praviti adekvatne preventivne strategije u HPI. Trenutni pristupi namenjeni za prevenciju gubitaka u HPI su uglavnom zasnovani na korišćenju spoljašnjih slojeva zaštite koji su orjentisani prema organizacionom i menadžerskom aspektu sigurnosti.

Dosadašnje analize su pokazale značajan doprinos tehničkih otkaza i projektantskih grešaka u nastanku akcidenata [29]. Najnovija istraživanja ukazuju da svaki akcident prati u proseku više od dva neorganizaciona kontributivna faktora, kao što su tehnički, tehnološki, projektantski i drugi uticaji [16]. Efikasno otklanjanje ovih nedostataka zahteva izvođenje rekonstruktivnih aktivnosti koje se ne mogu nadomestiti primenom proceduralnih izmena, kao što su odstupanje procesa, redukcija angažovanosti opreme i sl. Mnoge projektno-orjentisane metode procesne sigurnosti imaju ograničenu primenjivost u ranoj fazi projektovanja postrojenja usled nemogućnosti njihovog delovanja tokom odvijanja same procedure, kao što je to slučaj sa HAZOP studijom (Hazard and Operability study), Šta-ako analizom (What-If analysis) i dr. Osnovni nedostatak ovih metoda je potpuno ignorisanje saznanja o kontributivnim faktorima iz ranijih akcidenata, pa je sasvim realno očekivati ponavljanje istih akcidenata u budućnosti. Znatna iskorak u tom pravcu pruža novopredloženi model za identifikaciju kontributivnih faktora HPI koji uključuje tehničke, projektantske i operativne greške [30]. Posebna specifičnost ovog modela je njegova primenjivost kroz ceo životni ciklus procesa, čime su stvoreni uslovi za aktivno delovanje u početnim fazama projektantskih aktivnosti.

Sigurnosne aspekte odvijanja tehnoloških procesa u HPI odlikuje korelativnost između pratećih hazardnih situacija i sveobuhvatnih aktivnosti kontrole i nadzora izraženih preko tehničkih, tehnoloških, organizacionih i sigurnosnih modaliteta upravljanja. Bitno je ukazati da postojanje hazarda i odgovarajućih koncepcija upravljanja sa ciljem redukcije njihovih uticaja, karakteriše povezanost sa širim spektrom saznanja koje se odnosi na ova dva parametra, a što su dosada dokazala brojna akcidentna istraživanja na mnogim situacijama. Bitan segment ovih saznanja se odnosi na metodologiju upravljanja hazardima prema osnovnim informacijama iz akcidentnih izveštaja (baza podataka), utemeljenih na principu da se analizirajući prošlost može planirati odnosno predvideti budućnost [31]. Postojeće metode procene rizika su izrazito limitirajućeg karaktera za predviđanje i razvoj akcidenata u funkciji uticajnih faktora, poput vremena, angažovanih troškova, materijalnih i ljudskih gubitaka, kompleksnosti postrojenja, vrste procesa i dr. Ova situacija postaje naročito alarmantna kada se radi o novim tehničko-tehnološkim postrojenjima, vrlo kompleksnim sistemima i strateškim kapacitetima koje karakteriše oskudnost akcidentnih informacija. Literatura povodom ove problematike sugerise neophodnost razvoja novih metodologija koje bi bile podržane postojećim ili modifikovanim kvalitativno-kvantitativnim metodama [32]. Ovi autori kao sastavni deo razvoja novog metodološkog koncepta predlažu:

- a) Istraživanje implementiranosti postojećih metoda procene rizika u dosadašnjoj praksi,
- b) Racionalnije korišćenje informacija o prošlim akcidentima i
- c) Inkorporativnost tradicionalnih tehnika analize rizika sa nekim kreativnim postupcima, kao što je npr. TRIZ metoda [33].

Postrojenja HPI su kompleksni tehničko-tehnološki sistemi čije projektovanje, funkcionisanje i održavanje zahteva visok nivo znanja iz različitih naučnih disciplina, uključujući i aspekt procesne bezbednosti. Visok stepen kompleksnosti i mogućnost precizne procene stanja su karakteristike sistema koje odlikuje skoro međusobna isključivost i potpuno je izvesna kod tehničko-tehnološki složenih sistema [34]. Zato su kompleksnost tehničko-tehnoloških postrojenja i sposobnost ljudskog faktora za njihovom adekvatnom procenom stanja u različitim operativnim režimima dva kontradiktorna parametra unutar sistema opasnih materija. To znači da kompleksnija postrojenja HPI prate veće poteškoće oko njihove verodostojne procene rizika i obratno. Dosadašnja praktična iskustva jasno ukazuju da su subjektivne ekspertske informacije neizostavni deo svake metode ili modela za procenu rizika unutar postrojenja HPI. Na osnovu ovoga se može zaključiti da su kompleksnost tehničko-tehnoloških sistema i subjektivnost eksperata osnovni faktori koji otežavaju proces analize hazarda i izvođenje precizne procene rizika za postrojenja HPI. Procesnu industriju odlikuje izrazita tehničko-tehnološka dinamičnost čiji kontinualni razvoj projektivnih metoda i operativnih tehnika za efikasnije odvijanje procesa karakteriše preventivno okruženje hazarda sa značajnim rizikom po ljude, opremu, zalihe, neposredno okruženje postrojenja i životnu sredinu. Ovi preventivni sistemi su naročito izraženi u rafinerijama nafte i petrohemijskoj industriji unutar kojih se odvija manipulacija širokog spektra opasnih materija sa značajnim uticajem hazarda i to uglavnom iz klase zapaljivih i toksičnih supstanci.

Prethodno je konstatovano da pojava velikih akcidenta u procesnoj industriji beleži konstantni rast tokom zadnjih deset godina, a veliku zastupljenost u kreiranju takvih tendencija imaju rafinerijski i petrohemijski kompleksi [35]. Zato je nastavak pregleda o rizicima u HPI rezervisan upravo za ove komplekse sa fokusom na rafinerijske akcidente i procesnu sigurnost njihovih postrojenja.

Akcidenti u savremenim rafinerijama nafte su retke pojave, ali kada nastanu najčešće prouzrokuju katastrofalne posledice. Ovu činjenicu najbolje ilustruje akcident koji je nastao 23. marta 2005. godine unutar Britanske rafinerije nafte (British Petroleum Refinery – BPR), locirane na teritoriji SAD u gradu Texas City [36]. Akcident u BPR-Texas City se prema svim kriterijuma svrstava u najveću tehnološku katastrofu koja se desila u novijoj istoriji SAD i nesumnjivo je obeležila poslednju dekadu hemijskih udesa na svetskom nivou. BPR-Texas City je jedna od najvećih i najkompleksnijih svetskih rafinerija sa 30 procesnih jedinica, koja se prostire na 1200 jutara sa kapacitetom prerade od 460000 *bpd*, dok mogućnosti dnevne proizvodnje samo benzina iznose oko 11 miliona galona, pored dizela, avio goriva i petrohemijskih sirovina uz angažovanje 1600 stalno zaposlenih radnika [36]. Akcident je nastao u postrojenju izomerizacije, čiji tragični bilans posledica obuhvata 15 poginulih, 66 teško i 114 lakše povređenih radnika, dok je intenzivna rekonstrukcija rafinerijskog postrojenja trajala punih godinu dana i procenjena je na oko 1,5 milijardi \$ [37]. Ovaj akcident odlikuju dve specifičnosti [36]:

- a) Trenutak akcidenta je obeležilo prisustvo oko 800 dodatnih radnika koji su pripadali izvođaču radova u rafinerijskom kompleksu i
- b) Lista incidenata u rafineriji je pokazala da su nekoliko nedelja pre akcidenta identifikovani incidenti vezani za curenje ugljovodonika u odvodni kanal i požar.

Khan i Amyotte su bili prvi istraživački koji su dve godine nakon katastrofe u BPR-Texas City svoje rezultate publikovali široj naučno-istraživačkoj zajednici koristeći tri različita pristupa za modeliranje rafinerijskog akcidenta uz detaljan opis toka događaja i posledica. Prvi pristup podrazumeva modeliranje scenarija koji obuhvata trenutno ispuštanje isparenja pentana dovodeći do formiranja oblaka pare u poluograničenoj oblasti delimično oivičene preprekama. Ovaj pristup za kreiranje scenarija koristi samo eksplozivno dejstvo, pošto *Scope code* nema mogućnost analize sekvencijalnih događaja kao što je požar. Model eksplozivnog scenarija autori su sprovedli u softveru *Shell Scope 4.1* za zonu prisutnosti eksplozivnog oblaka unutar volumena zapremine 90×90×50 *m*. Autori su konstatovali kompatibilnost rezultata prvog pristupa sa ustanovljenim akcidentnim konsekvencama, što ukazuje da je uticaj eksplozije dominirao nad delovanjem vatre (požara). Drugi pristup akcidentnog scenarija se odnosi na eksploziju oblaka para pentana usled delovanja mlaznog plamena (*CAM code*) koji je modeliran u skladu sa *API R521 code*. Ovaj kod je ugrađen u sistem *FRED 4.0* na bazi koga se izvodi eksplozivno-požarna simulacija akcidenta. Procenjena količina pentana od strane autora je preko 8 *t* i sadržana u oblaku pare rezultira sasvim dovoljnim udarnim talasom da napravi oštećenja u radijusu većem od 70 *m*. Autori su takođe pretpostavili da u istom radijusu postoji letalni intenzitet toplotnog zračenja mlaznog plamena kao posledica isticanja ugljovodonika iz instalacija. Komparativna analiza rezultata pokazuje da drugi pristup podcenjuje nadpritisak udarnog talasa u odnosu na prvi, zato što *Scope code* detaljnije razmatra fenomen kongestije u eksplozivnoj zoni i modeliranju turbulencije u kongestivnoj oblasti. Međutim, delovanje mlaznog plamena nadomešta slabije eksplozivno dejstvo i daje približno isti rezultat kao prvi pristup, a to je potpuno uništenje opreme u radijusu od 70 *m* sa smrtnim ishodom lica ukoliko se nađu u ovoj zoni. Treći pristup modeliranja akcidentnog scenarija su razvili *Khan i Abbasi* i zasniva se na softveru *MAXCRED* [38]. Mlazni plamen se u okviru ovog pristupa razmatra na dva načina:

- a) Ključanje tečnosti i eksplozija oblaka pare usled iznenadne pojave plamena i
- b) Kongestivna eksplozija oblaka pare usled vatrene lopte.

Vrlo je zanimljivo analizirati rezultate delovanja mlaznog plamena, jer su ova dva slučaja često zastupljena kod postrojenja HPI. Autori izvode zaključak da je u prvom slučaju letalno eksplozivno dejstvo izraženo u opsegu od 50-70 *m*, dok je letalno toplotno delovanje izraženo u opsegu od 15-20 *m* sa verovatnoćama fatalnih ishoda od 50-100 %. Ovi rezultati su u dobroj meri saglasni sa rezultatima iz prvog pristupa.

Međutim, rezultati za drugi slučaj daju veći radijus letalnog eksplozivnog delovanja koji se kreće u opsegu od 90-130 *m*, dok je letalno toplotno delovanje znatno izraženije u odnosu na prvi slučaj za istu verovatnoću fatalnog ishoda i deluje unutar radijusa od 180-220 *m*. Razlog za dobijanje znatno većih vrednosti u odnosu na prethodna dva pristupa je posledica modeliranja različitih tipova požara, a kongestivnost utiče na veću turbulenciju i brzinu sagorevanja čime se indukuje pojava dodatnog pritiska. *Khan* i *Amyotte* izvode zaključak da kvantitativna procena rizika (Quantitative Risk Assessment – QRA) ima kapacitet modeliranja realnih scenarija i da je kao takva potpuno primenjiva za poboljšanje procesne sigurnosti i preventivnog delovanja od nastanka akcidenata [36]. Ovo istraživanje nedvosmisleno pokazuje značaj QRA u formiranju akcidentnih modela, ali i ulogu odgovarajućih simulacija za izradu akcidentnih scenarija. Zato procenu rizika u sistemu opasnih materija ne treba samo shvatiti kao obavezu u ispunjenju zakonske regulative, već kao mehanizam za identifikaciju i poboljšanje procesne sigurnosti. Akcident u BPR – Texas City je bio predmet nekoliko akcidentnih analiza kako bi se iz njega izvukle pouke za poboljšanje performansi procesne sigurnosti u HPI širom sveta. Komisija za hemijsku bezbednost SAD (US Chemical Safety Board – CSB) je u dva navrata izradila izveštaje za akcident u BPR – Texas City, među kojima posebno treba istaći onaj iz 2007. godine [39]. Zaključak ovog izveštaja aludira na propuste koji su nastali u bezbednosnoj kulturi kompanije uz nedostatak angažovanja menadžmenta na poboljšanju procesne sigurnosti. Izveštaj otkriva slabe tačke vezane za aktivnosti menadžmenta oko promena u procesu, a tiču se suviše bliskog lociranja privremenih prikolica postrojenjima izomerizacije i desulfatizacije. Razlog za dodatnu zabrinutost je činjenica nesprovođenje onih aktivnosti koje su kroz analizu procesnih hazarda (Process Hazard Analysis – PHA) označene kao neophodne za implementaciju u BPR – Texas City. Očigledno da se ovaj izveštaj isključivo bavio organizacionim propustima usled aktivnosti menadžmenta, dok su tehnički i tehnološki aspekti akcidenta stavljeni u drugi plan.

Palacin-Linan je neposredno nakon akcidenta u formi konačnog izveštaja prezentovao dinamički model događaja koji su doveli do eksplozije rafinerijskog postrojenja [40]. Autor u njemu konstatuje da kompleksnost rada destilacionog tornja unutar postrojenja izomerizacije i nepoznavanje svih parametara procesa na dan akcidenta onemogućava dinamičku simulaciju u softveru *Aspen HYSYS*, navodeći kako je za tu svrhu implementiran *gPROMS*. Međutim, zanimljivo je da su *Manca* i *Brambilla* sedam godina nakon katastrofalnog događaja objavili rad u kome su softver *Aspen HYSYS* upravo koristili za dinamičku simulaciju akcidenta [41]. Oni svoj stav o upotrebi softvera *Aspen HYSYS* zasnivaju na činjenicama da u trenutku akcidenta destilacije nije ni bilo i da je destilacioni toranj u trenutku akcidenta bio ispunjen tečnom fazom ugljovodonika. Autori ove publikacije tvrde da maseni bilans i termalna ekspanzija tečnosti ne mogu razjasniti razloge poplave destilacionog tornja, što je u saglasnosti sa prethodnim izveštajima. Osim toga, autori iznose sumnju da je delimična vaporizacija sirovinke baze imala glavnu ulogu u formiranju parne kape (poput čepa) prouzrokujući povećanje nivoa tečne faze i njeno izlivanje iz destilacione posude [41]. Takođe, iznose svoj stav u vezi događaja koji su prethodili akcidentu i smatraju da je izlivanje ugljovodonika iz destilacionog tornja nastalo kao posledica izdvajanja mehurića iz gasovite faze, zbog prisustva 30 kasete (perforiranih ploča) iznad otvora za dovod sirove nafte kod destilacionog tornja koji su doveli do disperzije sa tečnom fazom. Kao posledica toga se javlja zadržavanje mehurića u tečnoj fazi, dovodeći do povećanja volumena tečne faze. *Manca* i *Brambilla* konstatuju da je ovaj fenomen karakterističan za kasete čiji je prečnik otvora manji od 8 *mm*, što može biti uzrok prelivanja ugljovodonika u destilacionom tornju.

Manca i *Brambilla* sprovode dinamičku simulaciju na primeru strujanja fluida unutar *blowdown* cevovoda, kako bi dopunili oskudnu analizu i zaključke iz prethodnih akcidentnih izveštaja vezanih za ovu problematiku. Ustanovljena je značajna promena termodinamičkih uslova ispuštene smeše iz splitera duž 270 *m* dugog cevovoda koji povezuje pomoćne pritisne ventile sa *blowdown* sistemom. Oni konstatuju da je nelinearni pad pritiska duž cevovoda uzrokovao delimičnu vaporizaciju podhlađene tečnosti koja se ispušta na pomoćnim ventilima sa značajnom redukcijom temperature i gustine ugljovodonika. Simulacioni model *blowdown* cevovoda imao je za cilj da dokaže prisustvo dvofaznog fluida, čime se jedino može objasniti i opravdati isticanje ugljovodonika u obliku gejzera sa vrha dimnjaka *blowdown* posude. Ukazano je da *blowdown* posuda nije uspela u zaustavljanju akcidenta, ne zato što je karakteriše inherentna nesigurnost usled odsutnosti sistema baklje, kako se tvrdi u akcidentnom izveštaju [39], već zbog njenih suviše malih dimenzija.

Ove stavove *Manca* i *Brambilla* obrazlažu činjenicama da se sistem baklje koristi zajedno sa *blowdown* posudom koja inače služi za separaciju težih tečnosti ukoliko ih baklja ne može izgoreti. *Blowdown* posude zbog relativno malih dimenzija nisu u mogućnosti da zaustave sve tečne ugljovodonike iz pogona izomerizacije, pa samim tim ni sistemi baklje nisu dovoljni za prevenciju sličnih akcidenata [41]. Autori u tom smislu predlažu korišćenje dovoljno velike *knockout* posude koja bi se instalirala neposredno ispred sistema baklje. Osnovni nedostatak prethodne studije je nemogućnost uspešne dinamičke simulacije na delu strujnog toka od pomoćnih pritisnih ventila, što autori pravdaju nedostatkom podataka koji se tiču tipa ventila za rasterećenje pritiska i njihovim ulazno-izlaznim procesnim uslovima.

Svesni nedostataka dinamičke simulacije, *Manca* i *Bramilla* sugerišu da naponi budućih istraživanja trebaju biti fokusirani na korišćenje alternativnih modela za izlaganje potpune evolucije akcidentne dinamike. Međutim, potpuno adekvatan odgovor na prethodnu sugestiju daje najnovija studija slučaja o akcidentu koji se desio u BPR – Texas City [37]. U ovom istraživanju se navodi sumnja da će se realizovati sugestija autora iz prethodne studije, tj. da će se inherentno obezbediti suštinske informacije za poboljšanje procesne bezbednosti. *Isimite* i *Rubini* u nastavku kažu da njihov cilj u ovom istraživanju nije validacija dinamičkih simulacionih procesa pri eksploziji u rafineriji Texas City, već usredsređeno preispitivanje različitih barijernih propusta koji dovode do katastrofalnih eksplozija. Zato prema njihovim rečima sve napore treba koncentrisati na kreiranje pouzdanih aktivnih i pasivnih sigurnosnih barijera od čijih funkcija se zahteva daleko više koristi nego u prošlosti. U tom pogledu, ova studija je usmerena na proširenje postojećih dinamičkih akcidentnih modela čiji metodološki značaj nije u predstavljanju egzaktnih simulacija posledica, već u ekstrapolaciji modela koristeći dinamičnu HAZOP studiju. Autori ističu da se mogu dokazati ostvareni benefiti dobijeni korišćenjem takvih metodoloških pristupa i da oni prevazilaze bilo koji uspeh usled razvoja postojećih metoda veće tačnosti, a uključuju i vizuelno predstavljanje kvantifikovanog nivoa rizika usled neispravnosti opreme, neadekvatnih operacionih procedura i sl. Nakon akcidenta u BPR – Texas City je formiran tzv. *Baker-ov* panel na kome je prezentovano 10 preporuka za poboljšanje procesne bezbednosti u HPI [42]. Vrlo značajna preporuka ovog panela se tiče sprovođenja robusne procedure u HPI, poput PHA. Konstantno i konzistentno preispitivanje strategija, procedura i primenjenih tehnika za identifikaciju hazarda obuhvata skup mera radi adekvatnog upravljanja u oblasti procesne sigurnosti. Karakteristike procesne sigurnosti su vezane za postojanje hazarda i jedan od načina njegove identifikacije je primena PHA koncepta.

Rafinerije nafte su vrlo kompleksni sistemi koje karakteriše čvrsta organizaciona povezanost svih njenih podsistema i predstavljaju glavne hazardne kapacitete u okviru HPI. Prerada sirove nafte ima tradiciju dugu skoro 160 godina, a obeležili su je brojni incidenti i akcidenti širom sveta i to najčešće usled požara, eksplozija i isticanja (curenja) ugljovodonika. Sirova nafta u sebi sadrži veliki broj različitih ugljovodonika, poput alkana (propan, butan, heptan, oktan), cikloalkana (naftaleni) i aromata (benzen, toluen) čije prisustvo u oblaku para zavisi od temperature frakcionisanja. Dosadašnja iskustva pokazuju da su eksplozije oblaka para dominantan uzrok katastrofalnih akcidenata sa težištem na one grane procesne industrije kod kojih se prerađuju ili skladište ogromne količine zapaljivih supstanci (rafinerije nafte, petrohemijska industrija i sl.). Fatalne posledice usled eksplozije oblaka para su bile najizraženije u periodu od 1980. do 1990. godine, kada su se desila dva velika rafinerijska akcidenta Texas City (1984) i Piper Alpha (1988), čiji je bilans skoro 1600 poginulih [43]. U periodu nakon ovih događaja beleži se znatan pad akcidenata i fatalnih posledica, što je posledica uvođenja striktnih regulativa i efikasnije obuke zaposlenih, stečenih na iskustvima prethodnih akcidenata. Međutim, da ovo nije dovoljno i da katastrofalni akcidenti nisu samo deo prošlosti najbolje pokazuje Qingdao akcident iz 2013. godine u provinciji Shandong [43]. Akcident je pratila serija eksplozija i požara usled izlivanja približno 2000 t sirove nafte tokom 15 minuta, kroz otvor veličine oko 100 mm na oštećenom delu cevovoda \varnothing 711 mm. Posledice ovog akcidenta su katastrofalne, 62 poginulih, 136 povređenih, 18000 evakuisanih, oštećeno je 66 infrastrukturnih objekata, 200 vozila, kontaminirano je priobalno područje izlivenom naftom i direktna materijalna šteta je procenjena na oko 100 miliona \$. Direktni uzrok oštećenja cevovoda je vezan za zamor materijala usled vibracija obližnjih saobraćajnica. Zona akcidenta bila je iznad odvodnog kanala i to u preseku dve saobraćajnice. Polaganje cevovoda nije realizovano kroz kanal, jer se želeo izbeći korozivni efekat morske vode, pa je zato trasiran ispod saobraćajnice.

Eliminisanje korozivnog efekta kao potencijalnog uzročnika akcidenta je iniciralo prekursore za intenziviranje drugog uzročnog faktora (zamora materijala), što ujedno predstavlja i glavnu specifičnost razmatranog akcidenta. Kada se razmatra problematika korozivnog efekta unutar rafinerijskih kompleksa, treba imati u vidu da su kod postrojenja za regeneraciju sumpora (Sulfur Recovery Unit – SRU), fluidno katalitičkog krekinga i alkilacije, kao i tretmana efluentnih tokova najizraženiji uticaji agresivnih fluida. Sumpor je neizostavni pratilac sirove nafte i njegovim otklanjanjem nastaje gas H_2S koji se posebno nepovoljno odražava na razmenjivač toplote SRU postrojenja [44]. Rafinerijski efluenti su otpadni hazardni sadržaji koji se ne mogu reciklirati, već se različitim tretmanima razgrađuju i ispuštaju u životnu sredinu [45]. Njihov tretman često zahteva ekstremne temperature i pritiske, što se dodatno odražava na korozivni efekat procesne opreme.

Iako je najveći broj akcidenata u rafineriji proistekao iz eksplozije oblaka para, eskalacija takvih akcidenata može biti manifestovana požarima koji shodno tome imaju bitnu ulogu pri uspostavljanju akcidentnog lanca (domino efekta). Požari se isključivo javljaju kao posledica paljenja oslobođene zapaljive opasne materije (ugljovodonika) i mogu inicirati eksplozije, pa je jasno da između osnovnih vidova akcidenata postoji međusobna zavisnost u kontekstu eskalacije inicijalnog događaja. Veliki broj rafinerijskih akcidenata koji su vezani za nastanak požara imaju izrazito štetan uticaj po ljudske živote i na pojavu znatnih materijalnih gubitaka [46]. Najčešći uzroci požara u rafinerijama se javljaju usled loše konstrukcije opreme, neadekvatnih operacionih procedura, slabo procenjenih menadžerskih odluka, akumuliranih grešaka konstruktivnih modifikacija i operativnih aktivnosti, nedostatka koordinacije u procesu komunikacije i dr. Postrojenja sekundarne prerade nafte (fluidno katalitički kreking, izomerizacija, alkilacija i dr.) su generalno osetljivija na pojavu požara, pošto priroda tehnoloških procesa zahteva više radne temperature i pritiska uz izraženiji korozivni efekat. Rezultati PHA tehnike pokazuju da je primera radi kod postrojenja za fluidno katalitički kreking najveći procenat visoko-rizičnih događaja vezano za frakcionator (26 %), regenerator (25 %) i debutanizer (20 %), dok za de-etanizer i TPP triting praktično ne postoji uticaj ovih događaja [47]. Razlozi za ovaku raspodelu visoko-rizičnih događaja se nalaze u održavanju opreme, pa tako otkazi pojedinih komponenti forsiraju veću redukciju u snabdevanju reaktora procesnom sirovinom, dok iste ne budu reparirane ili zamenjene. S druge strane, postrojenje fluidno katalitičkog krekinga može u potpunosti snabdevati reaktor procesnom sirovinom, kad se vrši zamena de-etanizera i TPP tritinga, pa zbog minornog uticaja na proizvodnju katalitički-krekovanog benzina, otkazi ovih komponenti se ne tretiraju kao visoko-rizični događaji [47].

Međutim, da požari mogu izazvati velike akcidente tokom primarne prerade sirove nafte (postrojenje atmosferske destilacije) najbolje pokazuje događaji iz 1999. godine u rafineriji West Malaysia [48]. Istraživanje na studiji slučaja rafinerije nafte Skikda (Alžir) pokazuje da su požari bili akteri u više od 50 % incidenta (akcidenta) tokom perioda od 2002. do 2013. godine [49]. Autori u ovoj studiji izvode zaključak da je u pomenutoj rafineriji neophodno instalirati sisteme za detekciju požara najviših standarda, kao i sprovođenje provera i stalnih pregleda upravljačkih sistema sa fokusom na probleme nastanka požara. Ove činjenice nedvosmisleno govore da zaposleni u Skikda rafineriji nisu imali izgrađenu bezbednosnu svest o požaru, kao ni znanje da efikasno odgovore na događaje koji su prethodili ovim situacijama [49]. Kompleksnost rafinerijskih procesa i priroda lako isparljivih produkata stavlja naftnu industriju pred veliki izazov u pogledu korišćenja različitih tehnika procene rizika za identifikaciju potencijalnih modaliteta otkaza koji mogu ugroziti rad postrojenja. Zato su nadgledanje operativnog procesa upravljanja, obezbeđivanje sigurnog radnog okruženja i svođenje tehničkih otkaza unutar prihvatljivih granica prioriteta mnogih vladinih agencija i neprofitnih stručnih udruženja u formiranju industrijskih priručnika, nadzornih direktiva, standarda i najboljih praktičnih preporuka. Osnovni problem koji se javlja kod većine metoda procene rizika, kao što su FMEA, FTA, ETA, HAZOP i druge, odnosi se na različitu percepciju potencijalnog rizika od strane procenjivača različitog nivoa znanja i iskustva. Međutim, tačna procena rizika je od suštinskog značaja za predviđanje i ublažavanje potencijalnih akcidenta posebno u fazi konceptualnog projektovanja procesne opreme. Ispunjenje ovih zahteva i prevazilaženje prethodno navedenih problema je ostvareno razvojem prediktivne kompjuterizovane metode koja omogućava izbegavanje otkaza usled projektnih nedostataka i poznata je pod nazivom rizik u ranom projektovanju (Risk in Early Design – RED), a specifična je po tome što koristi ograničeni nivo iskustva procenjivača [50].

RED je podržavajući i komplementaran alat drugim PHA tehnikama koje se trenutno koriste u HPI, a njegova prednost se ogleda u generisanju liste preliminarnih procena rizika baziranih na kataloški evidentiranim prethodnim otkazima, čime doprinosi asistenciji projektantima u nedostatku neophodnog iskustva [50]. Ova studija je RED analizom nad skoro 30 velikih akcidenata prezentovala verifikaciju softverske primene za identifikaciju i rangiranje potencijalnih modova otkaza na bazi odgovarajućih akcidentnih izveštaja.

Manipulacija sa velikom količinom opasnih supstanci stvara uslove da HPI bude izložena različitim vrstama pretnji i predstavlja potencijalne ciljeve za dobro promišljene subverzivne aktivnosti terorističkih grupa, kriminalaca i/ili nezadovoljnih radnika. Posebnu osteljivost na ovaj vid delovanja imaju rafinerije nafte, zbog specifičnih tehnoloških procesa i ogromne količine ugljovodonika u proizvodnim i skladišnim kapacitetima. Zato je sasvim opravdano da se pored procesne sigurnosti, razmatra aspekt bezbednosne procene rizika u rafinerijskim postrojenjima. *Srivastava i Gupta* su za tu svrhu predložili novu metodologiju kako bi se za događaje potencijalno katastrofalnih posledica utvrdila izloženost riziku i to kroz scenarijo hipotetičkog napada na rafineriju nafte [51]. Predložena metodologija bezbednosne procene rizika je bazirana na primeni dve metode: tabeli faktora bezbednosnog rizika (Security Risk Factor Table – SRFT) i proceduri stepenaste matrice (Stepped Matrix Procedure – SMP), razmatrajući scenarije za sajber napad, udarni talas u cevovodu, eksploziju, požar, curenje osetljivih informacija, ispuštanje zapaljivih supstanci, najgori uticaj na licu mesta (oštećenje konstrukcije) i najgori slučaj izvan lica mesta (uključujući uticaj na industriju veštačkog đubriva i okolno stanovništvo). Prezentovana metodologija analizira situacije kod kojih požari, eksplozije i toksična curenja generišu razvoj domino događaja vezanih za namerno delovanje (npr. projektilom) na pojedina postrojenja kako bi došlo do potpunog ili delimičnog uništenja kompleksa [51].

Primena savremenih tehnika procene rizika, kao što su HAZOP, FTA, FMCA, LOPA i druge, ne može garantovati odsustvo akcidenata, čak i onih sa katastrofalnim posledicama. Razloge ne treba tražiti samo u ograničenjima ovih metoda, već u nedovoljnom sagledavanju svih aspekata koji su relevantni za retrospektivu sistema opasnih materija. Glavni izvori akcidentnih informacija koje se odnose na HPI su dostupna literatura (studije i izveštaji) i baze podataka, poput IchemeE, MHIDAS, MARS, HCR i dr. Sticanje saznanja na osnovu iskustava prošlih akcidenata za dovoljno dug vremenski period (najmanje 20 godina) je jedan od važnih faktora koji može doprineti poboljšanju procesne sigurnosti. Ovaj aspekt su prepoznale najveće kompanije iz sektora procesne industrije koje svoje eksperte dodatno obučavaju kako bi ovaj koncept uz primenu analitičkih tehnika iskoristili za identifikaciju izvornih uzročnika incidenata (akcidenata) u pogledu tehničkih, organizacionih i ljudskih faktora. Bazirajući se na pristupu učenja iz prošlih događaja [52], razvijen je sistem izveštavanja o izbegnutim nesrećama koji je pogodan za pronalaženje koorespondentne procesne sigurnosti usled eventualnog nedostatka podataka razmatrane industrije [53]. Studija pokazuje da analiza akcidenata u naftnoj industriji, prema bazi podataka FACTS za period od 1980. do 2010. godine, ima rastući trend izuzimajući poslednjih pet godina. Autori prema usvojenoj klasifikaciji konstatuju da 64,8 % akcidenata pripada proizvodnim procesima, zatim 28,9 % organizacijskim efektima i ostatak 6,4 % okruženju. Struktura predložene koncepcije se poziva na činjenicu da je istraživanje akcidenata kao *ljuštenje crnog luka* [54]. Ovaj stav *Kletz* obrazlaže time što ispod jednog sloja uzročnika i preporuka postoji drugi sloj, spoljašnji slojevi su neposredne tehničke preporuke, dok unutrašnji utiču na poboljšanje sistema upravljanja.

Studije novijeg datuma veliku pažnju poklanjaju značaju incidentnih istraživanja neophodnih za preispitivanje njihove uloge u procesu sticanja saznanja o suštinskim faktorima koji dovode do akcidenta. U tom kontekstu, *Vastveit* i *Nja* su tokom šestomesečne opservacije skandinavskih rafinerija nafte intervjuisali 70 zaposlenih, čiji fokus interesovanja obuhvataju istraživanja incidenta vezanih za rupturu *blowdown* cevi od rezervoara vodene pare i sidrenje naftnog tankera koje je moglo dovesti do povrede radnika [55]. Razmatranje ovih incidenta, potpuno različitih po prirodi uzroka, imalo je ulogu da generiše nova i potvrdi postojeća saznanja povezanih sa uticajem korozije na integritet postrojenja i poštovanje propisanih procedura pri sidrenju tankera. Autori sugerišu intenzivnije uključivanje zaposlenih tokom postupka istraživanja incidentnih uzročnika i razvoj direktiva u pogledu obrade istraženih izveštaja od strane naftnih kompanija.

Sprovedena istraživanja nad organizacijama, sposobnim za održanjem zadovoljavajućeg nivoa procesne sigurnosti tokom dužeg vremenskog perioda, ukazuju na postojanje brojnih praksa (procedura) koje su usvojene za postizanje visokog stepena pouzdanosti svih činilaca u sistemu opasnih materija. Ove prakse su često diskutovane pri analizi velikih akcidenata za isticanje standarda procesne sigurnosti kojih se kompanije HPI moraju pridržavati. *Lekka* i *Sugden* konstatuju da su prethodna istraživanja u ovom segmentu dominantno fokusirana na neprofitne organizacije i naglašavaju komparativno malu usmernost istraživanja radi ispitivanja mogućnosti oko značajnije primene prakse visokog nivoa pouzdanosti u komercijalne svrhe [56]. Ova publikacija tretira praznine postojećih analiza koristeći kvalitativni pristup za pronalaženje tipova praksa povećane pouzdanosti implementiranih u naftnoj industriji UK. Zaključci studije su ilustrovani uspešnom primenom praksa povećane pouzdanosti u nekoliko područja, uključujući identifikaciju i kontrolu hazarda, hitnu pripravnost i prikupljanje, kao i u slučaju analize incidenata i približnih sistema izveštavanja [56].

Prethodne publikacije pokazuju da se procesna sigurnost rafinerijskih postrojenja znatno oslanja na adaptirane kriterijume upravljanja u svim fazama životnog ciklusa postrojenja, počev od projektovanja i izgradnje, preko proizvodnih aktivnosti, do eventualne demontaže i zatvaranja postrojenja. Strategije procesne sigurnosti u sistemu opasnih materija su multi-dimenzionalnog karaktera koje uključuju: projektnu filozofiju, politiku održavanja, kao i procedure kadrovske angažovanosti, obuke i evaluacije [57]. Prethodno je konstatovano da preventivno održavanje u pogledu procesne sigurnosti daje najbolje rezultate, ali zahteva velika finansijska sredstva koja smanjuju ukupnu rentabilnost poslovanja. Povećanje ekonomičnosti održavanja zahteva duži radni vek opreme, pa se u tom kontekstu primenjuje rizik baziran na nadzoru (Risk Based Inspection – RBI), kao ekonomski prihvatljiviji koncept naspram preventivnog održavanja [58]. Postrojenja HPI karakteriše znatno prisustvo cevovoda kompleksne konfiguracije, što u velikoj meri stvara poteškoće pri nadzoru u odnosu na drugu procesnu opremu. Primena RBI metodologije je tokom poslednje dve decenije pokazala značajne troškovne benefite uz istovremenu redukciju rizika. Veliki broj različitih cevovoda i ograničeni resursi u pogledu vremena, budžeta i radne snage kod rafinerijskih i petrohemijskih kompleksa, zahtevaju primenu RBI metodologije za sprovođenje optimizacije inspeksijske strategije [59]. Najznačajni parametar sa aspekta implementacije RBI metodologije je vezan za određivanje optimalne frekvencije nadzora cevovoda, koja shodno preporuci API 570 iznosi $\frac{1}{2}$ preostalog životnog veka. Međutim, period između dva inspeksijska angažovanja svakako da zavisi od nivoa rizika i efektivnosti primenjenog metoda kontrole cevovoda, pa se fiksni koeficijent $\frac{1}{2}$ replicira sa faktorom procenjene uverljivosti (0-1) i inspeksijske efektivnosti (0-1), tako da može uzimati vrednosti u opsegu 0-1 [59]. Ovo istraživanje za dve razmatrane studije slučaja ukazuje na dominantnost rizika u rafinerijama nafte, njegovu alociranost među cevovodima i mogućnost neočekivanih otkaza usled intenzivnijeg delovanja degradacionih faktora. Spektar upravljanja analizom otkaza ima strateški značaj unutar rafinerije nafte iz organizacione, inženjerske i ekonomske tačke gledišta. Ekstremi strategijskih spektara obuhvataju:

- a) Najkonzervativniji pristup koji se oslanja na robusni sistem projektovanja, učestalo preventivno održavanje i rani odgovor na upozorenje, kao i
- b) Agresivni pristup koji zahteva predviđanje proizvodnje, jedno-nizni sistem projektovanja, minimalni nadzor i održavanje u cilju ispunjenja maksimalnih proizvodnih kapaciteta sa minimalnim prekidima u radu.

Razlike između ovih pristupa se manifestuju preko neposrednih troškova i nivoa rizika otkaza sistema [60]. Kreiranje alternativnih strategija održavanja koje su koncipirane na minimizaciji rizika od otkaza zahtevaju implementaciju RBM pristupa [61]. Realizacija alternativnih strategija podrazumeva simultanu adaptaciju analize rizika i metoda procene pouzdanosti sistema, kako bi se kroz znatne promene u pogledu izrade servisnih projekata stvorili uslovi za postizanje maksimalne pouzdanosti, pri minimalnim mogućim troškovima. Implementacija prethodnih uslova je zahtevala razvoj metodologije poznate pod nazivom *Kontrola i održavanje bazirano na riziku* (Risk Based Inspection and Maintenance – RBI&M), predložene od ekspertskeg tima koga su činili akademici i predstavnici rafinerija. Struktura RBI&M procedure uključuje 6 modula: identifikaciju prostora, funkcionalnu analizu, procenu rizika, evaluaciju rizika, operativni izbor i planiranje, kalkulacija J-faktora i operativna realizacija [62].

Razmatrajući istorijske podatke koji se tiču jedva izbegnutih akcidenata, operativnih nezgoda, akcidenata na radu i okolini, nastalih u rafinerijama nafte tokom poslednjih godina, ekspertska komisija je predložio matricu rizika radi evaluacije rizika vezanih za kritične događaje i aktivnosti održavanja. RBI&M metodologija definiše upotrebu pet klasa verovatnoća i isto toliko kategorija ozbiljnosti koje uzimaju u obzir četiri uticajna faktora i to: zdravlje i bezbednost, ambijent, ekonomski doprinos i reputaciju [62]. U ovoj studiji je izvršena implementacija RBI&M metoda za dve specifične faze u aktivnostima održavanja kod rafinerija, a vezane su za *turnaround* (neočekivane promene) i upravljanje redosledom poslova. Autori iznose stav da je razvijena RBI&M metodologija u okviru ovog istraživanja korisno poslužila za rešavanje dva značajna problema pouzdanosti rafinerijskih kompleksa [62]:

- a) Mogućnosti personala za analizu kritičnih događaja su ograničene i ne mogu se proceniti detaljno za sve nastale događaje i
- b) Donošenje adekvatnog plana održavanja za sprovođenje redosleda aktivnosti prema definisanom kritičnom nivou događaja.

Treba napomenuti da RBI&M metodologija podržava dinamičke procese koji se mogu kontinualno ažurirati u skladu sa dostupnim dodatnim informacijama i da se može adaptirati za primenu u mnogim drugim situacijama. Prisutnost opasnih materija u HPI se odražava na pojavu različitih hazarda zavisno od vrste manipulativnih aktivnosti pri odvijanju tehnoloških procesa. Hazardi koji iniciraju pojavu prekursora u HPI su uglavnom vezani za ispuštanje (curenje), nekontrolisanu hemijsku reakciju i organizacione propuste. Jedan od glavnih razloga za pojavu akcidenata je nedostatak efikasnog monitoringa procesa i adekvatnih metodoloških okvira koji bi obezbedili rano upozorenje u sistemu opasnih materija. Zato su savremena istraživanja usmerena u pravcu razvoja integrisanih ekspertskih sistema koji bi eliminisali nedostatke postojećih pristupa i omogućili predviđanje abnormalnih situacija tokom procesnog upravljanja. Primena klasičnih prediktivnih metoda zahteva poznavanje pouzdanih informacija o prošlim akcidentnim situacijama koje nisu upotrebljive za prognozu velikih akcidenata, zbog malog statističkog uzorka odnosno oskudnih podataka. Literatura u takvim situacijama predlaže korišćenje pristupa dinamičke procene rizika [63]. Ovaj princip je baziran na stavu da nedostatak informacija o pojavi akcidenata u prethodnom periodu treba nadomestiti jedva izbegnutim akcidentima i incidentnim podacima koji su neophodni za predviđanje performansi procesne sigurnosti odnosno procenu verovatnoće nastanka eventualnih akcidenata. Dinamička procena rizika je novi pristup akcidentne analize u kome je integrisan *Bayes-ov* mehanizam ažuriranih otkaza sistema sa posledičnom pojavom i isti je implementiran na studiju slučaja BPR – Texas City. Predloženi pristup za analizu rizika se klasifikuje u QRA metode, s obzirom da funkcioniše na principu kvantifikacije verovatnoće pojave i nastalih posledica nekog štetnog događaja ili uticaja.

Potreba za pouzdanijom procenom rizika kod nuklearnih kompleksa je inicirala nastanak i razvoj QRA metoda, što najbolje ilustruje njihov značaj u uslovima savremene analize procesne sigurnosti. Akcidenti kod nuklearnih industrijskih objekata su izuzetno retki, ali sa katastrofalnim posledicama, tako da je na raspolaganju vrlo malo akcidentnih podataka. Procena rizika u takvim situacijama je zasnovana na razvoju ažurirajućih alata koji usled nedostupnosti informacija o akcidentima u prethodnom periodu koriste podatke o jedva izbegnutim akcidentima i incidentne podatke [64]. Ovaj pristup procene rizika je razvijen u Oak Ridge National Laboratory nakon akcidenta u nuklearnom postrojenju Three Mile Island kao deo ASP (Accident Sequence Precursor) programa za laku vodu nuklearnih reaktora, pa je u literaturi poznat pod nazivom ASP metodologija [65]. Informacije o incidentima i događajima koji prethode pojavi akcidenata (jedva izbegnuti akcidenti – akcidentni prekursori) se mogu koristiti za dobijanje tačnih estimatora akcidentne učestalosti kada se ne raspolaze sa dovoljnim brojem akcidentnih podataka [66]. Isti autori predlažu poboljšanje estimatora korišćenjem *Bayes-ovog* pristupa koji dopušta *a priori* procenu plauzibilnog opsega verovatnoća vezanih za otkaze sistema i izazivanje akcidenata. Godinu dana kasnije, upravo koristeći *Bayes-ov* pristup je publikovana studija koja procenjuje frekvenciju oštećenja na bazi prethodnih informacija o akcidentu [67]. Kvalitativna procena rizika ne zavisi samo od broja akcidentnih događaja uključenih u analizu, već i od kriterijuma za diferenciju akcidenata i akcidentnih prekursora [68].

Autori u ovoj studiji pokazuju da procenjene akcidentne učestalosti koje su dobijene inkorporacijom akcidentnih prekursora iz baze podataka MARS sa *Bayes*-ovim pristupom daju značajno veće rezultate naspram situacije kada isti nisu razmatrani. Iako je ASP metodologija analize rizika prvobitno bila namenjena nuklearnim kompleksima (nuklearnim elektranama, nuklearnim istraživačkim centrima i sl.), sasvim je opravdana konstatacija o primenljivosti ove metodologije u procesnoj industriji uzimajući u obzir koncepciju ažurirajućih alata [63]. Veliki hemijski udesi koji su se desili u prošlosti (kao npr. Seveso, Italija, 1976) su upravo uticali na implementaciju ASP metodologije za procenu rizika u HPI [65]. Podsticajni rezultati u implementaciji QRA metoda i porast broja velikih akcidenta u prethodnom periodu su uticali na ekstenzivnu primenu kod postrojenja HPI. Inovacije tehnoloških procesa i kompleksnost tehničkih sistema zahtevaju poboljšanje tradicionalnih QRA metoda, kako bi se njihova primena bolje prilagodila savremenim uslovima projektovanja, eksploatacije i održavanja. Najznačajnije QRA metode koje se koriste za procenu rizika u HPI obuhvataju: HAZOP, FMEA, FTA i ETA [7]. Prvo značajnije poboljšanje ovih tehnika se odnosi na razvoj algoritma za automatizovanu računarsku implementaciju ETA metode, čime je omogućena efikasnija primena kod kompleksnih sistema [69]. Analiza stabla grešaka (Fault Tree Analysis – FTA) je tradicionalna tehnika za upravljanje rizikom koja se odnosi na identifikaciju specifičnih hazarda u fokusiranoj oblasti istraživanja. FTA metoda je sveobuhvatna i strukturno koncipirana logička analiza čiji je cilj identifikovanje hazarda i procena njihovih rizika kod kompleksnih tehničkih sistema. Uspešnost sprovođenja FTA metode je uslovljena postojanjem dovoljno pouzdanih podataka, a tehnička praksa često raspolaže sa malim brojem nedovoljno pouzdanih informacija. U takvim slučajevima je neophodna adaptacija FTA metode u fuzzy okruženje i kao rezultat ove modifikacije je nastala metoda pod nazivom Fuzzy analiza stabla otkaza (Fuzzy Fault Tree Analysis – FFTA). Značajno istraživanje u sistemu opasnih materija koje je vezano za proširenje FFTA metode na petrohemijsku industriju obuhvata razmatranje požara, eksplozija i toksičnih oblaka prepoznatih kao potencijalnih hazarda u cilju osiguranja održive proizvodnje [70]. Autori su ovu predloženu metodologiju demonstrirali na studiji slučaja otkaza Deethanizer petrohemijskog postrojenja i konstatovali da korišćenje fuzzy verovatnoća osnovnih događaja može uticati na efikasnije izražavanje neodređenosti sistema. Sprovedena analiza osetljivosti pruža robusne izlaze FFTA metode tako da može obezbediti korisne informacije u cilju poboljšanja sigurnosnih performansi sistema [70].

Dosadašnja istraživanja su pokazala da je analiza načina, efekata i kritičnosti otkaza (Failure Mode Effect Analysis – FMEA) pouzdan inženjerski alat za analizu katastrofalnih događaja [71]. *Labib* je konstatovao da takve tehnike mogu pomoći u kreiranju mentalnih modela namenjenih za opisivanje uzročnih efekata katastrofalnih događaja [72]. *Ishizaka* i *Labib* su na studiji slučaja Bhopal katastrofe predložili novu logičku kapiju kod FTA metode koja pri analizi akcidenata uzima u obzir benefite od korišćenja hibridnih tehnika za njihovu procenu i prevenciju [73]. Prethodno je konstatovano da dosadašnja istraživanja iz oblasti akcidentne analize i prevencije nisu adekvatno podržana iskustvom prethodnih akcidenta, što istraživače dovodi u dilemu oko potencijalne sličnosti različitih akcidenata. Ovom problematikom se detaljno bavio *Labib* koji je zaključio da akcidente nastale u potpuno različitim industrijskim granama karakteriše izvesna sličnost i taj stav obrazlaže kroz akcidente Bhopal i Fukushima [74]. *Labib* u ovoj studiji koristi FTA metodu i Blok dijagram pouzdanosti (Reliability Block Diagram – RBD) i konstatuje da se ista studija slučaja može sagledati iz različitih perspektiva, iako se koristi ista tehnika modeliranja. Autor iznosi osnovne principe kojih se treba pridržavati pri akcidentnoj analizi i obuhvataju: multidisciplinarni pristup, korišćenje modela dovoljne širine i dubine za razmatranje uzročnih faktora, identifikacija izvornih uzročnika i korektna primena *AND* i *OR* kapija [74].

Standardne QRA metode su od sredine 1970-tih uobičajeni inženjerski alat za donošenje odluka u HPI, a koje su vrlo osetljive na neodređenost faktora rizika. Iako u literaturi postoji znatan broj analiza vezanih za QRA metode, svega nekoliko publikacija se odnosi na parametar osetljivosti procene rizika, kao što je prezentovano od strane [75]. Osim toga, validna procena rizika u opštem slučaju zahteva egzaktno poznavanje verovatnoće nastanka akcidentnog događaja i njihovih posledica, što je u mnogim slučajevima povezano sa fenomenom nesigurnosti usled upotrebe nedovoljno pouzdanih podataka. Modeli QRA procene koji tretiraju ovaj fenomen su bazirani na proširenoj analizi rizika u cilju definisanja [76]:

- a) Neizvesnosti vezane za rezultat analize izvedene primenom standardnih kvalitativnih tehnika procene;
- b) Evaluacije uticaja neizvesnosti na verodostojnost dobijenih rezultata i
- c) Svrshodnosti korišćenja u prevenciji rizika, kao i redukciji hazardnih uticaja.

Analizu procesne sigurnosti prate neodređenosti usled razmatrane kompletnosti, sprovedenog modeliranja i korišćenih parametara [77]. U inženjerskim problemima je vrlo izraženo prisustvo fuzzy logike čiji se najveći doprinos ogleda u inkorporaciji sa brojnim metodama, kao što su FTA, AHP (Analytic Hierarchy Process), itd. Adekvatno rešavanje takvih problema zahteva sistematično korišćenje tehnike *Više-atributnog odlučivanja* (Multiple Attribute Decision Making – MADM) pošto iz skupa predefinisanih alternativa treba odabrati optimalnu varijantu za potencijalno konfliktne kriterijume. Fuzzy AHP nalazi veliku primenu u procesnoj industriji za širi spektar analiza koje se tiču izbora optimalnog tehnološkog procesa, postrojenja za uklanjanje i reciklažu gasovitih nusprodukata, tretmana otpadnih voda i slično [78]. Fuzzy logika ima značajnu primenu u analizi procesne sigurnosti za interpretaciju karakteristika neodređenosti i uvođenja korigovanog indeksa rizika relevantnog za identifikaciju reprezentativnog akcidentnog scenarija [77]. Ovi autori zaključuju da integracija fuzzy aspekta sa metodama iz okvira PHA procedure daje preciznije rezultate uz objektivnije sagledavanje realnog stanja. Fuzzy logika predstavlja koristan istraživački alat, pošto omogućava ugradnju u različite metode kako bi se redukovao uticaj neodređenosti. *Paralikas* i *Lygeros* su ovu prednost iskoristili za razvoj fuzzy višekriterijumske metodologije predviđene za klasifikaciju hazarda hemijskih supstanci i instalacija [79]. Predložena metodologija je uvela dva nova indeksa:

- a) Požarni hazardni indeks supstance (Substance Fire Hazard Index – SFHI) koji je fokusiran na hazardne supstance kod velikih akcidenta i
- b) Indeks posledica (Consequences Index – CI) koji se koristi za brzo rangiranje industrijskih postrojenja namenjenih za proizvodnju ili skladištenje opasnih materija.

Potencijalna primena SFHI pokazatelja uključuje procenu supstanci na bazi njihovih instinktivnih osobina, podršku u supstituciji opasnih supstanci sa manjim stepenom opasnosti i uspostavljanje veze sa rizikom u pogledu veličine inherentnosti hazarda opasne supstance [79]. Oblast potencijalne primene CI pokazatelja obuhvata procenu postojećih instalacija kroz njihovo relativno rangiranje sa fokusom na kapacitete sa potencijalno većim oštećenjima, procenu predloženih novih instalacija i brzo rangiranje njihovih lokacija, kao i definisanje rizika u pogledu veličine potencijalnog uticaja akcidenta [79]. Inherentna sigurnost u sistemu opasnih materija je prepoznata kao koristan projektantski pristup za uklanjanje ili redukciju hazarda umesto njihovog upravljanja uz angažovanje dodatnih zaštitnih barijera. Inherentna sigurnost HPI je bazirana na kvalitativnim pokazateljima čiju evaluaciju i analizu prate izvesne poteškoće u pogledu njene kvantifikacije [80]. Primena fuzzy logike u ovoj studiji je iskorišćena za razvoj metodologije koja koristi procese simulacije i sinteze za generisanje inherentno sigurnijih alternativa, kao i njihovu evaluaciju na sistematičan i rapidan način.

Tehniku definisanja nivoa rizika u preliminarnoj fazi procesa projektovanja, koristeći matricu rizika sa dve oblasti koje reprezentuju prihvatljivu i neprihvatljivu zonu, predlaže studija [81]. Prezentovano istraživanje je implemetirano na studiji slučaja akcidenta sa toksičnim ispuštanjem kod postrojenja za dobijanje amonijaka. Prihvatljivost rizika se procenjuje na osnovu modela za izračunavanje ozbiljnosti i verovatnoće nastanka akcidenta koji je integrisan sa simulacionim softverom radi dobijanja procesnih uslova postrojenja neophodnih za preliminarnu fazu njegovog projektovanja. Autori izvode zaključak da uključivanje predložene metodologije u ranoj fazi projektnih aktivnosti doprinosi inherentno sigurnijim postrojenjima. Naznačajniji kriterijum za donošenje odluka tokom preliminarne faze projektovanja hemijskog postrojenja obuhvata definisanje optimalnih tehnoloških parametara. Zato se u postupku procene inherentnog rizika koriste simulacije tehnoloških procesa, poput softvera *AspenHYSYS*, *iCON* i dr. Međutim, praksa je zabeležila brojne akcidente koji su imali katastrofalne posledice po život i zdravlje ljudi, kao i na životnu sredinu [82]. U tom smislu, literatura predlaže metodologiju za procenu inherentnog rizika zaštite na radu sa ciljem rangiranja hemijskih postrojenja prema aspektu izloženosti radnika hazardima [83].

Rangiranje ovih alternativa se sprovodi prema *Procesno usmerenom zdravstvenom indeksu* (Process Route Healthness Index – PRHI) razvijenog za potrebe kvantifikacije štetnosti hazarda po zdravlje ljudi usled potencijalnog oslobađanja opasnih materija i njihove inhalacije od strane radnika [83]. Iako industrijska praksa i zakonodavstvo prave značajnu razliku između zaštite i bezbednosti na radu sa jedne strane i ozbiljnih akcidentnih hazarda sa druge, savremena literatura po ovom pitanju predlaže integrisani pristup procene rizika sa tendencijom formiranja efikasnijeg sistema za upravljanje sigurnosnim aspektom u HPI [84]. Zaštita i bezbednost na radu je fokusirana na specijalnosti zaposlenih, dok se ozbiljni akcidentni hazardi odnose na karakteristike postrojenja. Indeks rizika je pokazatelj izloženosti maksimalnog broja opasnim materijama, ukoliko dođe do pojave akcidenata [85]. Struktura ovog indeksa obuhvata:

- a) Učestalost pojave akcidenata (akcidenata/godišnje);
- b) Hazardni efekat opasnih materija (ugroženih/toni);
- c) Količinu ispuštenih materija (tona/akcidentu) i
- d) Veličinu odnosno kompleksnost postrojenja (broj glavnih procesa).

Proporcionalnost indeksa rizika sa količinom ispuštene opasne materije utiče na intenzifikaciju njegove inherentnosti. Pouzdanost indeksa rizika je u funkciji tačnosti njegovih strukturnih činilaca u čijoj proceni mogu poslužiti odgovarajuće baze podataka ili empirijske formule [85]. *Grazia* i *Bragatto* za ovu svrhu koriste indeks rizika prema ISO 12100:2012 i predlažu njegovu modifikaciju kombinujući vremensku izloženost svakog radnika na svakom postrojenju iz OSH (Occupational Safety and Health) analize sa oštećenjem oblasti iz MAH (Major Accidental Hazard) analize. Time je omogućena kvantitativna procena MAH nivoa rizika za svaku individualnu specijalnost radnika, dok se rezultati mogu koherentno predstaviti prema profilu zanimanja i vrsti postrojenja [84]. Koncept inherentne zaštite radnika je značajno razvijen u poslednjih dvadesetak godina i ima za cilj da redukuje radne hazarde koji mogu imati negativan uticaj na zdravlje zaposlenih u HPI. Trendovi koji prate ovu tematiku su usmereni na razvoj takvih metoda procene inherentne zaštite radnika koje se mogu implemetirati u ranoj fazi projektnih aktivnosti.

Trend uvećanja proizvodnih diverziteta rafinerijskih kompleksa u pogledu postizanja većeg stepena prerade sirove nafte i ispunjenja strogih normativa životne sredine zahteva instalaciju brojnih kompleksnih aktiva. Literatura pokazuje tendenciju rasta akcidenta kod savremenih rafinerijskih kompleksa, iako su bezbednosni standardi u ovoj oblasti podignuti na viši nivo [86]. Takođe, veliki problem kod rafinerijskih kompleksa su enormno visoki troškovi održavanja koji često mogu premašiti operativne troškove. Zato je uvođenje efektivnih strategija održavanja neminovnost kako bi troškovi održavanja bili ekonomski prihvatljivi njihovom redukcijom na 40-60 % od operativnih troškova [61]. Faktori rizika rafinerijskih operativnih procesa obuhvataju verovatnoće nastanka abnormalnih situacija i njihovih posledica koje se odnose na procesnu opremu, zaposlene i životnu sredinu, operativni zastoj, operativnu gotovost rafinerijskih postrojenja, ukupne operativne troškove, kao i troškove održavanja. Literatura predlaže da se interpretacija ovih faktora sprovodi prema riziku baziranom na održavanju (Risk Based Maintenance – RBM), kao pogodnom metodološkom konceptu procene u cilju minimizacije rizika prouzrokovanih otkazima rafinerijskih aktiva [87]. U radu je prikazana komparativna analiza predložene metodologije sa tradicionalnom RBM metodom i konstatovana je njena primenjivost u drugim industrijskim oblastima kada modeliranje rizika prati nedostatak informacija. Implementacija predložene metodologije iz prethodne publikacije je sprovedena na studiji slučaja gasnog postrojenja kod iranskih rafinerija nafte koristeći modul u softverskom paketu *MATLAB*. Modul pomenutog softvera pod nazivom *SIMULINK* je koristan simulacioni alat za dinamičku analizu rafinerijskih procesa, kao što je katalitički reforming [88].

Literaturni podaci pokazuju da rafinerijski kompleksi učestvuju sa 50 %, petrohemijska industrija sa 32 % i gasna postrojenja sa svega 5 % u ukupnom broju registrovanih otkaza HPI [89]. Tehničko-operativna raspoloživost postrojenja HPI je direktna manifestacija kvaliteta održavanja, dok se uticaj hazarda na ljudski faktor u sistemu opasnih materija sagledava posredstvom bezbednosti i zaštite na radu. Kvalitet održavanja postrojenja HPI zahetva implementaciju odgovarajuće strategije, kao što je npr. RBM. Ova strategija se može koristiti u planiranju održavanja doprinoseći poboljšanju procesne sigurnosti uz finansijski prihvatljivu podršku.

HPI obuhvata brojnu opremu koja je izložena ekstremnim radnim uslovima (visoka temperatura, pritisak, korozivno delovanje i dr.), pa su najčešći uzroci njenih otkaza vezani za puzanje i zamor materijala, pojavu naprslina i dr. Aspekt tehničke ispravnosti procesne opreme je u prošlosti obeležilo preventivno održavanje koje se pokazalo kao efikasno u redukciji operativnih troškova i verovatnoće nastanka akcidenata sa katastrofalnim posledicama [90]. Međutim, ono iziskuje znatna finansijska sredstva, pa u poslednje vreme veliku pažnju istraživača privlači RBM strategija održavanja koju su originalno razvili *Khan* i njegov istraživački tim [91]. Naime, tehničke veštine, resursi održavanja i vreme su uvek limitirajući faktori u HPI, tako da se u najvećem broju slučajeva održavanje svodi samo na reparaciju uočenih nedostataka procesne opreme. Iako se reparacijom opreme ista dovodi u funkcionalno stanje, prisutna je izražena podložnost na bržu degradaciju naspram primene principa perfektnog održavanja. Zato je neophodna implementacija imperfektnog održavanja u RBM strategiji HPI [92]. Ovi autori su predložili poboljšanje RBM pristupa zasnovanog na modelu *Proporcionalnog smanjenja starosti* (Proportional Age Reduction – PAR) interpretiranog preko dvoparametarske Weibull-ove raspodele, procenjenih prema evidencionim podacima održavanja. Implementacija RBM strategije uključuje identifikaciju podsistema, procenu rizika, evaluaciju rizika i planiranje održavanja [92]. Inženjerska praksa je pokazala da neadekvatna strategija održavanja može biti uzročnik velikih akcidenata, kao što su Piper Alpha, Texas City i dr. Posebnu osetljivost sa aspekta održavanja pokazuju rafinerije nafte i petrohemijska industrija, pošto svako curenje ugljovodonika iz instalacija generiše više kritičnih prekursora koji mogu dovesti do katastrofalnih akcidenata. Održavanje procesnih komponenti je značajna aktivnost, među kojima treba izdvojiti pritisne sigurnosne ventile, zbog njihove zastupljenosti u rafinerijskim postrojenjima [93]. Autori navode da je propust oko održavanja ovih ventila inicirao nastanak Piper Alpha akcidenta i navode da se na primeru norveških instalacija beleži u proseku jedno curenje godišnje usled grešaka pri izolovanosti cevi i druge rafinerijske opreme ili ponovnom uspostavljanju. Posebno treba naglasiti da preventivno održavanje sigurnosnih pritisnih ventila kao barijernih elemenata u redukciji rizika, predstavlja potencijalni izvor hazarda koji se manifestuje u obliku isticanja (curenja) ugljovodonika iz instalacija [93]. Korozivni efekat opasnih materija (ugljovodonika, kiselina i dr.) je vremenski uslovljen hazard na koji utiče stepen agresivnosti fluida i rezultira ispuštanjem (curenjem) opasnih materija, što je u mnogim slučajevima uzročnik velikih akcidenata. Korozivni hazardi su najizraženiji kod izolovanih zona cevovoda, poznatih pod nazivom *mrtvi krakovi*, unutar kojih se duže vreme ne uspostavlja strujni tok fluida (npr. ispred sigurnosnih ventila).

Tokom poslednjih desetak godina nisu zabeležena istraživanja fokusirana na revidiranje PHA za neapostrofirane hazarde, pa u tom kontekstu značajan napredak predstavlja razvoj metodologije u cilju identifikacije korozivnih efekata nastalih kao posledica *mrtvih krakova* [94]. Kao rezultat ovog istraživanja, autori iznose sprovođenje sledećih preporuka: identifikacija korozivnih posledica devijacijom radnih uslova izvan uobičajenih parametara, povećanje učestalosti inspekcijских nadzora, poboljšanje antikorozivnih svojstava upotrebljenih materijala, povećanje debljine zidova procesne instalacije, kao i rekonstrukcija postrojenja u smislu redukovanja turbulencije i redistribucije antikorozivnog ubrizgavanja. Detaljan pregled vezan za nastanak korozivnog mehanizma i analizu kontributivnih faktora je izložen u *API RP 571*. Svakako da priroda tehnoloških procesa u znatnoj meri utiče na vrstu i stepen korozivnosti procesne opreme koji je usled specifičnosti radnih uslova posebno izražen u rafinerijama nafte i petrohemijskoj industriji. Održivi razvoj petrohemijske industrije zahteva permanentne inovacije na svim nivoima (tehničko-tehnološkim, ekonomskim, ekološkim i društveno prihvatljivim) koje su podržane odgovarajućim funkcionalnim modelima [95]. Svakako da u tim okvirima važnu ulogu imaju hazardi, kao i metode procene koje kvantifikuju njihove rizike u cilju sprečavanja kako akcidenata i incidenata, tako i abnormalnih situacija. Najrasprostranjeniji koncept u proceni rizika HPI odnosi se na *Maksimalnu verodostojnost akcidentne analize* (Maximum Credible Accident Analysis – MCAA), a čije centralno mesto zauzima aspekt kredibilnosti predočenog akcidentnog scenarija. Kvalitativno tretiranje kredibilnosti je zasnovano na subjektivističkim ekspertskim procenama, pa se kao posledica toga javlja značajno rasipanje rezultata procene rizika, sprovedeno za jedno te isto industrijsko postrojenje od strane različitih eksperata. *Khan* i *Abbasi* su razvili kriterijum identifikacije akcidentnog scenarija veće verodostojnosti za procenu rizika [96]. Svrha ovog kriterijuma je identifikacija kredibilnog akcidentnog scenarija iz skupa velikog broja mogućnosti koji je neophodan za izvođenje konsekventne analize.

Time se redukuju troškovi sprovođenja preventivnih mera za akcidentni scenario manje kredibilnosti o trošku akcidentnog scenarija veće verodostojnosti. *Khan* i *Amyotte* su demonstrirali korisnost različitih pristupa QRA tehnike za analizu akcidenta u BPR – Texas City, a čije su karakteristike prethodno diskutovane [36]. Kvantifikacije nivoa rizika u slučajevima kada se primenjuju dinamičke simulacije akcidentata zahtevaju kompatibilnost sa odgovarajućim QRA metodama i moraju biti dinamički koncipirane. Najnovija istraživanja u oblasti dinamičkog modeliranja akcidentata su zasnovana na korišćenju dinamički orjentisanih FTA i ETA metoda [97], kao i dinamičke HAZOP studije [37]. Značajan doprinos u tom pravcu je ostvaren razvojem metoda baziranih na proširenju tradicionalne FTA metode sa vremenskim zahtevima [98]. Najznačajniji rezultati ove studije pokazuju da primena dinamičkog stabla otkaza može redukovati neraspoloživost sistema, npr. pogodnim aranžmanom prekida sigurnosne opreme. Osnovna uloga dinamičke FTA metode nije samo u izboru aranžmana radi obezbeđenja veće raspoloživosti, već u prevenciji takvih konfiguracijskih rešenja koja rezultiraju većim stepenom njihove raspoloživosti. Rezultati prezentovani u prethodnoj studiji pokazuju da je dinamička FTA metoda korisna tehnika za proširenje i poboljšanje postojećih modela, kao i saznanja dobijenih iz probablističkih sigurnosnih procena, pošto vremenski zavisne informacije pružaju veći potencijal za redukciju rizika u postrojenjima HPI.

Modeliranje pouzdanosti sistema sa vremenski diskretnom *Bayes*-ovom mrežom sproveli su *Boudali* i *Dugan*, dok su potencijali primenjene metodologije demonstrirani na primerima pouzdanosti dva sistema [99]. Prethodno navedena istraživanja su uticala na aktuelizaciju problematike predvidivosti akcidentata kod studija novijeg datuma, pošto je upravljanje rizikom u HPI tehnički i tehnološki zahtevna aktivnost koja iziskuje znatna finansijska sredstva. Cilj savremenih istraživanja je sve više okrenut u ignorisanju uobičajenog tradicionalnog stava da su akcidenti pojave isključivo slučajnog karaktera koje se dešavaju same od sebe. Tradicionalno shvatanje akcidentata zahteva od kompanija koje upravljaju postrojenjima HPI angažovanje svih raspoloživih resursa u obezbeđivanju kontramera protiv potencijalnih akcidentata, čime akcidentni prekursori dobijaju kvalifikaciju latentnih faktora i time akcidente u potpunosti čine nepredvidljivim događajima. U tom smislu je realizovano istraživanje eventualne predvidivosti 17 akcidentata u holandskoj hemijskoj industriji koristeći informacije o industrijskim akcidentima širom sveta preuzetih iz baze podataka FACTS [100]. Rezultati ovog istraživanja pokazuju da se informacije akcidentnih prekursora mogu koristiti ne samo za predviđanje akcidenta, već i za njihovu prevenciju. U istoj studiji su razmatrane komparativne karakteristike tehničkih i organizacionih sistema upravljanja sa aspekta predvidivosti ponašanja. Zaključeno je da su tehnički sistemi projektovani za upravljanje samo onih sistema čiji se odziv unapred može predvideti, dok menadžerske i organizacione povratne sprege imaju intenciju upravljanja nepredvidljivim događajima. Analiza 39 akcidentnih prekursora je pokazala veću efikasnost razmatrane procesne sigurnosti za dvostruku povratnu spregu naspram jednostruke, čime je ustanovljena neefektivnost nekoliko elemenata upravljačkog procesa [100]. Normalno odvijanje tehnoloških procesa u HPI zavisi od operativne raspoloživosti odnosno od primenjene strategije održavanja industrijske opreme. Intenzivni uslovi eksploatacije vođeni principom maksimizacije profita zahtevaju adekvatno održavanje kako bi remontovana postrojenja mogla da odgovore strogim tehnološkim zahtevima uz prihvatljive troškove reparacije, a da pritom ne narušavaju sigurnosne normative.

Jedna od savremenih koncepcija održavanja koja se primenjuje u HPI je vezana za *Održavanje bazirano na riziku* (Risk Based Maintenance – RBM). Koncepcija RBM strategije ima za cilj redukciju stepena otkaza opreme i upravljanje aktivnostima oko izbora prioriteta. Važnu operativnu ulogu u realizaciji ovih ciljeva ima metoda pod nazivom *Analiza načina, efekata i kritičnosti otkaza* (Failure Mod, Effects and Criticality Analysis – FMECA). Potencijalna primena FMECA modela u dinamičkom okruženju omogućava kontinualno ažuriranje operativnih događaja i služi za podršku RBM strategiji [101]. Dinamička procena otkaza je novi pristup u analizi pouzdanosti sistema koji omogućava praćenje stanja u realnom vremenu sa posebnim osvrtom na pojavu abnormalnih situacija. Implementacija ovog pristupa se pokazala kao vrlo uspešna tokom postupka revidiranja devijacija i analize otkaza sistema u HPI [102]. Klasični statistički pristupi su u potpunosti nedelotvorni za analizu akcidentata, pošto su to retki događaji koje karakteriše limitiranost raspoloživih informacija u pogledu učestalosti njihove pojave.

Eliminisanje ovih poteškoća zahteva uključivanje *Bayes*-ove tehnike koja obezbeđuje *a posteriori* procene verovatnoća za uzročnike akcidenata u postrojenjima HPI. *Bayes*-ov pristup daje svrsishodna rešenja za predviđanje frekvencije akcidenata, otkaza opreme, analizu njihovih uzročnika i posledica, što predstavlja adekvatan metodološki okvir za integraciju statističkih analiza i QRA metoda u pogledu definisanja *a priori* funkcija. Statistički modeli mogu pružiti analizu akcidentnih prekursora koristeći informacije za širi spekatar incidenata registrovanih u bazama podataka. Identifikacija akcidentnih prekursora utiče na poboljšanje procena odnosno redukovanje prediktivnih grešaka koje su dobijene primenom *Bayes*-ove tehnike. Prethodne činjenice mogu korisno poslužiti prilikom analize pojedinih grana HPI. Predviđanje operativnog rizika prema *Bayes*-ovom modelu i registrovanim incidentima iz baze podataka NRC (National Response Center) pokazuje sporiji rast grešaka operatera naspram otkaza procesne opreme kod petrohemijske industrije u odnosu na druge grane HPI [103].

Međutim, sistem opasnih materija pored HPI obuhvata skoro sve industrijske grane i uslužne oblasti. Opasna materija koja je u najvećoj meri doprinela širenju oblasti opasnih materija izvan HPI se odnosi na tečni naftni gas (TNG). Masovna primena ove opasne materije tokom poslednje dekade je uslovljena proširenjem kapaciteta postojećih i izgradnjom novih TNG terminala. Osim toga, TNG je vrlo zapaljiv ugljovodonik koji sadrži najmanje 85 % metana i potrebno je svega 5 % volumenske koncentracije vazduha da bi se formirala eksplozivna smeša na atmosferskom pritisku. Iako je akcidentna statistika povoljna za TNG terminale u proteklih 40 godina, prethodne dve činjenice utiču na permanentni porast rizika, što za posledicu može imati porast broja akcidenata ove vrste. Osnovni razlog malog broja evidentiranih akcidenata kod TNG terminala nije posledica nepostojanja rizika, već njihova relativno kratka operativna upotreba u odnosu na druge industrijske grane, kao što je HPI. Efikasno upravljanje rizikom podrazumeva primenu odgovarajuće metodologije procene preko koje se sprovodi njegova kvantifikacija. Metodologija koja omogućava kvantifikaciju rizika sa manje napora i vremena od drugih QRA metoda je u literaturi poznata pod nazivom LOPA (Layer of Protection Analysis), a izgrađena je na bazi PHA informacija [104]. Ova studija je tipičan primer procene rizika sa vrlo oskudnim akcidentnim podacima, imajući u vidu prethodne konstatacije vezane za TNG terminale. Procenjena vrednost rizika sa nedovoljnim brojem akcidentnih informacija o TNG terminalima prikazuje statističku nestabilnost, pa se u cilju eliminisanja ovog problema pribegava korišćenju podataka iz drugih industrijskih grana, kao što su rafinerije, petrohemijska industrija, nuklearni kompleksi i dr. Međutim, tako dobijeni rezultati ne bi oslikavali realno stanje rizika kod TNG terminala, zbog toga što su njegovi operacioni uslovi i okruženje potpuno različiti od prethodno pomenutih industrijskih postrojenja. Takođe, može se postaviti pitanje pouzdanosti kvalitativnih informacija preuzetih iz kratkih akcidentnih izveštaja [105]. Zato se primena *Bayes*-ovog koncepta nameće kao neminovnost za procenu rizika u ovim i sličnim situacijama. *Bayes*-ov model utiče na postizanje statističke stabilnosti time što integriše informacije o akcidentima i incidentima iz drugih industrijskih oblasti u formi *a priori* funkcije sa uslovnom verovatnoćom nastanka hemijskih udesa za razmatrane TNG terminale neophodne za dobijanje *a posteriori* verovatnoća [104]. Pomenuti autori su zaključili da je integracija jednostavnosti LOPA metoda i efektivnosti *Bayes*-ovog pristupa uticala na razvoj *Bayes*-LOPA metodologije koja predstavlja korisnu tehniku procene rizika ne samo u okvirima TNG terminala, već i kod drugih industrijskih grana u sistemu opasnih materija. Koristeći iskustva prethodnih studija, *Kalantarnia et al.* su kao predmet najnovijeg istraživanja postavili dva osnovna cilja:

- a) Potencijalnu akcidentnu predvidivost u formi pouzdane probabilističke procene tokom rane faze razvoja događaja koji prethode pojavi akcidenta i
- b) Definisane načina informacione transformacije radi njene upotrebe u odlučivanju [63].

Metodologija dinamičkih modela rizika podrazumeva korišćenje procesnih podataka kako bi se u realnom vremenu definisale verovatnoće otkaza komponenti sistema i sprovela konsekvantna analiza za određivanje potencijalnih ishoda akcidenta, a zasnovana je na:

- a) Konceptu dinamičke procene rizika [102],
- b) Modelu za dinamičku procenu otkaza u analizi hemijskih procesa i prediktivnom modelu baziranom na teoriji zajedničke verovatnoće [106] i
- c) Kreiranju i aplikaciji profila rizika [63].

Osnovni razlog uvođenja *Bayes*-ovog pristupa u anлізу rizika odnosi se na nemogućnost korišćenja konvencionalnih QRA tehnika za potrebe revidiranja profila rizika prema akcidentnim prekursor informacijama. Metodologija korišćenja *Bayes*-ove teorije podrazumeva upotrebu dostupnih prekursor podataka (abnormalnih događaja, incidenata i eventualno akcidenata) za ažuriranje verovatnoće otkaza sistema odnosno pojave akcidenta [106]. Navedena publikacija čini bazu za sistematično razumevanje problematike procene rizika u dinamičkom okruženju uz demonstraciju prezentovane metodologije na jednostavnoj studiji slučaja. Autori navedenog istraživanja konstatuju znatnu devijaciju rezultata u poređenju sa tradicionalnim QRA metodama, što je bilo očekivano imajući u vidu njihovu statičnost. *Bayes*-ovu koncepciju ne treba tretirati poput nezavisnog modela procene rizika, već kao metodološki orjentisanu tehniku za integraciju QRA metoda, statističkih analiza i drugih procedura koje omogućavaju definisanje *a priori* raspodela i obučavanje (treniranje) mreže. Efikasnost implementacije *Bayes*-ovog pristupa zavisi od formiranog odgovarajućeg acikličnog grafa odnosno *Bayes*-ove mreže koja je vrlo pogodna za modeliranje uzročno-posledičnih procesa sa elementima neodređenosti koji su tipični pratioci rizika. Klasična forma *Bayes*-ovog pristupa je statičkog karaktera i uvodeći odgovarajuće temporalne zavisnosti može biti transformisana u dinamičku *Bayes*-ovu mrežu. Osnovna specifičnost dinamičke *Bayes*-ove mreže je postojanje dva tipa zavisnosti: istovremene i neistovremene [107]. Obe zavisnosti se odnose na lukove između čvorova koje predstavljaju varijable, stim što istovremene reprezentuju iste vremenske periode, a neistovremene u potpunosti različite.

Akcidentne uzroke i njihove posledice karakteriše izražena zavisnost prema subjektivnim mogućnostima ljudskog faktora i objektivnoj kompleksnosti samog postrojenja HPI. Oba ova aspekta su direktno ugrađena u sofisticirane interaktivne sisteme neophodne za upravljanje sigurnosnim parametrima tokom odvijanja tehnoloških procesa unutar različitih postrojenja HPI. Literatura iznosi posebno alarmantan podatak prema kome su akcidenti u 92 % slučajeva bili prouzrokovani uticajem višestrukih faktora, dok je svaki akcident bio praćen u proseku sa više od četiri osnovna abnormalna događaja [108]. Ova studija prezentuje primenu dinamičke *Bayes*-ove mreže za propagaciju otkaza prouzrokovanih interakcijama više osnovnih abnormalnih događaja sa prisutnim elementima slučajnosti i latentnosti, a koji mogu dovesti do akcidenata odnosno katastrofalnih posledica. Prezentovana problematika je posredstvom tri etape implementirana na studiji slučaja rafinerijskog postrojenja za fluidno katalitički krekning. Autori izvode zaključak da je dinamička *Bayes*-ova mreža metodološki okvir velikih potencijala za tačnu identifikaciju baznih događaja odnosno uzročnika abnormalnih situacija u uslovima primene izvan online pristupa monitoring sistemu [108]. Akcidentna ispuštanja opasnih materija iz procesnih postrojenja mogu dovesti do katastrofalnih posledica, a tipičan primer je dobro poznat Bhopal akcident, nastao kao posledica inherentno nesigurne konstrukcije postrojenja i lošeg operativnog upravljanja. Savremena istraživanja poučena lošim iskustvom iz prošlosti, značajnu pažnju poklanjaju efikasnijim pristupima modeliranja rizika koji su primenjivi za rano upozorenje sistema, pa shodno tome mogu biti deo kontrolnih i preventivnih mera za nastanak incidentnih i akcidentnih situacija. U literaturi su takvi pristupi predstavljeni kao prekursorski orjentisane metode koje su bazirane na adaptaciji *Bayes*-ove teorije za ažuriranje *a priori* ocena o verovatnoćama pojave određenih događaja [82]. Autori ovaj metodološki okvir koriste za *a posteriori* definisanje verovatnoća određenih događaja koje integrisane sa posledicama različite ozbiljnosti omogućavaju dobijanje profila rizika. Prethodna istraživanja su konstatovala kompatibilnost *Bayes*-ove mreže za analizu dinamičkih parametara, što omogućava kontinualno ažuriranje profila rizika i preventivno delovanje u realnom vremenu. Primenjivost i efektivnost prekursorski orjentisanih modela za operativnu procenu rizika je demonstrirana na studiji slučaja Bhopal akcidenta [82]. Uticaj ljudskog faktora u kvantitativnoj proceni rizika se direktno odražava na učestalost pojave akcidenata i glavni je uzrok nepoželjnih događaja u HPI. Prethodno citirana studija naglašava uticaj ljudskog faktora kao glavnog činioca koji doprinosi stepenu neizvesnosti abnormalnih događaja odnosno akcidentnom riziku, iako isti nije eksplicitno razmatran usled kompleksnosti i nedostaka informacija (saznanja) o ovom fenomenu. Predviđanje frekvencije abnormalnih događaja predstavlja veliki iskorak u prevazilaženju problema vezanih za nedostatak akcidentnih i nedostupnost incidentnih informacija. Zato je u takvim situacijama jedina racionalna mogućnost primena abnormalnih događaja koji su interpretirani formom prekursora i čija eskalacija prethodi pojavi incidenata i akcidenata [109].

Bitno je naglasiti da ova studija razmatra uticaj ljudskog faktora posredstvom abnormalnih događaja, pošto operateri nadziru rad alarmnih sistema. *Bayes-ov* pristup je iskorišćen za formiranje modela koji predviđa učestalost abnormalnih događaja (Abnormal Event Frequency – AEF) različitih operativnih timova i izvođenju njihovih međusobnih zavisnosti vezanih za AEF posledice. *Bayes-ov* model na osnovu snimljenih podataka naprednih upravljačkih i monitoring sistema izračunava *a posteriori* raspodele AEF za sve operativne timove, čime se definiše ponašanje abnormalnih događaja u narednom (budućem) periodu. Kada se razmatra uticaj ljudskog faktora na pojavu akcidenata treba uzeti u obzir da je aspekt zdravlja i bezbednosti na radu najviše unapređena oblast socijalne politike u zemljama EU, pa ipak prosečni godišnji troškovi koji proističu iz odsutnosti sa rada i to samo od akcidenta bez fatalnih ishoda iznose oko 20 milijardi € [110]. Autori u ovom istraživanju koriste *Bayes-ovu* analizu za stohastičku evaluaciju gubitka radnog vremena usled nastanka akcidenata na radnom mestu. Specifičnost ove studije je u korišćenju dinamičkih stohastičkih modela za procenu očekivanog gubitka radnog vremena usled nedostatka statističkih podataka. Broj posmatranih akcidenata je najznačajniji statistički podatak za redukciju prediktivne neodređenosti, dok je akcidentna neodređenost inverzno zavisna od broja posmatranih radnih dana [110].

Uobičajen pristup za procenu neodređenosti obuhvata primenu *Monte Carlo* simulacije koja je zasnovana na korišćenju funkcija raspodele verovatnoća reprezentujući time uticaj svih varijabli uključenih u model. Najnovija istraživanja vezana za uticaj ljudskog faktora u HPI su upravo bazirana na pomenutom principu, čiji modeli uzimaju u obzir neodređenost varijabli prilikom razmatranja ovog uticaja [111]. Ova studija pruža mogućnost uvođenja ljudskog faktora radi ostvarivanja realističnije procene koja se odnosi na učestalost pojave akcidenata, što je omogućeno posredstvom frekventnog modifikatora dobijenog u skladu sa *Monte Carlo* simulacijom. Predloženi postupak pokazuje konzervativniji pristup u odnosu na QRA metode analizirajući dve razmatrane studije slučaja vezane za skladištenje toksičnih supstanci. Dobijeni rezultati pokazuju veće vrednosti za modifikovane učestalosti akcidentnih pojava naspram onih koji su generisani iz baza podataka. Ova činjenica implicira veće distance za definisanje krivih izo-rizika, što poboljšava aspekt sigurnosti i redukuje mogućnost nastanka akcidenta [111]. Analizom prethodnih studija se može zaključiti da su sprovedena istraživanja isključivo zasnovana na *Bayes-ovom* metodološkom okviru koji služi kao baza za integrisanje različitih kvalitativno-kvantitativnih metoda procene rizika. Savremene tendencije u proceni rizika HPI su bazirane na primeni *Bayes-ovog* koncepta u dinamičkom okruženju omogućavajući time implementaciju ove koncepcije u realnom vremenu.

2.2. TRANSPORTNI RIZICI

Kategorizacija rizika pri transportu opasnih materija se sprovodi prema vidovima saobraćaja na drumski, železnički, vodni, vazdušni, cevni i intermodalni. Tehno-ekonomski pokazatelji ograničavaju primenu pojedinih vidova saobraćaja za transport opasnih materija prema kvalitativnim i kvantitativnim parametrima. Tako je npr. cevni transport ekonomski opravdan samo ukoliko se radi o kontinualnom prenosu velike količine opasnih materija, kao što je sirova nafta, prirodni gas i sl. S druge strane, transport veće količine opasnih materija vazdušnim putem nije ekonomski isplativ i uglavnom se koristi u specifičnim okolnostima, kada se zahtevaju veće transportne brzine i/ili kada je dostavna lokacija nedostupna za druge vidove transporta. Vodni transport opasnih materija je ekonomski najisplativiji oblik transporta koji omogućava prenos ogromne količine robe po jednom ciklusu. Međutim, nedostaci koji se tiču male transportne brzine, nedostupnosti većeg broja plovnih puteva prema kontinentalnim lokacijama i neophodnost znatnih investicija u izgradnju lučke infrastrukture samo delimično ograničavaju primenu vodnog saobraćaja u sistemu opasnih materija. Zato se interkontinentalni transport opasnih materija današnjice ne može zamisliti bez intermodalnog transporta, a koji podrazumeva obaveznu upotrebu intermodalnih cisterni i kombinovanje najmanje dva različita modaliteta transporta (npr. vodnog i železničkog). Železnički transport je najčešće korišćeni oblik kopnenog transporta za prevoz opasnih materija, čija rentabilnost raste sa transportnom distancom i mora biti veća od 100 km.

Drumski transport je zbog svoje fleksibilnosti neprikosnoveni oblik transporta kada se radi o manjim transportnim distancama (do 100 km), mada su specifični logistički zahtevi i razvoj savremenih drumskih transportnih sredstva ovu granicu pomerili na par stotina kilometara. Time je drumski transport postao ozbiljan konkurent železničkom transportu u sistemu opasnih materija, posebno ako se ima u vidu da železnički saobraćaj prati daleko veći rizik od direktnog domino efekta kada su u pitanju lakozapaljive i eksplozivne supstance. Međutim, specifičnosti postoje i kod drumskog transporta opasnih materija, a jedna od najizraženijih se odnosi na formiranje adekvatnog modela procene rizika. Železnički transport odlikuje veći stepen izolovanosti od spoljnih uticaja u odnosu na drumski, samim tim je manje učešće stohastičkih uticaja i moguće je formirati sasvim zadovoljavajući model procene transportnog rizika uz primenu jednostavnijeg matematičkog aparata. Analizu transportnih hazarda pri drumskom transportu opasnih materija prate brojne poteškoće zbog znatnog učešća brojnih spoljnih stohastičkih parametara, čiji međusobni uticaj nije lako identifikovati i zato su neophodni znatno složeniji modeli za adekvatnu kvantifikaciju rizika. S obzirom da se transport opasnih materija u Republici Srbiji realizuje isključivo drumskim i železničkim putem, detaljna analiza transportnih hazarda i predloženi modeli procene rizika su prezentovani kroz sedmo poglavlje ove disertacije. Zato će pri pregledu dosadašnjih istraživanja iz domena transportnog rizika akcenat biti upravo stavljen na ova dva vida transporta. Naravno, ne treba zanemariti ni trenutni značaj cevnog transporta radi kontinualnog snabdevanja prirodnim gasom, kao i očekivanu ekspanziju ovog vida transporta u budućnosti za ciklični prevoz raznovrsnih opasnih materija manjih količina.

Intermodalni transport se u najvećem broju slučajeva interkontinentalnog prevoza opasnih materija svodi na trio: vodni → železnički → drumski i obratno ili na duo raspored: vodni → železnički, vodni → drumski i obratno. Trio konfiguracija se primenjuje kada je krajnje odredište ili početna pozicija otpreme u kontinentalnom delu zemlje izvan rečnih plovih puteva, dok je duo raspored karakterističan za procesna postrojenja koja su smeštena u neposrednoj blizini lučkih centara. Duo konfiguracija je sa transportno-logističkog aspekta povoljnija, pa su zato mnogi međunarodni lučki centri prepoznatljiviji po razvijenoj procesnoj industriji. Izuzetak je duo konfiguracije železnički → drumski i obratno, a karakteriše je kopneni intermodalni transport i primenjuje se uglavnom kod manjih procesnih postrojenja koja nemaju izgrađene industrijske koloseke. Procena intermodalnog transportnog rizika se definiše posredstvom multirizika od onih vidova transporta koji su integrisani u intermodalnu konfiguraciju. Kako većinu intermodalnih konfiguracija odlikuje integracija drumskog i železničkog transporta, sasvim je jasno da se u postupku procene intermodalnog transportnog rizika moraju koristiti modeli procene koji su primenjivi za drumski i železnički transportni rizik. Time je uloga modela procene rizika za drumski i železnički transport dodatno istaknuta i zato zauzimaju centralno mesto u modeliranju rizika pri transportu opasnih materija.

2.3. RIZICI SKLADIŠTENJA

Skladišni kapaciteti procesne industrije su integralne celine logističkog sistema opasnih materija i predstavljaju neminovnost u normalnom odvijanju proizvodnih procesa. Skladišni kapaciteti imaju ulogu da nadomeste prostorne i vremenske neusaglašenosti između dopremljenih sirovina i prostornih kapaciteta odnosno finalnih produkata i tržišnih zahteva u sistemu opasnih materija. Skladištenje opasnih materija se klasifikuje kao logistička operacija visokog rizika, čiji kapaciteti mogu biti izvor nastanka akcidenata velikih razmera. Ovu činjenicu najbolje ilustruje podatak da se 17 % takvih akcidenata nastalih u hemijskoj industriji odnosilo upravo na skladišne procese [112]. Požar je najčešći uzrok skladišnih akcidenata koji se zbog svojih eskalacionih karakteristika lako prenosi na veći deo skladišnog kompleksa, izazivajući pritom eksplozije, dodatne požare, gasne oblake i sl. Zato su skladišni kapaciteti vrlo osetljivi na pojavu domino efekata kod kojih je požar uglavnom inicijalni događaj u eskalacionom procesu akcidenta. Ovaj stav opravdava i podatak Nacionalne Asocijacije za zaštitu od požara (National Fire Protection Association – NFPA) prema kome se 13 % akcidenata sa požarom nastalih tokom 2009. godine u SAD desilo unutar skladišnih kapaciteta opasnih materija i pritom su izazvali ukupne gubitke od 69,98 milijardi \$. Prethodni statistički podaci jasno pokazuju da u oblasti projektovanja, eksploatacije i održavanja skladišnih kapaciteta postoje prilične praznine koje

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U SISTEMU OPASNIH MATERIJIA

moraju biti predmet poboljšanja budućih istraživanja vezanih za povećanje bezbednosnih uslova rada. U nastavku ovog odeljka biće izneti najznačajniji dosadašnji rezultati vezani za smanjenje rizika kod skladišnih kapaciteta i instalacija namenjenih za opasne materije.

Skladišni kapaciteti rafinerijskih kompleksa i hemijskih postrojenja su namenjeni za skladištenje ogromne količine opasnih supstanci, čija klasa opasnosti zavisi od vrste prerađivačkih procesa. Manji akcidenti skladišnih kapaciteta velikih procesnih kompleksa mogu dovesti do materijalne štete koja se meri u milionima dolara, dok veće accidente prati znatna skladišna devalvacija. Accidente većih razmera najčešće karakteriše znatan broj povređenih i poginulih, oštećenje objekata koji se nalaze u neposrednoj blizini postrojenja i ugrožavanje životne sredine, što usled sudskih presuda o naknadi štete stvara dodatne finansijske pritiske na kompanije i mogu biti glavni uzrok njihovog bankrotstva. S obzirom da su u prošlosti zabeleženi veliki skladišni akcidenti, mnoge trgovinske organizacije i inženjerske asocijacije su poučene ovim iskustvom tokom proteklih 60 godina učinile velike napore u definisanju striktnih inženjerskih uputstava i standarda za projektovanje, rukovođenja pri eksploataciji, održavanju, instalaciji sigurnosnih sistema i procedura sigurnog upravljanja skladišnim kapacitetima unutar kompleksa hemijske procesne industrije. Važeći standardi iz oblasti skladišnih instalacija za opasne materije u SAD su propisani od strane vodećih institucija, kao što su:

- Američki institut za naftu (American Petroleum Institute – API),
- Američki institut hemijskih inženjera (American Institute of Chemical Engineers – AIChE),
- Američko društvo mašinskih inženjera (American Society of Mechanical Engineers – ASME) i
- Nacionalna Asocijacija za zaštitu od požara (National Fire Protection Association – NFPA).

Standardi i uputstva koje su propisale navedene organizacije prevazilaze nacionalni okvir SAD, jer su poslužili kao polazna baza za zakonsko regulisanje oblasti skladištenja opasnih materija u mnogim državama širom sveta. Iskustva ugrađena u takvu regulativu su skupo plaćena ogromnim ljudskim žrtvama i neizmernom materijalnom štetom i imaju svrhu da kroz njihovo poštovanje preventivno deluju na pojavu akcidenata, naročito onih većih razmera. Istorijski pregled akcidenata omogućava klasifikaciju prema vrsti procesnih kompleksa i skladišnih instalacija za određenu klasu opasnih materija, a u cilju validne kategorizacije akcidentnih uzročnika. Statistička obrada akcidentnih podataka je mnogo složeniji zadatak nego što na prvi pogled izgleda, jer je osnovno pitanje takve procedure vezano za relevantnost analiziranih uzroka i korišćenih izvora informacija odnosno baza podataka. Korišćenje akcidentnih informacija iz većeg broja izvora svakako doprinosi boljem kvalitetu statističkog uzorka i to treba da bude osnovna smernica statističke analize svih akcidenata, pa tako i onih koji su vezani za skladištenje opasnih materija. Informacije koje se koriste isključivo iz jednog izvora uvek prati izvestan stepen neizvesnosti oko validnosti statističkog uzroka, naročito ukoliko su takve baze podataka više nacionalnog karaktera (kao npr. FACTS, MARS, ZEMA i sl.). Prvi pokazatelj lošeg kvaliteta statističkog uzorka neke baze podataka je relativno mali broj podataka o određenoj vrsti akcidenata za neku klasu opasnih materija. To što u nekoj bazi podataka nisu evidentirani pojedini akcidenti sa opasnim materijama ne može biti opravdanje istraživačima da ne izvode validne zaključke. Takođe, treba imati u vidu da stepen tačnosti statističke analize direktno zavisi od veličine statističkog uzorka, jer statistika funkcioniše prema zakonu velikih brojeva. Jedna od hipoteza ove disertacije je upravo zasnovana na stavu da su podaci o istorijskom pregledu akcidenata samo potreban, a ne i dovoljan uslov za adekvatnu procenu rizika u sistemu opasnih materija. Dokaz ovog stava najbolje ilustruju akcidenti sa opasnim materijama koji su nastali u poslednjih nekoliko godina. Namera autora ove disertacije je da ukaže na neophodnost postojanja i opravdanost ulaganja u razvoj metodološki orjentisanih koncepata zasnovanih na ekspertskim sistemima koji bi kroz postojeće standarde, regulative, metode, statističke analize i procedure uz potpunu kompatibilnost sa dostupnim kontrolno-sigurnosnim sistemima prikazivali stepen rizika za rano upozorenje od akcidenata. Osnovni pravac u sistematskoj analizi skladišnih rizika sa opasnim materijama obuhvata klasifikovan i kategorizovan istorijski pregled akcidenata.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U SISTEMU OPASNIH MATERIJAMA

U tom smislu se može istaći studija koja u periodu od 1960. do 2003. godine analizira 242 akcidenta procesne industrije, čiji su akteri bili skladišni rezervoari širom sveta [113]. Rezultati ovog istraživanja pokazuju da se 74 % akcidenta desilo u rafinerijama nafte, dok su požari i eksplozije bili prisutni u 85 % razmatranih slučajeva. Glavni uzroci ovih akcidenta su bili udari groma odnosno munje u 33 % slučajeva, greške ljudskog faktora usled neadekvatnog rukovanja i održavanja (30 %), dok su ostatak akcidenta obeležili otkazi opreme, sabotaze, prsline i lomovi na instalacijama, statički elektricitet, otvoreni plamen i dr. Analiza razmatranih akcidenta je nedvosmisleno pokazala mogućnost odsutnosti većine ovih akcidenta da su poštovani adekvatni inženjerski postupci i procedure. Pregled akcidenta skladišnih kapaciteta je fokusiran na rezervoare sa opasnim materijama. Osim toga, *Chang i Lin* iznose podatak da se skoro $\frac{3}{4}$ akcidenta upravo desilo u okviru rafinerijskih kompleksa, kod kojih su akteri bili skladišni rezervoari [113]. Uobičajeni tipovi akcidenta koji mogu nastati kod rezervoara sa opasnim supstancama obuhvataju:

- a) Eksploziju gasnog oblaka (Vapor Could Explosion – VCE) i
- b) Eksploziju para tečnosti u stanju ključanja (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions – BLEVE).

Akcidentni događaji koji obuhvataju formiranje toksičnog oblaka, mlazni plamen, vatrenu loptu, vatreni bljesak i slab požar su uglavnom kroz uzročno-posledični efekat neposredno vezani za VCE i BLEVE akcidente. Individualne pojave ovih događaja mogu predstavljati potencijalne akcidente samo ukoliko nisu uzročno ili posledično vezani za VCE i BLEVE efekte (npr. ispuštanje toksične supstance usled curenja na ventilu ili slab požar pri manjoj količini izlivena zapaljive tečnosti). Međutim, treba istaći da je mlazni plamen pokazatelj prinudnog ispuštanja zapaljive supstance iz posude (BLEVE) ili stratifikovanog oblaka pare (VCE). Varena lopta nastaje kao posledica eskalacije akcidentnih događaja tokom pojave BLEVE akcidenta sa zapaljivim supstancama i paljenju eksplozivne smeše pri iniciranju VCE. Na bazi ovoga se može zaključiti da su BLEVE i VCE kompleksni akcidenti, pošto je njihov potencijalni nastanak spregnut sa iniciranjem i pojavom više akcidentnih događaja, kao što su ispuštanje zapaljive supstance, formiranje mlaznog palema, vatrene lopte, itd. VCE je glavni hazard u industrijskim kompleksima unutar kojih se skladišti enormna količina zapaljivih supstanci (ugljevodonika). Tokom poslednjih nekoliko decenija zabeležen je priličan broj ovih akcidenta koji su doveli do znatnih oštećenja ili potpunih uništenja industrijskih kompleksa i to uglavnom u skladištima goriva. VCE su izrazito kompleksni fenomeni sa još uvek ne rasvetljenom prirodom svog nastanka, a čiji destruktivni potencijal zavisi od zahvaćene zapaljive mase, disperzije oblaka i reaktivnosti gasne smeše. Da bi došlo do pojave VCE akcidenta, moraju biti ispunjeni sledeći uslovi:

- a) Izlivena (ispuštena) supstanca mora biti zapaljiva;
- b) Mora postojati određeno odlaganje u paljenju;
- c) Domašaj oblaka para mora biti minimalne veličine;
- d) Pare ugljovodonika sa vazduhom moraju formirati zapaljivu smešu odnosno njihove koncentracije moraju biti unutar granica gornje i donje zapaljivosti, kao i
- e) Neophodno prisustvo turbulencije.

U kontekstu razvoja gasnog oblaka, posebno se treba osvrnuti na uslove pod tačkama b) i e). Neophodnost odlaganja u paljenju utiče na generisanje veće količine para goriva, pa je samim tim veća masa eksplozivne (zapaljive) smeše odnosno gasnog oblaka. Turbulencija je neophodna radi formiranja adekvatne smeše para ispuštene supstance i vazduha, što se postiže načinom mlaznog isticanja goriva iz instalacija i/ili interakcijom gasnog oblaka sa preprekama koje postoje radi njegovog zadržavanja (zidovi, drveće, zgrade i sl.). Glavne komponente oblaka pare formirane usled izlivanja benzina obuhvataju butan i pentan, pa njihovu izrazitost u eksplozivnom dejstvu ne treba zanemariti prilikom procene rizika i kada se radi o malom stepenu evaporizacije. Značajnu ulogu na ove parametre imaju veličina, koncentracija i lokacija gasnog oblaka, što je bilo evidentno na primeru akcidenta iz 2009. godine u velikom skladištu goriva (kapaciteta 110 000 m³ za skladištenje benzina, kerozina i dizela) kojim upravlja Indijska naftna korporacije Jaipur [114]. Procena akcidenta ove vrste u cilju identifikacije eventualnih posledica eksplozije, obuhvata dva koraka:

- a) Analizu prvog (inicijalnog) događaja u vidu slučajnog izlivanja zapaljive supstance i
- b) Modeliranje procesa koji prethode pojavi VCE kao krajnjeg događaja.

Sekvencijalni razvoj događaja pri nastanku VCE akcidenta obuhvata ispuštanje benzina iz rezervoara, punjenje bazena izlivenim sadržajem u okviru nasipa rezervoara, kontinualnu evaporaciju izlivenih supstanci, formiranje gustog oblaka pare stratifikovanog pri tlu, disperziju oblaka pare, paljenje i njegovu eksploziju. Ispuštanja opasnih supstanci unutar postrojenja HPI su u najvećem broju slučajeva ograničenog karaktera, zahvaljujući prisustvu određenih prepreka. Konture gasnih oblaka su određene konfiguracijom instalacija, čija dubina varira u opsegu od 1-2 m. Međutim, ispuštanje naftnih derivata na otvorenom prostoru, kao i u slučaju akcidenta skladišnih terminala, dolazi do stvaranja oblaka ugljovodoničnih para koji može zahvatati veliku površinu (na primeru Jaipur akcidenta je iznosila oko 18 ha). Iskustva iz prethodnih akcidenta pokazuju da se gasni oblaci mogu kretati i po nekoliko kilometara u odnosu na lokaciju evaporacije. Literatura konstatuje da je vatreni bljesak vrlo verovatna akcidentna pojava koja dovodi do eksplozije u slučajevima odloženog paljenja oblaka para [115].

Jaipur akcident je nastao izlivanjem 2116 tona benzina koji je sadržao 63,5 % heksana i 36,5 % pentana, pri ambijentalnoj temperaturi od 30 °C, pokrivajući površinu od 0,64 ha u intervalu od 80 min [114]. Akcident je nastao kao posledica mlaznog izlivanja benzina iz oštećenog blind ventila (tipa Hammer), čime je izazvan oblak benzinskih para približne težine od 81 tona bio dovoljan da izazove eksploziju ekvivalentnu sa 38 tona TNT-a [114]. Istraživanje sprovedeno od strane Nezavisne istražne komisije pokazuje da je najverovatniji izvor paljenja oblaka benzinskih para i izazivanje eksplozije vatrootporna električna oprema ili startovanje vozila locirano u neposrednoj blizini instalacija [116]. Jaipur akcident je obeležilo nekoliko specifičnosti, a tiču se neadekvatno izvršene procene rizika i pojave belih oblaka koji su prethodili nastanku snažnih eksplozija. Prethodni autori iznose podatak da razmatrani skladišni terminal nije značajnije preopterećen, pa stoga nije razmatran kao potencijalna lokacija nastanka eksplozije oblaka para, niti je bila izvršena ozbiljnija procena rizika. Druga specifičnost akcidenta je vezana za pojavu belih oblaka pri maloj visini od tla. Većina ugljovodonika pri slučajnom izlivanju su inicijalno hladni i zgusnuti imajući u vidu da su takve tečnosti pod pritiskom ili rashlađenom stanju. Stanje ugljovodonika neposredno nakon isticanja je slično ponašanju teškog gasa, iako pri normalnom (atmosferskom) pritisku i temperaturi izlivena supstanca može biti lakša od vazduha. Razlog za takvo stanje može biti posledica tri situacije [117]:

- a) Inicijalno niska temperatura ugljovodonika dovodi do kondenzacije para goriva (npr. benzina) koje su zarobljene unutar kapljica izlivenih supstanci pri normalnim atmosferskim uslovima;
- b) Pare izlivenih ugljovodonika u uslovima povišene vlažnosti utiču na njihovu kondenzaciju pri čemu iste bivaju zarobljene u vodenoj magli formirajući aerosoli i
- c) Velike gustine izlivenih supstanci (ugljovodonika) nezavisno od vremenskih uslova.

Uslovi koji dovode do formiranja oblaka pare su najčešće kompilacija navedenih situacija, među kojima posebno treba istaći uticaj povišene vlažnosti vazduha. Aerosoli formirane od smeše para ugljovodonika i vodene magle se manifestuju belim oblakom koji dostiže relativno malu visinu uz stratifikovan razvoj pri tlu. Oblak para formiran pod takvim uslovima ima sporo pomeranje i podizanje, naročito ako je brzina vetra mala, što je posledica veće gustine gasnog oblaka. Ovaj potencijal uprkos gubitku od rasipanja tkz. hladnog benzina rezultira VCE efektom [118]. U opštem slučaju, neposredno paljenje gasnog oblaka manifestuje se mlaznim plamenom, vatrenim bljeskom ili uzlaznom vatrenom loptom dovodeći do njegove disperzije. U dovoljnoj meri odloženo i jako paljenje inicira pojavu VCE akcidenta koga prati vrlo snažna eksplozija sa potencijalom da izazove velika oštećenja. Osnovni elementi koji se moraju uzeti u obzir pri analizi akcidenta izazvanih ispuštanjem zapaljivih supstanci obuhvataju analizu sličnih akcidenta i incidenata koji su se desili u prethodnom periodu, implementaciju tehnika procene rizika sa fokusom na QRA metode, postojeće modele i softverske pakete za simulaciju akcidenta, kao i pregled dosadašnjih istraživanja u ovoj oblasti. Ovi elementi na primeru Jaipur akcidenta pokazuju [114]:

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U SISTEMU OPASNIH MATERIJIA

- a) Mlazno izlivanje benzina karakteriše razvoj oblaka pare velikih dimenzija i značajne gustine na niskim visinama;
- b) Zgrade i stabla predstavljaju potencijalne prepreke, pa ukoliko okružuju zapaljivi oblak para sasvim je izvesna pojava VCE efekta i
- c) Može se javiti prelaz iz deflagracije u detonaciju, proizvodeći karakteristično usmerene indikatore.

Autori su kao glavni cilj ove studije postavili kvantifikaciju potencijalnog nadpritiska nastalog usled VCE efekta, koristeći softver *PHAST* 6.51 koji je zasnovan na PHA pristupu i konstatuju da maksimalni procenjeni nadpritisk iznosi oko 1 *bar*. Ilustracije radi, nadpritisk udarnog talasa eksplozije koji dovodi do iskliznuća vagona ima vrednosti (0,8-1,9) *bara*, dok se uništenje zgrada javlja pri nadpritisku u opsegu (0,8-2,6) *bara*. Prema ustanovljenim posledicama Jaipur akcidenta može se konstatovati da je nadpritisk od 1 *bara*, nastao pri VCE efektu adekvatno procenjen. Pouke koje se mogu izvući iz ovog akcidenta obuhvataju [114]:

- a) Postrojenja i instalacije sa inherentno visokim hazardima trebaju inkorporisati suvišnost unutar sigurnosnih sistema i osigurati njihovo održavanje sve vreme;
- b) Menadžment mora obezbediti sprovođenje svih identifikovanih postupaka relevantnih za aspekt procesne sigurnosti industrijskih kapaciteta i
- c) Visok stepen operativne kompetencije koji je izgrađen na kombinaciji znanja i iskustva treba održavati sve vreme od strane svih profesionalnih grupacija.

Slična vrsta akcidenta je nastala 2005. godine u Buncefield skladištu goriva (UK) kada je došlo do snažne eksplozije i značajnog oštećenja susednih objekata usled prelivanja benzina iz rezervoara [119]. Ovaj akcident je imao istaknuti potencijal za formiranje vrlo velikog zapaljivog oblaka para, imajući u vidu nedetektovano produženo izlivanje benzina. Buncefield incident je doveo do značajnih promena u razumevanju kako može nastati eksplozivni oblak para iz prepunih velikih rezervoara namenjenih za skladištenje lako-isparljivih susstanci. Naime, nezavisna istražna komisija pod pokroviteljstvom (Health and Safety Executive – HSE) i Agencije za životnu sredinu (Environment Agency – EA) u svom izveštaju iznosi zaključak da je veličina nadpritiska usled eksplozivnog udarnog talasa mnogo veća od razumevanja VCE efekta koji se u tom trenutku mogao predvideti [120]. U cilju otklanjanja ovih nedoumica, formirana je radna grupa koja iznosi stav da Buncefield akcident nije mogao biti predviđen primenom bilo koje značajnije procene hazarda pri skladištenju goriva [120]. Posebno je ukazano na zabrinutost u vezi činjenice da su razmere Buncefield akcidenta prevazišle očekivanja, što je posledica grešaka pri interpretaciji načina kojim se preduzimala identifikacija hazarda i procena rizika unutar UK. Procena nastanka eventualne eksplozije u industrijskim postrojenjima koje prate ozbiljni akcidentni hazardi podrazumeva primenu sledećih regulativa [119]:

- a) Propis o sprečavanju značajnih akcidentnih hazarda
(The Control of Major Accident Hazard Regulations – COMAH) i
- b) Propis o planiranju (opasnih supstanci)
(Planning (Hazardous Substance) Regulations – P_(HS)R)

Glavni cilj COMAH procene je da spreči ili ublaži efekte velikih akcidenta sa opasnim materijama koji mogu prouzrokovati štetan uticaj po život i zdravlje ljudi, kao i životnu sredinu, dok se P_(HS)R odnosi na planiranje korišćenja zemljišta prema Seveso III direktivama. Oba propisa su zasnovana na saznanjima ugrađenim u industrijske standarde i iskustvima proisteklih iz prethodnih akcidenta. Prema ovim propisima ne postoje jasno definisana pravila da li VCE treba razmotriti u određenoj situaciji procene, ali je HSE razvio neke smernice koje u tom smislu mogu biti od koristi, prvenstveno namenjene za TNG. Faktori koji uključuju VCE hazarde pri proceni rizika obuhvataju [119]:

- a) Reaktivna goriva, tj. nezasićene ugljovodonike;
- b) Prisustvo (polu) ograničenih struktura u blizini tačke ispuštanja opasne materije;
- c) Velika količina izlivenog goriva koja je dovoljna da generiše gasni oblak u kome je sadržano više od 10 t para goriva;

- d) Energetsko ispuštanje goriva, tj. izlivanje iz skladišnih rezervoara pod pritiskom i
- e) Prisustvo jakog izvora paljenja.

Značajna tehnika za identifikaciju potencijalnih faktora koji mogu uticati na indukovanje većeg pritiska pri eksploziji oblaka para podrazumeva pregled prethodno nastalih incidenata i akcidenata uz detaljno sagledavanje njihovih uzročnika. Međutim, Buncefield akcidentni izveštaj ukazuje na vrlo ograničena saznanja o visoko-nadpritisnim eksplozijama pri obilnom izlivanju benzina, a čiju analizu otežavaju specifični uslovi skladišnih lokacija i nedostatak adekvatnih pristupa procene rizika [121]. Herbert je identifikovao četiri prethodna događaja koji imaju sličnosti sa Buncefield akcidentom [119]:

- a) Newark (1983);
- b) Naples (1985);
- c) St Herblain (1991) i
- d) Laem Chabang (1999).

Pouke izvučene iz Buncefield akcidenta imaju sličnosti sa *Baker*-ovim izveštajem u ključnim elementima kao što su rukovođenje, procesne informacije, analiza procesnih hazarda, integritet opreme i pogodnost za namenu [119]. Pregledom prethodno navedenih akcidenata se mogu izvesti tri bitna aspekta za poboljšanje identifikacije hazarda i procene rizika [119]:

- a) Mehanizam eksplozije pri nastanku VCE akcidenta mora obuhvatiti širi opseg generišućih faktora vezanih za pritisak udarnog talasa, kao što su vegetacija, parkinzi automobila, privremeni objekti i slično;
- b) Izlivanje zapaljive supstance i stvaranje masivnog oblaka pare u budućim procenama rizika treba razmatrati sa vrlo malom ili nultom brzinom vetra kako bi uslovi modeliranja odgovarali tkz. *plivajućem* oblaku para sa značajnim potencijalom za produženim ispuštanjem opasne supstance i
- c) Svi drugi uticajni faktori u slučaju pojave VCE akcidenata su vezani za produženo ispuštanje supstanci usled odsustva u detekciji zapaljive smeše.

Poboljšanje nadzora nad izvorom paljenja u UK je rezultiralo primenom Regulativa o eksplozivnoj atmosferi zapaljivih supstanci (Dangerous Substances Explosion Atmosphere Regulations – DSEAR). Svrha ovih regulativa je bolja identifikacija potencijalno generisane zapaljive atmosfere i korišćenje odgovarajuće zaštitne opreme u eventualnoj hazardnoj oblasti. *Herbert* iznosi zanimljiv podatak da je preduzeta DSEAR procena na primeru Bencefield skladišta, pokazala eventualno postojanje izvora paljenja izvan definisane hazardne oblasti, dok je detekcija isticanja iz rezervoara bila preporučena, ali ne i instalirana. Standardan pristup za modeliranje VCE akcidenata podrazumeva prvo definisanje širenja oblak para, a zatim identifikaciju zatvorene i prepunjene zapremine u gasnom oblaku koja može generisati nadpritisak. Postoji nekoliko metoda za određivanje nadpritiska pri VCE efektu, kao što su empirijski modeli i računarska fluidna dinamika (Computational Fluid Dynamics – CFD). Empirijski modeli su relativno jednostavni, ali odslikavaju realno stanje samo za uže definisane uslove, dok CFD podrazumeva softversku simulaciju pri različitim uslovima uz primenu značajnog nivoa znanja i iskustva. CFD simulacije su poželjne pri akcidentnim istraživanjima, jer podržavaju identifikaciju faktora neophodnih za generisanje nadpritiska u proceni ozbiljnosti takvog akcidenta, dok se verifikacija simulacionih rezultata sprovodi eksperimentalnim putem. Buncefield akcident karakterišu specifičnosti u odnosu na slične VCE događaje iz prošlosti, a tiču se načina generisanja gasnog oblaka. Naime, većina VCE akcidenata je nastala izlivanjem benzina iz skladišnih kapaciteta ili oštećenih instalacija (npr. ventila) u bazen oko rezervoara, odakle se vrši spora evaporacija izlivenne tečnosti i formiranje gasnog oblaka. Međutim, Bencefield akcident je nastao izlivanjem tečnosti kroz otvore na krovu prepunjenog rezervoara u vidu kaskadnih slapova (vodopada), dovodeći do stvaranja finih benzinskih kapljica koje intenzivno utiču na formiranje zapaljivog oblaka para. Znači, praksa je pokazala da izlivanje benzina u vidu slapa utiče na brže formiranje oblaka para, nego pri mlaznom isticanju koje se manifestuje ispuštanjem tečnosti pod pritiskom. Kapljice benzina pri pojavi slapa lakše isparavaju i brže formiraju gasni oblak od izlivenog sadržaja koji je sadržan u bazenu rezervoara, pa je zato u prvom slučaju manja disperzija oblaka para i takvo stanje pogoduje za stvaranje snažne eksplozije pri VCE efektu.

Metodologiju predviđanja brzine generisanja zapaljivog oblaka para na bazi kombinacije CFD modeliranja i jedinstvene eksperimentalne analize je predložena od strane istraživačkog tima koji se bavio fenomenima Buncefield akcidenta [122]. Autori na početku ove studije iznose zanimljiv podatak da su nadležni organi neposredno nakon Buncefield akcidenta sprovodili opsežnu istragu o eventualno podmetnutoj bombi velike razorne moći, što najbolje ilustruje ozbiljnost VCE efekta. Disperzija gasnog oblaka pri vrlo maloj brzini ili u odsustvu vetra je najgori slučaj za mnoge događaje koje prati gubitak zadržavanja, pa se zato pri uključivanju u procenu rizika ovom fenomenu mora pokloniti znatna pažnja. Eksperimentalnim putem je identifikovan rasprskavajući efekat kapljica kao značajni faktor u transferu mase i toplote, a potencijalne metode za njegovo predstavljanje je izložen u [123]. Primena CFD modela za simulaciju preliivanja rezervora i efekta rasprskavanja strujnog toka je dat u [124]. U tom smislu su *Gant* i *Atkins* predložili unapređenu podlogu za razvoj i validaciju CFD modela [124]. Kalkulacija brzine kojom se zapremina gasnog oblaka uvećava tokom preliivanja rezervoara sprovodi se metodom pod nazivom *Procena oblaka pare* (Vapor Cloud Assessment – VCA) i može korisno poslužiti za određivanje koncentracije ugljovodonika u oblaku pare [125]. Proširenje ovog metoda omogućava dokument FABIGTN 12 koji analizira karakteristike gasnog oblaka za opseg rasprskavanja izlivenog benzina [126] i time pokriva praznine postojećih alata procene rizika, kao što je PHAST softver. Istraživanja pokazuju da fenomen rasprskavanja benzina može uticati na stvaranje znatno veće zapremine gasnog oblaka u odnosu na isparavanje tečnog benzina, što se manifestuje kroz izražen VCE efekat [122].

Jedan od najznačajnijih efekata koji prate accidente skladišnih rezervoara sa lako zapaljivim supstancama se odnosi na fenomen *Eksplodije para tečnosti u stanju ključanja* odnosno BLEVE efekat čiju identifikaciju su spaveli *Smith, Marsh* i *Walls* tokom 1957. godine. *Walls* definiše BLEVE efekat kao oštećenje (razaranje) tečnošću ispunjene posude na dva ili više delova usled eksplozije nastale kada temperatura tečnosti pređe tačku ključanja pri normalnom atmosferskom pritisku [127]. Ovu definiciju su proširili *Birk* i *Cunningham* koji BLEVE efekat definišu kao eksplozivno ispuštanje ekspanzujuće pare i ključale tečnosti usled katastrofalnog popuštanja posude koja sadrži tečni gas pod pritiskom [128]. Slična definicija je predložena od strane *Centra za hemijsku procesnu sigurnost* (Centre for Chemical Process Safety) prema kojoj je BLEVE efekat iznenadno ispuštanje velike količine pregrejane tečnosti pod pritiskom u atmosferu usled razaranja posude prouzrokovane delovanjem požara, korozije, proizvodnih defekata, unutrašnjeg pregrevanja i eksplozivnih fragmenata. Međutim, pojedini istraživači iznose kritike na račun ovih definicija, pošto ne uključuju eventualno generisanje *vatrene lopte* kao sledećeg sekvencijalnog događaja, već samo razmatraju eksplozivno razaranje posude pod pritiskom i trenutnu evaporaciju njegovog pregrejanog tečnog sadržaja [129]. Ove sugestije su sasvim opravdane, ako se ima u vidu ceo lanac događaja pri BLEVE efektu. Međutim, *Eckhoff* je ukazao na još jedan značajan propust *Walls*-ove definicije, jer BLEVE efekat u velikom broju slučajeva nastaje pod uticajem plamena na posudu, pa je tada temperatura tečnosti znatno iznad tačke ključanja pri atmosferskim uslovima [130]. *Eckhoff* opisuje tipičan lanac događaja koji prati BLEVE efekat kroz uzročno-posledični odnos devet faza. Prva faza se odnosi na akcidentnu izloženost posude ispunjene tečnošću gasa pod pritiskom usled toplotnog delovanja (požara). Druga faza se javlja pri naglom razaranju plašta posude, kada dostignuti unutrašnji pritisak pare izazvan toplotnim delovanjem, dovodi do evaporacije pregrejane tečnosti i formiranje eksplozivnog oblaka. Vrlo izražena evaporacija oslobođene tečnosti se shodno principu akcije i interakcije manifestuje snažnim udarnim talasom, što predstavlja treću fazu BLEVE efekta. Proračun jačine emitovanog udarnog talasa može se sprovesti prema akustičnom i gasno-dinamičkom modelu. Međutim, fragmenti razorene posude predstavljaju veliku opasnost u generisanju domino efekta, pošto mogu izazvati znatno veća oštećenja na susednim rezervoarima u odnosu na *vatrenu loptu* i udarni talas. Fragmenti posmatrane posude pri velikoj brzini mogu udariti u susedne rezervoare i time izazvati sekundarne BLEVE efekte. U tom slučaju, primarni i sekundarni BLEVE događaji čine sekvencijalni niz domino efekta, što predstavlja najnepovoljniju situaciju u pogledu pojave akcidenta. Zato se četvrta BLEVE faza odnosi na oštećenje (razaranje) sekundarne posude usled delovanja fragmenata koji su generisani tokom primarnog BLEVE efekata. Peta faza BLEVE efekta obuhvata generisanje i razvoj *vatrene lopte* u zavisnosti od vrste opasne supstance u posudi. S obzirom na veliko prisustvo zapaljivih supstanci pri skladištenju u rezervoarima (TNG, benzin, itd.), sasvim je izvesna česta pojava *vatrene lopte* pri BLEVE efektu.

Međutim, ovaj fenomen neće biti izražen kada istisnuta zapaljiva tečnost padne na podlogu pre evaporizacije, pri čemu se tada formira samo požar slabijeg intenziteta, što predstavlja šestu fazu. Takođe, formiranje *vatrene lopte* neće biti u slučaju BLEVE efekta nezapaljivih supstanci, ali se tada mogu javiti neki drugi vidovi hazarda, poput toksičnih gasnih oblaka. Posude u kojoj se skladište toksične supstance (amonijak, hlor, hloro-butadien, fozgen i dr.) prati emisija toksičnih gasnih oblaka (isparenja) koji su u nekim slučajevima, čak i opasniji od *vatrene lopte* i čine sedmu fazu BLEVE efekta. Specifičnost BLEVE efekata najbolje ilustruje osma faza koja se odnosi na pojavu *hladnih* netoksičnih gasova, uobičajenih za posude koje sadrže ugljen-dioksid (CO_2) i vodu (H_2O). *Abbasi* i *Abbasi* konstatuju da su mnoge eksplozije bojlera (posuda pod pritiskom u kojoj je zagrejana voda) u stvari BLEVE efekti i da su takve pojave daleko više zastupljene, nego eksplozije sa zapaljivim i toksičnim supstancama [131]. Deveta faza BLEVE efekta je rezervisana za potencijalne posledice čija se ozbiljnost procenjuje na osnovu eksplozivne energije potrebne za generisanje udarnog talasa i brzine fragmenata od razorene posude. Način isticanja gasa pretvorenog u tečnost pod pritiskom određuje veličinu, trajanje i toplotni fluks *vatrene lopte*, ako je supstanca zapaljiva ili atmosfersku disperziju, ukoliko se radi o toksičnim supstancama [130].

Značajan pristup u redukciji i eventualnom eliminisanju uzročnika koji dovode do akcidenata se odnosi na implementaciju koncepta inherentno sigurnijeg projektovanja sa fokusom na BLEVE efekat koji je pratio mnoge velike akcidente širom sveta, kao što su npr. *Feyzin* (1966) i *San Juan Ixhuatepec* (1984). Najbolja svrsishodnost ovog koncepta se postiže u onim slučajevima kod kojih se posledice BLEVE efekta mogu proceniti u preliminarnoj fazi projektovanja. Ovaj aspekt sagledavanja rizika je vrlo značajan, jer omogućava sprovođenje neophodnih poboljšanja u ranoj fazi projektnih aktivnosti sa kojima akcidentni rizici mogu biti svedeni *onoliko nisko koliko je razumno izvodljivo* (As Low As Reasonably Practicable – ALARP), bez korišćenja skupih zaštitnih sistema. Međutim, velike poteškoće u pogledu implementacije koncepta inherentne sigurnosti za otklanjanje i redukciju akcidentnih situacija stvara nedostatke sistematičnih tehnika. Značajan doprinos u kontekstu inherentne sigurnosti ima novi model koji je poznat pod nazivom *Inherentni alat za procenu posledica požara* (Inherent Fire Consequence Estimation Tool – IFCE) i pruža procenu rizika proizvodnih i skladišnih kapaciteta na potencijalni nastanak BLEVE efekata u ranoj fazi projektovanja postrojenja i opreme [132]. Predloženi model je namenjen za procenu BLEVE uticaja uzimajući u obzir nadpritisak, radijacioni toplotni fluks i rasprskavajući efekat, a njegove mogućnosti su demonstrirane na studiji slučaja rezervoara za skladištenje propana. Dobijeni rezultati pokazuju da je IFCE prihvatljiva tehnika za određivanje potencijalnih posledica BLEVE uticaja manifestovanih preko svoja tri glavna uticaja. Autori ukazuju na mogućnost integracije simulacionih analiza sa IFCE modelom i ističu neophodnost razvoja sličnih tehnika za druge vrste akcidenata, kao što su eksplozija oblaka para, ispuštanje toksičnih supstanci, mlazni i slabi požar. Prethodno je konstatovano da pojavu BLEVE efekta prati evaporacija tečnosti unutar posude, pa je u njegovoj neposrednoj blizini neophodno postojanje izvora toplotnog zračenja. Kada pritisak u posudi dostigne kritičnu vrednost dolazi do otvaranja sigurnosnih pritisnih ventila i ukoliko je sadržaj zapaljiva supstanca nastaje mlazni požar. Intenzivno toplotno zračenje od mlaznog plamena utiče na gubitak čvrstoće materijala (čelika) koje pod dejstvom unutrašnjeg pritiska dovodi do razaranja posude. Međutim, inicijalizacija BLEVE efekta ne mora biti prouzrokovana samo tehničkim otkazom ili organizacionim propustom, već može nastati kao posledica prirodnih katastrofa (npr. zemljotresa), kao što je to bio slučaj u Japanu 2011. godine. Nekoliko hemijskih i naftnih kompleksa, lociranih duž jugoistočne obale Japana su bili izloženi enormno velikim gubicima koji su ostali u drugom planu naspram nuklearnog akcidenta u Fukushimi. Razmatrajući uticaj zemljotresa na BLEVE efekat, posebno treba napomenuti da je u rafineriji Cosmo Oil došlo do oštećenja 17 skladišnih rezervoara za TNG, koji su ili teško oštećeni ili su potpuno uništeni usled požara i eksplozija nastalih unutar rafinerijskog kompleksa. Svaki od pomenutih rezervora je u vreme akcidenta sadržao od 400-5000 m^3 TNG, pa je pojavu BLEVE efekta pratila *vatrena lopta* prečnika oko 450 m u trajanju od 25 s i maksimalni pritisak udarnog talasa od 300 psi [133]. U ovoj studiji je demonstrirana primena nekoliko simulacionih alata za modeliranje BLEVE akcidenta pri oštećenju velikih sfernih TNG rezervora usled zemljotresa. U tu svrhu se koristi softver pod nazivom *Analiza efekata požara na vagon cisternama* (Analysis of Fire Effects on Tank Cars – AFETAC) koji omogućava analizu toplotne provodljivosti, napona i modela otkaza cisterne, termodinamičkog ponašanja fluida i modeliranje strujnog toka pri ispuštanju kroz sigurnosni ventil.

Softver PHAST se koristi za verifikaciju dobijenih rezultata primenom AFETAC [133] i definisanje eksplozivnih parametara BLEVE efekta. SFPE inženjerski priručnik protivpožarne zaštite dopunjuje prethodna dva softvera u delu proračuna koji je vezan za eskalacione BLEVE karakteristike zapaljive supstance, a sa kojim se definiše prečnik, visina i trajanje nastale vatrene lopte. *Li et al.* iznose zaključak da je akcident bio praćen domino efektom, pošto je layout skladišnih kapaciteta karakterisala velika pretrpanost, naročito u pogledu cevovoda koji nisu bilo dovoljno izolovni i odvojeni [133]. Rezultati ove studije sugerišu da korišćena metodologija daje realistične procene BLEVE akcidenata koja može obezbediti korisne savete za kreiranje strategija radi ublažavanja rizika TNG postrojenja u pogledu projektovanja, operativnih aktivnosti, elastičnosti upotrebe, pojave vanrednih situacija i upravljanja rizikom. Prema *JAFSE* snažan zemljotres od 9 stepeni Rihterove skale i cunami čiji su talasi dostizali visinu do 20 m su bili uzrok oštećenja 3324 postrojenja kao posledica katastrofalnih događaja u Japanu iz 2011. godine. Kada se analiziraju ovakve katastrofe treba imati u vidu da probabilistički pristup rizika nije dovoljan za upravljanje procesnom sigurnošću, već se u obzir moraju uzeti i deterministički pristupi kao što su planovi u slučaju vanrednih situacija i tehnike za ublažavanje rizika [134]. Ova studija prethodni stav ilustruje na primeru BLEVE akcidenta u skladišnom terminalu rafinerijskog kompleksa Chiba Prefecture. U trenutku pojave zemljotresa jedan od sfernih TNG rezervoara je bio ispunjen vodom radi periodične kontrole. Gubitak stabilnosti noseće strukture skladišnog rezervoara usled seizmičkog opterećenja je inicirao oštećenje instalacije i isticanja TNG, formirajući zapaljivu smešu u radijusu od 150 m. Iako nema pouzdanih dokaza, pretpostavlja se da je izvor paljenja bila peć ili električna oprema [134]. Nakon eksplozije zapaljive smeše došlo je do pojave slabog požara, čime ostali skladišni tankovi bivaju direktno izloženi toplotnom zračenju. Nekoliko časova intenzivnog toplotnog delovanja je izazvalo pet snažnih eksplozija i ogromnih vatrenih lopti, što je bio jasan pokazatelj BLEVE efekta nad rezervoarima kapaciteta oko 2000 kL (ekvivalentno 2000000 l). Serija katastrofalnih događaja u Japanu jasno ukazuje da se problematika upravljanja rizikom, posebnu u domenu nuklearnih kompleksa, mora tretirati na sasvim drugim osnovama od onih koje su trenutno aktuelne i koje su obeležile razvoj ove oblasti tokom poslednje četiri decenije. Veliki rezervoari za skladištenje tečnosti se najčešće koriste u naftnoj i petrohemijskoj industriji kako bi se uskladištila ogromna količina sirovina, poluprodukata ili gotovih proizvoda u ograničenoj oblasti koja je odvojena od ostalih postrojenja.

Lees je izneo detaljne informacije vezane sa parametre sigurnosti skladišnih kapaciteta [135]. Klasifikacija rezervoara za skladištenje ugljovodonika je izvršena prema konstrukcionom izvođenju na tri osnovna tipa:

- a) Rezervoare sa fiksnim krovom;
- b) Rezervoare sa pokretnim krovom (pontonom) i
- c) Rezervoare sa fiksnim krovom i unutrašnjim pontonom.

Rezervoari sa fiksnim krovom su namenjeni za skladištenje teških naftnih derivata, poput lož-ulja, asfalta (bitumena), atmosferskog i vakuum ostatka. Ovi tipovi rezervoara imaju izolaciju, parno ili indukciono zagrevanje radi održavanja uskladištenog sadržaja u tečnom stanju. Projektovanje ovih tipova rezervoara se sprovodi prema API standardima koji zahtevaju da kritično zavareni šav bude u zoni spajanja cilindričnog dela rezervoara sa krovom [136]. U tom slučaju, eventualna unutrašnja eksplozija rezervora dovodi do odvajanja krova od cilindričnog dela bez njegovog zadržavanja, što rezultira pojavom požara samo na površini naftnih derivata [137]. Rezervoari sa pokretnim krovom odnosno pontonom su namenjeni za skladištenje lakoisparljivih tečnih naftnih derivata (sirova nafta i beli naftni produkti). Uloga pontona je da podizanjem ili spuštanjem eliminiše veću promenu unutrašnjeg pritiska sa varijacijom temperaturnih uslova i njegovu visinu diktira slobodna površina goriva u rezervoaru. Zazor između pontona i omotača rezervoara pokriva profilisana gumena cev koja je ispunjena kerozinom i zalepljena po obodu pokretnog krova (pontona), što vrlo često može inicirati požar [137]. Rezervoar sa fiksnim krovom i pokretnim pontonom je kombinacija prethodna dva tipa, projektovan tako da bi se otklonili nedostaci vezani za unutrašnju eksploziju i pojavu požara. Unutrašnji ponton doprinosi smanjenju potencijala za paljenje i time preventivno deluje na pojavu požara. Poslednja dva tipa rezervoara se isključivo koriste za skladištenje isparljivih ugljovodonika, kao što su sirova nafta i beli naftni produkti (benzin, avio gorivo i dizel).

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U SISTEMU OPASNIH MATERIJIA

Značajni sigurnosni parametri skladišnih kapaciteta za naftne derivate obuhvataju postojanje zidova oko rezervoara sa odgovarajućim volumenskim kapacitetom, kao i pristojnu distancu između njih i instalacija u cilju prevencije prostiranja ispuštene supstance prema instalacijama sa značajnom verovatnoćom paljenja [137]. Potencijalni požarni scenariji koji mogu biti razvijeni kod skladišnih akcidenata sa naftnim derivatima obuhvataju [138]:

- a) Požar na zalepljenom naplataku po obodu pokretnog krova (pontona);
- b) Požar usled delimičnog izlivanja goriva na krovu rezervoara;
- c) Cela površina krova rezervoara zahvaćena požarom;
- d) Požar unutar zida ili nasipa rezervoara;
- e) Eksplozija pokretnog krova (pontona) i
- f) Izbacivanje ključale tečnosti i paljenje.

Najozbiljniji akcidenti kod skladišnih rezervoara su pod tačkom c) i f), dok je situacija pod tačkom a) najčešći scenario koji se javlja u praksi [138]. Detaljni opis gore navedenih akcidentnih scenarija je prezentovan u studiji [139]. *Chang i Lin* konstatuju da je pretežan uzrok akcidenata kod skladišnih rezervoara vezan za udar groma, dok požar i eksplozija čine 85 % ukupnih akcidentnih slučajeva. U prethodnom periodu su zabeleženi veliki akcidenti okarakterisani scenarijem pod tačkom f), kao što su [140]: Yokkaichi (1955), Pernin (1968), Findlay (1975), Tocoa (1982), Milford Haven (1983), Thessalonica (1986), Port Edouard Herriot (1987) i Skikda (2005). Iako je tehničko-tehnološki razvoj sa aspekta sigurnosti skladišnih kapaciteta skoro eliminisao pojavu ovakvih akcidenata, još uvek postoje potencijalni prekursori koji stvaraju hazarde za eventualni nastanak takvih situacija [141]. Rezervoari za skladištenje tečnih ugljovodonika je posebna vrsta hemijskih instalacija kod kojih su hazardi dominantno vezani za potencijalni nastanak požara. Analiza hazarda skladišnih kapaciteta zapaljivih supstanci treba da uključi sve relevantne parametre koji obuhvataju [141]:

- a) Opis lokalne oblasti uključujući dispoziciji, odnosno mapu;
- b) Posedovanje dovoljno saznanja o hidrogeološkim, hidrografskim i meteorološkim uslovima sa svim zaštitnim zonama okruženja;
- c) Lista hazardnih instalacija u okruženju;
- d) Dispozicija postrojenja i skladišnih rezervoara sa dijagramom procesnog toka;
- e) Opis proizvodnog procesa za svaku celinu postrojenja i
- f) Karakteristike opasne supstance prema SEVESO II sa Izjavom o uskladištenim opasnim supstancama praćenih bezbednosnim listovima o materijalnim podacima.

Inicijalni događaji ili oštećenja koja mogu biti uzročnici akcidenata skladišnih rezervoara obuhvataju [137]:

- a) Operacione greške;
- b) Otkaze opreme i instrumenata;
- c) Udar groma;
- d) Statički elektricitet;
- e) Greške usled održavanja;
- f) Ruptura rezervoara i pojava prslina;
- g) Ruptura cevovoda i pojava prslina;
- h) Raznovrsni uzroci i
- i) Podržavajući bezbednosni sistemi.

Sprovedena istraživanja pokazuju da većina eksperata deli zajedničke stavove po pitanju zaštite skladišnih kapaciteta za naftne derivate, pa shodno tome iznose sledeće preventivne mere i konstatacije [137]:

- a) Ugradnja automatizovanih sistema za zaštitu od preliivanja rezervoara;
- b) Zaštita od udara groma;
- c) Odušak na vrhu rezervoara treba redovno kontrolisati kako bi se sprečilo njegovo blokiranje (npr. usled upada ptica);

- d) Sistematsko održavanje neeksplozivne opreme;
- e) Potapanje plivajućeg krova se mora izbeći kroz redovno održavanje pontona, naplatka na njegovom obodu i drenažnog sistema;
- f) Ekstremni vremenski uslovi, kao što su iznenadne i jake padavine mogu izazvati potapanje otvora za ispuštanje zauljenog ostatka, dovodeći do izlivanja ugljovodonika u okruženje;
- g) Požar na naplatku oboda pontona je najčešći uzrok akcidenta kod skladišnih rezervoara za benzin, sirovu naftu i kerozin;
- h) Akcidenti praćeni izbacivanjem ključale tečnosti su sasvim nemogući događaji unutar rafinerijskih kompleksa, sobzirom na konstantni operativni monitoring i povremeno uklanjanje vode iz rezervoara, kao i
- i) Visoka unutrašnja temperatura goriva nije razmatrana kao verovatan akcidentni uzrok.

Međutim, eksperti oko nekih tačaka vezanih za skladišne kapacitete naftnih derivata imaju podeljena mišljenja, pa iste treba uzetu pri budućem razmatranju ovog aspekta kako bi se osigurala opšta sigurnost rezervoara za skladištenje ugljovodonika [137]:

- a) Potreba za nasipima, dubinskim i zajedničkim obezbeđenjem;
- b) Rezerva oko VCE scenarija u smislu da li takav scenario treba razmatrati kao standardni pristup, kao što to preporučuje istraživački Komitet Buncefield akcidenta;
- c) Neslaganja oko sistema za hlađenje na skladišnim rezervoarima;
- d) Podcjenjen sistem za detekciju požara na vrhu skladišnog rezervoara ili unutar zida koji ograđuje rezervoar;
- e) Posvećenja minorna pažnja sakupljanju i preradi otpadne protivpožarne vode, kao i
- f) Nepostojanje specifičnih merila sigurnosti (npr. sistema za hlađenje), kao što je postojeća regulativa NFPA koja propisuje minimalne distance između skladišnih rezervoara.

Postrojenja HPI koriste veliki broj zapaljivih i toksičnih supstanci čije ispuštanje može dovesti do disperzije u atmosferu, formirajući zapaljivo-eksplozivan ili toksičan oblak koji predstavlja hazardu za život i zdravlje ljudi, biljni i životinski svet, kao i životnu sredinu. Posebnu grupu hazarda čine supstance sa zapaljivo-toksičnim svojstvima, kao što su toluen, amonijak, vodonik-cijanid, vinil-acetat, N butil-akrilat i sl. Da ozbiljni akcidenti mogu nastati kao posledica izlivanja (ispuštanja) ovih supstanci najbolje pokazuje akcident iz 2012. godine koji se desio u Iranu, kada je došlo do ispuštanja 20000 kg toluena usled frakture donjeg dela skladišnog rezervoara, izazvane uticajem korozije [142]. Izliveni toluen je formirao zapaljivo-toksični gasni oblak čije je paljenje izazvala električna oprema locirana u blizini rezervoara. Ovaj akcident su obeležile fatalne posledice po dva zaposlena koji su se nalazili na 20 m od skladišnog rezervoara [142]. Autori su koristeći PHAST softver sproveli modeliranje otkaza rezervoara za skladištenje toluena u cilju identifikacije oblasti eventualne pojave požarnog bljeska i njegovog širenja. Autori pokazuju da maksimalni intenzitet toplotnog zračenja iznosi 20 kW/m², dok na distancama od 42 m i 110 m ima vrednosti 12,5 kW/m² i 4 kW/m², respektivno. Ova analiza može korisno poslužiti prilikom izbora distance između skladišnih rezervoara i opreme radi izbegavanja potencijalnog oštećenja [142]. Osim toga, autori razmatraju uticaj zida oko rezervoara sa toluenom i izvode zaključak da se fatalni ishod akcidenta ne bi sprečio da je isti postojao. Međutim, postojanje zida bi značajno redukovalo požarni bljesak sa 48 m na 38 m i evaporaciju toluena sa 9000 kg na 240 kg usled smanjenja kontaktne površine između ispuštene supstance (toluena) i vazduha. Time se redukuje površina zapaljivog sektora uzrokovana gasnim oblakom za 35 %, ali se istovremeno povećava maksimalna vrednost toplotnog zračenja na 84 kW/m² koja rapidno opada sa distancom, pa zid oko rezervoara povoljno utiče sa aspekta sigurnosti skladišnih kapaciteta [142]. Preporuke kojih se treba pridržavati tokom ove vrste akcidenta obuhvataju [142]:

- a) Redovan inspekcijski nadzor rezervoara kako bi se sprečila svaka vrsta korozije;
- b) Električnu ogradu treba locirati na sigurnoj poziciji koja je dovoljno udaljena od opreme i skladišnih rezervoara;
- c) Obavezna ugradnja zida koji okružuje rezervoar za skladištenje toluena;
- d) Postaviti natpis *Zabranjeno pušenje* na susednim rezervoarima;

- e) Razmatrati minimalnu bezbednosnu distancu između rezervoara i opreme ili drugih skladišnih rezervoara i
- f) Redovan nadzor za štitnike električnih kablova i sisteme električne energije.

Široka primena TNG-a u svim sferama industrijske proizvodnje zahteva skladištenje ogromnih količina ove vrlo zapaljive i eksplozivne supstance, pa su hazardi od požara i eksplozije ekstremno visoki kod objekata namenjenih za skladištenje ovog energenta. Ovaj stav potvrđuje serija velikih akcidentata koji su se u prošlosti desili širom sveta, kao što su Mexico (1984), Bashkiria (1989), Alma Ata (1989), Belgorod (1990) i dr. Značajni rezultati eksperimentalnih i teorijskih istraživanja hazarda usled požara i eksplozije skladišnih rezervoara TNG-a su predstavljeni u studiji [143]. Autori su predstavili matematičke modele za evaporaciju TNG-a iz ispuštene količine, disperziju oblaka pare, VCE efekat, termalno zračenje usled slabog požara i ponašanje rezervoara sa TNG-om u blizini slabog požara odnosno BLEVE efekat. Svrha ovih modela je upotreba za predviđanje akcidentnih scenarija koji obuhvataju požare i eksplozije kod velikih TNG skladišnih rezervoara. Sprovedena istraživanja pokazuju da bezbedna distanca između cilindričnog rezervora sa TNG-om zapremine 200 m³ i rezervoara sa kerozinom zapremine 1000 m³ iznosi 26 m, a ukoliko je ista količina TNG-a uskladištena u sferni rezervoar kapaciteta 600 m³, ova udaljenost se povećava na 34 m. Međutim, bezbedne distance za 10 puta veću uskladištenu količinu kerozina (10000 m³) pri nepromenjenim ostalim uslovima, imaju vrednosti od 48 m i 55 m za horizontalni i sferni TNG rezervoar, respektivno [143]. Ovim se očigledno potvrđuje činjenica koja je izneta u studiji [142], prema kojoj intenzitet toplotnog zračenja rapidno opada sa distancom, pošto termalni fluks ima ekstremne vrednosti samo u neposrednoj blizini potencijalnog žarišta akcidenta.

Komparativne prednosti prirodnog gasa nad drugim energentima utiču na permanentan rast njegove potrošnje koja će do 2020. godine biti uvećana za 22 % ili 26,5 triliona kubnih stopa godišnje [141]. Zato proces regasifikacije ima veliku ulogu u daljem industrijskom razvoju, pa se pored 13 terminala u operativnoj upotrebi na teritoriji EU, planira uvođenje još oko 20-tak među kojima su neki u fazi izgradnje. Društvena prihvatljivost regasifikacije postrojenja značajno zavisi od standarda procesne sigurnosti [144] i odgovarajućih sigurnosnih analiza u pogledu povezanosti rizika sa uvedenim novim tehnologijama [145]. Mnoge tehnike koje su razvijene za identifikaciju hazarda u HPI ne mogu samostalno identifikovati sve sigurnosne faktore, pa se procena rizika najbolje može postići kroz sistematski pristup koristeći kombinaciju više različitih metoda [145]. Jedan od takvih pristupa je prezentovan u studiji koja analizira potencijalne akcidentne događaje skladišnih kapaciteta primenom integrisane metodologije zasnovane na FMECA i HAZOP tehnikama [146]. Iako su ove tehnike individualno primenjuju za analizu procesne sigurnosti (npr. u rafinerijama, petrohemijskoj industriji i sl.), *Giardina i Morale* sugerišu da takve procene rizika ne obuhvataju sve relevantne elemente i to obrazlažu kroz sledeću analizu.

Klasična HAZOP metoda je kvalitativne prirode koja obezbeđuje identifikaciju akcidentnih događaja i otkaza, operabilne probleme koristeći logičke nizove uzročno-devijaciono-posledičnih procesnih parametara. FMEA metoda je fokusirana na individualne komponente i način njihovih otkaza, a bazirana je na broju prioriteta rizika kojim se rangira značaj svakog potencijalnog kvara prema brzini njegovog nastanka, ozbiljnosti posledica i detekciji (opažanju). Poteškoće koje prate FMEA tehniku su vezane za identifikaciju akcidentnih posledica i zavisnosti između opreme i aktivnosti ljudskog faktora [147]. *Giardina i Morale* su uzimajući u obzir prednosti i nedostatke razmatranih metoda predložili FMEA i HAZOP integrisanu analizu, poznatu pod nazivom FHIA [146]. Predloženi pristup omogućava više logičkog rasuđivanja za otkaze komponenti i nepoželjne posledice, tako da obezbeđuju iscrpnu listu kombinacija svih događaja koji utiču i podržavaju iste ili različite vršne događaje [146]. FHIA predstavlja korisnu analitičku tehniku za adekvatnu procenu zaštitnih slojeva potrebnih za ublažavanje faktora rizika sa fokusom na analizi kritičnih tačka hazarda koja se sprovodi pre same procene rizika. Ovi podaci mogu korisno poslužiti, ako se procena prizika realizuje sa LOPA metodom. Kako su greške ljudskog faktora identifikovane kao najčešći uzročnik akcidenta, FHIA metodologija predlaže korišćenje RPN indeksa za rangiranje otkaza komponenti i grešaka ljudskog faktora.

Giardina i Morale su efikasnost predložene metodologije ilustrovali na primeru analize rizika skladišnog sistema u Porto Empedocle (Italija) i rezultati pokazuju da takva tehnika pruža sakupljanje značajne količine podataka koji mogu biti od velike koristi pri planiranju održavanja i projektovanju odgovarajućih sistema na nadzor procesa [146]. U literaturi postoji nekoliko tehnika koje se koriste za identifikaciju hazarda kod gasnih terminala. Jedna od široko rasprostranjenih tehnika je poznata pod nazivom *Identifikacija hazarda* (Hazard Identification – HAZID) i koristi se u ranoj fazi projektovanja industrijskih kapaciteta. U literaturi je dat opsežan pregled HAZID tehnika uz opis više metoda iz ove grupacije koje se koriste za identifikaciju hazarda [148]. Prednost HAZID tehnika su fleksibilnost primene za svaki tip instalacije ili procesa, korišćenje iskustva operativnog personala kao deo tima. Tipična HAZID metoda je kvalitativnog karaktera i omogućava identifikaciju akcidentnih događaja i problema sa operabilnošću sistema koristeći logičke sekvence *uzrok-devijacija-posledice* parametara procesa. Nedostaci HAZID tehnike su što reči pouke za svaki čvor procesa zahtevaju razvoj na svakoj instalaciji, pa se mogu izostaviti neki hazardi čija identifikacija zavisi od iskustva i znanja ekspertskog tima [146]. Međutim, konvencionalnim HAZID tehnikama se ne mogu dobiti akcidentni scenariji definisani kao netipični [149], zato što su oni izvedeni iz standardnih očekivanja neželjenih događaja ili najgorih slučajeva [146]. *Giardina i Morale* izvode zaključak da je iz ovih razloga nekoliko Evropskih Direktiva usmereno ka razvoju i proširenom korišćenju strukturisanih HAZID tehnika, kao što je HAZOP analiza [146]. Tehnika za identifikaciju hazarda koja u poslednjih 15-tak godina ima tendenciju povećane primene kod gasnih terminala se odnosi na LOPA metodologiju. Ova tehnika omogućava procenu rizika individualnih hazardnih scenarija kombinujući frekvencije inicijalnih događaja sa verovatnoćama otkaza zaštitnih slojeva [146]. LOPA metodologija se obično koristi nakon PHA pristupa, kao što je HAZOP studija koju treba da obezbediti LOPA tim unoseći hazardne scenarije sa vezanim posledičnim opisom i potencijalnom zaštitom za razmatranje [150]. Podaci koji su potrebni za sprovođenje LOPA metodologije uključuju sledeće informacije:

- a) Dovoljno detaljne inicijalne događaje za procenu frekvencije njegove pojave;
- b) Scenario opisa posledica i tipa za određivanje nivoa uticaja i
- c) Rangiranje rizika koji može biti korišćen u skrining scenarijima za LOPA pristup.

Detaljnije informacije oko PHA pristupa i LOPA metodologije su date u prethodnom odeljku, dok se u ovom razmatranju one stavljaju u kontekst primene kod skladišnih kapaciteta. PHA studije (npr. HAZOP) često ne obezbeđuju dovoljno detaljnih informacija za pogodno izvođenje LOPA tehnika, kao što su modaliteti otkaza, otkazi opreme, ljudske greške, kompetencije personala i sl. [151]. Literatura prepoznaje nekoliko metodoloških pristupa koji su tokom poslednjih deset godina posebno razvijeni za procenu rizika kod gasnih skladišnih terminala. Potencijalni hazardi povezani sa alternativnim tehnologijama *on-shore* i *off-shore* terminala za tečni prirodni gas (Liquified Natural Gas – LNG) su procenjeni identifikacijom svih eventualnih otkaza sistema i relevantnim posledičnim lancima [152]. Ovi autori konstatuju da se očekivani akcidentni scenariji postižu zahvaljujući *Metodologiji za identifikaciju značajnih akcidentnih hazarda* (Methodology for the Identification of Major Accident Hazards – MIMAH), čija je procedura bazirana na pristupu *leptir-mašne* sa ciljem generisanja predloga liste kritičnih događaja za svaki hazard [153]. Osnovni nedostatak MIMAH pristupa se ogleda u tome što daje slične konačne ishode za različite tehnologije, jer su regasifikacioni proces, materijal i operativni uslovi slični za sva podešavanja. Otklanjanje ovog nedostatka omogućava procena ključnih indikatora učinka, koja dozvoljava evaulaciju alternativnih tehnologija, dajući pritom poređenje eventualnih gubitaka zadržavanja događaja ili kritičnih događaja [146]. Modifikovana MIMAH procedura se koristi za dobijanje preliminarnog skupa referentnih LNG akcidentnih scenarija, čiji se rezultati revidiraju i integrišu sa drugim identifikacionim tehnikama [154]. Poboļšana verzija MIMAH metodologije podrazumeva primenu metoda pod nazivom *Dinamička procedura za identifikaciju atipičnih scenarija* (Dynamic Procedure for Atypical Scenarios Identification – DyPASI) koju je predložila grupa autora [154]. Cilj ovog metoda je sistematizacija informacija dobijenih na bazi rizika vezanih za događaje prošlih i jedva izbegnutih akcidenata, kao i odgovarajućih studija [146]. Isti autori konstatuju da je DyPASI metodologija namenjena za ublažavanje nedostatka postojećih HAZID tehnika pri identifikaciji neočekivanih potencijalnih hazarda vezanih za atipične scenarije i integraciju preporuka od prošlih atipičnih akcidenata.

Značajna tehnika za identifikaciju hazarda obuhvata SHIPP metodologiju koja obezbeđuje eventualna poboljšanja za svaki korak akcidentnog niza, bazirajući se na koncepciji *off-shore* akcidentnog modela [26]. Identifikacija hazardnih scenarija se realizuje posredstvom PHA metoda koje prate brojni nedostaci kao posledica indirektnih informacija o predstavljenim hazardima. Nedostaci trenutnih PHA metoda se koriste kako bi bili predloženi kriterijumi radi upoznavanja novih i poboljšanih metoda. Tipičan primer ovog stava se može ilustrovati na primeru klasične HAZOP studije, kao jedne od najčešće korišćenih tradicionalnih tehnika PHA pristupa i njene poboljšane verzije u formi dinamičke HAZOP metode koja je već bila predmet razmatranja. Svršishodnost PHA studija u velikoj meri zavisi od sposobnosti eksperata, manifestovanih preko njihove kreativnosti i imaginarnosti za identifikovanje hazardnih scenarija. PHA studije su inherentno subjektivne i u velikoj meri zavise od dobrog rasuđivanja, čiji uticaji obuhvataju sledeće aspekte [155]:

- a) Identifikaciju inicijalizacije događaja;
- b) Kompletna identifikacija scenarija;
- c) Scenario rangiranja rizika i
- d) Odobravanje zaštitnih mera.

Uobičajeni nedostaci tradicionalnih PHA metoda su nemogućnost analize višestrukih otkaza, znatno češća identifikacija najgorih posledičnih scenarija naspram scenarija najviših rizika i fokusiranje na individualne delove procesa [155]. Isti autori konstatuju da su ključni kriterijumi za poboljšanje postojećih i razvoj novih PHA metoda, oni koji obuhvataju generisanje struktura koje značajno olakšavaju scenario genijalnih ideja, lakše razumevanje i primenu metoda od strane participanata, mogućnost efikasne identifikacije scenarija, potpuna identifikacija scenarija, isključivanje irelevantnih scenarija, lakše ažuriranje i revidiranje studija, kao i lakše skupljanje kontrolnih zahteva. U literaturi je zabeleženo nekoliko pokušaja za poboljšanje PHA tehnika među kojima treba istaći sledeće metode:

- a) Strukturisana šta-ako tehnika (Structured What-If Techique – SWIFT), čiju je koncepciju predložio [156];
- b) Analiza značajnih hazarda (Major Hazard Analysis – MHA), koja je data u [157] i
- c) Postupak revizije hazarda (Process Hazard Review – PHR), uvedene u primenu sa [158].

Kvantitativna procena rizika LNG instalacija je u literaturi zastupljena kroz više metodologija, standarda i specifičnih analiza, kao što su *Bayesian*-LOPA metodologija [104], NFPA 59A [159] i analiza rizika u slučaju terorističkog napada [160]. Integrisani pristup uz opis metodoloških i proceduralnih koraka za kvantitativnu procenu rizika i njenu primenu na *on-shore* i *off-shore* LNG terminalima je izložen u studiji [161]. Ovi autori prezentuju osnovne korake koje treba preduzeti pri proceni rizika i obuhvataju:

- a) Identifikaciju hazarda;
- b) Modeliranje akcidentnog niza uz logičke modele, kao što su FTA i ETA;
- c) Prikupljanje podataka i procena parametara radi definisanja učestalosti inicijalnih događaja, komponentne nedostupnosti i verovatnoće ljudskih akcija;
- d) Kvantifikacija akcidentnog niza;
- e) Procena posledica gde se ispuštanje, brzina evaporizacije, nivo toplotnog zračenja i nadpritiska izvode zbog trenutnog ili odloženog paljenja LNG, kao i
- f) Integracija rezultata u okviru kojeg se procenjuje indeks rizika.

Takođe, integrisani metod kvantitativne analize hazarda za mlazno ispuštanje prirodnog gasa iz podzemnog skladišta su prezentovali [162]. Ovo istraživanje ima veliku ulogu u sistemu strateških energetske rezerve velikih nacionalnih ekonomija i pokazuje da se brzina ispuštanja gasa smanjuje sa uvećanjem dužine cevi usled trenja u stabilnom stanju. Distanca hazarda se uvećava sa uvećanjem radnog pritiska i prečnika cevovoda, dok se smanjuje sa povećanjem dužine [163]. Probabilističke metode za procenu rizika imaju prostranu primenu u literaturi za toksične i zapaljive supstance. Uloga ovih metoda je da na strukturiran način procenjuju sve postojeće hazarde i barijere kao merilo sigurnosti instalacija u pogledu prevencije nastalih hazarda, neizvršenja funkcija zaštitnih barijera,

pojave ispuštanja opasnih materija i eventualnih akcidentnih posledica. Opšte direktive o alatima i tehnikama za identifikaciju hazarda i procenu rizika su date standardom ISO 17776 u okviru koga su izložene FTA, ETA, HAZOP, FMEA i kvalitativne matrice rizika. Istraživanja su pokazala da se najznačajniji kontributivni faktor za individualni rizik odnosi na cevovod između broda i terminala usled odloženog paljenja disperzovane ispuštene količine LNG pri obavljanju manipulativnih operacija [161]. Isti autori konstatuju da *off-shore* terminali imaju viši nivo individualnog rizika, pošto ih karakteriše veći broj rezervoara značajnih volumena i samim tim rukovanje izrazito većih količina LNG u odnosu na *on-shore* terminale [161]. Kada se generalno govori o razvoju QRA metoda procesne industrije, a posebno pri proceni rizika kod LNG terminala, treba naglasiti da je *Papazoglou* dao veliki doprinos u ovoj oblasti što najbolje ilustruje prethodno citirana studija.

Raj i *Lemoff* sprovode analizu rizika koja se odnosi na pozicioniranje LNG postrojenja prema standardu NFPA 59A [159]. Generalno, NFPA standardi predstavljaju važeću regulativu na prostoru USA koji uključuju uslove bazirane na poukama nakon Cleveland akcidenta (1944), koji su izvorno publikovani 1971. godine. Procedura procene rizika i kriterijumi za lociranje LNG postrojenja su bazirani na društveno prihvatljivom riziku, zato što su karakteristike NFPA 59A značajno fokusirane na geografske i demografske detalje. Protokol koji se upotrebljava pri implementaciji NFPA 59A uključuje sledeće karakteristike [159]:

- a) Razmatranje spektra scenarija sa ispuštanjem LNG koji su dobijeni sistematskom analizom, kao što je HAZOP studija;
- b) Procena verovatnoća pojave LNG ispuštanja, uključujući uslovne verovatnoće različitih tipova LNG ponašanja i različite vremenske uslove;
- c) Karakterizacija događaja prema klasi verovatnoće, uzimajući u razmatranje i pojavu uslovnih verovatnoća elementarnih događaja;
- d) Određivanje posledične kategorije prema broju povređenih i
- e) Mapiranje frekventno-posledičnog para za svaki scenario ispuštanja u matrici prihvatljivosti rizika.

Evropski standard koji pokriva oblast procene rizika LNG instalacija se odnosi na EN 1473 i zahteva da nivo rizika projektovanih kapacitena bude ispod prihvatljivog nivoa specificiranog u Aneksu L navedene regulative [164]. EN 1473 podrazumeva razmatranje sigurnosti LNG instalacija kroz sve faze razvoja projekta: inženjering, izgradnju, puštanja u rad, operativno funkcionisanje i rashodovanje. Procedura analize rizika prema EN 1473 uključuje sledeće korake [159]:

- a) Spisak potencijalnih hazarda spoljašnjeg i unutrašnjeg porekla;
- b) Određivanje posledica svakog hazarda i njihova alokacija u klase prema Aneksu K;
- c) Skupljanje ulaznih podataka koji pokazuju stopu otkaza;
- d) Određivanje verovatnoće ili učestalosti svakog hazarda;
- e) Sumiranje učestalosti svih hazarda unutar svake alocirane posledične klase i njihova klasifikacija prema frekventnom opsegu u skladu sa Aneksom J i
- f) Klasifikacija hazarda u saglasnosti sa njihovim posledičnim klasama i frekventnim opsegom radi definisanja nivoa rizika prema Aneksu L.

Kriterijumi prema NFPA 59A i EN 1473 nisu identični, iako prema nekim karakteristikama postoji znatna sličnost. Oba standarda koriste procentualni sadržaj donje granice zapaljivosti kao kriterijum koji prati hazarde pri širenju isparenja i nivoa termalnih toplotnih flukseva usled požara. NFPA 59A kod uključuje neka značajna poboljšanja koja se mogu implementirati u nekim budućim procedurama procene rizika [159]:

- a) Razmatranje individualnog rizika i razvoj kriterijuma prihvatljivosti;
- b) Evaulacija rizika u smislu verovatnoće prekoračenja naspram broja poginulih i povređenih, kao i
- c) Specificiranje kriterijuma prihvatljivosti rizika u pogledu predstavljanja F-N krive.

Procedura za kalkulaciju individualnog rizika izloženosti osobe koja se nalazi na unapred definisanj distanci od zone LNG ispuštanja je izložena u studiji [159].

Razmatrani tipovi hazarda uključuju trenutno paljenje (slabi požar i vatrenu loptu) i odloženo paljenje disperzovanog oblaka pare. *Ray i Lemoff* na razmatranom primeru pokazuju da je najveći rizik unutar zatvorenih celina postrojenja (10^{-5} godina⁻¹), dok je prihvatljivi individualni rizik na 800 m udaljenosti od centralne zone skladišnih rezervoara [159]. Dinamički razvoj LNG sektora prati porast rizika od velikih akcidenata, pošto nekontrolisano ispuštanje LNG tokom procesa proizvodnje, distribucije, skladištenja i regasifikacije predstavlja ozbiljnu pretnju po ljude, postrojenja i životnu sredinu. U tom pogledu, ključni aspekt obuhvata procenu hazardnih zona i obima posledica usled ispuštanja LNG sa najmanjim nivoom neodređenosti [165]. Ovi autori predlažu dvofaznu proceduru za kalkulaciju brzine i trajanja ispuštanja LNG, rasprostiranje, isparavanje i disperziju izliveno količine uzimajući u obzir aspekt neodređenosti. Prva faza procedure obuhvata analizu osetljivosti za identifikovanje parametara sa najvišim stepenom određenosti, dok se u drugoj fazi primenjuju tehnike fuzzy skupova i Monte Carlo simulacije koje uključuju aspekte neodređenosti radi kalkulacije zona hazarda [165]. Komparativna analiza predloženih pristupa sa eksperimentalnim podacima pokazuje bolje slaganje rezultata u odnosu na klasične tehnike, poput Gausove disperzije (Gaussian dispersion – GD) i Britter-McQuaid (BMQ) modela. LNG je tokom poslednje dekade postao značajan energent sa prosečnim godišnjim rastom njegove potrošnje od 2,3 %, pa je izgradnja novih terminala aktuelno pitanje širom sveta [166].

LNG je smeša metana i manje količine etana, propana, azota i drugih komponenti u zavisnosti od izvora eksploatacije prirodnog gasa. Prirodni gas po prirodi nije toksičan, ali je potencijalni rizik ove opasne materije vezan za rizik od vrlo niske tačke ključanja, mogućnosti gušenja i pojave požara. Inhalacija ovog gasa duži vremenski period može dovesti do oštećenja pluća, dok se u kontaktu sa tečnošću mogu javiti promrzline. Komparativne prednosti LNG u odnosu na naftne derivate (benzin, naftu i sl.) uslovljavaju njegovo razmatranje kao potencijalno alternativno gorivo, pa otuda aspekt sigurnosti dobija još više na značaju. Zaštita LNG skladišta kao elementa kritične infrastrukture ima vitalni značaj po svaku državu, pa literatura poklanja znatnu pažnju odgovarajućim akidentnim scenarijima i metodološkim pristupima za procenu ranjivosti takvih kapaciteta [144]. Autori u ovoj studiji definišu hazardne zone oko LNG postrojenja koristeći softvere ALOHA, EFFECTS i TerEx čiji se rezultati međusobno upoređuju. Modelirani scenariji reprezentuju moguće pristupe za preliminarnu analizu rizika kojim se na brz i jednostavan način procenjuje oblast izložena opasnostima. Fundamentalni zaključak ove studije je da se hazardi mogu kontrolisati samo ako su prepoznati i procenjeni [144]. Novi metod procene rizika u zonama skladišnih rezervoara naftnih derivata se razmatra u studiji koja je bazirana na inherentnom i kontrolisanom tipu hazarda [167]. Inherentni hazardi su kvantitativno procenjeni glavnim metodama za identifikaciju hazarda. Faktori rizika koji mogu dovesti do pojave kontrolisanih hazarda su identifikovani FTA metodom i kao evaluacioni faktori se koriste u sledećem koraku analize nakon filtracije posredstvom stepena strukturalne važnosti [167]. AHP metoda se koristi za određivanje težine svakog indeksa, dok se fuzzy evaluacionom matricom multifaktora utvrđuju fuzzy kombinovani modaliteti kontrolisanih hazarda. Rangiranje rizičnih zona kod skladišnih rezervoara za naftne derivate je sprovedeno matricom rizika. Predložen model procene rizika kombinuje glavne hazardne metode, AHP, obuhvatnu fuzzy evaluaciju i matricu rizika [167].

Savremene tendencije za racionalnim korišćenjem energenata na ekološki prihvatljiv način uz ograničene kapacitete obnovljivih izvora energije pronalaze rešenje u prirodnom gasu, čija primena treba da produži resurse upotrebe fosilnih goriva do prelaska na alternativne vidove snabdevanja. Tokom poslednjih deset godina na globalnom nivou je zabeležen trend rasta prirodnog gasa za 28 %, pa u skladu sa time raste potencijalni rizik pri skladištenju ove supstance [168]. Analiza performansi skladišnih kapaciteta izloženih ekstremnim uslovima opterećenja ima veliki značaj na procenu rizika, posebno pod dejstvom eksplozija i seizmičkih promena, bez obzira što su ove pojave retki događaji. Istraživanja koja pokrivaju ove aspekte procene rizika u okviru opasnih materija su novijeg datuma i bazirana su na numeričkim analizama. Numerička studija koja razmatra dinamički odgovor i proces otkaza sfernog rezervoara izloženog eksploziji zapaljivog gasa metodom konačnih elemenata u softveru *LS-DYNA* je predstavljen u [169]. U ovoj studiji je za predstavljanje eksplozije korišćen TNT ekvivalentni metod, pri čemu su kao rezultat istraživanja izvedeni sledeći zaključci:

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA U SISTEMU OPASNIH MATERIJIA

- a) Sferni rezervoari imaju značajan efekat na refleksiju udarnog talasa pri eksploziji sa tendencijom opadanja posmatrano od ekvatora prema polovima sfere;
- b) Stubovi sfernog rezervoara mogu samo u izvesnoj meri reflektovati udarni talas;
- c) Oštećenje uzrokovano eksplozijom u blizini sfernog rezervoara uključuje značajnu fleksionu deformaciju stubova, lokalno deformisanje ljuski sfere, kao i frakturu spoja između stubova i sfere u kome je najizraženija koncentracija napona;
- d) Sistem oslanjanja ima značajnu ulogu u sprečavanju strukturnog oštećenja sfernog rezervoara;
- e) Ključni faktor koji dovodi do eskalacije oštećenja i velikih deformacija strukture je vezan za inicijalnu unutrašnju energiju uskladištene tečnosti, dobijene od sfernog rezervoara prilikom eksplozije i
- f) Uskladištena tečnost može apsorbovati udarno opterećenje usled eksplozije, čime se reakcija sfernog rezervoara značajno redukuje u ranoj fazi nastanka dinamičke promene.

Nadzemni čelični skladišni rezervoari su široko zastupljeni u industrijskim kompleksima, kao što su rafinerije nafte, petrohemijska industrija, skladišta naftnih derivata i sl. Aspekt procene rizika ovih infrastrukturnih postrojenja je vrlo značajan za razmatranje u seizmičkim oblastima, jer je velika amplituda oscilovanja tečnosti unutar rezervoara jedan od vrlo rasprostranjenih uzročnika oštećenja koji se javlja pri zemljotresima [170]. Fenomen oscilovanja tečnosti unutar rezervoara generiše dodatne udarne sile, pa se ugradnjom prstenastih pregrada stvara prigušenje koje redukuje ovaj efekat. Eksperimentalno ispitivanje sprovedeno u okviru prethodne studije pokazuje da prstenaste pregrade mogu u značajnoj meri redukovati oscilovanje tečnosti, čiji stepen prigušenja zavisi od nivoa ispunjenosti, dimenzija i konfiguracije pregrada [170]. Dobijeni rezultati su upoređeni sa preporukama API650 [171] i predloženim jednačinama drugih istraživača, kao što su [172-175]. Savremena naučna istraživanja u pogledu analize modaliteta oštećenja i dinamičkih karakteristika skladišnih rezervoara čelične konstrukcije su uglavnom okrenute numeričkim studijama uz komparativnu analizu sa odredbama API650-2008. Značajno mesto u numeričkim studijama zasnovanih na FEM analizama ima softver ANSYS. Najnovija istraživanja koja tretiraju seizmičko opterećenje čeličnih skladišnih rezervoara radi identifikacije kritičnih naprezanja i preduzimanja mera konstrukcionih poboljšanja su zasnovana na FEM analizi čija se implementacija ogleda preko odgovarajućih softvera, kao što je ANSYS [173].

3. OPASNE MATERIJE

Rapidan industrijski razvoj tokom XX-og veka i globalizacija svetskog tržišta koja je obeležila početak XXI-og veka uticali su na cenovnu i prostornu pristupačnost robe različitog asortimana od strane potrošača (kupaca) širom sveta. Intenzivna tražnja za robom određenog kvaliteta zahteva povećanje kapaciteta robnih tokova i razvoj distributivne mreže koja je sposobna da odgovori zahtevima tržišta. S druge strane, industrijsku bazu za većinu proizvoda savremene tehnologije čine sirovine koje se po svim svojim osobinama mogu svrstati u opasne materije određene klase opasnosti. Najbolja ilustracija za ovu tvrdnju je da se prema podacima UN trenutno u svetu proizvodi više od 4,5 miliona različitih hemijskih jedinjenja odnosno opasnih materija, a da njih oko 7000 (1,55%) ima vrlo rasprostranjenu primenu u različitim industrijskim granama. Uzimajući u obzir ove činjenice koje su date na globalnom nivou, lako je zaključiti da se u narednom periodu problematici proizvodnje i distribucije opasnih materija mora pokloniti mnogo veća pažnja, posebno sa aspekta razvoja novih pristupa u upravljanju rizikom koji bi omogućili veću bezbednost proizvodnih i logističkih sistema u odnosu na tradicionalne koncepcije. Ekspanzija rasta industrijske proizvodnje u okvirima sve veće tržišne raspoloživosti novim proizvodima i uslugama, izražena mobilnost kapitala i radne snage, kao i primena informacionih sistema uz izraženu primenu veštačke inteligencije obezbeđuje osnovne elemente za izgradnju savremenog modaliteta neoliberalizma koji služi ciljevima globalizacije. Važnu ulogu u izgradnji ovog okruženja imaju elementi fleksibilnosti i mobilnosti koji preko efikasnog logističkog sistema utiču na veću rentabilnost industrijske proizvodnje i održivost budućeg društvenog uređenja. Prema podacima Međunarodne organizacije rada (ILO) učešće transportnih akcidenata u ukupnom broju hemijskih udesa iznosi 35% [168]. Imajući u vidu vrlo veliku zastupljenost opasnih materija u proizvodima današnjice i tendenciju rasta njihovog učešća u narednom periodu, posebno kod robe široke potrošnje, neophodno je razviti preventivni mehanizam kako bi se otklonio ili smanjio njihov hazardni uticaj. U tom pogledu je potrebno izvršiti analizu karakteristika finalnih proizvoda (robe), njihovih komponenata, sirovinskog sastava komponenata i eventualnu reaktivnost u određenim uslovima. Poznavanje fizičko-hemijskih svojstava robe je preduslov za adekvatno definisanje planova preventivnog delovanja i zaštite u slučaju nastanka hemijskih udesa odnosno akcidenata sa opasnim materijama. Znači, preventivno delovanje i zaštita ljudi, materijalnih resursa i životne sredine obuhvata sistematsko sagledavanje i analizu dve redno vezane aktivnosti. Prva aktivnost se tiče identifikacije karakteristika opasnih materija bitnih za sagledavanje posledica njihovog hazardnog delovanja. Druga aktivnost ima za cilj da na bazi specifičnosti opasnih materija definiše mere preventivne zaštite, postupanja u slučaju hemijskog udesa i saniranja posledica udesa. U nastavku ovog poglavlja izvršena je identifikacija uticajnih hazardnih faktora iz prethodno navedenih aktivnosti na različite vidove manifestovanog rizika.

3.1. OPŠTE KARAKTERISTIKE OPASNIH MATERIJIA

Opasne materije se definišu kao supstance čije držanje (skladištenje), manipulisanje i transport karakteriše neumereno visok rizik na zdravlje ljudi, bezbednost okoline i zaštitu životne sredine. Dakle, supstance koje u toku procesa proizvodnje, transporta i skladištenja, kao i pratećih manipulativnih aktivnosti ovih procesa (istakanje, utovar, istovar, pretovar i dr.) mogu izazvati štetne posledice opasne po život i zdravlje ljudi, životnu i radnu sredinu, kao i gubitak materijalnih resursa klasifikuju se kao opasne materije. Negativan uticaj ovih materija zahteva preduzimanje posebnih mera u pogledu organizovanja proizvodnih i logističkih procesa kako bi se rizik od pojave neželjenih situacija sveo na prihvatljiv nivo. Opasne materije su kategorisane u devet klasa opasnosti u zavisnosti od tipa potencijalne opasnosti koja se može javiti prilikom držanja, manipulisanja i transporta. Ova podela je izvršena na bazi fizičko-hemijskih osobina opasnih materija, dok su zbog svojih specifičnosti pojedine klase opasnosti razvrstane u podklase, shodno tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Klasifikacija opasnih materija prema vrsti opasnosti

| Klasa opasnosti | Vrsta opasne robe | Podklasa opasnosti | Podvrsta opasne robe |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------------|
| 1 | Eksplozivna sredstva | 1 | Eksplozivi, opasnost od velike eksplozije |
| | | 2 | Eksplozivi, opasnost od projektila |
| | | 3 | Eksplozivi, opasnost od požara |
| | | 4 | Eksplozivi, mala opasnost od požara |
| | | 5 | Veoma stabilni eksplozivi, rizik od eksplozije |
| | | 6 | Izuzetno stabilne materije |
| 2 | Bojni otrovi i gasovi | 1 | Zapaljivi gasovi |
| | | 2 | Komprimovani gasovi |
| | | 3 | Otrovni gasovi |
| 3 | Lakozapaljive tečnosti | - | - |
| 4 | Zapaljiva tela, samozapaljive materije i vodo-reaktivne supstance | 1 | Zapaljive čvrste supstance |
| | | 2 | Samozapaljive materije |
| | | 3 | Reaktivne supstance sa vodom |
| 5 | Oksidne supstance i organski peroksidi | 1 | Oksidirajuće supstance |
| | | 2 | Organski peroksidi |
| 6 | Toksične materije i infektivne supstance | 1 | Toksične (otrovne) supstance |
| | | 2 | Infektivne (zarazne) supstance |
| 7 | Radioaktivna sredstva | - | - |
| 8 | Korozivna sredstva | - | - |
| 9 | Raznovrsne opasne materije | - | - |

Opasne materije su neophodne komponente u mnogim proizvodnim procesima (npr. rafinerijama, fabrikama vode, farmaciji, hemijskoj industriji i dr.). Intenzivan industrijski razvoj u proteklih nekoliko decenija omogućio je društvu savremeni način življenja sa tendencijom definisanja novih trendova u zadovoljenju životnih potreba. Ljudske potrebe i savremeni životni standardi su inicirali postojanje hemikalija koje na direktan i indirektan način podstiču značajno povećanje proizvodnih i distributivnih aktivnosti vezanih za opasne materije. Čovek je svakodnevno u kontaktu sa opasnim materijama, jer se održavanje većine današnjih domaćinstva ne može zamisliti bez sredstva za čišćenje, pranje, dezinfekciju, površinsku zaštitu, lakiranje, farbanje i sl. Mala koncentracija opasnih materija u ovim hemikalijama uz poštovanje neophodnih mera predostrožnosti pri njihovom rukovanju, čuvanju i odlaganju eliminiše značajniji hazardni uticaj na zdravlje ljudi i životnu sredinu. Opšte karakteristike opasnih materija obuhvataju sledeće osobine:

- 1) Požarno-eksplozivne,
- 2) Toksične,
- 3) Radioaktivne i
- 4) Korozivne.

3.1.1. POŽARNO-EKSPLOZIVNE OSOBINE

Požar je proces nekontrolisanog sagorevanja koga prati rizik od ugrožavanja života i zdravlja ljudi, materijalnih dobara i životne sredine. Eksplozija je ekstremno brza i ekspanzivna hemijska reakcija praćen praskom, oslobađanjem velike količine toplote, naglim povećanjem volumena i pritiska kao posledica nastanka gasovitih produkata. Eksploziju karakteriše proces sagorevanja i nastaje usled korišćenja zapaljivih i/ili gorivih materija koje sa vazduhom mogu stvoriti eksplozivnu smešu (atmosfera). Eksplozivna atmosfera je smeša zapaljivih materija u obliku gasa, pare ili magle sa vazduhom pri atmosferskim uslovima koja nakon inicijalizacije paljenjem naglo sagoreva u vidu eksplozije sve dok se ne utroši raspoloživa količina zapaljive materije ili kiseonika u smeši. Pojam eksplozivna smeša je uži od pojma eksplozivna atmosfera i definiše se kao smeša para ili gasova sa vazduhom koja se gorenjem progresivno širi i izaziva eksploziju. Na osnovu prethodne dve definicije može se zaključiti da razliku između eksplozivne atmosfere i eksplozivne smeše čini smeša magle zapaljivih materija pri atmosferskim uslovima sa vazduhom, pa otuda i potiče naziv zapaljiva atmosfera. Uslov za stvaranje eksplozivne atmosfere ili smeše podrazumeva mešavinu zapaljive materije i vazduha u bilo kom kvantitativnom odnosu. Znači, formiranje smeše ne prati nikakva hemijska reakcija, pošto komponente smeše (zapaljiva materija i vazduh) nisu međusobno povezane hemijskom vezom.



Slika 3.1. Požar procesne opreme izazvan zemljotresom u rafineriji nafte Ichihara, Japan

Kvantitativno učešće odnosno koncentracija zapaljive materije (gasa, pare ili magle) u eksplozivnoj smeši (atmosfera) koja obezbeđuje minimalne uslove za eksplozivno sagorevanje definiše granicu zapaljivosti ili područje eksplozivnosti. U zavisnosti od procentualnog učešća zapaljive materije u smeši razlikuju se gornja i donja granica eksplozivnosti. Maksimalna odnosno minimalna koncentracija zapaljive materije koja pruža minimalne uslove za eksplozivno sagorevanje definiše gornju odnosno donju granicu zapaljivosti. U vezi sa ovim granicama definišu se pojmovi nezasićene (siromašne) odnosno zasićene smeše. Eksplozivna smeša kod koje je koncentracija zapaljive materije ispod donje odnosno iznad gornje granice eksplozivnosti definiše nezasićenu odnosno zasićenu smešu. Ove tipove eksplozivnih smeša povezuje jedna zajednička karakteristika koja se odnosi na nemogućnost u iniciranju paljenja (iskrenjem, električnim lukom ili zagrevanjem). Prostor u kome se prisutnost eksplozivne atmosfere manifestuje sa koncentracijom preko 10 % od donje granice zapaljivosti definiše se kao ugrožen prostor odnosno zona povećanog rizika u pogledu opasnosti od korišćenja električnih uređaja, varničenja ili otvorenog plamena.

Znači, da bi se rizik od eksplozije sveo u prihvatljive okvire neophodno je koncentraciju eksplozivne atmosfere redukovati na vrednost manju od 10 %, što se osigurava odgovarajućim zapremninskim odnosom. Hazardi odnosno izvori eksplozivne opasnosti su zone (mesta ili tačke) posuda i/ili instalacija iz koje dolazi do oslobađanja zapaljivih materija (tečnosti, para, gasova ili magle) u spoljašnje okruženje i formiranja eksplozivne smeše. U zavisnosti od vremenskog generatora hazarda razlikuju se tri osnovna stepena opasnosti kao posledica ispuštanja zapaljivih materija:

- a) Trajni hazard,
- b) Primarni hazard,
- c) Sekundarni hazard i
- d) Višestruki hazard.

Trajni hazard odnosno izvor opasnosti karakteriše ispuštanje zapaljivih materija u većim ili umerenim količinama koje lako mogu formirati eksplozivnu atmosferu sa koncentracijom bliskoj ili preko vrednosti određenom donjom granicom eksplozivnosti. Indukovanje trajnog hazarda pri ispuštanju zapaljivih materija u okruženje može nastati kao rezultat sledeća dva slučaja:

- Kontinualno ili učestalo periodično ispuštanje (curenje) manje količine zapaljive materije u jedinici vremena i
- Retko periodično ispuštanje (isticanje) veće količine zapaljive materije u jedinici vremena.

Posledice prethodno navedenih slučajeva trajnih eksplozivnih hazarda karakteriše znatna količina ispuštene zapaljive materije iz rezervoara (ambalažne jedinice) ili instalacijskih postrojenja u određenom vremenskom intervalu. Naime, kontinualno curenje podrazumeva protok ispuštanja Q_c (m^3/h) u nekom posmatranom vremenskom intervalu t (h), pa je ukupna količina zapaljive materije u eksplozivnoj atmosferi V (m^3) data sa $V = Q_c \cdot t$. Ako se radi o učestalo periodičnom curenju neophodno je poznavati periodične protoke curenja Q_i koji odgovaraju vremenskim intervalima t_i za koji protok ima konstantnu (ili približno konstantnu) vrednost. Tada je ukupni protok periodičnog curenja $Q_i = \sum Q_i \cdot t_i$, gde i predstavlja broj različitih vremenskih intervala unutar unapred definisanog intervala t ($t = \sum t_i$). Funkcionalna veza između kontinualnog i periodičnog (učestalog ili retkog) ispuštanja zapaljivih materija je data preko ekvivalentnog protoka periodičnog isticanja i glasi: $Q_{ekv} = Q_c = (\sum Q_i \cdot t_i) / t$. Karakteristika trajnog ispuštanja je protok curenja Q_c , dok je pokazatelj periodičnog (učestalog ili retkog) ispuštanja zapaljivih materija protok Q_i . Protok trajnog ispuštanja je po pravilu manji od protoka učestalog periodičnog ispuštanja, dok su ukupne količine ispuštanja zapaljivih materija u oba slučaja veličine istog reda. Dakle, kumulativan efekat kontinualnog, učestalog i/ili retko periodičnog ispuštanja (curenja i isticanja) utiče na pojavu eksplozivnih atmosfera viših koncentracija u iniciranju trajnih izvora opasnosti.

Primarni hazard karakteriše umereno periodično ispuštanje zapaljivih materija čija je koncentracija u eksplozivnoj atmosferi (smeši) bliska donjoj granici eksplozivnosti. Nastanak primarnog hazarda je vezan za situacije ispuštanja zapaljive materije kao posledica učestalog curenja sa manjim ili umerenim protokom i retkog periodičnog isticanja sa većim ili umerenim protokom. Međutim, bez obzira na modalitet ispuštanja zapaljive materije, priroda primarnog hazarda govori o jednom te istom negativnom efektu koji se tiče stvaranja eksplozivne atmosfere sa koncentracijom nedovoljnom za iniciranje eksplozije u kratkom vremenskom intervalu i tendencijom njenog povećanja do donje eksplozivne granice. Znači, rizik koji generiše primarni hazard je manji od trajnog, ali još uvek nedovoljan da bi se sveo u prihvatljive (propisane) granice.

Sekundarni hazard podrazumeva isključivo retko periodično ispuštanje (curenje) zapaljivih materija u cilju formiranja eksplozivne atmosfere. Sekundarni izvor opasnosti odlikuje slaba koncentracija zapaljivih materija u eksplozivnoj atmosferi, imajući u vidu da se radi o curenju (malom protoku ispuštanja) sa malom frekvencijom pojave. Koncentracija zapaljivih materija u atmosferskoj smeši za ovaj tip hazarda je daleko ispod donje granice zapaljivosti i kao takva ne predstavlja značajniji rizik od požara. Dakle, rizik od sekundarnog hazarda se smatra kao prihvatljiv, a zona delovanja ovog hazarda se definiše kao neugrožen prostor.

Višestruki hazard obuhvata kombinaciju najmanje dva prethodno navedena izvora opasnosti (trajni, primarni i sekundarni hazard). Ovaj tip hazarda je najčešće zastupljen kod složenih industrijskih postrojenja i instalacija kada u neposrednoj blizini imamo dva ili više izvora opasnosti. Tada se za procenu opasnosti mora koristiti koncept multirizika, pošto dolazi do mešanja više eksplozivnih atmosfera (smeša). Rezultat ovih procesa utiče na povećanje koncentracija onih eksplozivnih smeša koje su izvor manje opasnosti.

Prema tome, može se zaključiti da je višestruki hazard izuzetno štetna pojava, jer se nepovoljno odražava na volumenski udeo eksplozivnih atmosfera sa manjom koncentracijom. Poznavanje tipa hazarda je neophodan uslov za identifikaciju zone opasnosti od pojedinih zapaljivih materija. Prethodno je konstantovano da rizik od eksplozije zavisi od koncentracije eksplozivne atmosfere, a da vrsta zapaljive materije diktira donju granicu eksplozivnosti (mogućnost iniciranja eksplozije). Ovo pokazuje da je rizik od eksplozije u korelaciji sa tipom hazarda na osnovu koga se definiše zona ugroženosti odnosno opasnosti. Identifikacija izvora opasnosti kod procesne opreme sa zapaljivim materijama (naročito, gasova i para) je vrlo kompleksna zbog složenosti postrojenja, instalacija, stohastičkih uticaja i sl. Sistemski rešena identifikacija hazarda podrazumeva stanje permanentnog monitoringa i uvođenje sistema za rano upozorenje, što zahteva znatna finansijska sredstva. Odluka menadžmenta o uvođenju monitoring sistema je takođe parametar koji u znatnoj meri može uticati na stepen rizika od eksplozivnosti postrojenja i instalacija procesne opreme. S druge strane, ograničenja u vidu finansijskih mogućnosti kompanije predstavljaju prepreku u potpunoj realizaciji monitoringa. Odluku o uvođenju sistema za monitoring stanja donosi menadžment na bazi tehnno-ekonomskih pokazatelja sa aspekta bezbednosti od eksplozije. Proces odlučivanja je višekriterijumske prirode i praćen je izvesnim stepenom neizvesnosti (neodlučnosti), zbog ograničenih resursa sa aspekta prikupljanja relevantnih podataka, iskustva i znanja eksperata (menadžera). Ova analiza jasno pokazuje da se rizikom meri neodređenost (neodlučnost) i da se neodređenost ne može kvantifikovati rizikom.

Imajući u vidu vrste hazarda i njihove osobenosti na stvaranje eksplozivne atmosfere mogu se identifikovati sledeće zone opasnosti:

- Zona opasnosti "0",
- Zona opasnosti "1" i
- Zona opasnosti "2".

Zona opasnosti "0" je posledica delovanja trajnih hazarda i definiše prostor u kojem je eksplozivna atmosfera konstantno prisutna ili se javlja periodično sa kraćim prekidima u koncentracijama koje mogu izazvati eksploziju.

Zona opasnosti "1" nastaje usled delovanja primarnih hazarda i obuhvata prostor u kojem je eksplozivna atmosfera periodično prisutna sa koncentracijom koja je manja od donje granice eksplozivnosti.

Zona opasnosti "2" obuhvata oblast delovanja sekundarnog hazarda u kojoj se eksplozivna atmosfera formira kao rezultat retkog periodičnog curenja zapaljive materije. U takvim uslovima koncentracija eksplozivne atmosfere je znatno ispod donje granice zapaljivosti i njena kratotrajna pojava se može tretirati kao prihvatljiv rizik.

Eksplozija se može javiti u dva osnovna oblika i to kao detonacija i deflagracija. Osnovna razlika između detonacije i deflagracije je u frontalnoj brzini udarnog talasa odnosno brzini širenja hemijske zone pri eksploziji.

Detonacija je proces širenja hemijske reakcije nadzvučnom brzinom tokom odvijanja eksplozije unutar eksplozivne smeše. Znači, detonacija je vrsta eksplozije pri kojoj se zona hemijske reakcije prostire nadzvučnom brzinom. Frontalne zone udarnih talasa karakteriše ekstremno veliki gradijenti pritiska i temperature, pa je efekat hemijske reakcije impulsnog karaktera. Širenje udarnog talasa kod detonacija mora biti već od 340 m/s (brzina zvuka), a može dostići brzinu do 10 km/s. Brzina udarnog talasa kod detonacije se uglavnom kreće od 2,8 km/s (za amonijev nitrat) do 9,2 km/s (za oktogen) i zavisi od gustine eksplozivne materije (veća gustina inicira veću eksplozivnost odnosno detonacijsku brzinu). Deflagracija je vrsta hemijske eksplozije koju karakterišu podzvučne brzine raspостiranja zone hemijske reakcije, tj. frontalnih zona udarnog talasa. Spontana reakcija kod eksplozivnih materija može biti izazvana kao posledica povećanog pritiska (udara) ili temperature. Osetljivost eksplozivnih materija na pritisak i temepreturu varira zavisno od njihove vrste, pri čemu treba naglasiti da veći uticaj ima pritisak odnosno udarno dejstvo. Ovo jasno objašnjava zašto se eksplozivni aktiviraju pritiskom inicijalizacijom (detonatorom).

Uslovi koji moraju biti obezbeđeni za aktiviranje eksplozivnih materija, bez obzira da li se radi o namernom ili spontanom procesu, obuhvataju tri elementa:

- Postojanje eksplozivne materije,
- Prisustvo dovoljne količine kiseonika (zavisno od količine eksplozivne materije) i
- Postojanje inicijalnog sredstva dovoljne snage, tj. detonatora.

Iniciranje eksplozivnosti kod programiranih (namerno) izazvanih eksplozija sa aspekta egzistencije trećeg uslova zahteva korišćenje detonatora (uređaja). Ulogu ovog uređaja kod hemijskih udesa imaju procesi koji su posledica nepažnje, nestručnog rukovanja, loše organizacije, neznanja i neiskustva, neadekvatne zaštite, nepridržavanje propisa i spleta slučajnih okolnosti (stohastički uticaj udesa). Prethodno navedeni faktori u slučaju eksplozivnih materija mogu biti uzročnici njegovog izlaganja povećanim pritiscima ili temperaturama za iniciranje eksplozije. Zato upravljanje rizikom od opasnih materija i treba shvatiti kao jedan složeni informacioni sistem o svim ovim pojavama čija je uloga prikupljanje, obrada, klasifikacija i analiza relevantnih podataka u cilju ranog prepoznavanja kritičnih izvora opasnosti i preduzimanja adekvatnih preventivnih mera.



PREKURSORI IMAJU ULOGU INICIRANJA
HEMIJSKIH AKCIDENATA



Slika 3.2. Iniciranje hemijskih udesa

Veličina i oblik zone ugroženosti nakon pojave hemijskog udesa zavisi od sledećih faktora:

- Vrste i količine opasne materije,
- Meteoroloških uslova,
- Reljefa terena,
- Konstrukcije postrojenja za proizvodnju i preradu odnosno otpornosti ambalaže kod skladištenja i transporta opasnih materija, kao i
- Brzine reagovanja i organizovanja u akcidentnim situacijama.

3.1.2. TOKSIČNE OSOBINE

Toksičnost je osobina hemijskih jedinjenja i smeša čiji direktni prodor u žive organizme (ljudi ili životinja) uzrokuje negativne posledice, a manifestuje se kroz narušavanje zdravlja i izazivanje smrtnog ishoda. Da bi neka hemijska supstanca delovala kao otrov mora se uneti u određenom obliku, dovoljnoj količini i na odgovarajući način. Minimalna količina neke hemijske supstance koja može da ugrozi (ošteti) zdravlje predstavlja otrovnu (toksičnu) količinu, dok najmanja količina koja dovodi do smrti predstavlja smrtonosnu (letalnu) dozu. Otrovi se u organizam unosi na dva načina: jednokratno i višekratno. Toksične supstance pri jednokratnom unošenju izazivaju akutno trovanje ili akutnu intoksikaciju, a ako se unošenje toksina realizuje višekratno, tj. duži vremenski period (danima, nedeljama, mesecima ili godinama), tada se radi o hroničnom trovanju ili hroničnoj intoksikaciji.

Prema karakteru trovanja mogu biti: ubilačka, samoubilačka i zadesna (profesionalna, medicinska ili spletom slučajnih okolnosti). Unošenje otrova u organizam može biti preko organa za varenje (digestivno), preko kože (dermalno), posredstvo disajnih organa (inhalaciono) i preko sluzokože očiju. Profesionalna trovanja uglavnom nastaju preko disajnih organa pri inhalaciji toksičnih materija u vidu gasova, pare, vrlo sitne prašine, aerosoli i magle iz prskalica (sprejeva), kao posledica nekorišćenja ili neadekvatnog korišćenja zaštitne opreme (zaštitno odelo, rukavice, naočare i dr.). Zadesna trovanja se retko dešavaju preko organa za varenje, dok su ubilačka i samoubilačka trovanja karakteristična upravo po ovom vidu trovanja.

Stepen opasnosti (otrovnosti) neke hemikalije se definiše preko dva pokazatelja toksičnosti:

- Smrtne odnosno letalne doze (LD_x) i
- Letalne koncentracije (LC_x).

Letalna (smrtna) doza se definiše kao količina supstance svedena na jedinicu telesne mase koja je u stanju da izazove smrt ispitivane populacije u preiodu od 2 nedelje. U praksi se koristi više smrtnih odnosno letalnih doza među kojima treba istaći sledeće: LD_{25} , LD_{50} , LD_{90} i LD_{95} . Oznaka LD predstavlja skraćenicu od letalne (smrtno) doze, dok indeks x označava srednju procentualnu smrtnost ispitivane populacije (npr. LD_{50} označava onu dozu hemikalije u mg/kg telesne mase koja će u 50% slučajeva izazvati smrt).

Letalna koncentracija predstavlja onu koncentraciju gasovitih supstanci ili pare u vazduhu koja pri jednokratnoj inhalaciji izaziva smrt eksponirane eksperimentalne populacije tokom prvih tri sata delovanja i izražava se u mg/m^3 . Oznaka za letalnu koncentraciju je LC (skraćenica od letalne doze), dok indeks x ima isto značenje kao i kod prethodne veličine.

S obzirom da se klasični bojni otrovi mogu otkriti primenom hemijskih detektora, savremene tendencije u ovoj oblasti tiču se primene tzv. binarnih bojnih otrova. Ovi otrovi se stvaraju od smeše dve ili više supstanci koje su po svojim osobinama potpuno bezopasne. Hemijska reakcija koja se javlja pri mešanju ovih supstanci formira vrlo toksičnu hemikaliju čiji je efekat istovetan ili pak veći od upotrebe tradicionalnih bojnih otrova. Mešanje supstanci se vrši unutar bojeve glave ili bombe pri letu do cilja. Prednost ovog nekonvencionalnog koncepta karakterišu dva aspekta: a) nemogućnosti detektovanja opasne materije sa toksičnim svojstvima i b) daleko manji rizik od incidenata u procesu proizvodnje, skladištenja i transporta ovih supstanci. Binarni bojni otrovi su idealni za skrivanje od detektora naoružanja za masovno uništenje i pogodni su za logističku podršku na terenu, pošto je daleko manji rizik od trovanja usled curenja individualnih supstanci (komponenti) smeše. Ovaj problem je naročito prisutan kod klasičnih bojnih otrova kada se sabotražom ili spletom slučajnih okolnosti može desiti akcident pri obavljanju logističkih aktivnosti izvan neprijateljske odnosno unutar svoje teritorije. Delovanje toksičnih opasnih materija na žive organizme zavisi od sledećih parametara:

- Fizičko-hemijskih i toksikoloških osobina,
- Veličine (dimenzija) čestica,
- Koncentracije,
- Ekspozicije i
- Načina prodiranja u organizam.

Stepen toksičnosti neke opasne materije (hemikalije) zavisi od njegove hemijske strukture odnosno fizičko-hemijskih osobina. Toksičnost hemijskih supstanci se povećava sa prisustvom elemenata koji pripadaju toksofornoj grupi (halogenidi, teški metali, nitro grupe i dr.). Toksoforne grupe karakterišu sposobnost atoma pojedinih hemikalija koje dolaze u kontakt sa drugim supstancama da uvećaju njihovu toksičnost. Veličina čestica opasnih materija sa toksičnim efektom utiče na stepen prodiranja unutar organizma i može se podeliti na: a) krupne čestice i b) sitne čestice. Krupne čestice karakterišu veličina preko $5 \mu m$ i talože se u gornjim disajnim putevima, dok sitne čestice imaju veličinu ispod $5 \mu m$ i talože se dublje u organizmu (plućima).

Tabela 3.2. Grupisanje industrijskih otrova prisutnih u vazduhu

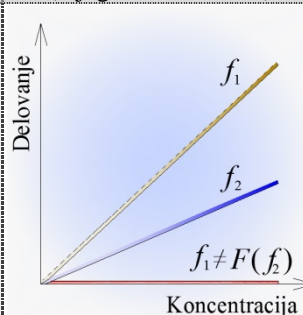
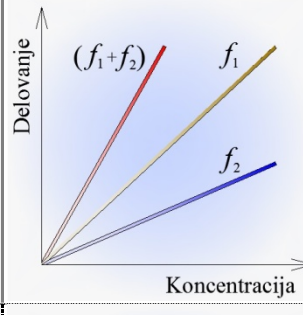
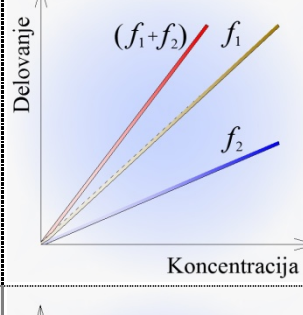
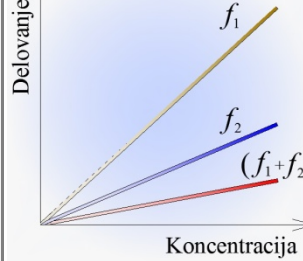
| Grupa | Naziv toksične hemikalije | | |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | · Acetonitrili · Akrlonitrili · Benzoni-triti | · Cijanovodonična kiselina · Cijanohlorid · Cijanbromid | · Dinitrofenol · Dinitroortokrezol · Insekticidi i dr. |
| 2 | · Karbonoksid · Arsenhidrogen | · Nitrobenzol · Dinitrobenzol | · Trinitrobenzol · Anilin i dr. |
| 3 | · Olovo · Vanadijum · Tetrahloretan | · Benzen · Nitrobenzen | · Dinitrobenzen · Trinitrobenzen i dr. |
| 4 | · Tetrahloretan | · Fenilhidrazin i dr. | |
| 5 | · Nitrizni plinovi · Etilnitrili | · Amilnitril | · Nitroglicerini i dr. |
| 6 | · Sumporhidrogen · Karbondisulfid · Propan · Dekan · Acetilen | · Metilhlorid · Metlenhlorid · Metilkromid · Etilbromid · Tetrahloretan | · Trihloretilen · Butanol · Benzin · Piridin |
| 7 | · Olovo · Nikalkarbonil | · Karbondisulfid · Hloridni karbonhidrogeni | · Fenoli i dr. |
| 8 | · Fosfor · Živa | · Terpentini | · Hlor i dr. |
| 9 | · Fosfor | · Fluor i dr. | |
| 10 | · Hlor · Brom · Jod · Amonijak · Oksidi nitrogena · Kiseline HCl, HF, HNO ₃ , H ₂ SO ₄ , H ₃ PO ₄ | · Formaldehid · Oksidi sumpora · Hloridni kreč · Fozgen · Organska jedinjenja broma · Alkalije NaOH, KOH, NH ₄ OH, CaO | · Organske kiseline (mravlja, sirćetna, oksalna) · Aceton · Etilen oksid · Izorpen fenol · Krezol i dr. |
| 11 | · Karbondioksid · Metan | · Etan | · Acetilen i dr. |

Delovanje otrova zavisi od njegove koncentracije i dužine trajanja dejstva. Homeostatski mehanizam živih bića je sposoban da savlada (razgradi) većinu otrova ukoliko se unose u veoma malim koncentracijama i ako deluju kratkotrajno. U tom slučaju organizam se održava u homeostazi (dinamičkoj i fluktuirajućoj ravnoteži), jer nije značajnije narušen sklad između izgradnje i razgradnje. Veće koncentracije i duže izlaganje izazivaju reverzibilne fiziološke promene, prestanaka rada pojedinih organa i eventualno smrtni ishod. Uticaj toksičnosti hemikalija se utvrđuje preko akutnih, subhroničnih i hroničnih testova, što zavisi od vrste toksične materije i prirode organizma. Ekspozicija je faktor toksičnosti koji se odnosi na stepen izlaganja živog organizma određenoj koncentraciji ili dozi toksične supstance u određenom vremenskom periodu. Ekspozicija je parametar koji zavisi od vrste i koncentracije opasne materije, dužine vremenskog izlaganja (akutno, subhronično i hronično) i načina njihovog unošenja (digestivno, inhalacijom i dermalno). Veća ekspozicija podrazumeva veću verovatnoću da će doći do trajnih posledica ili fatalnog ishoda. Pojavu toksičnih materija u organizmu prati hemijska reakcija koja je posledica digestivnog unošenja, inhalacije ili dermalne apsorpcije. Efekat delovanja toksične materije zavisi od njene hemijske strukture, koncentracije i ekspozicije. Ponašanje otrova unutar organizama u velikoj meri zavisi od načina njegovog prodiranja (npr. vitamin D je jako toksičan ako se unese u većoj količini digestivno, dok je netoksičan usled dermalne apsorpcije). Prema tome, nivo opasnosti toksičnih supstanci u organizam zavisi od načina i kapaciteta njenog prodiranja. Inhalacija dopušta apsorpciju najveće količine toksina u organizam, dok je najmanje unošenje dermalnim putem.

Kada se govori o otrovnim supstancama i njihovim karakteristikama treba istaći da za identifikaciju njihovog uticaja na organizam nije dovoljno samo poznavanje apsorbirane vrste i količine toksikanata, već je od suštinskog značaja informacija o kumulativnom (zbirom) efektu individualnih supstanci. U tom smislu, istovremeno unošenje u organizam dve ili više toksičnih supstanci ne znači da će efekat biti aditivan (isti kao kada bi svaka delovala zasebno).

Kumulativno (kombinovano) dejstvo ćemo posmatrati na primeru dve toksične hemikalije (A i B) koje su po svojim fizičko-hemijskim svojstvima potpuno različite, a čije se delovanje na organizam u funkciji koncentracije može definisati korelacijama f_1 i f_2 , respektivno. Potencijalne varijante usled međusobnog uticaja supstanci sa različitim fizičko-hemijskim svojstvima uz ocenu toksikološke povoljnosti su identifikovane i prikazane u tabeli 3.3. Reaktivna sposobnost je parametar koji određuje stepen toksičnosti preko dva potpuno nezavisna fenomena: fizičke toksičnosti i hemijske strukture.

Tabela 3.3. Kumulativni efekat individualnih supstanci

| Red. broj | Naziv efekta (dejstva) | Matematička formulacija | Opis reagovanja | Efekat | Grafički prikaz (dijagram zavisnosti) |
|-----------|------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Nezavisno | $(f_1) \neq F(f_2)$ | Nezavisno reagovanje dve ili više supstanci podrazumeva da nema međusobne reaktivnosti između toksikanata. | NEUTRALAN |  |
| 2 | Sinergičko | $(f_1 + f_2) > (f_1) + (f_2)$ | Sinergičko reagovanje podrazumeva delovanje dve ili više supstanci, čiji je zajednički efekat veći od zbira pojedinih toksikanata. | NEPOVOLJAN |  |
| 3 | Aditivno | $(f_1 + f_2) = (f_1) + (f_2)$ | Aditivno delovanje se odnosi na dejstvo dve ili više supstanci, čiji je zajednički efekat isti kao usled reagovanja na pojedinačne otrove. | NEUTRALAN |  |
| 4 | Antagoničko | $(f_1 + f_2) < (f_1) + (f_2)$ | Antagoničko delovanje karakteriše dejstvo dve ili više supstanci, čiji je zajednički efekat manji od zbira pojedinačnih toksikanata. | POVOLJAN |  |

Vrsta i stepen oštećenja ljudskog organizma kao posledica izlaganja odnosno uticaja pojedinih toksičnih materija indukuje određena štetna dejstva toksikanata, koja su sistematizovana i klasifikovana prema tabeli 3.4.

Tabela 3.4. Posledice izlaganja i uticaja pojedinih toksičnih materija

| Naziv štetnog dejstva | Naziv toksikanta | Posledice po ljudski organizam |
|-----------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Nadražujuće | Amonijak i formaldehid Azotovi oksidi | Nadražuju oči, nos, gornje disajne puteve, pluća i kožu (imaju snažno dejstvo, ali ne nanose trajne posledice) Fatalne posledice po pluća, uz slabo ispoljavanje |
| Fibrogeno | Ugljena i azbestna prašina | Izazivaju fibrozu (rane na plućnim krilima) |
| Alergijsko | Sve vrste alergena | Iritativno-alergijsko dejstvo na kožu i sluzikožu |
| Dermatološko | Kiseline, baze i rastvarači | Industrijski dermatitis |
| Toksično | Sve vrste toksikanata (otrova) | Akutna, subakutna i hronična intoksikacija |
| Mutageno | Mutgeni | Hemijske promene gena koje se prenose na potomstvo |
| Kancerogeno | Organski i neorganski kancerogeni (ukupno 783) | Kanceri – maligna oboljenja ljudskog organizma |
| Embriotropno | Hloroplen, benzen i živa | Smanjenje težine i dimenzija embriona ili smrtni ishod |

3.1.3. RADIOAKTIVNE OSOBINE

Radioaktivnost je svojstvo nekih hemijskih supstanci kod kojih se atomska jezgra procesom spontane emisije jedne ili više čestica odnosno kvanta elektromagnetnog zračenja transformišu u druge atomske vrste, stvarajući nove radioaktivne izotope [174]. Radioaktivnost se definiše vrstom raspada, količinom emitovane energije i vremenom poluraspada. Izlaganje ljudi vrlo velikim dozama radioaktivnosti i jonizujućeg zračenja dovodi do trovanja radijacijom odnosno akutnog radijacijskog sindroma (ARS) i radijacione bolesti koju karakteriše odumiranje koštane srži i otkazivanje rada unutrašnjih organa. Hronični radijacijski sindrom (HRS) se javlja kao posledica dužeg izlaganja ljudi manjim dozama jonizujućeg zračenja.

α zračenje se sastoji od dvostruko pozitivno naelektrisanih čestica identičnih jezgru helijuma, jer se sastoje od 2 protona i 2 elektrona i manifestuje se preko kretanja α čestica brzinom od približno 15000 km/s [174]. Pri kretanju α čestice vrlo lako ostvaruju interakciju sa materijom kroz koju prolazi (slika 3.3.), pa zato imaju jako jonizujuće delovanje. Ove čestice se zbog svoje veličine lako sudaraju sa atomima materije kroz koju prolaze, što znatno ograničava opseg njihovog delovanja usled gubitka kinetičke energije. Opseg delovanja α čestica je sveden na svega nekoliko centimetara i može ih zaustaviti list papira prosečne debljine 100 μm ili aluminijumska folija debljine 20 μm [174]. U vazduhu domet α čestica se kreće do 8 cm, a u tkivu par milimetara. Na taj način one ne predstavljaju opasnost po zdravlje ljudi, osim ako se u organizam ne unesu hranom ili inhalacijom.

β zračenje se manifestuje kretanjem negativno naelektrisanih čestica (elektrona) velikom brzinom (75000–298000 km/s) u zavisnosti od radioaktivnog elementa [174]. Interakcija elektrona sa atomima materije kroz koju prolazi je znatno manja, imajući u vidu da je veličina elektrona daleko manja od α čestica. Zato je jonizujuća sposobnost β zračenja 1000 puta manja nego kod α čestica [174]. Kao direktnu posledicu ove činjenice imamo znatno manji efekat jonizujućeg zračenja kod β čestica u odnosu na slučaj sa α zračenjem. Domet β čestica iznosi nekoliko metara (oko 100 puta veći u odnosu na α čestice) i imaju veću prodornost kroz materiju (zaustavlja ih metalna ploča debljina nekoliko milimetara ili drvena daska debljine nekoliko centimetara). U ljudsko telo prodire do par centimetara, a predstavlja veliku opasnost ako se izvor zračenja unese u organizam.

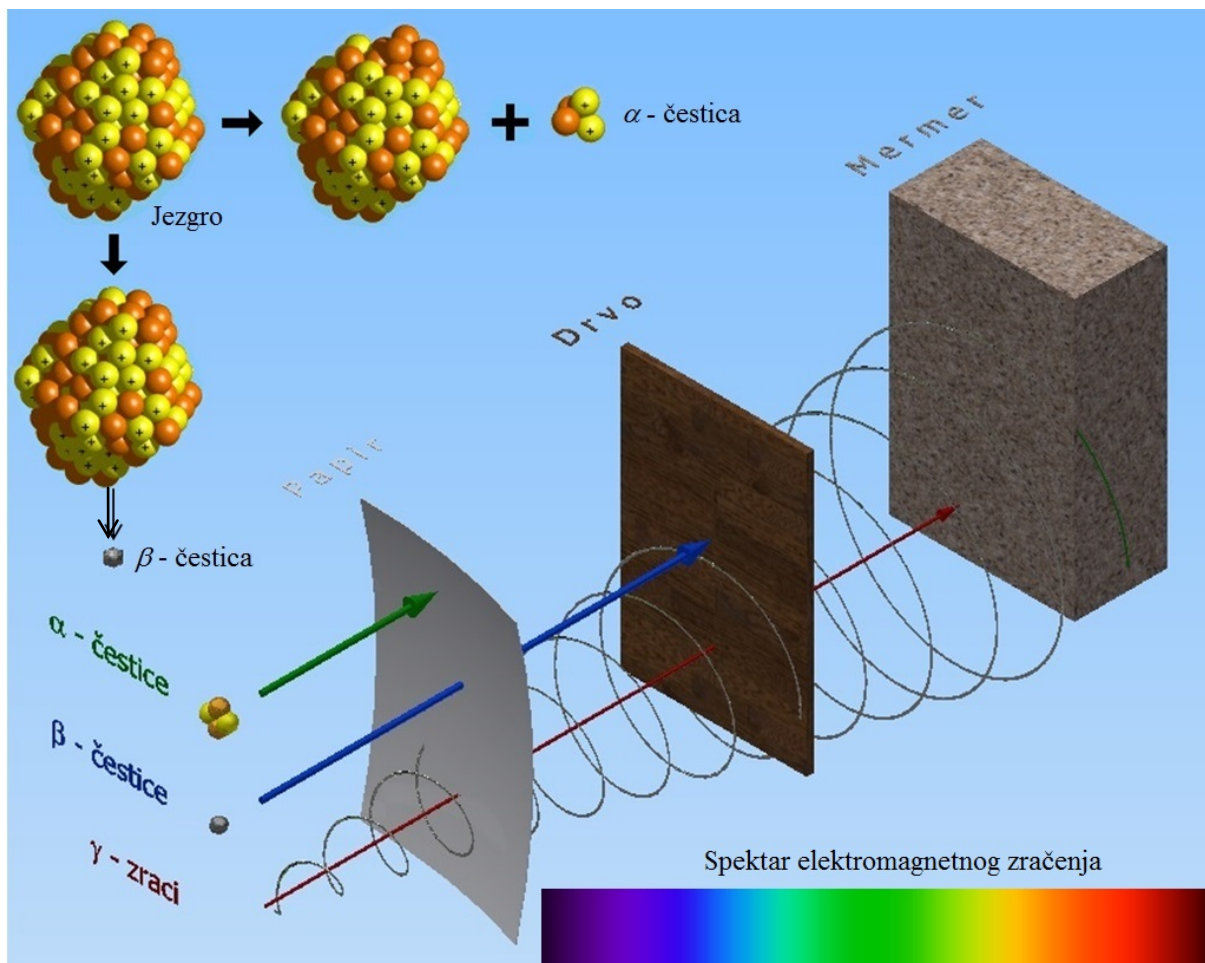
γ zračenje je elektromagnetno zračenje velike energije (visoko energetski fotoni) i vrlo male talasne dužine (manje od $0,5 \text{ nm}$) koja potiče od jezgra atoma i prostire se brzinom svetlosti (300000 km/s). Pojavu γ zračenja ne prati nastanak novog elementa kao što je slučaj kod α i β zračenja [174]. Fenomen γ zračenja nastaje kao posledica β raspada kada metastabilna (uzbuđena) jezgra da bi prešla u stanje stabilnosti oslobađaju višak energije kroz emisiju fotona. Na bazi fenomena koji prate nastanak prethodne dve vrste zračenja, može se zaključiti da se γ zračenje manifestuje kao posledica (nusprodukt) α i β raspada. To znači da je nemoguće realizovati γ raspad nezavisno od uticaja α i β čestica, a karakteriše ga električno neutralan tip zračenja tako da se elektromagnetni talasi prostiru pravolinijski u magnetnom polju [174]. Dakle, prilikom prostiranja γ zraka kroz magnetno polje ne dolazi do njihovog skretanja, pa se zato odlikuju velikom prodornošću kroz materiju u odnosu na α i β čestice. Jonizujući efekat γ zraka je 100 puta manji u odnosu na β čestice, a čak 10^4 puta je manji u poređenju sa α česticama. Maksimalni domet odnosno opseg delovanja γ čestica iznosi 1 km [174]. Ovaj vid zračenja je izuzetno opasan, jer u potpunosti prolazi kroz ljudsko telo. Da bi se sprečilo ili redukovao uticaj ovog zračenja neophodno je primeniti materijale velike specifične težine, kao što su npr. olovo, beton i sl. Olovna ploča debljine 10 cm može zaustaviti veći deo γ zraka, pa je ovo i najefikasniji način za potpunu zaštitu ili redukciju nivoa jonizujućeg zračenja. Pored zračenja koje stvaraju α čestice, β čestice i γ zraci treba imati u vidu i radioaktivnost koja potiče od X zraka, kosmičkog zračenja i neutrona.

X (rendgensko) zračenje je elektromagnetne prirode ograničeno oblastima γ i ultraljubičastog zračenja, što znači da ima talasnu dužinu između ove dve vrste zračenja [174]. Zato ovi zraci nose manju količinu energije i lako se apsorbuju pri prolasku kroz materiju. Rendgensko zračenje nastaje kao posledica naglog usporavanja elektrona koji se kreću velikom brzinom pri udaru u metal [174]. Prilikom usporavanja ovi elektroni svoju energiju predaju elektronima koji su na nižim energetskim nivoima odnosno bliži jezgru atoma metala. Pobuđivanje elektrona metala koji su bliži jezgru atoma se manifestuje prelaskom u više energetske nivoe i ovaj proces transformacije prati emisija fotona odnosno elektromagnetno zračenje. Praktično dobijanje X zraka u kontrolisanim uslovima se realizuje primenom rendgenske (vakuumske) cevi na čijim krajevima se nalaze anoda i katoda, a između njih tanka žičana nit iz koje se emituju elektroni. Propuštanjem električne struje kroz tanku žičanu nit smeštenu neposredno uz katodu dolazi do njenog usijanja, pri čemu katoda izbacuje elektrone iz usijane žice i usmerava ih ka anodi (katoda je na visokom naponu). Elektroni udaraju u anodu koja je od volframa ili molibdena tako da se 99 % energije elektrona transformiše u toplotu, a svega 1 % se u obliku jonizujućeg zračenja usmerava na objekat delovanja (npr. ljudsko telo, ispitivani materijal i sl.). Ovaj vid zračenja je našao široku praktičnu primenu u medicini za dijagnostiku stanja, dok je u industriji implementiran kroz tehnologiju spajanja i ispitivanja materijala.

Kosmičko zračenje je vrsta prirodnog jonizujućeg zračenja koje dospeva na površinu Zemlje iz kosmosa, a sastoji se od kosmičkog galaktičkog i sunčevog zračenja [174]. Na površinu Zemlje dospeva samo manji deo kosmičkog zračenja, bez obzira što je Svemir izložen mnogim vrstama radioaktivnog zračenja i to različitog porekla. Prirodna zaštita od štetnog uticaja kosmičkog zračenja su atmosfera i Zemljino magnetno polje [174]. Pod uticajem Zemljinog magnetnog polja znatan udeo kosmičkih zraka skreće sa pravca širenja prema Zemlji i time je štite od prodora veće količine kosmičke radioaktivnosti. Međutim, preostali udeo kosmičkih zraka koji se uputi ka Zemlji gubi energiju pri sudarima sa atomima iz atmosfere i formira tkz. kosmičke radionuklide. Ove čestice su izvor sekundarnog kosmičkog zračenja koje deluju u nižim slojevima atmosfere, pa čak i na samoj površini Zemlje kao posledica delovanja kosmičkih čestica vrlo velikih energija. Bitno je napomenuti da na kosmičko zračenje pozitivno utiče Sunčeva svetlost, jer veća aktivnost Sunca pospešuje jačanje Zemljinog magnetnog polja i redukuje efekat kosmičkog zračenja.

Neuronsko zračenje spada u specifičan i izuzetno prodoran vid veštačkog zračenja koji se javlja u nuklearnim reaktorima ili pri nuklearnim eksplozijama kao posledica odvijanja nuklearne lančane reakcije [174]. Neutron je subatomska neutralna naelektrisana čestica i sastavni je deo jezgra svakog atoma, osim najrasprostranjenijeg izotopa vodonika koji se sastoji samo od jednog protona. Elektroneutralna priroda neutrona omogućuje dobru prodornost kroz materiju, jer pri njegovom kretanju nema privlačenja niti odbijanja usled nailaska na pozitivno ili negativno naelektrisane čestice odnosno elektromagnetno polje [174].

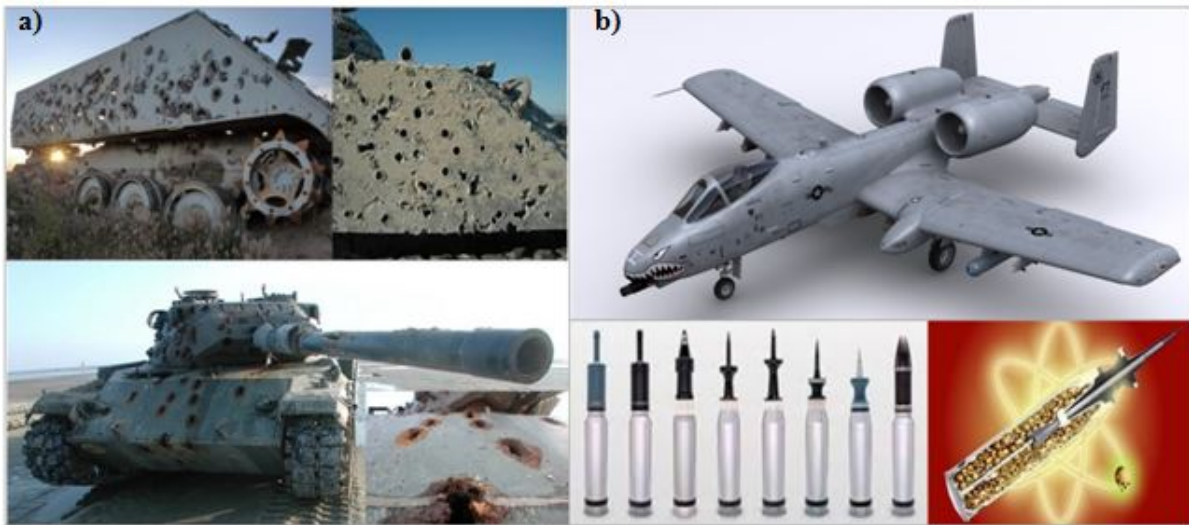
Upravo ova osobina neutrona je iskorišćenja za dubinsko ispitivanje čvrste materije, dok apsorpcija neutrona dovodi do neutronove aktivacije i pojave radioaktivnosti (bombardovanje jezgra atoma). Bitno je naglasiti da neutron celokupnu svoju energiju gubi pri reakciji (sudar) sa molekulom vode odnosno atomom vodonika. Nijedna čvrsta materija nije efikasna za eliminisanje snopa neuronskog zračenja i zato je ovaj oblik zračenja izuzetno opasan po zdravlje ljudi. Znači, štetan uticaj neuronskog zračenja ne može biti eliminisan upotrebom materijala sa velikim atomskim brojem i većim gustinama, kao što je na primer olovo, beton i dr. Ovi materijali su vrlo efikasni protiv širenja radijacije koja je posledica delovanja α i β čestica odnosno γ zraka, ali su neupotrebljivi za zaštitu od neuronskog zračenja. S obzirom da se neutroni odbijaju od atoma vodonika jedina efikasna zaštita od ove vrste zračenja je upotreba vodonika odnosno vode. Neutronsni snop pri prolasku kroz ljudsko telo dovodi do interakcije sa molekulima i atomima u organizmu izazivajući njihovo oštećenje i indukovanje drugih oblika radijacije, tako da njihovo kratkotrajno delovanje može biti sa fatalnim ishodom po živote ljudi.



Slika 3.3. Dejstvo radioaktivnosti preko α - čestica, β - čestica i γ - zraka

Radijacija se javlja u dva osnovna oblika i to kao elektromagnetna i korpuskularna, dok prema poreklu može biti prirodna i veštačka [174]. Elektromagnetno zračenje se javlja kao kombinacija oscilujućeg električnog i magnetnog polja koja zajedno putuju kroz prostor (materiju) u obliku međusobno upravni talasa. Korpuskularno zračenje nastaje kao posledica kretanja α ili β čestica. Većina radioaktivnih izotopa koji se koriste kao nuklearno gorivo u vojne ili civilne svrhe se dobija od rude uranijuma, a koja u sebi sadrži dva izotopa U 238 (99,3 %) i U 235 (0,7 %). Ovaj prvi izotop (U 238) nema nikakvu korisnu primenu u civilne svrhe, dok se drugi izotop uranijuma (U 235) koristi kao sirovinaska baza za nuklearno gorivo. Postupak izvlačenja izotopa U 235 iz rude uranijuma predstavlja proces obogaćivanja uranijuma. Kao nusprodukt procesa obogaćivanja uranijuma nastaje osiromašeni uranijum, a to je zapravo izotop U 238 koji se ne koristi za nuklearno gorivo, zbog slabe radioaktivnosti.

Osiromašeni uran je specifičan po tome što ima gustinu veću za 68 % u odnosu na olovo i tvrdoću veću za ceo stepen po Mosovoj skali u odnosu na čelik. Koristeći ove osobine jedinu praktičnu primenu osiromašeni uran ima u vojne svrhe za izradu municije i šrapnela kvazi-konvencionalnih bombi velike razorne moći.



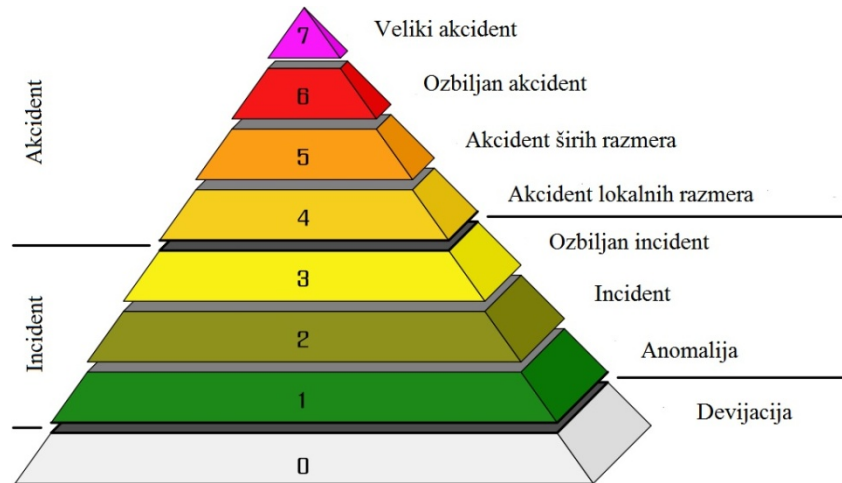
Slika 3.4. Praktična upotreba osiromašenog urana: a) Fizičko delovanje municije na oklopna vozila
b) Primena u naoružanju i municiji

Tipičan primer upotrebe osiromašenog urana odnosi se na municiju višecevnog topa kalibra 30 *mm* koji je standardni deo naoružanja borbenog aviona *A 10 Thunderbolt*. Specifičnost ove municije je u postojanju tkz. penetratora (igle) težine 350 *gr* i prstena od mekšeg materijala koji ga pridržava. S obzirom na veliku kinetičku energiju prilikom udara u ciljnu tačku (mnogo veću nego kod klasičnog zrna) i znatno veću tvrdoću penetranta od čelika (ciljne tačke) dolazi do probijanja pancirnog čelika debljine do 100 *mm*. Međutim, bez obzira na slabu radioaktivnost duže izlaganje ljudskog tela zračenju izotopa U 238 može dovesti do trajnih posledica (oštećenja DNK). Najveća opasnost po ljudsko zdravlje od osiromašenog urana dolazi od lanaca ishrane, jer se na taj način izvor α zračenja unosi u organizam. Ako čestica osiromašenog urana veličine par mikrona dospe u ljudski organizam može izazvati trajne posledice, čije delovanje nije trenutnog karaktera, jer se manifestuje nakon izvesnog perioda i može kulminirati smrtnim ishodom.

3.1.3.1. JONIZUJUĆE ZRAČENJE

Polonijum je radioaktivni element otkriven još davne 1898. godine od strane Marije Kiri, a koji se kao i uranijum dobija iz rude uraninit. Polonijum ima malu zastupljenost u prirodnom stanju i to samo u rudama urana, zbog kratkog vremena poluraspada. Polonijum ima 33 izotopa čije se atomske mase kreću između 194 i 218, a koji su nepostojani na duži vremenski period [174]. Najpostojaniji izotop polonijuma je sa atomskim brojem 209, dobija se u laboratorijskim uslovima postupkom bombardovanja atoma bizmuta neutronima i njegovo vreme poluraspada iznosi 105 godina. Najpostojaniji izotop polonijuma koji se nalazi u prirodnom stanju je sa atomskim brojem 210 i njegovo vreme poluraspada je svega 138 dana. Međutim, posebno je značajno istaći da osobine izotopa Po-210 omogućavaju njegovo korišćenje kao "savršenog" otrova. Radioaktivnost ovog izotopa se manifestuje preko α čestica, pa se potpuna zaštita po ljudski organizam može sprovesti ukoliko se čuva (skladišti) u npr. običnim staklenim bočicama sa polimernim čepom. To omogućava lako rukovanje i prenošenje ove suspstancie čak i u delovima odeće, bez opasnosti po živote ljudi. Međutim, ukoliko se ova suspstanca unese u organizam, ona usled visokog stepena apsorpcije vrlo brzo dospeva u krvotok, pa praktično ne postoje šanse da se preživi.

Radijacija usled delovanja α čestica oštećuje DNK organizam i stvara veliki broj jona koji imaju progresivno štetan uticaj na organe dovodiće do smrti. Izražena apsorpciona svojstva izotopa Po-210 utiču na vrlo teško otkrivanje radijacije preko Gajgerovog brojača, pa je samim tim pogodan za nelegalni transport. Polonijum je jedna od najtoksičnijih poznatih supstanci koja je čak nekoliko milijardi puta otrovnija od hidrogen cijanida. Zato mala količina polonijuma garantuje sigurnu smrt u kratkom vremenskom periodu (manje od mesec dana). S obzirom na ove činjenice, izotop Po-210 se danas koristi isključivo kao “špijunsko oružije” za neutralisanje uticajnih protivničkih snaga. Specifičnost ovoga izotopa je što nakon isteka njegovog vremena poluraspada nije moguće utvrditi prisustvo u organizmu. U budućnosti se očekuje znatno šira primena polonijumovih izotopa u vidu raznih modifikacija za municiju kod konvencionalnog naoružanja.



Slika3.5. Internacionalna skala nuklearnih i radioloških događaja (INES)

Upotreba urana kao nuklearnog goriva zahteva njegovo obogaćivanje izotopom U-235 u opsegu od 3-5 %. Nuklearno gorivo se tokom procesa eksploatacije u reaktoru transformiše u radioaktivni izotop U-238 koji je poznat pod nazivom osiromašeni uranijum. Zamena nuklearnog goriva se sprovodi kada se sadržaj izotopa U-235 spusti na granicu njegove isplativost od 0,2-0,3 %, dok se materijalni nusprodukt fisijonog procesa u reaktoru odbacuje kao nuklearni otpad. Radioaktivnost osiromašenog urana je oko $17,83 \text{ Bq/mg}$ i za oko 30 % je manja od radioaktivnosti uranijuma u prirodnom stanju ($25,4 \text{ Bq/mg}$), dok je vreme njihovog poluraspada skoro 4468 miliona godina [174]. Procene su da trenutno u svetu ima preko milion tona nuklearnog otpada (osiromašenog uranijuma), a posebno je zabrinjavjući podatak da se svake godine generiše dodatnih 46000 tona [174]. Ovu količinu radioaktivnog otpada stvara samo nekoliko zemalja u svetu, koje su svrstane u nuklearne sile (SAD, Rusija, UK, Francuka, Kina, Indija, Pakistan, Severna Koreja i Izrael). Ispitivanja i praktična upotreba je pokazala da municija sa osiromašenim uranijumom može bez ikakvih problema probiti kvalitetnu čeličnu ploču debljine do 100 mm. Posebnu opasnost prilikom udara zrna u cilj predstavlja generisanje aerosoli kada nastaje zapaljenje i oksidacija do 70 % penetratora. Prilikom upotrebe osiromašenog uranijuma postoje tri potencijalna vida kontaminacije [174]:

- Dubinska kontaminacije zemljišta od nesagorelih projektila,
- Površinska kontaminacija usled nastanka aerosoli i
- Tačkasta kontaminacija sagorelih projektila.

Dubinska kontaminacija zemljišta osiromašenim uranijumom nastaje u dva slučaja: a) kada projektil promaši metu i b) kada projektil probije metu manje debljine odnosno otpornosti. Površinska kontaminacija nastaje kao posledica udara projektila u metu velike otpornosti, kada usled visoke temperature dolazi do sagorevanja projektila odnosno formiranja oksida osiromašenog uranijuma. Ovi oksidi su uzrok nastanka sitnih čestica veličine nekoliko mikrona (najčešće oko $5 \mu\text{m}$), a koje se nazivaju aerosoli. Tačkasta kontaminacija nastaje prilikom udara projektila u teško oklopljena vozila kada sagoreli ostaci (fragmenti) projektila ostaju u površinskom sloju zemljišta.

3.1.4. KOROZIVNE OSOBINE

Korozivne odnosno nagrizajuće supstance predstavljaju hemikalije (hemijska jedinjenja i smeše) koje imaju sposobnost da pri kontaktu sa nekim materijalima (npr. metalima) odnosno tkivom izazivaju njihovo oštećenje ili potpuno uništenje isključivo hemijskim putem, kroz odvijanje hemijske reakcije (slika 3.6). Naziv korozivne je izveden od latinske reči *corrodere* koja znači *glodati*, jer u suštini izrazito korozivne supstance uništavaju (glođu) sve sa čim dođu u kontakt. Dakle, svaka hemijska supstanca koja može izazvati najmanja oštećenja na tkivu pri kontaktu sa kožom, očima, respiratornim ili degestivnim traktom i time ugroziti ljudski organizam se smatra nagrizajućom supstancom. Naravno, one supstance koje su agresivnije prirode mogu znatno oštetiti ili potpuno hemijski uništiti vrlo postojane materijale kao što metali, nemetali i dr. U praksi se često koristi naziv kaustične supstance i predstavlja uži pojam od korozivnih materija, pošto se odnosi samo na baze (ne obuhvataju kiseline, oksidatore i druge nealkalne korozive). Najveći broj korozivnih supstanci čine kiseline i baze, pa je pogrešno shvatanje da se korozivne supstance isključivo odnose na kiseline, dok se baze zanemaruju i stavljaju u drugi plan. Najčešće korišćene kiseline su: hlorovodonična, sumporna, azotna, hromna, sirćetna i hlurovodonična. Bazne supstance (baze) koje se najčešće upotrebljavaju u praksi su: amonijum hidroksid, kalijum hidroksid i natrijum hidroksid.

U zavisnosti od hemijskih osobina korozivne supstance pored nagrizajućeg (iritirajućeg) dejstva mogu imati i dodatne štetne efekte, kao što su toksičnost, eksplozivnost, zapaljivost i dr. Osnovna karakteristika većine korozivnih supstanci je njihova toksičnost, naročito kada se radi o kiselinama. Zato veći broj korozivnih supstanci odlikuje nagriza-toksičan efekat, a tipičan primer je supstanca pod nazivom *Glutaraldehyd*. Ova supstanca se klasifikuje kao korozivna i ima veliku primenu u medicini i stomatologiji za sterilizaciju instrumenata, tretmanu prečišćavanja voda, industriji kao konzervans, biohemiji služi za inaktivaciju bakterijskih toksina radi stvaranja vakcina, eksploataciji nafte i gasa za hidrauličku frakturu fluida i kao izvor organskog ugljenika koji koriste vodene biljke u akvarijumima. Iako nema dokaza o kancerogenom dejstvu ova supstanca je izuzetno štetna po zdravlje ljudi, jer ima jak iritirajući efekat u kontaktu sa tkivom i vrlo je toksična ako dospe u organizam.

Primer supstance koju karakteriše više štetnih efekata (korozivnost, zapaljivost, eksplozivnost, toksičnost i reaktivnost) po zdravlje ljudi i bezbednost u toku odvijanja manipulativnih aktivnosti vezanih za nju i njene produkte je organsko jedinjenje *dimetildihlorosilan*. Ova supstanca je osnovna sirovina u sintezi silikona, jer se od nje direktnim postupkom dobija silicijum karbid (komponenta silikona). Dimetildihlorosilan ima veliku praktičnu primenu i kao premaz za stakla u cilju izbegavanja adsorpcije mikro čestica (time se sprečava formiranje filma na površini stakla). Ovu supstancu karakteriše izuzetno nagrizajući efekat nezavisno od toga da li se njeno štetno dejstvo manifestuje kroz kontakt tečne faze sa kožom ili preko prodora isparenja u respiratorni trakt (tačka ključanja od 70 °C). Dimetildihlorosilan je lako zapaljiva supstanca, a zbog relativno niske tačke ključanja i lako isparljiva čija para može formirati eksplozivne smeše. Otežavajuća okolnost je veća specifična težina pare ove supstane od vazduha, pa se zato one skupljanju u prizemnim slojevima prostorija kod kojih je slabo provetravanje. Dimetildihlorosilan je reaktivna supstanca sa vodom, vlažnim vazduhom i vodenom parom oslobađajući toplotu i generišući isparenja hlorovodonika. Reakcija sa organskim i neorganskim kiselinama odnosno bazama je veliki izvor opasnosti, jer kao produkti nastaju toksični i zapaljivi gasovi. Ovaj primer najbolje pokazuje da se u praktičnoj primeni vrlo često mogu naći multihazardne supstance sa izuzetno nepovoljnim efektom po ljudske živote, sigurnost materijalnih dobara i očuvanje životne sredine.

Na osnovu prethodnih razmatranja izvodi se generalni zaključak da sve nagrizajuće supstance možemo sa spekta dodatnih štetnih efekata (multihazarda) podeliti u dve grupe:

- a) Korozivne supstance bez dodatnog rizika (tabela 3.5) i
- b) Korozivne supstance sa dodatnim rizikom (tabela 3.6).

Klasifikacija ambalaže korozivnih supstanci se sprovodi prema stepenu njihove opasnosti u toku transporta i razlikujemo tri grupe (vrste) pakovanja:

- 1) Grupa I (vrlo korozivne supstance i inhalaciona toksičnost prašine ili magle od LC_{50}),
- 2) Grupa II (umereno korozivne supstance) i
- 3) Grupa III (slabo korozivne supstance i materije sa oralnom/ dermalnom toksičnošću).

Tabela 3.5. Korozivne supstance bez dodatnog rizika

| Vrsta supstance | Priroda porekla | Agregatno stanje | Oznaka | UN kod | Naziv nagrizajuće supstance |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| KISELINE | Neorgansko | Tečno | C1 | 2584 | Alkilsulfonska kiselina (tečnosti sa > 5% H ₂ SO ₄) |
| | | | | 2584 | Arilsulfonska kiselina (tečnosti sa > 5% H ₂ SO ₄) |
| | | | | 2693 | Bisulfiti, vodeni rastvori |
| | | Čvrsto | C2 | 2837 | Bisulfati, vodeni rastvori |
| | | | | 3264 | Korozivne neorganske kiseline i tečnosti |
| | | | | 1740 | Hidrogendifluridi |
| | Organsko | Tečno | C3 | 2583 | Alkilsulfonska kiselina (čvrsta tela sa > 5% H ₂ SO ₄) |
| | | | | 2583 | Arilsulfonska kiselina (čvrsta tela sa > 5% H ₂ SO ₄) |
| | | | | 3260 | Korozivna čvrste neorganske supstance i kiseline |
| | | | | 2586 | Alkilsulfonska kiselina (tečnosti sa > 5% H ₂ SO ₄) |
| | | Čvrsto | C4 | 2586 | Arilsulfonska kiselina (tečnosti sa > 5% H ₂ SO ₄) |
| | | | | 2987 | Hlorosilan sa korozivnim delovanjem |
| | | | | 3145 | Alkilfenolne tečnosti (uzimajući C ₂ i C ₁₂ homologe) |
| | | | | 3265 | Korozivne organske tečnosti (kiseline) |
| BAZE | Ne-organsko | Tečno | C5 | 2430 | Akrilfenoli – čvrsta tela (C ₂ i C ₁₂ homolozi) |
| | | | | 2585 | Alkilsulfonska kiselina (čvrsta tela sa < 5% H ₂ SO ₄) |
| | | 2585 | Arilsulfonska kiselina (čvrsta tela sa < 5% H ₂ SO ₄) | | |
| | Organsko | Tečno | C7 | 3261 | Korozivna organske kiseline u obliku čvrstih tela |
| | | | | 1719 | Kaustični alkali i tečnosti |
| | | | | 2797 | Baterijska tečnost, alkali |
| | | Čvrsto | C6 | 3266 | Korozivne neorganske bazne tečnosti |
| | | | | 3262 | Korozivna neorganska bazna čvrsta tela |
| | | | | 2735 | Korozivni tečni amini |
| | | | | 2735 | Korozivni tečni poliamini |
| DRUG KORROZIVNE SUPSTANICE | Kombinovano (organsko i neorgansko) | Tečno | C9 | 3267 | Korozivne organske bazne tečnosti |
| | | | | 3259 | Korozivni amini u obliku čvrstog tela |
| | | | | 3259 | Korozivni poliamini u obliku čvrstog tela |
| | | Čvrsto | C10 | 3263 | Korozivna organska bazna čvrsta tela |
| | | | | 1903 | Tečno korozivno sredstvo za dezinfekciju |
| | | | | 2801 | Korozivne tečne boje za farbanje |
| ROBA | Kombinovano (organsko - neorgansko) i (čvrsto - tečno) | C11 | 2801 | Srednje korzivne tečne boje | |
| | | | 3066 | Boje (emajl, lak, lake baze i sl.) | |
| | | | 3066 | Dodati materijal za boje i lakove (komponente) | |
| | | | 1760 | Korozivne tečnosti | |
| | | | 3147 | Korozivne boje u obliku čvrstog tela | |
| | | | 3147 | Srednje korozivne boje u obliku čvrstog tela | |
| | | | 3244 | Korozivna čvrsta tela koja sadrže tečnosti | |
| 1759 | Korozivna čvrsta tela | | | | |
| 2794 | Baterije, vlažne, ispunjene kiselinom | | | | |
| 2795 | Baterije, vlažne, ispunjene alkalima | | | | |
| 2800 | Baterije, vlažne, nerazlivajuće | | | | |
| 3028 | Baterije, suve, sadrže telo od kalijum hidroksida | | | | |

Tabela 3.6. Korozivne supstance sa dodatnim rizikom

| Vrsta supstance | Agregatno stanje | Oznaka | UN kod | Naziv nagrizajuće supstance |
|-----------------------|------------------|--------|--------|----------------------------------------------------------------------|
| ZAPALJIVO | Tečno | CF1 | 2734 | Amini, tečni, korozivni, zapaljivi |
| | | | 2734 | Poliamini, tečni, korozivni, zapaljivi |
| | | | 2986 | Hlorosilani, korozivni, zapaljivi |
| | | | 2920 | Korozivne tečnosti, zapaljive |
| | Čvrsto | CF2 | 2921 | Korozivna tela, zapaljiva |
| SAMO-ZAGREVAJUĆE | Tečno | CS1 | 3301 | Korozivne tečnosti, samozagrevajuće |
| | Čvrsto | CS2 | 3095 | Korozivna čvrsta tela, samozagrevajuća |
| VODO-REAKTIVNO | Tečno | CW1 | 3094 | Korozivne tečnosti, vodo-reaktivne |
| | Čvrsto | CW2 | 3096 | Korozivna čvrsta tela, vodo-reaktivna |
| OKSIDUJUĆE | Tečno | CO1 | 3093 | Korozivne tečnosti, oksidujuće |
| | Čvrsto | CO2 | 3084 | Korozivna čvrsta tela, oksidujuća |
| TOKSIČNE | Tečno | CT1 | 2922 | Korozivne tečnosti, toksične |
| | Čvrsto | CT2 | 2923 | Korozivna čvrsta tela, toksična |
| ZAPALJIVO - TOKSIČNE | Tečno | CFT | - | Nije dostupan kolektivni unos za osobine prema ovim kvalifikacijama. |
| OKSIDUJUĆE - TOKSIČNE | - | COT | - | Nije dostupan kolektivni unos za osobine prema ovim kvalifikacijama. |

Alokacija korozivnih supstanci u navedene tri ambalažne grupe je izvršena na bazi iskustva uzimajući u obzir dodatne faktore kao što su inhalacioni rizik, reaktivnost sa vodom i produkcija opasnih fragmenata usled reakcije nestabilne korozivne supstance sa nečistoćama. Prva grupa pakovanja se odnosi na korozivne supstance koje su u stanju da izazovu potpunu destrukciju kožnog tkiva u periodu do 60 min posmatrano nakon 3 min izlaganja. U drugu grupu pakovanja se svrstavaju korozivne supstance koje mogu naneti potpuno oštećenje kožnog tkiva, ali u znatno dužem periodu opservacije koji iznosi do 14 dana, dok je vreme izlaganja u intervalu od 3-60 minuta. Treća grupa se odnosi na supstance koje imaju identične uslove oštećenja kožnog tkiva i perioda opservacije kao supstance iz druge grupe pakovanja, dok je vreme izlaganja duže i kreće se od 1 min do 4 h.

Treba istaći da su ovi kriterijumi predviđeni za klasifikaciju korozivnih supstanci koje odlikuje znatan nagrizajući efekat, pa se postavlja pitanje kako odrediti ambalažnu grupu onih hemikalija kod kojih nagrizajuće dejstvo ne može u potpunosti uništiti kožno tkivo, bez obtira na vreme izlaganja. U tu svrhu treba koristiti iskustvene podatke o posledicama usled izlaganja određenim korozivnim materijama ili razmatranjem njihovog potencijalnog učinka na određenim metalnim površinama. U nedostatku ovih informacija se predviđa korišćenje eksperimentalno dobijenih podataka koji su sistematizovani u skladu sa Direktivom OECD 404.

Supstance i smeše se ne mogu klasifikovati kao korozivne supstance (opasne materije klase 8), ako ne ispunjavaju bar jedan od navedenih kriterijuma:

- Direktiva 67/548/EEC ili 88/379/EEC kao i njihove izmene i dopune predviđaju postojanje korozivnog uticaja za datu supstancu odnosno smešu i
- Ne pokazuje se korozivno dejstvo na čeliku ili aluminijumu.

Supstance i smeše koje ispunjavaju jedan od navedenih kriterijuma se klasifikuju kao korozivne supstance (smeše) i razstavaju u osmu klasu opasnih materija prema ADR-u.

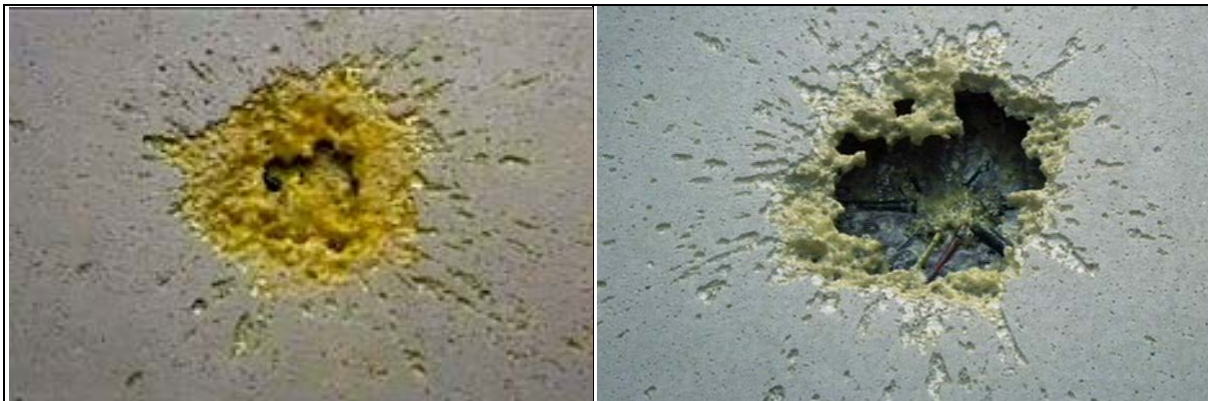
Hemijski nestabilne korozivne supstance se ne smeju izlagati procesu transporta, osim ako se ne preduzmu mere za odstranjivanje nečistoća iz rezervoara (posuda) kako bi se eliminisali uzročnici njihove dekompozicije ili polimerizacije. Nestabilne supstance ili smeše pri transportu mogu da fragmentiraju, naročito pod uticajem stranih tela (nečistoća) što dovodi do nastanka jedinjenja male molekulske mase. Ova jedinjenja mogu međusobno reagovati sve dok se ne iscrpe slobodne funkcionalne grupe, kao produkt ovih reaktanata nastaju molekuli sa znatno većom molekulskom masom (polimeri), a sam proces polimerizacije može pratiti burna reakcija.

Korozivne supstance koje nisu prihvatljive za transport obuhvataju:

- Nitrohirdohlorična kiselina (UN 1798),
- Hemijski nestabilne smeše korišćene sumporne kiseline,
- Hemijski nestabilne smeše za nitrovanje (smeša azotne i sumporne kiseline) ili smeše rezidualne sumporne i azotne kiseline bez denitracije i
- Vodeni rastvor perhlorne kiseline sa više od 72 % mase odnosno rastvora čiste kiseline ili mešavina perhlorne kiseline sa bilo kojom tečnošću osim vode.

Korozivne supstance nalaze veliku primenu u procesima hemijske industrije za postizanje veće reaktivnosti pri odvijanju hemijskih reakcija (npr. proces alkilacije u rafinerijama nafte). Stepem hemijske reaktivnosti potreban za adekvatno odvijanje procesa zavisi od efektivne koncentracije reaktivnih supstanci. Korzivne supstance su neizbežna sirovina u tehnološkim procesima za dobijanje naftnih derivata. Tipičan primer upotrebe korozivnih supstanci u procesnoj industriji odnosi se na sumpornu kiselinu koja predstavlja jednu od osnovnih sirovina za odvijanje procesa alkilovanja u rafinerijama nafte. Alkilovanje predstavlja proces sekundarne prerade nafte pri kome se izo-alkan sjedinjuje sa gasovitim alkenom, pri čemu kao produkt nastaje benzin visoke oktanske vrednosti. Znači, alkilovanjem se dobijaju derivati aromatičnih ugljovodonika radi povećanja oktanskog broja, a može se realizovati termičkim i katalitičkim putem. Proces katalitičkog alkilovanja se odvija na temperaturi od 5 °C i atmosferskom pritisku uz delovanje pomenute korozivne supstance koja ima ulogu da pojača aktivnost karbokatjona (jona sa pozitivno naelektrisanim atomom ugljenika) odnosno reaktivnih intermedijata pod većom koncentracijom kisele sredine, čime se povećava brzina odvijanja hemijske reakcije.

Korozivne supstance nalaze veliku primenu ne samo kao sirovine i/ili aditivi za odvijanje hemijskih procesa u industrijskim postrojenjima, već i kao roba široke potrošnje za svakodnevnu kućnu upotrebu (npr. sredstava za čišćenje, održavanje i sl.), pošto kiseline imaju mogućnost rastvaranja masti i proteina.



Slika 3.6. Korozivno (nagrizajuće) delovanje sumporne kiseline na ploči aluminijuma

3.2. PODELA I KLASIFIKACIJA OPASNIH MATERIJIA

Podela opasnih materija se zavisno od njihovih karakteristika sprovodi na bazi više kriterijuma prema sledećim parametrima:

- 1) Fizičko-hemijske osobine opasnih materija,
- 2) Vrste opasnosti shodno uticaju opasnih materija na život i zdravlje ljudi,
- 3) Uticaj opasnih materija na ugroženost životne sredine,
- 4) Stepent opasnosti koji prati ljudstvo angažovano u akcidentnim situacijama,
- 5) Grupisanje opasnih materija sa sličnim osobinama i istom vrstom opasnosti i
- 6) Nastanak otpada sa svojstvima opasnih materija (opasan otpad).

Prethodno navedeni kriterijumi za podelu opasnih materija predstavljaju bazu za klasifikaciju opasnih materija radi njihovog razvrstavanja u određene grupe odnosno klase. U uvodnom delu ovog poglavlja je naglašeno da postoji veliki broj opasnih materija, pri čemu mnoge od njih imaju slične osobine i mogu izazvati istu vrstu opasnosti (npr. požar, eksploziju itd.). Imajući ovo u vidu, osnovni cilj klasifikacije je primena identičnih mera za određene grupe (klase) opasnih materija kako bi se u znatnoj meri povećao stepen efikasnosti i organizovanosti u sprovođenju preventivnih mera, a naročito pri delovanju u akcidentnim situacijama.

Klasifikacija prema fizičkim i hemijskim osobinama opasnih materija odnosi se na sledeće klase opasnosti:

- Eksplozivne,
- Oksidujuće,
- Veoma zapaljive,
- Lako zapaljive i
- Zapaljive.

Klasifikovanje opasnih materija prema vrsti opasnosti koje imaju uticaj na život i zdravlje ljudi podrazumeva sledeće klase opasnosti:

- Veoma toksično,
- Toksično,
- Štetno,
- Korozivno,
- Iritativno,
- Senzibilno,
- Kancerogeno,
- Mutageno i
- Toksično za reprodukciju.

Klasifikacija koja se tiče uticaja opasnih materija na životnu sredinu se manifestuje preko vrste opasnosti koja je razvrstana u grupu odnosno klasu: Opasno po životnu sredinu.

Klasifikacija opasnih materija prema stepenu opasnosti koje mogu nastati pri reagovanju u akcidentnim situacijama podrazumeva postojanje tri kategorije:

- Opasnost po zdravlje,
- Opasnost od paljenja i
- Opasnost od reaktivnosti.

Svaka od ove tri kategorije se može podeliti na pet stepeni opasnosti, počev od stepena "0" do stepena "4", pri čemu veći broj pokazuje veću opasnost od ugroženosti ljudskih života, zapaljivosti ili uticaja reaktivnosti. Ovaj tip klasifikacije opasnih materija se odnosi na standardizovani sistema za identifikaciju opasnosti pri intervencijama u akcidentnim situacijama (kôd 704), koji je propisan od strane *Američke Nacionalne agencija za zaštitu od požara* (NFPA) i nosi oznaku NFPA 704. Inače, u literaturi je za razvrstavanje opasnih materija po ovom kriterijumu uobičajen naziv *NFPA klasifikacija* i on je dominantan u SAD.



Osnovni ciljevi ovog standarda definišu: procedure za implementaciju, upotrebu specijalne opreme, postupke reagovanja pri razvoju akcidentnih faza i mere opreza koje treba preduzeti tokom intervencija u vanrednim situacijama kako bi se minimizovala ugroženost angažovanog ljudstva. Ovde treba istaći veliki značaj postojanja propisa iz NFPA kategorije, a koji su formirani tako da obezbede načine za sprečavanje nastanka incidenata. Najbolji dokaz za to je postojanje više od 300 propisa između kojih postoji opšta saglasnost, namenjenih da u značajnoj meri smanje potencijalnu ugroženost prevashodno od požara, ali i od drugih izvora opasnosti (npr. eksplozije, izlivanja i sl.) u toku odvijanja različitih procesa (proizvodnje, transporta i skladištenja).

Prema propisu NFPA 704 sve relevantne informacije su sadržane u *rombu* koji je podeljen na četiri jednaka polja (Tabela 3.7), a čija je svrha da interventnim službama omoguće brzu i laku identifikaciju hazarda od opasnih materija. Znak prema NFPA 704 preko levog, gornjeg i desnog kvadrata prikazuje opasnosti od štetnog uticaja na ljude, zapaljivosti i reaktivnosti (osetljivosti na vodu, temperaturu, pritisak, udare i dr.), respektivno. Donji kvadrat daje neke specifične informacije o opasnoj materiji koje su posebno značajne za reagovanje u konkretnim situacijama (npr. nije dozvoljeno gasiti vodom, biološki opasan materijal, radioaktivno i dr.). Ove informacije su značajne kako se prilikom intervencija ne bi dogodilo iniciranje domino efekta i stvaranje još veće štete nego što bi bila kao rezultat spontanog stihijskog procesa. Uloga znaka prema propisu NFPA 704 je vrlo praktična i celishodna, uzimajući u obzir da je suština intervencija pri pojavi akcidenata njegova lokalizacija odnosno sprečavanje daljeg širenja, ne ugrožavajući ljudske živote i materijalna dobra.

Često se u literaturi i tehničkoj praksi koriste izrazi za materije kojima se želi istaći stepen njihove opasnosti odnosno štetnog uticaja na život i zdravlje ljudi i one mogu biti: materije nultog (0), prvog (1), drugog (2), trećeg (3) i četvrtog (4) stepena ugroženosti odnosno opasnosti. Ovo razvrstavanje je u skladu sa NFPA 704 i pruža informacije koje su bitne za neposredno planiranje i organizovanje interventnih aktivnosti u toku incidenta. Karakteristike ovih materija su definisane simbolima 0, 1, 2, 3, 4 u okviru plavog dela tabele 3.7 sa svrhom da definišu vrstu, kompletost i stepen specijalizovanosti zaštitne opreme koja je obavezna u toku izvođenja intervencija. S obzirom da je osnovna funkcija NFPA standarda omogućavanje boljeg uvida u prirodu pojedinih incidenata i definisanje načina za njihovo upravljanje, tj. sprečavanje sa aspekta zaštite ljudi, pojedinim kodovima ovog standarda će se posvetiti veća pažnja u okviru tematike hemijskih udesa (poglavlje 4).

Klasifikacija opasnih materija prema sličnosti njihovih osobina podrazumeva grupisanje u određene klase sa istom vrstom opasnosti. Osnovna svrha klasifikacije podrazumeva primenu istih preventivnih mera, što znatno pojednostavljuje organizaciju planiranja i realizaciju tokom odvijanja logističkih procesa (transporta, pretova, skladištenja i sl.). Osnovni dokument koji reguliše klasifikaciju opasnih materija prema potencijalno istoj vrsti opasnosti odnosi se na *Međunarodnu konvenciju o prevozu opasnih materija*. Ovo je osnovni dokument koji reguliše klasifikaciju opasnih materija, iako u svetu postoji više nacionalnih i internacionalnih propisa i preporuka koji regulišu ovu oblast.

Tabela 3.7. Klasifikacija opasnih materija prema propisu NFPA 704

| Primer označavanja u skladu sa NFPA 704 za HLOR | | Naziv | Simbol | Značenje |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|---------------------------------|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | | Rizik po zdravlje (plavo polje) | 0 | Bez posebnih opasnosti po zdravlje ljudi i mera predostrožnosti, radi se običnim zapaljivim materijama (npr. drvo). |
| | | | 1 | Mali rizik, izlaganje izaziva iritaciju, preporučuje se korišćenje maske za disanje (npr. aceton, natrijum bromat i sl.). |
| | | | 2 | Opasno, kraće izlaganje izaziva privremenu onesposobljenost, rad sa maskom i lakšom zaštitnom odećom (npr. etil etar i sl.). |
| | | | 3 | Veoma opasno, kratka izloženost izaziva ozbiljne povrede, rad pod punom opremom (npr. hlor, ugljen-monoksid, i sl.). |
| | | | 4 | Izuzetno opasno, kratko izlaganje može izazvati smrt, rad sa kompletnom opremom (npr. sarin, hidrogen cijanid i sl.). |
| | | Zapaljivost (crveno polje) | 0 | Nema opasnosti od paležnj pr normalnim uslovima, otpornost na požar: 820 °C za 5 min (npr. beton, kamen i sl.). |
| Simbol | Značenje | | 1 | Rizik od paljenja može se javiti samo uz prethodno zagrevanje iznad 93 °C (npr. mineralna ulja). |
| prazno | Koristiti vodu za gašenje | | 2 | Povišen rizik od paljenja uz povišenu temperaturu ambijenta, tačka paljenja materije od 38-93 °C (npr. dizel gorivo i sl.). |
| W | Gašenje bez upotrebe vode | | 3 | Visok rizik od paljenja pri normalnim uslovima, karakteriše materije sa tačkom paljenja od 23-38 °C (npr. benzin, aceton i sl.). |
| OX | Materijal je oksidirajući | | 4 | Izuzetno zapaljive materije koji pri normalnim uslovima lako isparavaju, tačka paljenja ispod 23 °C (npr. acetilen, vodonik i sl.). |
| | | Reaktivnost (žuto polje) | 0 | Bez opasnosti pri normalnim uslovima, čak ako je i pod dejstvom vatre, nije reaktivan sa vodom (npr. helijum) |
| ACID | Materija je kiselina | | 1 | Stabilan pri normalnim uslovima, ali postaje nestabilan kada se zagreva ili kada je pod pritiskom (npr. propen). |
| ALK | Materijal je baza | | 2 | Nestabilan pri povišenim temperaturama i pritiscima, burno reaguje sa vodom i formira eksplozivne smeše (npr. fosfor). |
| COR | Materijal je korozivan | | 3 | Vrlo nestabilan, postoji rizik od eksplozije pod uticajem toplote ili udara, zahteva formiranje bezbednosne zone (npr. amonijim nitrat) |
| BIO | Materijal je biološki opasan | | 4 | Izuzetno veliki rizik od eksplozije pri normalnim uslovima, u slučaju požara zahetva hitnu evakuaciji (npr. nitroglicerina). |
|  | Radioaktivna supstanca | | | |

Većina zemalja u svetu su potpisnice prethodno navedene Konvencije, pa suštinske razlike između nje i ostalih propisa praktično ne postoje. Razlika se odnosi samo u pogledu konkretizacije pri razvrstavanju opasnih materija po klasifikacionim grupama. Međunarodna klasifikacija opasnih materija predstavlja osnovu za definisanje uslova i pravilnika pri rukovanju sa opasnim materijama u toku proizvodnih i logističkih procesa. Kada se govori o klasifikaciji opasnih materija poseban akcenat je stavljen na problematiku transporta. Koji će vid transporta biti primenjen ne zavisi od vrste opasne robe, već od rezultata optimizacije na koji dominantno utiču ekonomičnost transportno-logističkog ambijenta i zahtevi proizvodno-tehnoloških procesa. Zato se transport opasnih materija može odvijati sa svakim vidom saobraćaja imajući u vidu pojedina ograničenja tehničke prirode (npr. cevni transport se ne može primeniti za čvrste opasne materije, već isključivo za tečne).

Kako svaki vid saobraćaja (drumski, železnički, vazdušni, vodni i cevni) ima neke prednosti i nedostatke, njihova zastupljenost u prevozu opasnih materija je u korelaciji sa parametrima koji definišu efikasnosti transportnog procesa. Najkritičnija faza u distributivnom lancu snabdevanja opasnih materija se odnosi upravo na spoljašnji transport i obuhvata dve faze: nabavku sirovina (ako i one imaju svojstva opasnih materija) i transport od proizvodnih postrojenja odnosno proizvodnih skladišta do distributivnih centara i krajnjih korisnika. Iz ovih razloga je sprovedena klasifikacija opasnih materija u grupe (klase) zavisno od vida transporta odnosno saobraćaja, pri čemu se razlikuje:

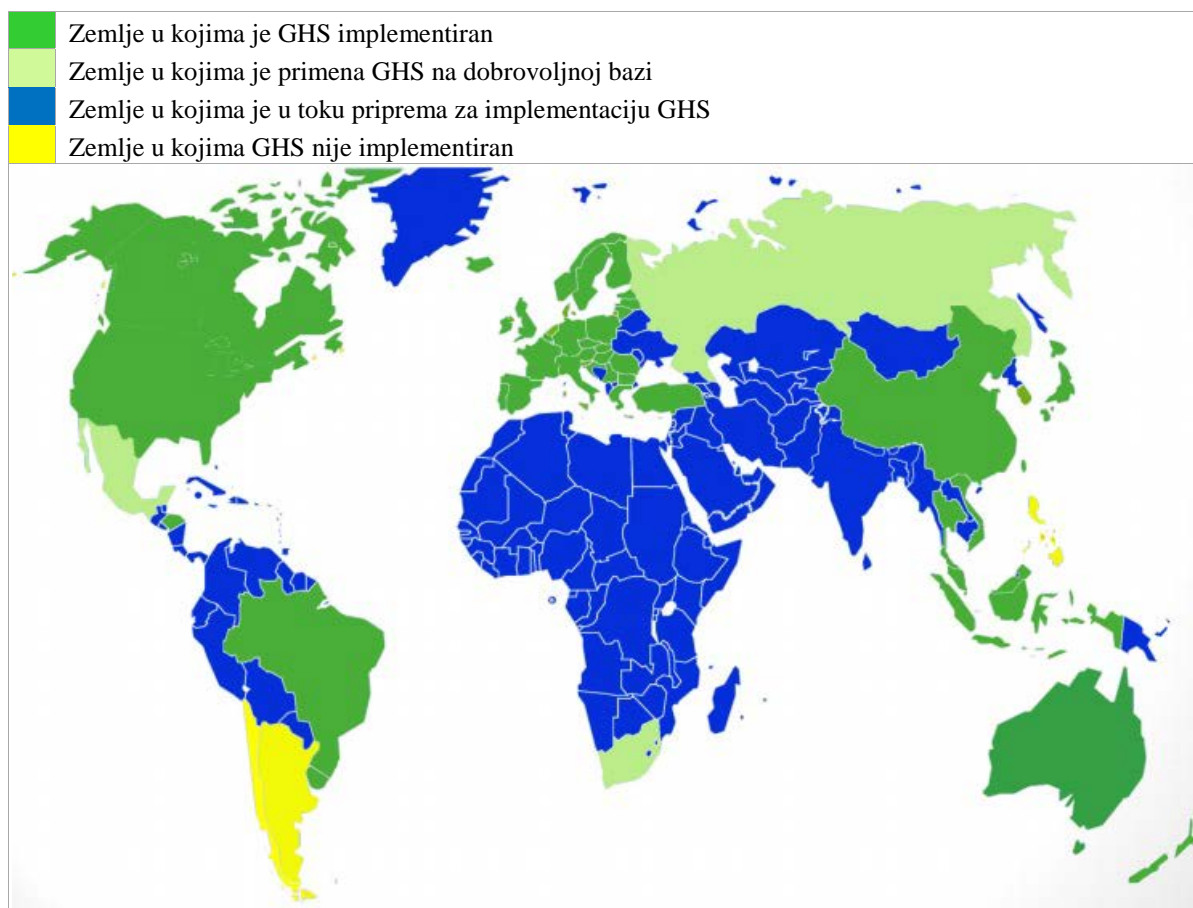
- Klasifikacija opasnih materija u drumskom saobraćaju (ADR),
- Klasifikacija opasnih materija u železničkom saobraćaju (RID),
- Klasifikacija opasnih materija u vazdušnom saobraćaju (ICAO),
- Klasifikacija opasnih materija u pomorskom saobraćaju (IMDG – CODE) i
- Klasifikacija opasnih materija u saobraćaju na unutrašnjim rečnim putevima (ADN).

3.3. GLOBALNO HARMONIZOVANI SISTEM (GHS)

Globalno harmonizovani sistem (GHS) za klasifikaciju i obeležavanje hemikalija je globalni sporazum kojim je ustanovljena usaglašenost u klasifikaciji, obeležavanju i pakovanju hemikalija odnosno hemijskih supstanci i smeša (proizvoda). GHS je stvoren iz potrebe za jedinstvenim sistemom klasifikacije i obeležavanja kako bi se omogućilo da:

- Kriterijumi za klasifikaciju i korespondentni elementi obeležavanja budu identični,
- Svi korisnici hemikalija moraju biti na istovetan način informisani o opasnostima i
- Jednostavnija distribucija (prodaja) hemikalija.

GHS je univerzalni sistem koji pruža širok spektar informacija o hemijskoj bezbednosti kroz harmonizovani proces klasifikacije i obeležavanja hemikalija (opasnih materija) i kao takav ima veliki uticaj na sve nacionalne i internacionalne propise koji regulišu ovu oblast. GHS je sistem stvoren pod okriljem UN sa ciljem da identifikuje opasne materije i da kroz simbole (oznake) pruži sve neophodne informacije korisnicima o stepenu opasnosti.



Slika 3.7. Implementacija GHS u zemljama širom sveta

Normalno funkcionisanje savremenih proizvodno-tehnoloških procesa nije moguće bez korišćenja hemikalija koje se mogu javiti u obliku sirovina, poluproizvoda, potrošnog materija ili kao nusprodukt samog procesa. Hemikalije se definišu kao hemijske supstance i smeše i po prirodi svog nastanka mogu biti prirodne i veštačke. Ukupan broj trenutno identifikovanih hemikalija se kreću preko 10 miliona od čega se 100000 intenzivno proizvodi za komercijalnu upotrebu, a svake godine se ovaj broj povećava za više od 200 novih hemikalija koje dolaze na tržište.

Procenjuje se da je proizvodnja hemikalija na godišnjem nivou preko 400 miliona tona, a da Evropa sa učešćem od 38 % svetskog prometa ima primat u njihovoj proizvodnji.

Osnovna uloga svih hemikalija je ostvarivanje pogodnosti življenja na direktan ili indirektni način. Hemikalije koje nastaju kao finalni proizvod imaju direktan uticaj na poboljšanje uslova življenja, jer se njihova distribucija vrši u smeru ka krajnjem potrošaču. Hemikalije u obliku sirovina ili poluproizvoda nemaju potrošačku upotrebnu vrednost, već se prethodno šalju na dalju preradu u cilju dobijanja finalnog proizvoda, pa zato ove materije imaju indirektni uticaj na stvaranje pogodnosti savremene civilizacije. Ono što je zajedničko za obe grupe hemikalija je stvaranje uglavnom štetnog nusprodukta kao rezultata njihove proizvodnje i upotrebe. Tipični primeri koji ilustruju prethodne navode za hemikalije direktnog uticaja na standard života su pesticidi, farmaceutski proizvodi, sredstva za čišćenje, održavanje higijene i sl.

Primena pesticida u poljoprivredi povećava prinose i stvara uslove za većom konkurentnošću prehrambene industrije kroz niže cene hrane, što je jedan od preduslova zavidnog standarda stanovništva. Proizvodi farmaceutske industrije (medikamenti) se primenjuju za sprovođenje različitih terapija u pogledu očuvanja zdravlja i produženja životnog veka ljudi. Sredstva za čišćenje i održavanje lične higijene omogućuju humanije uslove življenja i preventivno deluju na pojavu zaraznih bolesti. Međutim, postoji i druga strana upotrebe hemikalija, a ona karakteriše neadekvatno korišćenje kako u pogledu prevelike doze, tako i sa aspekta nepoštovanja uputstva za korišćenje i upotrebu. Prevelika količina pesticida dovodi do nedozvoljeno velike koncentracije različitih otrova u lancu ishrane. Primena neodgovarajućih medikamenata i upotreba u većim količinama od propisanih može ozbiljno ugroziti zdravlje ljudi, pa čak dovesti i do smrti. Sredstva za čišćenje takođe mogu biti vrlo štetna po zdravlje sa trajnim posledicama, ako se nestručno i neodgovorno upotrebljavaju. Hemikalije koje se javljaju u vidu hemijskih supstanci obuhvataju hemijske elemente i jedinjenja koja se javljaju u prirodnom obliku ili kao produkt proizvodnog procesa (veštačka tvorevina). Hemikalije koje se javljaju u obliku smeša nastaju kao rezultat mešavine dve ili više supstanci i isključivo su rezultat programiranog proizvodnog procesa u cilju dobijanja poluproizvoda (sirovine za dalju preradu), finalnog proizvoda i/ili eventualno nusprodukta.

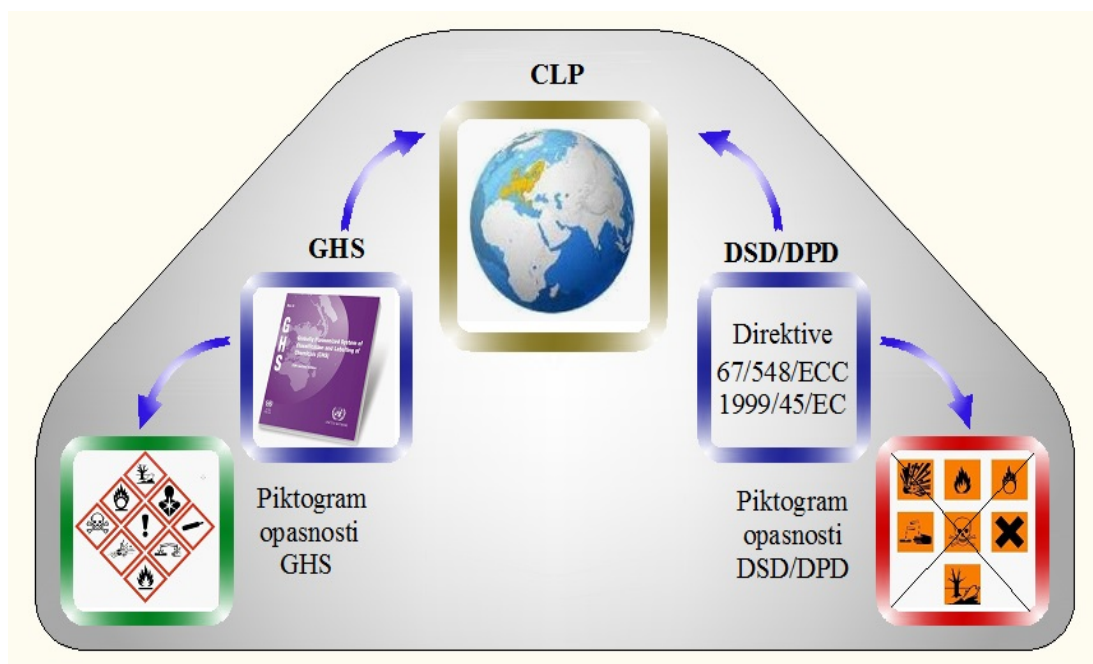
Pojavni oblik materije koji karakteriše vezu između hemikalija i opasnih materija odnosi se na supstance (smeše), pa se sa ovoga aspekta hemikalije mogu tretirati kao opštiji pojam. Sa ove tačke gledišta to znači da nisu sve hemikalije opasne (iako većina jeste), dok sve opasne materije sa pojavnim oblikom supstance imaju odlike opasnih hemikalija. Opasne hemikalije se prema *Zakonu o hemikalijama* (Službeni glasnik RS br. 36/2009) smatraju onim supstancama odnosno smešama koje nose izvestan stepen fizičke opasnosti i hemijskog uticaja štetnog po zdravlje ljudi i okolinu u skladu sa Direktivama 67/548/EEC (DSD) i 1999/45/EC (DPD), kao i Uredbom 1272/2008/EC Evropskog parlamenta i veća koji je izvan delovanja pomenutih Direktiva. Opasne hemikalije su hemijske supstance i smeše koje odlikuje pojava fizičko-hemijske, toksikološke ili ekotoksiološke opasnosti. Dakle, ako neku hemikaliju karakteriše bar jedna od navedene tri grupe opasnosti tada je ona opasna. Klasifikacija opasnih hemikalija se vrši prema vrsti i stepenu fizičko-hemijskih uticaja koji mogu imati štetne efekte po zdravlje ljudi i životnu sredinu, ako se u postupku njihove direktne upotrebe, transporta, manipulacije ili skladištenja ne poštuju zakonom propisane procedure i uputstva.

Informaciju o vrsti i stepenu opasnosti koji nosi određena hemikalija se određuje na bazi bezbednosnog lista i etikete. Bezbednosni list je dokument koji daje detaljan prikaz svih relevantnih podataka o hemikaliji sa akcentom na tipove opasnosti, transport i skladištenje kroz sledećih 16 poglavlja:

- 1) Fizička i hemijska svojstva,
- 2) Stabilnost i reaktivnost,
- 3) Toksiološke informacije,
- 4) Ekotoksiološke informacije,
- 5) Skladištenje i odlaganje,
- 6) Podaci o transportu,
- 7) Zakonska regulativa i
- 8) Ostale informacije.

Koristeći informacije iz bezbednosnog lista proizlazi formiranje etikete određene opasne hemikalije. Drugim rečima, etiketa je sažeti oblik bezbednosnog lista u kojoj se nalaze samo one informacije koje su bitne za krajnjeg korisnika i odnose se isključivo na upotrebu tokom korišćenja (npr. štetno ako se proguta, čuvati van domašaja dece, iritativno za kožu, nositi odgovarajuću zaštitnu odeću tokom korišćenja, opasnost od oštećenja zdravlja pri dužem izlaganju udisanjem i dr.).

CLP je Uredba o razvrstavanju, označavanju i ambalažiranju supstanci i smeša (1272/2008/EC) koja se nalazi u operativnoj upotrebi od 2009. godine i u potpunosti je nakon prelaznog perioda zamenila Direktive 67/548/EEC i 1999/45/EC odnosno dosadašnji način razvrstavanja i obeležavanja. CLP Uredba preuzima kriterijume za razvrstavanje, obeležavanje i pakovanje hemikalija koji su dogovoreni na nivou UN preko implementacije GHS-a. Razvrstavanje opasnih materija prema ovoj Uredbi se sprovodi na osnovu klasifikacionih kriterijuma prema definisanim grupama (klasama) opasnosti. Glavni ciljevi CLP Uredbe su da olakšaju međunarodnu trgovinu hemikalijama i da se održi zahtevani nivo zaštite ljudi i životne sredine. Ovom Uredbom se usaglašava prethodna zakonska regulativa EU o klasifikaciji, obeležavanju i pakovanju hemikalija koja je poznata pod nazivom GHS.














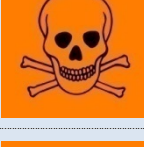







Slika 3.8. Razvojni put u implementaciji CLP Uredbe (1272/2008/EC)

Fundamentalne razlike novog i starog sistema klasifikacije:

- 1) Bolja i jasnija kategorizacija vrste i stepena opasnosti zbog postojanja više klasa,
- 2) Primenjen je novi sistem obeležavanja,
- 3) Korigovane granične vrednosti odnosno kriterijumi za klasifikaciju,
- 4) Primena drugih metoda za izračunavanje graničnih vrednosti,
- 5) Primat u definisanju graničnih vrednosti imaju eksperimentalni postupci i
- 6) GHS je primenljiv u velikom broju zemalja sa tendencijom dalje implementacije.

Tabela 3.8. Obeležavanje na osnovu klasifikacije hemikalija (stari i novi sistem označavanja)

| Stari sistem označavanja | | | Novi sistem označavanje opasnih hemikalija (u primeni od 01.06. 2015.) | |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Tip hazarda | DSD/DPD | Ozn. | Klasa i kategorija opasnosti | GHS |
| · Eksplozivno |  | E | <ul style="list-style-type: none"> · Nestabilni eksplozivi · Eksplozivi, podklasa 1.1, 1.2, 1.3 i 1.4 · Samoreaktivne supstance i smeše, tip A i B · Organski peroksidi tip A i B |  |
| · Veoma lako zapaljivo · Lako zapaljivo |  | F ⁺ F | <ul style="list-style-type: none"> · Samozapaljivi gasovi (kat.1), aerosoli (1-2) i tečnosti (1-3) · Zapaljive čvrste hemikalije, kat. 1 i 2 · Samoreaktivne supstance i smeše, tipa B, C, D, E i F · Samozapaljive tečnosti i čvrste supstance, kat. 1 · Samozagrevajuće supstance i smeše, kat. 1 i 2 · Vodoreaktivno oslobađanje zapaljivih gasova, kat. 1, 2 i 3. · Organski peroksidi, tip B, C, D, E i F |  |
| · Oksidujuće |  | O | <ul style="list-style-type: none"> · Oksidujući gasovi, kat. 1 · Oksidujuće tečnosti, kat. 1, 2 i 3 · Oksidujuće čvrste supstance i smeše, kat. 1, 2 i 3 |  |
| | | | · Gas pod pritiskom |  |
| · Korozivno |  | C | <ul style="list-style-type: none"> · Hemikalije korozivne za metale, kat. 1 · Korozivno oštećenje kože, kat. 1A, 1B i 1C · Teško oštećenje oka, kat. 1 |  |
| · Veoma Toksično · Toksično |  | T ⁺ T | · Akutna toksičnost, kat. 1, 2 i 3 |  |
| · Štetno · Iritativno · Senzibilno |  | Xn Xi | <ul style="list-style-type: none"> · Akutna toksičnost, kat. 4 · Iritacija kože i oka, kat. 2 · Senzibilizacija kože, kat. 1 · Specifična toksičnost za ciljni organ, kat. 3 |  |
| · Mutageno, · Karcinogeno, · Toksično po reprodukciju, kat. 1 i 2 |  | T | <ul style="list-style-type: none"> · Senzibilizacija respiratornih organa, kat. 1 · Mutagenost germinativnih ćelija, kat 1A, 1B i 2 · Karcionogenost, kat. 1A, 1B i 2 · Toksičnost po reprodukciju, kat. 1A, 1B i 2 |  |
| · Mutageno · Karcinogeno, · Toksično po reprodukciju, kat. 3 |  | Xn | <ul style="list-style-type: none"> · Specifična toksičnost za ciljni organ – jednokratna izloženost, kat. 1 i 2 · Specifična toksičnost za ciljni organ – višekratna izloženost, kat. 1 i 2 · Opasnost od aspiracije, kat. 1 |  |
| · Opasno po životnu sredinu |  | N | <ul style="list-style-type: none"> · Opasnost po vodenu životnu sredinu: Akutno, kat. 1 · Hronično, kat. 1 i 2 |  |

4. HEMIJSKI UDESI

Rapidan industrijski razvoj tokom XX-og veka i globalizacija svetskog tržišta koja je obeležila početak XXI-og veka uticali su na cenovnu i prostornu pristupačnost robe različitog asortimana od strane potrošača (kupaca) širom sveta. Intenzivna tražnja za robom određenog kvaliteta zahteva povećanje kapaciteta robnih tokova i razvoj distributivne mreže koja je sposobna da odgovori zahtevima tržišta. S druge strane, sirovinska baza za većinu proizvoda savremene tehnologije zasnovana je na korišćenju materija koje se po svojim osobinama mogu kvalifikovati kao opasne materije. Najbolja ilustracija za ovu tvrdnju je da se trenutno u svetu prema podacima UN proizvodi više od 4,5 miliona različitih hemijskih jedinjenja odnosno opasnih materija, a da njih oko 7000 (1,55%) ima vrlo rasprostranjenu primenu u različitim industrijskim granama. Uzimajući u obzir ove činjenice date na globalnom nivou, lako je zaključiti da se u narednom periodu problematici transporta opasnih materija mora pokloniti mnogo veća pažnja, posebno sa aspekta razvoja novih pristupa u upravljanju rizikom koji bi blagovremeno zamenili tradicionalne koncepte.

Prema podacima ILO-a učešće transportnih akcidenata u ukupnom broju hemijskih udesa iznosi 35%. Imajući u vidu vrlo veliku zastupljenost opasnih materija u proizvodima današnjice i tendenciju rasta njihovog učešća u narednom periodu, posebno kod robe široke potrošnje, neophodno je razviti zaštitni mehanizam od njihovog štetnog delovanja. To podrazumeva poznavanje karakteristika finalnih proizvoda (robe), njihovih komponenata, sirovinskog sastava komponenata i njihovu reaktivnost u određenim uslovima. Poznavanje fizičko-hemijskih svojstava robe je preduslov za adekvatno definisanje planova preventivnog delovanja i zaštite u slučaju nastanka hemijskih udesa odnosno akcidenata sa opasnim materijama. Znači, preventivno delovanje i zaštita ljudi, materijalnih resursa i životne sredine obuhvata sistematsko sagledavanje i analizu dve redno vezane aktivnosti. Prva aktivnost se tiče identifikacije karakteristika opasnih materija bitnih za sagledavanje posledica njihovog eventualnog štetnog delovanja. Nakon ove nastupa sledeća (druga) aktivnost koja ima za cilj da na bazi specifičnosti opasnih materija definiše mere preventivne zaštite, postupanja u slučaju hemijskog udesa i saniranja posledica udesa.

Ekspanzija rasta i raspoloživosti novih proizvoda i usluga, mobilnosti investicija i ljudi (radne snage) uz primenu informacionih sistema čini osnovne elemente za izgradnju neoliberalnog koncepta globalizacije. Važan element ovog koncepta čini fleksibilnost i mobilnost koji se ne mogu realizovati bez efikasnog delovanja transportnog sistema.

4.1. HEMIJSKI UDESI

Hemijski udes se definiše kao slučajan i neočekivan događaj koji za posledicu ima pesimistički ishod, a može biti prouzrokovan ljudskom nepažnjom, sistemskim propustom u kontroli proizvodno-logističkih procesa, spletom slučajnih okolnosti ili organizovanim delovanjem (sabotažom). Hemijski udes je spontani stohastički proces pri kome dolazi do nekontrolisane oslobađanja opasnih materija, njihovog sagorevanja i eksplozije u toku proizvodnih i logističkih aktivnosti (transportu, skladištenju, pretovaru i dr.). Posledice hemijskog udesa se ogledaju u kontaminaciji okruženja oko mesta iniciranja i manifestuje se kroz procese paljenja, eksplozije, oslobađanja, curenja, izlivanja, isparavanja, prodiranja i disperzije opasnih materija u okruženje. Zakon o vanrednim situacijama („Službeni glasnik RS“ br. 111/2009, 92/2011 i 93/2012) definiše tehničko-tehnološki udes kao iznenadni i nekontrolisani događaj koji je izmakao kontrolisanom upravljanju nad određenim sredstvima za rad i/ili prilikom rukovanja sa opasnim materijama u procesu proizvodnje, transporta, skladištenja i pratećih logističkih radnji, a čije posledice mogu ugroziti bezbednost ljudi, dobra i ekosistema. S obzirom na ovu definiciju lako je zaključiti da se ona odnosi na statičke i dinamičke uslove i da obuhvata sve tehnološke procese u toku manipulacije opasnih materija. Na bazi toga tehničko-tehnološki i hemijski udesi predstavljaju jedan te isti proces, tj. ova dva termina su sinonimi.

Hemijski udar je planski organizovana aktivnost koja se realizuje upotrebom hemijskog oružja u toku ratnih dejstava. Posledice hemijskih udara po pravilu imaju veći efekat na izazivavnje štetnih posledica po ljude, materijalna dobra i životnu sredinu, jer je dejstvo opasnih materija planski organizovano, unapred predviđeno (testirano) i fokusirano na ključne ciljeve napada (mete). Ovo ne znači da su nenamerno (slučajno) izazvani hemijski udesi manje opasni, već da je delovanje hemijskih udara racionalnijeg karaktera. Hemijske udare karakteriše kontrolisani proces koji sa minimalnim utroškom bojnog otrova (opasnih materija) treba da se ostvari maksimalan efekat. U okviru prethodnog pasusa koji analizira uzroke nastanka hemijskog udesa napomenuto je da sabotaža može biti jedan od uzročnika nastanka hemijskog udesa (uglavnom u proizvodnim i skladišnim kapacitetima). Upravo ovaj uzročnik predstavlja sponu između hemijskih udesa i hemijskih udara. Naime, hemijski udari predstavljaju vid *otvorene agresije* i čin su najbrutalnijeg delovanja u savremenim sukobima zaraćenih strana. Ovakav vid agresije se vrlo često vraća agresuru kao bumerang kroz medijsko reagovanje što smanjuje efekte agresorske politike. Ostvarenje ovih ciljeva sa znatno manjim rizikom od kontraefekta se ostvaruje koristeći doktrinu *prikrivene agresije* zasnovane na perfidnosti grupe (pojedinaца) unutar protivničkog tabora. Sabotažom hemijskih postrojenja ili skladišta od strane grupa ili pojedinaca koji su zaposleni u takvim kompleksima, uz logističku podršku sa strane može doći do velikih ili katastrofalnih hemijskih udesa. Ovim se postiže trostruki efekat:

- 1) Iznenadno delovanje (šok efekat),
- 2) Nema direktne veza sa nalogodavcem napada i
- 3) Otvara se prostor za politiku ucena (vlasti se ucenjuju sa gubitkom bezbednosne stabilnosti zemlje).

Naravno, ovim efektima treba pridodati materijalnu štetu nastalu na nekom vitalnom delu postrojenja za proizvodnju ili skladištenje opasnih materija (eksplozivnih, radioaktivnih, zapaljivih i sl.), kao i ljudske gubitke koji su uglavnom kolateralna šteta. Jasno se može uočiti da je efekat sabotažnih hemijskih udesa u direktnim posledicama skoro identičan sa hemijskim udarima (ista ili približna materijalna šteta i ljudski gubici), dok indirektno posledice daju znatnu prednost agresoru imajući u vidu prethodno navedena tri efekta. Praktični primeri sabotažnih hemijskih udesa nisu retki u svetu i kod nas, ali je većina njih pod velom tajni. Za ovu priliku će se navesti i analizirati hemijski udes koji se dogodio u fabrici GRMEČ sredinom 1995. godine. Tragičan bilans ovog akcidenta je 11 poginulih i 9 povređenih radnika (inženjera i majstora koji su bili angažovani na proizvodnji, za većinu njih nepoznate opasne materije), potpuno raskomadana mašina za valjanje (izvlačenje folije) od 20 t i uništena proizvodna hala.

Imajući u vidu do tada uobičajen proizvodni program fabrike ovaj akcident nije imao nikakve kvalifikacije tipične nesreće na radu, već se može tretirati isključivo kao sabotažna aktivnost. Uzrok snažne eksplozije je prah amonijum-perhlorat koji se koristi kao sirovina (komponenta) za proizvodnju kompozitnog raketnog goriva, a kao jak oksidans burno reaguje u kontaktu sa organskim materijama ili varnicom. Finalni proizvod je vrlo stabilan, srednje brizantni eksploziv koji ima oblik folije. Bezbedna proizvodnja ovog eksploziva se odvija u specijalizovanim pogonima namenske industrije (Lučani – namenska) uz strogo kontrolisani proces i adekvatne mere predostrožnosti. Prethodno navedene činjenice, kao i složena vojno-politička situacija u to vreme navode na zaključak da se radi o posebnoj vrsti sabotažanog hemijskog udesa.

Katastrofalni događaji (katastrofe) su iznenadni i ekstremni nesrećni slučajevi izazvani delovanjem prirodnih sila ili ljudskog delovanja sa fatalnim posledicama po živote ljudi, materijalna dobra i životnu sredinu. Zbog prirode svog delovanja, katastrofalni događaji čine normalno odvijanje svakodnevnog života nemogućim, jer posledice prelaze granicu izdržljivosti stanovništva (ekstremne vremenske nepogode, ratni sukobi i sl.). Katastrofalni događaj nastaje kao posledica hazarda (izvora opasnosti), osetljivosti na pojavu opasnosti i neadekvatnog potencijala za suzbijanje rizika od njegove pojave.

4.1.1. KLASIFIKACIJA I KATEGORIZACIJA HEMIJSKIH UDESA

Kategorizacija hemijskih udesa predstavlja sistematizovan pristup u primeni svih relevantnih tehnika (metoda, pravilnika, praktičnih iskustava, softvera i sl.) koji treba da obezbede osnovu za njihovu potpunu identifikaciju.

Klasifikacija hemijskih udesa podrazumeva njihovo svrstavanje u grupe sa identičnim ili vrlo sličnim karakteristikama. Kategorizacija hemijskih udesa se sprovodi na osnovu rezultata njihove klasifikacije i značajna je za uspostavljanje jedinstvenog sistema vrednovanja rizika. To znači da svaki hemijski udes karakteriše određena grupa parametra koji nemaju isti uticaj na krajnji ishod udesa (posledice).

Najopštija podela hemijskih udesa je prema njihovom poreklu i oni mogu biti:

- Prirodni i
- Veštački (antropogeni)

Klasifikacija hemijskih udesa prema mestu njihovog nastanka obuhvata:

- Proizvodnja (fiksna) postrojenja za proizvodnju i preradu opasnih materija,
- Transportna sredstva za prevoz opasnih materija,
- Skladišta opasnih materija (industrijska, distributivna i dr.),
- Deponije otpada koje imaju karakteristike opasnog otpada i
- Domaćinstva pri svakodnevnoj upotrebi (npr. propan-butan, sona kiselina itd.)

U zavisnosti od obima geografske rasprostranjenosti kontaminirane zone hemijski udesi mogu biti:

- Lokalni,
- Regionalni,
- Nacionalni i
- Globalni.

Prema stepenu posledica sa smrtnim ishodom hemijski udesi se dele na:

- Tehnološke katastrofe (≥ 25 mrtvih),
- Veliki hemijski udesi (≥ 5 mrtvih) i
- Značajni hemijski udesi (≥ 3 mrtvih).

Osnovni procesi koji se mogu javiti nakon iniciranja hemijskog udesa obuhvataju:

- Eksplozije,
- Požari i
- Izlivanje (curenje) opasnih materija.

4.1.2. FAZE HEMIJSKIH UDESA

U literaturi postoji velika šarenolikost i sloboda tumačenja faza koje se javljaju u toku procesa nastanka hemijskog udesa. Pravilna identifikacija faza hemijskog udesa je od vitalnog značaja za pravovremeni adekvatni odgovor na nastalu akcidentnu situaciju u cilju preduzimanja aktivnosti lokalizacije kontaminirane zone i uklanjanja (sanacije) negativnih posledica udesa. Najopštija podela u razvoju faza akcidentnih situacija se može sprovesti prema latentnosti u procesu upravljanja rizikom od pesimističkog ishoda, pa se u tom smislu razlikuju dve kategorije pokazatelja za slučaj hemijskog udesa:

- Pokazatelji kumulativnog efekta latentnosti na iniciranje hemijskog udesa i
- Pokazatelji iniciranja i razvoja hemijskog udesa.

Prva grupa pokazatelja obuhvata latentne (skrивene) parametre koje je zbog nemogućnosti adekvatne merljivosti u toku odvijanja proizvodno-logističkih procesa veoma teško kvalitativno i kvantitativno identifikovati. Nedostatak relevantnih podataka iz ove kategorije pokazatelja se nadomešta sprovođenjem preventivnih mera u postupku planiranja aktivnosti za projektovanje i izgradnju fabričkih postrojenja, transportno-pretovarnih sredstava i organizovanje proizvodno-logističkih funkcija kako bi se rizik od hemijskog udesa sveo na prihvatljiv nivo. Osnovni izvor za generisanje preventivnih mera se uglavnom nalazi u iskustvenim podacima o hemijskim udesima koji se dopunjuju primenom savremenih simulacionih modela. Tipičan primer o značaju latentnih informacija za nastanak hemijskog udesa odnosi se na fenomen domino efekta koji je naročito karakterističan za logističke procese (transport i skladištenje).

Druga grupa pokazatelja je zasnovana na manifestnim (transparentnim) podacima koji su jasno vidljivi, pa se njihova identifikacija u pogledu kvalitativnih i kvantitativnih svojstava realizuje bez poteškoća koristeći merljive parametre. Ova grupa parametara obuhvata sve merodavne informacije za vreme trajanja hemijskog udesa koga karakterišu tri osnovne etape razvoja: inicijalizacija, kulminacija i sanacija. Znači, sve pojave koje karakterišu hemijski udese mogu se vizuelno sagledati radi kvalitativne procene, dok se uzimanjem uzoraka odnosno merenjem koncentracije opasnih materija u kontaminiranoj zoni kvantifikuju posledice akcidenta (udesu). Imajući u vidu prirodu ovih podataka sasvim je jasno da su oni činioци koji imaju dominantnu ulogu u lokalizaciji i suzbijanju hemijskog udesa, a naročito nakon njegovog okončanja kada se pristupa procesu sanacije kontaminirane oblasti. Raspoloživost i tačnost ovih podataka utiče na brzinu operativnog reagovanja sektora za vanredne situacije i sprečavanja akcidenata većih razmera, naročito kada postoji mogućnost domino efekta (npr. kompleks skladišta sa eksplozivnim ili zapaljivim materijama). Na osnovu prethodno sprovedene analize može se zaključiti da prva grupa pokazatelja, zbog svojstva latentnosti nije pogodna za neku proceduralnu obradu, u smislu primene nekih standardizovanih metoda procene rizika. Zato se upravljanje procesnim parametrima koji prethode hemijskom udesu u toku proizvodnje, prerade, manipulacije i transporta sprovodi na posredan način, kroz iskustvenu i intuitivnu primenu preventivnih mera. Druga grupa pokazatelja se odnosi isključivo na nastanak hemijskog udesa koga karakteriše stihijski proces odnosno nekontrolisani tok događaja. Međutim, parametri koji se identifikuju u toku i neposredno nakon hemijskog udesa su celishodni samo za upravljanje datom situacijom, kao i za obavljanje aktivnosti sanacije terena nakon udesa. S obzirom da je suština upravljanja rizikom od opasnih materija predviđanje hemijskih udesa ili ako to nije moguće, preduzimanje mera za ublažavanje njihovih posledica, sasvim je jasna spregnutost informacija iz prve i druge grupe pokazatelja. Ovaj podatak je značajan za sveobuhvatnu analizu pri proceni i upravljanju rizikom od hemijskog udesa.

Uticajni parametri tokom faza hemijskog udesa ne mogu direktno uticati na njihovo sprečavanje, ali mogu dati validne odgovore na stepen posledica akcidentnih situacija. U tom smislu je vrlo značajno identifikovati ključne faze hemijskog udesa i razlikujemo:

- Faza 1 – Stanje neposredno pre hemijskog udesa;
- Faza 2 – Inicijalizacija hemijskog udesa;
- Faza 3 – Razvoj primarne kontaminacione zone;
- Faza 4 – Propagacija uticaja hemijskog udesa i definisanje zone ugroženosti;
- Faza 5 – Lokalizacija i stavljanje pod kontrolu hemijskog udesa;
- Faza 6 – Okončanje hemijskog udesa i
- Faza 7 – Postakcidentna situacija (mere za preduzimanje sanacije terena).

Prva faza podrazumeva stanje opasnih materija neposredno pre hemijskog udesa kada se stvaraju preduslovi za iniciranje hemijskog udesa kao posledica kumulativnog efekta u neadekvatnom odvijanju tehnološkog procesa u proizvodnji ili distribuciji opasnih materija.

Duga faza se odnosi na inicijalizaciju hemijskog udesa koji nastaje kada parametri tehnološkog procesa (proizvodnog, transportnog ili skladišnog) dostignu kritičnu vrednost. Ova faza se javlja kao direktna posledica neadekvatnih preventivnih mera u prethodnoj fazi kako bi se redukovao kumulativan efekat ili nekontrolisana slučajnost.

Treća faza se javlja neposredno nakon iniciranja hemijskog udesa čiji tok razvoja zavisi od tipa procesa koji prati udes. Ova faza se odvija veoma brzo i najčešće se odvija u roku od nekoliko minuta, dok je maksimalno vreme trajanja ograničeno na 30 min. Trajanje ove faze kod hemijskih udesa koje prati eksplozivni procesi je ograničeno na svega nekoliko sekundi (npr. eksplozija boce sa TNG-om). Ovo ukazuje da priroda hemijskih udesa diktira vreme trajanja ove faze odnosno mogućnost reagovanja na udes. Treća faza hemijskog udesa predstavlja prvi korak u preduzimanju tehničko-tehnoloških mera na lokalizaciji udesa, pružanju prve pomoći i spašavanju zaposlenih.

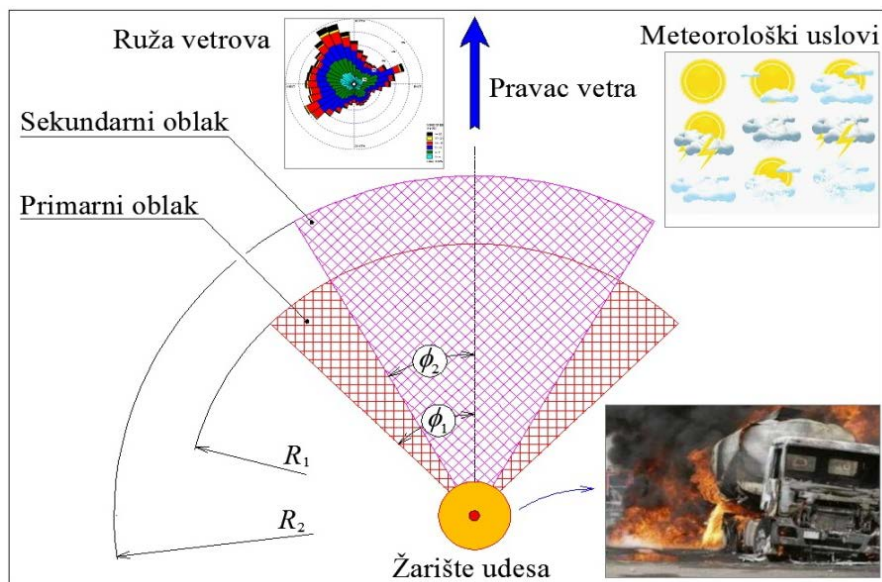
Četvrtu fazu karakteriše širenje kontaminacione zone nakon hemijskog udesa, ugrožavanje ljudskih života i životne sredine u užoj i/ili široj zoni udesa. Vreme nastupanja ove faze je obično 30 min nakon iniciranja hemijskog udesa i traje sve do uklanjanja njihovog uticaja prirodnim ili veštačkim putem. Uspešnost realizacije ove faze direktno zavisi od preduzetih mera na primarnom saniranju posledica udesa u prethodnoj fazi. U toku odvijanja ove faze radi se procena uticaja na ljude i životnu sredinu u cilju definisanja i kategorizacije zona ugroženosti. Na bazi ove procene pravi se plan evakuacije stanovništva i zaštite flore, faune, stambenih i privrednih objekata. Obim i brzina sprovođenja aktivnosti u ovoj fazi na najbolji način pokazuje stepen organizovanosti institucija za delovanje u vanrednim situacijama.

Peta faza se može tumačiti kao poslednji korak u nizu aktivnosti četvrte faze, koji se zbog značaja razmatra kao zasebna celina. U ovoj fazi se prave prve preliminarne procene o posledicama hemijskog udesa, definiše se konačna kontaminaciona zona, analiziraju se trenutni i prognozirani meteorološki uslovi, vrši se obezbeđenje ugrožene zone i usmeravaju se svi materijalno-tehnički i ljudski potencijali na okončanje hemijskog udesa.

Šesta faza označava trenutak okončanja hemijskog udesa, ali u opštem slučaju ne i prestanak opasnosti. Ova faza je karakteristična po tome što obuhvata prelazan proces između akcidentne i postakcidentne situacije. Proces koji prate hemijski udes su svoje delovanje manifestovali kroz prethodnih pet faza, dok je težište ove faze na rešavanju problema nastalih nakon udesa (npr. pružanje pomoći stanovništvu u novonastalim okolnostima, osposobljavanje saobraćajnica i dr.).

Sedma faza se odnosi na postakcidentne aktivnosti koje obuhvataju sanaciju i otklanjanje posledica hemijskog udesa. Kvalitet sanacije zavisi od vrste i količine opasne materije, konfiguracije terena, meteoroloških uslova, organizovanosti i osposobljenosti sektora za vanredne situacije i koordiniranog delovanja svih relevantnih institucija (službi).

Žarište udesa predstavlja poziciju u kojoj je došlo do iniciranja hemijskog udesa (npr. pojave požara, eksplozije, izlivanja i sl.) radi njegove eskalacije i daljeg širenja. Kada se govori o žarištu hemijskog udesa treba imati u vidu da se radi o primarno zahvaćenju oblasti unutar koje su maksimalno izraženi efekti opasnih materija (Slika 4.1). Primarni oblak je oblak para opasne materije koji nastaje pri trenutnoj dehermatizaciji ili eksploziji rezervoara (sudova pod pritiskom) sa opasnim materijama pri čemu dolazi do transformacije tečne faze u gasovito agregatno stanje.



Slika 4.1. Elementi hemijskog udesa

Tabela 4.1. Zone ugroženosti prema klasama opasnih materija

| Klasa opasnosti | Vrsta opasne robe | Podklasa opasnosti | Podvrsta opasne robe | Zona ugroženosti (m) |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------|
| 1 | Eksplozivna sredstva | 1 | | 800 - 1600 |
| | | 2 | | |
| | | 3 | | |
| | | 4 | | |
| | | 5 | | |
| | | 6 | | |
| 2 | Bojni otrovi i gasovi | 1 | Zapaljivi gasovi | 800 - 1600 |
| | | 2 | Komprimovani gasovi | 100 - 800 |
| | | 3 | Otrovni gasovi | 800 - 1600 |
| 3 | Lakozapaljive tečnosti | - | - | 300 - 800 |
| 4 | Zapaljiva tela, samozapaljive materije i vodo-reaktivne supstance | 1 | Zapaljive čvrste supstance | 100 - 800 |
| | | 2 | Samozapaljive materije | |
| | | 3 | Reaktivne supstance sa vodom | |
| 5 | Oksidne supstance i organski peroksidi | 1 | Oksidirajuće supstance | 100 - 800 |
| | | 2 | Organski peroksidi | 250 - 800 |
| 6 | Toksične materije i infektivne supstance | 1 | Toksične (otrovne) supstance | 100 - 800 |
| | | 2 | Infektivne (zarazne) supstance | |
| 7 | Radioaktivna sredstva | - | - | 100 - 300 |
| 8 | Korozivna sredstva | - | - | 900 - 1600 |
| 9 | Raznovrsne opasne materije | - | - | 25 - 500 |

4.1.3. RIZIK OD HEMIJSKIH UDESA

Koncept rizika je naročito postao popularan krajem dvadesetih godina prošlog veka sa pojavom velike ekonomske krizi i prvobitno je bio korišćen pri donošenju odluka u ekonomsko-finansijskoj praksi. Tokom druge polovine XX veka došlo je do implementacije rizika u gotovo sve naučne discipline, tako da je tumačenje ovog fenomena bilo različito i u skladu sa oblašću primene. Ovo je iniciralo za nastanak različitih definicija rizika kao posledica različitih ciljeva istraživanja. Pokušaji da se definiše jedinstvena definicija rizika koja bi bila univerzalnog karaktera i primenljiva za sve naučne discipline nisu urodili plodom zbog različitih gledišta (aspekata), stavova, nivoa znanja i iskustva istraživača. Prethodno iznete činjenice se mogu lako objasniti na primeru bilo koje proizvodne kompanije čija je osnovna struktura sastavljena od menadžmenta, tehničkog sektora, računovodstva i finansija, komercijalne službe, opštih poslova, informacionog odeska i marketinga. Personal tehničkog sektora (projektanti, konstruktori, rukovodici pogona itd.) imaju inženjerski koncept rezonovanja pri analizi rizika i na njega gledaju isključivo iz tehnološke perspektive, dok ekonomisti npr. finansijske službe na taj isti rizik gledaju samo na bazi ekonomskih i finansijskih pokazatelja. Ono što većinu definicija rizika povezuje su fraze *potencijalni nastanka nekog događaja* koga prati *pesimistički ishodi* odnosno *neželjene posledice*. Znači, rizik podrazumeva mogućnost nastanka nekog događaja, pa je egzistencija rizika neposredno vezana za neizvesnost (neznamo da li će se dogoditi). Nasuprot ovome, rizik ne prati one događaje koje karakteriše izvesnost neke situacije, tj. sa sigurnošću znamo za njihov ishod. Druga karakteristika rizika je postojanje većeg broja alternativnih situacija (najmanje dve) koje na različite načine generišu određene opasnosti. To znači da se pesimistički ishod nekog događaja kao posledica postojanja određenog rizika neće realizovati po jednom scenariju, već postoji više modaliteta (alternativa) čiji izbor nije determinističkog karaktera. Znači, rizik definišu dve nezavisne kategorije: neizvesnost i alternative scenarija.

Tradicionalni aspekt rizika je negativno (pesimistički) koncipiran čija se pojava vezuje za impliciranje opasnosti i pojavu negativnih posledica (gubitka ili oštećenja). Međutim, treba istaći da neke savremene smernice i standardi umesto klasičnog rizika razmatraju koncept *inverznog rizika* koji može imati optimistički efekat na postizanje određenih ciljeva. Veza rizika sa neizvesnošću se postiže na osnovu razlike između zavisnosti od slučaja (aleatorije) i epistemičke neizvesnosti. Aleatorizam potiče od latinske reči *alea* što znači *valjanje kocke* i podrazumeva uključivanje šanse u nekom procesu stvaranja. Ovaj koncept je najveću praktičnu primenu našao u umetnosti i književnosti. Zato je rizik merilo neodređenosti, a neodređenost je nemerljivi rizik [178-179].

Pojam rizika potiče od francuske reči *risique* koji je nastao tokom srednjeg veka na području francuskog govornog područja i prvobitno je bio vezan za pomorski saobraćaj i trgovinu. Tokom razvoja ljudskog društva fenomen rizika je najpre svoje utemeljenje našao u istorijskom i ekonomskom delovanju, da bi se kasnije sa nastankom industrijske revolucije integrisao u sferu tehničkog delovanja. Rizik podrazumeva mogućnost kvantifikacije u ostvarenju budućih događaja sa pesimističkim ishodom na osnovu poznate verovatnoće (raspodele očekivanja) njihovog nastanka. Rizik ne treba posmatrati kroz kontekst posledice koje može imati u određenim situacijama, već isključivo kao verovatnoću njegovog nastupanja. To znači da rizik istovremeno sadrži dva elementa: opasnost od pojave neželjenog (nesrećnog) događaja i priliku da se postigne izvestan rezultat. Upravljanje rizikom se ne može razmatrati nezavisno od strategija za upravljanje rizikom.

U naučnoj i stručnoj javnosti česti su slučajevi kada se o upravljanju rizikom naglašava sam rizik i njegova kvantitativna identifikacija, dok se metodološkom pristupu u kontroli procesa i odgovarajućem odgovoru na njegov monitoring stanja skoro ne pridaje nikakav značaj. Nerazumevanje ciljeva u procesu upravljanja rizikom često se mistifikuje i povezuje sa kompleksnim modelima za kvantitativnu procenu rizika. To ukazuje da na fenomen upravljanja rizikom ne treba gledati kao nezavisnu kategoriju, već kao praktičan mehanizam za realizaciju funkcija koje su predviđene odgovarajućim strategijama. Termin opasne materije je univerzalnog karaktera koji se odnosi na supstance i fizička polja, a čije delovanje na život i zdravlje ljudi kao i životnu sredinu može biti sa fatalnim ishodom. Izolovanost između opasnih materija i okruženja podrazumeva primenu permanentnog monitoringa uz sistematski planirane aktivnosti prevencije čiji kvalitet utiče na stepen rizika od pojave akcidente situacije.

U slučajevima kada se razmatra problematika transporta opasnih materija uobičajeno je da se u literaturi (posebno inostranoj) umesto naziva *transport opasnih materija* koristi kraće izraz *opasna roba* (dangerous goods), dok je u domaćoj regulativi uobičajen i naziv *opasan teret*.

Osnovne komponente upravljanja akcidentnim situacijama su:

- Hazard,
- Rizik,
- Ranjivost i
- Otpornost na udes.

Klasifikacija metoda za procenu opasnosti sprovodi se u zavisnosti od područja njihove primene i obuhvata:

- Metode za procenu rizika tehničkih sistema,
- Metode za procenu rizika radne snage,
- Metode za procenu rizika menadžmenta i
- Metode za analizu akcidenata.

Metode za procenu rizika tehničkih sistema su:

- Analiza modaliteta, efekata i kritičnosti otkaza,
- Analiza energije,
- Analiza stabla greške,
- Analiza stabla događaja,
- Studija hazarda i operabilnosti,
- Modeli analize posledica,
- Dijagram uzrok – posledica,
- Dijagram bezbednosne barijere,
- Matrica reakcije i
- Modeli analize posledice.

Metode za procenu rizika radne snage:

- Procena pouzdanosti čoveka,
- Analiza ljudske greške,
- Kognitivna pouzdanost i metod analize greške,
- Tehnika za procenu ljudske greške,
- Hijerarhijska analiza zadataka,
- Kognitivna analiza zadataka i
- Analiza bezbednosti rada.

4.2. TRANSPORT OPASNIH MATERIJIA

Tokom procesa transporta opasnih materija mogu se javiti sledeći rizici:

- Rizik od uništenja opasne robe (svaka roba ima svoju cenu, veći ili manju),
- Rizik od ugrožavanja života i zdravlja ljudi u kontaminiranoj zoni opasnih materija i
- Ekološki rizik (rizik od narušavanja životne sredine).

Procena rizika pri transportu opasnih materija je mnogo složenija od analize rizika u postrojenjima za proizvodnju i preradu opasnih materija, iako su rizici potpuno isti ili slični u oba slučaja. Međutim, treba naglasiti da posledice akcidenata za određenu vrstu i količinu opasne materije nastale unutar postrojenja najčešće nisu ni približno istovetne sa posledicama iste vrste i količine opasne robe.

Osnovni razlozi koji komplikuju procenu i upravljanje rizikom tokom transporta opasnih materija su:

- 1) Praktično, postoji veliki broj (teorijski, beskonačno mnogo) potencijalnih akcidentnih tačaka duž transportne rute, pošto se hemijski udes može desiti u svakoj tački posmatranog putnog pravca (u svakoj tačku rute postoji neka verovatnoća da će doći do udesa),
- 2) Rizik koji prati transport opasnih materija obuhvata svaku tačku unutar *kinematskog kruga opasnosti* koja se tokom iniciranja hemijskog udesa transformiše u *kontaminacionu elipsu*,
- 3) Kompleksna identifikacija hazarda kod transporta, jer su mnoge opasne materije ugrađene u finalne proizvode,
- 4) Hemijski udesi u transportnom procesu iniciraju znatno viši stepen rizika u odnosu na accidente nastale unutar fabričkih postrojenja, posmatrano za istu jediničnu količinu određene opasne materije,
- 5) Stohastička priroda nastanka saobraćajnih nezgoda zahteva kompleksnu analizu statističkih podataka za kvantifikaciju multirizika koji prati hemijski udes pri transportu,
- 6) Saniranje posledica hemijskog udesa nastalog tokom transporta karakteriše minorni interventni efekat u odnosu na fiksna postrojenja, zbog zahtevnijeg angažovanja sektora za vanredne situacije,
- 7) Infrastruktura kopnenog saobraćaja (drumskog i železničkog) je često trasirana kroz useke i klisure, duž rečnih tokova, jezera, brana i drugih prirodnih i/ili veštačkih tvorevina, tako da konfiguracija terena prostorno i vremenski ograničava blagovremeni pristup zoni hemijskog udesa,
- 8) Transportne rute često prolaze kroz gradske zone i naseljena mesta ili u njihovoj neposrednoj blizini, pa je rizik od ugroženosti stanovništva sveden po jediničnoj količini neke opasne materije daleko veći od odgovarajućeg rizika unutar proizvodnih postrojenja.
- 9) Potencijalne hemijske udesne nastale duž transportne rute prati daleko veći broj aktera sa većim stepenom posledica nego što je to slučaj kod postrojenja za proizvodnju i preradu opasnih materija i
- 10) Udesi pri transportu opasnih materija (npr. pad transportnog aviona sa opasnom robom, oštećenje tankera i dr.) mogu biti u nepristupačnim predelima, udaljeni od interventnih službi, drumskih saobraćajnica, bez mogućnosti za preduzimanje adekvatnih mera sanacije hemijskog udesa i zaštite ljudi odnosno ekosistema.

U literaturi postoji velika šarenolikost u tumačenju i analizi fenomena rizika, kao posledica kompleksnosti ove tematike i nedovoljno razvijenih alata za njegovu efikasnu procenu i upravljanje. Rizik je pesimistički procenjena posledica neke situacije čija je realizacija neizvesna. Postojanje rizika od pojave nekog neželjenog događaja ne znači istovremeno da će se on desiti, ali se sa velikom verovatnoćom može predvideti scenario negativnih efekata ako do realizacije tog događaja dođe.

4.3. ZAKONSKA REGULATIVA I PROPISI

Domaći dokumenti:

- Zakon o zaštiti životne sredine („Sl. glasnik RS”, br. 135/04 i 36/09),
- Zakon o integrisanom sprečavanju i kontroli zagađenja životne sredine, („Sl.glasnik RS”, broj 135/04),
- Zakon o proceni uticaja na životnu sredinu („Sl. glasnik RS”, br. 135/04),
- Zakona o strateškoj proceni uticaja na životnu sredinu objavljenom u Službenom glasniku Republike Srbije broj 135 od 2004. godine,
- Zakona o integrisanom sprečavanju i kontroli zagađivanja životne sredine objavljenom u Službenom glasniku Republike Srbije broj 135 od 2004. godine i Zakon o postupanju sa otpadnim materijama („Službeni glasnik Republike Srbije”, broj 25/96),
- Zakon o zaštiti od požara („Službeni glasnik SRS”, broj 37/88),
- Zakon o prevozu opasnih materija („Službeni list SFRJ”, broj 27/90),
- Zakon o eksplozivnim materijama, zapaljivim tečnostima i gasovima (Službeni glasnik SRS, br. 44/77, 45/85 i 18/89, Službeni glasnik RS br. 53/93, 67/93 i 48/94),
- Zakon o prevozu u međunarodnom drumskom saobraćaju (Službeni list SFRJ, br. 41/80, 56/80 i 33/87),
- Zakon o hemikalijama ("Sl. glasnik RS", br. 36/2009, 88/2010, 92/2011, 93/2012 i 25/2015),
- Pravilnik o listi opasnih materija i njihovim količinama i kriterijumima za određivanje vrste dokumenta koje izrađuje operater Seveso postrojenja, odnosno kompleksa ("Sl. glasnik RS", br. 41/2010),
- Pravilnik o listi opasnih materija i njihovim količinama i kriterijumima za određivanje vrste dokumenta koje izrađuje operater Seveso postrojenja, odnosno kompleksa (“Službeni glasnik RS”, br. 41 od 15. juna 2010, 51. od 12. juna 2015, 50 od 29. juna 2018.),
- Pravilnik o preventivnim merama za bezbedan i zdrav rad pri izlaganju hemijskim materijama ("Sl. glasnik RS", br. 106/2009 i 117/2017),
- Pravilnik o kategorijama, ispitivanju i klasifikaciji otpada (Sl. glasnik RS br. 56/10),
- Pravilnik o metodologiji za procenu opasnosti od hemijskog udesa i od zagađivanja životne sredine, merama pripreme i merama za otklanjanje posledica (Službeni glasnik RS, br. 60/94),
- Uredba o prevozu opasnih materija u drumskom i železničkom saobraćaju Sl glasnik R. Srbije 53/2002,
- Pravilnik o načinu postupanja sa otpacima koji imaju svojstva opasnih materija Sl Glasnik RS br. 12/95,
- Pravilnik o označavanju otrova koji se stavljaju u promet na domaćem tržištu, (Službeni list SRJ, br. 18/92, 50/92),

- Uredba o ratifikaciji Evropskog sporazuma o međunarodnom drumskom prevozu opasne robe (Službeni list SFRJ, dodatak, br. 59/72 i 35/71),
- Uredba o ratifikaciji Aneksa A i B Evropske konvencije o međunarodnom prevozu opasne robe u drumskom saobraćaju (Službeni list SRFJ, br. 32/86),
- Pravilnik o tehničkim normama za sisteme za ventilaciju i klimatizaciju ("Sl.list SFRJ", br. 38/89),
- Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu skladišta od požara i eksplozija („Sl.list SFRJ“, br. 24/87),
- Pravilnik o dozvoljenim količinama opasnih i štetnih materija u zemljištu i metodama za njihovo ispitivanje („Službeni glasnik Republike Srbije“, broj 11/90),
- Pravilnik o graničnim vrednostima, metodama merenja imisija, kriterijuma za uspostavljanje mernih mesta i evidenciji podataka („Službeni glasnik Republike Srbije“, broj 54/92),
- Pravilnik o graničnim vrednostima emisije, načinu i rokovima merenja i evidentiranja podataka („Službeni glasnik Republike Srbije“, broj 30/97),
- Pravilnik o izgradnji postrojenja za zapaljive tečnosti i o uskladištavanju i pretakanju zapaljivih tečnosti („Službeni list SFRJ“, broj 20/71 i 23/71),
- Klasifikacija eksplozivnih gasova i para JUS NS.8.003,
- Karakteristike opasnih zapaljivih gasova, tečnosti i isparljivih čvrstih supstanci JUS Z.C0.010,
- Klasifikacija materija i robe prema ponašanju u požaru JUS Z.C0.005,
- Pravilnik o izgradnji postrojenja za tečni naftni gas i o uskladištavanju i pretakanju tečnog naftnog gasa („Službeni list SFRJ“, br. 24/71, 26/71),
- Pravilnik o tehničkim normativima za spoljnu i unutrašnju hidrantsku mrežu za gašenje požara („Službeni list SFRJ“, br. 30/91),
- Pravilnik o tehničkim normativima za pristupne puteve, okretnice i uređene platoe za vatrogasna vozila u blizini objekta povećanog rizika od požara („Službeni list SRJ“ br. 8/95),
- Pravilnik o tehničkim normativima za uređaje za automatsko zatvaranje vrata ili klapni otpornih prema požaru („Službeni list SFRJ“, br. 35/80),
- Pravilnik o tehničkim normativima za električne instalacije niskog napona („Službeni list SFRJ“,br. 53/88),
- Pravilnik o tehničkim normativima za zaštitu od statičkog elektriciteta („Službeni list SFRJ“, br. 62/73),
- Pravilnik o tehničkim propisima o gromobranima („Službeni list SFRJ“, br. 17/68),
- Pravilnik o tehničkim normativima za stabilne instalacije za dojavu požara („Službeni list SRJ“, br. 87/93),
- Propisi o tehničkim merama za pogon i održavanje elektroenergetskih postrojenja („Službeni list SFRJ“, br. 13/78).

Dokumenti evropske unije:

- European Directive 82/501/CEE Seveso I,
- European Directive 96/82/CE Seveso II,
- UN/ECE Helsinki Convention,
- European Directive 96/61/EC IPPC,
- APELL Publikacija programa UNEP IE/PAC,
- TransAPELL Publikacija programa UNEP IE/PAC,
- Direktiva o opasnom otpadu (91/689/EC)
- EIA Direktiva (85/337 i 97/11/EC)
- ADR – Evropski sporazum o međunarodnom drumskom transportu opasnih materija u saobraćaju na putevima (Accord europeen relatif autransport international des marchandises dangereuses par route),
- RID – Pravilnik za međunarodni železnički transport opasnih materija (prilog “C” COTIF-Sporazum o međunarodnom železničkom transportu),
- ADN – Evropski sporazum o međunarodnom transportu opasnih materija unutrašnjim plovnim putevima,
- IMDG Code – Međunarodni kod za transport opasnih materijapomorskim brodovima, odredbe za primenu uz poglavlje VII, deo A Međunarodnog sporazuma iz 1974. za zaštitu ljudskih života na moru,
- ICAO-TI – Tehnička uputstva za bezbedan transport opasnih materija u vazdušnom saobraćaju, koja su dopuna Čikaške konvencije za međunarodni civilni vazdušni saobraćaj
- UN/ECE Arhus Convention,
- UN/ECE Espoo Convention

4.4. ANALIZA HEMIJSKIH UDESA NA PRAKTIČNIM PRIMERIMA

4.4.1. EKSPLOZIJA SKLADIŠTA U KINI (TIANJIN)

Eksplzija skladišta u luci Tianjin, locirane na istoku Kine u Bohajskom zalivu, spada u veliki tehnološki akcident koji se dogodio 12. avgusta 2015. godine u $10^{50} h$ po lokalnom vremenu [176]. Eskalaciji akcidenta je prethodila pojava požara u krugu logističke kompanije smeštene u lučkom sektoru na površini od $46000 m^2$. U trenutku akcidenta se na skladištu kompanije nalazilo nekoliko vrsta opasnih materija: kalcijum-karbid, toluen-dizocijanat, amonijum-nitrat, kalijum, natrijum i natrijum-cijanid. Gašenje požara je vršeno vodom sve do $11^{30} h$ istog dana kada je došlo do pojave dve snažne eksplozije. Prva je bila ekvivalentna dejstvu 3 tone TNT-a, dok je intenzitet druge bio znatno veći i iznosio je oko 21 tone TNT-a. Nakon ovih eksplozija je došlo do formiranja ogromnog toksičnog oblika, a zatim i do masovnog širenja požara. Interventni tim u suzbijanju ovog akcidenta je brojao nekoliko hiljada pripadnika vatrogasnih, vojnih i policijskih službi. Iako uzrok ovog velikog tehnološkog akcidenta nije bio odmah poznat, višemesečna istraga je svoja saznanja prezentovala u izveštaju objavljenom februara 2016. godine. U njemu se ističe da je uzrok ovog akcidenta pregrejani kontejner od suve nitroceluloze koji je bio inicijator prve eksplozije. Posledice ovog tehnološkog akcidenta su katastrofalne i njihov najveći efekat je nastao u prva dva dana nakon eksplozije. Ovaj hemijski udes je specifičan po tome što ima sve odlike domino efekta, a čiji se odraz najbolje može sagledati kroz ekstremno veliki uticaj na ljudske, materijalne i ekološke pokazatelje posledica. Konačan bilans ovog akcidenta su 173 smrtna slučaja, 720 registrovanih težih i lakših povreda i 70 nestalih, uglavnom pripadnika službi koje su učestvovala u intervencijama. Direktna i indirektna materijalna šteta ovog akcidenta je tolika da prevazilazi lokalni karakter sa tendencijom stagnacije regije koja gravitira ka ovoj lučkoj oblasti u narednim mesecima. Pored samog skladišta, pratećih objekata i zaliha koje su se nalazile u njemu, uništeno je oko 17000 stambenih jedinica koje su se nalazile u neposrednoj blizini, dok je preko 6000 stanovnika raseljeno. Štetu usled snažnih detonacija su pretrpeli i objekti koji su se nalazi na udaljenosti do 3 km od žarišta akcidenta. Kao posledica eksplozija je došlo do devastacije železničke tranzitne stanice koja je udaljena svega 650 m od skladišta. Naročito je zabrinjavajuća indirektna materijalna šteta, pošto je u luci Tianjin onesposobljen terminal za dopremanje metana (prirodnog gasa) sa godišnjim kapacitetom od 3 biliona m^3 , čime je prekinuto snabdevanje većeg dela Kine ovim energentom na nekoliko meseci. Neke procene govore da direktna materijalna šteta iznosi oko 1,3 milijarde evra. Postoji još nekoliko specifičnosti koje su obeležile ovaj akcident, a tiču se bezbednosnih mera pre nastanka udesa i aktivnosti u toku intervencije vatrogasnih službi. Naime, kompanija koja je upravljala radom skladišta je poznata po kršenju pravila bezbednosti, a jedan od njenih akcionara je koristeći politički uticaj uspeo da izdejstvuje administrativnu dozvolu za upravljanje objektom. Da su mere predostrožnosti grubo narušene najbolje ilustruje podatak da je skladište locirano na svega 500 m od najbližih stambenih jedinica, iako kineska regulativa iz ove oblasti predviđa da skladištenje opasnim materija mora biti minimalno udaljeno 1 km od stambenih objekata. Značajan doprinos u eskalaciji ovog akcidenta su imale i vatrogasno-spasilačke službe, jer nisu na profesionalan način reagovala u gašenju požara. To se posebno odnosi na natrijum-cijanid koji burno reaguje formirajući toksični gas vodonik-cijanid sa smrtonosnim dejstvom, čak i umalim dozama.

Kod ovog akcidenta ne treba zanemariti ni reakciju kalcijum-karbida koji u kontaktu sa vodom pri visokim temperaturama, oslobađa vrlo zapaljivi gas acetilen. Otežavajuća okolnost kod ovog akcidenta tiče se velike ugroženosti životne sredine, zbog prisustva jedinjenja cijanida. Cijanidi su izuzetno toksične supstance koje razaraju ćelije svih živih organizama (algi, sisara, riba itd.) dospevajući u njih preko lanca ishrane i stvarajući neravnotežu ekosistema. Naravno, na ovaj način mogu biti ugroženi i ljudski životi, pa se u konkretnom slučaju pristupilo izolaciji akcidentne lokacije u prečniku od 3 km u odnosu na njegovo žarište. U cilju izolacije ugrožene oblasti površine od $10000 m^2$, sprovedeno je postavljanje zemljanog nasipa i vreća sa peskom kako bi se sprečilo prodiranje toksične tečnosti usled deflagracije opasnih materija različite vrste u zemljište i more. Monitoring postakcidentnog stanja je pokazao prisustvo natrijum-cijanida na 1 km od mesta akcidenta.

Angažovanje specijalizovane francuske firme za preradu otpadnih voda je dalo rezultate, jer je izliveni cijanid neutralisan i merenja u perifernim delovima akcidentne lokacije od strane *Kancelarije za zaštitu životne sredine Kine* su pokazala da nije došlo do šireg prekoračenja praga tolerancije.



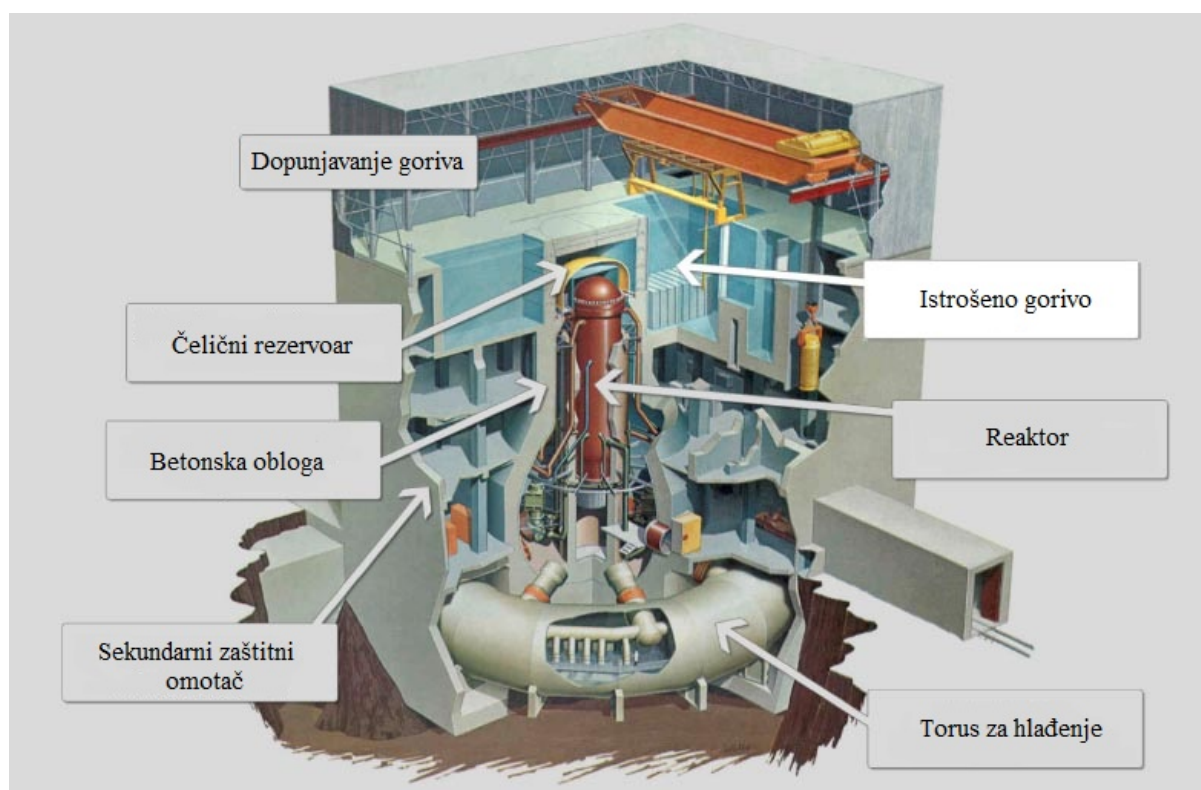
Slika 4.2. Potpuno uništeno skladište opasnih materija (Tianjin, 2015)

4.4.2. FUKUSHIMA NUKLEARNI AKCIDENT

Fukushima nuklearni akcident je nastao kao posledica cunamija koji je prouzrokovan snažnim zemljotresom sa epicentrom u blizini Honshu ostrva. Ovaj akcident se dogodio 11. marta 2011. godine i smatra se najveći nuklearnim akcidentom posle katastrofe u Černobilu (1986. godine). Inicijalni događaj koji je prethodio oštećenju nuklearnog postrojenja odnosio se na pojavu vrlo snažnog zemljotresa sa magnitudom od 9 stepeni po Rihterovoj skali. Epicentar zemljotresa je registrovan 180 km od istočne obale Japana i na dubini od 20 km u Pacifiku. Ovo je bio najači zemljotres koji je pogodio Japan i spada među pet najačih na svetu od kako se vrše seizmička merenja (1900. godina). Registrovana ubrzanja u Fukushima Daiichi iznosila su 0,561g u horizontalnom pravcu i 0,308g u vertikalnom pravcu. Zemljotres ove magnitude je zatim izazvao niz od sedam cunamija čija se visina talasa kretala do 40 m. Tragičan bilans ove prirodne katastrofe koja je pogodila istočnu obalu Japana iznosi 15854 poginulih i 3155 nestalih, dok je oko 27000 ljudi povređeno. Međutim, ovi podaci ostaju u senci velikog nuklearnog akcidenta izazvanog cunamijem, čiji su talasi visine od 13-15 metara u 41-om minutu nakon pojave zemljotresa u potpunosti poplavili postrojenje elektrane. Betonske prepreke koje su izgrađene u moru neposredno ispred postrojenja nisu mogle zaustaviti talase, imajući u vidu da je njihova visina iznosila svega 5,7 m iznad prosečnog nivoa mora. U datoj situaciji, visina prepreka je bila nedovoljna da spreči prodor vode u nuklearno postrojenje, što je dovelo do automatskog isključivanja elektrane. Elektrana u Fukushimi je svoj rad bazirala na 6 nuklearnih reaktora od kojih su četiri (reaktori br. 1-4) bila u radu kada je došlo do akcidenta, dok su preostala dva (reaktori br. 5 i 6) bila u režimu „hladnog“ gašenja, zbog redovnog održavanja. Međutim, ogromna količina vode koja se našla u postrojenju je onesposobila opremu sva tri potpuno nezavisna sistema za hlađenje čija je svrha hlađenje reaktora. Treba napomenuti da nakon isključivanja nuklearnog reaktora iz režima rada, on i dalje generiše energiju kao posledica raspadanja fuzionih produkata nastalih pre isključivanja.

Prilikom fuzije u nuklearnom reaktoru dolazi do neuronskog zračenja, dok svega 6% otpada na β i γ zrake sa energetskim udelom od 12 MeV po fuziji. Zato je nakon isključivanja reaktora neophodno konstantno hlađenje vodom kako bi došlo do režima "hladnog" gašenja reaktora. Veliku opasnost u takvim situacijama predstavlja eksplozija nuklearnog reaktora usled velike koncentracije vodonika. Može se postaviti pitanje otkuda vodonik u nuklearnom reaktoru, kada se ovaj hemijski element ne koristi u procesu fuzije? Zapravo, vodonik je nusprodukt reakcije nuklearnog reaktora sa njegovim zaštitnim (izolacionim) slojem u slučaju pregrevanja. Tada, pri visokim temperaturama dolazi do reakcije kisonika iz vodene pare (H_2O) sa cirkonijumom (Zr) koji se nalazi u građevinskim elementima izolacionog sloja, formirajući cirkonijum-oksidi (ZrO_2) i oslobađajući vodonik (H_2) čija tačka samozapaljenja iznosi $570^{\circ}C$. Poplava postrojenja je onemogućila napajanje pumpi za hlađenje reaktora električnom energijom, što je dovelo do pregrevanja nuklearnog reaktora i ispuštanja radioaktivne pare sa sadržajem joda-131 i cezijuma-137. Tada počinje evakuacija oko 20000 stanovnika koji su bili nastanjeni u radijusu od 10 km. Ubrzo nastaje eksplozija krova postrojenja iznad nuklearnog reaktora br. 1 i osoblje počinje da pumpama ubacuje morsku vodu u reaktor, kako bi se sprečila dalja eskalacija akcidenta. Međutim, situacija se pogoršava pošto dolazi do pregrevanja nuklearnih reaktora br. 2 i 3, a evakuaciona zona se povećava na 20 km. Pri tome dolazi do eksplozije vodonika iz oštećenog reaktora br. 1 i povrede nekoliko radnika, što dodatno otežava obuzdavanje akcidenta. Situacija je naročito postala alarmantna kada je nastala eksplozija na reaktoru br. 2 i požar na reaktoru br. 4, povećavajući time nivo radijacije za čak četiri puta. Eksplozija na reaktoru br. 4 je zahtevala proširenje evakuacione zona na 30 km, jer je radijacija u blizini reaktora iznosila do 400 mS/h. Ubacivanje vode u oštećene nuklearne reaktore je dalo izvesne rezultate, pa se pristupilo intenzivnom „gašenju“ reaktora br. 3 kome je pretila opasnost da eksplodira. Nuklearni reaktori br. 5 i 6 nisu predstavljali direktnu opasnost, jer u trenutku izbijanja akcidenta nisu bili u funkciji. U prva tri dana je zbog nepostojanja rashladne tečnosti došlo do topljenja jezgra na tri od ukupno šest nuklearnih reaktora. Zato je ovaj udes *Japanska Agencija za nuklearnu i industrijsku bezbednost* (NISA) prema INES-ovoj skali (Međunarodna skala za nuklearne incidente) svrstala u najviši rang 7, čime je okarakterisan kao akcident. Izloženost postrojenja cunamiju, kvar na sistemu za hlađenje, širenje radioaktivnih para usled eksplozija i naponi osoblja da nestandardnim postupkom izvrše hlađenje jezgara na reaktorima je doveo do znatnog izlivanja radioaktivne vode u zemljište i more, dok je izmerena radioaktivnost prelazila vrednost od 1000 mS/h.

U postakcidentnoj fazi razvoja događaja, *Francuski Institut za radiološku zaštitu i nuklearnu bezbednost* (IRSN) je procenio da zračenje u blizini nuklearnog postrojenja neće prelaziti 30 mS/godišnje, dok je dozvoljena doza limitirana na 1 mS/godišnje za opštu populaciju i 20 mS/godišnje za profesionalno osoblje. Glavna koncentracija radioaktivnog zagađenja se prostirala severozapadno od nuklearne elektrane, a nivoi kontaminacije radioaktivnim izotopom Ce-137 su se kretali do 3 MBq/m² u zemljištu uzorkovanom 35 km od žarišta akcidenta. Zato je dva meseca nakon akcidenta došlo do dodatne evakuacije stanovništva koje je bilo nastaljeno u pojasu od 20-40 km udaljenom od nuklearnog postrojenja, čime se broj raseljenih lica povećao na 100000. Nuklearni akcident u Fukushimi je po svojim razmerama prevazišao nacionalne okvire i može se kvalifikovati kao akcident globalnih razmera, jer je došlo do kontaminacije znatnog dela Pacifika. Takođe, mernjem je ustanovljeno da su radioaktivni izotopi (I-131, Cs-135 i Cs-137) nošeni vazдушnim strujama i putem atmosferskih padavina dospeli na teritoriju Azije, Severne Amerike i Evrope. Većina ovih merenja je sprovedeno analizom uzoraka prikupljenih postupkom filtracije veće količine vazduha ili padavina. U prethodnih pet godina vodeći svetski časopisi su posvetili veliku pažnju ovom akcidentu, među kojima treba izdvojiti časopis koji je specijalizovan za razmatranje uticaj radioaktivnosti na životnu sredinu pod nazivom *Journal of Environmental Radioactivity*. U ovom časopisu je od 2012. do danas publikovano preko 40 radova vezanih sa nuklearnim akcidentom u Fukushimi. Znatno broj tih radova analizira uticaj akcidenta u Fukushimi na različite oblasti sveta. Procenjene doze uticaja radioaktivnih izotopa u Evropi iznose nekoliko $\mu S/godišnje$, što ukazuje da nije došlo do značajnijeg ugrožavanja životne sredine na Evropskom kontinentu, uzimajući u obzir da je dozvoljeno prisustvo radionuklida za opštu populaciju ograničena na 1 $\mu S/godišnje$. Nuklearni akcident u Fukushimi je jedinstven događaj po mnogim aspektima, ako se u obzir uzmu značajni akcidenti nastali tokom XX i početkom XXI veka. Naime, ovaj tehnološki akcident ima sve osobenosti domino efekta, jer je izazvan prirodnom katastrofom – zemljotresom razorne moći.



Slika 4.3. Šematski prikaz reaktora u nuklearnoj elektrani Fukushima

Tabela 4.2. Zastupljenost opasnih supstanci pri akcidentimabuzrokovanim poplavama [177]

| R. broj | Vrsta opasne materije | Opis hazarda supstance | Procenat učestalosti |
|---------|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------|----------------------|
| 1 | Hlor | Toksičnost i opasnost po životnu sredinu | 1,41 |
| 2 | Dizel gorivo, benzin i ulja | Laka zapaljivost i opasnost po životnu sredinu | 66,67 |
| 3 | Cijanidi | Visok stepen toksičnost i opasnost po životnu sredinu | 2,35 |
| 4 | Propan – butan (TNG) | Ekstremna zapaljivost | 5,63 |
| 5 | Eksplozivi | Burna reakcija u kontaktu sa vodom | 1,41 |
| 6 | Đubriva | Toksičnost i ugroženost životne sredine | 5,16 |
| 7 | Kiseline | Tokično-nagrizajuće dejstvo i štetnost po životnu sredinu | 3,29 |
| 8 | Kalcijum karbid (CaCO_3) | Oslobađanje zapaljivog gasa pri kontaktu sa vodom | 1,41 |
| 9 | Sapuni i deterđenti | Štetnost po životnu sredinu | 0,47 |
| 10 | Tečni ugljovodonici | Ekstremna zapaljivost i ugroženost životne sredine | 3,76 |
| 11 | Tečni aromati | Visoka zapaljivost i ugrožavanje životne sredine | 3,76 |
| 12 | Oksidi | Burna reakcija sa vodom i eksplozivnost sa vazduhom | 2,35 |
| 13 | Amonijak | Toksičnost i opasnost po životnu sredinu | 2,35 |

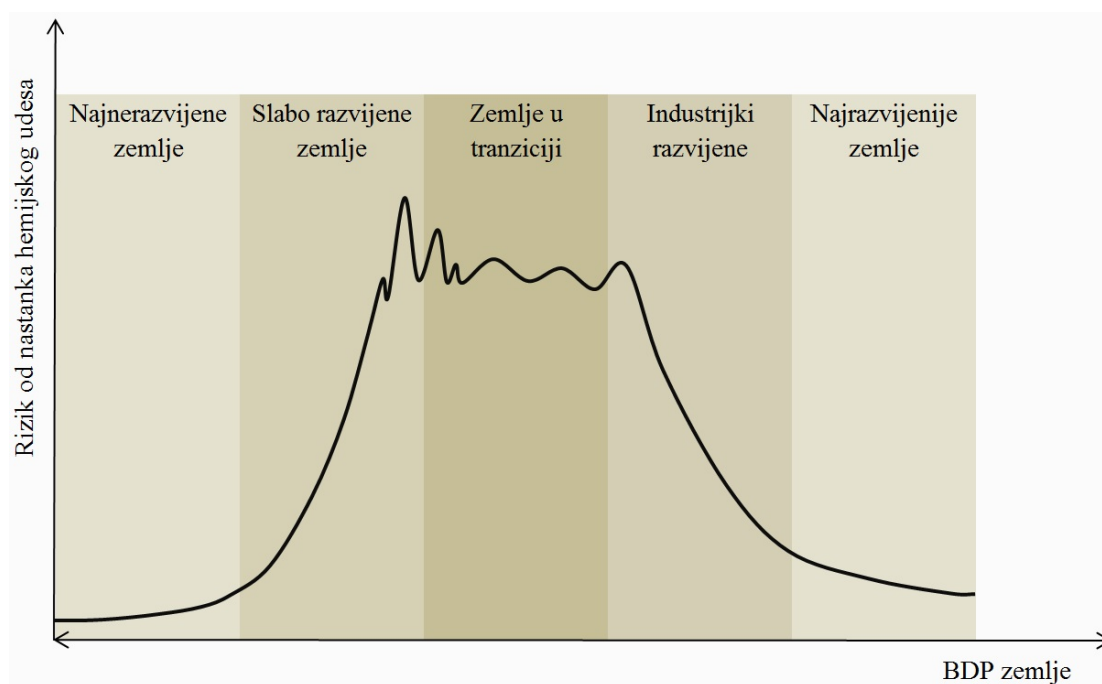
Rapidan industrijski razvoj vodećih svetskih ekonomija zahteva sve veću primenu opasnih supstanci (hemikalija) u mnogim segmentima društvenog delovanja. Savremeni uslovi proizvodnje i strogi tržišni zahtevi u postizanju određenih svojstava proizvoda zahtevaju prisutnost opasnih materija u mnogim prerađivačkim procesima koji izlaze iz okvira petro-hemijske industrije sa relativno malim asortimanom proizvoda, što je bio slučaj tokom prethodnih decenija sa zemljama u razvoju. Danas su opasne materije prisutne u svim društvenim sferama, počev od industrijskih postrojenja, poljoprivrede, medicine, pa sve do nacionalne bezbednosti i svakodnevne upotrebe u domaćinstvu.

Neizostavni pratioci opasnih materija su njihova hazardna svojstva koja se na direktan ili indirektan način mogu nepovoljno odraziti na ljude i životnu sredinu. Hazardni stepen neke opasne materije zavisi upravo od ovih svojstva koja se manifestuju preko zapaljivosti, eksplozivnosti, toksičnosti, zarazljivosti, oksidativnosti, korozivnosti i radioaktivnosti. Statistički podaci vodeće svetske baze podataka MHIDAS pokazuje da je najveći broj registrovanih akcidenata sa opasnim materijama na području Dalekog Istoka odnosno Kine. Prema statističkim podacima u Kini je registrovano u upotrebi ukupno 3777 supstanci koje se deklarišu kao opasne materije od kojih su 335 izuzetno otrovne.

Stepen društveno-ekonomskog razvoja određuje nivo bezbednosti u proizvodno-logističkom sistemu opasnih materija. Identifikacija nivoa bezbednosti sa aspekta pojave tehnoloških akcidenata se sprovodi prema pokazateljima ekonomskog razvoja nekog društva i obuhvata:

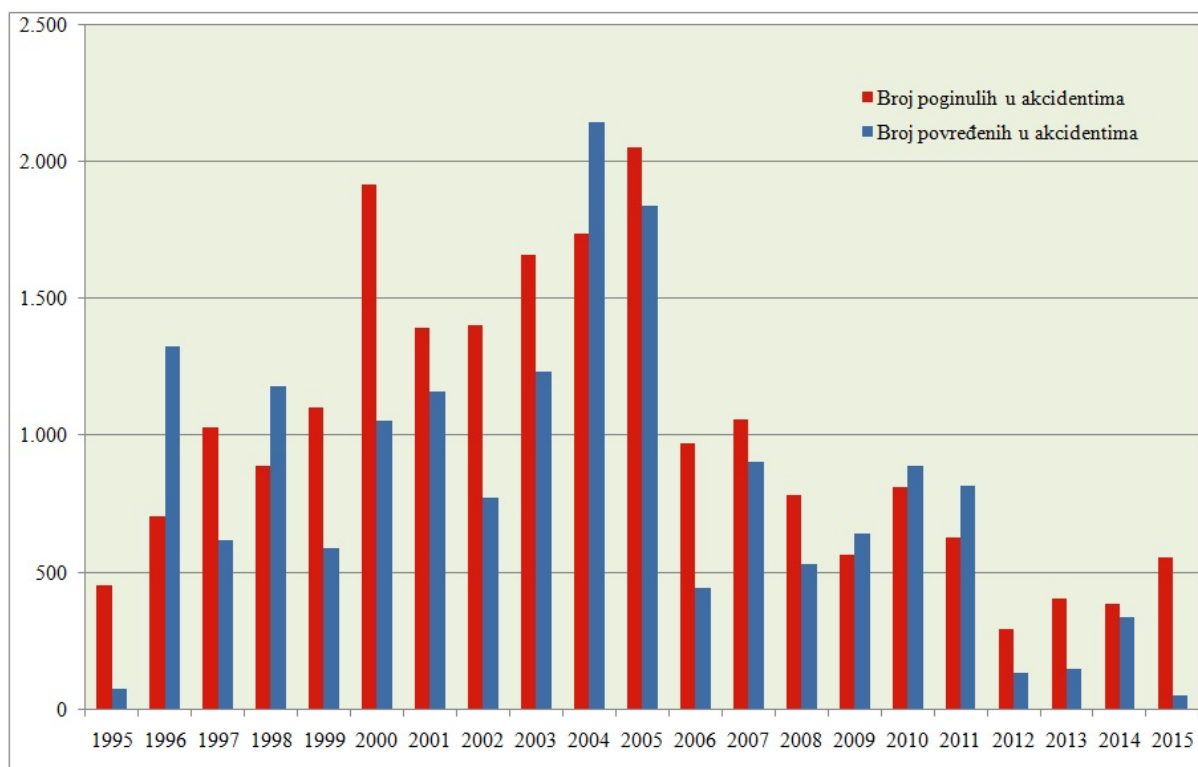
- Zemlje u razvoju (najnerazvijenije i slabo razvijene zemlje),
- Zemlje u tranziciji (prihvaćen neoliberalni koncept) i
- Razvijene zemlje (industrijski razvijene i najrazvijenije države sveta).

Zemlje u razvoju svoju ekonomiju isključivo baziraju na poljoprivredi i tehnološki jednostavnijoj industrijskog proizvodnji. Najnerazvijenije zemlje sveta nemaju kapaciteta da u značajnijoj meri organizuju industrijsku proizvodnju, pa je samim tim kod njih isključena značajnija upotreba opasnih materija. Zato su one i najbezbednije što se tiče industrijskih akcidenata, ali to ne znači da su životni i ukupni bezbednosni uslovi na zadovoljavajućem nivou.

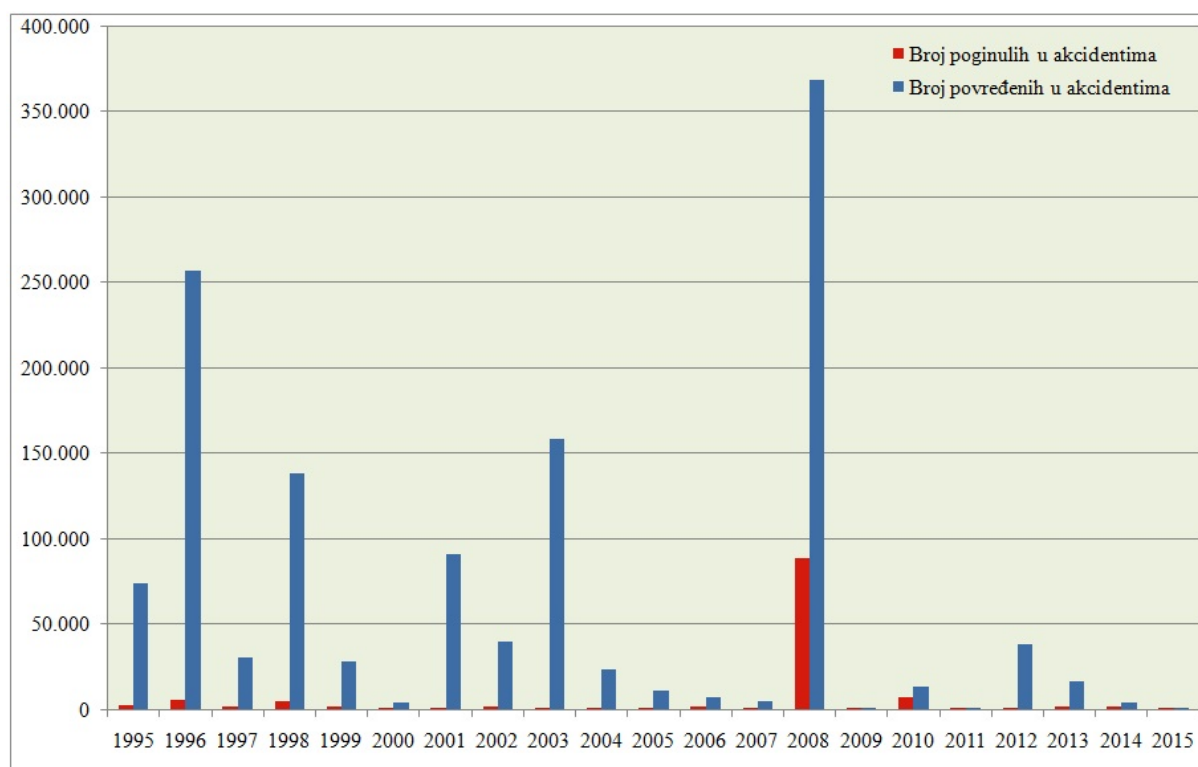


Slika 4.4. Uticaj društveno-ekonomskog razvoja na rizik od hemijskih udesa

Grafički prikaz ilustrovan na slici 4.4. pokazuje da veličina rizika usled akcidenata sa opasnim materijama ne obuhvata samo tehničko-tehnološke parametre nekog hemijskog kompleksa ili određene industrijske grane (npr. hemijske i naftne industrije na nivou države), već je funkcija ekonomskih pokazatelja razvijenosti izražena preko bruto društvenog proizvoda (BDP) zemlje. Jasno je da vrednost BDP ne zavisi samo od volje i spremnosti samih država da se razvijaju, već ključnu ulogu u tom procesu imaju globalna politička dešavanja, geostrateški položaj država, integracije u vojne saveze, pa čak i istorijska dešavanja na prostorima tih zemalja. Najbolji primer za sagledavanje uticaja društveno-ekonomskih, političkih, geostrateških i vojnih prilika na hemijske udese je Kina. Ova drevna zemlja Dalekog Istoka je u periodu nakon II svetskog rata izašla sa socijalističkim društvenim uređenjem i spadala je u grupu industrijski nerazvijenih zemalja.



Slika 4.5. Histogram broja poginulih i povređenih u Kini usled tehnoloških akcidenta za period 1995-2015.



Slika 4.6. Histogram broja poginulih i povređenih u Kini usled tehnoloških akcidenta za period 1995-2015.

4.4.3. AKCIDENTI PROCESNE OPREME

Vitalni elementi brojnih industrijskih postrojenja obuhvataju procesnu opremu koja u zavisnosti od prirode tehnološkog procesa može biti izložena unutrašnjem pritisku u opštem slučaju promenljive veličine. Tipične primere procesne opreme imamo kod plinskih skadišta (distributivnih centara), rezervoara goriva, gasnih kotlova, postrojenja za sagorevanje i dr. Praktična iskustva i analiza uzročnika pri nastanku akcidenata pokazuje da oštećenja procesne opreme najčešće prate eksplozije rezervoara u kojima se skladište lako zapaljive supstance, kao što su TNG, benzin, dizel i mlazno gorivo, ulja i dr. Eksplozija rezervoara se ne može desiti spontanom procesom, već isključivo nastaje kao posledica spoljnih faktora. Ovo znači da eksploziji procesne opreme prethode primarni događaji čiji se štetni efekti manifestuju kroz sledeće pojave: slabljenje čvrstoće rezervoara, povećanje pritiska iznad nominanle vrednosti ili kombinaciji prethodna dva slučaja. Uzročnici koji imaju dominantan uticaj na nastanak primarnih događaja u akcidentnom lancu iniciranja eksplozije obuhvataju:

- Vatru i toplotno delovanje,
- Prekoračenje kritičnog nadpritiska,
- Mehaničko oštećenje i
- Korozija.

Direktni uticaj vatre je najagresivniji faktor u inicijalizaciji eksplozije procesne oprema kada se kao radni medijum koristi tečni ili gasoviti fluid. Obrazloženje ovog stava se nalazi u činjenici da vatra odnosno intenzivno toplotno delovanje ima dualni efekat u generisanju primarnog događaja akcidentnog lanca sa epilogom eksplozije. Uticaj vatre odnosno intenzivnog toplotnog delovanja za iniciranje primarnog događaja u akcidentnom lancu je ilustrovan na primeru eksplozije rezervoara sa TNG-om. Pretpostavićemo da u toku odvijanja normalnog tehnološkog procesa ne dolazi do temperaturne varijacije uskladištenog fluida (npr. TNG u prerađivačkoj industriji). Postavlja se pitanje kada i pod kojim uslovima će doći do eksplozije rezervoara u pogledu delovanja vatre? Da bi se jasno odgovorilo na ovo pitanje treba uzeti u obzir i vrstu materijala (čelika) od koga se izrađuje procesna oprema. Čelik je materijal generalno dobrih mehaničkih karakteristika i zato ima veliku primenu za izradu procesne opreme kod kojih je dominantno naprezanje od unutrašnjeg pritiska. Čelik ima veliku osetljivost na pojavu visokih temperatura, jer time znatno opadaju njegove mehaničke osobine (pre svega čvrstoća). S druge strane, zagrevanje sa spoljne strane rezervoara napunjenog fluidom utiče na odvijanje termodinamičkog procesa u skladu sa jednačinom stanja idealnog gasa. Ova jednačina uz nekoliko ograničenja dobro opisuje ponašanje mnogih realnih gasova i pokazuje da sa povećanjem temperature fluida dolazi do povećanja njegovog volumena odnosno pritiska. S obzirom da su rezervoari fiksne zapremine (npr. 1000 m^3), to su mogućnosti njene promene minimalne, pa se rast temperature fluida u najvećoj meri odražava na porast pritiska. Zato se rezervoari nikada ne pune do vrha upravo iz razloga obezbeđenja izvesnog stepen širenja fluida. Međutim, intenzivno toplotno delovanje na rezervoar dovodi do znatnog povećanja pritiska u njemu, usled prelaska tečne faze fluida u gasovito i rezultira naglim razaranjem rezervoara (eksplozijom). Akcidente ove vrste pored eksplozije najčešće prati i požar, pošto plamen dolazi u kontak sa parom zapaljivog fluida. Dakle, vatra je uzročnik sa dualnim efektom, jer se njenim delovanjem istovremeno slabi materijal rezervoara i povećava pritisak fluida u odnosu na nominalnu (predviđenu) vrednost.

Razaranje rezervoara usled prekoračenja njegove kritične vrednosti pritiska karakteriše se kao primarni događaj akcidentnog lanca sa krajnjim ishodom u vidu eksplozije. Razmatrajući osobenosti prethodnog uzročnika (vatre odnosno toplotnog delovanja) zaključeno je da na vrednost pritiska utiče termički fluks koji zahvata fluid rezervoara. Međutim, stvaranje pritiska iznad limita se ne javlja samo pri direktnom delovanju vatre i kod punih rezervoara, već može biti posledica i malih temperaturnih varijacija uz prisustvo male količine lako zapaljivih supstanci (npr. benzin, kerozin, TNG i sl.). Treba imati u vidu da je kod praznog rezervoara veća verovatnoća nastanka eksplozije nego kod punog, što na prvi pogled izgleda nelogično. Suština je u tome da sve lako zapaljive fluide uskladištene u rezervoare karakteriše tečno agregatno stanje, čak i one koji su pri atmosferskom pritisku gasovi (npr. TNG, acetilen i sl.).

Ako se smanji volumen tečne faze pri istovremenom malom delovanju toplotnog fluksa, preostala količina tečne faze lako isprava formirajući eksplozivnu smešu sa niskom tačkom paljenja. Može se postaviti pitanje, da li je veći rizik od eksplozije rezervoara sa većom ili manjom količinom uskladištenog fluida pod istim spoljnim uticajima. Odgovor glasi: sa manjom količinom zato što je u tom slučaju tačka zapaljenja niža nega kada se u rezervoaru nalazi veća količina zapaljive supstance. Takođe, treba uzeti u obzir da prepunjeni rezervoari imaju negativan efekat u pogledu prekoračenja granične vrednosti pritiska. Naravno, ove činjenice nikako ne treba pogrešno interpretirati u pogledu procene rizika, jer eksploziju punog rezervoara prate znatno veće posledice. Postojanje eksplozivne smeše i potpuna ispunjenost volumena rezervoara su statički faktori potencijalne eksplozije. Naime, eksplozija procesne opreme ne nastaje samo prilikom skladištenja zapaljivog fluida, već i u toku odvijanja tehnoloških procesa kao što su npr. kotlovi, sušare i dr. Stvaranje pritiska iznad vrednosti nominalno predviđene za dati tehnološki proces može biti posledica velike osetljivosti radnog medijuma, nekontrolisanog procesa, kvara na instalaciji postrojenja ili diverzije (sabotaže). Kada se govori o osetljivosti radnog medijuma treba imati u vidu da glavnu ulogu u ovom procesu ima fazna transformacija (iz tečne u gasovitu fazu), naročito kod fluida sa progresivnom karakteristikom ovog fenomena u odnosu na temperaturu.

Mehanička oštećenja procesne opreme se klasifikuju u direktne akcidentne uzročnike, s obzirom na ekstremno malu vremensku distancu između procesa razaranja (uzroka) i eksplozije (posledice). Ovaj vid uzroka u iniciranju eksplozije može se manifestovati preko mehaničkog udara fragmenta ili udarnog talasa neke prethodne eksplozije u rezervoar. Jedine specifičnosti mehaničkih oštećenja se odnose na nastanak prslina i puzanja materijala. Prsline nastaju kao posledica nehomogenosti strukture čelika i manjkavosti u procesu izrade rezervoara, dok je puzanje materijala posledica dugotrajnog (konstantnog) naprezanja u uslovima povišene radne temperature postrojenja (npr. kotlovi). Korozija je u mnogim slučajevima bila uzročnik akcidenta koja je izazvana taloženjem nečistoća fluida usled nagrizanja unutrašnjih površina rezervoara. Time dolazi do smanjenja debljine zida u zonama intenzivne korozije i predstavlja mesto potencijalnog nastanka prsline. Pogrešno je shvatanje da izraženo korozivne supstance (npr. sumportna kiselina, hlor i sl.) imaju najveći uticaj na pojavu oštećenja ove vrste. Objašnjenje ovoga leži u činjenici da se procesna oprema za susptance sa korozivnim svojstvima izrađuje od nerđajućeg čelika velike korozivne otpornosti, a u novije vreme i od polietilena visoke gustine (PEHD).

Između svih ovih uzročnika se može uspostaviti direktna ili indirektna veza sa nastankom primarnog događaja (razaranjem rezervora) koji u uzročno-posledičnom smislu prethodi akcidentu odnosno eksploziji. Inicijalizacija primarnog događaja se javlja nastankom prsline (dejtvom korozije, rezidualnih napona i dr.) koja utiče na karakteristike eksplozije. Intenzitet eksplozije određuje brzina širenja oštećenja nastalog u zoni inicijalne naprsline rezervoara, dok njen položaj utiče na fragmentaciju. U cilju ilustracije ove tvrdnje posmatraćemo horizontalni cilindrični rezervoar kod koga je nastala naprsline. Ako je isticanje fluida kroz naprslinu brže od propagacije naprsline, tada ne dolazi do eksplozije (pod uslovom da fluid nije u kontaktu sa izvorom vatre). Tada naprsline igra ulogu „sigurnosnog ventila“ pri čemu dolazi do delimičnog oštećenja rezervoara. Dominantnu ulogu u širenju naprsline rezervoara ima mikrostrukturni sastav od koga zavise mehaničke osobine materijala (čvrstoća, tvrdoća, plastičnost, žilavost i dr.). Materijale izražene krtosti karakteriše naglo širenje naprsline, pri čemu nastaje eksplozija i potpuno uništenje rezervoara. Duktilne (plastične) materijale odlikuje sporije širenje naprsline, što omogućava ispuštanje izvesne količine fluida iz rezervoara i ublažavanje eksplozivnog efekta.

4.4.4. EKSPLOZIJA PARA TEČNOSTI U STANJU KLJUČANJA (BLEVE)

Procesna oprema svakog industrijskog postrojenja može biti oštećena u eksploziji usled kritične vrednosti pritiska, konstrukciono-tehnoloških nedostataka i spoljnih mehaničkih uticaja. U toku eksplozije jednog dela procesne opreme (npr. jednog rezervoara) dolazi do generisanja fragmenata koji predstavljaju potencijalnu opasnost po čitavo postrojenje odnosno ostale rezervoare sa pratećom instalacijom, ugrožavajući stambene i komercijalne komplekse koji su izvan samog pogona ili skladišta (npr. naselje u blizini postrojenja). Ovako definisan akcidentni lanac je u literaturi poznat pod nazivom domino efekat, jer je formiran od niza uzastopnih elementarnih sekvenci: eksplozija rezervoara → generisanje fragmenata → uticaj na okruženje → mehaničko oštećenje drugog rezervoara. Ova sekvencija se može ponavljati nekoliko puta, zavisno od konfiguracije postrojenja, vrste opasnih materija, stepena ozbiljnosti početne sekvence, akcidentnog reagovanja i drugih uglavnom stohastičkih parametara. Upravo iz tih razloga se velika pažnja poklanja proceni rizika akcidentnog lanca, tj. akcidenta koje prati domino efekat, pa je u tom kontekstu vrlo značajno postavljanje ispravnih hipoteza za konstituisanje akcidentnog modela. Tačnost konvencionalnih metoda procene rizika isključivo zavisi od validnosti konstituisanog simulacionog modela i informacija koje pruža ovaj aspekt akcidentne analize. Kada se govori o simulacionom modelu akcidentnog lanca treba imati u vidu da se on formira na bazi dve grupe uticajnih parametara: determinističkih i stohastičkih. Deterministički parametri obuhvataju one veličine koje se mogu egzaktno opisati na bazi empirijski zasnovanih pretpostavki. Međutim, veliki broj veličina koje su neophodne za analizu akcidenta, posebno domino efekta, nije moguće interpretirati na bazi nekog determinističkog matematičkog modela ili tradicionalnih softverskih simulacije (ALOHA i sl.). Zato se u procesu modeliranja akcidentnih situacija posebna pažnja mora fokusirati na stohastički aspekt i njegovo direktno povezivanje sa determinističkim parametrima modela. Literatura koja razmatra ovu problematiku je novijeg datuma i njen osnovni nedostatak je upravo vezan za slabu koherentnost determinističkog i stohastičkog pristupa u izvođenju analize domino efekta. Stohastički aspekt modela domino efekta podrazumeva identifikaciju parametara u okviru analize sledeća tri segmenta:

- Fragmentacija u zoni inicijalizacije akcidenta,
- Udarno dejstvo fragmenata na ostalu opremu postrojenja i
- Procena stanja usled mehaničkog delovanja fragmenata, tj. potencijalnog oštećenja.

Fragmentacija u zoni inicijalizacije (izvora) akcidenta tretira probablističku deskripciju fragmenata nastalih nakon eksplozije u delu procesne opreme postrojenja (npr. rezervoara). Parametri koji definišu stanje fragmentacije obuhvataju: broj fragmenata, oblik, veličinu (masu), početnu brzinu i napadni ugao. Literatura ove karakteristike fragmenata isključivo razmatra kao stohastičke parametre, jer ih nije moguće nikakvim proračunom izračunati ili softverskom simulacijom predvideti. Razloge njihove stohastičnosti treba tražiti u nemogućnosti postizanja idealnih projektnih, tehnoloških i eksploatacionih uslova procesne opreme, pa kao posledica odstupanja stvarnih stanja od teorijski predviđenih imamo uključivanje poremećaja slučajnog karaktera. Tipični faktori koji unose stohastičnost kod procesne opreme se odnose na zaostale napone pri izradi (zavarivanju) rezervoara i koroziji od taloga radnog medijuma.

Koncepcija projektovanja rezervoara izloženog konstantnim unutrašnjim pritiskom je zasnovana na logici da u svakoj njegovoj tački naprezanje mora biti istog intenziteta. Ako posmatramo omotač cilindričnog rezervoara sa aspekta projektnih uslova, on bi pri eksploziji morao biti fragmentisan na dva jednaka dela, ali je ova situacija samo delimično ispunjena u praksi. Naime, postoji znatno procentualno učeće akcidenta kod kojih dolazi do fragmentacije rezervoara na dva dela, ali oni skoro nikada nisu iste veličine niti je razaranje nastalo na sredini cilindričnog dela. Takođe, svaki akcident praćen eksplozijom karakteriše različita veličina fragmenata nezavisno od njegovog broja (može biti isti ili različit), što ukazuje na postojanje neizvesnosti kod mehanizma razaranja rezervoara. Udarno dejstvo fragmenata ima ulogu formiranja akcidentnog lanca posredstvom njihovog uticaja na opremu postrojenja koja je potencijalno ugrožena inicijalnom eksplozijom.

Ova faza akcidentnog lanca ima ulogu da nadomesti vremensku i prostornu distancu između izvora (žarišta) akcidenta i zone njegovog uticaja. Postojanje procesne opreme u zoni uticaja inicijalne eksplozije prati rizik od nastanka sekvencijalno povezanog niza akcidentata (domino efekta). Verovatnoća nastanka akcidentnog lanca je u direktnoj zavisnosti od geometrijskih uslova između objekta na kome je nastala inicijalna eksplozija i potencijalno ugrožene procesne opreme postrojenja (mete). Geometrijski uslovi u ovom smislu obuhvataju dve veličine: distancu između centra mase izvora akcidenta i potencijalnih meta, kao i međusoban položaj ovih objekata (izvora eksplozije i meta). U okviru ovog segmenta poseban akcenat je stavljen na istraživanju dinamičkog ponašanja fragmenata u toku leta do ugroženih objekata, kako bi se uspostavila deterministička zavisnost kinematskih i dinamičkih parametara fragmenata sa njihovim početnim uslovima.

S obzirom da početne uslove nije moguće egzaktno odrediti, njihov uticaj na zakon kretanja (trajektorije) fragmenata je jedino moguće istražiti probabilističkim konceptom kroz primenu Monte Carlo simulacije. Zadatak ove simulacije je uspostavljanje veze između determinističkog i stohastičkog aspekta akcidentne analize sa ciljem da se za različite početne kinematske uslove i mase fragmenata definišu njihovi maksimalni dometi. Deterministički parametri definišu neke kinematske i dinamičke parametre bitne za oblik trajektorije kao što su: zakon kretanja (oblik trajektorije), brzinu fragmenta, koeficijent otpora vazduha, gustinu fluida otporne sredine i koeficijent podizanja fragmenta usled razlike pritiska. Stohastički parametri prema literaturi uključuju one veličine čije se vrednosti ne mogu ni približno odrediti proračunom ili softverskom simulacijom, već se moraju unapred pretpostaviti kao *a priori* poznate i obuhvataju: početnu brzinu i napadni pravac (ugao) fragmenata, njihov broj nakon eksplozije, oblik i veličinu odnosno masu. Međutim, ovde se može postaviti zanimljivo pitanje: Da li su svi ovi stohastički parametri međusobno invarijantni da ih možemo potpuno nezavisno predstaviti u statističkoj simulaciji? Da bi se generalno moglo odgovoriti na ovo pitanje razmatraćemo jedan elementaran slučaj koji se tiče eksplozije rezervoara. Pretpostavimo da eksploziju prati fragmentacija rezervoara na dva njegova dela različite veličine (mase), pri čemu ove parametre ne možemo unapred predvideti proračunskim metodom. Brzina prvog fragmenta nije potpuno nezavisna od brzine drugog fragmenta, jer mora biti zadovoljen zakon o održanju količine kretanja koji glasi:

$$m\vec{v}_{rez} = 0 \Rightarrow m_1\vec{v}_{1,0} + m_2\vec{v}_{2,0} = 0 \Rightarrow \vec{v}_{1,0} = -\frac{m_2}{m_1}\vec{v}_{2,0} \quad (4.1)$$

Vektor početne brzine prvog fragmenta je linearno zavisna od vektora početne brzine drugog fragmenta, dok je faktor proporcionalnosti negativna vrednost odnosa njihovih masa ($-m_2/m_1$). Fizička interpretacija ovog matematičkog izraza govori da vektor brzine drugog fragmenta ima isti pravac, a suprotan smer od vektora brzine prvog fragmenta. Intenzitet početne brzine prvog fragmenta je veći od intenziteta početne brzine drugog za recipročnu vrednost njihovih masa. Znači, razmatranjem četiri stohastičke veličine ($m_1, m_2, v_{1,0}$ i $v_{2,0}$) možemo ustanoviti da nisu sve međusobno nezavisne, pa tu činjenicu treba uključiti prilikom statističke simulacije. Kasnije će se pokazati da ovo nije jedina jednačina koja uspostavlja zavisnost između posmatrane četiri stohastičke veličine, čime se smanjuje učešće slučajnosti početnih kinematskih uslova na račun povećanja njihove determinističnosti. Procena stanja mehaničkog oštećenja opreme postrojenja je faza akcidentne analize koja istražuje fizički uticaj fragmenata nastalih nakon inicijalne eksplozije na konkretne objekte postrojenja u zoni njihovog dometa. Ovaj aspekt razmatranja predstavlja poslednju fazu u jednom akcidentnom lancu omogućavajući da na bazi kinematskih i dinamičkih pokazatelja prethodnih analiza pruži adekvatan odgovor o stepenu oštećenja objekata koji su se našli u uticajnoj zoni inicijalnog akcidenta (eksplozije).

4.4.5. PRINCIP MAKSIMUMA ENTROPIJE

Princip maksimuma entropije se koristi kada raspoložemo sa delimičnim informacijama o raspodeli verovatnoće, a koje su nedovoljne da se u potpunosti jednoznačno definiše stanje neke pojave ili procesa. Razlozi za nedostatak informacija mogu biti različitog karaktera, kao što su nedostatak finansijskih sredstava za istraživanje, nedostatak saznanja, teško dostupne informacije i dr. U cilju ilustracije, princip maksimalne entropije kaže da treba izabrati onu raspodelu koja maksimizira količinu u njoj sadržanih nepredvidivih informacija, pod uslovom da ispunjava postavljeno ograničenje. Da bi se objasnio princip maksimalne entropije posmatraćemo uzorak od n događaja, pri čemu verovatnoća pojave i -tog događaja odgovara vrednosti p_i . Akcija iznenađenja odnosno neočekivanja u pojavi i -tog događaja se definiše preko matematičke forme: $-\log p_i$, $p_i \in [0, 1]$. Ovakvo definisana funkcija je monotono neprekidna na intervalu od beskonačnosti do nule, čiji se fizički smisao najbolje može objasniti za verovatnoće koje teže ekstremnim vrednostima. Ako je verovatnoća pojave nekog i -tog događaja vrlo mala ($p_i \rightarrow 0$), tada se eventualna pojava takvog događaja manifestuje ekstremno velikim stepenom iznenađenja ($-\log p_i \rightarrow \infty$).

Sa druge strane, ako postoji velika izvesnost u pojavi i -tog događaja ($p_i \rightarrow 1$), tada je pojava tog događaja sasvim očekivana i ne predstavlja nikakvo iznenađenje ($-\log p_i \rightarrow 0$). Zavisnost između verovatnoće nastanka i -tog događaja i stepena iznenađenja ($-\log p_i$) je intuitivno jasna, ali se postavlja pitanje zašto se koristi logaritamska funkcija u opisivanju fenomena neočekivanja na poluotvorenom intervalu $[0, 1]$. U tom smislu posmatraćemo dva međusobno nezavisna događaja i i j sa unapred poznatim verovatnoćama p_i i p_j , respektivno. Verovatnoća istovremene pojave dva nezavisna događaja i i j u funkciji njihovih parcijalnih verovatnoća glasi: $p_{ij} = p_i p_j$. Ako je potrebno odrediti stepen iznenađenja za simultanu pojavu dva nezavisna događaja i i j , tada imamo: $-\log p_i p_j = -(\log p_i + \log p_j)$, gde verovatnoće $(p_i, p_j) \in [0, 1]$. Ova matematička formulacija pokazuje da stepen iznenađenja istovremene pojave dva nezavisna događaja karakteriše aditivnost njihovih parcijalnih verovatnoća, što je omogućeno koristeći osobine logaritamske funkcije. Entropija je karakteristika svih događaja, a ne samo jednog određenog i definiše njihovo prosečno iznenađenje koje je shodno tome izvedeno za celu raspodelu verovatnoće. Entropija se za diskretnu raspodelu verovatnoće p definiše:

$$H(p) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log p(x_i) \quad (4.2)$$

Entropija je mera neinformativnosti date raspodele verovatnoće čija je vrednost srazmerna sa porastom stepena nepredvidivosti. Dakle, maksimiziranje entropije je konzistentno sa maksimiziranjem nepredvidljivosti, s obzirom da u opštem slučaju raspoložemo sa oskudnim informacija o raspodeli verovatnoće. Najinformativnija raspodela odgovara slučaju nulte entropije kada sa potpunom sigurnošću možemo ustanoviti ishode nekih događaja ($p_i = 1$). Nasuprot ovome, najmanje informativna raspodela odgovara slučaju uniformne raspodele kada svaki od n razmatranih događaja ima istu verovatnoću pojave p_i ($0 < p_i < 1$) i tada entropija ima vrednost $\log n$. Ako ne posedujemo informaciju o raspodeli neke slučajne veličine (ne znamo unapred zakon pojave nekih događaja), onda se koristeći princip maksimalne entropije može pokazati da raspodela verovatnoće posmatranih događaja mora biti uniformna. Uniformnu raspodelu sa aspekta principa maksimalne entropije odlikuje najmanja informativnost, pošto se svaki događaj iz razmatranog skupa uzoraka tretira podjednako i bez preferentnosti u smislu veće frekventnosti pojave bar jednog od razmatranih događaja. Ova činjenica je značajna sa aspekta izbora raspodele slučajno promenljive kada nam njena zakonitost nije unapred poznata i može se matematički pokazati da u tom slučaju jedino uniformna raspodela maksimizira entropiju. Zato se u odsustvu bilo kakvog očekivanja za frekventnom pojavom bar jednog događaja (veličine) u odnosu na ostale primenjuje princip jednakih *a priori* verovatnoća koji podrazumeva dodeljivanje svim događajima istu verovatnoću pojave. Ovaj princip je od fundamentalnog značaja za primenu kod Monte Carlo simulacije kada unapred nije poznat zakon raspodele, pa se u skladu sa maksimizacijom entropije uzima uniformna raspodela posmatrane veličine. Prema tome, princip jednakih *a priori* verovatnoća je podslučaj principa maksimalne entropije.

5. METODE PROCENE RIZIKA

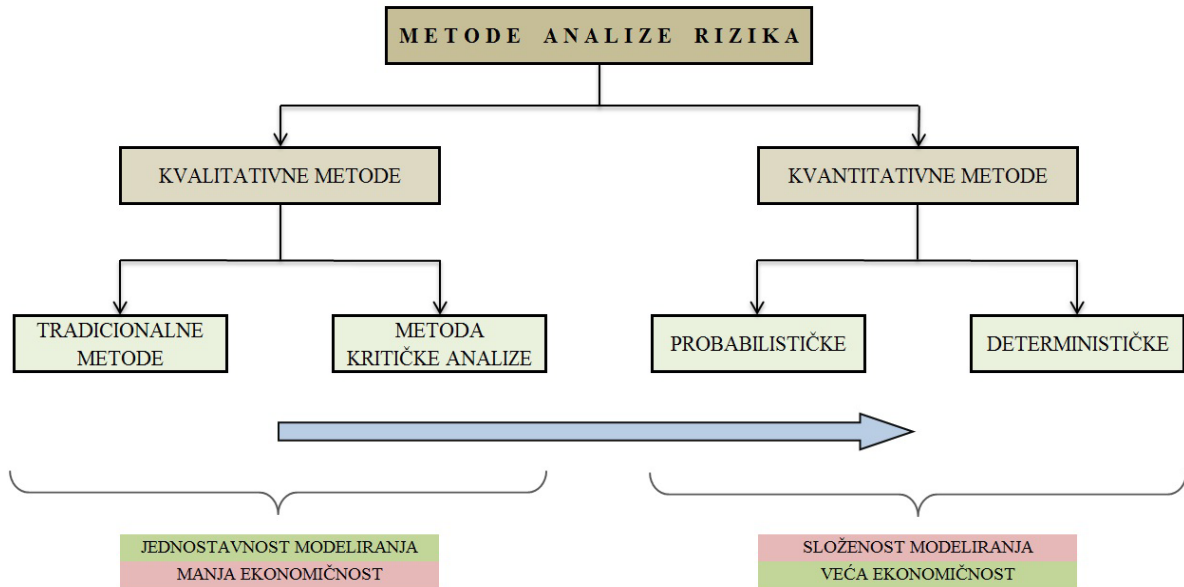
Proizvodne, logističke i transportne aktivnosti sa opasnim materijama mogu biti izložene velikom riziku od nastanka akcidentnih situacija imajući u vidu značajan broj uzročnika koji utiče na prirodu opasnosti pri odvijanju ovih procesa. Procena rizika izloženosti određenim opasnostima je analitički proces kojim se identifikuju potencijalne opasnosti i posledice njihovih štetnih efekata, naročito po zdravlje ljudi. Iako su kvalitativne metode u prošlosti imale značajan doprinos u proceni rizika, ne umanjujući njihov značaj treba napomenuti da se u poslednjih nekoliko godina težište procene rizika značajno pomerilo u pravcu kvantitativnih metoda. Ovu činjenicu najbolje ilustruje sve veća primena kvantitativnih metoda u kompanijama proizvodnih i transportno-logističkih delatnosti, jer pružaju numeričke informacije koje su korisne u fazi planiranja, strateškog i operativnog odlučivanja, kao i za optimizaciju tehnoloških procesa ovih kompanija.

Tehnike analize rizika bazirane na specifičnim karakteristikama primenjenih metoda su podeljene u četiri kategorije:

- Determinističke metode,
- Probabilističke metode,
- Kvalitativne metode i
- Kvantitativne metode.

Međutim, problematika procene rizika sa aspekta naučnih istraživanja zasnovana je na primeni tri fundamentalna pristupa:

- Kvalitativni pristup,
- Polukvantitativni pristup i
- Kvantitativni pristup.



Slika5.1. Podela metoda za procenu rizika

5.1. KVALITATIVNE METODE PROCENE RIZIKA

Kvalitativne metode za procenu rizika su subjektivne prirode i bazirane su na matričnom konceptu povezivanja lingvističkih varijabli koje reprezentuju stepen rizika i njegove posledice koristeći unapred definisane (usvojene) semantičke skale. Iz ove definicije je jasno da subjektivni kriterijumi u definisanju lingvističkih varijabli rizika i njegovih posledica prema semantičkoj skali utiču na tačnost kvalitativnih metoda. To znači da kvalitet procene zavisi od trenutnog iskustva, stručnosti i sposobnosti valjanog rasuđivanja eksperata u timu za procenu, ne zahtevajući statističke podatke o eventualnim akcidentima u prethodnom periodu, uzrocima, posledicama, strateškim dokumentima i preduzimanim preventivnim merama.

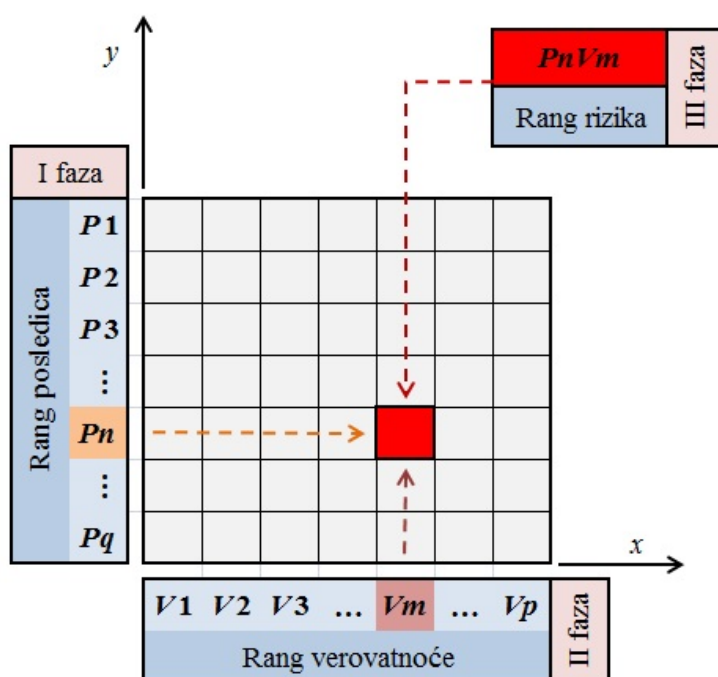
Odlika svih kvalitativnih metoda za procenu rizika je predstavljanje finalnih rezultata u kvalitativno iskazanoj formi preko lingvističkih varijabli (npr. mali rizik, umereni rizik i visok rizik). Kvalitativne metode koriste semantičke stupnjevite skale koje uglavnom imaju od tri do sedam nivoa (kvalitativnih opisa). Svakom od ovih nivoa odgovara određena lingvistička varijabla koja opisuje verovatnoću nastanka neke neželjene situacije odnosno rizika (npr. mala verovatnoća, umerena verovatnoća ili velika verovatnoća) i posledice koje mogu nastati ukoliko dođe do realizacije pesimističkog ishoda (npr. beznačajne, male, srednje, velike, katastrofalne). Veza između lingvističkih varijabli (nivoa) koje pripadaju rangu verovatnoće ($V_1, V_2, V_3, \dots, V_m, \dots, V_p$) i rangu posledica ($P_1, P_2, P_3, \dots, P_n, \dots, P_q$) se uspostavlja preko matrice rizika, a sam rezultat kvalitativne metode definiše rang rizika ($r \sim V_m V_n$) i kvalitativno se kvalifikuje kao visok rizik, umeren rizik i sl. Broj nivoa semantičke skale koji se odnosi na verovatnoću (p) i posledice (q) direktno definišu rang matrice rizika ($r = p \cdot q$) koji pokazuje broj mogućih rezultata u postupku kvalitativne procene rizika.

Klasifikacija nenumeričkih (kvalitativnih) ulaznih parametara u određeni broj nivoa (rangova) zavisi isključivo od izbora eksperta, pri čemu nivoe odnosno rangove treba rasporediti tako da omoguće što bolju kvalitativnu identifikaciju faktora rizika. Na osnovu prethodno iznetih analiza i činjenica može se zaključiti da su kvalitativne metode procene rizika relativno jednostavne za praktičnu implementaciju i koriste matrični princip za umrežavanje kvalitativnih odnosno nenumeričkih ekspertskih procena kako bi se racionalnije identifikovali pokazatelji bitni za ishod konačnih rezultata. Znači, matrica rizika predstavlja osnovnu alatku u primeni kvalitativnih metoda procene rizika i imaju za cilj da grafički ilustruju međusobnu povezanost verovatnoće i posledica pojave nekog neželjenog događaja sa kvalitativnom ocenom rizika.

Prethodno je rečeno da se uobičajen broj nivoa semantičke skale odnosno rangova u matrici rizika kreće u opsegu od tri do sedam. Veći broj nivoa (rangova) može imati kontra efekat ukoliko ekspertske ocene nisu validno definisane. Ovaj slučaj nije karakterističan samo kod eksperata sa manjim iskustvom i nivom znanja, već može biti i posledica nedostatka i/ili neodređenosti raspoloživih podataka za vrednovanje (ocenjivanje) definisanih parametara u matrici rizika. Praktična iskustva su pokazala da maksimalan broj nivoa semantičke skale treba ograničiti na devet ili eventualno deset stupnjeva. Nasuprot ovome, broj nivoa koji je manji od tri ili ne bi imao praktičnog smisla (slučaj kada bi imali po jedan nivo za rang verovatnoće i rang posledica) ili bi samo reprezentovao ekstremne rezultate procene (slučaj kada bi imali po dva nivo za rang verovatnoće i rang posledica). Ekstremni rezultati procene rizika se dobijaju iz matrice dimenzija 2×2 koja može verodostojno prikazati samo dva finalna rezultata (rizik je veliki ili rizik je mali). Ekspertskim odabirom dva nivoa ne možemo dobiti informaciju o uslovima umerenog izika, pa zato treba izbegavati ovaj slučaj odnosno težiti izboru tri i više nivoa prema iznetim preporukama. U skladu sa značajem matrice rizika kod kvalitativnih metoda, nastavak analize je rezervisan za interpretaciju matričnih šema prema različitim preporukama (standardima).

5.1.1. MATRICE RIZIKA

U prethodnom razmatranju je konstatovano da procena rizika kvalitativnom metodom podrazumeva korišćenje matrice rizika za obradu kvalitativnih (nenumeričkih) ocena baziranih na izboru lingvističkih varijabli. Zato se često u literaturi za kvalitativne metode koristi naziv matrični metodi ili modeli procene rizikom. S obzirom da kvalitativne metode operišu sa jezičkim (lingvističkim) opisom parametara rizika neophodno je adekvatno uspostavljanje logičke povezanosti između ranga verovatnoće i ranga posledica. Lingvističke varijable (izrazi) ovaj proces približavaju ljudskom načinu razmišljanja (rezonovanja), dok matrična tabela u koordinatnom sistemu grafički prezentuje zavisnost ranga rizika od nezavisno promenljivih x i y . Ova matrična tabela se u literaturi naziva matrica rizika i ima za cilj grafičku interpretaciju procenjenih parametara kako bi se na validan i racionalan način procenio rizik za prethodno definisane hazarde [178]. Osnovna struktura matrice rizika je formirana od matrične tabele, parametara rizika (veličina duž osâ x i y) i rezultata kvalitativne procene odnosno ranga rizika (Slika 5.2).



Slika 5.2. Generalna konfiguracija matrice rizika

Primena matrice metode za procenu rizika se odvija u tri sukcesivne faze:

- a) I faza – rangiranje posledica određenog problema (procesa ili fenomena),
- b) II faza – rangiranje verovatnoće pojave posledica i
- c) III faza – kvalitativna procena odnosno rangiranje rizika.

I faza obuhvata definisanje nivoa (rangova) posledica preko lingvističkih odnosno kvalitativnih izraza (beznačajno, malo, umereno, veliko, katastrofalno), shodno vrsti problema za koji se vrši procena rizika. Nekvantitativne ocene odnosno lingvističke varijable se unose duž y ose čiji značaj posledica raste idući odzgo na dole.

II faza podrazumeva definisanje verovatnoće pojave za svaku od definisanih posledica na bazi empirijskih ili iskustvenih podataka, takođe u lingvističkoj formi (retko, neverovatno, moguće, verovatno, skoro sigurno). U nekim slučajevima kada se raspolaže numeričkim podacima, pored kvalitativnog opisa može stajati verovatnoća pojave nekog događaja (npr. retko – 10^{-4} , neverovatno – 10^{-3} itd.). Veza između kvalitativnog i kvantitativnog opisa zavisi od ekspertske procene i izabranog broja nivoa. Međutim, s obzirom na prirodu problema koji se analiziraju kvalitativnim metodama treba istaći da je prethodna praksa retka i više je odlika polukvalitativnih metoda.

III fazu karakteriše rangiranje rizika na osnovu logičke povezanosti između verovatnoće nastanka opasnosti i posledica koje one mogu prouzrokovati. Definisanje rangova odnosno nivoa rizika vrši ekspert ili ekspertski tim na bazi iskustva, znanja i empirijskih podataka. Matrice i rangovi rizika su radi racionalnije i efikasnije praktične primene standardizovani u skladu sa preporukama odgovarajućih agencija i institucija.

Standardima se definiše izbor dimenzija matrice, nivoa verovatnoće i posledica, kao i rang rizika prema vrsti problema za koji treba dati kvalitativnu procenu rizika. Na ovaj način se u znatnoj meri smanjuje obim ekspertske posla pri proceni rizika, što pojednostavljuje implementaciju ovog pristupa u mnogim praktičnim primenama. Angažovanje eksperata je fokusirano na analizu konkretnog problema i uglavnom se svodi na kvalitativno ocenjivanje parametara verovatnoće i posledica. Rang odnosno stepen rizika koji prati razmatrani proces ili pojavu se na osnovu ekspertske ocene očitava iz standardizovanih matrica rizika, shodno korišćenom standardu. U nastavku će biti prezentovani standardi za matricnu procenu rizika, zavisno od oblasti za koju su namenjeni.

5.1.2. SINGAPURSKA METODA (OHSAS STANDARD)

U preporukama za primenu OHSAS standarda *Evropske agencije za bezbednost i zdravlje na radu* preporučuje se matrica 3x3 (tabela 5.1). Rizik se najjednostavnije izražava kao proizvod verovatnoće nastanka povrede na radu, oštećenja zdravlja i oboljenja u vezi sa radom (**V**) i posledica težine povrede, oštećenja zdravlja i oboljenja u vezi sa radom (**T**).

$$R = V \times T \quad (5.1)$$

Matrica ima tri nivoa za kvalitativni opis verovatnoće (neverovatno, verovatno i veoma verovatno), kao i za opis posledice (umerene, srednje i velike). Rizik takođe ima tri nivoa izražena kvalitativnim opisom: mali, srednji i velik.

Prednost svih matrica rizika se oslikava u onemogućavanju prihvatanja neprihvatljivog rizika, tako što omogućavaju donošenje operativnih, inženjerskih odluka u cilju smanjenja rizika na prihvatljiv nivo.

Tabela 5.1. OHSAS standrad (matrica rizika 3×3)

| Rizik se izražava kao proizvod verovatnoće (V) i posledica (T) $R=V \times T$ | | Posledice | | |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| | | <i>Umerene</i> – nesreće i bolesti ne prouzrokuju dugotrajne posledice | <i>Srednje</i> – nesreće i bolesti prouzrokuju srednje, ali ne i dugotrajne posledice | <i>Velike</i> – nesreće i bolesti koje prouzrokuju teške i stalne posledice i/ili smrt |
| Verovatnoća | <i>Neverovatno</i> – ne bi trebalo da se desi tokom čitave profesionalne karijere zaposlenog | 1 | 1 | 2 |
| | <i>Verovatno</i> – može da se desi nekoliko puta tokom profesionalne karijere zaposlenog | 1 | 2 | 3 |
| | <i>Veoma verovatno</i> – može se desi više puta tokom profesionalne karijere zaposlenog | 2 | 3 | 3 |
| 3 | Velik rizik | Neprihvatljiv rizik | Radno mesto sa povećanim rizikom | |
| 2 | Srednji rizik | Prihvatljiv rizik | Radno mesto sa povećanim rizikom | |
| 1 | Mali rizik | | | |

Učesnici u timu za procenu rizika ističu da sve matrice rizika karakterišu sledeća ograničenja:

- mogućnost primene samo za identifikovane opasnosti/štetnosti (nije alat za identifikaciju opasnosti/štetnosti),
- veliki stepen subjektivnosti pri procenjivanju rizika i
- mogućnost samo komparativne, odnosno uporedne analize nivoa rizika.

5.1.3. MIL-STD-882C STANDARD

Američki vojni standard preporučuje upotrebu matrica procene rizika:

- 4x6 (MIL-STD-882C),
- 5x5 (MIL-STD-882B) i
- 4x5 (MIL-STD-882D).

Matrica 4x6 (MIL-STD-882C) sadrži četiri nivoa (I, II, III i IV), odnosno kvalitativna opisa posledice, koji se odnosi na profesionalna oboljenja/povrede, gubitak opreme i radnog vremena i uticaj na životnu sredinu. Kvalitativni opis i definicija verovatnoće nastanka neželjenog događaja predstavljen je sa šest nivoa (A, B, C, D, E i F).

Pri korišćenju ove matrice prepoznaju se tri kvalitativna opisa nivoa rizika (povećan, srednji i mali rizik). Rizik se smatra neprihvatljivim ako je procenjen kao povećan, a prihvatljivim ako pripada oblasti srednjeg ili malog rizika.

Tabela 5.2. Matrica procene rizika MIL-STD-882C standard (matrica rizika 4×6)

| Posledice Verovatnoća | Katastrofalne (1) | Kritične (2) | Umerene (3) | Neznatne (4) |
|--------------------------|----------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| Često (A) | 3 | 3 | 2 | 1 |
| Verovatno (B) | 3 | 3 | 2 | 1 |
| Povremeno (C) | 3 | 2 | 2 | 1 |
| Slabo (D) | 2 | 2 | 2 | 1 |
| Neverovatno (E) | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Eliminisano (F) | Eliminisano | | | |

| | | |
|----------|---------------|---------------------|
| 3 | Povećan rizik | Neprihvatljiv rizik |
| 2 | Srednji rizik | Prihvatljiv rizik |
| 1 | Mali rizik | |

5.1.4. STANDARD AS/NZS 4360: 2004

Standard AS/NZS 4360:2004 definiše rizik kao šansu da se nešto dogodi, a što će imati uticaja na ciljeve, često se to navodi u smislu događaja čiji uticaj može biti pozitivan ili negativan.

Tabela 5.3. Matrica rizika prema AS/NZS 4360:2004

| POSLEDICE | | | | | VEROVATNOĆA | | | | | |
|-----------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------|-----------------------------------------------|---|
| NIVO | LJUDI | REPUTACIJA | POSLOVNI PROCES I SISTEMI | FINANSIJE | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | | | | | Retko 1 u 10000 - 100000 | Neverovatno 1 u 1000 - 10000 | Moguće 1 u 100 - 1000 | Verovatno 1 u 10 - 100 | Skoro sigurno > 1 u 10 | |
| | | | | | Može da se desi u nekim slučajevima | Verovatno se neće desiti | Može da se desi nekad u budućnosti | Verovatno će se desiti | Očekuje se da sedesi u većini slučajeva | |
| 1 | BEZNAČAJNA | Povrede i bolesti koje ne zahtevaju medicinski tretman | Interna kontrola | Manje greške u procesima ili sistemima koje zahtevaju korektivnu akciju | 1% Budžeta | L | L | L | M | M |
| 2 | MALA | Male povrede koje zahtevaju samo prvu pomoć | Posmatranje od strane unutrašnje kontrole da bi se sprečile eskalacije | Neispunjene procedure u procesu | 2,5% Budžeta | L | M | M | M | H |
| 3 | UMERENA | Ozbiljne povrede koje zahtevaju hospitalizaciju ili višestruki medicinski tretman | Posmatranje koje zahteva spoljne izvršioce ili istragu | Zahtevi za jednu ili više odgovornosti nisu ispunjeni | >5% Budžeta | M | M | M | H | H |
| 4 | OZBILJNA | Povrede koje ugrožavaju život ili višestruke povrede koje zahtevaju hospitalizaciju | Intenzivni javni ili politički značaj | Strategije nisu u saglasnosti sa nacionalnim planom | >10% Budžeta | H | H | H | H | E |
| 5 | KATASTROFALNA | Smrt ili višestruke povrede koje ugrožavaju život | Javnost | Kritični pad sistema, loša politika savetovanja | >25% Budžeta | H | H | E | E | E |

| | | | |
|----------|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| E | Ekstremni rizik | Ekstremni i povećani rizici zahtevaju detaljan plan radi smanjenja na srednji ili mali rizik | Radno mesto sa povećanim rizikom |
| H | Povećani rizik | | Radno mesto nije sa povećanim rizikom |
| M | Srednji rizik | | |
| L | Mali rizik | | |

5.2. POLUKVALITATIVNE METODE PROCENE RIZIKA

Polukvalitativne (kombinovane) metode za procenu rizika su razvijene na bazi nedostataka kvalitativnih metoda i kao takve su našle široku praktičnu primenu. Osnovni nedostatak kvalitativnih metoda ogleda se u nemogućnosti validne procene verovatnoće nastanka neželjenog događaja. Ovo je posebno izraženo u slučajevima kada treba izvršiti procenu rizika nastanka nepoželjnih događaja odnosno incidenata koji se retko javljaju. Prirodu ovih incidenata karakterišu oskudni statistički podaci na bazi kojih se ne može induktivnim pristupom izvući merodavan generalizovani zaključak. Primer koji nabolje ilustruje ovu situaciju se odnosi na procenu rizika pri transportu opasnih materija (zapaljive, eksplozivne, toksične i druge materije). Ako posmatramo neku deonicu saobraćajnice dužine L (npr. $L = 100 \text{ km}$) u nekom dovoljno dugom vremenskom intervalu t (npr. $t = 10$ godina) može se zaključiti da je broj saobraćajnih udesa N_{su} daleko veći od broja hemijskih udesa N_{hu} .

Koncepcija polukvalitativnih metoda procene rizika je zasnovana na kvalitativnom pristupu u proceni verovatnoće nastanka štetnog događaja i posledica koji taj događaj nosi sa sobom ukoliko se realizuje. Osnovna razlika polukvalitativnih metoda u odnosu na kvalitativne pristupe je korišćenje kvalitativne odnosno numeričke skale preko koje se uspostavlja direktna veza sa lingvističkim varijablama (kvalitativnim opisom). Svakom kvalitativnom opisu za verovatnoću pojave incidenta i nastanak pojedinih posledica odgovaraju uslovne numeričke vrednosti (rangovi). Znači, pristup rangiranja kod polukvalitativnih metoda podrazumeva transformaciju kvalitativnih pokazatelja u kvantitativne (numeričke) ocene. Iako se ovaj pristup kvalitativno-kvantitativne transformacije odlikuje jednostavnošću, njega prati i jedan suštinski nedostatak koji je vezan za nemogućnost preciznog dodeljivanja kvalitativnih izraza podeocima kvalitativne skale. Analizirajući prednosti i nedostatke polukvalitativnih metoda može se konstatovati sledeće:

- Polukvalitativne metode se baziraju na kvalitativnom pristupu,
- Pобољшanje polukvalitativnih metoda je izvršeno koristeći kvalitativnu skalu i
- Ograničenost uspostavljanja pouzdane veze između kvalitativnih formi i numeričkih nivoa skale.

Na osnovu prethodnih elemenata može se zaključiti da su polukvalitativne metode nadograđeni kvalitativni koncepti procene rizika u delu numeričkog rangiranja za verovatnoće pojave i posledice određenog incidenta. Zato su ove metode i dobile naziv polukvalitativne (kombinovane), jer koriste kvalitativnu bazu za nadogranju kvantitativnih elemenata. Postoje tri metode zasnovane na polukvalitativnom odnosno kombinovanom pristupu procene rizika i to su:

- Matrična metoda,
- Tabelačna metoda i
- Grafička metoda.

U nastavku teksta će se izvršiti pregled ovih metoda procene rizika uz osvrt na njihove specifičnosti, oblast primene, prednosti i nedostatke.

5.2.1. MATRIČNA METODA

Matrična polukvalitativna metoda je zasnovana na formiranju matrice rizika koristeći kombinacije podmatričnih tabela koje se odnose na verovatnoće nastanka neželjenog događaja (incidenta) i stepena posledica koji mogu prouzrokovati. Koncept ove metode je analogan sa kvalitativnom matricom rizika, a osnovna razlika je u samom postupku određivanja ranga rizika. Naime, kod kvalitativne metode rang rizika definiše polje matrice $P_n V_m$ u preseku kolone ranga verovatnoće nastanka incidenta P_n i reda koji definiše posledicu tog događaja V_m (slika 5.2). Rang rizika polukvalitativne metode se po analogiji sa kvalitativnim pristupom definiše preko numeričke vrednosti (broja) dobijene kao proizvod ranga (nivoa numeričke skale) verovatnoće nastanka incidenta i ranga posledice koja je izazvana nepoželjnim događajem. Najpoznatije polukvalitativne metode za procenu rizika koje imaju praktičnu primenu u nekim oblastima proizvodnje su (tabela 5.6):

- AUVA – metoda *Austrijskog udruženja proizvođača celuloze i papira* i
- BG – metoda *Udruženja nemačkih inženjera*.

Ove metode svoje rezultate baziraju na istoj matrici rizika, a procedura njihove primene se odvija u tri faze:

- Formiranje podmatrice verovatnoće nastanka incidenta,
- Analiza mogućih posledica od opasnosti koje nosi rizik nastanka akcidenta i
- Definisanje matrice rizika i definisanje rezultata procene rizika.

Postupak sprovođenja prve faze ima za cilj da utvrdi dva parametra. Prvi parametar se tiče stepena potencijalne ugroženosti odnosno izloženosti predmeta procene (procesa, tehničkog sistema, radne snage ili nekog fenomena) od mogućih hazarda. Ova procena se izvodi na bazi statističkih podataka, a u nedostatku istih se oslanja na iskustvo i znanje eksperta. Drugi parametar ima ulogu subjektivne procene eksperta o ispunjenosti bezbednosnih zahteva predmeta procene. Ova analiza se realizuje na bazi unapred pripremljenog upitnika (ček liste) koji zavisi od kategorije predmeta procene. Integrisani kvalitativni opisi sa odgovarajućim rangovima koji se odnose na izloženost hazardima i ispunjenost bezbednosnih uslova u zavisnosti od procenjenog procentualnog uticaja su dati u tabeli 5.4.

Tabela 5.4. Kvalitativno-kvantitativni odnos izloženosti i bezbednosti

| Procenjen uticaj hazarda i bezbednosti | Kvalitativni opis nivoa | | Rang kvalitativnog opisa | |
|----------------------------------------|-------------------------|-----------------|--------------------------|-------------|
| | hazarda | bezbednosti | hazarda | bezbednosti |
| 0 – 20 % | Vrlo retko | Kritičnan | 1 | 5 |
| 21 – 40 % | Povremeno | Veliki | 2 | 4 |
| 41 – 60 % | Često | Nedovoljan | 3 | 3 |
| 61 – 80 % | Pretežno | Prihvatljiv | 4 | 2 |
| 81 – 100 % | Konstantno | Zadovoljavajući | 5 | 1 |

Tabela 5.5. Podmatrice posledica i verovatnoće sa uslovima izloženosti i bezbednosti

| $V = H \times B$ | | | Stepen ispunjenosti bezbednosnih uslova (B) | | | | | Verovatnoća | | |
|--------------------------------------|------------|---|-------------------------------------------------|----|----|----|----|-------------|---------|------|
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Opis | Opseg | Rang |
| Stepen izloženosti hazardima (H) | Vrlo retko | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Vrlo mala | 1 – 2 | 1 |
| | Povremeno | 2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | Mala | 3 – 5 | 2 |
| | Često | 3 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | Srednja | 6 – 9 | 3 |
| | Pretežno | 4 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 | Velika | 10 – 16 | 4 |
| | Konstantno | 5 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | Vrlo velika | 20 – 25 | 5 |

| Posledice | Opis | Vrlo lake | Lake | Umerene | Teške | Smrtonosne |
|-----------|------|-----------|------|---------|-------|------------|
| | Boja | | | | | |
| | Rang | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |

Tabela 5.6. Matrica rangiranja rizika prema AUVA i BG metodama (matrica 5×5)

| Kvantitativna vrednost rizika R se dobija iz izraza: $R = V \times P$ | | | P | Potencijalne posledice incidenta | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------|------|------|----------------------------------|------|---------|-------|------------|
| | | | Opis | Vrlo lake | Lake | Umerene | Teške | Smrtonosne |
| | | | Boja | | | | | |
| V | Opis | Boja | Rang | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Verovatnoća nastanka incidenta | Vrlo mala | | 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | Mala | | 2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| | Srednja | | 3 | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 |
| | Velika | | 4 | 4 | 8 | 12 | 16 | 20 |
| | Vrlo velika | | 5 | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 |

| | | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|-------|------------|-------|---------|---------|-----------|
| Rang rizika definiše opseg iz matrice 5×5 kome odgovara kvalitativni opis | 1. | Rang | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| | 2. | Opseg | 1 – 2 | 3 – 5 | 6 – 9 | 10 – 16 | 20 – 25 |
| | 3. | Opis | Beznačajan | Mali | Srednji | Visok | Ekstremni |

5.2.2. TABELARNA METODA

Tabelarne metode koriste nadograđeni koncept preuzetog od matričnih metoda i podrazumevaju kvantifikaciju verovatnoće nastanka incidenata i njihovih posledica na osnovu tabelarnog kvalitativnog opisa. Tabelarne metode su razvijene na bazi suštinskog nedostatka matričnog pristupa sa tendencijom kvantitativne interpretacije rizika. Komparativnom analizom matrične i tabelarne metode se zaključuje da veći udeo kvalitativnog pristupa povlači za sobom veću subjektivnost procene rizika. Odavde se zaključuje da su tabelarne metode naprednije od matričnih upravo zbog toga što je kvantifikovanje rizika obrnuto proporcionalno ugrađenoj subjektivnosti eksperta u rezultat procene. Svi parametri koji se mogu izmeriti ili identifikovati na neki direktan ili indirektan način (npr. vizuelno, mernim instrumentom, iskustveno i sl.) su znatno pouzdaniji od subjektivnih procena. Upravo na tom konceptu su zasnovane tabelarne metode.

5.2.3. KINNEY METODA

Rizik se prema KINNEY metodi računa primenom izraza:

$$R = V \times U \times P \quad (5.2)$$

Gde su:

V – verovatnoća pojave nepoželjnog događaja (incidenata)

U – učestalost i vreme izlaganja opasnosti

P – posledice nastanka incidenata

Definisanje verovatnoće nastanka incidenata V odnosno faktora rizika usled nastanka neželjenog događaja se sprovodi koristeći skalu sa 7 nivoa rangiranja (tabela 5.7).

Tabela 5.7. Kvalitativno-kvantitativna zavisnost za faktore rizika prema KINNEY metodi

| Faktor rizika | Rang | Vrednost | Kvalitativni opis verovatnoće |
|---------------------------------------|------|----------|--------------------------------------------------------|
| Verovatnoća nastanka opasnosti V | 1 | 0,1 | Skoro da ne postoji mogućnost (samo u domenu teorije) |
| | 2 | 0,2 | Praktično neverovatno |
| | 3 | 0,5 | Prihvatljivo (uverljivo), ali malo verovatno |
| | 4 | 1 | Mala verovatnoća – moguće u određenim slučajevima |
| | 5 | 3 | Neuobičajeno, ali moguće |
| | 6 | 6 | Moguće |
| | 7 | 10 | Predvidljivo |
| Učestalost izlaganja hazardu U | 1 | 1,0 | Retko (godišnje) |
| | 2 | 2,0 | Mesečno |
| | 3 | 3,0 | Nedeljno |
| | 4 | 6,0 | Dnevno |
| | 5 | 10,0 | Stalno (kontinualno) |
| Posledice incidenata P | 1 | 1,0 | Beznačajne povrede (ne zahtevaju nikakav veći tretman) |
| | 2 | 2,0 | Lake telesne povrede sa trenutnom onesposobljenošću |
| | 3 | 3,0 | Umerene povrede sa privremenom onesposobljenošću |
| | 4 | 6,0 | Teške telesne povrede sa trajnim invaliditetom |
| | 5 | 10,0 | Smrtni ishod |

Kvantitativne vrednosti za rangiranje rizika prema KINNEY metodi se određuju prema (5.2) i zavise od procenjenog uticaja pojedinih faktora rizika (V , U i P). Sve polukvalitativne metode koje su zasnovane na tabelarnom konceptu procene rizika zasnivaju se na primeni tri koraka, a karakterišu ih procesi kvantifikacije i dekvantifikacije. Prvi korak u primeni polukvalitativnih metoda podrazumeva uspostavljanje kvalitativno-kvantitativnog odnosa za svaki od faktora rizika koristeći odgovarajuće tabelarne prikaze. Znači, ovaj korak se odnosi na sprovođenje procesa kvantifikacije elemenata odnosno faktora rizika, kako bi se numeričkim putem definisao nivo rizika. U drugom koraku se realizuje kalkulacija nivoa rizika na bazi matematičke formulacije primenjene metode. Treća faza kroz proces dekvantifikacije ima za cilj da transformiše numeričku vrednost nivoa rizika u unaped definisan kvalitativan opis (mali, veliki itd.) odnosno rang prema klasifikovanom opsegu vrednosti. Uobičajeno je da se rangiranje kod svih metoda sprovodi u pet nivoa radi lakše ocene stanja u proceni rizika i definisanja adekvatnih mera za reagovanje (tabela 5.8).

Tabela 5.8. Kriterijumi za rangiranje rizika prema Kinney metodi

| Rizik od nastanka incidenta R | | | | Stanje procesa koji je predmet procene rizika |
|---------------------------------|-----------|-------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|
| Rang | Vrednost | Kvalitativni opis | Reagovanje | |
| 1 | 0,1 – 20 | Zanemarljiv | Nema reagovanja | Prihvatljiv rizik |
| 2 | 21 – 70 | Mali | Zahteva monitoring | |
| 3 | 71 – 200 | Umeren | Treba preduzeti mere | Povećan rizik |
| 4 | 201 – 400 | Visoki | Hitno otklanjanje uzroka | Neprihvatljiv rizik |
| 5 | > 400 | Neprihvatljiv | Zaustavljanje procesa | |

Finalni rezultat polukvalitativnih metoda mora biti definisan preko ranga i dat u formi kvalitativnog opisa. Da bi se definisao rang rizika neophodno je sprovesti klasifikaciju njegovog nivoa R prema skali koja je specifična za svaku od primenjenih metoda. Skala za rangiranje rizika je kod svih metoda nelinearna i svakom podeoku na skali odgovara određeni opseg nivoa rizika (videti prve dve kolone u tabeli 5.8). Ovo je sasvim logično imajući u vidu da je nivo rizika kod KENNEY metode „*kubna funkcija*“, jer se određuje kao proizvod tri parametra.

Rizik prema tabelarnim polukvalitativnim metoda se rangira u pet gupa, shodno klasifikaciji nivoa rizika i može biti: zanemarljivo mali, mali, srednji, visok i ekstremno visok (videti treću kolonu u tabeli 5.8). Ovoj klasifikaciji nivoa odnosno rangu rizika odgovara kvalitativni opis procenjenog stanja i mere koje treba preduzeti u cilju reagovanja na pojavu rizika određenog ranga (kolone četiri i pet u tabeli 5.8). Tako imamo da se za zanemarljivo mali rizik (rang 1) ne zahteva nikakvo reagovanje, jer je rizik prihvatljiv. Mali rizik (rang 2) ne zahteva uvođenje monitoringa (praćenja) procesa, bez preduzimanja konkretnih aktivnosti pri upravljanju, pa je rizik prihvatljiv. Umereni ili srednji rizik (rang 3) podrazumeva sprovođenje mera za otklanjanje potencijalnih hazarda uz ograničena finansijska sredstva, pa se proces kvalifikuje kao stanje povećanog rizika. Visok rizik (rang 4) podrazumeva privremeni prekid procesa, dok se hitno ne uklone uzročnici opasnosti, zahteva znatna finansijska sredstva i kategoriše se kao neprihvatljiv rizik. Ekstremno visok rizik (rang 5) obavezuje totalni prekid procesa, ako zbog tehno-ekonomskih ograničenja nije moguće otkloniti hazarde i tretira se kao neprihvatljiv rizik.

5.2.4. PILZ METODA

Ova metoda takode spada u grupu tabelarnih metoda i njenom upotrebom je moguće identifikovati četiri nivoa rizika. Implementacija ovog pristupa procene rizika je vrlo slična kao i kod KENNEY metode i zasniva se na dodeljivanju ponderisanih vrednosti određenim kvalitativnim opisima. Osnovna razlika u odnosu na KENNEY metodu je uvođenje dodatnog faktora rizika koji obuhvata broj osoba istovremeno izloženih opasnostima (B).

Na bazi ovoga može se zaključiti da je KENNEY metoda specijalan slučaj PILZ metode kada je rang koji definiše broj osoba istovremeno izloženih hazardima jednak jedinici.

Kvantitativna vrednost rizika R prema ovoj metodi se računa korišćenjem obrasca:

$$R = V \times U \times P \times B \quad (5.3)$$

Gde su:

V – verovatnoća pojave nepoželjnog događaja (incidenta),

U – učestalost odnosno vreme izlaganja opasnosti,

P – posledice nastanka incidenta i

B – broj osoba koje su istovremeno izložene opasnostima.

Definisanje faktora rizika odnosno parametara koji se odnose na verovatnoću nastanka incidenta V , učestalost izlaganja U , moguće posledice usled incidenta P i broja osoba izloženih riziku B , sprovodi se prema tabeli 5.9.

Tabela 5.9. Kvalitativno-kvantitativna zavisnost za faktore rizika prema PILZ metodi

| Faktor rizika | Rang | Vrednost | Kvalitativni opis verovatnoće |
|-----------------------------------------|------|----------|-----------------------------------------------------------|
| Verovatnoća nastanka incidenta V | 1 | 0,033 | Skoro nemoguće (samo u ekstremnim slučajevima) |
| | 2 | 1,0 | Izrazito mala verovatnoća, ali je ostvarljivo |
| | 3 | 1,5 | Neverovatno, ali se može desiti |
| | 4 | 2,0 | Moguće, ali nije uobičajeno |
| | 5 | 5,0 | Postoji šansa da se desi |
| | 6 | 8,0 | Verovatno, nije iznenađenje ako se desi |
| | 7 | 10,0 | Velika verovatnoća da će se desiti (treba očekivati) |
| | 8 | 15,0 | Izvesno da će se desiti (nema sumnje) |
| Učestalost izlaganju opasnostima U | 1 | 0,5 | Godišnje |
| | 2 | 1,0 | Mesečno |
| | 3 | 1,5 | Nedeljno |
| | 4 | 2,5 | Dnevno |
| | 5 | 4,0 | Časovno |
| | 6 | 5,0 | Konstantno |
| Posledice nastanka incidenta P | 1 | 0,1 | Beznačajne povrede osoba |
| | 2 | 0,5 | Izrazito lake telesne povrede (ogrebotine i sl.) |
| | 3 | 2,0 | Srednje teške telesne povrede (trenutna onesposobljenost) |
| | 4 | 4,0 | Lakše telesne povrede (privremena onesposobljenost) |
| | 5 | 6,0 | Teške telesne povrede (trajna onesposobljenost) |
| | 6 | 10,0 | Izrazito teške telesne povrede (teška invalidnost) |
| | 7 | 15,0 | Fatalni ishod - smrt |
| Broj lica izloženih uticaju hazarda B | 1 | 1,0 | 1 – 2 osobe |
| | 2 | 2,0 | 3 – 7 osoba |
| | 3 | 4,0 | 8 – 15 osoba |
| | 4 | 8,0 | 16 – 50 osoba |
| | 5 | 12,0 | Više od 50 osoba |

Rangiranje rizika prema PILZ metodi se vrši u pet nivoa na osnovu njegove kvantitativne (numeričke) vrednosti, koristeći formulaciju (5.3). Rang rizika kome odgovara vrednost manja od 250 smatra se prihvatljivim, u suprotnom rizik je neprihvatljiv i zahetva prekid aktivnosti do otklanjanja ili redukovanja izvora opasnosti (tabela 5.10).

Tabela 5.10. Klasifikacioni nivoi za rangiranje rizika prema PILZ metodi

| Rizik od nastanka incidenta R | | | | Stanje procesa koji je predmet procene rizika |
|---------------------------------|-----------|-------------------|--------------------------|-----------------------------------------------|
| Rang | Vrednost | Kvalitativni opis | Reagovanje | |
| 1 | < 5 | Zanemarljiv | Nema reagovanja | Prihvatljiv rizik |
| 2 | 6 – 50 | Mali | Zahteva monitoring | |
| 3 | 51 – 250 | Umeren | Treba preduzeti mere | Povećan rizik |
| 4 | 251 – 500 | Visoki | Hitno otklanjanje uzroka | Neprihvatljiv rizik |
| 5 | > 500 | Neprihvatljiv | Zaustavljanje procesa | |

5.2.5. GUARDMASTER METODA

Ova metoda je predložena od strane Guardmaster-a, snabdevača zaštitnih uređaja za bezbednosne sisteme sa sedištem u Velikoj Britaniji. Koncept kalkulacije ranga rizika kod ove metode se suštinski razlikuje u odnosu na KENNEY i PILZ metode, jer se faktori rizika sabiraju (za razliku od prethodne dve metode gde se faktori rizika međusobno množe). Ovo objašnjava prirodu GUARDMASTER metode koja podrazumeva da se problemu procene rizika pristupa na sistemastki način koristeći originalan metodološki razvoj. Na ovaj način se rizik sagledava na matematičkoj platformi koja je nezavisna od prethodne dve metode.

Proračunati (određeni) nivo rizika R je kvantitativna interpretacija fenomena rizika i sam po sebi ne daje dovoljno informacija o procesu ili pojavi koja je predmet analize. Međutim, ovaj parametar je vrlo koristan u sistemu procene rizika određenim postupkom, jer na metodičan način uzima u obzir uticaje od svih faktora rizika. Zato se nivo rizika R može tretirati kao procesni parametar i ima ključnu ulogu u obradi informacija koje se generišu na osnovu subjektivno procenjenih faktora rizika. Nivo rizika R varira zavisno od primenjenog pristupa procene rizika, pa se kod KENNY metode kreće u opsegu od 0,1-1000, dok kod GUARDMASTER pristupa uzima vrednosti u intervalu od 3-20. Poredeći GUARDMASTER i PILZ metode sa aspekta klasifikacije nivoa rizika R , može se zaključiti da je kod prve odnos maksimalne i minimalne vrednosti znatno manji nego kod druge metode. Kao posledicu toga imamo da je skala rangiranja po GUARDMASTER-u ravnomernijeg karaktera nego kod PILZ metode, što je ujedno i jedna od prednosti ovog metodološkog koncepta procene rizika. Metoda GUARDMASTER predlaže kalkulaciju ranga odnosno nivo rizika preko sledećeg izraza:

$$R = V+U+P+B \quad (5.4)$$

Gde su:

V – verovatnoća pojave nepoželjnog događaja (incidenta)

U – učestalost odnosno vreme izlaganja opasnosti

P – posledice nastanka incidenta

B – broj osoba koje su istovremeno izložene opasnostima.

Tabela 5.11. Kvalitativno-kvantitativna zavisnost za faktore rizika prema GUARDMASTER metodi

| Faktor rizika | Rang | Vrednost | Kvalitativni opis verovatnoće | Korektivni faktori | |
|-----------------------------------|------|----------|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| | | | | Uslovi procesa | Vrednost |
| Verovatnoća incidenta <i>V</i> | 1 | 1,0 | Mala | Neiskusni i neobučeni personal | Na nivo rizika $R = V+U+P$ dodati 2, pa je $R=V+U+P+2$ |
| | 2 | 2,0 | Moguća | | |
| | 3 | 4,0 | Verovatna | | |
| | 4 | 6,0 | Izvestna | | |
| Izlaganje hazardu <i>U</i> | 1 | 1,0 | Retko (jednom nedeljno) | Dugačak interval izlaganja Rad u opasnoj zoni (>15 min) | Tada se uzima: $U = 4$ Na U se dodaje 1, ($U+1$) |
| | 2 | 2,0 | Povremeno (dnevno) | | |
| | 3 | 4,0 | Često (više puta u toku dana) | | |
| Posledice incidenta <i>P</i> | 1 | 1,0 | Lakše povrede (beznačajne povrede) | Opasnostima je izloženo više (B) osoba | Umesto vrednosti za P uzeti: $P \times B$ |
| | 2 | 3,0 | Umerene povrede (bez trajnih posledica) | | |
| | 3 | 6,0 | Teške povrede (sa trajnim posledicama) | | |
| | 4 | 10,0 | Fatalan ishod (smrt) | | |

Rangiranje rizika prema GUARDMASTER-u se realizuje prema četiri klasifikaciona nivoa (tabela 5.4), što predstavlja razliku u odnosu na KINEEY i PILZ metodu. Nivo rizika koji ne prelazi vrednost $R = 6$ smatra se prihvatljivim i pri tome se ne zahtevaju nikakve ozbiljnije mere reagovanja, osim eventualno monitoringa procesa radi jasnije identifikacije pojedinih faktora (V , U ili P). Povećan rizik se javlja kada je $R = 7-15$ i na takvo stanje treba reagovati preventivnim merama. Ako nivo rizika ima vrednost $R > 15$ neophodno je zaustavljanje procesa i prema planu prioriteta sprovesti otklanjanje izvora opasnosti, shodno finansijskim mogućnostima. Cilj ovog postupka je svodenje rizika sa ranga 4 na rang 3 (povećani rizik), kako bi se nastavio proces, a zatim simultano sprovodile aktivnosti za redukciju na rang 1 ili 2 (prihvatljiv rizik). Ovo je najčešći slučaj u praksi imajući u vidu različita tehničko-tehnološka, finansijska, kadrovska, prostorna, vremenska i druga ograničenja. Retki su slučajevi kada se rizik sa ranga 4 (neprihvatljiv nivo) može redukovati direktno na rang 1 ili 2 (prihvatljiv nivo).

Tabela 5.12. Numeričke vrednosti za posledice P prema GUARDMASTER metodi

| Rizik od nastanka incidenta R | | | | Stanje procesa koji je predmet procene rizika |
|---------------------------------|----------|-------------------|------------------------|-----------------------------------------------|
| Rang | Vrednost | Kvalitativni opis | Reagovanje | |
| 1 | 1 – 2 | Zanemarljiv | Nema reagovanja | Prihvatljiv rizik |
| 2 | 3 – 6 | Mali | Zahteva monitoring | |
| 3 | 7 – 15 | Umeren | Hitno sprovođenje mera | Povećan rizik |
| 4 | >15 | Visoki | Zaustavljanje procesa | Neprihvatljiv rizik |

5.2.6. FINE METODA

FINE metoda se koristi za donošenje odluka da li je trošak za redukovanje rizika opravdan i za koje vreme bi ti rizici bili otklonjeni. Ovu metodu je 1971. godine predložio *William Fine* po kome je i dobila ime. Rizik se prema FINE metodi računa koristeći formilaciju:

$$R = V \times U \times P \quad (5.5)$$

Gde su:

V – verovatnoća pojave nepoželjnog događaja (incidenta)

U – učestalost odnosno vreme izlaganja opasnosti

P – posledice nastanka incidenta.

Tabela 5.13. Kvalitativno-kvantitativna zavisnost za faktore rizika prema FINE metodi

| Faktor rizika | Rang | Vrednost | Kvalitativni opis verovatnoće |
|--------------------------------------------|------|----------|------------------------------------------------------------------|
| Verovatnoća nastanka opasnosti <i>V</i> | 1 | 10 | Potpuni niz akcidenata je najverovatniji |
| | 2 | 6 | Potpuni niz akcidenata je prilično verovatan |
| | 3 | 3 | Poptuni niz događaja bi bio čista koincidencija |
| | 4 | 1 | Veoma mala mogućnost za potpuni niz događaja |
| | 5 | 0,5 | Poptuni niz događaja se ranije nije dogodio, ali je moguć |
| | 6 | 0,1 | Praktično nemoguće da će se desiti potpuni niz događaja |
| Učestalost izlaganja hazardu <i>U</i> | 1 | 10 | Kontinualno (više puta dnevno) |
| | 2 | 6 | Frekventno (jednom dnevno) |
| | 3 | 3 | Povremeno (jednom sedmično do jednom mesečno) |
| | 4 | 2 | Neuobičajeno (jednom mesečno do jednom godišnje) |
| | 5 | 1 | Retko (poznato je da će se desiti jednom u par godina) |
| | 6 | 0,5 | Teorijski moguće (nije poznata frekvencija događanja) |
| Posledice incidenta <i>P</i> | 1 | 100 | Katastrofalne, brojne žrtve, veliki poremećaj, šteta > 1 mil. \$ |
| | 2 | 50 | Više žrtava, materijalna šteta od 400 000 - 1 000 000 \$ |
| | 3 | 25 | Pojedinačni fatalni ishod, šteta od 100 000 – 400 000 \$ |
| | 4 | 15 | Teška telesna povreda |
| | 5 | 5 | Lakše telesne povrede, šteta do 1 000 \$ |
| | 6 | 1 | Povrede su isključene, manja materijalna šteta (do 1000 \$) |

Tabela 5.14. Kriterijumi za rangiranje rizika prema FINE metodi

| Rizik od nastanka incidenta <i>R</i> | | | | Stanje procesa koji je predmet procene rizika |
|--------------------------------------|------------|-------------------|------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Rang | Vrednost | Kvalitativni opis | Reagovanje | |
| 1 | 0 – 89 | Zanemarljiv | Zahteva preduzimanje mera, ali je situacija pod kontrolom | Prihvatljiv rizik |
| 2 | 90 – 199 | Visoki | Hitno otklanjanje uzročnika opasnosti, bez prekida procesa | Neprihvatljiv rizik |
| 3 | 200 – 1500 | Neprihvatljiv | Obustavljanje procesa kako bi se sprovele korektivne mere | |

Vrednost troškova opravdanosti (*J*) se određuje na osnovu relacije:

$$J = R/(CF \times DC) \quad (5.6)$$

Gde je:

R – rizik

CF – faktor troškova

DC – stepen korigovane vrednosti

Faktor troškova (*CF*) i stepen korigovane vrednosti (*DC*) se definišu preko skale sa sedam odnosno pet nivoa rangiranja, respektivno i dati su u tabeli 5.15.

Tabela 5.15. Kvalitativno-kvantitativna zavisnost za faktore rizika prema FINE metodi

| Korekциони faktori | Rang | Vrednost | Kvalitativni opis faktora troškova u dolarima (\$) |
|----------------------------------------------------------------------------|------|----------|----------------------------------------------------|
| Faktor troškova (procenjen trošak za korektivne mere u \$) <i>CF</i> | 1 | 10 | Više od 50 000 |
| | 2 | 6 | 25 000 – 50 000 |
| | 3 | 4 | 10 000 – 25 000 |
| | 4 | 3 | 1 000 – 10 000 |
| | 5 | 2 | 100 – 1 000 |
| | 6 | 1 | 25 – 100 |
| | 7 | 0,5 | Manje od 25 |
| Stepen korekcije (stepen smanjenja opasnosti) <i>DC</i> | 1 | 1 | Opasnost potpuno eliminisana (100 %) |
| | 2 | 2 | Opasnost smanjena na najmanju moguću meru (75 %) |
| | 3 | 3 | Opasnost redukovana za 50 – 75 % |
| | 4 | 4 | Opasnost smanjena za 50 % |
| | 5 | 6 | Mali uticaj na opasnost (manje od 25 %) |

Prema metodi FINE trošak je opravdan ukoliko je vrednost troškova opravdanosti $J > 10$, dok se smatra neopravdanim ako je $J \leq 10$. Kriterijum za ocenu troškova i vrednosti koje su dodeljene pojedinim parametrima su empirijskog karaktera i izvedeni su na bazi procena koje je sprovodio William Fine za vreme njegovog rukovođenja *Odeljenjem bezbednosti u vojno-pomorskoj laboratoriji američke vojske*.

5.2.7. GRAFIČKA METODA PROCENE RIZIKA

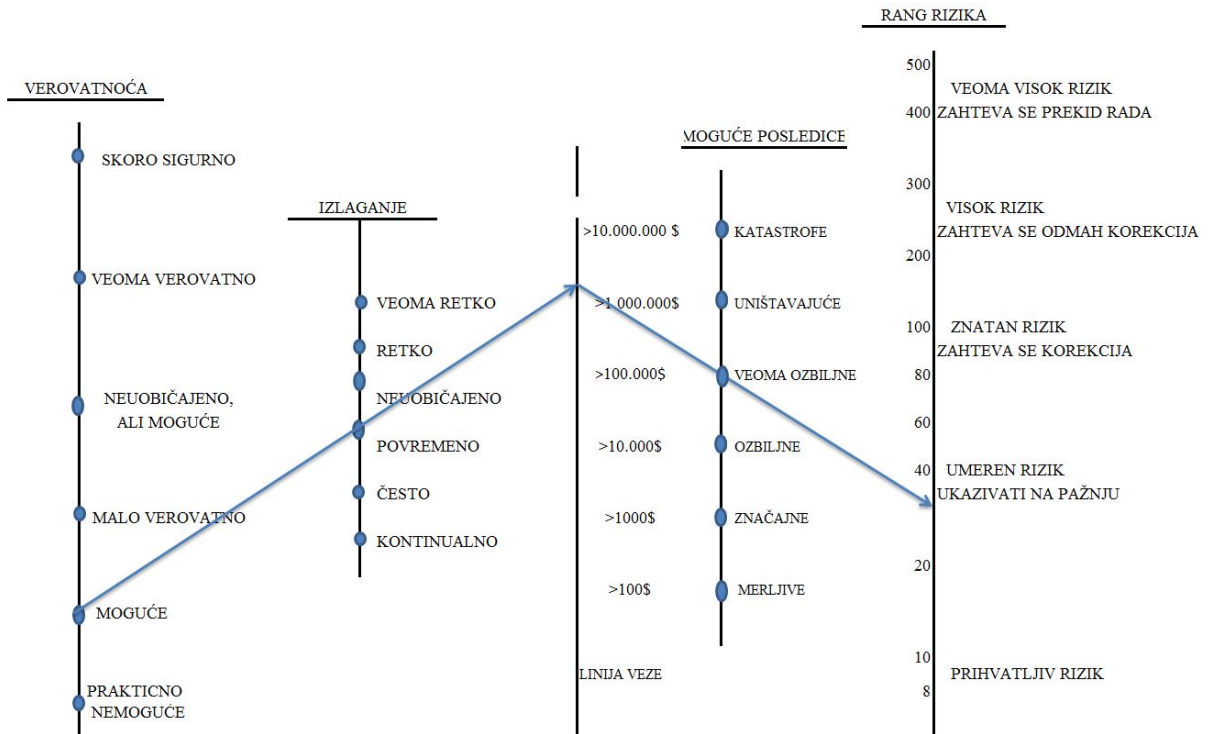
Kinney i *Wiruth* su 1976.godine u *Centru za pomorska naoružanja* napisali izveštaj pod naslovom *Praktična analiza rizika za upravljanje bezbednošću (Practical Risk Analysis for Safety Management)*, pozivajući se na *Fine*-ov raniji rad i čije u mnoge procene zasnovane na ovom izveštaju. Autori su takođe razvili brojčanu ocenu rizika razmatrajući verovatnoću, učestalost izlaganja i posledice, pri čemu su korišćene termine drugačije definisali u odnosu na *Fine*-a. Osim toga, numeričke vrednosti date za klasifikaciju svake različite kategorije su takođe drugačije. *Kinney* i *Wiruth* su razvili grafičku metodu sa ciljem da se analiziraju rizici i opravdanost troškova primenjenih korektivnih mera.

Ova grafička metoda se sastoji iz dva formirana nomograma:

- Nomogram za analizu rizika (slika 5.3) i
- Nomogram za analizu opravdanosti troškova (slika 5.4).

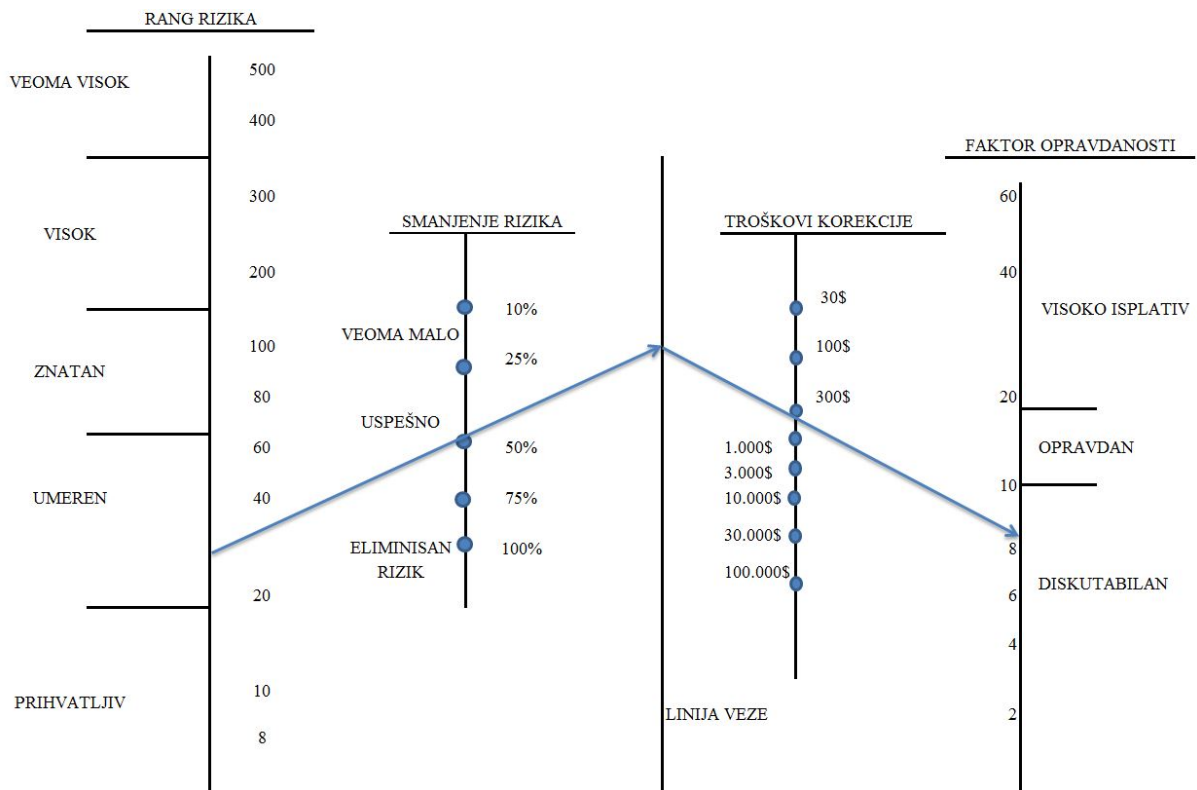
Način korišćenja nomograma za analizu rizika se realizuje tako što se:

- Odredi procenjena vrednost za verovatnoću i učestalost i povuče prava linija kroz procenjene vrednosti sve do linije veze,
- Procene moguće posledice i
- Povuče prava linija od tačke na liniji veze kroz procenjene moguće posledice i produži do nivoa rangiranja rizika.



Slika 5.3. Nomogram za analizu rizika

Procena troškova neophodnih za korekciju podrazumeva povlačenje linije od tačke na liniji veze kroz procenjene troškove potrebne za korekciju sve do faktora opravdanosti. Kao i u slučaju Fajnovog sistema, vrednost opravdanosti manja od 10 pokazuje da je predloženo smanjenje rizika diskutabilno. Tri nivoa opravdanosti su: visoko isplativ, opravdan i diskutabilan.



Slika 5.4. Nomogram za analizu opravdanosti troškova

Ukoliko je neophodno, treba uraditi još i sledeće:

- Određeni rang rizika preneti do slike 5.4,
- Proceniti smanjenje rizika,
- Povući pravu liniju da bi se spojila vrednost nivoa rangiranja rizika i smanjenja rizika sve do linije veze i

5.3. KVANTITATIVNE METODE PROCENE RIZIKA

Rizik se razmatra kao verovatnoća da će nešto što se vrednuje negativno uticati na opasnost odnosno hazard [179]. Procena rizika je sistematski proces za procenu uticaja, pojava i ishoda ljudskih aktivnosti koje uključuju proizvode ili sisteme sa opasnim karakteristikama. Potrebno je odgovoriti na tri pitanja: i) Šta može poći po zlu ?, ii) Koliko je verovatno da će se to dogoditi ? i iii) Ako se to desi, koje su posledice? [180]. Procena rizika se često formalno opisuje kao proces koji se sastoji od tri različite faze: identifikacije opasnosti i rizika, procene rizika i evaluacije rizika. Analiza rizika ima ulogu efikasnog i sveobuhvatnog postupka koji se dopunjuje upotrebom različitih tehnika.

Sve tehnike analize rizika se mogu klasifikovati u tri glavne kategorije: kvalitativne, kvantitativne i hibridne (kvalitativno-kvantitativne ili polu-kvantitativne). Kvalitativne tehnike su bazirane na metodama čiji rezultati procene u najvećoj meri zavise od menadžerskih i inženjerskih sposobnosti lica uključenih u postupak analize. Nasuprot ovom pristupu, razvijene su kvantitativne tehnike koje preko matematičkih izraza kvantifikuju rizik. Kvantitativne tehnike predstavljaju analitičke metode procene rizika određenih procesa kod kojih dominantan uticaj imaju realni podaci registrovanih usled realnih akcidenata. Uticaj lica koje procenjuje rizik kod kvantitativnih metoda je sveden na minimum, što ima i prednosti i nedostatke. Prednosti se ogledaju u tome što ne treba veliko iskustvo i znanje za primenu neke od kvantitativnih metoda i ostavlja mogućnost lake implementacije. Glavni nedostatak je neophodnost većeg broja statističkih podataka da bi se mogao adekvatno primentiti kvantitativni pristup, što može imati restriktivni karakter u onim situacijama kod kojih je mala učestalost pojave akcidenata. Zato je u takvim slučajevima neophodno primeniti tzv. hibridne tehnike koje koriste prednosti kvalitativnog i kvantitativnog pristupa. Hibridne tehnike procene rizika odlikuje veća kompleksnost u odnosu na kvalitativne i kvantitativne metode, a karakteriše ih koncept koji je funkcionalan i održiv samo za određenu namenu (*ad hoc*). To znači da se neka metoda procene rizika iz kategorije hibridnih tehnika ne može univerzalno primenjivati na širok spektar problema, već je njena svrsishodnost ograničena na analizu specijalizovanog problema.

Glavni poznati metodološki pristupi za analizu rizika obuhvataju:

- 1) Kvalitativne tehnike
 - a) Ček lista,
 - b) Analiza šta-ako,
 - c) Sigurnosna provera,
 - d) Analiza zadataka,
 - e) STEP metoda i
 - f) HAZOP metoda.
- 2) Kvantitativne tehnike
 - a) PRAT metoda,
 - b) DMRA metoda,
 - c) Kvantitativne mere rizika iz društvenog rizika,
 - d) QRA metoda,
 - e) QADS metoda,
 - f) CREA metoda,
 - g) PEA metod i
 - h) WRA metod.

- 3) Hibridne tehnike
 - a) HEAT/HFEA metod,
 - b) FTA metod,
 - c) ETA metod i
 - d) RBM metod.

5.3.1. ČEK LISTA

Ček lista je instrument sistematske opservacije, praćenja i procenjivanja određenih pojava i predstavlja najjednostavniji metod za identifikaciju hazarda pri proceni rizika. Analiza rizika ček listom podrazumeva sistemski pristup procene prema unapred utvrđenim kriterijumima u obliku jedne ili više ček lista. Ček lista je tabela sa unapred pripremljenim kategorijama pitanja i ponuđenim odgovorom na svako od pitanja koje anketni ispitivač čekira, pa otuda i naziv ček lista. Kategorija postavljenih pitanja zavisi od problematike koja se analizira i za industrijske pogone obuhvata uslove rada, organizovanje procesa, održavanje instalacija, mere sigurnosti i dr. Osnovne karakteristike ček liste koje ujedno predstavljaju i njene prednosti obuhvataju sledeće elemente [181]:

- a) Sistematski pristup zasnovan na *a priori* podacima koji su uključeni u pitanja,
- b) Mogućnost univerzalne primene kod različitih sistema i za različite svrhe,
- c) Obično se izvodi od strane pojedinca ili manje grupe obučanih za poslove anketiranja,
- d) Zasnovana je na intervjuima, pregledu dokumentacije i inspekcijskom pregledu,
- e) Generiše kvalitativno usaglašene liste ili neusaglašene forme listova sa preporukama za ispravljanje neusaglašenosti,
- f) Kvalitet evaluacije je primarno određen iskustvom ljudi koji kreiraju i vrše obuku korisnika ček lista,
- g) Koristi se za detaljne analize stanja sistema uključujući i analizu uzroka,
- h) Najčešće se koristi za rukovođenje timovima kroz inspekcijske radnje kritičnih elemenata sistema i
- i) Može se uspešno koristiti kao dodatak ili sastavni deo neke druge metode, kao što je npr. analiza šta-ako.

Iako analizu ček listom odlikuje visok stepen efektivnosti u identifikaciji različitih hazarda, ova tehnika ima dva limitirajuća faktora i to:

- a) Struktura analize ček listom se isključivo oslanja na znanje koje je ugrađeno kroz određenu kategoriju pitanja kako bi se identifikovali potencijalni problemi i
- b) Ček lista pruža samo kvalitativne informacije, bez kvantitativnih procena rizika koje bi se odnosile na bitne karakteristike razmatranog procesa.

5.3.2. ANALIZA “ŠTA - AKO”

Da bi mogli unapred proceniti uticaj strateškog ili taktičkog poteza kako bi planirali optimalne strategije za postizanje svojih ciljeva, donosiocima odluka trebaju pouzdani prediktivni sistemi. Analiza šta-ako je simulacija podataka čiji je cilj da ispita ponašanje složenog sistema, kao što je korporativno poslovanje ili njegov deo, pod nekim hipotezama koje se nazivaju scenariji. Konkretno, analiza šta-ako meri kako promene u skupu nezavisnih varijabli utiču na skup zavisnih promenljivih u odnosu na dati simulacioni model. Takav model je pojednostavljen prikaz poslovanja, podešen prema istorijskim korporativnim podacima. U praksi, formulisanje scenarija omogućava izgradnju hipotetičkog sveta kojim analitičar tada može upravljati, anketirati i konsultovati.

Glavne karakteristike ove tehnike su [181]:

- a) Sistematski i široko strukturane procene koje se oslanjaju na ekspertske timove za generisanje sveobuhvatnog pregleda u cilju osiguranja odgovarajućih mera od nastanka hazarda,

- b) Realizuje se sa jednim ili više timova sastavljenih od eksperata različitog nivoa znanja i iskustva koji participiraju u grupnim preispitivanjima radi donošenja kompromisnog rešenja i formiranja najrealnijih scenarija,
- c) Ova tehnika je univerzalnog karaktera što znači da se može primeniti na bilo koju aktivnost ili sistem u okviru koga treba dati procenu rizika,
- d) Visok nivo performansi koji omogućava detaljnu procenu rizika,
- e) Pruža kvalitativni opis potencijalnih problema u formi pitanja i odgovora, kao i preporuka za sprečavanje tih problema,
- f) Kvalitet sprovedenog postupka procene rizika zavisi od kvaliteta raspoloživih informacija, dokumentacije, znanja i iskustva članova ekspertskih timova, kao i metodike rada koju primenjuju njihovi rukovodioci,
- g) Generalno je primenljiva za skoro sve situacije kod kojih treba sprovesti procenu rizika, a naročito kod onih koje odlikuju jednostavniji scenariji hazarda i
- h) Vrlo retko se koristi samostalno (nezavisno), pa se zato najčešće primenjuje u cilju upotpunjavanja drugih, više struktuiranih tehnika kao što je analiza ček listom.

Procedura za sprovođenje analize šta-ako se sastoji od sledećih sedam koraka [181]:

- 1) Specifikacija i jasno definisanje granica potrebnih informacija u vezi rizika,
- 2) Identifikacija problema interesovanja na koji se analiza rizika odnosi (problem bezbednosti tehnološkog procesa, transporta, zaštitne životne sredine i dr.),
- 3) Izvršiti dekompoziciju predmeta analize na glavne elemente (osnovne ili suštinske zadatke) tako da analiza šta-ako treba da započne na osnovnom nivou,
- 4) Generisanje šta-ako pitanja za svaki segment aktivnosti ili element sistema,
- 5) Davanje odgovora na svako od šta-ako pitanja i razvoj preporuka za poboljšanje uslova usled rizika od potencijalnih problema,
- 6) Podela elemenata aktivnosti ili sistema na elementarni nivo radi sprovođenja detaljne analize stanja. Dekompozicija pojedinih elemenata na sukcesivno finije nivoe treba da pruži više korisnih informacija kako bi se prevazilaženjem organizacione kontrole mogli identifikovati merodavni uticaji za potencijalno poboljšanje šta-ako pitanja.
- 7) Rezultati sprovedene analize se koriste u odlučivanju kako bi se na bazi njih mogle izvesti preporuke za implementaciju, doprinoseći većim benefitima u životnom ciklusu aktivnosti ili sistema.

5.3.3. BEZBEDNOSNA REVIZIJA

Bezbednosnu reviziju čine procedure pomoću kojih se realizuju inspeksijski poslovi vezani za operativnu bezbednost instalacija, procesa i postrojenja. Postupkom bezbednosti revizije se identifikuju uslovi opreme i operacionih procedura (procesu) koji bi bili uzročnik potencijalnog incidenta ili akcidenta [182]. Revizorski tim pregleda vitalne celine opreme i kritične tehnološke funkcije postrojenja, uslove rada, organizacione procedure, mere bezbednosti i zaštite na radu, razvijene programe za upravljanje rizikom i postupanje u slučaju pojave akcidenta. Rezultat revizije je izveštaj koji obezbeđuje korporativno upravljanje kompanije u čijoj je nadležnosti hemijski kompleks, sa osvrtom na nivo performansi za različite sigurnosne aspekte poslovanja. Izveštaj o rezultatima revizije treba da sadrži razumne preporuke i sugestije u vezi poboljšanja sigurnosnih postupaka i podizanja bezbednosne svesti radnog personala [178].

5.3.4. ANALIZA ZADATKA

Ovaj postupak analizira način na koji ljudski faktor obavlja poslove u svom radnom okruženju i čiji su zadaci prerađeni u podzadatke sa detaljnim opisom interakcije između personala i tehničkih sistema. Ova kvalitativna tehnika se koristi za kreiranje detaljne slike o ljudskom učešću uzimajući u obzir sve neophodne informacije za analizu stanja prema adekvatnom stepenu detaljnosti [187-188].

Analiza zadataka obuhvata istraživanje aktivnosti i komunikacija preduzetih od strane rukovodilaca i njihovih timova u cilju ostvarenja sistemskog cilja. Rezultat analize zadataka se naziva modelom zadatka. Proces analize zadataka obično obuhvata tri zadatka: a) informacije vezane za intervencije ljudskog faktora i zahteve sistema, b) predstavljanje tih podataka u razumljivom obliku i c) poređenje tih podataka između sistemskih zahteva i mogućnosti (kapaciteta) rukovodilaca.

Primarni cilj analize zadataka je obezbeđivanje kompatibilnosti između sistemskih zahteva i mogućnosti rukovodilaca i ako je potrebno da koriguju ove zahteve kako bi bili prilagođeni svakom članu tima. U širokoj upotrebi je i oblik analize zadataka koji je poznat pod nazivom hijerarhijska analiza zadataka (HTA). Kroz hijerarhijski pristup se obezbeđuje dobro strukturiran pregled procesa rada, čak i kada imamo vrlo kompleksne situacije. HTA je jednostavan metod za prikupljanje i organizovanje informacija o ljudskim aktivnostima, interakciji između ljudi i omogućava analitičaru pronalaženje bezbednosno kritičnih zadataka. Ovo je jedan dugotrajan proces i u slučaju kompleksnih zadataka zahteva saradnju stručnjaka iz aplikativnog domena, upoznatih sa zadacima operativnih uslova rada. Ostali značajniji postupci analize iz grupe ove tehnike obuhvataju: analizu tabelarnog zadatka, hronološku analizu, stabla događaja delovanja operatera, GOMS metodu (ciljevi, operateri, metode i pravila izbora), kritično delovanje i tehniku evaluacionog odlučivanja [189-190].

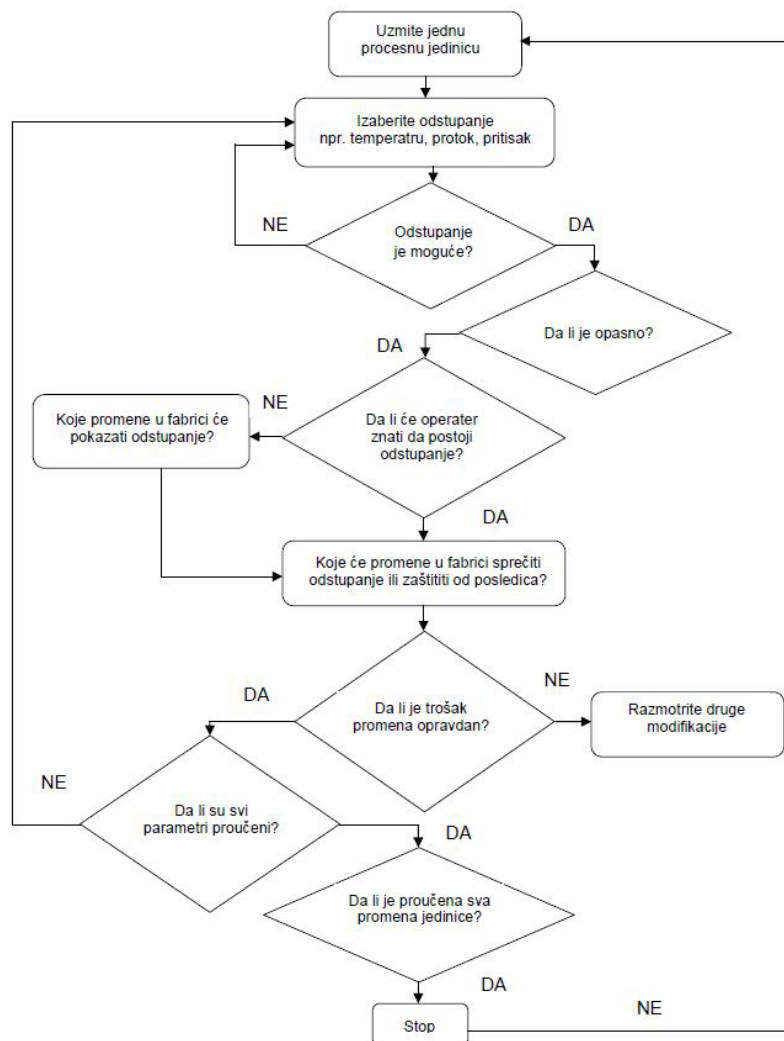
5.3.5. STEP TEHNIKA

Tehnika STEP predstavlja skraćenicu od punog naziva koji glasi *Planiranje sekvencijalnih vremenskih događaja* (eng. *Sequentially Timed Event Plotting*). Ova tehnika daje dragoceni pregled vremena i sekvenci događaja odnosno radnji koje doprinose pojavi akcidenta. To znači da STEP tehnika vrši rekonstrukciju oštećenja grafičkim predstavljanjem niza događaja koji su prethodili nastanku akcidenta. Osnovni koncept STEP tehnike podrazumeva inicijalizaciju *blokova događaja* akcidenta kroz promene koje narušavaju normalno odvijanje tehnološkog procesa i aktivnosti operatera u cilju upravljanja i kontrole nad tehničkim sistemima. Tehnika STEP se sprovodi konstrukcijom radnog lista kod kojeg se dijagrami evolucija događaja i sistemskih intervencija prikazuju na horizontalnoj osi, dok se na vertikalnoj osi registruju izvršioци ovih postupaka. Nakon toga se identifikuju glavni događaji odnosno postupci koji doprinose akcidentu koji su sadržani u formi *blokova događaja* i daju odgovore na sledeća pitanja: a) vreme u kojem je događaj počeo, b) trajanje događaja, c) izvršilac koji je izazvao neželjeni događaj, d) opis događaja i e) naziv izvora koji je učinio ove informacije dostupnim. Međusobna zavisnost događaja se predstavlja strelicama i svaki događaj mora imati dolazne i odlazne strelice. Dolazne strelice reprezentuju da posmatranom događaju prethodi neka druga aktivnost, dok odlazne strelice pokazuju da tom istom događaju tek slede određene aktivnosti [185].

5.3.6. HAZOP TEHNIKA

Kvalitativna metoda HAZOP je naziv dobila po skraćenicu *Hazard i studija operabilnosti* (eng. *Hazard and operabilitz study*) i predstavlja formalizovanu metodologiju za identifikaciju i dokumentovanje opasnosti kroz proces imaginarnog mišljenja. Ova tehnika se sprovodi kroz sistematski pregled projektne dokumentacije postrojenja i instalacija koji su predmet istraživanja. Studiju sprovodi multidisciplinarni tim koji postupkom analitičkog istraživanja ima za svrhu da ustanovi odstupanja u radu tehnološkog procesa. Analiza HAZOP tehnikom zahteva realizaciju sistematski kreiranog postupka kroz sledeće dve aktivnosti: 1) Identifikaciju eventualnih odstupanja pojedinih parametara od normalnih vrednosti pri odvijanju tehnoloških procesa i 2) Obezbeđivanje odgovarajućih mera zaštite kako bi se sprečili akcidenti. Osnovni princip HAZOP studije je zasnovan na stavu da hazardi u industrijskom postrojenju nastaju zbog odstupanja od uobičajenih normi ponašanja. Značajnu ulogu u pravcu identifikacije hazarda kod HAZOP studije imaju PID dijagrami koji zapravo analiziraju stanje bezbednosti kod instalacija i na merno-kontrolnim sistemima postrojenja.

Cilj je da se u okviru svake celine postrojenja od strane specijalizovanih timova izvrši analiza eventualnih abnormalnih stanja čiji bi uzroci mogli dovesti do negativnih posledica i odstupanja parametara tehnološkog procesa postrojenja od uobičajenih operativnih vrednosti. Na taj način se realizuje detektovanje potencijalnih problema u procesima postrojenja. Ključnu ulogu u sprovođenju ove kvalitativne tehnike imaju odgovarajući multidisciplinarni timovi eksperata koji u HAZOP studiju ugrađuju svoje znanje i iskustvo o radu postrojenja. Ekspertski tim za izradu HAZOP studije najčešće se sastoji od šest članova među kojima se nalaze inženjeri različite specijalnosti: tehnologije, procesne opreme, bezbednosti i zaštite na radu, sistema kontrole kvalitetom, održavanja i menadžmenta (rukovodilac tima). Uloga članova tima je da kreiraju scenarije prema kojima se potencijalni hazardi i operativni problemi mogu javiti u toku odvijanja tehnološkog procesa postrojenja. Radi pokrivanja svih mogućih manjkavosti u radu postrojenja, članovi tima za izradu HAZOP studije koriste skup *vodič reči* koje su neophodne za generisanje eventualnih odstupanja parametara u tehnološkom procesu. Najčešće korišćeni skupovi ovih reči obuhvataju sledeće lingvističke varijable: nijedan, više od, manje od, deo od, obrnuto i osim. Kada *vodič reči* implementiramo na procesne parametre postrojenja, dobijamo odgovarajuća procesna odstupanja uključena u analizu HAZOP studije. U tom pogledu *vodič reči* i procesne varijable treba kombinovati na takav celishodan način da reprezentuju odstupanja varijabli. Stoga se sve ove reči ne mogu primeniti za sve varijable procesa (npr. ako kao procesnu promenljivu razmatramo temperaturu, tada su svrsishodne samo dve *vodič reči* i to: više od ili manje od). Sekvenca tipične HAZOP studije je prikazana na slici 5.5. Krucijalni faktori za bolju efikasnost i veću pouzdanost rezultata se odnose na pravilno planiranje i upravljanje HAZOP postupka, što je moguće kada je poznato trajanje svake od aktivnosti, kao i kompletne studije [182] i [186].



Slika 5.5. Procedura HAZOP metode [187]

Glavne karakteristike HAZOP tehnike pokazuju da je:

- Sistematski i visko strukturiran postupak procene rizika baziran na HAZOP vodič rečima čija je uloga generisanja sveobuhvatnog pregleda u cilju osiguranja odgovarajućih mera zaštite od eventualnog nastanka akcidenta,
- Rezultati procene isključivo zavise od stručnosti multidisciplinarnog ekspertskeg tima koji sprovodi izradu HAZOP studije,
- Univerzalno primenjiv postupak na širi spektar različitih problema,
- Najveću primenu ima kao metoda za procenu rizika na nivou sistema i
- Svrstava u grupu kvalitativnih tehnika procene rizika.

5.3.7. PRAT TEHNIKA

PRAT je zapravo skraćenica od punog naziva *Proporcionalna tehnika procene rizika* i ova tehnika koristi proporcionalnu formulu za kvantitativno izračunavanje rizika usled hazarda [182] i [188]. Prema ovoj metodi, kalkulacija rizika R se sprovodi na bazi poznavanja tri faktora: verovatnoće (učestalosti) pojave nekog štetnog događaja P , faktora ekspozicije (izloženosti) štetnom uticaju F i mogućih posledica nastanka takvog događaja (ozbiljnost oštećenja) S . Na bazi ovih faktora, rizik se može kvantitativno izraziti preko sledeće proporcionalne relacije [188]:

$$R = P \times F \times S \quad (5.7)$$

Gore navedena formula rizika pokazuje proporcijalnu zavisnost od tri nezavisna faktora (P , F i S) po čemu je ova tehnika dobila naziv. PRAT tehnika polazi od logičkog koncepta da svaki od faktora rizika podjednako doprinosi nastanku akcidentne situacije i da se za adekvatno upravljanje bezbednošću u okruženju hazarda moraju odrediti njihovi prioriteta delovanja. Valjanost odluka u vezi izbora pravih prioriteta je funkcija verodostojnih procena za faktore rizika (P , F i S). Vrednosti faktora rizika se dobijaju na bazi statističke obrade informacija iz prethodnog perioda za okruženje u kome se nalaze hazardi. Međutim, u slučajevima kada se iz bilo kog razloga ne raspolaže kompletnim statističkim podacima, oni se mogu u izvesnoj meri nadomestiti primenom nekih od kvalitativnih tehnika (npr. ček listom). Takve situacije podrazumevaju sprovođenje ankete među operaterima u onim pogonima postrojenja kod kojih se faktori rizika ne mogu kvantifikovati na osnovu frekventnosti akcidenta u prethodnom periodu [178]. Kombinacija kvalitativnih tehnika sa ovom ili nekom drugom kvantitativnom tehnikom je vrlo uobičajena praksa sa tendencijom dobijanja verodostojnije procene rizika, naročito kada treba utvrditi pojedine faktore rizika, kao što je u ovom slučaju izloženost štetnim uticajima odnosno hazardima. Stoga je participacija kvalitativnih metoda značajna, jer od neposrednih izvršilaca prikuplja informacije o karakteristikama i ponašanju procesa u postrojenju. Na bazi statističke obrade podataka i kvalitativne analize neposredno prikupljenih informacija od operatera, svaki od faktora rizika se procenjuje u rasponu od 1-10 i time se rizik kvantifikuje u opsegu od 1-1000. Gradacija vrednosti rizika sa urgentnošću zahtevanih mera se sprovodi u skladu sa tabelom 5.16.

Tabela 5.16. Gradacija vrednosti rizika sa urgentnošću zahtevanih mera [188]

| Rizik Vrednost/Rezultat (R) | Nivo hitnosti bitnih aktivosti |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 700 – 1000 | Hitna akcija |
| 500 – 700 | Obavezna akcija ranije od jednog dana |
| 300 – 500 | Obavezna akcija ranije od jednog meseca |
| 200 – 300 | Obavezna akcija ranije od jedne godine |
| < 200 | Hitna akcija nije potrebna, ali je potrebno praćenje događaja |
| 100 – 200 | Dugoročno delovanje |
| < 100 | Hitna akcija nije potrebna, ali je potrebno praćenje događaja |

5.3.8. DMRA TEHNIKA

DMRA tehnika označava skraćenicu od punog naziva *Tehnika procene rizika matricom odlučivanja* i predstavlja sistematski pristup za procenu rizika koja obuhvata njegovu kvantifikaciju i kategorizaciju na osnovu informacija o relativnom značaju verovatnoće pojave nekog nepoželjnog događaja i njegovih posledica [195-196]. Linearna kombinacija više međusobno različitih uticaja posledica (ozbiljnosti) akcidenta C sa faktorom verovatnoće njegovog nastanka P kvantitativno definiše procenu rizika i karakteriše se kao rang rizika. Konkretno, proizvod verovatnoće nastanka akcidenta P i njegove ozbiljnosti odnosno posledica C daje meru rizika R koja se izražava sa:

$$R = P \times C \quad (5.8)$$

DMRA tehnika ima dve ključne prednosti [181]:

- Omogućava diferenciranje relativnog rizika kako bi se olakšalo donošenje odluka i
- Poboljšava konzistentnost i bazu za odlučivanje.

Ova tehnika spada u grupu kvantitativnih metoda, pošto obezbeđuje vrednosnu interpretaciju rizika koja se može grafički ilustrovati u zavisnosti od faktora P i C . Uloga grafičke ilustracije je stvaranje odgovornosti prema pitanju procene rizika, omogućavajući menadžerima da odrede prioritete i adekvatne modele upravljanja [188].

Tabela 5.17. Matrica rizika prema DMRA tehnici

| Ocenjivanje ozbiljnosti posledice C | Verovatnoća nastanka akcidenta P | | | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|----|----|----|----|---|
| | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 6 | 36 | 30 | 24 | 18 | 12 | 6 |
| 5 | 30 | 25 | 20 | 15 | 10 | 5 |
| 4 | 24 | 20 | 16 | 12 | 8 | 4 |
| 3 | 18 | 15 | 12 | 9 | 6 | 3 |
| 2 | 12 | 10 | 8 | 6 | 4 | 2 |
| 1 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |

| | | |
|--|-------------------------------|-------|
| | Neprihvatljiv rizik | 18-36 |
| | Nepoželjan rizik | 10-16 |
| | Prihvatljiv rizik uz kontrolu | 5-9 |
| | Prihvatljiv rizik | 1-4 |

5.3.9. KVANTIFIKACIJA DRUŠTVENOG RIZIKA

Društveni rizik se definiše kao neizvesnost koja proističe iz verovatnoće nastanka akcidenta koji bi direktno i indirektno mogao ugroziti veliki broj ljudi (npr. eksplozije rafinerija nafte, skladišta opasnih materija, nuklearnih objekata i dr.). Društveni rizik je povezan sa radom nekog kompleksnog tehničko-tehnološkog sistema kod koga se rizik od nastanka akcidentne situacije procenjuje na bazi uređene trojke [190]:

$$R = \{S_k, F_k, N_k\} \quad (5.9)$$

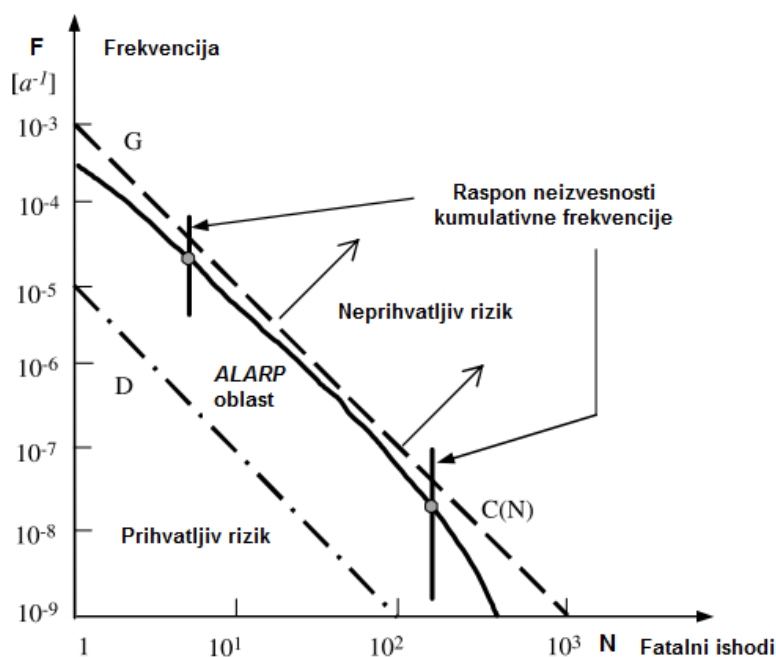
Gde je:

S_k – akcidentni scenario k -te kategorije definisan u determinističkom procesu modeliranja,

F_k – predstavlja frekvenciju k -tog akcidentnog scenarija i

N_k – označava posledice k -tog akcidentnog scenarija (ljudski i materijalni gubici).

Svakom akcidentnom scenariju S_k shodno relaciji (5.9) odgovara određena F - N zavisnost i koja se naziva komplanarnom kumulativnom funkcijom raspodele. Sasvim je jasno šta predstavlja kumulativna funkcija raspodele, ali izvesne nedoumice oko naziva ove raspodele može stvoriti termin komplanarnost. Da bi smo ovo objasnili posmatraćemo npr. dva scenarija (S_1 i S_2). Ako razmatramo scenario S_1 tada automatski otpada S_2 , jer su ova dva scenarija komplementarni događaji (S_1 isključuje S_2), pa otuda naziv komplementarna raspodela. Uobičajeno je da se F - N krive predstavljaju u logaritamskom koordinatnom sistemu, zbog vrlo širokih domena koji obuhvataju parametre F i N . Primer ilustracije F - N krive sa prihvatljivom i neprihvatljivom zonom je data na slici 5.6. Društveni rizik za određeno odnosno hemijsko postrojenje je prihvatljivo kada je F - N kriva za taj tehnički sistem ispod linije zanemarljivog rizika. Tada je definisana F - N funkcija u skladu za društvenim prioritetima i nalazi se u oblasti prihvatljivog rizika. Ako se za svaku vrednost parametra N kriva F - N nalazi iznad linije dopuštenog rizika odnosno u oblasti društveno prihvatljivog rizika, tada postrojenje mora biti predmet strukturne i funkcionalne modifikacije u pogledu redizajniranja njegovih organizacionih i tehničko-tehnoloških performansi. Praktične situacije najčešće odlikuju F - N krive koje se nalaze u ALARA oblasti i karakteriše ih prelaz između ova dva ekstremna slučaja. ALARA ili ALARP je termin koji se često koristi u ambijentu bezbednosno-kritičnih tehničkih sistema.



Slika 5.6. Primer F - N krive i kriterijumske funkcije za društveni rizik

ALARP princip je zasnovan na stavu da rezidualni rizik treba biti što je moguće niži u granicama opravdane izvodljivosti. Ovaj princip ima posebne konotacije ugrađene kroz propise i procedure za sprečavanja akcidenata i povreda na radnom mestu kao što je SFARIP u Velikoj Britaniji, koji govori o tome da smanjenje rizika treba biti onoliko koliko je to razumno ostvarljivo. Prema ovoj metodi, kao mera društvenog rizika se uzima prosečna stopa smrtnosti koja se procenjuje prema formuli:

$$R = \sum_{i=1}^k F_i \cdot N_k \quad (5.10)$$

Gde je:

F_k – frekvencija k -tog akcidentnog scenarija
 N_k – broj fatalnih ishoda usled k -tog scenarija

5.3.10. QRA TEHNIKA

QRA tehnika predstavlja skraćenicu od naziva *Kvantitativna procena rizika* i razvijena je za eksternu bezbednost industrijskih postrojenja usled opasnosti od eksplozije prašine. Ova metoda pruža konzistentnu osnovu za adekvatnu analizu individualnog i društvenog rizika koncipiranih od submodela. Individualni rizik je definisan kao verovatnoća (frekvencija) smrtnosti za nezaštićene osobe u blizini izvora opasnosti. Društveni rizik u obzir uzima i stvarne uslove životne sredine (npr. industrijski pogon je podeljen u dve grupe modula definisanih po veličini, obliku i konstrukcionim svojstvima). U skladu sa ovom klasifikacijom se određuju relevantni scenariji eksplozije, dok je određivanje njihove učestalosti pojave delimično bazirana na kazuistici. Svaki od scenarija uključuje varijante kod kojih u akcidentu učestvuje samo po jedan modul postrojenja, kao i situacije sa domino efektom. QRA tehnika omogućava definisanje četiri tipa objekta: nezaštićeni ljudi, automobili, stambene i poslovne zgrade. Svaki od ovih tipova objekata ima svoje nivoe zaštite od različitih eksplozivnih efekata. U svakom od scenarija je predviđen razvoj događaja usled eksplozije prašine kao i sistemi ventilacije za pojedine module postrojenja. Kao rezultat ovoga, individualni rizik je nezavistan od uticaja loma stakala na prozorima usled udarnog talasa eksplozije. Delovanje mlaza plamena je relevantno samo ukoliko je izvor njegovog nastanka manji od 5 m iznad nezaštićene osobe. Hazardi merodavni za analizu individualnog rizika obuhvataju fragmentalno delovanje usled eksplozije i volumensko izlivanje opasnih materija. Procenjujući frekvenciju pojave određenog scenarija i njegovih posledica dobija se kvantifikovana forma individualnog i/ili društvenog rizika koji se može porediti sa odgovarajućim relevantnim regulativama [191].

5.3.11. QADS TEHNIKA

QADS tehnika predstavlja skraćenicu od engleskog naziva *Quantitative Assessment of Domino Scenarios* što u prevodu znači *Kvantitativna procena domino scenarija*. Ova tehnika težište svojih razmatranja stavlja na kvantitativnu procenu rizika usled akcidenata sa domino efektom. Akcident praćen domino efektom podrazumeva eskalaciju primarno izazvanog događaja na susednu opremu postrojenja izazivajući jedan ili više sekundarnih događaja sa znatno težim posledicama u odnosu na one koje bi bile inicirane samo usled primarnog događaja. Znači, da bi se neki akcident mogao okarakterisati kao domino efekat, potreban i dovoljan uslov je da dođe do eskalacije primarnog događaja i da njegove posledice budu manje ili najviše uporedljive sa posledicama izazvanim usled domino scenarija. Značajno mesto u akcidentnom domino scenariju zauzima proces eskalacije (propagacije), kada oštećenje izazvano na najmanje jednom sklopu opreme usled fizičkog efekta primarnog događaja može uticati na otkaz rada celog ili dela postrojenja koji se najčešće manifestuje preko sekvencijalnog niza sekundarnih događaja. Domino efekat karakterišu četiri osnovna elementa:

- Primarni akcidentni scenario koji izaziva domino efekat,
- Efekat propagacije primarnog događaja praćen pojavom sekundarnih scenarija,

- Jedan ili više akcidentnih scenarija koji se mogu javiti na istim ili različitim jedinicama postrojenja mogu biti uzrok eskalacije jednog istog primarnog događaja i
- Eskalacija posledica primarnog događaja usled efekta sekundarnih scenarija.

Kvantitativna procena domino akcidenata zahteva identifikaciju faktora rizika što podrazumeva procenu frekvence pojave akcidentnog scenarija i njegovih posledica za sve kredibilne domino scenarije uzimajući u obzir sve moguće kombinacije sekundarnih događaja koji mogu biti prouzrokovani primarnim događajem. Identifikacija verodostojnih domino scenarija treba da se zasniva na kriterijumima eskalacije koji se odnose na potencijalna oštećenja opreme usled fizičkog delovanja generisanih u fazi nastanka primarnog scenarija. Ovaj pristup procene frekvencije domino scenarija podrazumeva da se verovatnoća oštećenja pojedinih jedinica postrojenja može nezavisno razmatrati od potencijalnih kontemporalnih oštećenja drugih jedinica razmatranog postrojenja.

Ako sa n predstavimo potencijalno ugrožene jedinice postrojenja, tada jedan primarni događaj može uzrokovati maksimalno n različitih sekundarnih događaja od kojih svaki ima verovatnoću realizacije P_i ($i = 1 \dots n$). Međutim, svaki od sekundarnih događaja se može kontemporalno realizovati sa drugim sekundarnim događajima. Jedan domino scenario može biti tako definisan kao događaj koji uključuje kontemporalna oštećenja k jedinica postrojenja proisteklih iz k sekundarnih događaja, gde je $k = 1 \dots n$ ($k \leq n$). Ako svaku jedinicu postrojenja od ukupnog broja n označimo numeričkim indikatorom k koji obuhvata vrednosti između 1 i n , tada se domino scenario DS može predstaviti matricom $\{DS\}_m = \{a_1 a_2 \dots a_k\}^T$, čiji elementi a_1, a_2, \dots, a_k obuhvataju sekundarne događaje uključene u akcidentni događaj. Indeks m u matrici $\{DS\}$ označava da je jedan domino scenario m -ta kombinacija od k sekundarnih događaja. U opštem slučaju, za k poznatih sekundarnih događaja postoji više od jedan akcidentni scenarijo čiji se broj može odrediti preko izraza za broj kombinacija bez ponavljanja k te klase od ukupno n elemenata:

$$K(n, k) = \binom{n}{k} = \frac{n!}{(n-k)!k!} \quad (5.11)$$

Ukupan broj različitih domino scenarija koji su generisani od strane primarnog događaja, predstavlja broj varijacija sa ponavljanjem r -te klase od ukupno n elemenata koji je umanjen za primarni događaj i izražavase se izrazom:

$$(DS)_{tot} = (r^n - 1)_{r=2} = 2^n - 1 \quad (5.12)$$

Gde r predstavlja broj različitih stanja koje mogu uzimati sekundarni događaji akcidentnog scenarija (stanje 0 – nema akcidenta i stanje 1 – došlo je do akcidenta), pa je zato $r = 2$.

Verovatnoća jednog domino scenarija obuhvaćenog kontemporalnim oštećenjem k industrijskih celina preko istog broja sekundarnih događaja identifikovanih sa matricom $\{DS\}$ se procenjuje preko sledećeg uslova:

$$P_{DS} = \prod_{i=1}^n \begin{cases} P_i, & i \in m \\ 1 - P_i, & i \notin m \end{cases} \quad (5.13)$$

Uslov (2) izražava verovatnoću domino scenarija pod pretpostavkom nezavisnosti sekundarnih događaja koristeći verovatnoće nastanka akcidenata na k -tim jedinicama postrojenja, proisteklih iz m kombinacija akcidentnih scenarija. Učestalost pojave m -tog domino scenarija koji je obuhvaćen od strane k kontemporalnih događaja se formuliše kao:

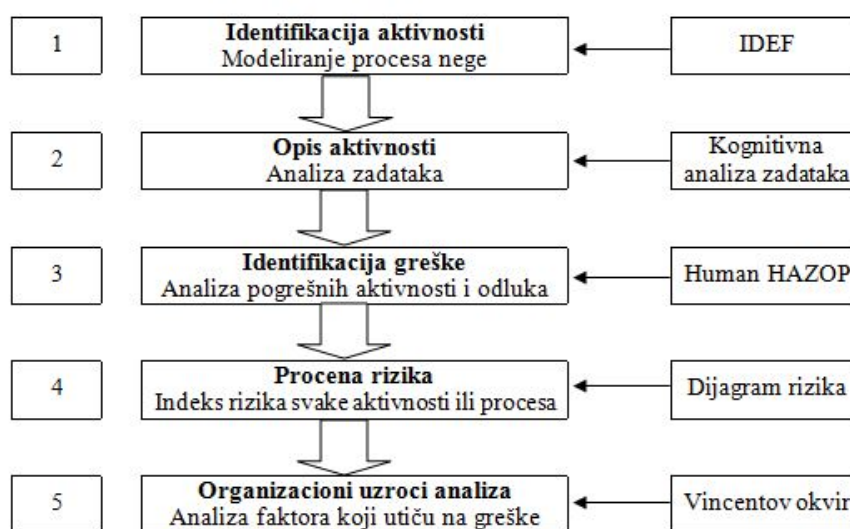
$$f_{DS}(k, m) = f_{PD} \cdot P_{DS} \quad (5.14)$$

Gde je f_{DS} procenjena učestalost primarnog događaja koji je izazivač eskalacionog procesa [192].

5.3.12. CREA TEHNIKA

CREA je metodološki pristup za kvantitativnu analizu rizika čija se aplikativnost ogleda u primeni pet faza, shodno preporuci koju su izložili [193]. CREA je skraćenica od engleske reči Clinical Risk and Error Analysis, što u prevodu znači *Klinički rizik i analiza greške*. Ova tehnika procene rizika je prvobitno namenjena za primenu u industrijskim procesima i zato je danas njena aplikacija dobro utemeljena u ovoj oblasti, ali je vremenom adaptirana i danas značajnu primenu ima za medicinske svrhe. CREA omogućava analitičarima pridruživanje podataka koje su prikupili direktnim posmatranjem procesa, sprovođenjem anketa i objavljenih statističkih podataka. Procena rizika po metodi CREA se odvija po šemi (pet faza) sa slike 5.7 i podrazumeva da se za svaku k -tu aktivnost, verovatnoća pojave i -tog moda greške (MG) i težinskog indeksa oštećenja (TIO) proračunava na osnovu raspoloživih podataka i ekspertskih procena kao njihov proizvod, dobijajući pritom indeks rizika $R(MG_{ki})$ za svaki modalitet greške MG u skladu sa sledećom formulacijom:

$$R(MG_{ki}) = P(MG_{ki}) \cdot TIO(MG_{ki}) \quad (5.15)$$



Slika 5.7. Osnovni koraci i alati CREA metode [193]

5.3.13. PEA TEHNIKA

Ova procedura je bazirana na predviđanju, što podrazumeva epistemički pristup za procenu rizika. Ova metoda obezbeđuje formalna sredstva za kombinovanje statističkih podataka i subjektivnih informacija omogućavajući predviđanje abnormalnih odnosno slučajnih aktivnosti (SA) u obliku matematičkih modela koji kvantifikuju epistemičku neizvesnost karakterističnih postupaka. Epistemički modeli omogućavaju približnu i na ekspertskom modelu zasnovanu procenu verovatnoće oštećenja usled nastanka abnormalnih događaja. Ovi modeli se smatraju prvim korakom usmerenim u pravcu sprečavanja (prevencije) nastanka akcidenta koji proističu iz oštećenja procesne opreme kao rezultat abnormalnih tehnoloških postupaka. Uobičajena praksa procene oštećenja kod procesne opreme i pratećih instalacija izazvana abnormalnim (slučajnim) događajima podrazumeva primenu dva koncepta strukturne analize: determinističkog i probabilističkog. Modeliranje abnormalnih (slučajnih) postupaka obuhvata predstavljanje njihovih fiksnih vrednosti koje su najčešće specificirane u okviru propisa iz oblasti projektovanja procesne opreme. U praksi je bilo pokušaja da se izvan regulatornog područja propisa određuju slučajne aktivnosti (SA) u pogledu definisanja raspodele gustine verovatnoća dodeljenih posredstvom klasičnog statističkog pristupa (KSP). Ovaj pristup dominira u strukturnoj analizi pouzdanosti i treba istaći da je KSP koncept zasnovan na fiksnim vrednostima u postupku procene mehaničkog oštećenja opreme podložan ozbiljnim kritikama. Nasuprot ovome, postoji fundamentalno drugačiji pristup za predviđanje slučajnih aktivnosti koji je zasnovan na numeričkoj simulaciji fizičkih fenomena abnormalnih pojava.

Predviđanje abnormalnih aktivnosti u prediktivnom okviru na bazi epistemičkog pristupa se postiže stohastičkom simulacijom udesa koje obuhvataju slučajne aktivnosti. Stohastička simulacija akcidenta SSA se koristi kao sredstvo propagacije epistemičke nesigurnosti. Predviđanje slučajnih aktivnosti treba tretirati kao deo šireg problema kvantitativne analize rizika (QRA) i sprovodi se korišćenjem QRA metoda baziranih na znanju. One omogućavaju korišćenje šireg spektra raznovrsnih saznanja u vezi sa pojavom slučajnih aktivnosti nego što je to u mogućnosti da obezbedi klasična statistička analiza. Suština razmatranja ovog problema svodi se davanje odgovora na sledeće pitanje: Kolika je učestalost prekoračenja date magnitude m abnormalnih aktivnosti? Ova učestalost se najčešće u praksi izražava preko godišnje verovatnoće, verovatnoće po godini rada, itd. Prethodno pitanje se može matematički formulisati preko sledećeg proizvoda:

$$F(SA) \times P(m|SA) \quad (5.16)$$

Gde je:

$F(SA)$ – učestalost pojave slučajnog događaja SA i

$P(m|SA)$ – uslovna verovatnoća prekoračenja parametra m datog slučajnog događaja SA.

Na bazi (5.16) se može zaključiti da odgovor na gore postavljeno pitanje zavisi od uticaja dva parametra: $F(SA)$ i $P(m|SA)$. Definisane ova dva parametra jedino na bazi registrovanih statističkih podataka pojave SA često neće biti moguće realizovati. Podaci o pojavi abnormalnih događaja su najčešće teško dostupni ili irelevantni za određenu dispoziciju izloženosti razmatrane strukture slučajnih aktivnosti, a nisu retki slučajevi kada su u potpunosti nedostupni za određene situacije izlaganja. Ovakvo stanje zahteva kombinovanje krutih podataka sa ekspertskim procena, čime dolazi do ukrštanja relevantnih iskustvenih informacija o nekim prošlim događajima sa subjektivnim ocenama analitičara (inženjera) o nastanku tih istih događaja. Metodološki okvir koji obezbeđuje adekvatnu kombinaciju ovih podataka je zasnovan na prediktivnom konceptu i predstavlja epistemički pristup u kvantitativnoj proceni rizika. Znači, da ovaj pristup koristi probablistički koncept kojim se izražava mera ekspertske (inženjerske) neizvesnosti, a koja je u literaturi poznata pod nazivom stepen uverenja. U pogledu predviđanja slučajnih aktivnosti SA, prediktivno-epistemistički pristup PEA može biti definisan kao način tumačenja i određivanja učestalosti $F(SA)$ i raspodele gustine verovatnoće $P(m|SA)$. U tom smislu PEA je fokusiran na analizu pojave budućih slučajnih događaja koji su po svojoj prirodi opservabilnog karaktera, kao i prekoračenja parametra m s obzirom na pojavu SA. U PEA metodologiji postoji samo jedan vid neodređenosti i ona se odnosi na epistemičku neizvesnost (ekspertski stepen verovanja) u pogođu budućih pojava SA i prekoračenja parametra m [194]. U skladu sa prethodnim izlaganjem prediktivno-epistemičkog pristupa, konačni rezultat predviđanja pojave abnormalnih aktivnosti procesa se mogu izraziti kroz model akcije definisan kao:

$$F(x) = F(SA) \times [1 - F_X(x|\pi_x)] \quad (5.17)$$

Gde je:

x – vektor karakteristika slučajnih aktivnosti,

X – slučajni vektor koji reprezentuje funkciju gustine verovatnoće $F_X(x|\pi_x)$ čiji model odlikuju elementi epistemičke neizvesnosti po x ,

$F(SA)$ – izražava učestalost epistemičke neizvesnosti vezanih za pojavu budućih SA,

$F_X(x|\pi_x)$ – pokazuje epistemičku neizvesnost u slučaju kada je $X \leq x$
(najmanje jedna komponenta mora biti poznata).

Dakle, vrednost $F(x)$ kvantifikuje epistemičku neizvesnost u učestalosti prekoračenja najmanje jedne komponente x i prema njegovoj formi predstavlja generalizaciju krive hazarda. Ako su direktni podaci o komponentama X retki ili nedostupni mogu biti u izvesnom broju slučajeva dodeljeni indirektno od strane statističke simulacije akcidenta. Na taj način se posredstvom SSA generišu uzorci karakteristika slučajnih pojava na bazi kojih se dalje izvode zaključci vezani za procenu $F(x)$. U tom smislu, raspodela gustine verovatnoće $F_X(x|\pi_x)$ je ugrađena u model radi generisanja uzoraka. Indirektan pristup zasnovan na SSA se uspešno može koristiti za propagaciju epistemičke nesigurnosti u karakteristikama slučajnih događaja kod stohastičkih modela fizičkih fenomena koji su prethodili nastanku istih [194].

5.3.14. WRA TEHNIKA

WRA tehnika predstavlja skraćenicu od engleskog naziva Weighted Risk Analysis (WRA) što u prevodu znači *Ponderisana analiza rizika*. Ovaj metodološki pristup se koristi u cilju uravnoteženja mera bezbednosti između različitih segmenta u pogledu delovanja hazarda, kao što su životna sredina, aspekt kvaliteta i ekonomskih pokazatelja. Ponderisana analiza rizika je alat za komparaciju različitih rizika, poput investicionog ulaganja, ekonomskih (materijalnih) i ljudskih gubitaka, koja ima za cilj da iskaže rizik u jednodimenzionalnoj sferi (npr. u novcu) [195]. Analiza rizika nije samo bitna za tehničko-tehnološke procese i prateću opremu, već ima veliki praktični značaj i za prateće sfere u kojima deluju hazardi, a među kojima posebno mesto zauzimaju ekonomski, ekološki, politički, psihološki i društveno prihvatljivi aspekti. U akcidentnim scenarijima sa velikim posledicama, težinski faktori za sve dimenzije rizika se koriste radi njihove međusobne komparacije i vezano sa tim definisanje mera koje se moraju preduzeti za eventualno smanjenje rizika.

Zato je preporučljiva komparativna analiza rizika izvedena za različite sfere delovanja hazarda (ekonomski, ekološki, socijalni, politički, psihološki i dr.) kako bi se izvršila integracija različitih elemenata za donošenje odluka u formi jedno-dimenzionalnog izraza za ponderisani rizik R_w kako sledi [195]:

$$R_w = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \alpha_j \cdot R_{ij} \quad (5.18)$$

Gde su:

R_w – ponderisani rizik (jedinični troškovi po godini),

α_j – monetarna vrednost po razmatranom gubitku odnosno jediničnim troškovima.

Treba napomenuti da se ponderisani rizik R_w može izražavati u jedinstvenim troškovima, kao što je finansijski, ali to nije obavezujuće. Ponderisani rizik R_w se može lakše proširiti na više elemenata odlučivanja u zavisnosti od potreba donosilaca odluka. Prethodne formule mogu biti specificirane preko određenih komponenti rizika:

$$R_w = \alpha_1 \cdot \sum_{a=1}^p R_{ZSR,a} + \alpha_2 \cdot \sum_{b=1}^q R_{EKO,b} + \alpha_3 \cdot \sum_{c=1}^r R_{POL,c} + \alpha_4 \cdot \sum_{d=1}^s R_{SOC,d} + \alpha_5 \cdot \sum_{e=1}^t R_{PSH,e} + \alpha_5 \cdot \sum_{f=1}^u R_{KVL,f} + \dots \quad (5.19)$$

Gde su:

α_1 – monetarna vrednost jediničnog troška za poginule ili povređene,

α_2 – monetarna vrednost jediničnog troška za rizik životne sredine,

α_3 – monetarna vrednost jediničnog troška za ekonomski rizik,

α_4 – monetarna vrednost jediničnog troška za kvalitet rizika.

Korišćenje ponderisane analize rizika omogućava zadovoljenje principa izbalansiranosti radi sprovođenja optimizacije u pogledu donošenja validnih odluka. U tom pravcu WRA tehnika dopušta kvantifikaciju svi uticajnih hazarda, a ne samo onih koji se odnose na bezbednosne aspekte rizika, svodeći ponderisani rizik na jednodimenzionalni i novčano iskazani oblik. Postupak optimizacije vrednosti ponderisanog rizika podrazumeva minimizaciju ukupnih troškova koji su dati izrazom:

$$C_{tot} = C_0(y) + \sum_{j=1}^N \frac{R_{wj}}{(1+r)^j} \quad (5.20)$$

Gde su:

$C_0(y)$ – uložena investiciona sredstva za bezbednosnu opremu

y – parametar odluke

j – broj godina

r – kamatna stopa

Prethodno navedena jednačina obezbeđuje sveobuhvatni prilaz u matematičko-ekonomskoj analizi problema odlučivanja koji se tiče definisanja parametra izbalansiranosti u postupku identifikacije stepena bezbednosnog rizika i to za sve aspekte hazardnog delovanja, izražavajući pozitivno-negativne benefite konkretnog projekta. Komponente ponderisanog rizika se mogu izračunati samo kvantitativno, ako je poznata novčana vrednost za razmatrani rizik α_j . Neke od ovih vrednosti su dostupne u literaturi i treba imati u vidu da su one u funkciji lokalnih okolnosti među kojima dominiraju socijalni, politički, kulturološki i istorijski aspekti ostavljenih u nasleđu jedne oblasti ili regiona.

5.3.15. HEAT (HFEA) TEHNIKA

HEAT odnosno HFEA tehnika predstavljaju skraćenice od engleskih reči Human Error Analysis Techniques (HEAT) i Human Factor Event Analysis (HFEA) koje u prevodu znače *Tehnika analize ljudske greške* i *Analiza događaja ljudskog faktora*. Ova metoda procene rizika u svom nazivu sadrži frazu ljudska greška odnosno ljudski faktor, što jasno ukazuje na činjenicu da je suština ove metode upravo analiza postupaka koje prate greške usled neadekvatnog reagovanja i odlučivanja od strane operatera (ljudskog faktora). Ova metoda je svoje utemeljenje zasnovala na ljudskom faktoru, jer je dosadašnja praksa pokazala da su ljudske greške postale široko rasprostranjeni uzroci izazivanja akcidenata i to u širokom spektru industrijskih procesa. Praksa je pokazala da sistematsko razmatranje ljudskih grešaka na objektivni i sveobuhvatan način u procesu projektovanja, operativnog rada i održavanja veoma složenih tehničko-tehnoloških sistema mogu dovesti do poboljšanja bezbednosti i njihovog efikasnijeg rada [186], [196]. Projektovana dispozicija radnog mesta, bezbednosna svest i kultura uz stepen obučenosti, dostignuti nivo kompetentosti, složenosti zadataka i radne opterećenosti predstavlja osnovnu grupu faktora koji utiču na ponašanje operatera. Ovi parametri su u literaturi poznati pod nazivom faktori oblikovanja performansi – FOP [197] i posredstvom HEAT metode se mogu koristiti za procenu rizika ljudskog faktora, shodno određenim uticajima na kvalitet rada (performanse) operatera. Faktori oblikovanja performansi često nisu direktni uzročnici akcidenata, ali svakako jesu indirektni i mogu biti uzrok mnogih propusta u složenim industrijskim postrojenjima koji prethodne akcidentima. U literaturi je je kao posledica velikog indirektnog uticaja ljudskog faktora na pojavu akcidenata razvijen veliki broj modifikovanih postupaka procene rizika zasnovanih na HEAT tehnici, kao što su [183] i [198]:

- ATHEANA (A Technique for Human Error Analysis – *Tehnika za analizu ljudske greške*),
- CREAM (Cognitive Reliability and Error Analysis Method – *Kognitivna pouzdanost i metod analize greške*),
- HEART (Human Error Analysis and Reduction Technique – *Analiza ljudske greške i tehnika redukcije*),
- HEIST (Human Error Identification in System Tools – *Identifikacija ljudske greške i sistemski alati*) i
- THERP (Technique for Human Error Rate Prediction – *Tehnike za ocenu predviđanja ljudske greške*).

Cilj ove tehnike je da identifikuje razloge za nastanak ljudskih grešaka, faktore koji utiču na učinak radne snage (ljudskih resursa) i procenu verovatnoće potencijalnih grešaka koje su nenamerno izazvane od strane ljudskog faktora. Adekvatna procena rizika često ima potrebe za alatima koji istražuju doprinose ljudskih grešaka u akcidentima, pa u tom smislu značajno mesto zauzima široko rasprostranjena metoda procene pod nazivom HFACS koja kvantitativno definiše ulogu ljudskog faktora.

U tom pogledu, značaj doprinos razvoja matematičkih alata za uključivanje ljudskog faktora u analizu pouzdanosti tehničkih sistema su izloženi u [199]. Zapažene rezultate u analizi ljudskog faktora ima hibridni postupak pod nazivom HFEA koji se oslanja na dva analitička metoda:

- THERP koji obezbeđuje model stabla događaja ljudskog faktora i
- CREAM koji definiše greške ljudskog faktora tokom forenzičkog postupka akcidenta.

Praktičan pristup za kvantifikaciju ljudskih grešaka predložili su *Balkey* i *Phillips*, kojim se izražava verovatnoća nastanka grešaka ljudskog faktora $P(HU)$ u okviru akcidentnog procesa sledećom matematičkom relacijom:

$$P(HU) = \left[\left(1 - \frac{1}{f_{opc}} \right) \cdot f_{ps} \cdot f_{reg} \cdot f_{red} \right] \quad (5.21)$$

Gde su:

f_{opc} – faktor opcija koja pokazuje da povećanjem individualnosti u izboru rastu mogućnosti i verovatnoće nastanka greške,

f_{ps} – faktor povratne sprege reprezentuje vizuelizaciju povratne sprege kroz sposobnost donosioca odluke da u prostornoj i vremenskoj dimenziji sagleda posledice odlučivanja,

f_{reg} – faktor regulisanja podrazumeva eksterno i interno korigovanje (podešavanje) parametara na bazi registrovanih informacija iz povratne spege, a koji se odnose na životnu sredinu, iskustva operatera, uslove radnog okruženja (vazdušni pritisak, temperatura, vlažnost, upotreba zaštitne opreme, psiho-fizičke sposobnosti, uvežbanost i sl.) i

f_{red} – faktor redundantnosti pokazuje stepen suvišnosti ciklusa u realnom vremenu čijim se minimalnim ponavljanjem treba stvoriti validna slika o svim parametrima radnog okruženja.

5.3.16. FTA TEHNIKA

FTA tehnika potiče od engleske reči Fault Tree Analysis (FTA) što u prevodu znači *Analiza stabla grešaka*. FTA je deduktivna tehnika fokusirana na jedan poseban događaj akcidenta i obezbeđuje postupak za utvrđivanje uzročnika tog događaja. FTA je tehnika akcidentne analize koja koristi vizuelizovane modele za prikazivanje logičkih odnosa između oštećenja tehničkih sistema, ljudskih grešaka i eksternih uticaja u pogledu identifikacije njihovog međusobnog uticaja na pojavu specifičnih događaja koji prethode nastanku akcidenta. Stablo grešaka je grafička ilustracija koja se kreira od događaja i kapija (slika 5.8).

Događaji u stablu otkaza se mogu klasifikovati kao primarni i sekundarni. Primarni (osnovni) događaji se koriste za predstavljanje tehničkih propusta koji dovode do akcidenta, dok se sekundarnim događajima predstavljaju greške ljudskog faktora (operatera) kojima se mogu izazvati kvarovi na tehničkim sistemima. Kapije u stablu otkaza (kvarova) se koriste kao prelazi između događaja različitih nivoa, predstavljajući različite kombinacije na koje neki tehnički sistem i/ili ljudski faktor može dovesti do akcidenta tehnološkog procesa. Na primer, ako kapija u kojoj je naznačeno “I” podrazumeva da oba inicijalna događaja se moraju desiti kako bi se realizovao sekundarni događaj. Sa druge strane, kapija u kojoj je naznačeno “ILI” podrazumeva da će do realizacije sekundarnog događaja sigurno doći ukoliko mu prethodi bar jedan od osnovnih događaja [178], [182], [185] i [200]. U nastavku će biti predstavljen pregled grafičkih simbola koji se najčešće koriste prilikom konstruisanja stabla otkaza (grešaka):

- Vršni i posredni događaji: Za predstavljanje događaja ova dva tipa se koriste simboli u obliku pravougaoika. Vršni događaj se odnosi na akcident koji se analizira, dok sekundarni događaji predstavljaju stanja sistema koja su doprinela pojavi akcidenta.
- Osnovni događaj: Njegovo grafičko predstavljanje u stablu otkaza se vrši krugom i kategoriše se u najniži nivo događaja koji se po svojoj prirodi ne može dalje razložiti.

- Nerazvijeni događaji: Ovi događaji se grafički predstavljaju romбом (dijamantom) i koriste se za predstavljanje greške ljudskog faktora u proceni rizika, kada iz različitih razloga nisu razvijeni do nivoa osnovnih događaja (nedostupnost informacija, kompleksnost problema itd.).
- I kapije: Događaj u pravougaoniku (vršni ili posredni događaj) predstavlja izlaz "I" kapije ispod pravougaonika. Izlazni događaj povezan sa ovom kapijom postoji samo ako su svi ulazni događaji egzistiraju istovremeno po principu redne veze.
- ILI kapije: Događaj u pravougaoniku (vršni ili posredni događaj) predstavlja takođe izlaz, ali u ovom slučaju "ILI" kapije koja je locirana ispod pravougaonika. Izlazni događaj koji se odnosi na ovaj tip kapije egzistira samo ako postoji bar jedan od ulaznih događaja, shodno principu paralelne veze.
- Inhibitorne kapije: Događaj u pravougaoniku (vršni ili posredni događaj) reprezentuje izlaz iz inhibitorne kapije koja se nalazi neposredno ispod pravougaonika. Ova kapija predstavlja specijalan slučaj "I" kapije i izlazni događaji koji su povezani sa ovom kapijom egzistiraju samo ako postoji ulazni događaj i ako su zadovoljene uslovne kvalifikacije grafički prikazane preko elipsi (ovalnih oblika).
- Transfer simboli: Ovi grafički simboli se koriste kako bi ukazali da se ostatak stabla otkaza prenosi na drugu stranu u cilju uspostavljanja njegovog kontinuiteta.

Procedura izvođenja analize rizika zasnovane na stablu otkaza obuhvata sledećih 8 koraka:

- 1) Definisanje predmeta istraživanja odnosno interesovanja,
- 2) Identifikacija vršnog događaja za analizu,
- 3) Kreiranje strukture stabla,
- 4) Detaljno istraživanje svake grane strukture kroz sukcesivne nivoe,
- 5) Rešavanje stabla otkaza za različite kombinacije događaja koji doprinose pojavi vršnog događaja odnosno akcidenta,
- 6) Identifikacija značajnih potencijalnih otkaza koji su međusobno nezavisni i odgovarajuće podešavanje modela,
- 7) Izvođenje kvantitativne analize,
- 8) Korišćenje dobijenih rezultata u procesu odlučivanja (donošenja odluka).

U prvom koraku je neophodno konkretno i jasno definisati granične i početne uslove sistema za koje su potrebne informacije o otkazima pojedinih celina sistema.

Drugi korak se odnosi na definisanje problema interesovanja koji će FTA postupkom biti analiziran. U okviru ovoga koraka se navode konkretni slučajevi koji će biti predmet razmatranja, kao što su problemi kvaliteta obavljanja nekih procesa, uključivanja, isključivanja, bezbednosti postrojenja itd.

Treći korak utvrđuje događaje i uslove koji su direktno vezani za posredne događaje, a sa kojima se u najvećem broju slučajeva može uspostaviti direktna povezanost sa vršnim događajem.

U četvrtom koraku se određuju događaji i uslovi koji najviše direktno dovode do svakog posrednog događaja. Ovaj postupak se sukcesivno ponavlja za svaki nivo strukture stabla otkaza sve dok model ne bude u potpunosti kompletiran.

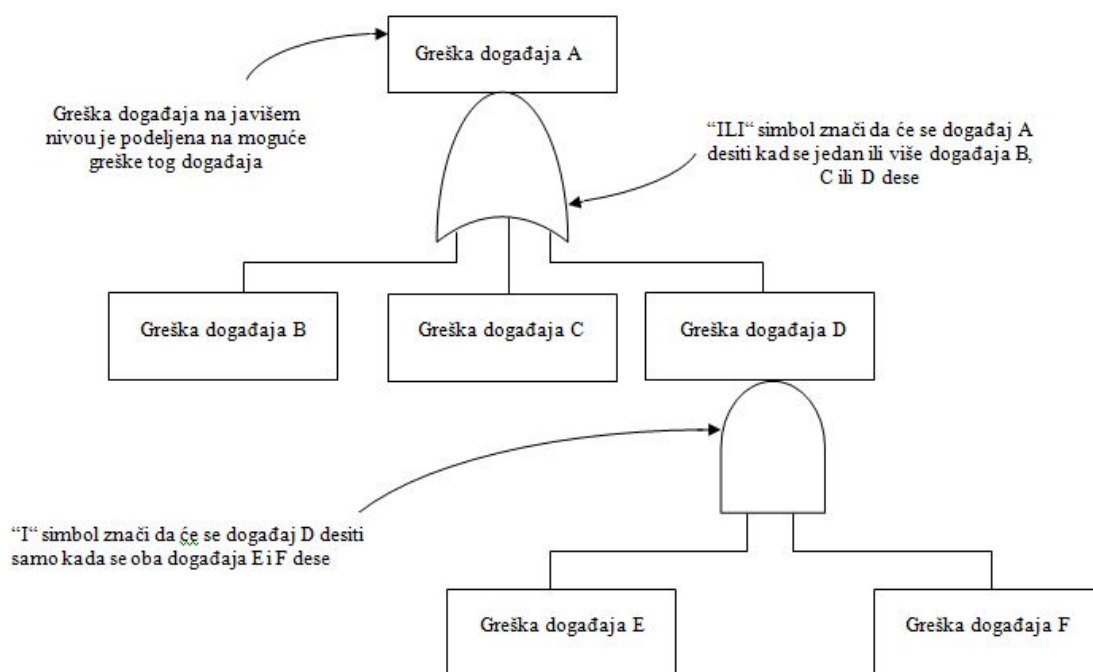
Peti korak podrazumeva ispitivanje modela stabla otkaza u cilju identifikacije svih mogućih kombinacija događaja i uslova koji mogu prouzrokovati vršni događaj od interesa za funkcionisanje tehničkog sistema. Kombinacija događaja i uslova koji su potrebni i dovoljni za izazivanje vršnog događaja se naziva *minimalni presečni skup*. Na primer, minimalni presečni skup za stanje koje odgovara prekoračenju pritiska u rezervoaru obuhvata sledeća dva događaja: neblagovremeno reagovanje operatera i otkaz sigurnosnog ventila. Znači, ako zaostane adekvatno reagovanje operatera usled prekoračenja pritiska dolazi do aktiviranja sigurnosnog ventila kao krajnje sigurnosne mere.

Ukoliko operater blagovremeno reaguje, tada se pritisak u rezervoaru na vreme redukuje, pa tada nema potrebe za aktiviranjem sigurnosnog ventila. Situacija koja dovodi do akcidenta podrazumeva istovremnu pojavu dva nezavisna i redno vezana događaja: izostanak reakcije operatera i pojavu otkaza sigurnosnog ventila.

U šestom koraku se proučava model stabla otkaza zasnovanog na rezultatima analize u prethodnom koraku, kako bi se na bazi minimalnih presečnih skupova identifikovali potencijalno važne zavisnosti između samih događaja. Ove zavisnosti odlikuju pojedinačne pojave koje mogu prouzrokovati istovremeni nastanak više događaja ili uslova koje neposredno prethode akcidentu. Ovaj korak pruža kvalitativnu analizu rizika usled otkaza komponenata sistema.

Sedmi korak obuhvata korišćenje statističkih karakteristika događaja koji se odnose na otkaze komponenata sistema i njihovu reparaciju u pogledu promene stanja događaja i uslova modela zasnovanog na stablu otkaza, kako bi se na osnovu te analize predvidele performanse sistema za neki predstojeći period upotrebe.

U osmom koraku se koriste rezultati analize za identifikaciju najznačajnijih slabosti u sistemu i kreiranje efikasnih preporuka u cilju redukcije rizika koji su povezani sa tim slabostima.



Slika 5.8. Stablo otkaza

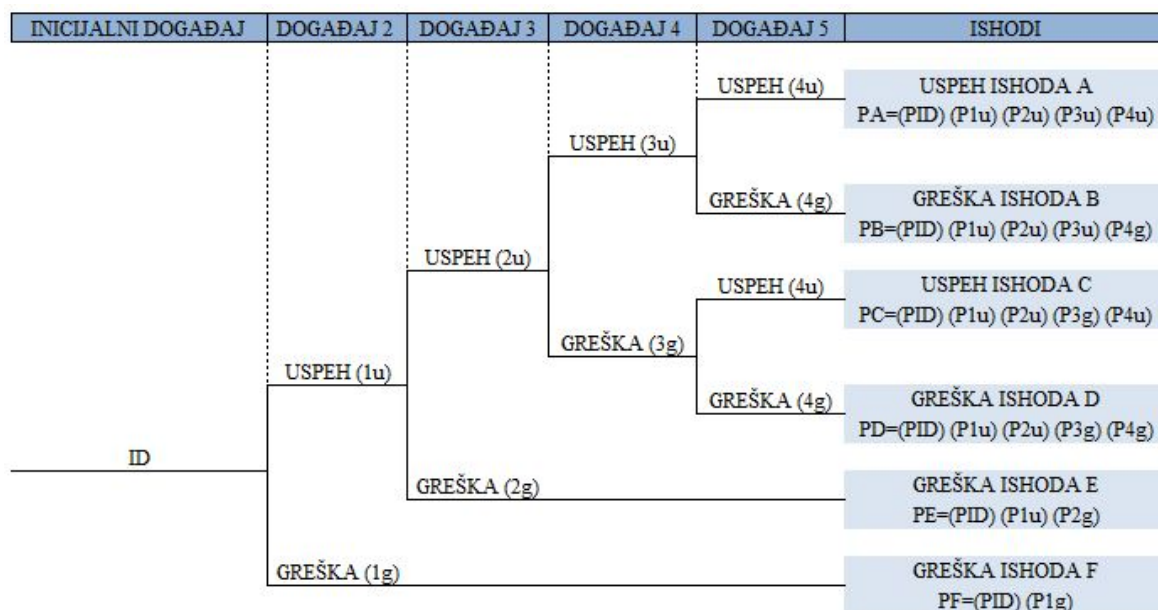
5.3.17. ETA TEHNIKA

ETA tehnika je skraćena od engleske reči Event Tree Analysis koj u prevodu znači *Analiza stabla događaja*. ETA postupak je tehnika koja koristi stabla odlučivanja i logički razvijene modele vizuelizacije mogućih ishoda nekog inicijalnog događaja. Osim toga, tehnika je zasnovana na grafičkom prikazu logičkog modela kojim se identifikuju i kvantifikuju mogući ishodi i sledeći inicijalni događaj (slika 5.9). Pomenuti modeli ETA pristupa istražuju na koji način mere zaštite i eksterni uticaji pod nazivom linije osiguranja odnosno obezbeđenja utiču na akcidenti lanac. U ovom postupku, inicirajući događaji kao što su funkcionalne smetnje (manjkavosti, kvarovi i sl.) tehničkih sistema i tehnoloških procesa se razmatraju kao polazna tačka u postupku definisanja prediktivnih rezultata i njihova sekvencijalna propagacija se predstavlja grafički preko stabla događaja. ETA je sistemski model koji predstavlja bezbednosni sistem zasnovan na zadovoljenju sigurnosti poddogađaja.

Na osnovu ove činjenice je izveden naziv stablo događaja, pošto se grafički prikaz sekvencijalnih događaja razvija kao drvo od stabla ka granama, povećavajući time broj uticajnih događaja. Svako stablo događaja mora imati inicijalni događaj, u većini slučajeva naknadne događaje i konačne rezultate izazvane od strane sekvencijalnih događaja. Verovatni kasniji događaji su nezavisni jedni sa drugima i sa specifičnim konačnim rezultatima zavisi samo od inicijalnog događaja i kasnijih događaja koji slede. Zbog toga, verovatnoća pojave specifičnih grana, može se dobiti množenjem verovatnoća svih kasnijih događaja na toj grani. Svi događaji koji su grafički predstavljeni preko stabla događaja se veoma efikasno mogu opisati sa aspekta njihovog redosleda u odnosu na vreme. Ovo tumačenje opravdava činjenica da se stablo događaja upravo odnosi na redosled događaja. U fazi projektovanja, ETA se koristi za verifikaciju kriterijuma u cilju poboljšanja performansi sistema kako bi se dobile osnovne informacije ispitivane operabilnosti i upravljanja radi identifikacije metoda zaštite sistema od otkaza. ETA procedura je univerzalna alatka procene rizika koja se ne primenjuje samo za projektovanje i operabilnost sistema, već značajnu primenu ima u praćenju operativnosti sistema i analizi uzroka akcidenata.

Glavne karakteristike tehnike se mogu koncipirati na sledeći način:

- 1) Modeli bazirani na ETA pristupu u širokom dijapazonu mogućih akcidenata proističu iz inicijalnog događaja,
- 2) ETA pristup je tehnika procene rizika koja efikasno objašnjava vremensku komponentu i međusobnu zavisnost između različitih aktera akcidenata koji su komplikovani za modeliranje preko FTA tehnika, kao što je fenomen domino efekta,
- 3) Analiza zasnovana na ETA metodologiji omogućava kvalitativni opis potencijalnih problema kao kombinaciju događaja koje proizvode različite vrste problema od strane inicijalnih događaja,
- 4) ETA pristup pruža kvantitativne procene učestalosti događaja odnosno njihovih verovatnoća i relativnog značaja raličitih sekvenci otkaza,
- 5) ETA metodologija daje listu preporuka za redukciju rizika i
- 6) Analiza procene rizika sa ETA metodom pruža kvantitativnu evaluaciju rezultata.



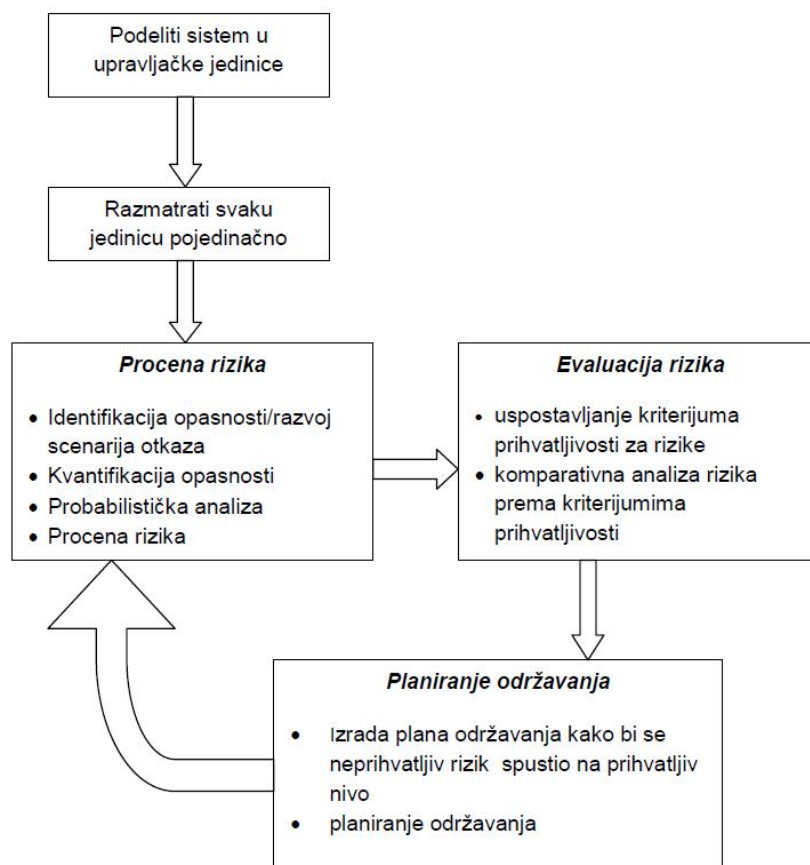
Slika 5.9. Stablo događaja

5.3.18. RBM TEHNIKA

RBM tehnika predstavlja hibridni metod procene rizika koji je naziv dobio po skraćenici od engleske reči Risk-based Maintenance (RBM) i u prevodi znači *Održavanje zasnovano na riziku*. RBM spada u grupu hibridnih metoda procene rizika koja kroz kvalitativno-kvantitativnu analizu može biti primenjiva za široki opseg problema, bez obzira na njihove karakteristike. Kvantitativni opis rizika zavisi od kvaliteta istraživačkog procesa koji se tiče posledica akcidenata i tačnosti probabilističke procene nastanka akcidenta odnosno otkaza vitalnih delova postrojenja. RBM metodologija se realizuje kroz tri segmenta [91]:

- i) Analizu rizika koja obuhvata njegovu identifikaciju i procenu,
- ii) Postupak evaluacije za razmatranje fenomena averzije rizika i uslova njegove prihvatljivosti i
- iii) Planiranje održavanja s obzirom na faktore rizika.

Prethodno navedene tri faze RBM metode (slika 5.10) se postupno sprovode kroz korake, tako da se prva faza realizuje u četiri, a druga i treća posredstvom dva koraka. U nastavku je dat detaljan opis ovih koraka po fazama RBM metode.



Slika 5.10. Arhitektura RBM tehnike [91]

Faza I (procena rizika) se realizuje kroz četiri logički povezana koraka u skladu sa slikom 5.10. Korak 1 se odnosi na razvoj scenarija otkaza (akcidenta) neophodnog za opisivanje niza događaja koji mogu dovesti do otkaza sistema. Akcidentni scenario se može kreirati na bazi sadržaja jednog ili kombinacije više sekvencijalno povezanih događaja. Praktična iskustva su pokazala da je uobičajena situacija pojave otkaza sistema ili akcidenata postrojenja posledica interakcije sekvencijalne dispozicije događaja, što je tipična situacija za manifestovanje domino efekta. Projektovanje nekog akcidentnog scenarija ne znači da će on zaista odigrati u realnim uslovima, već da postoji razumna verovatnoća i izvestan stepen opravdanosti u pogledu njegove realizacije.

Međutim, skup akcidentnih scenarija nam pruža sve potencijalne alternative po kojima se mogu odvijati pojave u realnim uslovima, a samo jedna se može realizovati. To znači da sve druge automatski otpadaju prema zakonitosti komplanarnih događaja. Scenario otkaza ili pojave akcidenta je baza za analizu rizika, a daje pregled o tome šta se sve može desiti i kako (na koji način) koji je neophodan radi preduzimanja mera i sredstava za sprečavanje ili minimiziranje mogućnosti nastanka takvih situacija. Pomenuti scenariji se generišu na osnovu operativnih karakteristika sistema, fizičkih uslova pod kojim se realizuje njegovo funkcionisanje, parametara bezbednosti, vrste tehnoloških procesa, dispozicije pogonskih jedinica postrojenja, organizacije strukture itd.

Korak 2 se tiče procene posledica čiji je cilj određivanje prioriteta značajnosti opreme postrojenja (sistema) i komponenti na bazi njihovog doprinosa u pojavi otkaza sistema ili izazivanje akcidenta. Analiza konsekvenci uključuje procenu mogućih posledica, ako scenariji otkaza sistema ili pojave akcidenta nisu materijalizovani. Početni stadijum ove analize obuhvata kvantifikaciju posledica u pogledu definisanja područja oštećenja sa jasno definisanim opsegom odnosno radijusom u oblasti postrojenja koja bi bila podložna oštećenju usled delovanja određenih hazarda. Step en oštećenja postrojenja u prvom redu zavisi od prirode tehnološkog procesa koji se odvija u postrojenju i vrste opasnih materija koje se u njemu koriste kao radni medijum.

U zavisnosti od ova dva pokazatelja mogu se kreirati globalni akcidentni scenariji koji isključivo pokazuju posledični efekat oštećenja postrojenja (eksplozivno-požarni, toksični, radioaktivni ili kombiovani). Kalkulacija područnog oštećenja postrojenja je neophodna kako bi se ustanovio posledični efekat na gubitke proizvodnih kapaciteta, materijalnih i ljudskih resursa, uticaja na životnu sredinu i stanovništvo u neposrednom okruženju potencijalnog akcidenta. Shodno ovome, totalna procena posledica usled havarije na postrojenju zahteva razmatranje sledeće četiri kategorije gubitaka:

- a) Gubitak funkcionalnosti postrojenja (sistema) se izražava preko faktora A koji uzima u obzir gubitak funkcionalnosti sistema odnosno njegovih performansi usled oštećenja tehničko-tehnoloških jedinica postrojenja. Procena gubitka performansi postrojenja se kvalitativno procenjuje na osnovu ekspertskog mišljenja. Kako bi se poboljšala ova procena, *Khan* i *Haddara* su predložili polu-kvalitativni pristup u određivanju vrednosti parametra A u funkciji performansi sistema, tako da važi relacija: $A = f(\text{performanse sistema})$. Kvantifikacija funkcionalne osetljivosti sistema u zavisnosti od uticaja operabilnosti je data u tabeli 5.18.

Tabela 5.18. Kvantifikacija funkcionalne osetljivosti sistema u zavisnosti od uticaja operabilnosti

| Kategorija | Opis | Funkcija operacija |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| I | Veoma važno za funkcionisanje sistema; Otkaz bi prouzrokovao prestanak funkcionisanja sistema | 8-10 |
| II | Važno za funkcionisanje sistema; Otkaz bi prouzrokovao pogoršanje performansi i štetne posledice | 6-8 |
| II | Potrebno za dobro funkcionisanje; Otkaz može uticati na performanse i može dovesti do naknadnog otkazivanja sistema | 4-6 |
| IV | Opciono za dobre performanse; Otkaz može uticati na performanse odmah, ali dugotrajni neuspeh može izazvati otkaz sistema | 2-4 |
| V | Opciono za operacije ; Otkaz ne može uticati na performanse sistema | 0-2 |

- b) Finansijski gubitak usled otkaza sistema se izražava faktorom B koji predstavljaju materijalnu štetu na objektima i tehničko-tehnološkom opremom postrojenja, a koja se procenjuje za svaki akcidentni scenario koristeći sledeće relacije:

$$B_i = \frac{(AR)_i \cdot (AD)_i}{UFL} \quad (5.22)$$

$$B = \sum_{i=1}^q B_i \quad (5.23)$$

Gde je:

i – broj akcidentnih događaja (požar, eksplozija, toksični oblik, radijacija i dr.),

$(AR)_i$ – površina oblasti zahvaćena oštećenjem za i -ti događaj izražena u m^2 ,

$(AD)_i$ – gustina opreme postrojenja do 500 m od i -tog događaja izraženo u $\$/m^2$ i

UFL – označava nivo neprihvatljivog gubitka koji je subjektivnog karaktera i varira od slučaja do slučaja, imajući u vidu organizacione kriterijume kompanija i vrstu izvođenja tehnoloških procesa u okviru postrojenja kojim ta kompanija upravlja [91].

- c) Gubici ljudskih resursa se procenjuju preko faktora fatalnosti C za svaki akcidentni scenario koristeći sledeće jednačine:

$$(PDI)_i = PDI \cdot PDF \quad (5.24)$$

$$C_i = \frac{(AR)_i \cdot (PDI)_i}{UFR} \quad (5.25)$$

$$C = \sum_{i=1}^q C_i \quad (5.26)$$

Gde je:

UFR – označava neprihvatljivu stopu smrtnosti koja je subjektivnog karaktera i promenljive vrednosti, zavisno od slučaja do slučaja sa najčešćom vrednošću oko 10^{-3} ,

PDF – označava distributivni faktor populacije kojim se izražava heterogenost u raspodeli stanovništva oko postrojenja. Ako stanovništvo uniformno naseljava oblast koju zahvata radijus od približno 500 m u odnosu na postrojenja, tada ovaj faktor uzima vrednost 1. Ako je nastanjenost stanovništva lokalizovana (samo u jednoj zoni oko postrojenja), vrednost PDF uzima manju vrednost od jedinice i opada sa povećanjem radijusa (udaljenosti) od postrojenja. Minimalna vrednost koja može biti dodeljena ovom faktoru iznosi 0,2 i

PDI – definiše gustinu populacije u blizini pojave i -tog događaja, odnosi se na oblast zahvaćenu radijusom do 500 m od postrojenja i izražava se brojem stanovnika/ m^2 .

- d) Ekološki gubici i ugroženost životne sredine se manifestuje posredstvom faktor D reprezentujući time oštećenost ekosistema, a koji se procenjuje preko sledećih izraza:

$$D_i = \frac{(AR)_i \cdot (IM)_i}{UDA} \quad (5.27)$$

$$C = \sum_{i=1}^q C_i \quad (5.28)$$

Gde je:

UDA – ukazuje na nivo ekološke neprihvatljivost ugrožene oblasti koja se nalazi u neposrednoj blizini postrojenja. Ovaj parametar karakteriše izvesna subjektivnost, što znači da je njegova vrednost promenljiva, zavisno od slučaja do slučaja. Tipična vrednost ovog parametra se kreće oko 1000 m^2 ,

$(IM)_i$ – predstavlja faktor značaja koji uzima jediničnu vrednost, ako je radijus oštećenja veći od rastojanja između žarišta akcidenta i posmatrane lokacije ekosistema. Značajne rezultate u pogledu kvantifikacije ovog parametra su dali *Khan i Haddara* [91].

Konačno, da bi smo došli do jedinstvenog faktora posledica FP neophodno je uzeti u obzir sve konsekvantne fakore (A , B , C i D), a čiji se međusoban uticaj manifestuje postupkom kombinovanja njihovih vrednosti sledećom matematičkom relacijom:

$$FP = \frac{1}{2} \sqrt{A^2 + B^2 + C^2 + D^2} \quad (5.29)$$

Korak 3 se odnosi na probabilističku analizu otkaza odnosno akcidenata postrojenja i sprovodi se primenom FTA tehnike procene rizika. Efikasna primena FTA metode zahteva integralni pristup analize rizika, što podrazumeva da se u postupku procene kombinuju statistički podaci o potencijalnim otkazima sa pouzdanim ekspertskim procenama u cilju određivanja učestalosti pojave akcidenta.

Korak 4 podrazumeva procenu rizika koja se sprovodi na osnovu rezultata istraživanja prethodnih koraka. Rezultat konsekvantne analize je faktor posledica *FP*, dok probabilistička analiza oštećenja sagledava verovatnoću pojave oštećenja sa kvalitativnog i kvantitativnog aspekta u okviru FTA metode.

Faza II se odnosi na evaluaciju rizika čiji algoritam obuhvata dva koraka:

Korak 1 podrazumeva uspostavljanje kriterijuma prihvatljivosti za rizike koji su bili predmet prve faze postupka. U literaturi su dostupni različiti kriterijumi prihvatljivosti.

Korak 2 obuhvata komparativnu analizu rizika prema kriterijumima prihvatljivosti. U ovom koraku se primenjuju kriterijumi prihvatanja za procenjeni rizik svake tehnološke jedinice razmatranog postrojenja. Identifikuju se pogoni postrojenja čiji procenjeni rizik prevazilazi okvire definisane kriterijumima prihvatljivosti. Takve tehnološke celine postrojenja moraju biti predmet naknadnih analiza u smislu definisanja efikasnijih preventivnih planova kako bi se stvorili bolji uslovi rada sistema kroz poboljšane mere održavanja.

Faza III je rezervisana za planiranje održavanja postrojenja i predstavlja logički nastavak poslednjeg koraka prethodne faze. U okviru ove faze, posebna pažnja je usmerena na jedinice postrojenja kod kojih je procenjeni rizik izvan granica prihvatljivosti prema unapred definisanim kriterijumima. Zato su one predmet detaljnih studija kako bi se identifikovali svi uticajni faktori relevantni za smanjenje rizika i poboljšanje uslova održavanja. Ova faza se takođe realizuje u dva koraka i to:

Korak A se odnosi na procenu optimalnog trajanja održavanja u okviru koga se proučavaju individualni uzroci oštećenja kao bi se ustanovili negativni uticaji na verovatnoću nastanka oštećenja u postrojenju. U okviru ovoga koraka sprovodi se reverzibilna analiza kojom se utvrđuje zahtevana vrednost verovatnoće otkaza *top* odnosno vršnog događaja. Na bazi reverzibilne analize stabla otkaza i reverzibilno određenih verovatnoća oštećenja, moguće je identifikovati najuticajnije parametre otkaza sistema i time je okončan revidiran plan održavanja.

Korak B je istovremno završni korak faze III i celokupne metodologije, a vezan je za re-estimaciju i re-evaluaciju rizika. Cilj ovog koraka je da verifikuje razvijeni plan održavanja koji generiše prihvatljivi nivo rizika pojedinih celina razmatranog postrojenja (sistema).

6. DOMINO EFEKAT HEMIJSKIH UDESA

Proizvodne, logističke i transportne aktivnosti sa opasnim materijama mogu biti izložene velikom riziku od nastanka akcidentnih situacija imajući u vidu značajan broj uzročnika koji utiče na prirodu opasnosti pri odvijanju ovih procesa. Procena rizika izloženosti određenim opasnostima je analitički proces kojim se identifikuju potencijalne opasnosti i posledice njihovih štetnih efekata, naročito po zdravlje ljudi. Iako su kvalitativne metode u prošlosti imale značajan doprinos u proceni rizika, ne umanjujući njihov značaj treba napomenuti da se u poslednjih nekoliko godina težište procene rizika značajno pomerilo u pravcu kvantitativnih metoda. Ovu činjenicu najbolje ilustruje sve veća primena kvantitativnih metoda u kompanijama proizvodnih i transportno-logističkih delatnosti, jer pružaju numeričke informacije koje su korisne u fazi planiranja, strateškog i operativnog odlučivanja. Glavni izvori informacija za analizu akcidenata čini nekoliko baza podataka:

- Major Hazard Incident Data Service (MHIDAS),
- Major Accidents Reporting System (MARS),
- Failure and Accident Technical Information System (FACTS)
- Analyse, Recherche et Information sur les Accidents database (ARIA)
- Awareness and Preparedness for Emergencies at Local Level database (APELL)
- Control of Major Accident Hazards database (COMAH)
- Chemical Safety Board database (CSB)
- Health and Safety Executive database (HSE)

Kriterijumi za identifikaciju domino akcidenata iz baza podataka obuhvataju sledeće uslove:

- Domino efekat se javlja kada pojava jednog akcidenta izaziva nastanak nekog drugog akcidenta, čije su pozicije definisane određenom prostornom distancom (npr. eksplozija u blizini rezervoara dovodi do ispuštanja njenog sadržaja odnosno opasne supstance i/ili požara). Ovaj fenomen je poznat pod nazivom prostorni domino efekat, imajući u vidu prirodu lančanog procesa koga karakteriše skoro trenutno dejstvo (mali vremenski opseg unutar koga se javljaju oba akcidenta) i određena fizička distanca objekata koji su akteri akcidenata.
- Domino efekat karakteriše situacija kada nastanak jednog akcidenta u određenoj celini prati nastanak nekog drugog akcidenta u istom prostornom okruženju, ali sa postojanjem vremenske distance (zagrevanje rezervoara sa zapaljivim fluidom dovodi do njegove eksplozije). Priroda ovih uslova za nastanak lančanih akcidenata je poznata pod nazivom temporalni (vremenski) domino efekat.

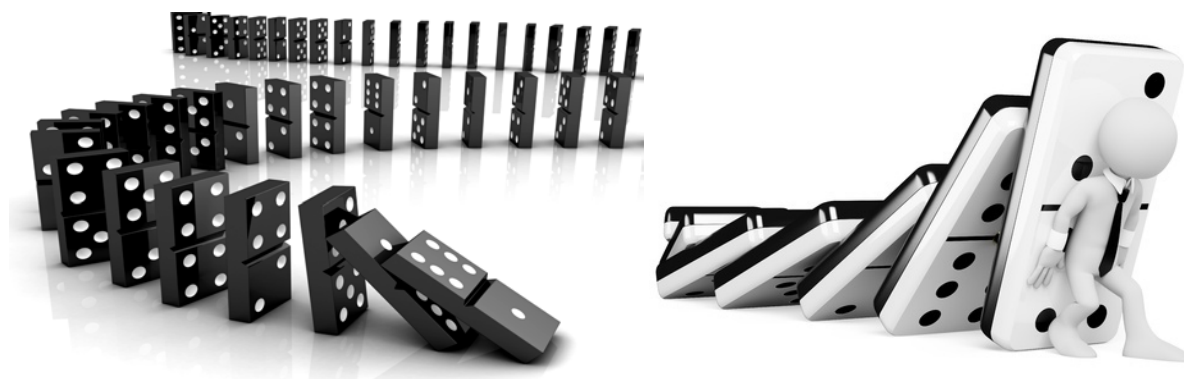
- Simultani nastanak dva akcidenta na istoj lokaciji (objektu) se ne tretira kao domino efekat, već se analizira kao jedinstven akcident. Tipičan primer za ovu vrstu akcidenta se odnosi na eksploziju rezervoara sa plivajućim krovom koju prati neposredni nastanak požara na istom objektu.

Iako je u zadnjih desetak godina objavljen veliki broj radova o ovoj tematici, još uvek ne postoji univerzalno prihvatljiva definicija domino efekta u kontekstu akcidenata koji se javljaju u HPI. Većina istraživača iz vodećih svetskih centara koji se bave ovom problematikom koriste pojam domino efekta da opišu situaciju pri kojoj dolazi do gubitka obuzdavanja (kontrole) nad akcidentom nekog procesa koji postaje inicijator za pojavu jednog ili više akcidenata vezanih za neke druge procese. Prvi od domino događaja se karakteriše kao događaj prvog nivoa ili prvog reda domino efekta, a simbolički predstavlja prvu dominu koja pod uticajem spoljašnjeg faktora pada na sledeću. Drugi domino događaj nastaje kao posledica međusobne interakcije sa prvim, bez direktnog uticaja spoljašnjih faktora i predstavlja događaj drugog nivoa domino efekta. Slično se može izvesti i domino događaj višeg reda (n -tog) koji je takođe posledica neposrednog delovanja prethodnog događaja ($n-1$).

Jedna od prvih definicija domino efekta sa prilično liberalnim tumačenjem po kojoj domino efekat predstavlja faktor koji uzima u obzir opasnosti koje mogu nastati kao posledica curenja (izlivanja) opasne materije, dovodeći do eskalacije incidenta (npr. malo curenje zahvaćeno plamenom ili oštećenje plamenom može uticati na znatna oštećenja procesne instalacije, tj. cevi i rezervoara sa naknadnim izlivanjem veće količine opasne materije). Definiciju koju je predložio *Američki institut hemijskih inženjera – Centar za bezbednost hemijskih procesa* (AIChE – CCPS) je takođe prilično liberalnog karaktera i pod domino efektom podrazumeva incident koji počinje na jednom objektu i može uticati na obližnje predmete (npr. posude i rezervoare sa opasnim materijama) termičkim, eksplozivnim ili fragmentnim delovanjem.

Prema prethodno navedenim definicijama u domino efekat su svrstani i oni akcidenti koji se javljaju u okviru jednog procesa odnosno objekta sa praktično zanemarljivim vremenskim intervalom između njihovog nastanka. Nešto bližu definiciju, ali nedovoljno konciznu su dali *Bagster i Pitblado* koji domino efekat u smislu domino akcidenata definišu kao pojavu koja obuhvata dva različita procesa unutar istog ili različitog objekta [201]. Imajući u vidu ove definicije, jasno se može zaključiti da se izraz domino efekat isključivo razmatra u kontekstu akcidenta procesne industrije sa izraženom divergencijom njegove interpretacije. Treba imati u vidu da domino efekat nije fenomen isključivo vezan za opasne materije, već je univerzalan termin sa kojim se opisuju pojave i procesi karakteristični za lančane reakcije. Terminologija lančanih reakcija u kontekstu domino efekta podrazumeva uticaj nekih štetnih aktivnosti koje imaju sklonost (tendenciju) da prouzrokuju nastanak drugih negativnih aktivnosti odnosno pojava, čime je obezbeđeno da u nizu reakcija reaktivni produkt (međuprodukt) prouzrokuje dalje reakcije.

Zato pod fenomenom domino efekta ne treba samo podrazumevati koncepciju koja je svojstvena procesima u polju tehničko-tehnoloških nauka, već je on univerzalni mehanizam za analizu pojava u društvenima naučnom disciplinama (sociologiji, ekonomiji, politikologiji i sl.) i to uglavnom onih nepoželjnih, kao što su društvene, ekonomske, političke i druge krize. U tom smislu treba naglasiti da je domino teorija ili domino efekat prvi put zvanično upotrebljen tokom Hladnog rada (1954. godine) od strane američkog predsednika Ajzenhauera, iako je sam termin nastao bar deset godina ranije u okvirima Trumanove administracije. Kao što se iz ovoga može zaključiti, početni koreni domino efekata su nastali u ambijentu američke diplomatije i bili su vezani za tada aktuelne vojne i političke krize. Vremenom je ova terminologija prešla u ostale sfere društvenog života, pre svega u ekonomiju i finansije. Upotreba domino efekta u tehničko-tehnološkim disciplinama je došla tek kasnije nakon 1960-tih. Sam naziv domino efekat potiče od igre rušenja (obaranja) domina koje su poređane duž određene trajektorije između kojih postoji određena distanca. Domine moraju biti tako raspoređene da pad bilo koje može sigurno oboriti sledeću dominu u nizu i na taj način izazvati lančanu reakciju (Slika 6.1).



Slika 6.1. Simbolički prikaz domino efekta

Značaj proučavanja lanca akcidenata se ogleda u tome što su takvi serijski, domnino ili kaskadni događaji najčešće pratilac velikih hemijskih udesa sa znatno izraženijim posledicama u odnosu na njihovu pojavu kao nezavisnih akcidenata. Formulacija domino efekta u okvirima zakonske regulative EU koja reguliše oblast hemijskih udesa ima više restriktivniji smisao u odnosu na prethodne definicije i koristi se samo u situacijama kada gubitak kontrole nad akcidentom u jednom objektu postaje uzrok za nastanak drugog akcidenta u drugom objektu. Kada se govori o prikupljanju informacija radi analize domino efekta treba računati na određene dobro poznate probleme koji se tiču evidentiranja prethodno nastalih akcidenata, a od kojih posebno treba istaći:

- Nedostatak adekvatnog mehanizma akcidentnog izveštavanja i održavanje postojeće evidencije u mnogim zemljama, naročito tokom prošlog veka,
- Namerno nedovoljno izveštavanje o akcidentima u cilju izbegavanja ili redukovanja odgovornosti nadležnih organa,
- Kontradiktorne pretpostavke u rekonstrukciji stvarnog ponašanja pri akcidentu i nemogućnost verodostojne simulacije akcidenata kao posledica velike neizvesnosti usled nedostatka nepobitnih (ključnih) dokaza,
- Inherentna nepreciznost mnogobrojnih dostupnih podataka (npr. požar i eksplozija su često evidentirani u generičkom smislu i u mnogim slučajevima nije moguće shvatiti određenu vrstu događaja),
- Nejasna dokumentacija o sekvenci akcidenata u lancu događaja.

U nekim situacijama priroda akcidenta onemogućava jasnu identifikaciju domino efekta, bez obzira što su akcidenti nastali na teritoriji razvijenih zemalja u zadnjih nekoliko godina i pored svih preduzetih mera i radnji prevencija. Tipičan primer za ilustraciju ovog tvrđenja jeste akcident koji se dogodio 29. juna 2009. godine u oblasti Viareggio, Italija. Akcident je nastao kao posledica iskliznuća teretnog voza sa vagon cisternama u kojima se nalazio tečni naftni gas (TNG) usled čega je došlo do dve velike eksplozije. Osnovno pitanje kod ovog akcidenta se odnosi na to da li su ove dve eksplozije bile međusobno nezavisne ili je druga eksplozija bila posledica prve. Drugim rečima, traži se veza između dve identifikovane eksplozije nakon iskliznuća voza, pod pretpostavkom da se radi o domino efektu. Na bazi odgovarajućeg izveštaja iz baze podataka ne postoji dovoljno informacija koje bi nedvosmisleno ukazivale o eventualnom postojanju domino efekta, niti se taj zaključak eksplicitno može izvesti iz priložene evidencije izveštaja. Čak iako je akcident zaista bio praćen domino efektom, nije moguće sa sigurnošću izvesti validan zaključak. Pojavu velikih hemijskih udesa u postrojenjima za proizvodnju (preradu) i skladištenje opasnih materija najčešće karakterišu posledice sa fatalnim ishodom po ljude uz velika materijalna razaranja proizvodne i skladišne opreme. Intenzitet akcidenata i stepen njegovih posledica u velikoj meri zavisi od pratećih fizičko-hemijskih efekata, kao što su pritisak udarnog talasa, termički fluks, mehanički udar od fragmenata eksplozije i dr.

U nekim slučajevima, ugrožena oprema usled nedovoljne otpornosti na pojedine uticaje (npr. pritisak, požar i dr.) može dovesti do nemogućnosti obuzdavanja odnosno gubitka kontrole nad inicijalnim akcidentom uzrokujući na taj način čitavog niza akcidenata. Na primer, mali požar u neposrednoj blizini rezervoara sa TNG-om može uticati na povećanje pritiska fluida i smanjenje čvrstoće materijala u zoni delovanja maksimalnog toplotnog fluksa. Ukoliko se u najkraćem mogućem periodu ne ugasi inicijalni požar sasvim je realno očekivati da će ubrzo doći do pojave naprsline na rezervoaru, kroz koju će isticati gas pod visokim pritiskom. Pojava povišene temperature i vatre u zoni isticanja vrlo zapaljive materije pod pritiskom dovodi do formiranja zapaljivog mlaza i eventualno proširenje požara na ostalu instalaciju i druge delove objekta. Opadanjem pritiska fluida usled njegovog mlaznog isticanja ima za posledicu uvlačenje plamena u rezervoar i izazivanje pritom snažne eksplozije. Fragmenti rezervoara nakon eksplozije mogu oštetiti susedne rezervoare (ako ih ima u blizini) i procesnu instalaciju, izazivajući pritom dodatni požar usled isticanja zapaljivog fluida i potpuno uništenje infrastrukturne opreme objekta. Znači, kratko delovanje požara malog intenziteta u blizini procesne opreme velike ranjivosti može dovesti do čitavog niza vezanih akcidenata, kao što su: isticanje fluida pod pritiskom, njegovog zapaljenja i proširenja požara, eksplozije rezervoara, oštećenja instalacija i druge infrastrukturne opreme, isticanje veće količine zapaljive materije i nastanak velikog požara na celom kompleksu.

Dakle, relativno minoran akcident može inicirati sekvencu događaja čije se posledice manifestuju akcidentom velikih razmera. Sekvencijalna pojava akcidentnih situacija se u stručnoj literaturi karakteriše kao domino efekat. Iako se domino efekat može javiti na različite načine, osnovni aspekt njegove klasifikacije je izvršen zavisno od toga da li su sekvencijalni događaji skoncentrisani u okvirima jedne zone (postrojenja, skladišta i sl.) ili kaskadno napreduju sa određenom prostornom i/ili vremenskom distancom. Na bazi ovog kriterijuma se može izvršiti klasifikacija domino efekta u dve kategorije: unutrašnji i spoljašnji [178]. Unutrašnji domino efekat odlikuje nastanak kaskadnog niza akcidenata u okviru jednog ili više postrojenja posmatrane fabrike. Eskalacija primarno nastalog akcidenta iz okvira jedne fabrike predstavlja spoljašnji domino efekat i obavezno ga prati jedan ili više sekundarnih akcidenata izazvanih primarnim događajem, ugrožavajući pritom objekte koji se nalaze u blizini fabričkog postrojenja. S obzirom na prirodu ova dva tipa sekvencijalnih akcidenata treba istaći da su posledice spoljašnjeg domino efekta veće i ozbiljnije u odnosu na unutrašnji, zbog veće ugrožene zone sa više materijalnih dobara i ekstremnijim uticajem na fatalni ishod po ljude. Analiza spoljašnjeg domino efekta je u literaturi znatno manje zastupljena u odnosu na unutrašnji tip sekvencijalnih događaja, što je posledica kompleksnijeg modeliranja i teže identifikacije uticajnih parametara. U literaturi su predložene brojne definicije domino efekta. Posebno treba istaći doprinos koji je u tom smislu dao *Reniers*, jer je predložio ukupno trinaest definicija od kojih su neke prilično kompleksne. Većina tih definicija u sebi sadrži sledeća tri koncepta:

- Primarni događaj (požar, eksploziju i dr.) koji se javlja u određenoj proizvodnoj jedinici odnosno postrojenju fabrike,
- Širenje akcidenta na jednu ili više proizvodnih postrojenja odnosno fabričkih celina aktivira sekundarne akcidente koji su rezultat primarnog događaja i
- Eskalacija inicijalnog događaja se manifestuje sekundarnim akcidentima sa generalno težim posledicama nego kod primarnog domino efekta.

Pored velikog broja predloženih definicija domino efekta poseban značaj ima ona koju je predložio *Delvosalle*, jer pokriva prethodno navedena tri aspekta i glasi: “Domino efekat čine kaskadni događaji čije se posledice prethodnih akcidenata prostorno i vremenski uvećavaju od strane onih koji tek slede, dovodeći do velikog akcidenta”. Ono što karakteriše ovu definiciju je korišćenje prostornog i vremenskog okvira za izbor akcidenta. Požari su najčešći akcidenti u industrijskim postrojenjima koji su uglavnom praćeni eksplozijama i gasnim oblacima. Sprovedena analiza statističke obrade hemijskih udesa pokazuje da su u zonama pomorskih luka 59,5 % akcidenata bili požari, na eksplozije otpada 34,5% i svega 6% se odnosi na gasne oblake. Istraživanja hemijskih udesa pri drumskom i železničkom transportu opasnih materija pokazuju da su 65 % akcidenata bili požari, 24 % eksplozije i 11 % gasni oblaci.

Akcidenti koji se odnose na pojavu gasnih oblaka imaju relativno mali uticaj na pojavu domino efekta, dok požari i eksplozije mogu lako izazvati naknadne accidente usled njihovih fizičko-hemijskih manifestacija. Ozbiljnost nekog akcidentnog scenarija se može značajno povećati pod uticajem domino efekta. Najzastupljeniji primarni fenomeni koji dovode do dodatnih i u mnogim slučajevima ozbiljnih akcidenata u smislu domino efekta obuhvataju dejstvo mlaznog plamena, udarnog talasa usled eksplozije rezervoara ili oblaka pare i udara delova odnosno parčica eksplozivnog rezervoara (fragmenata). Domino efekat je vrlo značajan fenomen u procesnoj industriji i bio je specifično apostrofirani u prvoj verziji Seveco Direktive (Direktiva Evropskog Saveta 82/501/ECC). Modifikacije ove direktive propisuju da opasnosti domino efekta moraju biti različito procenjene zavisno od toga da li se radi o unutrašnjim ili spoljašnjim industrijskim postrojenjima i da se ogledaju kroz primenu Direktiva 96/82/EC i 96/82/EC. Domino efekat je značajan aspekt u analizi rizika manifestujući se preko saznanja glavnih opasnosti i karakteristika ovog fenomena neophodnih za identifikaciju dodatnih bezbednosnih mera, kao što je npr. minimalna distanca između određenih tipova procesne opreme. Pregled domino efekta je publikovan od strane nekoliko autora među kojima posebno treba istaći [202] u kome je na uzorku od 207 velikih hemijskih akcidenata, nastalih u periodu od 1960. do 1998. godine, identifikovano 114 sa domino efektom prema prethodno definisanim kriterijumima.

Autori analiziraju mogućnost ili relativnu verovatnoću akcidenata čije posledice karakterišu nastanak jednog ili dva domino efekta u odnosu na ukupan broj akcidenata razvrstanih prema vrsti opasnih supstanci u četiri kategorije: tečna goriva, pare ugljovodonika, toksične supstance i ostale materije. U istoj studiji su analizirane posledice na ugroženu populaciju koristeći tzv. $p-N$ krivu i modifikovanu \log normalnu raspodelu. Dokazano je da odnos broja akcidenata koji karakteriše pojava jednog domino efekta prema akcidentima za koje je vezan nastanak najmanje dva domino efekata iznosi 2,3. Značajan doprinos analize domino efekta na uzorku od 828 akcidenata koji su nastali u lučkim oblastima dat je u [203]. U ovoj studiji je kreirano stablo relativne verovatnoće događaja za analizu posledica 108 akcidenata u kojima je identifikovan domino efekat sa najčešćim posledicama: požar → eksplozija, ispuštanje → požar → eksplozija i ispuštanje → gasni oblik → eksplozija. Vrlo česti accidente koji iniciraju domino efekat su vezani za pojavu mlaznog plamena. U tom kontekstu, su identifikovana 84 accidente koji obuhvataju fenomen gasnog plamena uz konstataciju da je u 50 % slučajeva ovaj vid primarnog događaja bio uzrok nastanka domino efekta [204]. Korisnu studiju sa aspekta analize tipa aktivnosti, vrste opasne supstance, stepena domino efekta pri accidentu i uticaja na ugroženo stanovništvo koristeći informacije od 73 hemijska udesa sa elementima domino efekata koji su bili evidentirani u periodu od 1917. do 2009. godine publikovani su u [5]. Ovo istraživanje je bazirano na relativno malom broju akcidenata među kojima značajno procentualnu zastupljenost imaju oni koji su se javili u prvoj polovini XX veka.

Iako prethodno navedene studije obezbeđuju korisne informacije one su ili fokusirane na specifične accidente ili predviđaju različite posledice pojave domino efekta. Glavni izvori informacija za analizu akcidenata su odgovarajuće baze podataka, među kojima je najobimnija ona pod nazivom MHIDAS. Postojeće baze podataka omogućavaju razmatranje više scenarija akcidenata i obuhvataju četiri podsistema opasnih materija: proizvodnju (primarnu i sekundarnu preradu), transport (drumski, železnički i morski), skladištenje i manipulativne aktivnosti (utovar, istovar i pretovar). Accidenti mogu biti posledica prirodnih događaja (više sile) i veštački izazvanih procesa (direktnih ili indirektnih). Jedan od ključnih zadataka prilikom analize akcidenata koristeći baze podataka je definisanje kriterijuma za razlikovanje akcidenata zavisno od toga da li njihovu pojavu prati domino efekat. U tom smislu neophodno je jasno definisati pod kojim uslovima odnosno kriterijumima nastaje domino efekat. Definisanje domino efekta je limitirano sa sledeća dva kriterijuma:

- Sekundarni akcidentni scenario koji se javlja sa prostornom i vremenskom distancom u odnosu na pojavu primarnog događaja karakteriše pojavu domino efekta i
- Sekundarne događaje čiju pojavu ne prate nikakve posledice posmatrano u odnosu na primarne accidente nemaju odlike domino efekta.

Ovi kriterijumi pokazuju da nastanak nekog primarnog akcidenta (npr. mehaničko oštećenje procesne instalacije) uzrokuje sekundarni događaj koji se manifestuje preko isticanja (curenja) fluida, ali to ne znači automatski nastanak domino efekta. Ukoliko pojava primarnog događaja inicira nastanak bar jednog sekundarnog akcidentnog scenarija tada sekvenca ovih akcidentnih fenomena definiše domino efekat. Međutim, ako pojavu sekundarnog događaja ne prate dodatne posledice u kontekstu stvaranja sekvencijalne povezanosti sa primarnim akcidentom, tada nemamo situaciju karakterističnu za domino efekat. Tada se sekundarni događaj ne razmatra kao akcidentna situacija, jer nije došlo do sekvencijalne povezanosti. To u razmatranom primeru znači da ne mora uvek doći do sekundarnog akcidenta ukoliko dođe do isticanja opasne supstance iz oštećene instalacije i da to isključivo zavisi od vrste opasne materije i uslova okruženja. Ako se kao procesni medijum razmatra lako zapaljiva supstanca, onda usled primarnog akcidenta (mekaničkog oštećenja instalacije) dolazi do njenog isticanja iz procesne instalacije, formirajući sa vazduhom eksplozivnu smešu koja može biti potencijalna opasnost od nastanka sekundarnog akcidenta. Sekundarni akcident nastaje kada se iskrenje ili izvor plamena nađu u zoni eksplozivne atmosfere, pa u tom slučaju sekvencijalni niz primarnog i sekundarnog događaja čini domino efekat. S druge strane, posledica nastanka primarnog događaja implicira formiranje eksplozivne atmosfere, stvarajući potrebne uslove potencijalne opasnosti od nastanka sekundarnog akcidenta, ali za njegovu realizaciju je neophodno imati inicijalni faktor (iskrenje ili otvoren plamen) čije će odsustvo sprečiti sekundarni akcident (neće doći do aktiviranja eksplozivne smeše, požara i daljeg oštećenja postrojenja), a samim tim i sekvencijalni niz događaja odnosno domino efekat. Međutim, ako je procesni medijum toksična supstanca, situacija je u pogledu sekundarnog događaja dijametralno suprotna od prethodne. Isticanje ovog procesnog medijuma iz oštećene instalacije usled primarnog akcidenta, automatski dovodi do nastajanja sekundarnog akcidenta koji se manifestuju disperzijom toksičnog oblaka u okruženje radne i/ili životne sredine. Na bazi ovih činjenica se jasno može izvući zaključak da na indukovanje sekundarnog događaja nema samo uticaj intenzitet primarnog akcidenta, već u znatnoj meri utiče procesni medijum i uslovi okruženja unutar postrojenja. U poglavlju 3 je naglašeno da mnoge supstance odlikuje istovremeno postojanje više hazardnih osobina (npr. toksično-zapaljiva supstanca), što menja uslove nastanka sekundarnog događaja (akcidenta) odnosno definisanja domino efekta.

Domino hemijski akcidenti se definišu kao situacije gde hemijski akcident postaje inicijalni događaj za nastanak jednog ili više rednih akcidenta, čime se ozbiljnost posledica u znatnoj meri povećava nego što bi bile usled samo pojave primarnog događaja. S obzirom na ovu činjenicu poseban akcent analize hemijskih udesa treba staviti na detaljnu identifikaciju fenomena koji su na direktan ili indirektan način vezani sa domino efektom. Hemijski udesi su kombinacija uzroka i posledica čiji se uticaji mogu sagledavati sa inženjerskog i društvenog aspekta, respektivno. Inženjerski aspekt je primarnog karaktera u analizi akcidenta i podrazumeva razmatranje različitih organizaciono-tehnoloških parametara na eventualnu pojavu odgovarajućih akcidentnih scenarija. Društveni aspekt definiše ozbiljnost akcidenta koji se manifestuje preko veličine njegovih posledica, tj. štete izazvane po ljudsku populaciju i materijalne resurse. Domino efekat je termin koji se koristi za označavanje uzročno-posledičnog niza događaja koji dovodi do akcidenta velikih razmera.

U opštem slučaju, pojavu akcidenta prati više od jedne supstance koje osim toga mogu sadržati više hazardnih svojstava. U praksi je prisutan relativno mali broj akcidenta kod kojih je samo jedna supstanca aktuelna, kao što je npr. propan-butan. Eksplozija rezervoara sa propan-butanom inicirana požarom može dovesti do ugrožavanja drugih rezervoara kao posledica domino efekta, pri čemu je akter takog akcidenta samo jedna vrsta opasne supstance. Praktična iskustva pokazuju da su u većini akcidenta bile uključene zapaljive supstance sa udelom od 89 % i istovremeno imaju dominaciju u odnosu na materije sa drugim hazardnim svojstvima pri akcidentima koje prati domino efekat. Tečni naftni gas (TNG ili propan-butan) u akcidentima učestvuje sa 26,7 %, udeo goriva (benzini, nafta i naftnih derivata) iznosi 33,3 %, toluen je akter akcidenta u 4% slučajeva, isto koliko i vinil hlorid, supstanca etilen se javlja u 3,6 % akcidenta, dok etilen oksid, prirodni gas i hlorin učestvuju svaki sa po 3,1%, a metanol karakteriše svega 2,7 % akcidentnih scenarija. Ovaj procentualni udeo je dobijen na osnovu statističke analize 225 akcidenta koji obuhvataju ukupno 375 različitih opasnih materija, što ukazuje da zbirno učeće ostalih 217 supstanci iznosi 24 %. Efekat industrijskih akcidenta na populaciju se može klasifikovati u tri grupe i zavisno od ozbiljnosti posledica obuhvata:

- Broj smrtnih slučajeva (žrtava),
- Broj povređenih i
- Broj evakuisanih.

Međutim, informacije o navedenim posledicama nisu dostupne kod svih akcidenata, pri čemu je tendencija većine baza podataka da ukažu na najozbiljnije posledice koje se odnose na broj poginulih i povređenih. Posledice sa smrtnim ishodom su navedene u 82 % akcidentnih izveštaja, broj povređenih je dat u 67 % slučajeva, a broj evakuisanog stanovništva je evidentiran tek kod 38 % akcidenata. Ovo jasno pokazuje da je većinu evidentiranih akcidenata pratila informacija o broju nastradalih i eventualno povređenih, dok se broj evakuisanih zanemarivao u većini dosadašnjih akcidentnih izveštaja. Ova činjenica ima svoje opravdanje ako se ima u vidu ozbiljnost posledica i međusoban odnos nacionalnih strategija prema problematici hemijskih udesa u prethodnom periodu. Ovo se može ilustrovati time što potuno isti tip hemijskog udesa sa istim posledicama ima različit tretman u različitim delovima sveta. Zemlje u razvoju nemaju u prvom planu dovoljno razvijenu svest o ovom problemu, a značajnu prepreku u ozbiljnijem sagledavanju ove problematike predstavljaju ograničeni materijalni i finansijski resursi. Operacije sa opasnim materijama nose visok stepen rizika u svim proizvodno-logističkim fazama koje u cilju njihovog bezbednog upravljanja zahtevaju velike ekonomske resurse. Većina savremenih multinacionalnih kompanija koje potiču iz viskorazvijenih zemalja je svoje fabrike za proizvodnju i preradu opasnih materija izmestila u slabo razvijene ili zemlje u razvoju pod izgovorom stranih investicija. Iako ne treba zanemariti ni taj ekonomski efekat, suština izmeštanja se ogleda upravo u direktnom i indirektnom stepenu rizika koje one nose po stanovništvo, bez obzira gde se nalazile. Visokorazvijene zemlje pred svoje kompanije u savremenim uslovima poslovanja postavljaju vrlo rigorozne kriterijume, naročito nakon velikih hemijskih udesa u prošlosti kao što je npr. akcident u Seveso, Italija. Zato danas jedna od osnovnih zakonskih regulativa u oblasti opasnih materija ima naziv Seveso Direktiva. S druge strane, zemlje u razvoju, a naročito nerazvijene zemlje više formalno nego suštinski propisuju ove kriterijume, dok su lokalne sredine vrlo često ekološki ugrožene, bez mogućnosti da značajnije utiču na rukovodstvo kompanija. Zapravo, ispunjavanje minimalnih ekoloških uslova kompanije vezuju za loše uslove poslovanja (stranih investicija) i stvarajući kontraudar na državnu administraciju u popuštanju ekoloških kriterijuma. Održavanje socijalnog mira u uslovima lošeg životnog standarda stanovništva je osnovni kriterijum kojim se rukovodi svako rukovodstvo u takvim državama, pa multinacionalne kompanije u takvim duelima najčešće izlaze kao pobednici.

MHIDAS je baza podataka akcidenata izazvanih u sistemu opasnih materija, čije direktno delovanje ima dalekosežni uticaj po zdravlje ljudi, materijalna dobra i životnu sredinu, dok se njihov indirektni efekat manifestuje preko rizika od nastanka određenih štetnih posledica. Ova baza podataka je kreirana pod okriljem *Ministarstva za javnu bezbednost Ujedinjenog Kraljevstva* i do 2007. godine je evidentirano 15000 akcidenata zabeleženih od početka XX veka. U bazu su uključeni akcidenti koji zavisno od prirode nastanka obuhvataju tri grupe: prirodne nepogode, tehničko-tehnološke akcidente i humanitarne katastrofe. Akcidenti usled prirodnih nepogoda obuhvataju: biološki, klimatološki, vanzemaljski, geofizički, hidrološki i meteorološki aspekt. Tehničko-tehnološki akcidenti obuhvataju tri kategorije: industrijska (proizvodna) postrojenja, transportne procese i ostale aktivnosti (manipulativne procese). Humanitarne katastrofe obuhvataju specifične vidove akcidenata koji su najčešće posledica društveno-ekonomskih, političkih i vojno-strateških aktivnosti određenih interesnih grupa (multinacionalnih kompanija), međunarodnih organizacija ili vodećih svetskih sila (država) nad stanovništvom određene etničke, verske ili druge pripadnosti. MHIDAS baza podataka pokriva veliki broj akcidenata evidentiranih od početka XX veka u skoro 100 zemalja širom sveta. Bitno je naglasiti da ova baza pokriva sve kontinente i da se posledice akcidenata interpretiraju preko broja stradalih (poginulih), broja povređenih (privremeno ili trajno onesposobljenih lica) i broja evakuisanih (privremeno ili trajno raseljenih), dok se u nekim slučajevima posledice izražavaju preko materijalnih gubitaka u \$.

FACTS je baza podataka koja obuhvata akcidente sa opasnim materijama, a kreirana je krajem 1970-tih godina u Holandiji od strane TNO *Departmana za industrijsku i eksternu bezbednost*. Informacije koje su sadržane u ovoj bazi su profesionalnog karaktera čiji je izvor baziran na

izveštajima o akcidentima prezentovan od strane kompanija, vladinih agencija, naučnih časopisa i druge stručne literature. FACTS je od svog nastanka pa do danas evidentirao preko 25000 akcidentnih događaja sa opasnim materijama i po svim parametrima se klasifikuje među najsveobuhvatnije baze podataka današnjice u svojoj kategoriji. Svi evidentirani akcidenti u FACTS-u su kodirani prema ključnim parametrima u obliku abstrakta i obuhvataju sledeće elemente: evidencioni broj akcidenta, godinu, državu, lokaciju nastanka, aktivnost pri nastanku akcidenta, vrstu hemikalije, uzrok (ako je poznat), broj poginulih i povređenih, kao i kratak opis akcidenta. Informacije o akcidentima sa kojima raspolaže baza podataka FACTS su predstavljeni u tri različita nivoa. Prvi nivo sadrži pregled glavnih karakteristika odabranih akcidenta predstavljenih pod pseudonimom akcidentna tablica. Drugi nivo informacija sadrži kodirane podatke i opis akcidenta koji se deklarišu formom akcidentnog apstrakta. Najkompletniji informacioni nivo je poznat kao prošireni akcidentni apstrakt i sadrži sve dostupne podatke o akcidentu. Iako su ovi podaci od značaja za izvođenje osnovnih statističkih zaključaka o akcidentu, treba imati u vidu da ova baza podataka nema mogućnost filtriranja podataka po nekim parametrima (npr. po tipovima akcidenta, faktorima uzroka i dr.) kao što je to slučaj sa MHIDAS bazom podataka. Međutim, imajući u vidu veliki broj evidentiranih akcidenta širom sveta, FACTS baza podataka može korisno poslužiti ne samo kao izvor podataka u statističkoj analizi, već i kao podloga za predviđanje budućih trendova u oblasti akcidenta sa opasnim materijama. Ova činjenica je od fundamentalnog značaja za analizu i upravljanje rizikom, definisanju preventivnih mera, dodatno obučavanje kadrova i reagovanje u vanrednim situacijama.

MARS je razvijen od strane *Biroa za velike akcidentne hazarde* (MAHB) na Institutu za inženjerske sisteme i informatiku (ISEI) pri Centru Evropske Komisije za zajednička istraživanja (JRC) sa sedištem u Ispri na Severu Italije. Ova baza podataka se nalazi u opretnoj upotrebi od 1984. godine i funkcioniše u okvirima Seveso Direktiva. Ovo podrazumeva da shodno Direktivama Seveso I i Seveso II, nadležni organi država članica EU imaju obavezu prijave velikih akcidenta sa opasnim materijama kod predstavnika Evropske Komisije u zemlji pojave akcidenta. Izuzetak u evidentiranju hemijskih udesa prema ovoj bazi podataka obuhvataju nuklearne, vojne i transportne akcidente, kao i akcidentne situacije nastale u rudarstvu i pri manipulaciji sa opasnim otpadom. MARS je baza podataka velikih hemijskih akcidenta sa obavezom prijave svih država članica kod organa Evropske Komisije i sa jedinstvenom šemom izveštavanja u okvirima Evropske Unije. Hemijske udesa koje evidentira ova baza podataka se ne odnose samo na industrijske akcidente, već i na sve one specifične ili neobične tehnološke događaje čija priroda može imati veliki socijalni uticaj na stanovništvo. Svrha ove baze podataka je brzo širenje informacija od strane predstavnika države u kojoj se desio akcident u skladu sa članom 15 Direktive Seveso II. Upravo se u ovoj činjenici ogleda suština primene Seveso Direktiva, jer se razmenom informacija između relevantnih institucija država članica EU one mogu sistematski i efikasnije analizirati u cilju analize uzroka, organizacionih i tehničko-tehnoloških propusta, procene rizika, validnosti preventivnih mera i adekvatnosti rešavanja u akcidentnim scenarijima. Nakon obrade i analize dobijenih informacija, referentne ustanove iz EU dostavljaju završne izveštaje Evropskom Savetu o akcidentima u kojima su jasno izvedeni zaključci o budućim preventivnim merama i reagovanju u slučaju pojave istih ili sličnih akcidenta radi eliminisanja ili ublažavanja njihovih posledica. Baza podataka MARS je do danas evidentirala preko 850 hemijskih akcidenta na nivou zemalja EU, pri čemu njih 60 ima odlike domino efekta. Znači, udeo hemijskih akcidenta sa karakteristikama domino efekta prema ukupnom broju evidentiranih hemijskih udesa u EU shodno raspoloživim podacima iz MARS-a ne prelazi 7 % za analizirani period od prethodnih 30 godina. Ova baza hemijskih akcidenta je zasnovana na principu pretraživača koja uključuje vremenski period pretrage, zakonsku regulativu, vrstu događaja, tip industrijskog postrojenja, godinu akcidenta i ključne reči.

ARIA je baza podataka hemijskih akcidenta evidentiranih od 1992. godine kojom upravlja francusko *Ministarstvo ekologije, održivog razvoja i energetike*. Ova baza obuhvata sve akcidentne događaje koji imaju ili mogu imati uticaja na narušavanje zdravlja ljudi, opšte bezbednosti, poljoprivredu, prirodnu i životnu sredinu. Akcidentne situacije mogu biti prouzrokovane havarijama u industrijskim postrojenjima ili poljoprivrednim kompleksima, pri odvijanju transportnih procesa i drugih aktivnosti koje se u kontekstu njihovih posledica klasifikuju kao hazardne. Iako je ova baza podataka nacionalnog karaktera, treba naglasiti da obuhvata i akcidente ostalih država. ARIA je od svog nastanka zaključno sa 2015. godinom evidentirala skoro 40000 akcidenta. Najveći broj ovih

akcidenata je evidentirano u Francuskoj (oko 37000), dok se preostali broj odnosi na akcidente zabeleženih u 127 zemalja širom sveta za period od 1992. godine. Uzimajući u obzir ovu činjenicu, lako se može zaključiti da ova baza nije relevantna za analizu akcidenata koji su se desili izvan teritorije Francuske, jer je njihovo učešće svega 7,5 % u ukupnom broju evidentiranih akcidenata od strane ove baze.

ZEMA je baza podataka nastala 1993. godine pod okriljem *Savezne Agencije za zaštitu životne sredine* u Nemačkoj. Ova baza podataka je zasnovana na principima Seveso Direktiva i objavljuje godišnje publikacije o svim akcidentima koji su nastali na teritoriji Nemačke u kontekstu njihove analize i procene štetnih uticaja. ZEMA u skladu sa potencijalnom opasnošću identifikuje dve vrste nepoželjnih događaja: akcidente velikih razmera i poremećaje normalnog rada. Ova baza podataka sadrži pregled svih akcidenata evidentiranih u periodu od 1980. godine koji su se desili na području Nemačke. Prema ovoj bazi podataka zaključno sa 2015. godinom je evidentirano ukupno 701 akcident za sva fabrička postrojenja. ZEMA je kao i većina sličnih baza podataka ovoga tipa organizovana u pretraživačkoj formi, što omogućava jednostavan rad i sprovođenje različitih vrsta analiza. Kriterijumi za pretragu akcidenata u ovoj bazi podataka obuhvataju: vremenski interval u okviru koga se posmatraju akcidenti, mesto nastanka, tip fabričkog postrojenja, klasifikacija događaja (ispuštanje, eksplozija i dr.) i uzrok nastanka akcidenta.

CONCAWE je osnovan 1963. godine od strane male grupe vodećih naftnih kompanija i prvobitno je bio namenjen za istraživanja o ekološkim pitanjima od značaja za naftnu industriju. Kasnije je članstvo prošireno na sve značajnije naftne kompanije koje posluju u Evropi (EU).

Tabela 6.1. Značajni hemijski udesi u svetu [205]

| Redni broj | Zemlja akcidenta | Mesto akcidenta | Godina akcidenta | Vrsta supstance | Smrtni slučajevi |
|------------|------------------|-------------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 | Indija | Bopal | 1984 | Metil-izocijanat | 20 000 |
| 2 | SSSR | Sibir | 1989 | TNG | 645 |
| 3 | Nemačka | Oppau | 1921 | Amonijum-nitrat | 561 |
| 4 | Brazil | Cubato | 1984 | Gorivo | 508 |
| 5 | Meksiko | Mexico City | 1984 | TNG | 500 |
| 6 | Nemačka | Ludwigshafen | 1948 | Dimetil eter | 245 |
| 7 | Španija | San Carlos de la Rapita | 1978 | Propilen | 215 |
| 8 | Belgija | Tessenderloo | 1942 | Amonijum-nitrat | 200 |
| 9 | UK | Piper Alpha | 1988 | Gorivo | 165 |
| 10 | Venecuela | Caracas | 1982 | Gorivo | 160 |
| 11 | Južna Koreja | Taegu | 1995 | TNG | 106 |
| 12 | Rumunija | Pitesti | 1974 | Etilen | 100 |
| 13 | Tajland | Bangkok | 1991 | Gorivo | 63 |
| 10 | Irska | Whiddy Island | 1979 | Sirova nafta | 50 |
| 14 | Brazil | Rio de Janeiro | 1972 | TNG | 37 |
| 15 | SAD | Louisiana | 1977 | Prašina žitarica | 36 |
| 16 | SAD | Puerto Rico | 1996 | Propan | 33 |
| 17 | Turska | Corlu | 1992 | Metan | 32 |
| 18 | Francuska | Toulouse | 2001 | Amonijum nitrat | 30 |
| 19 | UK | Flixborough | 1974 | Cikloheksan | 28 |
| 20 | SAD | Texas | 1989 | Etilen | 23 |
| 21 | Grčka | Elefsina | 1992 | TNG | 20 |
| 22 | Francuska | Feyzin | 1966 | Propan | 18 |

6.1. BAYES-OVA MREŽA

Bayes-ova mreža je probabilistički model kojim se odražavaju sve moguće kombinacije stanja razmatranog sistema sa ciljem njegovog predviđanja odnosno budućeg ponašanja. Kreiranje probabilističkih modela bez upotrebe Bayes-ove mreže zahteva upotrebu matrice odnosno tabele zajedničkih raspodela u kojoj se nalaze sve moguće kombinacije verovatnoća za svako pojedinačno stanje sistema. Međutim, matrica zajedničkih raspodela može imati veliki broj elemenata odnosno kombinacija, što ograničava njenu primenu, čak i za jednostavnije slučajeve. Tako na primer, za proste modele sa 5 varijabli od kojih svaka može uzimati samo 2 stanja, imamo ukupno $2^5 = 32$ kombinacije verovatnoća. Generalizacijom ovog primera može se zaključiti da ukupan broj kombinacija verovatnoća kod modela sa r varijabli i s stanja iznosi $N_{r,s} = r^s$. Uobičajeni praktični primeri mogu imati oko 20-tak varijabli, dok broj stanja varira zavisno od tipa varijable i nikada nije manji od 2. Broj kombinacija verovatnoća za model sa 20 varijabli od kojih svaka može uzimati po 2 stanja iznosi $2^{20} = 1048576$, što ukazuje na kompleksnost matrice zajedničke raspodele i nemogućnost njene efikasne primene u konkretnim praktičnim problemima. Ovo je naročito izraženo kada imamo veći broj varijabli, pošto broj kombinacija verovatnoća $N_{r,s}$ eksponencijalno raste sa porastom broja varijabli, dok parametar rasta definiše osnova odnosno broj stanja koje mogu uzimati varijable. Osim toga, veći broj stanja pojedinih varijabli omogućava veći stepen priraštaja usled eksponencijalnog rasta. Ozbiljniji praktični problemi mogu imati i više od 30-tak varijabli, dok broj stanja većine varijabli može biti veći od 2. Ilustracije radi, broj kombinacija verovatnoća ako imamo 30 varijabli i 2 moguća stanja za svaku od varijabli iznosi $2^{30} = 1073741824$, dok za 19 varijabli i 3 moguća stanja svake od razmatranih varijabli iznosi $3^{19} = 1162261467$. Ovo jasno pokazuje da osnova stepene funkcije (broj stanja varijabli) ima značajan uticaj i da je promena sa 2 na 3 stanja ekvivalentna smanjenju broja varijabli sa 30 na 19 za približno isti broj kombinacija verovatnoća (odstupanje 7,6 %). Zaključak ove analize nedvosmisleno govori da se kod složenijih praktičnih primera broj mogućih kombinacija verovatnoća može kretati do reda veličine 10^{15} i da je rad sa tabelama zajedničkih verovatnoća u tim slučajevima praktično nemoguće realizovati, zbog potrebe skladištenja ogromne količine podataka. Zato je rešenje ovog problema pronađeno u konstrukciji Bayes-ove mreže koja je sastavljena od čvorova i orjentisanih veza (strelica) reprezentujući time varijable i njihove međusobne uticaje, respektivno. Znači, Bajesovu mrežu čine čvorovi (varijable) koji su probabilistički spregnuti posredstvom uzročno-posledične zavisnosti sa formulacijom (6.1).

$$P(AB) = P(A)P(A | B) = P(B)P(B | A) \quad (6.1)$$

Bayes-ovu mrežu pored rešavanja problema skladištenja ogromne količine podataka iz matrice zajedničke verovatnoće karakteriše izuzetna fleksibilnost (prilagodljivost). Bayes-ova mreža podrazumeva predstavljanje raspodele zajedničke verovatnoće za skup slučajnih promenljivih koje odlikuju međusobni uzročno-posledični odnosi. Zato se Bayes-ova mreža može tretirati kao alat za modeliranje i rezonovanje u domenu neizvesnosti. Bayes-ova mreža je struktura sastavljena od dve komponente:

- Kvalitativne i
- Kvantitativne.

Kvalitativna komponenta se izražava u grafičkom obliku preko usmerenog acikličkog grafa ukazujući na uzajamnu povezanost između pojedinih čvorova. Ako postoji uzročna probabilistička zavisnost između dve slučajne varijable u acikličnom grafu, tada su odgovarajuća dva čvora mreže spojena usmerenom linijom (strelicom). Čvorovi reprezentuju varijable od interesa za posmatrani sistem, pa se usmerena grafička povezanost od čvora A ka čvoru B može tumačiti kao direktan uticaj slučajne varijable A na B. Tada čvor A nazivamo roditeljem čvora B i svaki čvor ima najmanje jednog roditelja, osim korenog čvora koji nema roditelje. Kvantitativnu komponentu definišu uslovne verovatnoće svih stanja u čvorovima mreže, pri čemu svakom stanju jednog čvora odgovara tačno jedna uslovna verovatnoća. Bayes-ova mreža se sa kvalitativnog aspekta može tumačiti kao precizna jedinstvena raspodela verovatnoće nad njenim varijablama. Zato se Bayes-ova mreža može tretirati kao faktorisana interpretacija raspodele verovatnoća, čime je omogućena kompaktnost njene strukture.

Ova činjenica je ujedno i osnovna prednost Bayes-ove mreže, jer omogućava kompaktno predstavljanje velikog broja raspodela uslovnih verovatnoća. Osnovna svrha Bayes-ove mreže podrazumeva kalkulaciju *a posteriori* raspodele uslovnih verovatnoća za svaki od nerazmatranih uzroka s obzirom na posmatrane dokaze, što je definisano izrazom $P(\text{uzrok}|\text{dokaz})$. Međutim, u praksi se najčešće raspolaze sa raspodelama uslovnih verovatnoća koje posmatraju realizaciju dokaza pod pretpostavkom ostvarenja uzroka u skladu sa formulacijom $P(\text{dokaz}|\text{uzrok})$. Imajući u vidu ove činjenice, sasvim je jasno zašto ceo koncept mreže ima potporu u Bayes-ovoj teoremi. Ova teorema je zasnovana na raspodelama uslovnih verovatnoća nastanka uzroka s obzirom na posmatrani dokaz, koristeći konverzovanu uslovnu verovatnoću realizacije dokaza na bazi pretpostavke o nastanku uzroka. Shodno prethodno izloženom Bayes-ova teorema se može zapisati u obliku:

$$P(\text{uzrok} | \text{dokaz}) = P(\text{dokaz} | \text{uzrok}) \cdot \frac{P(\text{uzrok})}{P(\text{dokaz})} \quad (6.2)$$

Svaki čvor u Bayes-ovoj mreži je uvek uslovno nezavisan od svih onih čvorova koji nisu njegovi potomci, pod pretpostavkom da se razmatrani čvor posmatra kao njihov roditelj. Stoga se raspodela zajedničke verovatnoće svih slučajnih varijabli u acikličnom grafu faktorizuje u niz raspodela uslovnih verovatnoća imajući u vidu njihove roditelje. Koristeći ove osobine moguće je izgraditi kompletan model, precizirajući raspodelu uslovne verovatnoće u svakom čvoru mreže. U cilju ilustracije osnovnog principa funkcionisanja Bayes-ove mreže razmatran je jedan krajnje jednostavan problem nastanka hemijskog udesa (akcidenta) tokom odvijanja tehnološkog procesa u industrijskom postrojenju za proizvodnju (preradu) opasnih materija. Radi jednostavnosti razmatranja, pretpostavićemo da tehnološki proces funkcioniše po modelu otvorenog sistema automatskog upravljanja (bez povratne sprege). Ako u nekoj fazi proizvodnog procesa dođe do hemijskog udesa, postavlja se pitanje šta je bio uzrok akcidenta i koje mere prevencije treba preduzeti kako se u budućnosti ne bi dešavale slične situacije. Radi daljeg pojednostavljenja razmatrane ilustracije, pretpostaviće se da postoje samo dva uzročnika u nastanku akcidenta: ljudski faktor i nepouzdanost opreme. Analizirajući uzročnike nastanka akcidenta može se zaključiti da između njih ne postoji uzajamna zavisnost, pošto ljudski faktor u upravljanju tehnološkim procesom ne može direktno uticati na pouzdanost opreme ugrađene u samo industrijsko postrojenje. Ovu činjenicu ne treba poistovetiti sa time što nekada mali propusti ljudskog faktora kod opreme slabije pouzdanosti mogu imati fatalni ishod. Takođe, ovome treba dodati da tehnološki zastarela oprema daje manje kontrolnih informacija ljudskom faktoru za adekvatno upravljanje tehnološkim procesom. Ove aspekte uzročnih faktora treba staviti u kontekst osetljivosti odnosno ranjivosti na pojavu akcidenta, a nikako u funkciju njihove međusobne zavisnosti. Radi pojašnjenja ovih stavova polazimo od suprotne pretpostavke, tj. da između ova dva razmatrana uzročnika u nastanku akcidenta (ljudskog faktora i pouzdanosti opreme) postoji direktna zavisnost. Ako bi to bilo ispunjeno onda bi imali situaciju da npr. ljudski faktor izaziva smanjenje pouzdanosti na opremi, pa bi nepouzdanost opreme bio direktni, a ljudski faktor indirektni uzročnik akcidenta. Hemijske udese izazivaju samo direktni faktori, dok se indirektni uticaji manifestuju kroz formu stvaranja preduslova za iniciranje direktnih uzročnika na akcident. Zato se i zovu direktni faktori, jer njihovim neposrednim prisustvom i uticajem nepovoljno utiču na rizičnu situaciju doprinoseći havariji odnosu hemijskom udesu. Prema tome, zaključak je da ljudski faktor ne može uticati na pouzdanost opreme u tehnološkom procesu. Međutim, može se postaviti obratno pitanje, da li pouzdanost opreme može direktno uticati na ljudski faktor? Intuitivno je jasno da pouzdanost procesne opreme nekog tehnološkog procesa ne može direktno uticati na ljudski faktor i to se može ilustrovati jednostavnim primerom: nepouzdanost merno-regulacione opreme može izazvati pregrevanje radnog fluida u sudu pod pritiskom (rezervoaru), njegovu eksploziju, eskalaciju hemijskog udesa u vidu domino efekta i nastanka akcidenta. Ovde ne postoji direktan uticaj na ljudski faktor u smislu njegovog delovanja kroz organizacioni propust, već razlog za eksploziju treba tražiti u čisto tehničko-tehnološkoj sferi procesa. Treba napomenuti da su ovde iz razmatranja isključeni indikatorski sistemi na bazi kojih ljudski faktor upravlja procesom (polazna pretpostavka o otvorenom sistemu automatskog upravljanja). Takođe, zanemaren je i psihološki uticaj usled ozbiljnosti hemijskog udesa na odluke i ponašanje ljudskog faktora u trenutku izbijanja i neposredno nakon akcidenta. Varijable koje reprezentuje ljudski faktor i pouzdanost opreme označićemo sa *HU* (human factor) i *RE* (Realibility of Equipment), respektivno.

Neka je ekspertaska procena o potencijalnim uzročnicima hemijskog udesa usled ljudskog faktora (HU) i pouzdanosti opreme (RE) data sa verovatnoćama: $P(HU = da) = p$ odnosno $P(RE = ne) = q$, respektivno. Ako hemijski udes označimo sa CA (Chemical Accident) i pretpostavimo: a) organizovano delovanje ljudskog faktora je u skladu sa propisanom procedurom i b) ugrađena procesna oprema pouzdano funkcioniše. Tada se tehnološki proces odvija normalno bez nagoveštaja o mogućem akcidentu i važi: $P(CA = da | HU = ne, RE = da) = 0$. Međutim, verovatnoća nastanka akcidenta usled nepouzdanosti procesne opreme je: $P(CA = da | HU = ne, RE = ne) = \frac{1}{2}$. S obzirom da ljudski faktor (HU) upravlja radom tehnološkog procesa, svako značajnije odstupanje od procedure rada sa opasnim materijama neminovno vodi ka nastanku akcidenta. Ovo može biti posledica nenamernih propusta usled neodgovornosti ljudskog faktora (menadžmenta ili neposrednih izvršilaca) i unapred planski organizovanih aktivnosti u vidu sabotaza, bez obzira na motive takvih postupaka. Verovatnoće nastanka akcidenta ukoliko je izazvan štetnim delovanjem ljudskog faktora, bez obzira na stepen pouzdanosti procesne opreme su:

$$P(CA = da | HU = da, RE = da) = 1 \text{ i } P(CA = da | HU = da, RE = ne) = 1.$$

Verovatnoća nastanka akcidenta se na bazi prethodne analize može izraziti sledećim izrazom:

$$\begin{aligned} P(CA = da) &= \sum_{HU, RE} P(CA = da, HU, RE) \\ &= \sum_{HU, RE} P(CA = da | HU, RE) \cdot P(HU | RE) \cdot P(RE) \\ &= \sum_{HU, RE} P(CA = da | HU, RE) \cdot P(HU) \cdot P(RE) \end{aligned} \quad (6.3)$$

Gde je $P(HU|RE) = P(HU)$ kao posledica pretpostavke o nezavisnosti događaja HU i RE . Tada se nakon razvijanja sume iz (6.3), dobija oblik:

$$\begin{aligned} P(CA = da) &= P(CA = da | HU = ne, RE = ne) \cdot P(HU = ne) \cdot P(RE = ne) + \\ &P(CA = da | HU = da, RE = ne) \cdot P(HU = da) \cdot P(RE = ne) + \\ &P(CA = da | HU = ne, RE = da) \cdot P(HU = ne) \cdot P(RE = da) + \\ &P(CA = da | HU = da, RE = da) \cdot P(HU = da) \cdot P(RE = da) \end{aligned} \quad (6.4)$$

$$\begin{aligned} P(CA = da) &= \frac{1}{2} \cdot (1-p) \cdot q + 1 \cdot p \cdot q + 0 \cdot (1-p) \cdot (1-q) + 1 \cdot p \cdot (1-q) \\ &= \frac{1}{2} \cdot q \cdot (1-p) + q \end{aligned} \quad (6.5)$$

Gde p i q predstavljaju, respektivno:

Verovatnoću da će uzrok hemijskog udesa (CA) biti ljudski faktor ($HU=da$): $p = P(HU=da)$,
Verovatnoću da će uzrok akcidenta (CA) biti nepouzdanost opreme ($RE=ne$): $q = P(RE=ne)$.

Ove verovatnoće su rezultat ekspertaska procene i mogu se dobiti na bazi statističkog praćenja za HU odnosno shodno analizi pouzdanosti procesne opreme u realnim uslovima eksploatacije za RE . Usvajajući npr. za $p = 0,10$ i $q = 0,15$, verovatnoća nastanka hemijskog udesa (CA) ima vrednost $P(CA) = \frac{1}{2} \cdot q \cdot (1-p) + q = \frac{1}{2} \cdot 0,10 \cdot (1-0,10) + 0,15 = 0,195$.

Dobijena verovatnoća $P(CA) = 0,195$ predstavlja *a priori* verovatnoću nastanka hemijskog udesa (CA) pre posmatranja bilo kakvog dokaza, a čiji je grafički model ilustrovan na slici 6.2.

$$\begin{aligned}
 P(HU = da | CA = da) &= \sum_{RE} P(HU = da, RE | CA = da) \\
 &= \sum_{RE} \frac{P(CA = da | HU = da, RE)P(HU = da)P(RE)}{P(CA = da)} \quad (6.6)
 \end{aligned}$$

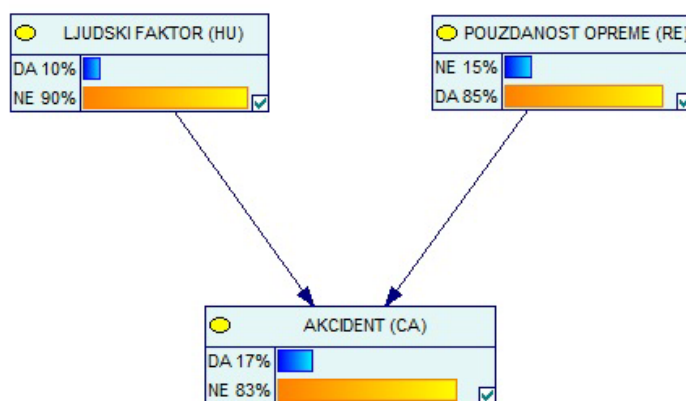
$$\begin{aligned}
 P(RE = ne | CA = da) &= \sum_{HU} P(HU, RE = ne | CA = da) \\
 &= \sum_{HU} \frac{P(CA = da | HU, RE = ne)P(HU)P(RE = ne)}{P(CA = da)} \quad (6.7)
 \end{aligned}$$

Razvijanjem suma u (6.6) i (6.7) i zamenom konkretnih vrednosti verovatnoća, dobija se:

$$\begin{aligned}
 P(HU = da | CA = da) &= \frac{1 \cdot p \cdot (1 - q) + 1 \cdot p \cdot q}{\frac{1}{2} \cdot q \cdot (1 - p) + q} = \frac{2}{3 - p} \\
 &= \frac{2}{3 - 0,10} = 0,689 \quad (6.8)
 \end{aligned}$$

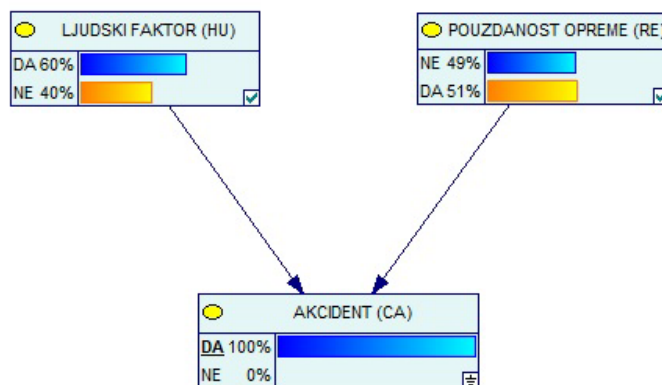
$$\begin{aligned}
 P(RE = ne | CA = da) &= \frac{1 \cdot p \cdot q + \frac{1}{2} \cdot (1 - p) \cdot q}{\frac{1}{2} \cdot q \cdot (1 - p) + q} = \frac{1 + p}{3 - p} \\
 &= \frac{1 + 0,10}{3 - 0,10} = 0,379 \quad (6.9)
 \end{aligned}$$

Grafička ilustracija *a posteriori* raspodele verovatnoće za dva nezavisna potencijalna uzročnika hemijskog udesa je prikazana na slici 6.3.



Slika 6.2. *A priori* verovatnoća nastanka hemijskog udesa

Analizom slike 6.2 uočava se da potencijalni nastanak akcidenta ($CA=da$) indukuje jaku zavisnost između uzročnih faktora, ako su njihove verovatnoće date sa: $P(HU=da) = 0,10$ i $P(RE=ne) = 0,15$. Treba napomenuti da je polazna pretpostavka bila nezavisnost uzročnih faktora koji dovode do akcidenta. Prema formiranoj Bayes-ovoj mreži (slika 6.3) može se zaključiti da određene vrednosti verovatnoća $P(HU)$ i $P(RE)$ daju skoro potpunu zavisnost između ljudskog faktora (HU) i pouzdanosti opreme (RE).



Slika 6.3. "A posteriori" verovatnoća nastanka hemijskog udesa

Verovatnoća da će akcident biti izazvan ljudskim faktorom iznosi 60 %, a usled nepouzdanost opreme 51 %. S obzirom da verovatnoće od oba uzročna faktora teže vrednosti od 50 %, sasvim je jasna njihova međusobna kvazi-zavisnost. Potpuna (idealna) zavisnost bi bila kada bi verovatnoće od oba uzročnika akcidenta imale vrednost od 50 %, što je u datom primeru nemoguće. Kada je reč o idealnoj zavisnosti, primer koji najbolje ilustruje ovaj fenomen se javlja kod bacanja novčića: verovatnoća da će pasti "grb" ista je kao verovatnoća pojave "pisma" i ona iznosi 0,5. Događaji koji se odnose na pojavu "grba" i "pisma" su međusobno isključivi, pa pojava "grba" isključuje pojavu "pisma" i obratno. Jednake ili približno jednake verovatnoće uzročnih faktora za stoprocentni nastanak akcidenta pokazuju da pojava jednog uzročnika isključuje drugi i obratno. Iako ova analiza može biti korisna za utvrđivanje međuzavisnosti uzročnih faktora, dominantnu ulogu u kreiranju Bayes-ove mreže imaju novi dokazi koji upotpunjuju postojeću šemu novim informacijama. Ako u model uključimo informacije o kontrolnom sistemu postrojenja, tada u postojećoj Bayes-ovoj mreži imamo još jedan čvor. Kontrolni sistem predstavlja povratnu spregu o realizovanoj aktivnosti postrojenja i ima ulogu da pruži ljudskom faktoru sve relevantne merne veličine (informacije) kako bi se moglo adekvatno upravljati radom procesne opreme.

6.2. VEROVATNOĆA NASTANKA DOMINO EFEKTA

U uvodnom delu ovog poglavlja je naglašeno da pojavu domino efekta karakteriše uzročno-posledična zavisnost primarnih i sekundarnih događaja. Akcidente koje karakteriše eksplozija procesne opreme nekog postrojenja najčešće prati sekvencijalni niz događaja (domino efekat), pa je za analizu rizika u tom slučaju neophodno poznavati verovatnoće pojave primarnog i sekundarnog događaja posmatranog akcidentnog lanca. U tom kontekstu, verovatnoća pojave domino efekta zahteva poznavanje uslovnih verovatnoća posledično-uzročnih događaja jednog ciklusa akcidentnog lanca. Verovatnoća nastanka domino efekta je data sa (6.10), ako se primarni i sekundarni događaji označeni sa PD i SD , respektivno.

$$P(PD \cap SD) = P(PD) \cdot P(SD | PD) \quad (6.10)$$

Kao što je poznato iz teorije verovatnoće, formulacija (6.10) pokazuje da je realizacija sekundarnog događaja zavisna od ostvarenja primarnog događaja koji se nalazi prvi u akcidentnom lancu. Primarni događaj je u okviru jedne sekvence akcidentnog lanca nezavisan događaj i ima ulogu povezivanja više sekvencijalnih događaja u jedinstven akcidentni lanac. Uslovna verovatnoća pojave sekundarnog događaja pod uslovom da je ishod primarnog u potpunosti izvestan ima sledeći oblik:

$$P(SD | PD) = \frac{P(PD \cap SD)}{P(PD)} \quad (6.11)$$

Bitno je istaći da je analiza domino efekta u nekim istraživačkim studijama zasnovana na konceptijsko pogrešnom tumačenju, jer verovatnoću akcidentne sekvence interpretira bez uslovnih verovatnoća primarnog i sekundarnog događaja.

Na taj način je uspostavljena nezavisnost događaja u akcidentnom lancu, što je u suprotnosti sa logičkim i matematičkim principima. Osnovni faktor rizika hazarda koji može biti generator domino efekta obuhvata verovatnoću njegove pojave, pa se iz tog razloga ovom fenomenu poklanja velika pažnja.

6.3. DOMINO EFEKAT USLED EKSPLOZIVNE FRAGMENTACIJE

Eksplorziju procesne opreme u hemijskoj industriji najčešće prati proces fragmentizacije koji predstavlja potencijalnu opasnost za nastanak akcidenata većih razmera – domino efekta. Eksplozija procesne opreme nastaje kada dođe do prekoračenja kritičnog pritiska, pri čemu se kao posledica toga javlja njihovo mehaničko razaranje praćeno fragmentacionim dejstvom. U okviru ove analize se pod eksplozivnom fragmentacijom podrazumeva dejstvo razorenih delova procesne opreme (rezervoara i cevovoda) koje je uzrokovano njihovom eksplozijom na potencijalno oštećenje ostalih postrojenja i objekata. Razoreni delovi procesne opreme nakon eksplozije postaju fragmenti koji mehaničkim delovanjem (udarom) mogu ugroziti živote ljudi i/ili izazvati oštećenja instalacija ostalih postrojenja. Fragmentaciono delovanje usled eksplozije je jedan od osnovnih generatora domino efekta u hemijskoj industriji, pa se shodno tome ovoj problematici posvećuje posebna pažnja.

Osnovni elementi eksplozivne fragmentacije u kontekstu pojave domino efekta obuhvataju:

- Vrstu izvora primarnog događaja (eksplozije),
- Trajektorije fragmenata i
- Dejstvo fragmenata na eventualnu pojavu sekundarnog incidenta.

6.4. ANALIZA RIZIKA USLED FRAGMENTACIJE REZERVOARA

Procena rizika usled fragmentacije posuda pod pritiskom zahteva adekvatno modeliranje hazarda, a kreatori prvih fragmentacionih modela su bili *Moore and Baker* [206]. *Holden and Reeves* pokazuju da je fragmentacija u 77% akcidenata posledica eksplozija posuda pod pritiskom sa generisanim brojem fragmenata od 1 do 9 [207]. *Holden* je ustanovio da 60% generisanih fragmenata pokriva sektorski ugao od $\pm 30^\circ$ sa obe strane rezervoara [208]. Neke novije studije su zasnovane na rezultatima ovih istraživanja [209]. *Mébarki et al.* predlažu entropijski model za procenu broja generisanih fragmenata [209]. Tipične eksplozije rezervoara koje prate industrijske akcidente su vezane za BLEVE fenomen [210] i [130]. Procena rizika usled fragmentacije rezervoara podrazumeva modeliranje leta fragmenta, a literatura za analizu fragmentacije isključivo koristi uprošćeni model. *Gubinelli et al.* koriste pomenuti uprošćeni model, ali ne navode ograničenja njegove primene [211]. Primena ovog modela zahteva poznavanje početnih uslova, poput inicijalne brzine. *Baum* izvodi seriju eksperimenata sa rezervoarima mase do 82,5 kg i zaključuje da inicijalna brzina ne prelazi 54,6 m/s [212]. Veličina rezervoara nema uticaja na broj generisanih fragmenata [213]. Međutim, promenom veličine (mase) rezervoara menja se inicijalna brzina. *Baum* pokazuje da udeo kinetičke energije fragmenta može biti do 20% ekspanzione energije. *Hauptmanns* iznosi podatak da se udeo kinetičke energije fragmenata kreće od 20% do 50% (očekivane vrednosti 30%) u odnosu na eksplozivnu energiju rezervoara [214]. *Mébarki et al.* tvrde da je verovatnoća pojave fragmenta sa udelom kinetičke energije od 22% do 24% manja od 1%. Prethodno navedeni podaci govore o priličnom rasipanju inicijalne brzine i međusobnoj nesaglasnosti rezultata. *Hauptmanns* procenu rizika usled udara fragmenata bazira na njihovoj kinetičkoj energiji [214]. Bitni parametri za validnu procenu mehaničkog oštećenja susednih objekata moraju obuhvatiti pravac i ubrzanje pri udaru fragmenta. *Mébarki et al.* istražuju uticaj pravca fragmenta, dok efekat ubrzanja zanemaruju [215]. *Gubinelli and Cozzani* analiziraju konfiguraciju fragmenata i konstatuju da u 55% slučajeva nastaje odvajanje danceta od cilindričnog dela rezervoara [216]. Isti autori na uzorku od 140 akcidenata procenjuju broj generisanih fragmenata određene fragmentacione konfiguracije i predlažu model za određivanje koeficijenta otpora [217].

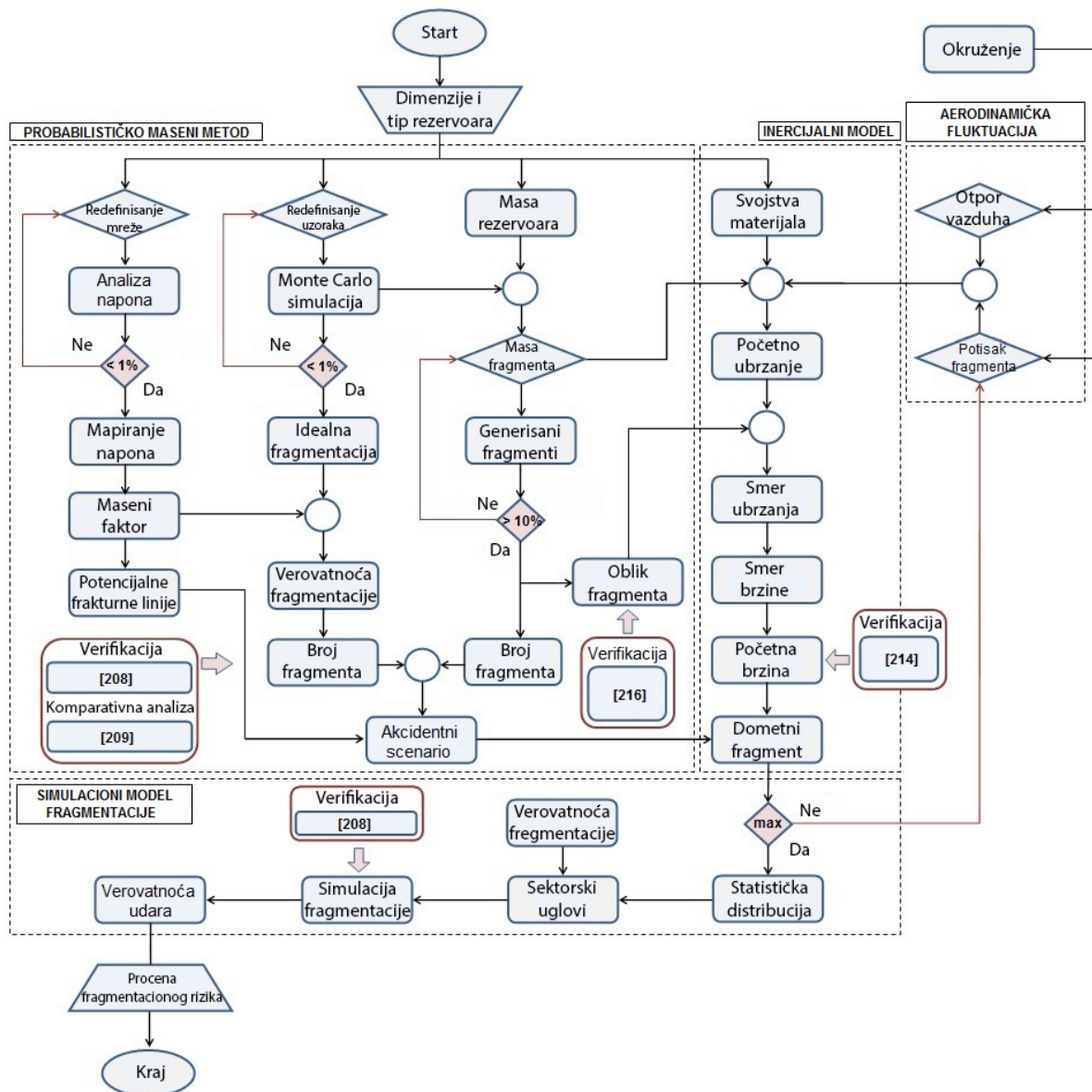
Inicijalni pravac i brzina fragmenata pri fragmentaciji posuda pod pritiskom predstavlja značajnu informaciju za kvantitativnu procenu rizika usled oštećenja procesnih instalacija [218]. *Tugnoli et al.* su koristeći prethodno iznete metodologije izvršili procenu rizika usled dejstva fragmenata na studiji slučaja *Mediterranea Refinery in Milazzo, Italy* [219]. Eksperimentalnu analizu pri eksploziji rezervoara za TNG je realizovao *Stawczyk* [220]. Hazardi usled fragmentacije vrlo često prouzrokuju sekvencijalni lanac domino efekata [221]. *Sun et al.* analiziraju višestruke domino scenarije prouzrokovane fragmentima [222]. U ovoj studiji je primenjena metodologija koju predlaže *Mébariki et al.* [223]. Jednačine trajektorije se izvode primenom uprošćenog modela [224], dok se fragmentacija interpretira Monte Carlo simulacijom. Autori ne daju dovoljno informacija o načinu integrisanja uprošćenog modela u simulacioni postupak i njegovim ograničenjima. Uticaj neodređenosti fragmentacionih parametara razmatraju *Zhang and Chen* [225]. Cilj predložene studije je razvoj potpuno nove metodologije za analizu fragmentacije u pogledu otklanjanja epistemičke neizvesnosti pojedinih parametara, ne umanjujući značaj prethodno navedenih istraživanja.

6.4.1. METODOLOŠKI PRISTUP

Postrojenja procesne industrije su vrlo osetljivi sistemi u pogledu nastanka domino efekta, a čija procena rizika zahteva identifikaciju fragmentacionih hazarda. Najzastupljenija oprema procesnih postrojenja se odnosi na posude pod pritiskom koje mogu biti različitog oblika (cilindrične horizontalne, cilindrične vertikalne, sferne i dr.). Eksploziju posuda pod pritiskom prati fragmentacioni efekat koji može ugroziti objekte na većim udaljenostima [218]. Kompleksnost fragmentacionog mehanizma u sprezi sa visokim stepenom neizvesnosti oblika, inicijalne brzine, pravca inicijalne brzine, koeficijenta aerodinamičkog otpora i potiska fragmenta znatno otežava pouzdanu procenu rizika. Poslednjih nekoliko godina su učinjeni veliki naponi u otklanjanju neizvesnosti fragmentacionih parametara, prevashodno sa aspekta koeficijenta otpora vazduha i pravca inicijalne brzine [217]. Izloženi metodološki pristup predstavlja kontinuitet ovih istraživanja kako bi se identifikovali parametri aleatoričke i epistemičke neizvesnosti.

Metodološki okvir za identifikaciju fragmentacionog rizika omogućava definisanje geometrije i kinematike generisanih fragmenata. Konceptija metodološke strukture istraživanja obuhvata integraciju probabilističko masenog metoda (PBM), inercijalnog modela, aerodinamičke fluktuacije i simulacionog modela fragmentacije. PBM ima najznačajniju ulogu u fragmentacionoj analizi rezervoara, a baziran je na Monte Carlo simulaciji i naponskoj analizi. Monte Carlo simulacija daje verovatnoće generisanih fragmenata u uslovima idealne fragmentacije. Korekcija ovih verovatnoća je uslovljena stepenom neravnomernosti naprezanja i vrše se preko procenjenih masenih faktora koristeći naponsku analizu rezervoara. Mapiranje napona se sprovodi radi identifikacije potencijalnih frakturnih linija usled različitih vrsta naprezanja, kao što su unutrašnji pritisak, požar, udar fragmenata i sl. Fragmentacione verovatnoće rezervoara se dobijaju kombinacijom rezultata idealne fragmentacije sa masenim faktorima. Ove verovatnoće pokazuju širenje frakturnih linija duž razmatranih segmenata rezervoara. Broj i veličina ovih segmenata se određuje u odnosu na nominalni napon. Nominalni napon predstavlja prosečnu vrednost naprezanja koje dominira na većem delu rezervoara. Maksimalna frakturna verovatnoća odgovara najvećem segmentu, bez širenja na ostale segmente i opada sa porastom broja generisanih fragmenata. Fragmentacione verovatnoće rezervoara su važan rezultat probabilističko masenog metoda, jer omogućavaju predviđanje raspodele broja generisanih fragmenata. Verifikacija i komparativna analiza broja generisanih fragmenata rezervoara je izvršena prema akcidentnim podacima [208] i entropijskom modelu [209]. Drugi aspekt implementacije Monte Carlo simulacije je usmeren na određivanje oblika generisanih fragmenata koji odgovaraju najverovatnijim akcidentnim scenarijima (preko 10%). Oblik fragmenta povezuje PBM sa inercijalnim modelom posredstvom pravca inicijalnog ubrzanja. Validnost najverovatnijih fragmentacionih oblika je sprovedena prema [216]. Svrha inercijalnog modela je da u potpunosti definiše kinematske parametre fragmentacije sa posebnim akcentom na identifikaciji pravca i intenziteta inicijalne brzine. Aerodinamička fluktuacija u dinamici leta ima bitnu ulogu na domet fragmenata i oblik njegove trajektorije.

Fluktuacija otpora vazduha i potiska fragmenta se analizira statističkom simulacijom na reprezentativnom uzorku trajektorija. Ove trajektorije su dobijene ravnomernim variranjem koeficijenata otpora vazduha i potiska fragmenata između graničnih vrednosti. Minimalne i maksimalne vrednosti koeficijenta otpora vazduha su određene u skladu sa opštim preporukama [207]. Koeficijent potiska ima nultu minimalnu vrednost, dok je maksimalna vrednost određena špicastim oblikom trajektorije. Simulacioni model fragmentacije je završni korak integrisanog metodološkog pristupa za identifikaciju fragmentacionih hazarda koji je zasnovan na statističkoj raspodeli dometa i sektorskih zona. Sektorske zone čine oblasti unutar kojih padaju fragmenti generisani iz određenih segmenata rezervoara. Tako je svrha uvođenja segmenata kao fiktivnih delova rezervoara dvostruka, prvobitno se koristi za definisanje masenih faktora, a zatim za procenu sektorskih uglova. Uloga fragmentacionih verovatnoća je takođe dvojaka, koristi se radi predviđanja broja generisanih fragmenata i za određivanje sektorskih uglova. Između probablističko masenog metoda i simulacionog modela fragmentacije postoji direktna i indirektna zavisnost. Indirektna zavisnost je ostvarena preko inercijalnog modela, dok je direktna veza uspostavljena preko sektorskih uglova. Time su svi ključni parametri fragmenata ugrađeni u simulacioni proces fragmentacije. Verifikacija simulacionih rezultata je sprovedena preko gustine generisanih fragmenata [208].

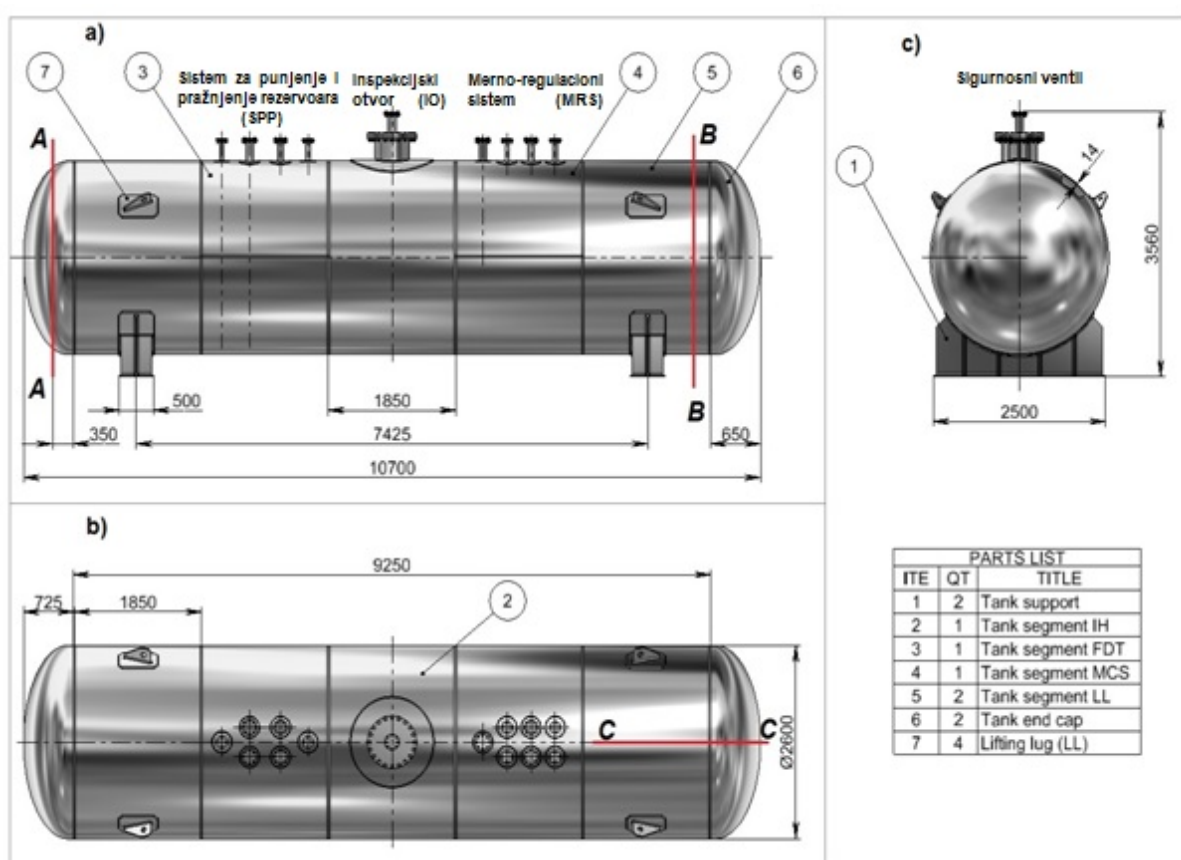


Slika 6.4. Algoritam metodološkog pristupa za procenu fragmentacionog rizika posuda pod pritiskom

Primena izloženog metodološkog pristupa ne važi za instalacije kod kojih uzrok eksplozije nije posledica kritičnog pritiska, poput procesne opreme za visoko zagrejane ugljovodonike. Ovu opremu tokom procesa duboke prerade sirove nafte karakteriše interakcija između vodonika radnog medijuma sa ugljenikom iz čelika dovodeći do korozivnog delovanja, što nije obuhvaćeno analizom. Prikazani fragmentacioni metod se može primeniti na sve oblike posuda pod pritiskom izloženih požaru prema proceduri koja je definisana algoritmom (Slika 1). Detaljnija analiza proceduralnih koraka sa konkretnim objašnjenjima je izložena na studiji slučaja.

6.5. CILINDRIČNI REZERVOAR ZA TNG

Identifikacija mehanizma fragmentacije i procena rizika usled eksplozije rezervoara se razmatra za rezervoar sa slike 6.5. Analizirani cilindrični rezervoar je projektovan i testiran u skladu sa normom EN 13445, a čije su konstruktivne dimenzije i kritične zone prikazane na slici 6.5.



Slika 6.5. Horizontalni cilindrični rezervoar sa eliptičkim dancima prema DIN 28013

6.5.1. KRITIČNE ZONE REZERVOARA

Kritične zone cilindričnog rezervoara se procenjuju prema (6.12) - (6.14), izvedenih na bazi podloga datih u [226]. Procedura izvođenja ovih jednačina je data u Prilogu A.

$$\sigma_x = \left[1 + \frac{3}{2} \frac{1}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{D}{2h} \right)^2 e^{-\lambda x} \sin(\lambda x) \right] \cdot \left(\frac{Dp}{4\delta} \right) = 46.5p \quad (6.12)$$

$$\sigma_{\theta} = \left[1 + \frac{1}{4} \left(\frac{3\nu \sin(\lambda x)}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} - \cos(\lambda x) \right) \left(\frac{D}{2h} \right)^2 e^{-\lambda x} \right] \cdot \left(\frac{Dp}{2\delta} \right) = 92.5p \quad (6.13)$$

$$\sigma_{cr} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_{\theta}^2 - \sigma_x \sigma_{\theta} + \frac{3}{2} (\sigma_x - \sigma_{\theta})^2} = 98 \cdot p_{cr} \quad (6.14)$$

Gde je koeficijent λ :

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{12(1-\nu^2)}{D^2 \delta^2}} \quad (6.15)$$

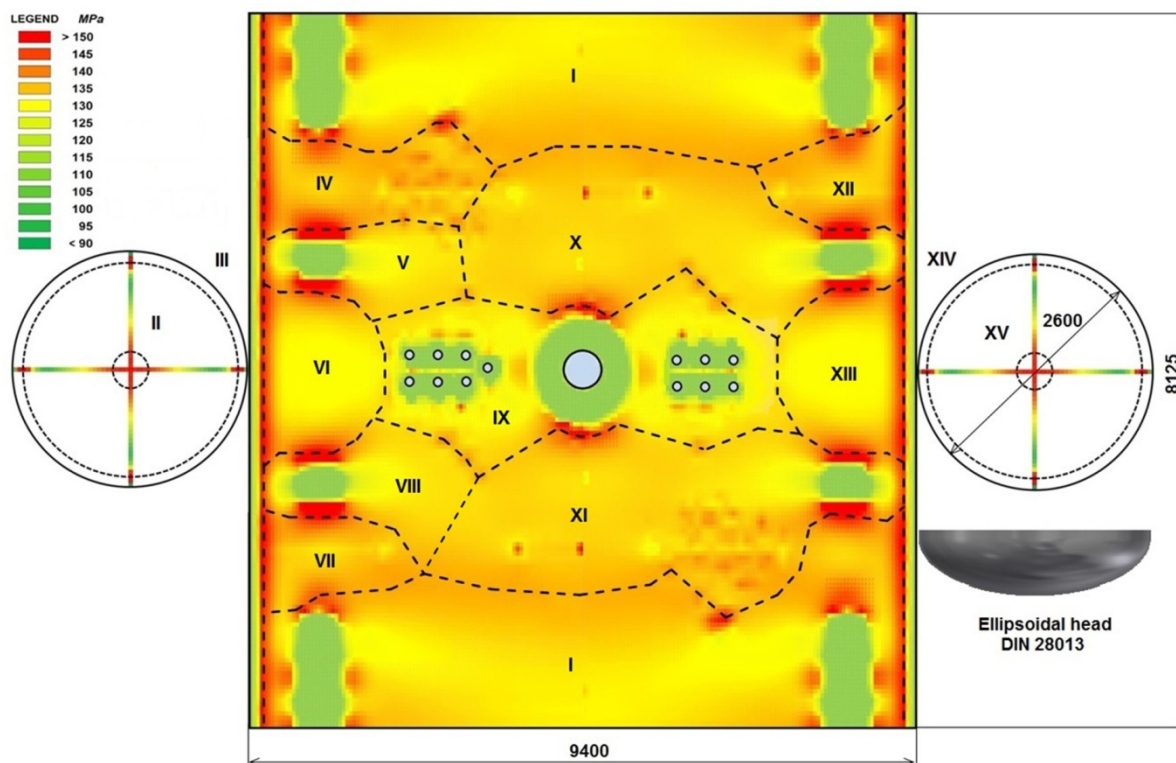
Merodavan napon za dimenzionisanje suda pod pritiskom je dat sa (6.14). Dopušteni napon rezervoara za S355J2G3 iznosi 195,83 MPa. Maksimalni radni pritisak prema (6.13) je 1,88 MPa, dok EN 13445-3 predviđa 2,12 MPa. Radni pritisak rezervoara za skladištenje TNG-a se kreće od 16,4 do 16,9 bar (prosečno 16,7 bar). Racionalno projektovane rezervoare karakteriše minimalna razlika $\sigma_{x,max}$ i $\sigma_{\theta,max}$ koja se postiže odnosom $D/2h$. Razmatrani primer ima $D/2h = 2$, pa je $\sigma_{\theta,max}/\sigma_{x,max} = 4\%$. Merodavna kritična zona je uslovljena kriterijumom $(D/2h) = 2,086$. Kritična zona 1 se razmatra samo ako su danca rezervoara eliptička i torisferična. Tada je uvek $(D/2h) < 2$, pa fragmentaciju najčešće prati odvajanje danca od cilindra rezervoara usled širenja frakturnih linija po obimu ($\sigma_{\theta} > \sigma_x$). Kritična zona 3 dominira kada je $\sigma_{\theta} < \sigma_x$ (sferično dance), u suprotnom je merodavan presek B-B (slika 6.5). Procena kritičnih zona prema (6.12) i (6.13) je ograničena na generisanje manjeg broja fragmenata usled BLEVE efekata. Realno naprezanje rezervoara odstupa od (6.12) i (6.13) usled osne nesimetričnosti. Zato fragmenatacija rezervoara u opštem slučaju zahteva identifikaciju realnog naprezanja preko softverske strukturne analize.

Tabela 6.2. Mehanička i hemijska svojstva za S355J2G3 prema EN 10025-2

| Mehanička svojstva | Jačina tečenja R_e | Zatezna čvrstoća R_m [MPa] | | Elongacija E_l | Min. temperatura T_{min} [°C] | | Min. adsorbovana energija E_{abs} [J] |
|--------------------|-----------------------|------------------------------|------|------------------|---------------------------------|------|-----------------------------------------|
| | [MPa] | | | [%] | | | |
| | 355 | 470-630 | | 22 | -20 | | 27 |
| Hemijska svojstva | Hemijski elementi [%] | | | | | | Zavrljivost [%] |
| | C | Mn | Si | P | S | Cu | CEV |
| | 0.20 | 1.60 | 0.55 | 0.03 | 0.03 | 0.55 | 0.45 |

6.5.2. PROCENA FRAKTURALNIH LINIJA

Procena frakturnih linija je neophodna u pogledu definisanja oblika i veličine fragmenata. Realizuje se postupkom mapiranja svih zona rezervoara. Vrednosti mapiranja odgovaraju naprezanju rezervoara generisanih na bazi strukturalne analize u softveru ANSYS sa veličinom mreže od 50 mm. Širenje potencijalnih frakturnih linija se odvija u zonama preko 135 MPa (slika 6.7). Kritične zone definišu potencijalne frakturne linije u skladu sa naponskim stanjem rezervoara. Konfiguraciju potencijalnih frakturnih linija prate zone izrazitih naprezanja rezervoara. Identifikacija naponskog stanja rezervoara je sprovedena za radni pritisak od 16.7 bar u softveru ANSYS v15. Neravnomernost naprezanja je posledica funkcionalnih i konstrukcionih zahetva rezervoara, kao što su inspekcijski otvor, instalacioni priključci, prelazak cilindričnog dela u eliptička danca, oslonci, lifting lugs i dr. Ova neravnomernost uzrokuje nastanak zone izrazitog naprezanja (crveni i narandžasti nivoi) i zone umerenog naprezanja (žuti nivo). Širenje frakturnih linija se odvija duž zona izrazitog naprezanja (preko 135 MPa), pošto u njima dominira vrednost von Mises napona. Razmatrani cilindrični rezervoar je shodno tome podeljen na ukupno 15 frakturnih zona čija kombinacija određuje potencijalne fragmente. Konfiguracija frakturnih linija i tipični oblici frakturnih zona rezervoara su ilustrovani na slici 6.6.



Slika 6.6. Potencijalne frakturane linije rezervoara

6.5.3. FRAGMENTACIONI MEHANIZAM

Fragmentacioni mehanizam podrazumeva identifikaciju geometrijskih parametara koji služe kao podloga za validnu kinematsku analizu i procenu rizika usled udara fragmenata. Oblik fragmenta je geometrijski parametar rezervoara koji utiče na početni ugao inercijalnog ubrzanja ψ_0 (slika 6.10). Domet i oblik trajektorije direktno zavisi od ovog ugla koji se svrstava u osnovne kinematske parametre. Pouzdana procena oblika fragmenta se vrši na bazi potencijalnih frakturalnih linija i njegove mase. Predloženi probabilistički koncept u nastavku otvara široke mogućnosti za nezavisnu fragmentacionu analizu i verifikaciju sa postojećim akcidentnim podacima. Osnovni razlog za uvođenje inicijalnog ubrzanja fragmenata pri analizi eksplozije rezervoara se nalazi u prirodi nastanka fenomena fragmentacije. Eksplozivno odejstvo lako zapaljivog fluida u rezervoaru se manifestuje njegovim razaranjem kroz formu fragmentacije, pri čemu svaki od razorenih parčića rezervoara (fragmenata) ima svoju jedinstvenu putanju. Kretanje fragmenata se realizuje pod uticajem sile impulsnog opterećenja F , stvorenog usled minimalnog kritičnog pritiska p_{cr} i raspoređenog po površini generisanog fragmenta A , a čija prosečna vrednost iznosi $F_a = p_{cr} \cdot A$. Ova sila delujući na fragment mase m stvara ubrzanje a_o intenziteta:

$$a_o = \frac{F}{m} = \frac{p_{cr}}{\rho \delta} = \frac{R_m}{98 \rho \delta} = const \quad (6.16)$$

Prethodni izraz pokazuje da je inicijalno ubrzanje konstantna veličina za određeni tip rezervoara i da pri njegovoj eksploziji svaki fragment karakteriše ista promena brzine u jedinici vremena. Inicijalno ubrzanje fragmenata pri eksploziji razmatranog rezervoara iznosi $22048 m/s^2$. Inercijalne sile fragmenata su međusobno različite, imajući u vidu njihove različite mase. Veća masa stvara veću inercijalnu silu, pa će domet takvih fragmenata biti manji u odnosu na fragmente manje mase. Ovde treba imati u vidu da manji fragmenti u principu imaju i manju površinu, pa je kod takvog fragmenta manji otpor vazduha. Ovaj pristup razmatranja i rezonovanja je u potpunosti saglasan sa eksperimentalnim rezultatima i akcidentnim analizama.

Prednost uvođenja inicijalnog ubrzanja pri analizi fragmentacije se ogleda u korišćenju minimalnog kritičnog pritiska p_{cr} koji je karakteristika tipa rezervoara, a ne generisane eksplozivne energije. Naime, eksplozivni pritisak unutar rezervoara p_e zavisi od eksplozivne energije i opterećuje ga samo do vrednosti p_{cr} kada nastupa fragmentacija. Nakon pojave naprsline eksplozivni pritisak naglo opada, pa je kod fragmentacije uvek ispunjen uslov $p_{cr} \ll p_e$. Dakle, za efekat fragmentacije rezervoara je merodavan pritisak p_{cr} koji se dovoljno egzaktno može proceniti na bazi naponskog stanja samog rezervoara, dok je odnos pritiska p_{cr} i p_e bitan za definisanje broja generisanih fragmenata. Primena koncepta inicijalnog ubrzanja fragmenta umesto početne brzine ne zahteva procenu udela njegove kinetičke energije, pa je definisanje osnovnih kinematskih parametara u procesu fragmentacije rezervoara znatno lakše i preciznije. Posebno treba istaći da proračun inicijalnog ubrzanja ne uključuje masu fragmenta, što se vrlo povoljno odražava na tačnost dobijenih rezultata. Određivanje inicijalne brzine preko udela kinetičke energije zahteva uključivanje i njegove mase, čija vrednost ima znatno rasipanje usled orjentacionih procena ulaznih parametara. Ovo je glavni argument zašto treba ubrzanje fragmenta uvrstiti kao osnovni kinematski parametar u procesu fragmentacije rezervoara, a ne njegovu inicijalnu brzinu. Osim toga, takav pristup ništa suštinski ne menja u pogledu identifikacije ostalih kinematskih parametara za date početne uslove, jer se brzina i koordinate težišta svakog od fragmenata dobijaju postupkom numeričke integracije. Bitnu ulogu pri fragmentaciji rezervoara ima vrsta opterećenja odnosno način stvaranja pritiska unutar njega. Postoje dva karakteristična slučaja opterećenja rezervoara i to kada je unutrašnji pritisak statički (kvazistatički) i dinamički. Uticaj karaktera naprežavanja odnosno pritiska rezervoara se direktno odražava na broj generisanih fragmenata, dok nema značajnijeg uticaja na kinematske veličine.

Kvazistatički pritisak fragmentacije nastaje pri postepenom povećanju pritiska fluida sve dok ne dođe do frakture rezervoara. Razaranje rezervoara pri kvazistatičkom pritisku odlikuje odsustvo fragmentacije, jer kada pritisak dostigne kritičnu vrednost, nastaje pucanje omotača u kritičnoj zoni. To je zona sa najizraženijom koncentracijom napona u površinskom sloju rezervoara koja je predodređena da bude mesto pucanja usled potencijalnih grešaka (prslina, grešaka u zavarenom šavu, korozije i sl.). Razaranje rezervoara usled dinamičkog pritiska karakteriše proces detonacije i pojava sfernog longitudinalnog talasa velike frontalne brzine (i do nekoliko km/s). Brzina prostiranja longitudinalnog talasa kroz čelični rezervoar iznosi svega $c = (E/\rho)^{0.5} = 163,6 m/s$ i najčešće je za ceo red veličina manja od brzine detonacijskog talasa. Ova činjenica navodi na zaključak da su pri dinamičkom pritisku najopterećenije unutrašnje zone rezervoara, dok je za njegovo prenošenje u površinske slojeve potrebno vreme $t = \delta/c = 8,55 \cdot 10^{-5} s$. Detonacijski talas za to vreme može preći dužinu od $\Delta R = 85,5 mm$, ako se pretpostavi da je njegova brzina $1 km/s$.

Sasvim je očigledno da će pri ovim uslovima radijalna deformacija rezervoara imati vrednost $\varepsilon_\theta = \Delta R/R = 6,3 \%$ koju ni teorijski nije moguće ostvariti, jer razaranje rezervoara nastaje pri znatno manjoj deformaciji $\varepsilon_{\theta, failure} = [1 - D/(2\delta)] \cdot (R_m/E) = 0,025 \%$. Ove numeričke vrednosti trebaju da obrazlože razlog nastajanja većeg broja fragmenata pri eksplozivnoj fragmentaciji i da taj broj raste sa brzinom detonacijskog udarnog talasa. Kvazistatički pritisak ima dovoljno vremena da nađe izvor koncentracije napona u površinskom sloju, odakle kreće širenje prslina i fraktura rezervoara (cilindrični deo – omotač). Dinamički pritisak manifestovan preko udarnog detonacijskog talasa usled eksplozije nema dovoljno vremena da nađe najkritičniji izvor koncentracije napona koji se najčešće nalazi sa spoljne strane rezervoara, već pronalazi lokalne sa unutrašnje strane cilindra (to su najčešće mesta izražene korozije), odakle kreće formiranje linije pucanja. Naponske linije pre nego što se lokalizuju u jednu kritičnu zonu na površinskom sloju, bivaju prekinute usled plastične deformacije odnosno frakture rezervoara. Dakle, relativno sporo prostiranje naponskog toka kroz debljinu omotača i velika brzina detonacijskog talasa su osnovni uzročnici generisanja većeg broja fragmenata. Naravno, što su ovi kontrasti izraženiji, to će broj primarno generisanih fragmenata biti veći.

6.5.4. IDEALNA FRAGMENTACIJA REZERVOARA

Broj generisanih fragmenata i njihova masa su najčešće razmatrane karakteristike fragmentacije sa značajnim izvorom literaturnih podataka [209]. Entropijski modeli zahtevaju poznavanje srednje vrednosti i disperzije na osnovu akcidentnih ili drugih izvora, što je ujedno i njihov najveći nedostatak. Raspodela idealne fragmentacije rezervoara je formirana postupkom statističke simulacije koristeći 110000 uzoraka. Stohastičku raspodelu broja fragmenata koja odgovara uniformnom naponskom stanju i idealnoj čvrstoći materijala rezervoara definišu sledeće verovatnoće (slika 6.8): jedan fragment (1/2), dva fragmenta (1/3), tri fragmenta (1/8), četiri fragmenta (1/30), pet fragmenata (1/150), šest fragmenata (1/800), itd. Kumulativna verovatnoća da će pri navedenim uslovima doći do generisanja više od šest fragmenata iznosi $4,17 \cdot 10^{-4}$, pa navođenje verovatnoća ostalih pojedinačnih fragmenata (sedam, osam, itd.) nema naročitog praktičnog značaja. Ovi rezultati su implementirani u probabilistički maseni metod.

6.5.5. PROBABILISTIČKI MASENI METOD

Realna fragmentacija rezervoara ne odgovara principu idealne raspodele mase, jer postoje zone različitih nivoa naprezanja kao posledica uticaja oslonaca, inspekcijskog otvora (IO), merno-regulacionog sistema (MRS), sistema za punjenje i pražnjenje rezervoara (SPP) i ušica za dizanje. Svrha predloženog metoda je predviđanje broja fragmenata zavisno od konstrukcionih tipova rezervoara. Implementacija probabilističko-masenog metoda (PBM) se sprovodi u četiri koraka: 1) Formiranje najmanje tri segmenta rezervoara različitog naponskog stanja; 2) Procena mase segmenata u odnosu na masu rezervoara preko masenog faktora; 3) Određivanje verovatnoće razaranja svakog segmenta; 4) Kalkulacija uslovnih verovatnoća razaranja za svaki scenario fragmentacije i 5) Definisane fragmentacionih verovatnoća rezervoara. Faktor mase se definiše kao odnos mase pojedinih fragmenata prema ukupnoj masi rezervoara. Faktorom mase se određuje verovatnoća razaranja segmenata, prema dijagramu idealne raspodele sa slike 6.8. Svaki segment može uzeti dva stanja: došlo je do razaranja (DA) i nije došlo do razaranja (NE), što daje $2^3 = 8$ varijacija (tabela 6.3). Uslovne verovatnoće pokazuju mogućnost realizacije svake varijacije na osnovu raspodele individualnih oštećenja segmenata.

Tabela 6.3. Varijante oštećenja segmenata

| Varijacija | Frakture na segmentu 1, ako su segmenti 2 i 3 oštećeni | | |
|---------------|--------------------------------------------------------|------|------|
| Segment broj | 1 | 2 | 3 |
| Maseni faktor | 0,70 | 0,15 | 0,15 |
| V1 | DA | NE | NE |
| V2 | DA | NE | DA |
| V3 | DA | DA | NE |
| V4 | DA | DA | DA |
| V5 | NE | NE | NE |
| V6 | NE | NE | DA |
| V7 | NE | DA | NE |
| V8 | NE | DA | DA |

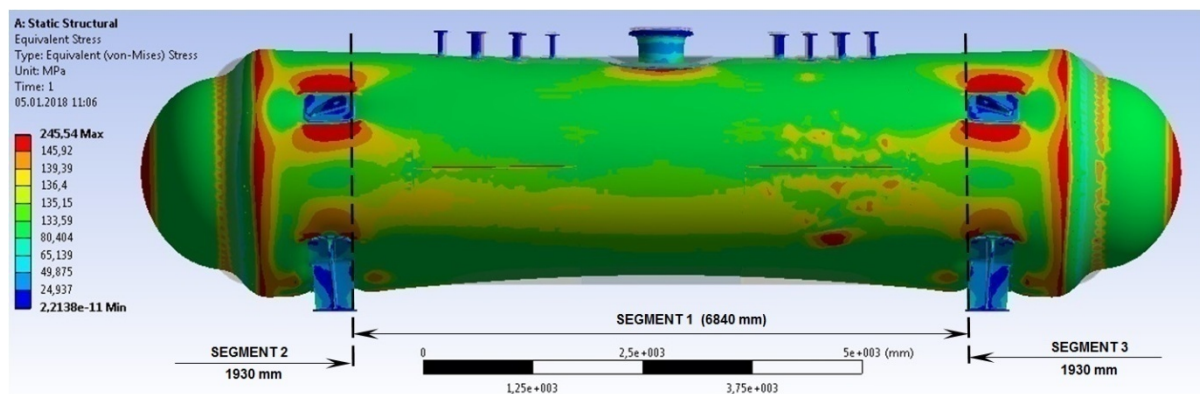
Izložena procedura za razmatranu studiju slučaja je sistematizovana u tabeli 6.4. Formiranje segmenata rezervoara se vrši na bazi strukturne analize rezervoara. Segment 1 čini cilindrični deo između oslonaca u dužini od 6840 mm na kome naprezanje ne prelazi 135 MPa. Segmente 2 i 3 čine rubni delovi rezervoara dužine 1930 mm (bez oslonaca i ušica za dizanje) i obuhvata kritične zone (slika 6.4). Softverska statička strukturna analiza rezervora je prikazana na slici 6.7. Crvene zone označavaju kritična mesta naprezanja rezervoara odakle postoji najveća verovatnoća širenja prslina. Softverska naponska analiza rezervoara je sprovedena sa ukupno 56489 konačnih elemenata tipa SHELL61 i radnim pritiskom od 16,7 bar. Konvergencija numeričkih rezultata u zavisnosti od veličine mreže je prikazana u tabeli 6.4. Rezultati su prihvatljivi za veličinu mreže ispod 100 mm.

Tabela 6.4

Konvergencija numeričkih rezultata u ANSYS-u

| Veličina mreže [mm] | 200 | 175 | 150 | 125 | 100 | 75 | 50 |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Kritični napon [MPa] | 22.95 | 25.10 | 25.59 | 23.22 | 24.50 | 24.54 | 24.55 |
| Konvergencija | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> |

Fragmentaciona verovatnoća rezervoara daje informacije o uslovima pri kome je došlo do generisanja fragmenata (npr. nastanak jednog fragmenta usled oštećenja prvog segmenta, bez obzira na stanje drugih iznosi 35%). Vrednosti fragmentacionih verovatnoća su pod nazivom predloženi metod predstavljene na slici 6.8.

**Slika 6.7.** Softverska simulacija kritičnih zona rezervoara (pritisak 16,7 MPa)

Istraživanje odnosa između broja i mase generisanih fragmenata pruža mogućnost uspostavljanja neposredne zavisnosti geometrijskih i kinematskih parametara fragmentacije. Probabilističko maseni metod (PBM) omogućava procenu broja generisanih fragmenata preko frakturnih verovatnoća segmenata datih u tabeli 6.5. Frakturne verovatnoće predstavljaju verovatnoće idealne fragmentacije koje su korigovane masenim faktorom. Maseni faktori reprezentuju frakturne verovatnoće unutar definisanih segmenata rezervoara i njihova procena se sprovodi prema mapiranim vrednostima napona. Maseni faktor za segment 1 razmatranog rezervoara iznosi 0,70 (tabela 6.3). Frakturne verovatnoće rezervoara su izvedene statističkom obradom na velikom broju slučajno generisanih uzoraka koristeći fragmente različitih masa. Frakturne verovatnoće po segmentima služe kao podloga za izvođenje uslovnih i fragmentacionih verovatnoća rezervoara neophodnih za kvantifikaciju potencijalnih scenarija.

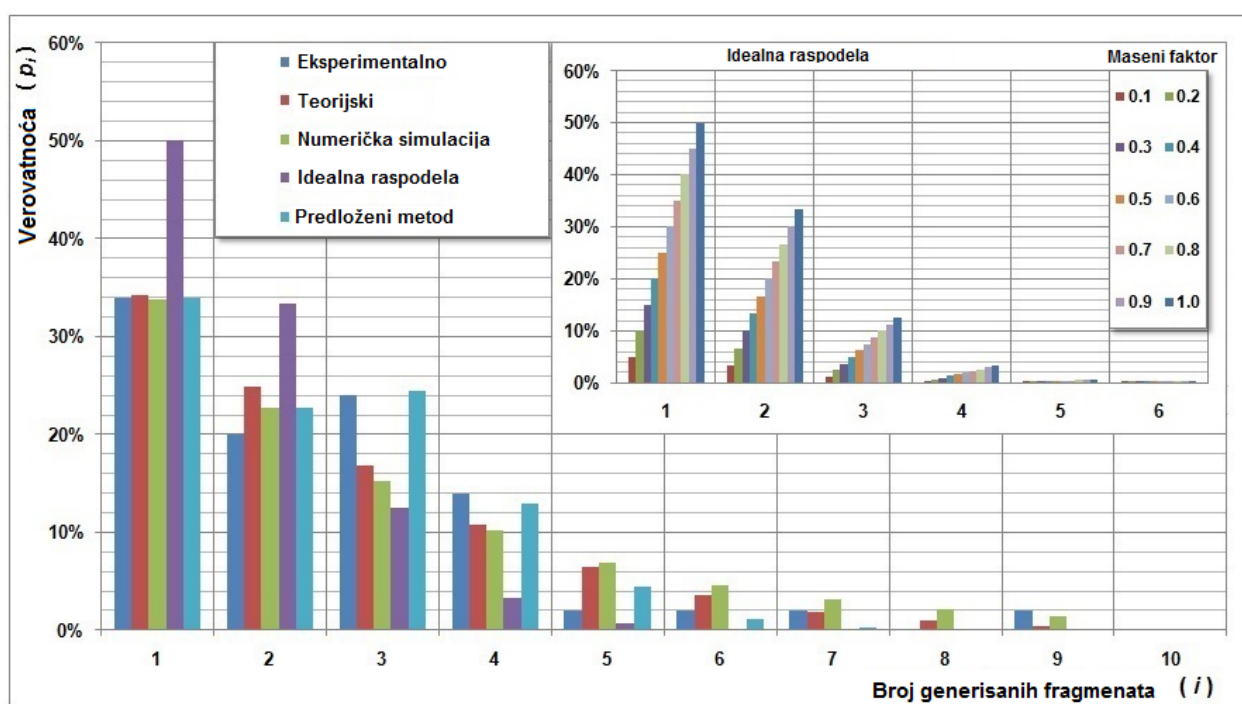
Osnovni princip kojim se rukovodi ovaj pristup procene broja generisanih fragmenata je zasnovan na sledećim hipotezama: 1) fraktura nastaje na onom segmentu rezervoara koga odlikuje veća frakturna verovatnoća, 2) fraktura mora obuhvatiti najveći segment rezervoara i 3) broj generisanih fragmenata iz pojedinih segmenata rezervoara mora rasti sa fragmentacionim modalitetom. Koristeći ove hipoteze u nastavku će biti izložen čisto teorijski okvir za predviđanje broja generisanih fragmenata kod cilindričnih rezervora. Frakturna verovatnoća koja odgovara generisanju samo jednog fragmenta na segmentu 1 rezervoara je 35 %, dok za segmente 2 i 3 ukupno iznosi 15 %. Dakle, veća frakturna verovatnoća prati segment 1 u odnosu na segmenate 2 i 3, pa će verovatnoća generisanja jednog fragmenta biti 35 %. Frakturna verovatnoća u slučaju generisanja dva fragmenta na segmentu 1 rezervoara iznosi 23,33 % naspram 10 % za segmente 2 i 3 istog moda fragmentacije. Potencijalni fragmentacioni scenariji pružaju mogućnost da jedan fragment bude generisan iz segmenta 1, a drugi iz segmenata 2 i 3 različitih fragmentacionih modaliteta. Verovatnoća generisanja fragmenta iz segmenata 2 i 3 za prvi fragmentacioni mod je 15 %. Maksimalna frakturna verovatnoća odgovara frakturi segmenta 1 za drugi fragmentacioni modalitet, pa je verovatnoća generisanja dva fragmenta 23,33%. Frakturna verovatnoća za treći fragmentacioni mod na segmentu 1 je 8,75%, dok na segmentima 2 i 3 iznosi 3,75%. Frakturnu verovatnoću iz segmenta 1 za treći mod treba uporediti sa korespondentnim verovatnoćama iz segmenata 2 i 3 za sva tri fragmentaciona moda koje respektivno iznose 15 %, 10 % i 3,75 %.

Tabela 6.5. Uslovna verovatnoća segmenata i fragmentaciona verovatnoća rezervoara

| Stavka | Maseni faktor za segment | | | Oštećenje S1, ako je oštećen S2 i S3 | | | Verovatnoća oštećenja za segment | | | Uslovna verovatnoća (1) (2 and 3) | Fragmentaciona verovatnoća rezervoara |
|------------------|--------------------------|------|------|--------------------------------------|----|----|----------------------------------|---------|---------|-----------------------------------|---------------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | S1 | S2 | S3 | S1 | S2 | S3 | | |
| JEDAN FRAGMENT | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | NE | NE | 0.35000 | 0.07500 | 0.07500 | 29,95% | 35.00% |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | NE | DA | 0.35000 | 0.07500 | 0.07500 | 2,43% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | DA | NE | 0.35000 | 0.07500 | 0.07500 | 2,43% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | DA | DA | 0.35000 | 0.07500 | 0.07500 | 0,20% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | NE | NE | 0.35000 | 0.07500 | 0.07500 | 55,62% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | NE | DA | 0.35000 | 0.07500 | 0.07500 | 4,51% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | DA | NE | 0.35000 | 0.07500 | 0.07500 | 4,51% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | DA | DA | 0.35000 | 0.07500 | 0.07500 | 0,37% | |
| DVA FRAGMENTA | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | NE | NE | 0.23333 | 0.05000 | 0.05000 | 21,06% | 23.33% |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | NE | DA | 0.23333 | 0.05000 | 0.05000 | 1,11% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | DA | NE | 0.23333 | 0.05000 | 0.05000 | 1,11% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | DA | DA | 0.23333 | 0.05000 | 0.05000 | 0,06% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | NE | NE | 0.23333 | 0.05000 | 0.05000 | 69,19% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | NE | DA | 0.23333 | 0.05000 | 0.05000 | 3,64% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | DA | NE | 0.23333 | 0.05000 | 0.05000 | 3,64% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | DA | DA | 0.23333 | 0.05000 | 0.05000 | 0,19% | |
| TRI FRAGMENTA | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | NE | NE | 0.08750 | 0.01875 | 0.01875 | 8,42% | 87.86% |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | NE | DA | 0.08750 | 0.01875 | 0.01875 | 0,16% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | DA | NE | 0.08750 | 0.01875 | 0.01875 | 0,16% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | DA | DA | 0.08750 | 0.01875 | 0.01875 | 0,00% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | NE | NE | 0.08750 | 0.01875 | 0.01875 | 87,86% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | NE | DA | 0.08750 | 0.01875 | 0.01875 | 1,68% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | DA | NE | 0.08750 | 0.01875 | 0.01875 | 1,68% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | DA | DA | 0.08750 | 0.01875 | 0.01875 | 0,03% | |
| ČETIRI FRAGMENTA | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | NE | NE | 0.02333 | 0.00500 | 0.00500 | 2,31% | 96.69% |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | NE | DA | 0.02333 | 0.00500 | 0.00500 | 0,01% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | DA | NE | 0.02333 | 0.00500 | 0.00500 | 0,01% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | DA | DA | 0.02333 | 0.00500 | 0.00500 | 0,00% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | NE | NE | 0.02333 | 0.00500 | 0.00500 | 96,69% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | NE | DA | 0.02333 | 0.00500 | 0.00500 | 0,49% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | DA | NE | 0.02333 | 0.00500 | 0.00500 | 0,49% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | DA | DA | 0.02333 | 0.00500 | 0.00500 | 0,00% | |
| PET FRAGMENTATA | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | NE | NE | 0.00466 | 0.00100 | 0.00100 | 0,47% | 99.33% |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | NE | DA | 0.00466 | 0.00100 | 0.00100 | 0,00% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | DA | NE | 0.00466 | 0.00100 | 0.00100 | 0,00% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | DA | DA | 0.00466 | 0.00100 | 0.00100 | 0,00% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | NE | NE | 0.00466 | 0.00100 | 0.00100 | 99,33% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | NE | DA | 0.00466 | 0.00100 | 0.00100 | 0,10% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | DA | NE | 0.00466 | 0.00100 | 0.00100 | 0,10% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | DA | DA | 0.00466 | 0.00100 | 0.00100 | 0,00% | |
| ŠEST FRAGMENTATA | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | NE | NE | 0.00087 | 0.00018 | 0.00018 | 0,09% | 99.88% |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | NE | DA | 0.00087 | 0.00018 | 0.00018 | 0,00% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | DA | NE | 0.00087 | 0.00018 | 0.00018 | 0,00% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | DA | DA | DA | 0.00087 | 0.00018 | 0.00018 | 0,00% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | NE | NE | 0.00087 | 0.00018 | 0.00018 | 99,88% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | NE | DA | 0.00087 | 0.00018 | 0.00018 | 0,02% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | DA | NE | 0.00087 | 0.00018 | 0.00018 | 0,02% | |
| | 0.70 | 0.15 | 0.15 | NE | DA | DA | 0.00087 | 0.00018 | 0.00018 | 0,00% | |

Treći fragmentacioni mod rezervoara prema uslovima postavljenih hipoteza može nastati ako su: a) sva tri fragmenta bar delimično na segmentu 1 (8,75 %) ili b) kada na jednom od segmenata 2 i 3 bude realizovan prvi fragmentacioni mod (7,5 %) ili c) kada na jednom od segmenata 2 i 3 bude realizovan drugi fragmentacioni mod (5,0 %).

Treći fragmentacioni modalitet rezervoara nastaje realizacijom jednog od prethodna tri događaja koji su sa vršnim (top) događajem u stablu otkaza povezana kapijom OR. Vršni događaj je treći fragmentacioni modalitet rezervoara čija se verovatnoća dobija sabiranjem $(8,75+7,5+5,0) \% = 21,25 \%$. Analognim postupkom se mogu dobiti verovatnoće i ostalih fragmentacionih modaliteta vodeći računa o uslovu treće hipoteze. Verifikacija i komparativna analiza rezultata predloženog metoda je izvršena prema eksperimentalnim i teorijskim podacima [209]. Eksperimentalne vrednosti odgovaraju akcidentnim podacima [208], dok su teorijske predstavljene entropijskim modelom [209]. Predloženi metod u kvalitativnom i kvantitativnom pogledu znatno bolje prati akcidentne podatke za manji broj fragmenata (do četiri), dok porast fragmentacionih modaliteta rezultate približava entropijskom modelu i numeričkoj simulaciji (slika 6.8). Fragmentaciona verovatnoća rezervoara daje informacije o uslovima pri kome je došlo do generisanja fragmenata (npr. nastanak jednog fragmenta usled oštećenja prvog segmenta, bez obzira na stanje drugih iznosi 35 %). Vrednosti fragmentacione verovatnoće su pod nazivom predloženi metod predstavljene na slici 6.8. Istraživanje odnosa između broja i mase generisanih fragmenata pruža mogućnost uspostavljanja neposredne zavisnosti geometrijskih i kinematskih parametara fragmentacije.

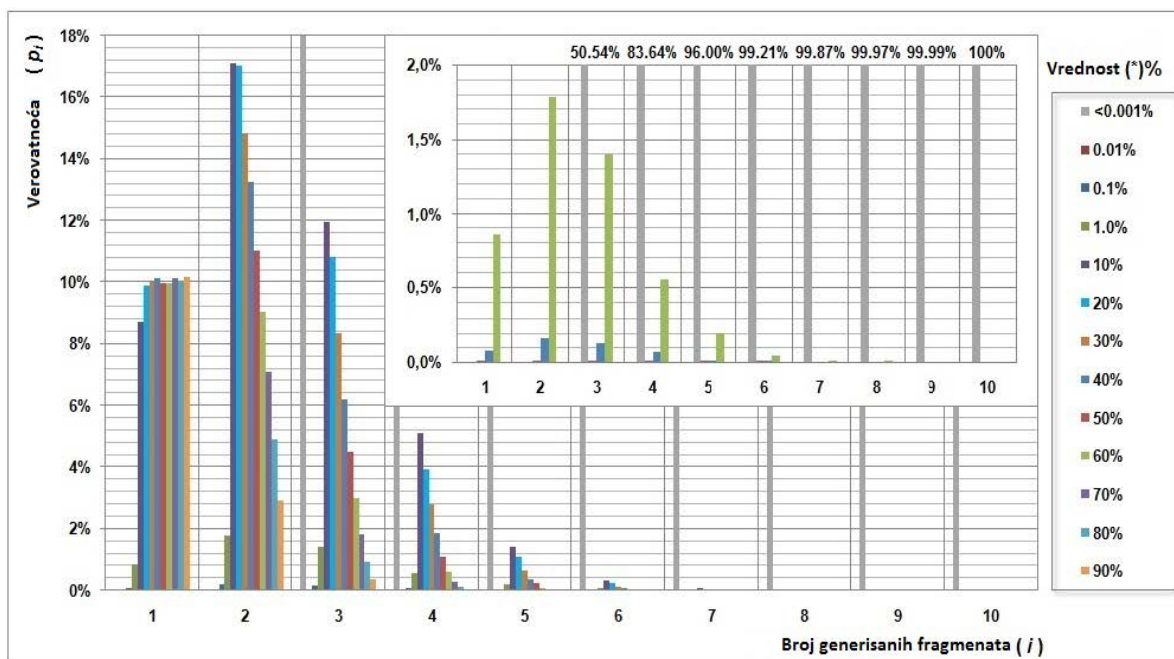


Slika 6.8. Raspodela broja generisanih fragmenata usled eksplozije cilindričnog rezervoara

6.5.6. ZAVISNOST BROJA I MASE FRAGMENTATA

Procena frakturalnih linija je ukazala na neophodnost uvođenja zavisnosti broja i mase fragmenata u analizu mehanizma fragmentacije. U tom kontekstu je usmeren kritički osvrt prema entropijskom modelu koji predlažu *Mébari* i ostali [209]. Uloga entropijskog modela se svodi na fitovanje akcidentnih podataka i radi dokaza istoga može poslužiti komparativna analiza teorijskih i simulacionih podataka (slika 6.8.). Numerička simulacija sa svega 1000 uzoraka daje kvalitativno i kvantitativno saglasnu raspodelu sa entropijskim rezultatima. Poseban značaj u analizi fragmentacije rezervoara ima zavisnost mase i broja generisanih fragmenata. Korelacija ova dva parametra je uspostavljena korišćenjem Monte Carlo simulacije sa 110000 uzoraka i omogućava procenu veličine fragmenata u skladu sa potencijalnim frakturalnim linijama za dati modalitet fragmentacije. Modaliteti fragmentacije su definisani brojem generisanih fragmenata usled eksplozije rezervoara. Najveća verovatnoća se javlja pri generisanju dva fragmenta iz fragmentacione mase između 1230 i 2460 kg i iznosi 17 %. Fragmentaciona masa se procenjuje na osnovu vrednosti (*) % u funkciji mase rezervoara, prema slici 6.9.

Veći broj fragmenata je isključivo rezervisan za fragmente mase do 0,123 kg. Generisanje jednog fragmenta mase 2460 kg i više karakteriše uniformna raspodela odnosno aleatorička neizvesnost sa verovatnoćom nastanka od 12%. Maksimalna verovatnoća fragmentacije prati generisanje dva i tri fragmenta čiji su ukupni procentualni maseni udeli u rasponu od 10-50 % i od 10-20 %, respektivno. Iz ovoga proizilazi znatno manja masa za tri nego za dva generisana fragmenta iste fragmentacione verovatnoće. Zato u slučaju generisanja većeg broja fragmenta (preko 3) ima praktičnog značaja razmatrati segmente 2 i 3 iz prethodnih fragmentacionih modaliteta, kao što je izloženo u delu 6.5.5.



Slika 6.9. Verovatnoća generisanja fragmenata u funkciji raspodele mase

Prethodni rezultati koji se tiču analize broja generisanih fragmenata, potencijalnih frakturalnih linija kao i zavisnosti fragmentacionih verovatnoća od broja i i masenih udela fragmenata su integrisani radi procene tipičnih fragmentacionih oblika (tabela 6.6). Prikazani oblici fragmenata su posledica najverovatnijih akcidentnih scenarija i njihova validacija je izvršena prema fragmentacionim obrascima datim u [216]. Uobičajeni fragmentacioni oblici usled BLEVE efekta sa osobinama generisanih fragmenata su prikazani u tabeli 6.6. Razmatrani fragmentacioni oblici obuhvataju najverovatnije akcidentne scenarije do tri generisana fragmenta. Validacija procenjenih fragmentacionih oblika je sprovedena komparativnom analizom koja obuhvata verovatnoću fragmentacije [216] i maseni udeo generisanih fragmenata [219]. Maseni udeo predstavlja odnos mase fragmenta prema ukupnoj masi rezervoara.

Najveće odstupanje masenih udela se odnosi na fragmente koji obuhvataju danca rezervoara. Akcidentni podaci prema [216] su dati za cilindrični rezervoar sa sferičnim dancetom čija je masa veća od mase eliptičkog danceta razmatranog rezervoara, pa iz tog razloga potiče navedeno odstupanje. Komparativna analiza fragmentacionih oblika je izvršena prema [216]. Odstupanje rezultata je najizraženije pri generisanju samo jednog fragmenta, što je posledica defekata usled prslina koji prate izvesan broj akcidenta [216]. Ovi defekti utiču na pojavu većeg broja BLEVE akcidenta sa samo jednim generisanim fragmentom. Predstavljeni model podrazumeva homogenost i podjednaku čvrstoću materijala, bez uticaja prslina usled korozije i drugih defekata, što je direktni razlog navedenog odstupanja. Akcidentni podaci prema kojima je izvršeno poređenje uključuju defekete usled prslina shodno eksplicitnim navodima u [216]. Ostale fragmentacione oblike prati dobra konzistentnost rezultata.

Tabela 6.6. Tipični oblici fragmenata rezervoara

| Broj fragmenata | Fragmentaciona konfiguracija Oblik fragmenata | Fragmentna masa [kg] | Inicijalni ugao [°] | Fragmentaciona verovatnoća [%] | Zona frakture |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|---------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 1 |  | 1350 | 32 | 9.10 | II+III+VI |
| 1 |  | 2050 | 34 | 10.00 | II+III+IV+V+VI |
| 1 |  | 3545 | 70 | 9.95 | II+III+IV+V+VI+VII+VIII+XI |
| 2 |  | 820 | 2 | 17.04 | II+III |
| | | 480 | 21 | | IV+V |
| 2 |  | 205 | -4 | 17.06 | VII+VIII |
| | | 2050 | 34 | | II+III+IV+V+VI |
| 2 |  | 1590 | 3 | 14.85 | II+III+IV+V+VI+VII |
| | | 2050 | 34 | | VIII+XI |
| 2 |  | 1365 | 35 | 13.00 | XIII+XIV+XV |
| | | 3545 | 70 | | II+III+IV+V+VI+VII+VIII+XI |
| 2 |  | 3545 | 70 | 11.00 | II+III+IV+V+VI+VII+VIII+XI |
| | | 2600 | 19 | | X+XII+XIII+XIV+XV |
| 3 |  | 190 | -5 | 12.00 | VII |
| | | 805 | 8 | | II+III |
| | | 235 | 33 | | V |
| 3 |  | 500 | 15 | 10.72 | VII+VIII |
| | | 1345 | 32 | | II+III+VI |
| | | 605 | 16 | | IV+V |

6.5.7. DINAMIKA LETA FRAGMENTA

Dinamička analiza obuhvata identifikaciju kinematskih parametara (trajektorije, brzine i ubrzanja) tokom leta fragmenta neophodnih za proračun dometa. Fragmentaciona procena rizika podrazumeva definisanje raspodele dometa rasprsnutih fragmenata sa odgovarajućim funkcijama gustine verovatnoće. Ova kompleksana procedura obuhvata pet koraka: definisanje početnih uslova, rešavanje jednačine kretanja, određivanje dometa za različite trajektorije fragmenata u funkciji varijabilnih parametara, statističku obradu dobijenih vrednosti dometa i numeričku simulaciju.

6.5.8. INERCIJALNI MODEL POČETNIH USLOVA

Početno ubrzanje fragmenata je osnovni kinematski parametar fragmentacije čiji intenzitet određuje geometrija i otpornost materijala rezervoara. Međutim, literatura iz oblasti fragmentacije rezervoara ne poznaje ovaj kinematski parametar, već umesto njega koristi inicijalnu brzinu fragmenata. Osnovni razlog za uvođenje inicijalnog ubrzanja fragmenata se nalazi u prirodi nastanka fragmentacije rezervoara. Kretanje fragmenata se realizuje pod uticajem sile impulsnog opterećenja F , stvorenog usled kritičnog pritiska p_{cr} i raspoređenog po površini generisanog fragmenta A , prosečne vrednosti $F_a = p_{cr} \cdot A$. Ova sila delujući na fragment mase m_{fr} stvara ubrzanje a_o intenziteta:

$$a_o = \frac{F}{m_{fr}} = \frac{p_{cr}}{\rho \delta} = \frac{R_m}{98 \rho \delta} = const \quad (6.17)$$

Prethodni izraz pokazuje da je inicijalno ubrzanje konstantna veličina za određeni tip rezervoar i da pri njegovoj eksploziji svaki fragment karakteriše ista promena brzine u jedinici vremena. Inicijalno ubrzanje fragmenata pri eksploziji razmatranog rezervoara je 22048 m/s^2 ($R_m = 252 \text{ MPa}$ pri 500°C). Inercijalne sile fragmenata su međusobno različite, imajući u vidu njihove različite mase. Prednost uvođenja inicijalnog ubrzanja se ogleda u korišćenju minimalnog kritičnog pritiska p_{cr} kao karakteristike rezervoara. Eksplozivni pritisak deluje na rezervoar samo do vrednosti p_{cr} kada nastupa fragmentacija. Nakon pojave naprsline eksplozivni pritisak unutar rezervoara naglo opada i manifestuje se u formi detonacijskog talasa. Primena koncepta inicijalnog ubrzanja fragmenta umesto početne brzine ne zahteva procenu eksplozivne energije, pa je definisanje osnovnih kinematskih parametara u procesu fragmentacije rezervoara znatno lakše i preciznije (tabela 6.7). Posebno treba istaći da proračun inicijalnog ubrzanja ne uključuje masu fragmenta, što se vrlo povoljno odražava na tačnost dobijenih rezultata. Ovo je glavni argument zašto u početne uslove fragmentacije treba uključiti ubrzanje umesto brzine fragmenta. Svrha uvođenja inicijalnog ubrzanja je elegantno definisanje početnih uslova (6.31) i (6.32) koristeći (6.27) - (6.29). Inercijalna brzina je osnovni kinematski parametar neophodan za definisanje trajektorije fragmenta i u literaturi se određuje preko udela ekspanzije energije αE [214] i [216]:

$$v_i = \sqrt{\frac{2\alpha E}{m_i}} = (\sqrt{\alpha}) \cdot \sqrt{\frac{2E}{m_i}} \quad (6.18)$$

Osnovni problem u implementaciji (6.18) je procena udela energije αE koja je predata fragmentu mase m_i preko koeficijenta α . Ne postoji jasna procedura za određivanje α , niti su definisani svi parametri koji utiču na njegove vrednosti, već se procenjuje iskustveno na bazi akcidentnih podataka. Literaturni podaci govore da ovaj koeficijent ima širok opseg vrednosti između 0,05 i 0,8 [218]. To znači da se prema (6.18) brzine fragmenata kreću između 22,4% i 89,4% od brzine individualno generisanog fragmenta. Eksploziju rezervoara u opštem slučaju prati generisanje n fragmenata, pa su tada brzine pojedinačnih fragmenata v_i date sa:

$$E = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 + \dots + \frac{1}{2} m_i v_i^2 + \dots + \frac{1}{2} m_n v_n^2 \Rightarrow v_i = \sqrt{\frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{m_{i+1}}{m_i} \right) \cdot \left(\frac{v_{i+1}}{v_i} \right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{2E}{m_i}} \quad (6.19)$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^n \left(\frac{m_{i+1}}{m_i} \right) \cdot \left(\frac{v_{i+1}}{v_i} \right)^2}, \quad 0 < \alpha < 1 \quad (6.20)$$

Dakle, faktor α nije moguće analitički definisati, jer su nepoznati odnosi brzina generisanih fragmenata. Dodatni problem predstavlja nepostojanje koncezusa u pogledu određivanja ekspanzione energije E prema različitim modelima (Brode, Beker, Baum i dr.) uzimajući u obzir njihove nedostatke [214]. Prethodno iznete činjenice vezane za održanje energije se mogu sagledati preko balansa količine kretanja i impulsa sile za svaki generisani fragment u toku eksplozije.

$$m_i \bar{v}_i = \bar{F}t \Leftrightarrow m_i \int_A \bar{v}_i d\bar{v}_i = \int_A (\bar{F} d\bar{v}_i) t \quad (6.21)$$

Kinetička energija fragmenata je posledica delovanja rada impulsne sile F tokom vremena t . Da bi došlo do eksplozije rezervoara, ekspanziona energija po unutrašnjoj površini rezervoara mora biti najmanje jednaka radu imuplsne sile čime se postiže ekvivalentnost (6.19) i (6.21). Fragmente generisane iz zona rezervoara približno konstantne debljine karakteriše indiferentnost inicijalnog ubrzanja od ostalih kinematskih parametara. Ekspanzioni pritisak prema principu minimalne entropije teži podjednakom ubrzanju svih fragmenta što utiče da impulsna sila raste sa masom povećavajući time inicijalnu brzinu. Fraktura fragmenata veće mase se odvija sporije u skladu sa odnosom inicijalnih brzina generisanih fragmenata. Transformacija udela ekspanzione energije rezervoara αE u kinetičku energiju fragmenta se kod inercijalnog modela razmatra preko impulsa $\bar{F}t$. Odnos impulsa i mase generisanog fragmenta daje inicijalnu brzinu čija promena u toku frakture reperezentuje inicijalno ubrzanje. Time se stiču uslovi da se faktor α interpretira preko inicijalnog ubrzanja i jednačina kretanja. Analiza dinamike leta sa inercijalnim modelom je alternativni način identifikacije inicijalne brzine bez korišćenja udela kinetičke energije αE ne menjajući uslove koji se tiču održanja energije i impulsa $\bar{F}t$.

Tabla 6.7. Zavisnost fragmentacionih parametra od temperature za masu fragmenta ($m_{fr} = 1300 \text{ kg}$)

| Parametri | Temperatura [$^{\circ}\text{C}$] | | | | | | | | | |
|----------------------------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|-----|
| | 20 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | 900 |
| Zatezna čvrstoća $R_m[\text{MPa}]$ | 500 | 496 | 469 | 427 | 373 | 252 | 117 | 53 | 23 | 11 |
| Kritični pritisak $p_{cr}[\text{bar}]$ | 48,1 | 47,7 | 45,1 | 41,1 | 35,9 | 24,2 | 11,3 | 5,1 | 2,2 | 1,1 |
| Početno ubrzanje $a_0[\text{m/s}^2]$ | 43746 | 43396 | 41034 | 37359 | 32635 | 22048 | 10237 | 4637 | 2012 | 962 |
| Početna brzina $v_0[\text{m/s}]$ | 2901 | 2889 | 2809 | 2680 | 2505 | 2059 | 1403 | 944 | 621 | 429 |

6.5.9. JEDNAČINA KRETANJA FRAGMENTA

Vektorski oblik jednačine kretanja fragmenta mase m_{fr} i brzine v_{fr} , glasi [223]:

$$m_{fr} \cdot \frac{d\bar{v}_{fr}}{dt} = \bar{W}_D + \bar{W}_L + \bar{G} \quad (6.22)$$

Sila otpora vazduha pri letu fragmenta je definisana izrazom [223]:

$$\bar{W}_D = -\left(\frac{1}{2} \rho_v C_D A_D v_{fr} \right) \cdot \bar{v}_{fr} \quad (6.23)$$

Sila uzgona fragmenta pri letu je [223]:

$$\bar{W}_L = -\left(\frac{1}{2} \rho_v C_L A_L v_{fr} \right) \cdot \bar{v}_{fr} \quad (6.24)$$

Let svih fragmenta se realizuje pod uticajem inercijalne, gravitacione, aerodinamičke i potisne sile, a radi jednostavnosti, trajektorije se analiziraju u vertikalnoj ravni Oyz lokalnog koordinatnog sistema $Oxyz$ (slika 6.10). Jednačine kretanja su date bez uticaja bočnog vetra, pa ova pretpostavka daje vrednosti dometa na strani sigurnost.

Projekcije vektorske jednačine kretanja (6.18) na ose lokalnog koordinatnog sistema su date u Prilogu B. Balansna jednačina inercijalnog ubrzanja sa aerodinamičkim i potisnim ubrzanjima je:

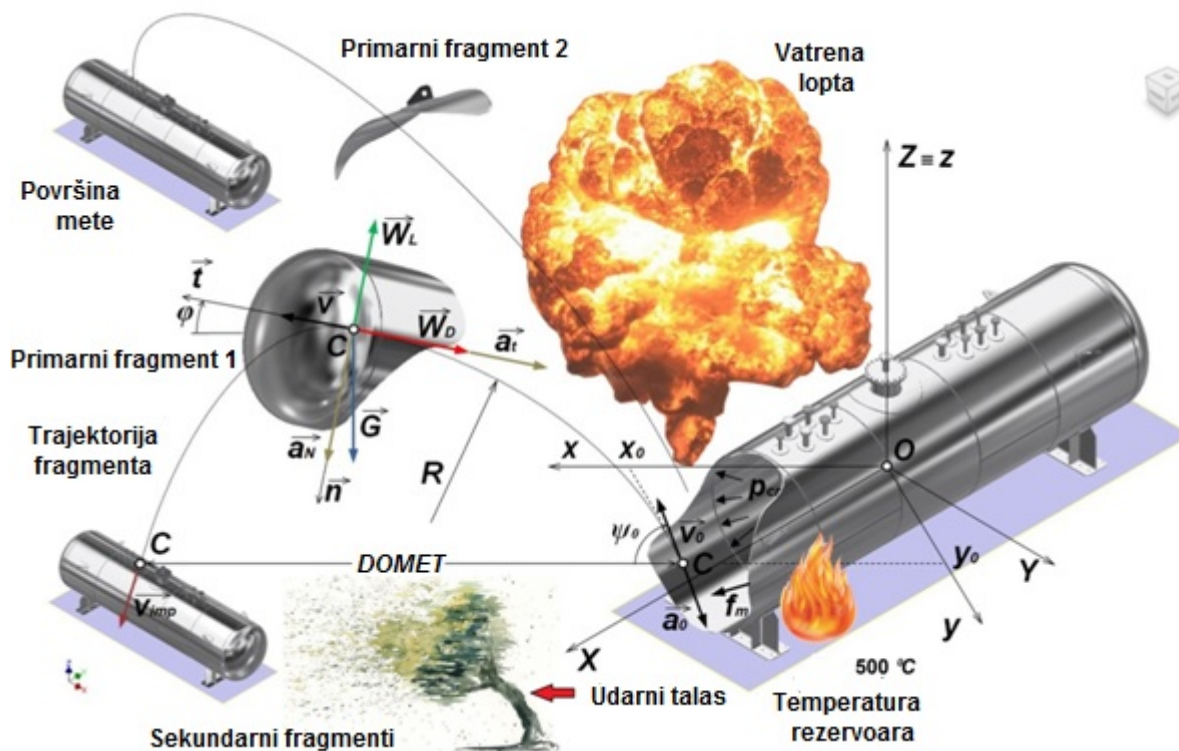
$$a_{x,fr} = a_{drag} \cdot (-\cos \varphi) + a_{lift} \cdot (-\sin \varphi) \quad (6.25)$$

$$a_{z,fr} = a_{drag} \cdot (-\sin \varphi) + a_{lift} \cdot (\cos \varphi) - g \quad (6.26)$$

Prethodni sistem jednačina daje mogućnost definisanja ugla φ tokom leta fragmenta, što je posebno značajno u početnom i krajnjem trenutku. Parametar φ predstavlja ugao koji vektor brzine zaklapa sa pozitivnim delom x ose. Uzlazni deo trajektorije odlikuje $\varphi > 0$, dok na silaznom delu važi $\varphi < 0$. Pravac brzine φ je funkcija intenziteta inercijalnog i gravitacionog ubrzanja, kao i odnosa aerodinamičkog otpora prema potisku fragmenta čija zavisnost glasi:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{v_{z,fr}}{v_{x,fr}}\right) = \arctg\left[\frac{\left(\frac{k_L}{k_D}\right) \cdot (-a_x) + (-a_z) - g}{(-a_x) + \left(\frac{k_L}{k_D}\right) \cdot a_z + g}\right] \quad (6.27)$$

Inicijalni pravac brzine φ_0 je u potpunosti jednoznačno definisan poznavanjem intenziteta početnog ubrzanja fragmenta, kao i njegovog oblika. Time se dokazuje da pravac inicijalne brzine fragmenta nije nezavisna stohastička veličina, već deterministički izlazni parametar zavisan od inputa sa izraženim rasipanjem. Neizvesnost prilikom definisanja inicijalnog pravca brzine proističe od rasipanja inputa i otklanja se predstavljanjem dometa fragmenata u vidu funkcije gustine verovatnoće Prilog C.



Slika 6.10. Kinematski parametri i sile nakon fragmentacije

Inicijalni pravac brzine je bitan za proračun dometa i procenu fragmentacionog rizika, dok je poznavanje pravca brzine u završnoj fazi leta neophodno za analizu mehaničkih oštećenja susednih instalacija i objekata, kao i procenu rizika usled domino efekta. Različiti pravci udara pri istoj kinetičkoj energiji fragmenta se potpuno drugačije manifestuju u pogledu mehaničkih oštećenja procesne opreme. Komponente vektora brzine $v_{x,fr}$ i $v_{z,fr}$ se dobijaju iz konačnih jednačina kretanja fragmenta (B.1) i (B.2):

$$v_{x,fr} = \sqrt{\frac{2m_{fr} \cdot (-a_x)}{\rho_{air} \cdot [C_D A_D + C_L A_L \cdot tg \varphi]}} \cdot \frac{1}{\sqrt[4]{1 + tg^2 \varphi}} \quad (6.28)$$

$$v_{z,fr} = \sqrt{\frac{2m_{fr} \cdot (-a_x)}{\rho_{air} \cdot [C_D A_D + C_L A_L \cdot tg \varphi]}} \cdot \frac{tg \varphi}{\sqrt[4]{1 + tg^2 \varphi}} \quad (6.29)$$

Intenzitet brzine fragmenta se određuje prema:

$$v_{fr} = \sqrt{v_{x,fr}^2 + v_{z,fr}^2} \quad (6.30)$$

Inicijalna brzina je deterministički parametar u funkciji početnog ubrzanja, oblika i mase fragmenta. Uticaj rasipanja ovog parametra se razmatra integrisano sa rasipanjem pravca početne brzine preko odgovarajuće raspodele dometa. Inicijalni napadni uglovi vektora brzine i ubrzanja nisu kolinearni, pošto početak leta skoro svih primarnih fragmenata karakteriše pojava koeficijenta $C_L \neq 0$. Napadni ugao pravca brzine (6.27) je funkcija komponenti ubrzanja $(-a_x)$ i $(-a_y)$, kao i odnosa potiska prema aerodinamičkom otporu k_L/k_D . Faktor k_L/k_D fizički predstavlja odnos sile potiska prema sili aerodinamičkog otpora vazduha pri letu fragmenta i njegova vrednost utiče na odstupanje pravca inicijalnih vektora brzine i ubrzanja. Početni uslovi fragmenta definisani u odnosu na lokalni koordinatni sistem $Oxyz$ neposredno nakon eksplozije rezervoara ($t = t_o = 0$) su dati sa:

$$(x_{fr})_0 = x_0 \quad \wedge \quad (z_{fr})_0 = z_0 \quad (6.31)$$

$$(v_{x,fr})_0 = v_{xo} \quad \wedge \quad (v_{z,fr})_0 = v_{zo} \quad (6.32)$$

Trajektorija fragmenata se dobija rešavanjem konačnih jednačina kretanja (B.1) i (B.2) koristeći početne uslove (6.31) i (6.32). S obzirom na nemogućnost analitičkog rešenja usled spregnutosti jednačina, primenjuje se numerička procedura zasnovana na metodi Tejlorovih redova. Ovu metodu karakteriše jednostavnost pri programiranju, brzo određivanje greške i sami tim egzaktne vrednosti dometa. Postupak implementacije metode Tejlorovih redova i određivanja egzaktne vrednosti dometa je izložen u Prilogu D. Trajektorije prikazane u Prilogu C su određene ovom metodom. Inicijalni model je baziran na principu da generisanje fragmenta prati pojava kritičnog naprezanja čija vrednost odgovara zateznoj čvrstoći materijala R_m , kao i da pritisak impulsne sile ne prelazi vrednost p_{cr} . Dakle, fragmentaciju rezervoara ne određuje ekspanzioni pritisak unutar rezervoara, već otpornost materijala da se suprostavi tom pritisku. Fragmentacija rezervoara nastaje kada maksimalno naprezanje materijala $\{\sigma_x, \sigma_\theta\}_{max}$ dostigne vrednosti zatezne čvrstoće R_m , dok pritisak koji odgovara ovom stanju je kritični pritisak p_{cr} i određuje se iz (6.14) smenom $\sigma_{\theta,max} \rightarrow R_m$ i $p \rightarrow p_{cr}$ ($p_{cr} = R_m/104$). Otpornost materijala drastično opada sa porastom temperature, što ima znatan uticaj na inicijalnu brzinu kod BLEVE efekta (tabela 6.7).

6.5.10. RASPODELA DOMETA FRAGMENTATA

Validna fragmentaciona procena rizika zahteva identifikaciju svih kinematskih parametara tokom leta fragmenta (tabela 6.7). Dosadašnja istraživanja su se ograničavala na analizu samo nekih parametara, kao što su intenzitet početne brzine, inicijalni pravac, domet i kinetička energija udara fragmenata [214], [228-229] i [227]. Pouzdanu procenu oštećenja procesne opreme nije moguće izvesti bez poznavanja pravca udara i ubrzanja fragmenta. Udar fragmenta sa ubrzanjem je nepovoljniji od udara sa nultim ubrzanjem pri istoj brzini.

Tabela 6.8. Kinematski parametri trajektorija prikazanih na slici C1, levo (Prilog C)

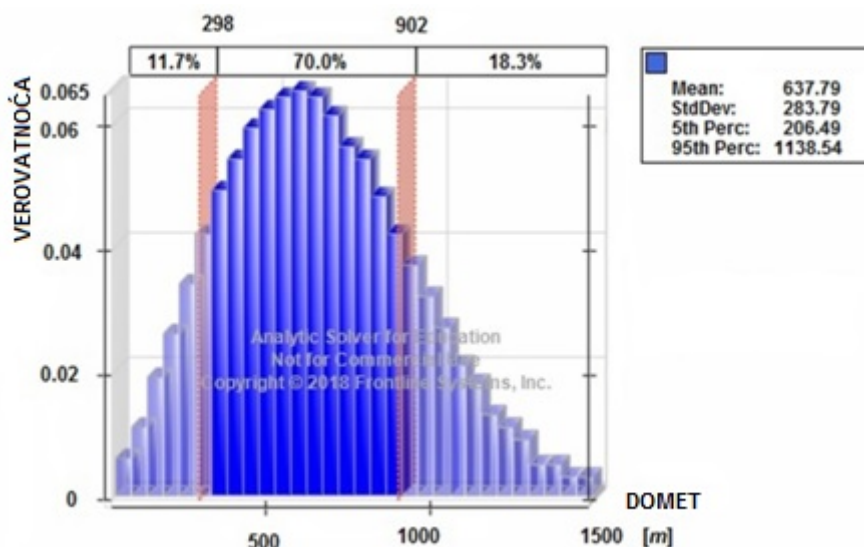
| | Broj podgrupe | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| $k_L [m^{-1}]$ $\times 10^{-6}$ | 554 | 554 | 554 | 554 | 831 | 692 | 415 | 277 | 554 | 554 | 277 | 554 | 762 | 623 | 485 | 346 | 554 |
| $k_D [m^{-1}]$ $\times 10^{-6}$ | 7754 | 6462 | 3877 | 2585 | 5169 | 5169 | 5169 | 5169 | 5815 | 7108 | 4523 | 3231 | 5169 | 5169 | 5169 | 5169 | 5169 |
| $v_0 [m/s]$ | 1693 | 1854 | 2386 | 2904 | 2064 | 2068 | 2074 | 2076 | 1954 | 1769 | 2218 | 2608 | 2066 | 2070 | 2073 | 2075 | 2071 |
| $D [m]$ | 515 | 599 | 843 | 866 | 590 | 654 | 757 | 795 | 651 | 554 | 897 | 896 | 623 | 683 | 734 | 777 | 709 |
| $v_{imp} [m/s]$ | 35,3 | 38,7 | 50,0 | 61,0 | 43,2 | 43,3 | 43,2 | 43,1 | 40,8 | 36,9 | 46,2 | 54,7 | 43,3 | 43,3 | 43,3 | 43,2 | 43,3 |
| $\varphi_{imp} [^\circ]$ | -84,1 | -83,7 | -81,6 | -83,2 | -80,8 | -82,0 | -83,9 | -84,4 | -83,5 | -84,0 | -84,3 | -80,4 | -81,4 | -82,5 | -83,5 | -84,2 | -83,0 |
| $a_{imp} [m/s^2]$ | 0,4 | 0,3 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | 0,1 | 0,4 | 0,6 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,5 | 0,2 |

Raspodele dometa koje su prikazane u prilogu C su date u tabeli 6.8. U prilogu E je dato kvalitativno i kvantitativno odstupanje trajektorija prema modelu izloženom u [213] i [223].

Tabela 6.9. Raspodele dometa fragmenata po sektorima u funkciji fiksnih i varijabilnih parametara

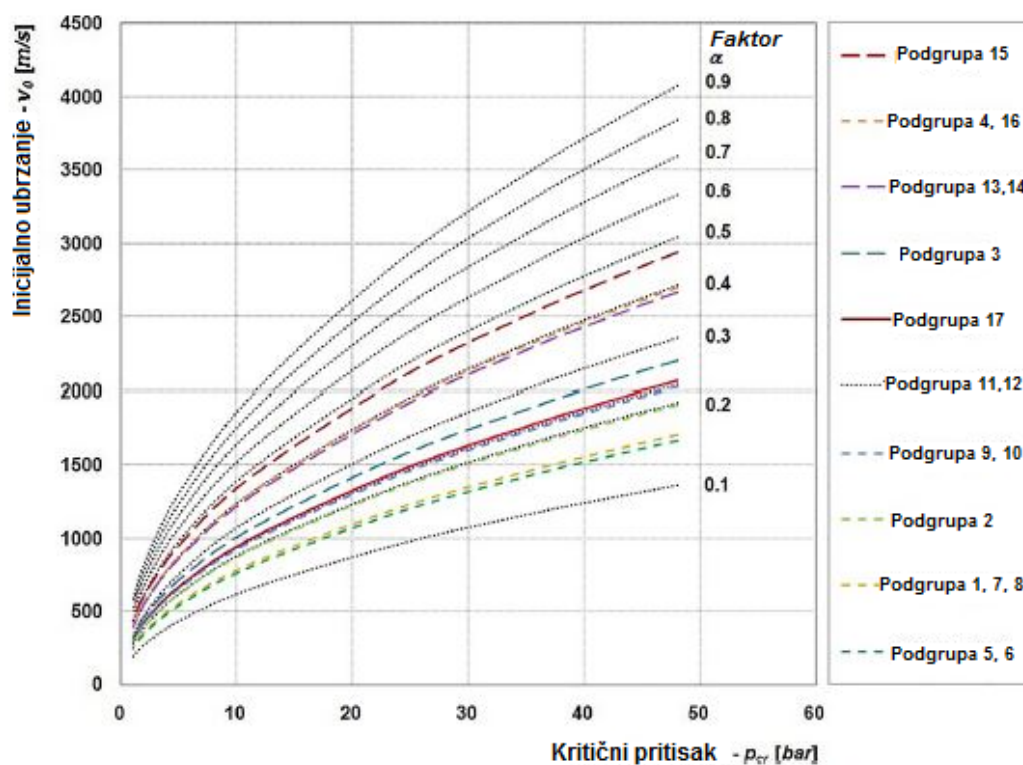
| Stavka | Masa $m_f [kg]$ | Ugao $\psi_0 [^\circ]$ | Odnos (a_{lift}/a_{drag}) | | Sektor | Tip pdf-a | Parametri pdf-a | | Domet [m] |
|--------|--------------------|---------------------------|--------------------------------|-------|--------|----------------|-----------------|---------|-------------|
| | | | min | max | | | a | b | |
| 1 | 1300 | 30 | 0,054 | 0,214 | I i II | Inverse normal | 714,3 | 25875,4 | [400, 1000] |
| 2 | 1300 | 60 | 0,071 | 0,134 | I i II | Pareto | 3,0 | 200,3 | [0, 600] |
| 3 | 750 | 30 | 0,047 | 0,188 | I i II | Inverse normal | 757,0 | 2264,2 | [400, 1200] |
| 4 | 750 | 60 | 0,054 | 0,129 | I i II | Pearson | 18,9 | 5582,5 | [100, 600] |
| 5 | 200 | 30 | 0,054 | 0,214 | I i II | Gamma | 25,2 | 31,5 | [400, 1200] |
| 6 | 200 | 60 | 0,054 | 0,143 | I i II | Pearson | 15,9 | 4764,3 | [100, 600] |
| 7 | < 125 | < 70 | 0,010 | 0,100 | III | Inverse normal | 1200,0 | 160,0 | [0, 350] |

Svrishodnost inercijalnog modela u predviđanju inicijalne brzine sa (6.30) se najbolje može sagledati komparativnom analizom prema literaturnim podacima. Zavisnost inicijalne brzine fragmenta od kritičnog pritiska za različite aerodinamičke uslove fragmenta je ilustrovana na slici 6.11. Inicijalna brzina se odnosi na masu fragmenta od 200 kg koja najčešće prati akcidentne scenarije sa dva i više generisanih fragmenata. Može se zaključiti da na inicijalnu brzinu osim kritičnog pritiska (temperature rezervoara) u značajnoj meri utiču koeficijenti aerodinamičkog i potisnog ubrzanja (k_L and k_D). Aerodinamički fragmenti imaju manju inicijalnu brzinu, zbog manjeg otpora vazduha i većeg potiska. Faktor α se za najveći broj simulacionih varijanti kreće od 0,15 do 0,26 i konvergira ka 0,2. Trajektorija sa maksimalnim očekivanjem se odnosi na varijantu podgrupe 17, pa je $\alpha = 0,22$. Verifikacija inicijalne brzine odnosno faktora α je izvršena prema preporukama datim u [214]. Literaturni podaci govore da faktor α ima desno-stranu trougaonu raspodelu u intervalu [0,2; 0,5] sa očekivanom vrednošću 0,3. U prethodnoj analizi je konstatovano da inicijalna brzina raste sa masom. Opravdanost procenjene vrednosti od 0,22 je utoliko veća, ako se uzme u obzir da se fragmenti od 200 kg smatraju manjim fragmentacionim oblicima. Simulacija leta fragmenata za svaku razmatranu fragmentacionu formu obuhvata analizu trajektorija za 20 karakterističnih slučajeva. Dometi ovih trajektorija se koriste kao statistički uzorci za sprovođenje Monte Carlo simulacije, a ima ih ukupno $12 \times 20 = 240$. Dometi fragmenata za svih 12 razmatranih fragmentacionih formi se opisuje funkcijama gustine verovatnoća (pdf) koje su date u tabeli 6.9. Domet generisanih fragmenata za procenjene vrednosti geometrijskih i kinematskih parametara iz tabele 6.6 najbolje opisuje Weibull-ova raspodela sa parametrima $a = 2.357$ i $b = 723.779$ (Slika 6.11). Maksimalnu verovatnoću pojave imaju fragmenti čiji je domet u intervalu $637,79 \pm 25 m$ i iznosi 6.5 %. Verovatnoća da će domet generisanih fragmenata cilindričnog rezervoara biti između 298 m i 902 m iznosi 70 %, dok je preko 902 m svega 18.3%.



Slika 6.11. Funkcija gustine verovatnoća za domet generisanih fragmenata

Visina objekta predstavlja prepreku tokom leta fragmenata i vrlo nepovoljno utiče na fragmentacioni rizik. Zato se razmatrani fragmentacioni scenariji odnose na najnepovoljnije slučajeve koji pritom vrlo često prate realne accidente situacije. U tom pogledu su razmatrani fragmenti mase od 200 kg i 1300 kg lansirani pri malom vertikalnom uglu (5°) za različite aerodinamičke uslove datih sa podgrupama 1-17. Fragmentacioni parametri se analiziraju na distancama od 50, 100, 150 i 200 m za maksimalnu visinu objekta od 15 m, a obuhvataju postignutu visinu $h(m)$, vreme leta $t(s)$ i brzinu fragmenta $v(m/s)$. Iz tabele 6.10 se može zaključiti da se odsustvom potiska fragmenta ne može izbeći udar u objekat ni posle 150 m, dok otpor vazduha samo povećava taj efekat. Aerodinamički oblici fragmenata mogu biti garant da će na distancama od 50 m preleteti objekat zadate visine od 15 m. Fragmenti loših aerodinamičkih osobina mogu ugroziti objekat visine 15 m i nakon 150 m.



Slika 6.12. Komparativna analiza rezultata inercijskog modela naspram [214]

Uticaj kinematičkih parametara na visinu objekta je dat u tabeli 6.10.

Tabela 6.10. Uticaj kinematičkih parametara na visinu objekta

| Distance | Indeks | Masa fragmenta: 200 kg | | | | Distance | Indeks | Masa fragmenta: 1300 kg | | | | |
|--------------|----------------|------------------------|--------|--------|--------|-------------|----------------|-------------------------|--------|--------|--------|-------|
| | | 50 m | 100 m | 150 m | 200 m | | | 50 m | 100 m | 150 m | 200 m | |
| Podgrupa 1 | h [m] | 4,330 | 8.580 | 12.400 | 14.300 | Podgrupa 1 | h [m] | 4.390 | 8.670 | 12.98 | 17.25 | |
| | $k_L = 0,0000$ | t [s] | 0,062 | 0.195 | 0.47 | 1.077 | $k_L = 0,0000$ | t [s] | 0,031 | 0.072 | 0.128 | 0.204 |
| | $k_D = 0,0150$ | v [m/s] | 564 | 264 | 124 | 59 | $k_D = 0,0060$ | v [m/s] | 1,404 | 1,040 | 769 | 568 |
| Podgrupa 2 | h [m] | 4,340 | 8.640 | 12.750 | 16.280 | Podgrupa 2 | h [m] | 4.320 | 8.770 | 12.970 | 17.260 | |
| | $k_L = 0,0000$ | t [s] | 0,051 | 0.145 | 0.317 | 0.630 | $k_L = 0,0000$ | t [s] | 0,028 | 0.066 | 0.113 | 0.176 |
| | $k_D = 0,0120$ | v [m/s] | 734 | 400 | 218 | 118 | $k_D = 0,0053$ | v [m/s] | 1,556 | 1,181 | 911 | 697 |
| Podgrupa p 3 | h [m] | 4,370 | 8.670 | 12.920 | 17.000 | Podgrupa 3 | h [m] | 4.370 | 8.640 | 13.060 | 17.290 | |
| | $k_L = 0,0000$ | t [s] | 0,041 | 0.105 | 0.206 | 0.360 | $k_L = 0,0000$ | t [s] | 0,026 | 0.058 | 0.100 | 0.151 |
| | $k_D = 0,0090$ | v [m/s] | 984 | 626 | 398 | 253 | $k_D = 0,0046$ | v [m/s] | 1,725 | 1,372 | 1,082 | 862 |
| Podgrupa 4 | h [m] | 4,390 | 8.670 | 12.980 | 17.250 | Podgrupa 4 | h [m] | 4.290 | 8.720 | 12.980 | 17.380 | |
| | $k_L = 0,0000$ | t [s] | 0,031 | 0.072 | 0.128 | 0.204 | $k_L = 0,0000$ | t [s] | 0,023 | 0.052 | 0.086 | 0.129 |
| | $k_D = 0,0060$ | v [m/s] | 1404 | 1040 | 769 | 568 | $k_D = 0,0039$ | v [m/s] | 1,949 | 1,594 | 1,313 | 1,074 |
| Podgrupa 5 | h [m] | 31,190 | 96.090 | 54.990 | - | Podgrupa 5 | h [m] | 23.800 | 53.350 | 89.910 | 135.46 | |
| | $k_L = 0,0050$ | t [s] | 0,081 | 0.423 | 12.155 | - | $k_L = 0,0016$ | t [s] | 0,031 | 0.074 | 0.136 | 0.230 |
| | $k_D = 0,0150$ | v [m/s] | 365 | 61 | 55 | - | $k_D = 0,0050$ | v [m/s] | 1,378 | 976 | 667 | 431 |
| Podgrupa 6 | h [m] | 25,550 | 69.600 | 153.27 | 83.740 | Podgrupa 6 | h [m] | 20.070 | 44.040 | 73,140 | 107.24 | |
| | $k_L = 0,0410$ | t [s] | 0,075 | 0.303 | 1.602 | 9.885 | $k_L = 0,0013$ | t [s] | 0,030 | 0.070 | 0.126 | 0.204 |
| | $k_D = 0,0150$ | v [m/s] | 421 | 120 | 14 | 6 | $k_D = 0,0050$ | v [m/s] | 1,448 | 1,063 | 762 | 535 |
| Podgrupa 7 | h [m] | 20,290 | 52.040 | 99.260 | 152.65 | Podgrupa 7 | h [m] | 16.290 | 35.350 | 58.040 | 83.300 | |
| | $k_L = 0,0032$ | t [s] | 0,070 | 0.252 | 0.822 | 3.079 | $k_L = 0,0010$ | t [s] | 0,029 | 0.067 | 0.119 | 0.187 |
| | $k_D = 0,0150$ | v [m/s] | 469 | 170 | 49 | 13 | $k_D = 0,0050$ | v [m/s] | 1,512 | 1,136 | 840 | 621 |
| Podgrupa 8 | h [m] | 15,580 | 38.020 | 68.100 | 102.97 | Podgrupa 8 | h [m] | 12.530 | 27.150 | 43.600 | 62.310 | |
| | $k_L = 0,0023$ | t [s] | 0,067 | 0.224 | 0.620 | 1.698 | $k_L = 0,0007$ | t [s] | 0,028 | 0.065 | 0.113 | 0.177 |
| | $k_D = 0,0150$ | v [m/s] | 506 | 210 | 81 | 29 | $k_D = 0,0050$ | v [m/s] | 1,567 | 1,193 | 907 | 685 |
| Podgrupa 9 | h [m] | 16.930 | 40.430 | 71.040 | 110.05 | Podgrupa 9 | h [m] | 17.890 | 40.580 | 68.910 | 103.87 | |
| | $k_L = 0,0020$ | t [s] | 0,049 | 0.141 | 0.319 | 0.689 | $k_L = 0,0016$ | t [s] | 0,039 | 0.099 | 0.195 | 0.355 |
| | $k_D = 0,0105$ | v [m/s] | 763 | 402 | 202 | 94 | $k_D = 0,0075$ | v [m/s] | 1,047 | 655 | 410 | 242 |
| Podgrupa 10 | h [m] | 13.140 | 30.210 | 51.470 | 77.060 | Podgrupa 10 | h [m] | 14.070 | 31.870 | 53.420 | 78.630 | |
| | $k_L = 0,0014$ | t [s] | 0,048 | 0.133 | 0.287 | 0.574 | $k_L = 0,0012$ | t [s] | 0,037 | 0.094 | 0.182 | 0.318 |
| | $k_D = 0,0105$ | v [m/s] | 796 | 444 | 243 | 129 | $k_D = 0,0075$ | v [m/s] | 1,099 | 718 | 462 | 293 |
| Podgrupa 11 | h [m] | 9.340 | 20.610 | 34.130 | 49.540 | Podgrupa 11 | h [m] | 10.970 | 23.870 | 39.190 | 56.670 | |
| | $k_L = 0,0008$ | t [s] | 0,047 | 0.127 | 0.268 | 0.515 | $k_L = 0,0008$ | t [s] | 0,037 | 0.091 | 0.173 | 0.296 |
| | $k_D = 0,0105$ | v [m/s] | 823 | 474 | 272 | 155 | $k_D = 0,0075$ | v [m/s] | 1,124 | 756 | 502 | 332 |
| Podgrupa 12 | h [m] | 4.480 | 8.950 | 13.360 | 17.520 | Podgrupa 12 | h [m] | 7.570 | 16.180 | 25.800 | 36.390 | |
| | $k_L = 0,0000$ | t [s] | 0,046 | 0.124 | 0.256 | 0.481 | $k_L = 0,0004$ | t [s] | 0,036 | 0.089 | 0.167 | 0.282 |
| | $k_D = 0,0105$ | v [m/s] | 845 | 497 | 293 | 173 | $k_D = 0,0075$ | v [m/s] | 1,152 | 783 | 531 | 360 |
| Podgrupa 13 | h [m] | 25.300 | 58.040 | 100.72 | 157.77 | Podgrupa 13 | h [m] | 22.010 | 48.59 | 79.560 | 116.06 | |
| | $k_L = 0,0020$ | t [s] | 0,036 | 0.090 | 0.177 | 0.332 | $k_L = 0,0012$ | t [s] | 0,026 | 0.060 | 0.104 | 0.163 |
| | $k_D = 0,0060$ | v [m/s] | 1,150 | 741 | 445 | 237 | $k_D = 0,0039$ | v [m/s] | 1,690 | 1,303 | 991 | 735 |
| Podgrupa 14 | h [m] | 18.320 | 41.440 | 69.460 | 102.82 | Podgrupa 14 | h [m] | 16.16 | 34.590 | 55.540 | 78.980 | |
| | $k_L = 0,0014$ | t [s] | 0,333 | 0.081 | 0.151 | 0.255 | $k_L = 0,0008$ | t [s] | 0,025 | 0.056 | 0.095 | 0.144 |
| | $k_D = 0,0060$ | v [m/s] | 1,257 | 875 | 591 | 389 | $k_D = 0,0039$ | v [m/s] | 1,807 | 1,443 | 1,145 | 904 |
| Podgrupa 15 | h [m] | 13.460 | 29.650 | 47.760 | 68.550 | Podgrupa 15 | h [m] | 10.170 | 21.240 | 33.510 | 46.790 | |
| | $k_L = 0,0008$ | t [s] | 0,028 | 0.066 | 0.115 | 0.181 | $k_L = 0,0004$ | t [s] | 0,024 | 0.053 | 0.089 | 0.133 |
| | $k_D = 0,0050$ | v [m/s] | 1,545 | 1,165 | 880 | 658 | $k_D = 0,0039$ | v [m/s] | 1,895 | 1,546 | 1,256 | 1,021 |
| Podgrupa 16 | h [m] | 6.150 | 13.150 | 20.460 | 28.110 | Podgrupa 16 | h [m] | 4.290 | 8.720 | 12.980 | 17.380 | |
| | $k_L = 0,0002$ | t [s] | 0,030 | 0.073 | 0.130 | 0.206 | $k_L = 0,0000$ | t [s] | 0,023 | 0.052 | 0.086 | 0.129 |
| | $k_D = 0,0060$ | v [m/s] | 1,409 | 1,027 | 756 | 559 | $k_D = 0,0039$ | v [m/s] | 1,949 | 1,594 | 1,314 | 1,075 |
| Podgrupa 17 | h [m] | 18.260 | 43.460 | 76.620 | 119.73 | Podgrupa 17 | h [m] | 18.310 | 39.950 | 65.690 | 96.830 | |
| | $k_L = 0,0021$ | t [s] | 0,048 | 0.136 | 0.305 | 0.659 | $k_L = 0,0012$ | t [s] | 0,032 | 0.075 | 0.135 | 0.223 |
| | $k_D = 0,0100$ | v [m/s] | 787 | 422 | 212 | 97 | $k_D = 0,0055$ | v [m/s] | 1,359 | 978 | 693 | 477 |

Očekivane vrednosti koeficijenta potisnog ubrzanja za fragmente mase 200 kg i 1300 kg moraju biti preko $0,0021 m^{-1}$ i $0,0012 m^{-1}$, respektivno. Prosečna brzina udara fragmenta mase 1300 kg na distanci od 200 m je 477 m/s i 11 puta je veća od prosečne brzine udara u osnovu objekta na distanci od 709 m. Rezervoare treba postavljati normalno na pravac objekta kako bi se redukovao hazard usled fragmentacionog efekta. Manji fragmenti imaju veću aerodinamičnost, pošto uglavnom imaju oblik ljuske.

6.6. PROCENA FRAGMENTACIONOG RIZIKA

Pojam fragmentacioni rizik je vezan za domino efekat i uspostavlja vezu između uzročnih i posledičnih hazarda. Uzročni hazardi su vezani za okolnosti koje iniciraju eksploziju rezervoara, dok se posledični hazardi manifestuju udarom fragmenata u susedne procesne instalacije, izazivajući pritom dodatne požare i eksplozije. Fragmentacioni rizik zauzima centralno mesto u analizi domino efekta, pošto je potencijalna ugroženost susednih objekata usled udara fragmenata izražena i na distancama većim od 1 km [218]. Primenjujući PMM kao podlogu za procenu fragmentacionog rizika, polazimo od pretpostavke eksplozije rezervoara uz generisanje maksimalno šest fragmenata (verovatnoća ovog scenarija iznosi 99,71%). Tada se verovatnoće fragmentacije na svakom segmentu rezervoara u funkciji broja fragmenata mogu iskazati tabelom 6.11 i njihova prosečna vrednost se koristi za procenu fragmentacionog rizika. Prikazane vrednosti u tabeli 6.11 dobijene su na bazi uslovnih verovatnoća razaranja iz tabele 6.5 i pokazuju učešće segmenata u potencijalnoj fragmentaciji rezervoara (npr. generisanje tri fragmenta prati učešće mase iz segmenta 1 sa 72,05%).

Tabela 6.11. Verovatnoće fragmentacije na segmentima rezervoara u funkciji broja fragmenata

| Verovatnoća fragmentacije (p_f) | Broj fragmenata | | | | | | Prosečna vrednost |
|-------------------------------------|-----------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| Segment 1 | 78,85% | 75,75% | 72,05% | 70,40% | 70,15% | 69,23% | 72,70% |
| Segment 2 ili 3 | 20,30% | 23,62% | 27,70% | 29,60% | 29,85% | 30,77% | 27,30% |
| Segment 2 i 3 | 0,85% | 0,63% | 0,25% | 0,00% | 0,00% | 0,00% | |

Veći broj generisanih fragmenata povećava učešće mase iz segmenata 2 i 3 na račun smanjenja mase iz segmenta 1. Prosečna vrednost verovatnoće fragmentacije na segmentu 1 je 72,7% (sektor 1), a segmenata 2 i 3 iznosi 27,3% (sektor 2). Sektorski uglovi 2α i 2β , ($2\alpha + 2\beta = 2\pi$), respektivno određuju fragmentacione sektore 1 i 2, prema sledećoj formulaciji:

$$\frac{p_f(S1)}{2\alpha} (45^\circ - \beta) + \frac{1 - p_f(S1)}{4} = \frac{1}{2} \cdot \frac{15}{52} \quad (6.33)$$

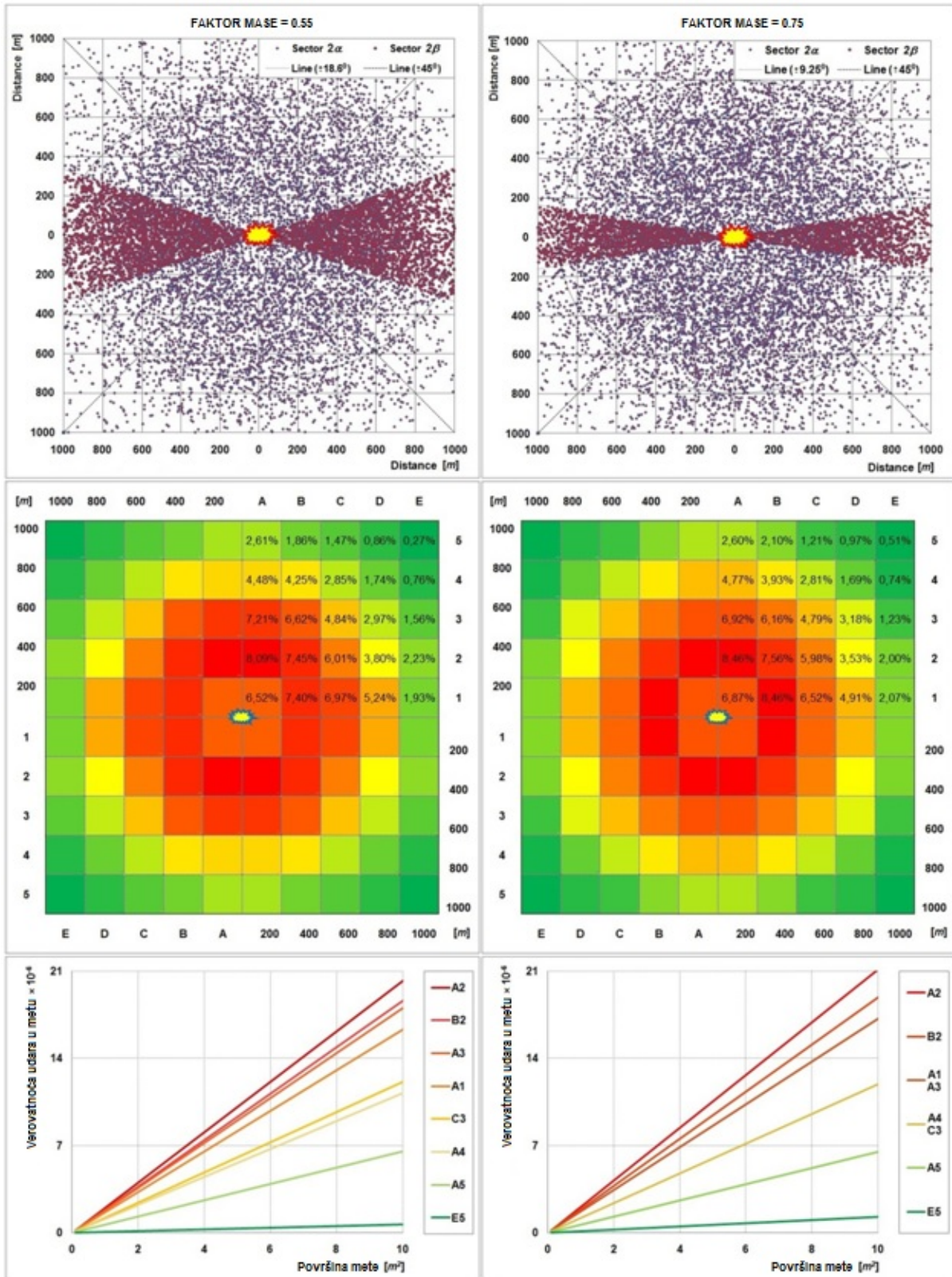
Veličina fragmentacionih sektora 1 i 2 zavisi od broja generisanih fragmenata, prema tabeli 6.12. Generisanje većeg broja fragmenata prati povećanje sektorskog ugla 2β (sektor 2) i za istu vrednost smanjenje ugla 2α (sektor 1). Horizontalni ugao generisanih fragmenata unutar sektora prati aleatorička neizvesnost, pošto svaku poziciju fragmenta karakteriše ista verovatnoća. Dakle, horizontalni ugao fragmenata mora imati uniformnu raspodelu i ovaj zaključak je potpuno saglasan sa pretpostavkom literaturnih izvora [213] i [223]. Isti izvori fragmentacionu gustinu i veličinu sektorskih zona procenjuju na bazi akcidentnih podata [208].

Tabela 6.12. Polusektorski uglovi fragmentacionih sektora

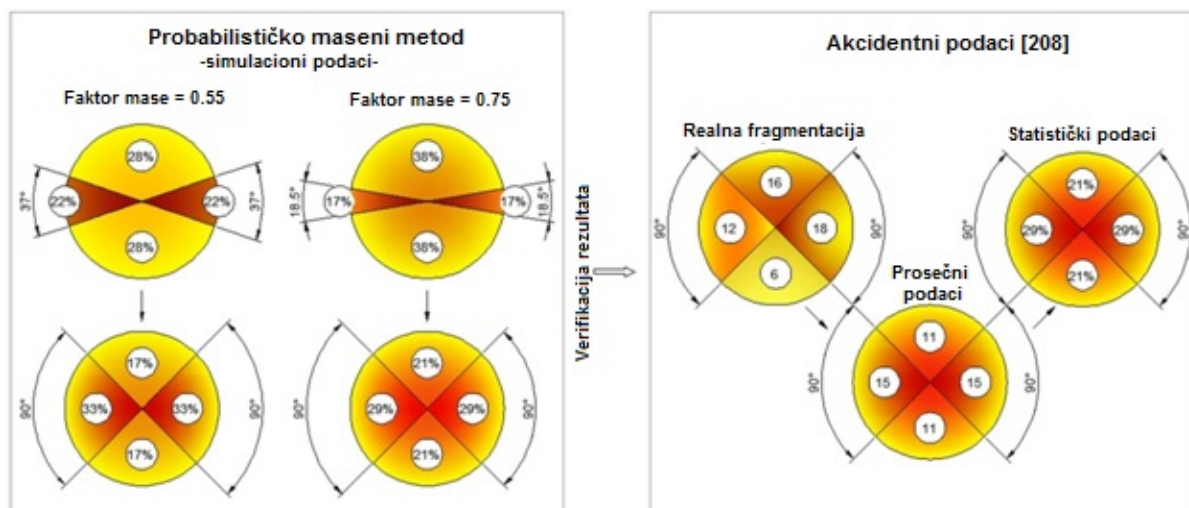
| Polusektorski uglovi | Broj fragmenata | | | | | | Prosečna vrednost |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| Sektor 1 (α) | 173,9 ⁰ | 170,6 ⁰ | 166,6 ⁰ | 164,9 ⁰ | 164,6 ⁰ | 163,6 ⁰ | 167,3 ⁰ |
| Sektor 2 (β) | 6,1 ⁰ | 9,4 ⁰ | 13,4 ⁰ | 15,1 ⁰ | 15,4 ⁰ | 16,4 ⁰ | 12,7 ⁰ |

Simulacioni prikaz fragmentacije rezervoara prema uslovima navedenim u tabelama 6.5, 6.9, 6.11 i 6.12 za ukupno 56000 uzoraka je dat na slici 6.13.

Gustina simuliranih fragmenata u sektoru 2 je 2,23 puta veća naspram sektora 1. U sektoru 3 su generisani fragmenti mase oko 1% od mase rezervoara koji istovremeno pripadaju sektorima 2 i 3.



Slika 6.13. Vizuelizacija simulacionih vrednosti dometa usled fragmentacije cilindričnog rezervoara



Slika 6.14. Verifikacija fragmentacionih gustina prema akcidentnim podacima [208]

Rezultati sektorske procene rizika su nakon transformacije dati po kvadrantima dimenzija 200×200 m i sistematizovani u formu matrice. Matricu rizika karakteriše podužna izduženost i omogućava procenu verovatnoće udara fragmenata u objekat određene površine (slika 6.13). Validacija izloženog metodološkog okvira je prikazana na slici 6.14, a izvršena je prema akcidentnim podacima [208]. Fragmentacioni sektori prema akcidentnim podacima i probabilističko masenom metodu nisu istovetni, pa je fragmentacione gustine neophodno svesti na kompatibilne sektorske zone (istih površina i orjentacija). Gustinu simulacionih tačaka treba analizirati unutar sektora kompatibilnih sa predstavljanim akcidentnim podacima. PMM predviđa da će 60 % generisanih fragmenata pokriti sektore definisane uglom $\pm 45^\circ$ u odnosu na horizontalni pravac, a 40 % preostale zone. Odstupanje rezultata ne prelazi 5 % u odnosu na akcidentne podatke [208]. Broj i veličina prisutne opreme u kvadrantu se razmatra preko njihove površine A_{tar} . Verovatnoća udara fragmenata u cilj je srazmerna njegovoj površini i za karakteristične kvadrante je prikazana na slici 6.13. Verovatnoća udara fragmenata u objekat P_{tar} se računa preko verovatnoće kvadranta P_{quad} kao:

$$P_{tar} = \frac{A_{tar}}{A_{quad}} \cdot P_{quad} \quad (6.34)$$

6.7. REKAPITULACIJA ISTRAŽIVANJA

Multidisciplinarnost i kompleksnost procesa fragmentacije stvara znatne poteškoće u adekvatnoj interpretaciji fenomena pri eksploziji rezervoara. Prezentovana studija je otvorila dodatni prostor za otklanjanje epistemičke neodređenosti fragmentacionih parametara, poput početnog pravca i brzine fragmenata, frakturnih linija, oblika, broja i mase fragmenata. Trajektorije fragmenata se kvalitativno i kvantitativno razlikuju u poređenju sa [213] i [223]. Egzaktni matematički model (tačka 6.5.9) daje približno dva puta manji domet pri istim kinematskim parametrima. Kvalitativno odstupanje je drastično izraženo pri većim odnosima k_I/k_D . Početne brzine fragmenata odgovaraju znatno manjim vrednostima naspram realnih za prikazane domete u [222-223] i [225]. Inercijalni model definiše početne uslove fragmentacije bez uključivanja mase fragmenata. Probabilistički maseni metod je upotrebljen kao podloga za procenu fragmentacionog rizika. Definisane raspodele dometa su implementirane u simulacioni proces fragmentacije prilikom definisanja sektorskih rizika. Verifikacija postupka je sprovedena na bazi raspoloživih akcidentnih podataka [208]. Generisanje većeg broja fragmenata povećava sektor 2 i utiče na izduženost elipse u matrici rizika. Razvoj prezentovane metodologije je usmeren ka implementaciji šireg spektra fragmentacionih istraživanja u procesnoj industriji.

6.8. KOMPARATIVNA ANALIZA REZULTATA

Nezavisno od verifikovanih rezultata u literaturi možemo posmatrati empirijske vrednosti dometa fragmenta preuzetih iz tabele 6.13. U cilju komparativne analize, domet fragmenta se može približno odrediti koristeći vrednosti iz tabele 6.13 i činjenice da se najčešće generišu dva ili tri fragmenta usled BLEVE efekta, a veoma retko više od četiri ili pet [228]. Uzimajući u obzir veličinu rezervoara, u konkretnom primeru je rezervoar od 50000 l i želimo da procenimo domet fragmenata na bazi rezultata datih u tabeli 6.13., gde maksimalan domet (R) fragmenata za TNG cisternu od 37850 l iznosi 608 m.

Tabela 6.13. Bezbedne zone za pojedine tipove fragmentacije (US Department of Homeland Security)

| Opis pretnje | | Masa eksploziva (TNT ekvivalent) | Evakuaciona udaljenost zgrade | Udaljenost za evakuaciju na otvorenom |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Eksplozivni (TNT Ekvivalent) |  Cev bomba | 5 lbs 2,3 kg | 70 ft 21 m | 850 ft 259 m |
| |  Samoubilački pojas | 10 lbs 4,5 kg | 90 ft 27 m | 1.080 ft 330 m |
| |  Samoubilački prsluk | 20 lbs 9 kg | 110 ft 34 m | 1.360 ft 415 m |
| |  Kofer bomba | 50 lbs 23 kg | 150 ft 46 m | 1.850 ft 564 m |
| |  Automobil | 1.000 lbs 454 kg | 400 ft 122 m | 1.750 ft 534 m |
| |  Kombi | 4.000 lbs 1.814 kg | 640 ft 195 m | 2.750 ft 838 m |
| |  Kamion za dostavu | 10.000 lbs 4.536 kg | 860 ft 263 m | 3.750 ft 1.143 m |
| |  Kamion cisterna | 30.000 lbs 13.608 kg | 1.240 ft 375 m | 6.500 ft 1.982 m |
| |  Šleper | 60.000 lbs 27.216 kg | 1.570 ft 475 m | 7.000 ft 2.134 m |
| Opis pretnje | | TNG masa/volumen | Obim vatrene lopte | Bezbedna udaljenost |
| TNG |  Plinska boca za dmaćinstvo | 20 lbs/5 gal 9 kg/19 l | 40 ft 12 m | 160 ft 48 m |
| |  Velika plinska boca | 100 lbs/25 gal 45 kg/95 l | 69 ft 21 m | 276 ft 84 m |
| |  Komercijalni/stambeni rezervoar za TNG | 2.000 lbs/500 gal 907 kg/1.893 l | 184 ft 56 m | 736 ft 224 m |
| |  Mala cistem za TNG | 8.000 lbs/2.000 gal 3.630 kg/7.570 l | 292 ft 89 m | 1.168 ft 356 m |
| |  Cisterna za TNG | 40.000 lbs/10.000 gal 18.144 kg/37.850 l | 499 ft 152 m | 1.996 ft 608 m |

Očekivani domet za rezervoar od 50 m³ TNG se računa prema:

$$(Domet)_{\text{bezbedni}} = \frac{\text{Zapremina rezervoara}}{\text{Referentna zapremina}} \cdot \text{Referentni domet} \quad (6.35)$$

$$(Domet)_{bezbedni} = \frac{50000}{37850} \cdot 608 \approx 810 \text{ m}$$

Veće rezervoare karakteriše veći domet fragmenata. Takvi rezervoari su većih zapremina, pa fragmentaciju prati generisanje fragmenata veće mase. Veličina fragmenta raste sa masom rezervoara, a masa rezervoara raste sa njegovom zapreminom. Dakle, veća zapremina rezervoara daje njegovu veću masu. Osnovni princip kojim se treba rukovoditi pri proceni fragmentacionog rizika je da porast zapremine rezervoara daje veći radijus ugroženosti prema susednim objektima. U prilog tome se mogu navesti osnovni rezultati ovog istraživanja [246-248]:

- i) Fragmentaciona verovatnoća za dva generisana fragmenta iznosi 17 %, ako je njihova zbirna masa oko 10 % mase rezervoara i
- ii) Fragmentaciona verovatnoća za tri generisana fragmenta iste zbirne mase iznosi 12 %.

Fragmentaciona verovatnoća drastično opada sa porastom broja generisanih fragmenata (preko tri), što se može zaključiti sa slike 6.8. Maksimalni pikovi su između 10-20 % od ukupne mase rezervoara, iz čega proizilazi da sa porastom mase rezervoara raste i masa fragmenta. Procena bezbednog dometa za rezervoar zapremine 50000 l sa TNG-om se može dovoljno tačno proceniti koristeći tabelu 6.13. Bezbedni domet prema iskustvenim podacima za rezervoar sa 37850 l TNG-a iznosi 608 m (tabela 6.13). Koristeći ovu vrednost, može se proceniti bezbedni domet za 50000 l TNG-a preko (6.35). Ovde treba naglasiti da bezbedna rastojanja nisu rastojanja kod kojih se garantuje 100 % sigurnost, već su to rastojanja kod kojih se toleriše određen stepen ugroženosti (postoji prihvatljivi rizik). Dakle, bezbedno rastojanje od eksplozije 50 m³ TNG-a se nalazi na približno 810 m od žarišta akcidenta. Rizik na bezbednoj distanci je moguće proceniti prema (6.34) i za razmatrani rezervoar iznosi:

$$P_{tar} = \frac{10}{40000} \cdot 0,0353 = 8,83 \cdot 10^{-6} \quad (6.34)$$

Gde je:

$A_{tar} = 10 \text{ m}^2$ (usvojena površina objekta – mete)

$A_{quad} = 40000 \text{ m}^2$ (površina kvadranta dimenzija 200×200 m)

$P_{quad} = 3,53 \%$ (prosečna verovatnoća udara fragmenta na distanci od 810 m)

Komparativna analiza rezultata pokazuje da izložen metodološki pristup fragmentacione analize daje vrlo konzistentne vrednosti sa iskustvenim podacima prema *US Department of Homeland Security*. Bezbedne zone usled fragmentacije rezervoara predstavljaju zelena polja prikazana na matrici rizika (slika 6.13).

7. ANALIZA TRANSPORTNIH AKCIDENATA

7.1. ANALIZA RIZIKA ŽELEZNIČKOG TRANSPORTA

U poslednjih nekoliko godina, brojni akcidenti nastali pri transportu opasnih materija su bili uzrok katastrofalnih ljudskih i materijalnih gubitaka sa znatnim negativnim uticajem po životnu sredinu. Analiza uticajnih faktora na transport opasnih materija je važno pitanje u procesu prevencije akcidenta, pošto pruža značajne informacije transportnim kompanijama o potencijalnim uzročnicima. Identifikacija uticajnih faktora na pojavu akcidenta pri transportu opasnih materija obuhvataju dva uobičajena pristupa: statističku metodu i analizu stabla grešaka. U praksi na pojavu transportnog akcidenta utiču brojni faktori između kojih postoji korelacija, što je neophodno uzeti u obzir kada se pravi analiza rizika. Međutim, ova povezanost sa sobom nosi poteškoće u identifikovanju uzročnika transportnog akcidenta, pošto njihova korelacija doprinosi većem udelu stohastičkih veličina u postupku procene transportnog rizika. Stohastički karakter uticajnih veličina na potencijalni transportni akcident doprinosi pojavi uslova neodređenosti (neizvesnosti). Analiza transportnog rizika između većeg broja međusobno povezanih parametara u uslovima neodređenosti zahteva primenu Bayes-ove mreže koja je dobijena integracijom teorije grafova i teorije verovatnoće. Onovna karakteristika Bayes-ove mreže omogućava da se pomoću nje može izvesti probabilistički zaključak u cilju predviđanja vrednosti neke varijable na bazi posmatranih vrednosti nekih drugih uticajnih varijabli. Tako predviđanje vrednosti ciljne varijable se naziva *a posteriori* verovatnoća i predstavlja probabilistički rezultat zaključivanja na osnovu poznatih činjenica i dostupnih informacija iz realizovanih (prošlih) događaja. Nasuprot *a posteriori* se nalazi *a priori* verovatnoća koja svoj probailistički rezultat zasniva na slobodnoj pretpostavci ili proceni vrednosti neke varijable, bez nekog značajnijeg utemeljenja u činjenično stanje. U tom pogledu *a posteriori* verovatnoća se karakteriše kao bitan element Bayes-ove mreže za detekciju uzajamnog odnosa između varijabli koje opisuju konkretnu situaciju transporta opasnih materija. Interpretacija rezultata Bayes-ove mreže za procenu rizika pri transportu opasnih materija podrazumeva analizu uticaja *a posteriori* verovatnoća na pojavu akcidenta. Znači, polazeći od situacije da je došlo do transportnog akcidenta i uzimajući u obzir *a posteriori* verovatnoće varijabli od interesa, mogu se identifikovati njihovi uticaji na pojavu akcidentnog scenarija. Pretpostavka o pojavi transportnog akcidenta podrazumeva da je to sigurni događaj čija verovatnoća realizacije iznosi 1, pa se na bazi vrednosti *a posteriori* verovatnoća interesnih varijabli može definisati stepen njihovog hazardnog uticaja tokom transporta opasnih materija.

Na taj način se rezultati ove analize implementiraju u preventivne mere transportnih kompanija čija je svrha da se smanji rizik od akcidenata pri prevozu opasnih materija. Generalno, postoje dva osnovna pristupa za konstrukciju Bayes-ove mreže: manualni i automatski. Oba ova metoda imaju svoje prednosti i nedostatke. Manualni pristup u konstrukciji Bayes-ove mreže pretpostavlja postojanje *a priori* fundamentalnog ekspertskog znanja. Nasuprot ovome, automatski koncept kreiranja Bayes-ove mreže ne zahteva korišćenje ekspertskog znanja, već je zasnovan na učenju mreže shodno iskustvima ugrađenih u informacijama iz baza podataka. U cilju eliminisanja nedostataka ove dve metode predložen je kombinovani koncept kreiranja Bayes-ove mreže. Ovaj koncept je zasnovan na činjenici da nakon ugrađivanja ekspertskog znanja u Bayes-ovu mrežu treba sprovesti učenje njenih parametara (varijabli) prema raspoloživoj bazi podataka koristeći neki od algoritama učenja. U tu svrhu se koriste sledeća dva algoritma učenja Bayes-ove mreže: a) algoritam procene maksimalne verovatnoće i b) algoritam očekivane maksimizacije. Osnovni nedostaci ekspertskog sistema zasnovanog na primeni Bayes-ove mreže se odnose na dva limitirajuća faktora. Prvi faktor se tiče ekspertskog znanja koji je subjektivne prirode i ograničenog karaktera, što može uticati na smanjenu pouzdanost validne procene rizika. Drugi faktor je vezan za ignorisanje uslovne nezavisnosti između varijabli kada eksperti ustanove njihovu kauzalnost. Značaj predstavljanja ekspertskog sistema u obliku mrežne strukture ima za svrhu bolje razumevanje uzročnih odnosa između promenljivih i prevazilaženje njegovih ograničenja pri formiranju modela procene rizika zasnovanog na kombinovanom pristupu Bayes-ove mreže.

Međusobna informacija između dve diskretne slučajne promenljive X i Y je data sa:

$$I(X, Y) = \sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x, y) \log \frac{p(x, y)}{p(x)p(y)} \quad (7.1)$$

Intenzivan razvoj hemijske procesne industrije zahteva efikasnije angažovanje transportno-logističkih kapaciteta u okviru sistema opasnih materija. Savremeni uslovi procesne proizvodnje su podržani fleksibilnim logističkim sistemima u kojima značajno mesto imaju podsistemi transporta. Izbor transportnih sredstava se sprovodi na bazi tehničko-tehnoloških, transportnih i ekonomskih pokazatelja u skladu sa vrstom (klasom) opasnih materija. Zato se transportni rizik tretira kao težinski dominantan kriterijum pri izboru transportnih modaliteta. Komparativne prednosti železničkog transporta su uticale na njegovo značajnije učešće pri kopnenom prevozu opasnih materija na srednjim i većim distancama. Bezbednosni aspekt ove činjenice treba interpretirati u smislu redukcije transportnog rizika unutar individualnih i društveno prihvatljivih granica, a ne kao mogućnost njegovog potpunog eliminisanja. Tako na primer, transport tečnog azota kroz železnički i drumski tunel prati rizik koji nije moguće izbeći na ekonomski prihvatljiv način, ali je zato rizik od zagušenja nekoliko puta manji pri železničkom transportu u odnosu na drumski za istu vrstu i količinu opasne materije i time postaje prihvatljiviji sa individualnog i društvenog aspekta bezbednosti [229]. Osnovni uzrok koji dovodi do akcidenata pri železničkom transportu opasnih materija se odnosi na fenomen iskliznuća [230].

Iako je procena železničkih akcidentnih rizika tokom prethodnih decenija bila predmet brojnih istraživanja, treba istaći da su najznačajniji rezultati postignuti u poslednjih nekoliko godina i to uglavnom zahvaljujući FRA REA bazi podataka. Dva osnovna pristupa korišćena u dosadašnjim istraživanjima iskliznuća voza obuhvataju simulacione modele i statističku analizu [230]. Simulacioni modeli tiču se nelinearnih dinamičkih odziva pri kretanju vozila na specifične uslove vožnje i okruženja, a bazirani su na detaljnoj interakciji točak-šina. Analizirani su uticaji frikcije, momenta usled vučnog uređaja, usporenosti delovanja kočne sile i brzine voza na broj iskliznutih vagona. Naknadno sprovedena studija je ove uticaje dopunila simulacijom nezavisnog kretanja otkaćenog vagona usled otkaza vučnog uređaja [231-232]. Savremeni trendovi u dinamičkoj simulaciji voza i analizi iskliznuća su bazirani na korišćenju softverskih paketa, kao što je *SYMPACK*. Softverske simulacije iskliznuća voza usled zemljotresa imaju poseban značaj tokom transporta opasnih materija u trusnim oblastima, kao što su to npr. Japan, Kalifornija itd. [233]. Transportni akcidenti ove vrste su prilično retki događaji (izuzetno mala učestalost pojave), ali njihov nastanak prate katastrofalne posledice.

Statistički modeli procene rizika pri transportu opasnih materija su bazirani na podacima o nastalim vanrednim događajima usled iskliznuća voza uzetih iz odgovarajućih izvora (baza podataka). *Saccomanno & El-Huge* su na bazi okrnjene geometrijske raspodele razvili model procene srednjeg broja iskliznutih kola u zavisnosti od brzine kretanja, rezidualne dužine voza i akcidentnog uzroka [234]. Značajnije poboljšanje polaznog statističkog modela je sprovedeno kroz modifikaciju koju su predložili *Bagheri et al.*[235]. Koristeći metodološki pristup iz prethodnih studija, *Lui et al.* su pokazali da je lom šina najzastupljeniji uzrok iskliznuća teretnih vozova na glavnim prugama klase I u SAD. Prosečan broj iskliznutih vagona usled loma šina iznosi 14, dok u slučaju oštećenja ležaja vagona taj broj iznosi 7. Oštećenja ležaja predstavljaju potencijalno ozbiljniji uzrok iskliznuća voza nego što su naprsnuća šina, ali statistička analiza pokazuje povoljnije stanje za ovaj uzročni faktor. Prethodni rezultat najbolje ilustruje očigledan značaj statističkih modela u odnosu na simulacioni pristup koji ne raspolaže sa adekvatnim tehnikama identifikacije ovih ili sličnih parametara.

Studije koje statističku metodu tretiraju sa spektra razvoja i implementacije, kao npr. [234-235], isključivo su bazirane na upotrebi FRA REA baze podataka i samim tim su rezultati takvih istraživanja ograničeni na železnicu SAD. Implementacija statističkih metoda na države izvan teritorije SAD zahteva korišćenje adekvatnih baza podataka, pa u nedostatku istih imamo vrlo slabu pokrivenost za većinu nacionalnih železnica širom sveta. Treba imati u vidu da za primenu statističke metode nije dovoljno samo postojanje bilo kakve baze podataka, već ona mora biti koncipirana bar približno kao FRA REA kako bi bili zastupljeni svi aspekti akcidenta (broj iskliznutih vagona, tačka iskliznuća i dr.), a što nije slučaj sa Evropskom bazom EUROSTAT. U tom smislu treba posebno istaći istraživanje koje shodno bazi podataka o transportnim akcidentima na Iranskim železnicama koristi CRISP-DM metodologiju radi ekstrahovanja nepoznatih relacija između raspoloživih podataka [236]. Značaj ove metodologije se ogleda u potencijalnom nadomeštanju eventualno nedostajućih podataka o akcidentima (npr. nedoumice oko uzroka) sa ciljem ostvarivanja efikasnijih preventivnih mera.

7.1.1. FAKTORI KOJI UTIČU NA ISKLIZNUĆE

Fenomen iskliznuća voza je kompleksan problem koji zahteva sistematičan pristup u analizi uticajnih faktora, posebno kada se radi o transportu opasnih materija. Iskliznuća su uobičajen tip železničkih akcidenta pri teretnom transportu u SAD [230], što je u pogledu opasnih materija inicijalni događaj za eventualni nastanak domino efekta [237]. Akcidentni rizik pri železničkom transportu opasnih materija je znatno nepovoljniji naspram drumskog u kontekstu nastanka domino efekta. Zato procena rizika mora da obuhvati proces eskalacije akcidenta koji je vrlo izražen pri železničkom transportu lako zapaljivih i eksplozivnih supstanci (benzin, TNG i sl.), a ključnu ulogu u tom procesu ima iskliznuće voza. Tipičan primer je železnički akcident Viareggio (2009) kada je usled iskliznuća došlo do eksplozije 45 tona TNG-a od koje je 13 lica povređeno, dok su materijalni gubici procenjeni na 32 miliona €[238].

Na iskliznuće vagon-cisterni sa opasnim materijama utiče veliki broj parametara. Osnovni parametri koji utiču na iskliznuće voza obuhvataju:

- Brzinu kretanja voza,
- Klasu koloseka,
- Dužinu voza i
- Tačku iskliznuća.

Međusobna zavisnost ovih parametara utiče na kompleksnost iskliznuća čime ovaj fenomen postaje teži za identifikaciju i adekvatnu procenu akcidentnog rizika. Najizraženija zavisnost je između brzine voza i klase koloseka. Manja klasa koloseka daje veći broj iskliznuća pri manjoj brzini, dok sa porastom brzine imamo tendenciju opadanja broja iskliznuća. Broj iskliznuća kod veće klase koloseka raste sa porastom brzine. Praktična iskustva su pokazala da vozove većih dužina prati veća verovatnoća iskliznuća. Ovu hipotezu su potvrdile statističke analize sprovedene prema FRA REA bazi podataka.

Vozove manjih dužina karakteriše manji rizik od iskliznuća, ali se tada u pitanje dovodi njihova rentabilnost. Ovo je jedan od vrlo očiglednih situacija zašto se ne teži potpunoj eliminaciji rizika, nego se vrši redukcija na prihvatljivi nivo o kojoj je prethodno bilo reči. U tom smislu, postupkom višekriterijumske optimizacije se određuje optimalna dužina voza koja minimizuje iskliznuće na prihvatljivi nivo rizika. Dosadašnja istraživanja su pokazala da je prvo železničko vozilo najčešće podložno iskliznuću kod teretnog voza. Iskliznuća vozova koji broje više od 10 železničkih vozila (pozicija) se javljaju u preko 98% slučajeva. Znatno procenat iskliznuća voza (25%) se odnosi na prvih 10 pozicija, što ukazuje na srazmerno veliki uticaj uzročnih faktora vezanih za kolosek. *Liu et al.* su pokazali da se tačka iskliznuća voza najbolje može aproksimirati Beta raspodelom, primenom K-S testa nad skupom uobičajenih raspodela {Normalna, Logistička, Vejbulova, Uniformna, Beta, Gama}[239]. Preko ove raspodele se mogu identifikovati uzroci iskliznuća voza i za frontalne pozicije je to uglavnom prelom šina, dok uniformna raspodela odgovara otkazima na vagonima. U Severnoj Americi se za transport opasnih materija koristi više od 2 miliona teretnih vagona. Železnički transport opasnih materija ima niz specifičnosti naspram drumskog i u prvom planu se tiče ekonomičnosti usled angažovane energije za prevoz jedinične neto mase tereta po pređenom kilometru. Ova prednost železničkog saobraćaja u odnosu na drumski je omogućena zahvaljujući malom koeficijentu trenja u kontaktu točak-šina i mogućnosti formiranja kompozicije od nekoliko desetina vagona (ponekad i preko 100 vagona čine jednu kompoziciju). Nasuprot ovome, drumski transport opasnih materija pored vučnog vozila predviđa samo jedno priključno vozilo, pa je energetska efikasnost po jedinici prevezenog tereta i pređenom kilometru znatno manja od železničkog vida transporta.

Ovome treba dodati da drumske saobraćajnice mogu imati znatne uspone (nekoliko procenata), dok se kod koloseka taj nagib izražava u promilima. Drumska vozila karakteriše veći koeficijent trenja između podloge i pneumatika, što predstavlja još jedan od faktora za smanjenje ekonomičnosti drumskog transporta. S druge strane, drumski saobraćaj pruža daleko veću fleksibilnost prevoza utičući na smanjenje logističkih troškova kada imamo transport manje količine tereta na manjim distancama (do 100 km). Ovde se neće detaljnije zalaziti u transportno-logističku komponentu drumskog i železničkog transporta, pošto ovo nije tematika disertacije, već će u nastavku biti stavljen akcenat na njihovu komparativnu analizu sa aspekta transportne bezbednosti odnosno rizika od akcidenata. Teorija i praksa transporta često postavljaju pitanje koji od ova dva vida transporta imaju prednost pri transportu opasnih materija. Ovde se prvo mora naglasiti da aspekt transportno-logističke ekonomičnosti nema direktne povezanosti sa aspektom bezbednosti transporta, pa onaj vid transporta koji je pogodan sa jednog aspekt ne mora biti, a najčešće i nije prihvatljiv sa drugog.

Sagledavanje problematike rizika usled transporta opasnih materija nije moguće bez uključivanja parametara ekonomičnosti, pošto svrha transporta nije da se rizik minimizuje, već da se profit maksimizira. Ovaj stav treba tumačiti u smislu da smanjenje transportnog rizika ispod optimalne vrednosti može imati za posledicu značajan udeo u smanjenju transportne ekonomičnosti, pa profit može biti minimalan ili čak negativan, čime se u potpunosti gubi interes za takvom aktivnošću. Znači, kada se vrši odabir vida transporta treba se rukovoditi principom optimizacije između kriterijuma maksimizacije profita i minimizacije rizika. Na iskliznuće vagon-cisterni sa opasnim materijama utiče veliki broj parametara, među kojima treba izdvojiti: dužina voza, brzina pri iskliznuću, uzrok akcidenta, tačka iskliznuća (pozicija prvog iskliznutog vagona), pozicije vagon-cisterni u kompoziciji voza, tip i konstrukcija vagon-cisterni. Najveći broj incidenata sa opasnim materijama se javlja kao posledica iskliznuća voza. Kada se govori o uzrocima akcidenata treba napomenuti da su prvobitno identifikovani parametri stope iskliznuća voza odnose na karakteristike železničke infrastrukture. Najznačajnija karakteristika je definisana preko klasa koloseka, pa je tako npr. Federalna Uprava Železnica (FRA) u SAD razvila sistem klasifikacije prema kvalitetu koloseka. Prema ovoj klasifikaciji postoji ukupno 9 klasa koloseka pri čemu viša klasa (veći broj) reprezentuje njegov bolji kvalitet odnosno manju stopu iskliznuća voza. Osim toga, viša klasa koloseka odgovara većim radnim brzinama, ali istovremno zahteva strožije kriterijume u pogledu njegovog održavanja i ispunjenja bezbednosnih standarda.

Kada se sprovodi analiza iskliznuća treba imati u vidu da se kao merilo ozbiljnosti udesa razmatraju dva kriterijuma:

- Ukupni direktni i indirektni troškovi uzrokovani udesom i
- Broj iskliznutih vagona iz kompozicije voza.

Broj iskliznutih vagona iz kompozicije voza obuhvata vagone u kojima se prevoze opasne supstance (vagon-cisterne) i ostale vagone. Istraživanje na ovu tematiku koje su sproveli *Glickman et al.* pokazuje da se broj iskliznutih vagon-cisterni ponaša prema hiper-geometrijskoj raspodeli u slučaju kada su njihove pozicije nasumično definisane u kompoziciju voza. Broj iskliznutih vagon-cisterni zavisi od njihove pozicije u kompoziciji, našta su posebno ukazali *Bagheri et al.* Pored ovog uslova na iskliznuće vagon-cisterni veliki uticaj ima njihovo konstrukciono rešenja sa aspekta torzione krutosti, pa se pri analizi iskliznuća moraju u obzir uzeti oba parametra. Konstrukcija vagon cisterne ima dvostruko dejstvo na verovatnoću pojave akcidenta, utičući na pojavu iskliznuća vagona i osetljivosti rezervoara na mehanička oštećenja u slučaju da se realizuje događaj iskliznuća. Znači, pojava iskliznuća vagon-cisterne ne znači automatski i pojavu isticanja opasnih supstanci, jer realizaciji drugog događaja prethodi prvi pod uslovom da je došlo do plastičnih deformacija odnosno oštećenja rezervoara. Procena rizika pri železničkom transportu opasnih materija se sprovodi shodno modelima koji su kreirani zavisno od homogenosti tipova teretnih vagona u kompoziciji. U tom pogledu, identifikovana su dva različita slučaja:

- Svi teretni vagoni koji čine kompoziciju voza su istog ili sličnog tipa (npr. Zas-z) i
- Kompozicija voza je heterogenog karaktera, jer su pored teretnih vagona namenjenih za transport opasnih supstanci (vagon-cisterni) uključeni i drugi tipovi teretnih vagona (npr. Sgnss-z, Eanoss-z i dr.).

7.1.2. PROBABILISTIČKI MODEL PROCENE RIZIKA

Probabilistički modeli procene rizika su zasnovani na korišćenju raspodela uslovnih verovatnoća događaja koji prethode akcidentu, a koje su formirane u skladu sa relevantnim statističkim podacima. Verovatnoća nastanka hemijskog udesa usled iskliznuća voza za heterogenu kompoziciju vagona je data preko formule uslovne verovatnoće [249]:

$$P(X_l, X_k, X_j, X_i) = P(X_l / X_k, X_j, X_i) \cdot P(X_k / X_j, X_i) \cdot P(X_j / X_i) \cdot P(X_i) \quad (7.2)$$

Diskretne slučajne raspodele verovatnoća su:

X_i – iskliznuće i -te pozicije voza,

X_j – iskliznuće j železničkih vozila iz kompozicije,

X_k – iskliznuće k vagon-cisterni,

X_l – isticanje opasne materije iz l vagon-cisterni,

i – pozicija prvog iskliznutog vozila u kompoziciji,

j – ukupan broj iskliznutih vagona ($0 < j \leq n$),

k – broj iskliznutih vagon-cisterni ($0 \leq k \leq j$),

l – broj vagon-cisterni podložnih isticanju ili curenju opasne materije ($0 < l \leq k \leq j \leq n$),

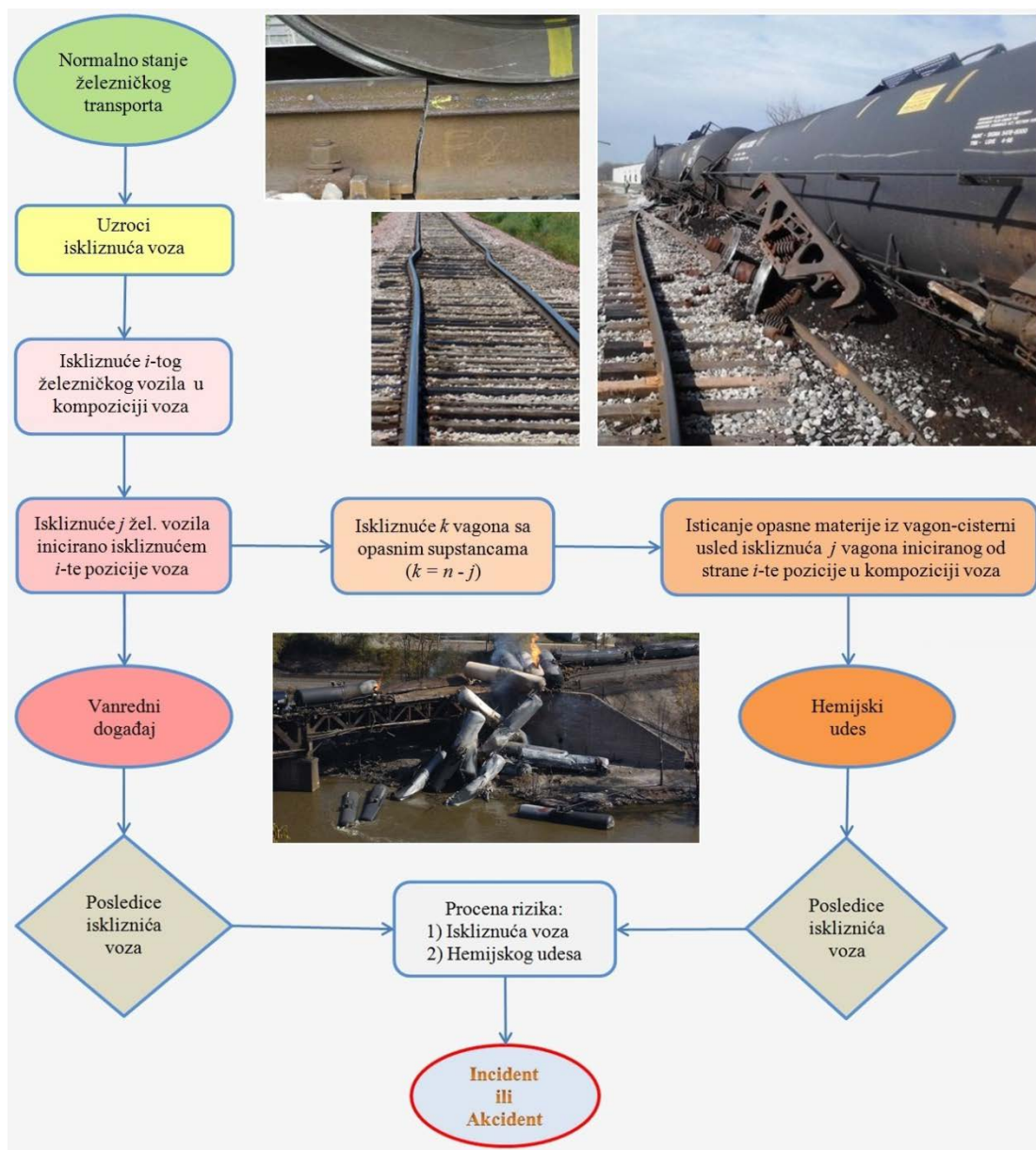
n – ukupan broj železničkih vozila ($n \geq 2$).

Ishod nastanka hemijskog udesa zavisi od potencijalne pojave sekvencijalnih događaja koji mu prethode (slika 7.1) i matematički se interpretiraju preko parcijalnih verovatnoća sa sledećim značenjima:

- Diskretna raspodela $P(X_l / X_k, X_j, X_i)$ predstavlja uslovnu verovatnoću nastanka hemijskog udesa (isticanja opasne materije) pod uslovom da je iskliznuće inicirano na i -toj poziciji voza i ako je među ukupno j iskliznutih železničkih vozila bilo k vagon-cisterni.
- Diskretna raspodela $P(X_k / X_j, X_i)$ predstavlja uslovnu verovatnoću iskliznuća k vagon-cisterni pod uslovom da je iskliznuće inicirano na i -toj poziciji voza izazvalo iskliznuće ukupno j železničkih vozila.

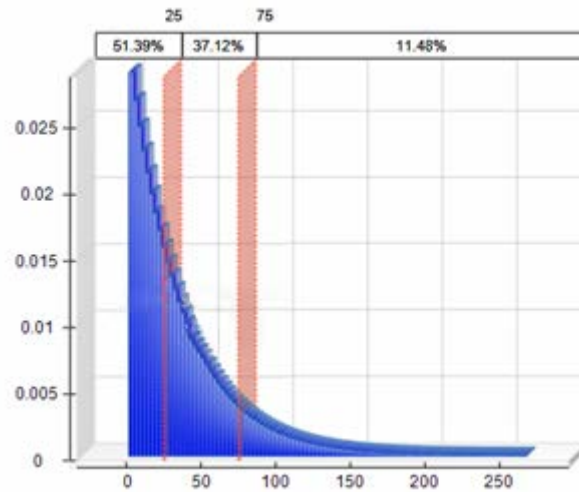
- Diskretna raspodela $P(X_j / X_i)$ predstavlja uslovnu verovatnoću iskliznuća j različitih tipova železničkih vozila iz kompozicije voza, pod uslovom da je iskliznuće inicirano na i -toj poziciji.
- Diskretna raspodela $P(X_i)$ predstavlja verovatnoću inicijalizacije iskliznuća u i -toj poziciji voza.

Formiranje diskretnih raspodela iz (7.2) se sprovodi prema podacima iz FRA REA baze podataka za period od 2006-2015. godine. Generisanje raspodela uslovnih verovatnoća se vrši u softverskom modulu *Analytic Solver Platform V2016-R2*. Metodologija definisanja uslovnih verovatnoća je potpuno nezavisna od literature uz istovetan probabilistički okvir i izvor statističkih podataka. Time je omogućeno dobijanje indiferentnih rezultata za identične ili približno iste ulazne parametre u odnosu na studije novijeg datuma [239]. Značaj ovog pristupa je u verifikaciji postojećih rezultata i identifikaciji latentnih faktora rizika vezanih za iskliznuće voza.

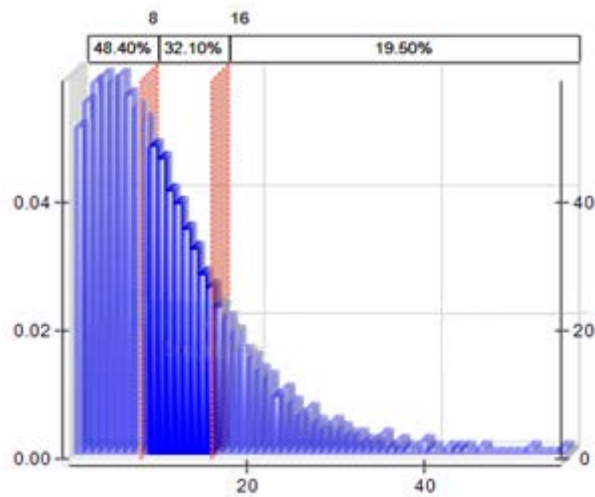


Slika 7.1. Šema uzročno-posledičnog odnosa uslovnih verovatnoća kod iskliznuća voza

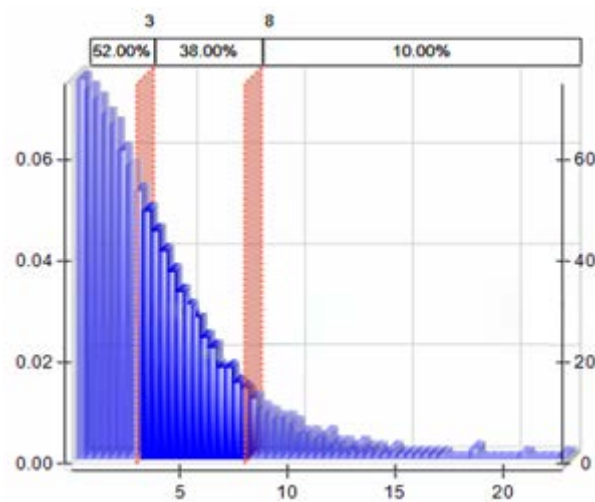
Raspodele uslovnih verovatnoća iz (7.2) su date na slikama 7.2-7.5 i reprezentuju sekvencijalni niz događaja koji prethode pojavi akcidenta pri železničkom transportu.



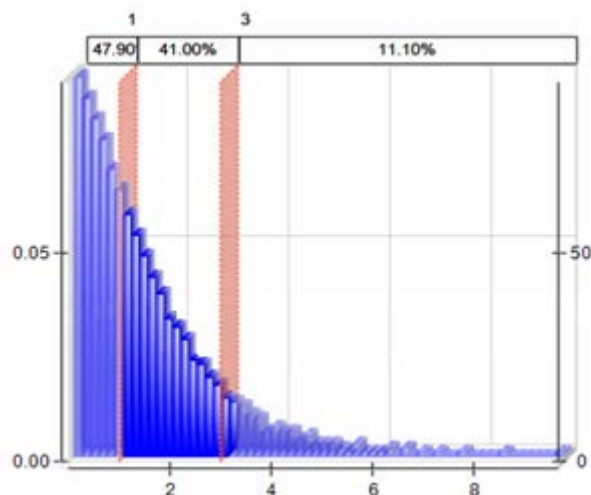
Slika 7.2. Raspodela pozicije iskliznuća u vozu



Slika 7.3. Raspodela ukupnog broja iskliznutih vagona



Slika 7.4. Raspodela broja iskliznutih HAZMAT vagona



Slika 7.5. Raspodela broja vagon-cisterni sa ispuštanjem

Verovatnoća pojave akcidenta pri železničkom HAZMAT transportu se dobija iz (7.2) shodno uslovima sa slika 7.2-7.5 i npr. za $P(X2, X6, X10, X1)$ iznosi $1,23 \cdot 10^{-5}$.

Iskliznuće voza ima značajnu ulogu u akcidentima pri železničkom transportu opasnih materija, dok prisustvo zapaljivih i eksplozivnih supstanci utiče na njihovu eskalaciju (domino efekat). Međusoban uticaj parametara iskliznuća nije dovoljno identifikovan, tako da latentni činioci doprinose većoj neizvesnosti oko potencijalnog nastanka akcidenta odnosno utiču na veći nivo rizika. Adekvatna procena rizika zahteva integraciju simulacionih tehnika, statističkih analiza i QRA modela u metodološki okvir za *a posteriori* ažuriranje nivoa rizika. Razvoj takvih metodoloških pristupa zahteva poboljšanje postojećih statističko-probabilističkih modela i njenu implementaciju kroz specifične eksploatacione uslove.

7.2. MODEL PROCENE TRANSPORTNOG RIZIKA USLED ISKLIZNUĆA VOZOVA

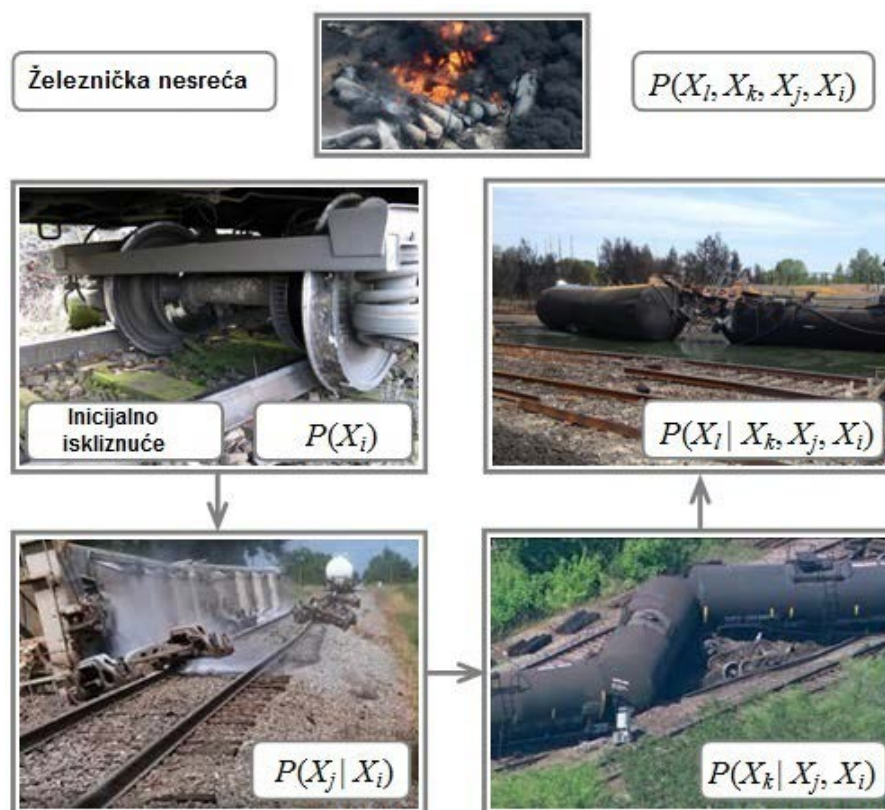
Iskliznuća voza su najčešći slučaj železničkih akcidenata [240]. Uzroci koji dovode do iskliznuća uključuju nepravilnost šina i oštećenja železničkih vozila. Tokom poslednjih deset godina, oko 500 akcidenata godišnje je evidentirano u EU usled iskliznuća [241]. Oko 7% ovih akcidenata ima katastrofalne posledice. Akcidente sa katastrofalnim posledicama parti u proseku 30 smrtnih slučajeva godišnje i šteta od 10 miliona funti. Železnički transport opasnih materija prati značajan rizik, jer posledice takvih akcidenata mogu biti katastrofalne. Potpuno eliminisanje rizika pri transportu opasnih materija nije moguće ili bi bilo ekonomski neopravdano. Zbog toga postoji tendencija razvoja procedura za optimizaciju rizika [242]. Savremena istraživanja procene akcidentog rizika usled iskliznuća voza su zasnovana na nekoliko pristupa, kao što su Artificial Neural Networks (ANN), Naive Baies, stablo odlučivanja i genetski algoritam [243]. Važnu ulogu u analizi železničkih akcidenata ima baza podataka FRA. Upotreba FRA baze podataka je bila osnova za izvođenje probabilističke analize železničkih transportnih rizika [239]. Probabilistička analiza zahteva poznavanje nekoliko parametara, kao što su tačka iskliznuća (POD), broj vagona koji su isklizli, broj vagon-cisterni iz kojih dolazi do ispuštanja i posledice ispuštanja. *Anderson* i *Barkan* pokazuju da se tačka iskliznuća najbolje može aproksimirati preko Beta distribucije [244]. *Bagheri et al.* su predložili statistički model za približnu procenu ukupnog broja vagona koji su isklizli [235]. *Glickman et al.* su prepostavili da broj vagon-cisterni koji su isklizli odgovara hiper-geometrijskoj raspodeli [245]. Ispuštanje opasnih materija iz vagon-cisterni odgovara Poison binomnoj raspodeli [239]. *Ksiu et al.*, su predstavili ZTNB regresioni model koji je razvijen da bi se procenila ozbiljnosti iskliznuća voza [242].

Otkazi na koloseku i opremi su primarni uzroci iskliznuća voza na glavnim prugama, dok upotreba skretnica i pravila za prebacivanje značajno utiče na učestalost iskliznuća na sporednim kolosecima i industrijskim kolosecima [236]. Predloženi okvir verovatnoće je zasnovan na Bayesovom klasifikatoru za predviđanje katastrofalnih železničkih nesreća izazvanih iskliznućem.

7.2.1. VEROVATNOĆA ŽELEZNIČKE NESREĆE

Verovatnoća nesreće zbog iskliznuća se predviđa preko diskretne distribucije koja proizlazi iz slučajnih podataka ili preporuka iz literature. Model verovatnoće za procenu slučajnog rizika koristi verovatnoću događaja koji prethode nastanku nezgoda identifikovanih preko relevantnih slučajnih podataka (slika 7.6). Transportnom akcidentu prethodi niz događaja koji uključuje [239]:

- Inicijalizaciju iskliznuća – $P(K_{si}) = P(A)$,
- Iskliznuće vagona – $P(K_{sj} | K_{si}) = P(B)$,
- Iskliznuće HAZMAT vagona – $P(K_{sk} | K_{sj}, K_{si}) = P(C)$ i
- Oslobađanje opasnih materije iz HAZMAT vagona – $P(K_{sl} | K_{sk}, K_{sj}, K_{si}) = P(D)$.



Slika 7.6. Posledični događaji izazvani iskliznućem

Verovatnoće pojave transportne nesreće usled iskliznuća voza sa heterogenom kompozicijom vagona data je sa formulom uslovne verovatnoće [239]:

$$P(X_l, X_k, X_j, X_i) = P(X_{sl} | X_k, X_j, X_i) \cdot P(X_k | X_j, X_i) \cdot P(X_{sj} | X_{si}) \cdot P(X_i) \quad (7.3)$$

Gde su diskretne slučajne raspodele:

- X_i – iskliznuće inicirano na i -toj poziciji voza,
- X_j – iskliznuće j vagona cisterni,
- X_k – iskliznuće k vagona cisterni,
- X_l – oslobađanje opasnih materija iz l vagona cisterni,
- i – pozicija prvog iskliznutog vagona,

j - ukupan broj iskliznutih vagona ($0 < j \leq n$),
 k - broj iskliznutih vagona cisterni ($0 \leq k \leq j$),
 l - broj vagona cisterni izloženih ispuštanju ili curenju opasnih materija ($0 < l \leq k \leq j \leq n$),
 n - ukupan broj vagona ($n \geq 2$).

Dakle, utvrđivanje verovatnoće iskliznuća podrazumeva poznavanje verovatnoće posledičnih događaja za broj intervala železničkih vagona prema tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Broj železničkih vagona koji odgovaraju događajima iskliznuća

| R. Broj | $n(A) = x$ | $n(B) = y$ | $n(C) = z$ | $n(D) = k$ |
|---------|------------------|-----------------|----------------|----------------|
| 1. | ≤ 25 | ≤ 8 | ≤ 3 | ≤ 1 |
| 2. | ≤ 25 | ≤ 16 | ≤ 3 | ≤ 1 |
| 3. | ≤ 25 | ≤ 8 | ≤ 8 | ≤ 1 |
| 4. | ≤ 25 | ≤ 16 | ≤ 8 | ≤ 1 |
| 5. | ≤ 25 | ≤ 8 | ≤ 3 | ≤ 3 |
| 6. | ≤ 25 | ≤ 16 | ≤ 3 | ≤ 3 |
| 7. | ≤ 25 | ≤ 8 | ≤ 8 | ≤ 3 |
| 8. | ≤ 25 | ≤ 16 | ≤ 8 | ≤ 3 |
| 9. | $25 < x \leq 75$ | $8 < y \leq 16$ | $3 < z \leq 8$ | $1 < k \leq 3$ |
| 10. | $25 < x \leq 75$ | $y > 16$ | $3 < z \leq 8$ | $1 < k \leq 3$ |
| 11. | $25 < x \leq 75$ | $8 < y \leq 16$ | $z > 8$ | $1 < k \leq 3$ |
| 12. | $25 < x \leq 75$ | $y > 16$ | $z > 8$ | $1 < k \leq 3$ |
| 13. | $25 < x \leq 75$ | $8 < y \leq 16$ | $3 < z \leq 8$ | $k > 3$ |
| 14. | $25 < x \leq 75$ | $y > 16$ | $3 < z \leq 8$ | $k > 3$ |
| 15. | $25 < x \leq 75$ | $8 < y \leq 16$ | $z > 8$ | $k > 3$ |
| 16. | $25 < x \leq 75$ | $y > 16$ | $z > 8$ | $k > 3$ |
| 17. | ≤ 25 | ≤ 8 | ≤ 3 | ≤ 1 |

Verovatnoće sekvencijalnih događaja i iskliznuća voza za intervalne vrednosti železničkih vozila iz tabele 7.1 su prikazani u tabeli 7.2.

Tabela 7.2. Verovatnoća železničkih akcidenata preko verovatnoće rednih događaja

| R. Broj | $P(A)$ | $P(B)$ | $P(C)$ | $P(D)$ | $P(X_l, X_k, X_j, X_i)$ |
|---------|--------|--------|--------|--------|-------------------------|
| 1. | 0.5139 | 0.4840 | 0.5200 | 0.4790 | 0.061953 |
| 2. | 0.5139 | 0.8050 | 0.5200 | 0.4790 | 0.103042 |
| 3. | 0.5139 | 0.4840 | 0.9000 | 0.4790 | 0.107226 |
| 4. | 0.5139 | 0.8050 | 0.9000 | 0.4790 | 0.178342 |
| 5. | 0.5139 | 0.4840 | 0.5200 | 0.8890 | 0.114982 |
| 6. | 0.5139 | 0.8050 | 0.5200 | 0.8890 | 0.191240 |
| 7. | 0.5139 | 0.4840 | 0.9000 | 0.8890 | 0.199007 |
| 8. | 0.5139 | 0.8050 | 0.9000 | 0.8890 | 0.330993 |
| 9. | 0.3712 | 0.3210 | 0.3800 | 0.4100 | 0.018564 |
| 10. | 0.3712 | 0.1950 | 0.3800 | 0.4100 | 0.011277 |
| 11. | 0.3712 | 0.3210 | 0.1000 | 0.4100 | 0.004885 |
| 12. | 0.3712 | 0.1950 | 0.1000 | 0.4100 | 0.002968 |
| 13. | 0.3712 | 0.3210 | 0.3800 | 0.1110 | 0.005026 |
| 14. | 0.3712 | 0.1950 | 0.3800 | 0.1110 | 0.003053 |
| 15. | 0.3712 | 0.3210 | 0.1000 | 0.1110 | 0.001323 |
| 16. | 0.3712 | 0.1950 | 0.1000 | 0.1110 | 0.000803 |

7.2.2. MODEL OČEKIVANJA NESREĆA

Model za predviđanje ozbiljnosti akcidenta zasniva se na primeni Bayes-ovog klasifikatora. Ovaj tip klasifikatora je izveden iz Bayes-ovog pravila koje glasi:

$$P(\beta|\alpha) = \frac{P(\beta) \cdot P(\alpha|\beta)}{P(\alpha)} \quad (7.4)$$

α - hipoteza,

β - dokaz vezan za hipotezu α ,

$P(\alpha)$ - verovatnoća hipoteze α (*a priori* verovatnoća),

$P(\beta)$ - verovatnoća dokaza, tj. stanja na osnovu prikupljenih podataka

$P(\alpha|\beta)$ - uslovna verovatnoća dokaza β , ako je hipoteza α validna (*a posteriori* verovatnoća),

$P(\alpha|\beta)$ - uslovna verovatnoća hipoteze α ako je hipoteza β validna (verovatnoća).

Klasifikator zasnovan na Bayes-ovom pravilu uvodi dve pretpostavke u odnosu na atribute:

- Svi atributi su *a priori* jednako važni i
- Svi atributi su statistički nezavisni (vrednost jednog atributa nam ništa ne govori o vrednosti drugog atributa).

Baesov klasifikator koristi MAP hipotezu (Makimum A Posteriori) i podrazumeva takvu hipotezu za koju $P(\beta|\alpha)$ ima maksimum uzimajući u obzir prikazane podatke. Onda imamo:

$$h_{MAP} = \arg \max_{\alpha_i \in \beta} P(\beta_i|\alpha) \quad (7.5)$$

$$h_{MAP} = \arg \max_{\alpha_i \in \beta} \frac{P(\beta_i) \cdot P(\alpha|\beta_i)}{P(\alpha)} \quad (7.6)$$

Verovatnoća $P(\alpha)$ se može izostaviti, jer je konstantna i onda je:

$$h_{MAP} = \arg \max_{\alpha_i \in \beta} P(\beta_i) \cdot P(\alpha|\beta_i) \quad (7.7)$$

Gde β_i predstavlja dostupne podatke koji se odnose na atribut i . Pretpostavka o nezavisnosti atributa značajno pojednostavljuje izračunavanje uslovnih verovatnoća i tada važi:

$$\begin{aligned} P(\beta|\alpha) &= P(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n|H) \\ P(\beta|\alpha) &= P(\beta_1|H) \cdot P(\beta_2|H) \cdot \dots \cdot P(\beta_n|H) \end{aligned} \quad (7.8)$$

Pretpostavka o nezavisnosti atributa u slučaju iskliznuća voza je u potpunosti ispunjena, tako da se može primeniti (7.7). Razmatrani atributi za iskliznuće voza uključuju: masu, brzinu i temperaturu iskliznuća, kao i broj povređenih i poginulih u železničkim nesrećama. Bayes-ov klasifikator koristi primere u tabeli 7.3 za klasifikaciju novih podataka, tj. vektora koji nije u postojećoj tabeli. Bayes-ov klasifikator je jednostavno i efikasno sredstvo za vektorske podatke.

Razmatrani atributi omogućavaju klasifikaciju novih vektora koji ne postoje u tabeli 7.3. Postojeći podaci se koriste za analizu u smislu procene parametara za atribute traženog vektora. Proces analize je sproveden na uzorku od 38 nesreća sa najmanje jednom povredom. Analizirani statistički uzorak odnosi se na period 2006-2015.

Osnovna svrha studije odnosi se na predviđanje vektorskih atributa koji prate ozbiljnije nezgode sa najmanje jednom poginulom ili 18 povređenih.

Tabela 7.3. Karakteristični akcidentni parametri: 2006-2015

| Red. broj | Masa [t] | Brzina [mph] | Temperatura [⁰ F] | Poginuli | Povređeni |
|-----------|------------|--------------|-------------------------------|----------|-----------|
| 1. | 2,136 | 7 | 10 | 0 | 1 |
| 2. | 5,054 | 19 | 70 | 0 | 4 |
| 3. | 3,740 | 24 | 85 | 0 | 197 |
| 4. | 13,149 | 3 | 46 | 0 | 1 |
| 5. | 14,815 | 31 | 26 | 0 | 1 |
| 6. | 14,107 | 23 | 53 | 0 | 2 |
| 7. | 5,764 | 47 | 62 | 0 | 2 |
| 8. | 8,287 | 36 | 70 | 0 | 2 |
| 9. | 7,279 | 28 | 28 | 0 | 1 |
| 10. | 9,041 | 50 | 81 | 0 | 1 |
| 11. | 2,598 | 34 | 53 | 0 | 2 |
| 12. | 2,144 | 23 | 39 | 0 | 1 |
| 13. | 13,335 | 42 | -1 | 0 | 2 |
| 14. | 12,319 | 23 | 74 | 0 | 3 |
| 15. | 7,500 | 0 | 88 | 0 | 1 |
| 16. | 9,321 | 8 | 34 | 0 | 385 |
| 17. | 8,654 | 22 | 40 | 0 | 1 |
| 18. | 4,627 | 21 | 28 | 0 | 1 |
| 19. | 7,722 | 38 | 60 | 0 | 2 |
| 20. | 5,217 | 49 | 90 | 0 | 2 |
| 21. | 2,389 | 26 | 28 | 0 | 2 |
| 22. | 6,213 | 47 | 60 | 0 | 2 |
| 23. | 2,380 | 13 | 25 | 1 | 1 |
| 24. | 3,928 | 16 | 58 | 0 | 1 |
| 25. | 8,192 | 53 | 91 | 0 | 1 |
| 26. | 11,125 | 34 | 66 | 1 | 11 |
| 27. | 12,283 | 25 | 37 | 0 | 1 |
| 28. | 7,186 | 55 | 53 | 0 | 1 |
| 29. | 6,821 | 25 | 97 | 0 | 2 |
| 30. | 10,990 | 17 | 72 | 0 | 2 |
| 31. | 39,000 | 21 | 58 | 0 | 2 |
| 32. | 6,600 | 11 | 58 | 0 | 4 |
| 33. | 2,352 | 4 | 65 | 0 | 6 |
| 34. | 0 | 20 | 85 | 0 | 1 |
| 35. | 810 | 10 | 96 | 0 | 1 |
| 36. | 3,459 | 35 | 38 | 0 | 2 |
| 37. | 6,407 | 30 | 5 | 0 | 34 |
| 38. | 7,920 | 61 | 60 | 0 | 1 |

U tom smislu, potrebno je definisati četiri nova vektora koji adekvatno opisuju ove nesreće[250]:

$X1 = (Mass > 7,760; brzina < 27; temperatura < 55)$

$X2 = (Mass < 7,760; brzina > 27; temperatura < 55)$

$X3 = (Mass < 7,760; brzina < 27; temperatura > 55)$

$X4 = (Mass > 7,760; brzina > 27; temperatura > 55)$

Procene akcidentnih verovatnoća definisane ovim vektorima realizovane su sa (7.6) i (7.7), a čije su vrednosti prikazane u tabeli 7.4.

Tabela 7.4. Verovatnoće katastrofalnih akcidenata

| Slučaj | $P(X_1)$ | $P(X_2)$ | $P(X_3)$ | $P(X_4)$ |
|--------|----------|----------|----------|----------|
| DA | 0,00004 | 0,00004 | 0,00004 | 0,00002 |
| NE | 0,05052 | 0,06204 | 0,11427 | 0,05052 |

Verovatnoće katastrofalnih železničkih akcidenata izazvanih iskliznućem voza ne prelaze $4 \cdot 10^{-5}$, uzimajući u obzir zahteve FRA baze podataka . Dobijene vrednosti su potpuno konzistentne sa probabilističkim pristupom datim u [249]. Manja masa i brzina voza pri višoj temperaturi okoline značajno stvara preduslove za nezgode sa manje od 18 povređenih.

8. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

Logistika opasnih materija ima važnu ulogu u geopolitičkim strategijama vodećih svetskih sila, posebno na onim teritorijama koje obiluju rudnim bogatstvima. Ekonomski interesi imaju uvek logično objašnjenje za političke uticaje, a iza kojih često provejavaju neracionalne odluke. U kontekstu geopolitičkih strategija, opasne materije se mogu razvrstati u tri grupe: i) strateški energenti, ii) sirovine novih tehnologija i iii) radioaktivne materije. Ova podela nije izvršena sa aspekta tehničko-tehnološkog i društvenog razvoja, već na bazi svetske dominacije surovih rivala. Svaki od tih rivala želi da na svojoj interesnoj zoni uspostavi potpunu kontrolu, bez uticaja drugih. Uloga sistema opasnih materija u ostvarivanju geostrateških interesa moćnih zemalja iz razumljivih razloga nije dovoljno poznata široj javnosti. Zašto su sistemi opasnih materija sastavni deo geopolitičke strategije najrazvijenih zemalja? Zato što sisteme opasnih materija prati znatan rizik koji može naneti velike gubitke suprostavljenim stranama. Takva situacija je posledica neizvesnosti koja služi kao mehanizam odvratanja rivalskih strana od nekih konkretnih namera. Znatno broj velikih akcidenata koji se dogodio u prošlosti prati latentnost informacija. Analiza velikih akcidenata u kontekstu ekonomskih, političkih i vojnih dešavanja može dati pokazatelje za postojanje subverzivnog delovanja kod znatnog broja tih akcidenata. Takvi akcidenti najčešće prethode nekim važnim društvenim procesima kao mera upozorenja aktuelnim vlastima. Ako se ovo ima u vidu, onda nije teško zaključiti da sistemi opasnih materija imaju važnu ulogu u interesnim zonama krupnog kapitala i geopolitičkim odnosima velikih zemalja. Kompanije koje posluju u sistemu opasnih materija su zatvorenog tipa i strogo čuvaju informacije o svim incidentima i jedva izbegnutim akcidentima, jer su one pokazatelj stanja takvog sistema. U takvim okolnostima, procena rizika se svodi na stručnu analizu od strane zaposlenih lica primenom konvencionalnih tehnika i metoda. Tako realizovana procena rizika nije u dovoljnoj meri pouzdana, jer je ona više kvalitativna nego kvantitativna i u najvećoj meri zavisi od iskustva procenjivača. Širem krugu istraživača nije omogućen pristup raspoloživim informacijama, pa se samim tim procena rizika u sistemu opasnih materija nalazi u okvirima tradicionalnih metoda. Savremeni uslovi poslovanja prevazilaze te okvire i stvaraju preduslove za porast rizika od akcidenata, bez obzira na modernizaciju postrojenja u sistemu opasnih materija.

Fokus istraživanja u ovoj disertaciji je usmeren na procenu rizika procesnih instalacija sa posebnim akcentom na identifikaciji epistemičke i aleatoričke neizvesnosti. Iako je ova tematika bila predmet interesovanja literature, način analize problema u ovoj disertaciji je aktuelizovan kroz vodeće svetske časopise [246-248]. Istraživanje u oblasti rizika mora pratiti adekvatna analiza neizvesnosti,

jer neizvesnost prethodi riziku. Polazeći od takve konceptijske postavke istraživanja, formirana je metodološka procedura za identifikaciju neizvesnosti i procenu fragmentacionog rizika usled eksplozije rezervoara. Fragmentaciona analiza u ovoj disertaciji je zasnovana na pretpostavci da do frakture rezervoara dolazi usled naglog porasta pritiska i da je to jedini uzrok nastanka fragmenata. Zato iz ove hipoteze proističu ograničenja dobijenih rezultata koji su neprimenjivi, ako je mehanizam frakture rezervoara posledica nekih drugih fenomena razaranja. Tipičan primer takvih fenomena se javlja pri dubokoj preradi ugljovodonika u rafinerijskim postrojenjima. Zagrejani ugljovodonici oslobađaju vodonik koji prodire u zidove cevi od ugljeničnog čelika, vezuje za atome ugljenika i pritom se formira gas metan (CH₄). Paljenje metana unutar zidova cevi dovodi do eksplozije instalacija, pri čemu to razaranje nije posledica kritičnog pritiska unutar cevi. Naravno, ovo je jedan specifičan slučaj duboke prerade sirove nafte o kome treba voditi računa kada se vrši procena rizika unutar procesnih instalacija. Metodološki pristup procene fragmentacionog rizika koji je dat u poglavlju 6 ove disertacije podrazumeva frakturu rezervoara usled nastanka kritičnog pritiska. Nastanak kritičnog pritiska u procesnoj opremi može biti usled mehaničke (fizičke) eksplozije, hladnog ili toplog BLEVE efekta, zatvorene eksplozije ili nekontrolisane hemijske reakcije. Razvijeni model fragmentacije iz poglavlja 6 je generalno primenjiv za sve prethodno navedene tipove eksplozija, nezavisno od oblika procesne opreme. Opis metodološkog pristupa za fragmentacionu analizu procesne opreme je izložen kroz studiju slučaja horizontalnog cilindričnog rezervoara za skladištenje TNG-a. Skladištenje lako zapaljivih supstanci, poput TNG-a je posebno karakteristično sa aspekta pojave domino efekta i eskalacije inicijalnih incidenata. Fragmentaciona analiza u ovoj disertaciji razmatra eksploziju rezervoara praćenu BLEVE efektom, što je posebno specifično u pogledu broja generisanih fragmenata i njihovih inicijalnih brzina.

U disertaciji je eksplicitno pokazano da neće svaki tip eksplozije dovesti do istog broja generisanih fragmenata, niti će kinematski parametri fragmenata imati istu vrednost. BLEVE efekat je specifičan vid eksplozije kroz čiju analizu je bilo najlakše dokazati prethodni stav. BLEVE efektu prethodni nastanak incidenta u vidu pojave požara u neposrednoj blizini rezervoara, najčešće usled ispuštanja lako zapaljivih supstanci ili kao posledica nekog drugog uzroka. Toplotni uticaj na zidove rezervoara se manifestuje smanjenjem otpornosti materijala (zatezne čvrstoće), pa će razaranje procesne opreme pratiti manji kritični pritisak od uobičajne vrednosti (vrednosti koja odgovara bez uticaja vatre). Temperaturski uticaj je isključivo rezervisan za BLEVE efekat, jer kod drugih tipova eksplozije ne postoji dovoljno vremena da se toplota prenese na zidove rezervoara (npr. pri nekontrolisanoj hemijskoj reakciji i sl.). Zaključak ove disertacije je da se brzina fragmenata ne može pouzdano proceniti na bazi ekspanzione energije, jer ne postoji pouzdan način za procenu udela ove energije (kinetičke energije) za svaki pojedinačni fragment. Svi modeli procene ekspanzione energije (Brode, Baker, Baum) su bazirani na kritičnom pritisku (pritisak pri kome nastaje eksplozija rezervoara), što znači da ekspanziona energija može uključiti toplotni uticaj. Međutim, komparativna analiza rezultata je pokazala da ekspanzioni modeli daju prihvatljive rezultate samo za fragmente do 200 kg. Ova činjenica daje opravdanje zašto je u disertaciji primenjen inercijalni model. Fragmentaciju rezervoara prati generisanje fragmenata manje i veće mase. Fragmenti veće mase imaju generalno veći domet, jer im je veća inicijalna brzina. Eksplozivna energija procesne opreme se samo delom transformiše u kinetičku energiju fragmenata, dok se ostatak odlazi na energiju udarnog talasa i toplotno zračenje. Dakle, potpuno je pogrešna pretpostavka nekih literaturnih izvora da se celokupna energija transformiše u kinetičku energiju fragmenata. Svaki tip eksplozije u zatvorenom prostoru (rezervoaru) mora pratiti udarni talas, a kod lako zapaljivih supstanci i nastanak vatrene lopte (toplotno zračenje). Koliki će biti udeo ovih energija zavisi od tipa eksplozije i vrste opasne materije. Eksploziju rezervoara sa toksičnim supstancama koje pritom nisu zapaljive ne prati toplotno zračenje, ali usled disperzije toksičnih materija nastaje dodatni hazard u obliku kontaminacije okolnog područja. Hazard usled toplotnog zračenja ne prelazi 200 m pri eksploziji oko 50 m³ TNG-a, dok toksični hazard iz istog volumena uz nepovoljne meteorološke uslove može biti i do nekoliko kilometara.

U ovoj disertaciji su prikazane originalne i unapređene ideje za fragmentacionu analizu procesne opreme naspram literaturnih izvora. U disertaciji je po prvi put uveden termin idealna fragmentacija koja je poslužila kao osnova za razvoj probablističko masenog metoda. Ova metoda je omogućila da se proceni broj generisanih fragmenata pri eksploziji rezervoara. Poseban doprinos ovog

istraživanja je mogućnost procene mase za svaki generisani fragment. Ovi rezultati su dobijeni primenom Monte Carlo simulacije i u potpunosti su konzistentni sa akcidentnim podacima. Zaključeno je da entropijski model iz literaturnih izvora ne daje dobru procenu za tri i više generisanih fragmenata. Time je obrazložena opravdanost uvođenja idealne fragmentacije i probabilističko masenog metoda u fragmentacionu analizu. Ustanovljeno je da sve slučajeve generisanja jednog fragmenta prati isključivo aleatorička neizvesnost. To znači da kada se generiše samo jedan fragment, onda njegovu masu prati zakon uniformne raspodele. Ovo generalno nije slučaj za dva i više fragmenata. Najveću verovatnoću prati nastanak dva fragmenta čija se ukupna masa kreće od 10% do 20% od mase praznog rezervoara.

Fragmentaciona analiza obuhvata analizu geometrijskih i kinematskih parametara. Geometrijski parametri omogućavaju procenu oblika generisanih fragmenata, dok kinematski parametri definišu oblik trajektorije. Vezu između geometrijskih i kinematskih parametara uspostavlja inicijalna brzina. Procena oblika generisanih fragmenata je omogućena zahvaljujući proceni njihovog broja i mase uz definisanje potencijalnih frakturnih linija. Najverovatniji scenariji za razmatranu studiju slučaja (horizontalni cilindrični rezervoar) su:

- i) Generisanje dva fragmenta od kojih je jedan fragment kompletno elipsoidno dance (DIN 28013) sa manjim delom iz cilindra mase 820 kg, a drugi fragment čini isključivo deo cilindra mase 480 kg (verovatnoća ovog scenarije je 17,04 %) i
- ii) Generisanje dva fragmenta od kojih je jedan fragment kompletno elipsoidno dance (DIN 28013) sa većim delom iz cilindra mase 2050 kg, a drugi fragment čini isključivo deo iz cilindra mase 205 kg (verovatnoća ovog scenarija je 17,06%).

S obzirom na neznatnu razliku verovatnoća ovih scenarija, zaključeno je da ih prati aleatorička neizvesnost. Takođe, aleatorička neizvesnost prati i sve one scenarije gde su generisana dva fragmenta, a čija se zbirna masa kreće između 1300 kg i 2255 kg. U svim drugim scenarijama generisanja dva fragmenta nije identifikovana aleatorička neizvesnost. Dakle, neodređenost u pouzdanoj proceni mase dva generisana fragmenta postoji samo u opsegu kada su njihove zbirne mase između 1300 kg i 2225 kg. Ova analiza i zaključci najbolje govore kojim principima se autor rukovodio prilikom procene fragmentacionog rizika procesne opreme.

Let generisanih fragmenta se opisuje spregnutim sistemom nelinearnih diferencijalnih jednačina, dok literaturni izvori koriste uprošćen model. Neki autori u obzir uzimaju samo koeficijent otpora vazduha, zanemarujući potisak fragmenta. Poseban problem je određivanje intenziteta i pravca inicijalne brzine. Intenzitet brzine se u literaturi određuje preko udela ekspanzione energije, dok se za pravac inicijalne brzine pretpostavlja uniformna raspodela, što ne odogovara realnosti. U disertaciji se intenzitet inicijalne brzine određuje prema egzaktnim jednačinama kretanja uzimajući u obzir fluktuacioni efekat otpora vazduha i potiska. Pravac inicijalne brzine je u disertaciji procenjen na bazi geometrijskih parametara odnosno oblika generisanih fragmenata. Zaključeno je da pravac inicijalne brzine za fragmente sa najvećom verovatnoćom generisanja ne prelazi napadni ugao od 34° u odnosu na horizontalu. Izuzetak su jedino veliki fragmenti odnosno ostaci rezervoara čija masa prelazi 3545 kg i kod njih napadni ugao iznosi oko 70° . Fragmenti koji su lansirani pod uglom od približno 34° postižu maksimalne domete za tipične vrednosti otpora vazduha i potiska, pa su samim tim kod njih i najizraženiji fragmentacioni hazardi.

U disertaciji je pokazano da za razmatranu studiju slučaja prosečna očekivana vrednost dometa fragmenata iznosi 638 m, što je potpuno u saglasnosti sa empirijskim preporukama. Verifikacija izloženog metodološkog pristupa procene fragmentacionog rizika je izvršena na bazi gustine rasprnutih fragmenata prema akcidentnim podacima. Verovatnoća da će generisani fragmenti pasti u kvadrant dimenzija 200×200 m na distanci od 600 m iznosi oko 5,9%. Ako je površina cilja 10 m², onda verovatnoća pogotka fragmenta u cilj iznosi oko $1,5 \cdot 10^{-5}$.

Zona sigurnosti fragmentacionih hazarda zahteva da verovatnoća udara fragmenta u cilj ne prelazi vrednost 10^{-6} , što se za cilj površine 10 m² postiže na distancama većim od 800 m. Ova disertacija je pored industrijskih rizika izvesnu pažnju posvetila i transportnim rizicima. Analiza transportnih rizika je ograničena na železnički transport kod kojih je uzrok akcidenata iskliznuće voza. Iskliznuće voza je

jedan od najčešćih uzročnika transportnih akcidenata sa opasnim materijama u železničkom saobraćaju. Suština analize železničkih transportnih rizika sa opasnim materijama je procena verovatnoće iskliznuća takvih vozova. U tu svrhu korišćena je FRA baza podataka i formula uslovne verovatnoće sa više promenljivih (događaja). Statistička analiza transportnih akcidenata je obuhvatila desetogodišnji period (2006-2015). Diskretne raspodele statističkih podataka su dobijene softverskom primenom Monte Carlo simulacije. Zaključeno je da verovatnoća iskliznuća voza sa opasnim materijama zavisi od četiri parametra: i) pozicije nastanka iskliznuća, ii) broja ukupno iskliznutih vagona, iii) broja iskliznutih vagona sa opasnim materijama (HAZMAT vagona) i iv) broja oštećenih HAZMAT vagona. Ako je iskliznuće voza registrovano na 5-toj poziciji, pri čemu je došlo do iskliznuća ukupno 8 vagona od kojih su 2 HAZMAT vagoni, a samo je jedan oštećen, tada je verovatnoća pojave takvog transportnog akcidenta oko $5 \cdot 10^{-6}$.

Interpretacija rizika kao apstraktnog parametra neizvesnosti događaja je znatno jednostavnija kod fragmentacione analize nego kod transportnih akcidenata. To ne znači da je lakše odrediti verovatnoću udara u metu od verovatnoće iskliznuća voza, već da su posledice konstantne za jedan isti razmatrani objekat kod fragmentacije rezervoara. Procesnu opremu karakterišu iste posledice bez obzira u kom se kvadrantu nalazi. Transportne akcidente karakterišu različite posledice za isti sastav kompozicije, jer se ne može *a priori* odrediti broj oštećenih HAZMAT vagona, a upravo od njega zavisi intenzitet posledica. Dakle, fragmentacionu analizu karakteriše kompleksnija procedura za određivanje verovatnoće štetnog (neželjenog) događaja, dok procena rizika železničkih transportnih akcidenta zahteva sagledavanje posledica na bazi oštećenih HAZMAT vagona.

U okviru analize železničkih transportnih akcidenata je poseban akcenat stavljen na model očekivanja akcidenata. Ovaj model je baziran na Bayes-ovom klasifikatoru i ima za cilj da na bazi raspoloživih statističkih podataka predvidi opseg parametara budućih akcidenata. U tu svrhu Bayes-ov klasifikator koristi MAP (Maximum A Posteriori) hipotezu koja je proistekla iz formule uslovne verovatnoće. Verovatnoća očekivanih akcidenata je posmatrana u funkciji tri parametra: i) bruto mase voza (7760 t), ii) brzine voza (27 mph) i iii) temperature vazduha (55 F). Procena očekivanih transportnih akcidenata je izvršena za četiri karakteristična slučaja (vektora) u zavisnosti od toga da li su prethodno navedeni parametri veći ili manji od navedenih vrednosti za različite akcidentne varijante. Zaključeno je da verovatnoća akcidenata (vanrednih događaja sa povređenim i poginulim licima) ne prelazi vrednost $2 \cdot 10^{-5}$ za najnepovoljniju varijantu, kada iskliznuće nastaje pri brzinama većim od 27 mph (43,5 km/h), temperaturama većim od 55 F (12,8 °C) za bruto masu voza preko 7760 t. Minimalna verovatnoća da se transportni akcident neće dogoditi je 0,051. Prethodno dobijeni podaci su od izuzetnog značaja za dalju analizu transportnih rizika, jer je model očekivanih akcidenata definisao granične vrednosti verovatnoća. Ovo je posebno bitno za implementaciju Dempster-Shafer (D-S) teorije i uključivanje neizvesnosti u analizu rizika.

Kada se govori o daljim pravcima istraživanja u oblasti procene industrijskih i transportnih rizika treba imati na umu prethodno pomenutu D-S teoriju. Ova teorija predstavlja generalizovanu Bayes-ovu teoriju i zasnovana je na stepenu verovanja (masama) da će neki događaj biti realizovan ili ne. Dakle, ovu teoriju karakteriše rad sa graničnim vrednostima verovatnoće između kojih je definisana neizvesnost. Bayes-ova formula ne prepoznaje fenomen neizvesnosti i kod nje je za bilo koji događaj X ispunjen uslov $P(X=da) + P(X=ne) = 1$. D-S teorija u prehodnu formulu uključuje neizvesnost, pa je tada $P(X=da) + \text{neizvesnost} + P(X=ne) = 1$. Ukoliko su procene $P(X=da)$ i $P(X=ne)$ nepouzdana, tada raste neizvesnost i potreba za D-S teorijom je očigledna. Imajući u vidu mogućnosti D-S teorije, autor ove disertacije je pri analizi fragmentacionog rizika takođe rezultate prikazao u formi graničnih vrednosti za faktore masa od 0,55 i 0,75. Nemogućnost egzaktne procene faktora mase pri fragmentacionoj analizi rezervoara je zahtevalo njegovo predstavljanje između dve granične vrednosti. Ova neizvesnost procene je uticala na maksimalno odstupanje rezultata od 12,5%. Primena D-S teorije daje procenu rizika uzimajući u obzir uticaj neodređenosti usled procene input-a.

Ovo je posebno značajno za procenu rizika u uslovima kada se ne raspolaže sa dovoljno informacija ili su one nepouzdana. Sistematska analiza industrijskih i transportnih rizika koja je prezentovana u ovoj disertaciji daje uvid u kompleksnost ove problematike i validnost dobijenih rezultata. Autor je kroz originalan metodički prilaz ukazao na specifičnosti analize fragmentacionih i transportnih rizika i neophodnost razmatranja aleatoričke i epistemičke neizvesnosti. U disertaciji je

8. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

takođe naglašen značaj korišćenja graničnih verovatnoća kao osnovnih parametara za uključivanje efekta neodređenosti u proceni rizika. Takav metodološki pristup stvara dobru podlogu za implementaciju naprednih tehnika procene rizika, kao što je D-S teorija. Zato ova disertacija pruža sasvim solidnu osnovu širem krugu istraživača za dalju identifikaciju rizika, posebno u oblasti procesne opreme, transporta i opasnih materija.

LITERATURA

- [1] M. Rodríguez and I. Díaz, "A systematic and integral hazards analysis technique applied to the process industry," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol.43, pp. 721–729, 2016.
- [2] I. Nimmo, "Abnormal Situation Management," *Process Control Eng.*, vol. 49, no. 5, 1995.
- [3] R. Qi, K. P. Prem, D. Ng, M. A. Rana, G. Yun, and M. S. Mannan, "Challenges and needs for process safety in the new millennium," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 90, no. 2, pp. 91–100, 2012.
- [4] E. De Rademaeker, G. Suter, H. J. Pasman, and B. Fabiano, "A review of the past , present and future of the European loss prevention and safety promotion in the process industries," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 92, no. 4, pp. 280–291, 2014.
- [5] B. Abdolhamidzadeh, T. Abbasi, D. Rashtchian, and S. A. Abbasi, "Domino effect in process-industry accidents - An inventory of past events and identification of some patterns," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 24, no. 5, pp. 575–593, 2011.
- [6] S. M. Tauseef, T. Abbasi, and S. A. Abbasi, "Development of a new chemical process-industry accident database to assist in past accident analysis," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 24, no. 4, pp. 426–431, 2011.
- [7] F. I. Khan and S. . Abbasi, "Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 11, no. 4, pp. 261–277, 1998.
- [8] P. J. M. Sonnemans, P. M. W. Körvers, and H. J. Pasman, "Accidents in 'normal' operation - Can you see them coming?," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 23, no. 2, pp. 351–366, 2010.
- [9] P. Swuste, J. Theunissen, P. Schmitz, G. Reniers, and P. Blokland, "Process safety indicators, a review of literature," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 40, pp. 162–173, 2016.
- [10] F. Khan, S. Rathnayaka, and S. Ahmed, "Methods and models in process safety and risk management : Past , present and future," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 98, pp. 116–147, 2015.
- [11] G. Drogaris, "Learning from major accidents involving dangerous substances," *Saf. Sci.*, vol. 16, no. 2, pp. 89–113, 1993.
- [12] T. A. Kletz, "Learning from experience," *J. Hazard. Mater.*, vol. 115, no. 1–3 SPEC. ISS., pp. 1–8, 2004.
- [13] A. Jacobsson, J. Sales, and F. Mushtaq, "Underlying causes and level of learning from accidents reported to the MARS database," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 23, no. 1, pp. 39–45, 2010.
- [14] A. K. Lindberg, S. O. Hansson, and C. Rollenhagen, "Learning from accidents - What more do we need to know?," *Saf. Sci.*, vol. 48, no. 6, pp. 714–721, 2010.
- [15] K. Kidam, H. A. Sahak, M. H. Hassim, H. Hashim, and M. Hurme, "Method for identifying errors in chemical process development and design base on accidents knowledge," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 97, pp. 49–60, 2015.
- [16] K. Kidam and M. Hurme, "Design as a contributor to chemical process accidents," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 25, no. 4, pp. 655–666, 2012.
- [17] S. Kinnersley and A. Roelen, "The contribution of design to accidents," *Saf. Sci.*, vol. 45, no. 1–2, pp. 31–60, 2007.
- [18] P. E. D. Love, R. Lopez, D. J. Edwards, and Y. M. Goh, "Error begat error: Design error analysis and prevention in social infrastructure projects," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 48, pp. 100–110, 2012.
- [19] I. M. Duguid, "Take this safety database to heart," *Chem. Eng.*, vol. 108, no. 7, pp. 80–84, 2001.
- [20] Z. H. Qureshi, "A review of accident modelling approaches for complex socio-technical systems," *Work. Saf. Crit. Syst. Softw. safety-related Program. Syst.*, vol. 86, pp. 47–59, 2007.
- [21] K. Kidam, N. E. Hussin, O. Hassan, A. Ahmad, A. Johari, and M. Hurme, "Accident prevention approach throughout process design life cycle," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 92, no. 5, pp. 412–422, 2014.
- [22] Q. Tan, G. Chen, L. Zhang, J. Fu, and Z. Li, "Dynamic accident modeling for high-sulfur natural gas gathering station," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 92, no. 6, pp. 565–576, 2013.

- [23] L. J. Crowl, A. Daniel; Louvar, *Chemical Process Safety: Fundamentals with Application, third edition*. 2011.
- [24] A. Al-Shanini, A. Ahmad, and F. Khan, "Accident modelling and safety measure design of a hydrogen station," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 35, pp. 20362–20370, 2014.
- [25] S. A. Adedigba, F. Khan, and M. Yang, "Process accident model considering dependency," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 102, pp. 633–647, 2016.
- [26] M. F. Kujath, P. R. Amyotte, and F. I. Khan, "A conceptual offshore oil and gas process accident model," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 23, no. 2, pp. 323–330, 2010.
- [27] S. Rathnayaka, F. Khan, and P. Amyotte, "SHIPP methodology: Predictive accident modeling approach. Part II: Validation with case study," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 89, no. 2, pp. 75–88, 2011.
- [28] S. Rathnayaka, F. Khan, and P. Amyotte, "SHIPP methodology: Predictive accident modeling approach. Part I: Methodology and model description," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 89, no. 3, pp. 151–164, 2011.
- [29] J. R. Taylor, "Statistics of design error in the process industries," *Saf. Sci.*, vol. 45, no. 1–2, pp. 61–73, 2007.
- [30] K. Kidam and M. Hurme, "Method for identifying contributors to chemical," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 91, no. 5, pp. 367–377, 2012.
- [31] R. B. Ward, "For the hazard of management," *Trans IChemE*, vol. 80, Part B, vol. 80, pp. 47–54, 2002.
- [32] J. Escande, C. Proust, J. Christophe, and L. Coze, "Limitations of current risk assessment methods to foresee emerging risks : Towards a new methodology?," *J. Loss Prev. Process Ind.*, pp. 6–11, 2016.
- [33] D. Regazzoni and D. Russo, "TRIZ Future Conference 2010 TRIZ tools to enhance risk management," *Procedia Eng.*, vol. 9, pp. 40–51, 2011.
- [34] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," *Inf. Control*, vol. 8, pp. 338–353, 1965.
- [35] J. C. Coco, "The 100 Largest Losses 1972-2001 - Large property damage losses in the hydrocarbon - Chemical industries. (20th ed.)," *Texas Marsh's Risk Consult. Pract.*, 2003.
- [36] F. I. Khan and P. R. Amyotte, "Modeling of BP Texas City refinery incident," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 20, pp. 387–395, 2007.
- [37] J. Isimite and P. Rubini, " A dynamic HAZOP case study using the Texas City refinery explosion," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 40, pp. 496–501, 2016.
- [38] F. I. Khan and S. A. Abbasi, "MAXCRED – a new software package for rapid risk assessment in chemical process industries," *Environmental Modelling & Software*, vol. 14, no. 1, pp. 11–25, 1999.
- [39] CSB, "(U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board). BP Texas City refinery explosion and fire - Investigation report. Texas City,," 2007.
- [40] J. Palacin-Linan, "Model-based analysis of the events leading up to the March 2005 safety incident at BP Oil in Texas - Final technical report." 2005.
- [41] D. Manca and S. Brambilla, "Dynamic simulation of the BP Texas City refinery accident," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 25, no. 6, pp. 950–957, 2012.
- [42] J. A. Baker, F. L. S. Bowman, I. I. Rosenthal, S. Gorton, P. V Tebo, D. Hendershot, and D. A. Wiegmann, "The Report of the BP U.S. Refineries Independent Safety Review Panel. Washington, D.C., " *U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB)*, January, 2007.
- [43] Y. Zhu, X. Qian, Z. Liu, P. Huang, and M. Yuan, "Analysis and assessment of the Qingdao crude oil vapor explosion accident : Lessons learnt," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 33, pp. 289–303, 2015.
- [44] V. F. C. Lins and E. M. Guimarães, "Failure of a heat exchanger generated by an excess of SO₂ and H₂S in the Sulfur Recovery Unit of a petroleum refinery," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 20, no. 1, pp. 91–97, 2007.
- [45] B. Hasan, W. Mohd, A. Wan, and A. R. A. Aziz, "Treatment technologies for petroleum refinery effluents : A review," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 89, no. 2, pp. 95–105, 2011.
- [46] D. Zhang and K. Jiang, "Application of data mining techniques in the analysis of fire

- incidents,” *Procedia Eng.*, vol. 43, pp. 250–256, 2012.
- [47] J. J. Rooney, J. H. Turner, and J. S. Arendt, “A preliminary hazards analysis of a fluid catalytic cracking unit complex,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 1, pp. 96–103, 1988.
- [48] I. M. Shaluf, F. R. Ahmadun, and A. M. Said, “Fire incident at a refinery in West Malaysia : the causes and lessons learned,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 16, no. 4, pp. 297–303, 2003.
- [49] S. Chettouh, R. Hamzi, and K. Benaroua, “Examination of fire and related accidents in Skikda Oil Refinery for the period 2002 - 2013,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 41, pp. 186–193, 2016.
- [50] M. A. Alkazimi and K. Grantham, “Investigating new risk reduction and mitigation in the oil and gas industry,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 34, pp. 196–208, 2015.
- [51] A. Srivastava and J. P. Gupta, “New methodologies for security risk assessment of oil and gas industry,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 88, no. 6, pp. 407–412, 2010.
- [52] A. Jacobsson, J. Sales, and F. Mushtaq, “Underlying causes and level of learning from accidents reported to the MARS database,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 23, no. 1, pp. 39–45, 2010.
- [53] B. Fabiano and F. Currò, “From a survey on accidents in the downstream oil industry to the development of a detailed near-miss reporting system,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 90, no. 5, pp. 357–367, 2012.
- [54] T. A. Kletz, “Critical Aspects of Safety and Loss Prevention.” Published by Butterworth-Heinemann Ltd, 1990.
- [55] K. R. Vastveit and O. Njå, “The roles of incident investigations in learning processes at a Scandinavian refinery,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 32, pp. 335–342, 2014.
- [56] C. Lekka and C. Sugden, “The successes and challenges of implementing high reliability principles : A case study of a UK oil refinery,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 89, no. 6, pp. 443–451, 2011.
- [57] M. M. Cowing, M. E. Paté-Cornell, and P. W. Glynn, “Dynamic modeling of the tradeoff between productivity and safety in critical engineering systems,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 86, no. 3, pp. 269–284, 2004.
- [58] API, “API STANDARD 2000 Venting Atmospheric and Low-Pressure Storage Tank,” vol. 552, no. 2, pp. 54, 1998.
- [59] M. Chang, R. Chang, C. Shu, and K. Lin, “Application of risk based inspection in refinery and processing piping,” vol. 18, pp. 397–402, 2005.
- [60] M. M. Baron and E. B. Pate-Cornell, “Designing risk-management strategies for critical engineering systems,” *IEEE Trans. Eng. Manag.*, vol. 46, no. 1, pp. 87–100, 1999.
- [61] L. Krishnasamy, F. Khan, and M. Haddara, “Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 18, no. 2, pp. 69–81, 2005.
- [62] M. Bertolini, M. Bevilacqua, F. E. Ciarapica, and G. Giacchetta, “Development of Risk-Based Inspection and Maintenance procedures for an oil refinery,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 2, pp. 244–253, 2009.
- [63] M. Kalantarnia, F. Khan, and K. Hawboldt, “Modelling of BP Texas City refinery accident using dynamic risk assessment approach,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 88, no. 3, pp. 191–199, 2010.
- [64] V. M. Bier, A. Mosleh “The Analysis of Accident Precursors and Near Misses : Implications for Risk Assessment and Risk Management,” *Proceedings of the International Topical Meeting on probability, Reliability, and Safety Assessment, Pittsburg, PA*, pp. 1125-1130, 1989.
- [65] R. Cooke, and L. Goossens, “The Accident Sequence Precursor Methodology for the European Post-Seveso Era,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 27, pp. 117–130, 1990.
- [66] V. M. Bier and W. Yi, “The performance of precursor-based estimators for rare event frequencies,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 50, no. 3, pp. 241–251, 1995.
- [67] J. W. Johnson and D. M. Rasmuson, “The US NRC ’ s accident sequence precursor program : an overview and development of a Bayesian approach to estimate core damage frequency using precursor information,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 53, pp. 205-216, 1996.

- [68] C. Kirchsteiger, "Impact of accident precursors on risk estimates from accident databases," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 10, no. 3, pp. 159–167, 1997.
- [69] I. A. Papazoglou, "Mathematical foundations of event trees," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 61, no. 3, pp. 169–183, 1998.
- [70] S. Miri, A. Zendegani, and M. Celik, "An extension to Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA)," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 93, no. May, pp. 75–88, 2014.
- [71] R. Labib, Ashraf; Champaneri, "The Bhopal Disaster – learning from failures and evaluating risk," *Maint. Asset Manag.*, vol. 27, no. 3, pp. 41–47, 2012.
- [72] A. Labib and M. J. Harris, "Learning how to learn from failures : The Fukushima nuclear disaster q," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 47, pp. 117–128, 2015.
- [73] A. L. A. Ishizaka, "A Hybrid and Integrated Approach to Evaluate and Prevent Disasters," *J. Oper. Res. Soc.*, vol. 65, no. 10, pp. 1475–1489, 2013.
- [74] A. Labib, "Learning (and unlearning) from failures : 30 years on from Bhopal to Fukushima an analysis through reliability engineering techniques," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 97, pp. 80–90, 2015.
- [75] G. Maschio, G. Milazzo, M.F. Muscarà, C. Ugucioni, "Influence of measures of risk prevention and mitigation on the frequencies of rupture of pipework," in *Safety and Reliability for Managing Risk, Taylor & Francis Group, London*, 2006, pp. 2019–2026.
- [76] M. Francesca, C. Vianello, and G. Maschio, "Uncertainties in QRA : Analysis of losses of containment from piping and implications on risk prevention and mitigation," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 36, pp. 98–107, 2015.
- [77] A. S. Markowski, M. S. Mannan, A. Kotynia, and D. Siuta, "J Uncertainty aspects in process safety analysis," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 23, no. 3, pp. 446–454, 2010.
- [78] R. R. Tan, K. B. Aviso, A. P. Huelgas, and M. A. B. Promentilla, "Fuzzy AHP approach to selection problems in process engineering involving quantitative and qualitative aspects," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 92, no. 5, pp. 467–475, 2013.
- [79] A. N. Paralikas and A. I. Lygeros, "A Multi-criteria and Fuzzy Logic Based Methodology for the Relative Ranking of the Fire Hazard of Chemical Substances and Installations," *Process Saf. Environ. Prot.*, no. 83, no. 2, pp. 122–134, 2005.
- [80] M. Gentile, W. J. Rogers, and M. S. Mannan, "Development of a fuzzy logic-based inherent safety index," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 81, no.6, pp. 444-456, 2003.
- [81] A. M. Shariff and D. Zaini, "Inherent risk assessment methodology in preliminary design stage : A case study for toxic release," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 26, no. 4, pp. 605–613, 2013.
- [82] M. Yang, F. Khan, and P. Amyotte, "Operational risk assessment : A case of the Bhopal disaster," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 97, pp. 70–79, 2015.
- [83] M. H. Hassim and D. W. Edwards, "Development of a methodology for assessing inherent occupational health hazards," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 84, no. 5, pp. 378–390, 2006.
- [84] M. Grazia and P. A. Bragatto, "Integrating major accidents hazard into occupational risk assessment : An index approach," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 26, no. 4, pp. 751–758, 2013.
- [85] D. Edwards and G. Hankinson, "A new safety risk index for use in petrochemical planning," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 85, pp. 533–540, 2007.
- [86] N. S. Arunraj and J. Maiti, "Risk-based maintenance-Techniques and applications," *J. Hazard. Mater.*, vol. 142, no. 3, pp. 653–661, 2007.
- [87] E. Sa'idi, B. Anvaripour, F. Jaderi, and N. Nabhani, "Fuzzy risk modeling of process operations in the oil and gas refineries," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 30, pp. 63–73, 2014.
- [88] H. M. Arani, S. Shokri, and M. Shirvani, "Dynamic Modeling and Simulation of Catalytic Naphtha Reforming," *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, vol. 1, no. 2, pp. 159–164, 2010.
- [89] R. H. Ralph King, "King's Safety in the Process Industries 2nd Edition." Butterworth-Heinemann, p. 680, 1998.
- [90] H. Wang, "A survey of maintenance policies of deteriorating systems," *European Journal of Operational Research*, vol. 139, pp. 469–489, 2002.

- [91] F. I. Khan and M. M. Haddara, "Risk-based maintenance (RBM): A quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 16, no. 6, pp. 561–573, 2003.
- [92] H. Hu, G. Cheng, Y. Li, and Y. Tang, "Risk-based maintenance strategy and its applications in a petrochemical reforming reaction system," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 4, pp. 392–397, 2009.
- [93] J. Erik, S. Haugen, and P. Okoh, "Maintenance of petroleum process plant systems as a source of major accidents?," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 40, pp. 348–356, 2016.
- [94] J. Murata, René; Benaquisto and C. Storey, "A methodology for identifying and addressing dead-legs and corrosion issues in a Process Hazard Analysis (PHA)," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 35, pp. 387–392, 2015.
- [95] G. P. J. Dijkema, J. Grievink, and M. P. C. Weijnen, "Functional modelling for a sustainable petrochemical industry," *Trans IChemE*, vol. 81, no. September, 2003.
- [96] S. A. Abbasi, "A criterion for developing credible accident scenarios for risk assessment," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 15, no. 6, pp. 467–475, 2002.
- [97] P. Bucci, J. Kirschenbaum, L. A. Mangan, T. Aldemir, C. Smith, and T. Wood, "Construction of event-tree / fault-tree models from a Markov approach to dynamic system reliability," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 93, no. 11, pp. 1616–1627, 2008.
- [98] M. Cepin, B. Mavko, "A dynamic fault tree," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 75, no. 1, pp. 83-91, 2002.
- [99] H. Boudali and J. B. Dugan, "A discrete-time Bayesian network reliability modeling and analysis framework," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 87, no. 3, pp. 337–349, 2005.
- [100] P. J. M. Sonnemans P. M. W. Körvers A. C. Brombacher P. C. van Beek J. E. A. Reinders "P. J. M. Sonnemans P. M. W. Körvers A. C. Brombacher P. C. van Beek J. E. A. ReindeAccidents, often the result of an 'uncontrolled business process'—a study in the (Dutch) chemical industry," *Qual. Reliab. Eng. Int.*, vol. 19, pp. 183–196, 2003.
- [101] A. Mili, S. Bassetto, A. Siadat, and M. Tollenaere, "Dynamic risk management unveil productivity improvements," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 1, pp. 25–34, 2009.
- [102] A. Meel and W. D. Seider, "Plant-specific dynamic failure assessment using Bayesian theory," *Chemical Engineering Science*, vol. 61, pp. 7036–7056, 2006.
- [103] A. Meel, L. M. O. Neill, J. H. Levin, W. D. Seider, U. Oktem, and N. Keren, "Operational risk assessment of chemical industries by exploiting accident databases," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 20, pp. 113–127, 2007.
- [104] G. Yun, W. J. Rogers, and M. S. Mannan, "Risk assessment of LNG importation terminals using the Bayesian – LOPA methodology," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 1, pp. 91–96, 2009.
- [105] A. J. ã. Ross, J. B. Davies, and M. Plunkett, "Reliable qualitative data for safety and risk management," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 83, pp. 117-121, 2005.
- [106] M. Kalantarnia, F. Khan, and K. Hawboldt, "Dynamic risk assessment using failure assessment and Bayesian theory," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 5, pp. 600–606, 2009.
- [107] J. Hu, L. Zhang, and W. Liang, "Opportunistic predictive maintenance for complex multi-component systems based on DBN-HAZOP model," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 90, no. 5, pp. 376–388, 2012.
- [108] J. Hu, L. Zhang, Z. Cai, Y. Wang, and A. Wang, "Fault propagation behavior study and root cause reasoning with dynamic Bayesian network based framework," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 97, pp. 25–36, 2015.
- [109] C. Lv, Z. Zhang, X. Ren, and S. Li, "Predicting the frequency of abnormal events in chemical process with Bayesian theory and vine copula," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 32, pp. 192–200, 2014.
- [110] E. C. Marcoulaki, I. A. Papazoglou, and M. Konstandinidou, "Prediction of occupational accident statistics and work time loss distributions using Bayesian analysis," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 25, no. 3, pp. 467–477, 2012.

- [111] J. R. G. Dan, A. Guix, V. Martí, J. Arnaldos, and R. M. Darbra, "Monte Carlo simulation as a tool to show the influence of the human factor into the quantitative risk assessment," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 102, pp. 441–449, 2016.
- [112] J. A. Vílchez and J. Casal, "El riesgo químico y el territorio," *Rev. Catalana Segur. Pública*, vol. Noviembre, 2010.
- [113] J. I. Chang and C. Lin, "A study of storage tank accidents," vol. 19, pp. 51–59, 2006.
- [114] R. K. Sharma, B. R. Gurjar, S. R. Wate, S. P. Ghuge, and R. Agrawal, "Assessment of an accidental vapour cloud explosion : Lessons from the Indian Oil Corporation Ltd . accident at Jaipur , India," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 26, no. 1, pp. 82–90, 2013.
- [115] A. Koshy, M. M. Mallikarjunan, and K. V. Raghavan, "Causative factors for vapour cloud explosions determined from past-accident analysis," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 8, no. 6. pp. 355–358, 1995.
- [116] "MoPNG." 2010.
- [117] B. Abdolhamidzadeh, T. Abbasi, D. Rashtchian, and S. A. Abbasi, "A new method for assessing domino effect in chemical process industry," *J. Hazard. Mater.*, vol. 182, no. 1–3, pp. 416–426, 2010.
- [118] T. A. Kletz, "Transportation of hazardous substances: The UK scene," *Plant/operations Prog.*, vol. 5, no. 3, pp. 160–164, 1986.
- [119] I. Herbert, "The UK Buncefield incident - The view from a UK risk assessment engineer," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 23, no. 6, pp. 913–920, 2010.
- [120] BMIIB, "Explosion Mechanism Advisory Group report," *Marlowe Road, Rose Court*, 2007.
- [121] BMIIB, "The Buncefield Investigation," *Www.Explosionsolutions.Co.Uk*, 2008.
- [122] G. Atkinson, S. Coldrick, S. Gant, and L. Cusco, "Flammable vapor cloud generation from overfilling tanks : Learning the lessons from Buncefield," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 35, pp. 329–338, 2015.
- [123] S. Coldrick, S. E. Gant, G. T. Atkinson, and R. Dakin, "Factors affecting vapour production in large scale evaporating liquid cascades," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 89, no. 6, pp. 371–381, 2011.
- [124] S. E. Atkinson, G., Gant, "Buncefield Investigation e Liquid Flow and Vapour Production. HSE Research Report RR936. HSE Books, Sudbury." 2012.
- [125] S. Atkinson, G., Coldrick, "Vapour Cloud Formation e Experiments and Modelling. HSE Research Report RR908. HSE Books, Sudbury." 2012.
- [126] M. Atkinson, G., Pursell, "FABIG Technical Note 12-Vapour Cloud Development in Overfilling Incidents." 2013.
- [127] W. L. Walls, "What is a BLEVE?," *Fire J.*, vol. 31, pp. 46–47, 1978.
- [128] M. H. C. A. M. Birk, "The Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 7, no. 6, pp. 474–480, 1994.
- [129] and N. H. A. V. A.C. van den Berg, M.M. van der Voort, J. Weerheijm, "BLEVE Blast by Expansion-Controlled Evaporation," *Process Saf. Prog.*, vol. 25, no. 1, pp. 44–51, 2006.
- [130] R. K. Eckhoff, "Boiling liquid expanding vapour explosions (BLEVEs): A brief review," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 32, pp. 30–43, 2014.
- [131] T. Abbasi and S. A. Abbasi, "The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE) is fifty ... and lives on!," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 21, no. 4, pp. 485–487, 2008.
- [132] A. M. Shariff, N. A. Wahab, and R. Rusli, "Assessing the hazards from a BLEVE and minimizing its impacts using the inherent safety concept," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 41, pp. 303–314, 2016.
- [133] X. Li, H. Koseki, and M. S. Mannan, "Case study : Assessment on large scale LPG BLEVEs in the 2011 Tohoku earthquakes," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 35, pp. 257–266, 2015.
- [134] R. Dobashi, "Fire and explosion disasters occurred due to the Great East Japan," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 31, pp. 121–126, 2014.
- [135] Frank P. Lees, *Loss Prevention, Second Edition: Hazard Identification, Assessment and Control*. Oxford, UK, 1996.
- [136] K. C. Crawford, "Fire Protection in Refineries," *API Recomm. Pract.*, pp. 1–101, 2012.
- [137] C. D. Argyropoulos, M. N. Christolis, Z. Nivolianitou, and N. C. Markatos, "A hazards

- assessment methodology for large liquid hydrocarbon fuel tanks,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 25, no. 2, pp. 329–335, 2012.
- [138] “LASTFIRE,” 2001.
- [139] C. Crippa, L. Fiorentini, V. Rossini, R. Stefanelli, S. Tafaro, and M. Marchi, “Fire risk management system for safe operation of large atmospheric storage tanks,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 5, pp. 574–581, 2009.
- [140] H. Persson and A. Lönnemark, “LASTFIRE-Large Atmospheric Storage Tank Fires”, Resource Protection International,” 2004.
- [141] I. M. Shaluf and S. A. Abdullah, “Floating roof storage tank boilover,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 24, no. 1, pp. 1–7, 2011.
- [142] H. Haghazarloo, M. Parvini, and M. N. Lotfollahi, “Consequence modeling of a real rupture of toluene storage tank,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 37, pp. 11–18, 2015.
- [143] Y. N. Shebeko, I. M. Smolin, A. Y. Korolchenko, A. P. Shevchuk, A. N. Borodkin, V. L. Malkin, A. Simonov, L. V. Gurinovich, S. A. Popov, V. A. Kolosov, and E. V. Smirnov, “Some aspects of fire and explosion hazards of large LPG storage vessels,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 8, no. 3, pp. 163–168, 1995.
- [144] A. Bernatik, P. Senovsky, and M. Pitt, “LNG as a potential alternative fuel e Safety and security of storage facilities,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 24, no. 1, pp. 19–24, 2011.
- [145] R. M. Pitblado and J. L. Woodward, “Highlights of LNG risk technology,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 24, no. 6, pp. 827–836, 2011.
- [146] M. Giardina and M. Morale, “Safety study of an LNG regasi fication plant using an FMECA and HAZOP integrated methodology,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 35, pp. 35–45, 2015.
- [147] M. Casamirra, F. Castiglia, M. Giardina, and C. Lombardo, “Safety studies of a hydrogen refuelling station: Determination of the occurrence frequency of the accidental scenarios,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 14, pp. 5846–5854, 2009.
- [148] M. Glossop, I. Agamemnon, and J. Gould, “Review of hazard identification techniques HSL/2005/58,” 2000.
- [149] N. Paltrinieri, A. Tugnoli, and V. Cozzani, “Hazard identification for innovative LNG regasification technologies,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 137, pp. 18–28, 2015.
- [150] A. M. Dowell and T. R. Williams, “Layer of protection analysis: Generating scenarios automatically from HAZOP data,” *Process Saf. Prog.*, vol. 24, no. 1, pp. 38–44, 2005.
- [151] P. Baybutt, “Using risk tolerance criteria to determine safety integrity levels for safety instrumented functions,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 25, no. 6, pp. 1000–1009, 2012.
- [152] G. Landucci, A. Tugnoli, and V. Cozzani, “Safety assessment of envisaged systems for automotive hydrogen supply and utilization,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 1493–1505, 2010.
- [153] C. Delvosalle, C. Fievez, A. Pipart, and B. Debray, “ARAMIS project: A comprehensive methodology for the identification of reference accident scenarios in process industries,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 130, no. 3 SPEC. ISS., pp. 200–219, 2006.
- [154] A. Di Padova, A. Tugnoli, V. Cozzani, T. Barbaresi, and F. Tallone, “Identification of fireproofing zones in Oil&Gas facilities by a risk-based procedure,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 191, no. 1–3, pp. 83–93, 2011.
- [155] P. Baybutt, “Journal of Loss Prevention in the Process Industries Requirements for improved process hazard analysis (PHA) methods,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 32, pp. 182–191, 2014.
- [156] M. Rausand, *Risk assessment - Theory, Methods, and Applications*. Wiley, 2011.
- [157] P. Baybutt, “Major Hazards Analysis: An Improved Method for Process Hazard Analysis,” *Process Saf. Prog.*, vol. 22, no. 1, pp. 21–26, 2003.
- [158] G. R. Ellis, “Process Hazard Review : The Efficient Risk Assessment of Existing Plants,” *11th International Symposium Loss Prevention*, pp. 1232–1241, 2004.
- [159] P. K. Raj and T. Lemoff, “Risk analysis based LNG facility siting standard in NFPA 59A,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 6, pp. 820–829, 2009.
- [160] G. Landucci, A. Tugnoli, G. Spadoni, and V. Cozzani, “LNG regasification terminals: assessment of accidents due to external acts of interference,” in *11th International*

- Probabilistic Safety Assessment and Management Conference and the Annual European Safety and Reliability Conference 2012 (PSAM11 ESREL 2012)*, 2012, p. 6882.
- [161] O. N. Aneziris, I. A. Papazoglou, M. Konstantinidou, and Z. Nivolianitou, "Integrated risk assessment for LNG terminals," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 28, pp. 23–35, 2014.
- [162] S. Yang, Q. Fang, Y. Zhang, H. Wu, and L. Ma, "An integrated quantitative hazard analysis method for natural gas jet release from underground gas storage caverns in salt rock. I: Models and validation," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 26, no. 1, pp. 74–81, 2013.
- [163] G. Dong, L. Xue, Y. Yang, and J. Yang, "Evaluation of hazard range for the natural gas jet released from a high-pressure pipeline : A computational parametric study," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 23, no. 4, pp. 522–530, 2010.
- [164] E. 147, "Installation and equipment for liquefied natural gas — Design and testing of marine transfer systems Part 3 : Offshore transfer systems," 2008.
- [165] D. Siuta, A. S. Markowski, and M. S. Mannan, "Uncertainty techniques in liquefied natural gas (LNG) dispersion calculations," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 26, no. 3, pp. 418–426, 2013.
- [166] J. Koo, H. S. Kim, W. So, K. H. Kim, and E. S. Yoon, "Safety Assessment of LNG Terminal Focused on the Consequence Analysis of LNG Spills," in *Proceedings of the 1st Annual Gas Processing Symposium*, 2009, pp. 325–331.
- [167] J. Kang, W. Liang, L. Zhang, Z. Lu, D. Liu, W. Yin, and G. Zhang, "A new risk evaluation method for oil storage tank zones based on the theory of two types of hazards," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 29, no. 1, pp. 267–276, 2014.
- [168] Y. Li, Z. Li, and W. Wang, "Simulating on rollover phenomenon in LNG storage tanks and determination of the rollover threshold," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 37, pp. 132–142, 2015.
- [169] B. Y. Zhang, H. H. Li, and W. Wang, "Numerical study of dynamic response and failure analysis of spherical storage tanks under external blast loading," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 34, pp. 209–217, 2015.
- [170] N. Hosseinzadeh, M. Kaypour Sangsari, and H. Tavakolian Ferdosiyeh, "Shake table study of annular baffles in steel storage tanks as sloshing dependent variable dampers," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 32, pp. 299–310, 2014.
- [171] API, "API Standard 620," 2013.
- [172] J. W. Miles, "Ring damping of free surface oscillations in a circular tank," *Appl. Mech.*, vol. 25, pp. 274–276, 1958.
- [173] N. Hosseinzadeh, H. Kazem, M. Ghahremannejad, E. Ahmadi, and N. Kazem, "Comparison of API650-2008 provisions with FEM analyses for seismic assessment of existing steel oil storage tanks," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 26, no. 4, pp. 666–675, 2013.
- [174] J. Magill and J. Galy, *Radioactivity · Radionuclides · Radiation*. European Commission Joint Research Centre, 2005.
- [175] D. Hillson, "Effective Opportunity Management for Projects: Exploiting Positive Risk," *1st Edition*, CRC Press, 2003.
- [176] Z. F. Yu and J. L. Guan, "Fire and Rescue Combat Technical Training System Construction for Dangerous Chemicals," *Procedia Eng.*, vol. 135, pp. 654–659, 2016.
- [177] V. Cozzani, M. Campedel, E. Renni, and E. Krausmann, "Industrial accidents triggered by flood events : Analysis of past accidents," *J. Hazard. Mater.*, vol. 175, no. 1–3, pp. 501–509, 2010.
- [178] G. L. L. Reniers, W. Dullaert, B. J. M. Ale, and K. Soudan, "Developing an external domino accident prevention framework : Hazwim," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 18, pp. 127–138, 2005.
- [179] J. M. Woodruff, "Consequence and likelihood in risk estimation : A matter of balance in UK health and safety risk assessment practice," *Saf. Sci.*, vol. 43, pp. 345–353, 2005.
- [180] F. H. Van Duijne, D. Van Aken, and E. G. Schouten, "Considerations in developing complete and quantified methods for risk assessment," *Saf. Sci.*, vol. 46, no. 2, pp. 245–254, 2008.
- [181] P. K. Marhavilas, D. Koulouriotis, and V. Gemeni, "Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the

- scientific literature of the period 2000–2009,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 24, no. 5, pp. 477–523, 2011.
- [182] B. M. Ayyub, *Risk analysis in egeneering and economics*. Florida: CHAPMAN & HALL/CRC A, 2003.
- [183] D. E. Doytchev and G. Szwillus, “Combining task analysis and fault tree analysis for accident and incident analysis : A case study from Bulgaria,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 41, no. 6, pp. 1172–1179, 2009.
- [184] R. Brauchler and K. Landau, “Task analysis : Part II — The scientific basis (knowledge base) for the guide,” *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 22, no. 1–2, pp. 13–35, 1998.
- [185] T. Kontogiannis, V. Leopoulos, and N. Marmaras, “A comparison of accident analysis techniques for safety-critical man - machine systems,” *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 25, no. 4, pp. 327–347, 2000.
- [186] M. T. Baysari, A. S. Mcintosh, and J. R. Wilson, “Understanding the human factors contribution to railway accidents and incidents in Australia,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 40, no. 5, pp. 1750–1757, 2008.
- [187] F. I. Khan and S. A. Abbasi, “Mathematical model time estimation for HAZOP study,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 10, no. 4, pp. 249–251, 1997.
- [188] P. K. Marhavilas and D. E. Koulouriotis, “A risk-estimation methodological framework using quantitative assessment techniques and real accidents ’ data : Application in an aluminum extrusion industry,” *Journan Loss Prev. Process Ind.*, vol. 21, no. 6, pp. 596–603, 2008.
- [189] F. Henselwood and G. Phillips, “A matrix-based risk assessment approach for addressing linear hazards such as pipelines,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 19, no. 5, pp. 433–441, 2006.
- [190] K. T. Kosmowski, “Functional safety concept for hazardous systems and new challenges,” *Journan Loss Prev. Process Ind.*, vol. 19, no. 2–3, pp. 298–305, 2006.
- [191] M. M. van der Voort, A. J. J. Klein, M. de Maaijer, A. C. van den Berg, J. R. van Deursen, and N. H. A. Versloot, “A quantitative risk assessment tool for the external safety of industrial plants with a dust explosion hazard,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 20, no. 4–6, pp. 375–386, 2007.
- [192] V. Cozzani, G. Antonioni, and G. Spadoni, “Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 19, no. 5, pp. 463–477, 2006.
- [193] P. Trucco and M. Cavallin, “A quantitative approach to clinical risk assessment : The CREA method,” *Saf. Sci.*, vol. 44, no. 6, pp. 491–513, 2006.
- [194] E. R. Vaidogas, “First step towards preventing losses due to mechanical damage from abnormal actions : Knowledge-based forecasting the actions,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 19, no. 5, pp. 375–385, 2006.
- [195] S. Suddle, “The weighted risk analysis,” *Saf. Sci.*, vol. 47, no. 5, pp. 668–679, 2009.
- [196] T. Kontogiannis and S. Malakis, “A proactive approach to human error detection and identification in aviation and air traffic control,” *Saf. Sci.*, vol. 47, no. 5, pp. 693–706, 2009.
- [197] J. W. Kim and W. Jung, “A taxonomy of performance influencing factors for human reliability analysis of emergency tasks,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 16, no. 6, pp. 479–495, 2003.
- [198] L. J. Bellamy, T. A. W. Geyer, and J. Wilkinson, “Development of a functional model which integrates human factors , safety management systems and wider organisational issues,” *Saf. Sci.*, vol. 46, no. 3, pp. 461–492, 2008.
- [199] Z. Li, H. Shu-dong, and H. Xiang-rui, “THERP+HCR-based model for human factor event analysis and its application,” *Hedongli Gongcheng/Nuclear Power Eng.*, vol. 24, no. 3, pp. 272–276, 2003.
- [200] E. Hong, I. Lee, H. Shin, S. Nam, and J. Kong, “Quantitative risk evaluation based on event tree analysis technique : Application to the design of shield TBM,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol. Inc. Trenchless Technol. Res.*, vol. 24, no. 3, pp. 269–277, 2009.
- [201] D. F. Bagster and R. M. Pitblado, “The Estimation of Domino Incident Frequencies—An Approach,” *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 69, no. 4, pp. 195–199, 1991.
- [202] S. P. Kourniotis, C. T. Kiranoudis, and N. C. Markatos, “Statistical analysis of domino chemical accidents,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 71, pp. 239–252, 2000.
- [203] A. Ronza, S. Carol, V. Espejo, and J. Arnaldos, “A quantitative risk analysis approach to port

- hydrocarbon logistics,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 128, pp. 10–24, 2006.
- [204] M. Gómez-mares and M. Mu, “Axial temperature distribution in vertical jet fires,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 172, pp. 54–60, 2009.
- [205] E. K. Mihailidou, K. D. Antoniadis, and M. J. Assael, “The 319 Major Industrial Accidents Since 1917,” *Int. Rev. Chem. Eng.*, vol. 4, no. November, pp. 529–540, 2012.
- [206] C. V. Moore, “The design of barricades for hazardous pressure systems,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 5, no. 1, pp. 81–97, 1967.
- [207] P. L. Holden and A. B. Reeves, “Fragment hazards from failures of pressurised liquefied gas vessels,” *iChem Symp. Hazards VIII. 22-24 April*, pp. 205–220, 1985.
- [208] P. L. Holden, *Assessment of missile hazards : Review of incident experience relevant to major hazard plant*. Warrington : UKAEA Safety and Reliability Directorate, 1988.
- [209] A. Mébarki, F. Mercier, Q. B. Nguyen, and R. A. Saada, “Structural fragments and explosions in industrial facilities. Part I: Probabilistic description of the source terms,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 4, pp. 408–416, 2009.
- [210] J. Zhang, D. Laboureur, Y. Liu, and M. S. Mannan, “Lessons learned from a supercritical pressure BLEVE in Nihon Dempa Kogyo Crystal Inc.,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 41, pp. 315–322, 2016.
- [211] G. Gubinelli, S. Zanelli, and V. Cozzani, “A simplified model for the assessment of the impact probability of fragments,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 116, no. 3, pp. 175–187, 2004.
- [212] M. R. Baum, “The velocity of large missiles resulting from axial rupture of gas pressurised cylindrical vessels,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 14, no. 3, pp. 199–203, 2001.
- [213] Q. B. Nguyen, A. Mebarki, R. A. Saada, F. Mercier, and M. Reimeringer, “Integrated probabilistic framework for domino effect and risk analysis,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 40, no. 9, pp. 892–901, 2009.
- [214] U. Hauptmanns, “A Monte-Carlo based procedure for treating the flight of missiles from tank explosions,” *Probabilistic Eng. Mech.*, vol. 16, no. 4, pp. 307–312, 2001.
- [215] A. Mebarki, Q. Bao Nguyen, F. Mercier, R. Ami Saada, and M. Reimeringer, “Reliability analysis of metallic targets under metallic rods impact: Towards a simplified probabilistic approach,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 21, no. 5, pp. 518–527, 2008.
- [216] G. Gubinelli and V. Cozzani, “Assessment of missile hazards: Identification of reference fragmentation patterns,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 163, no. 2–3, pp. 1008–1018, 2009.
- [217] G. Gubinelli and V. Cozzani, “Assessment of missile hazards: Evaluation of the fragment number and drag factors,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 161, no. 1, pp. 439–449, 2009.
- [218] A. Tugnoli, G. Gubinelli, G. Landucci, and V. Cozzani, “Assessment of fragment projection hazard: Probability distributions for the initial direction of fragments,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 279, pp. 418–427, 2014.
- [219] A. Tugnoli, M. F. Milazzo, G. Landucci, V. Cozzani, and G. Maschio, “Assessment of the hazard due to fragment projection: A case study,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 28, pp. 36–46, 2014.
- [220] J. Stawczyk, “Experimental evaluation of LPG tank explosion hazards,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 96, no. 2–3, pp. 189–200, 2003.
- [221] V. Cozzani, G. Gubinelli, and E. Salzano, “Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 129, no. 1–3, pp. 1–21, 2006.
- [222] D. Sun, J. Jiang, M. Zhang, and Z. Wang, “Influence of the source size on domino effect risk caused by fragments,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 35, no. 130, pp. 211–223, 2015.
- [223] A. Mébarki, Q. B. Nguyen, and F. Mercier, “Structural fragments and explosions in industrial facilities: Part II - Projectile trajectory and probability of impact,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 4, pp. 417–425, 2009.
- [224] S. Mannan, *Lees’ Loss Prevention in the Process Industries*, 4th ed. Elsevier Inc., 2012.
- [225] X. mei Zhang and G. hua Chen, “The analysis of domino effect impact probability triggered by fragments,” *Saf. Sci.*, vol. 47, no. 7, pp. 1026–1032, 2009.
- [226] P. Ciarlet, *Theory of Shells*. Elsevier, 2000.
- [227] U. Hauptmanns, “A procedure for analyzing the flight of missiles from explosions of cylindrical vessels,” *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 14, no. 5, pp. 395–402, 2001.

- [228] Q. B. Nguyen, A. Mebarki, F. Mercier, R. A. Saada, Q. B. Nguyen, A. Mebarki, F. Mercier, R. A. Saada, and M. R. The, "The domino effect and integrated probabilistic approaches for risk analysis," *Eight International Conference on Computational Structures Technology*, pp. 27-34, 2006.
- [229] R. Bubbico, S. Di Cave, B. Mazzarotta, and B. Silvetti, "Preliminary study on the transport of hazardous materials through tunnels," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 41, pp. 1199-1205, 2009.
- [230] X. Liu, M. R. Saat, X. Qin, and C. P. L. Barkan, "Analysis of U . S . freight-train derailment severity using zero-truncated negative binomial regression and quantile regression," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 59, pp. 87-93, 2013.
- [231] A. M. Birk, R. J. Anderson, and A. J. Coppens, "A computer simulation of a derailment accident : Part I - Model Basis," *J. Hazard. Mater.*, vol. 25, pp. 121-147, 1990.
- [232] A. M. Birk, R. J. Anderson, and A. J. Coppens, "A computer simulation of a derailment accident part ii -sample simulation," *J. Hazard. Mater.*, vol. 25, pp. 149-165, 1990.
- [233] X. Xiao, L. Ling, and X. Jin, "A study of the derailment mechanism of high speed train due to an earthquake," *Vehicle Syst. Dyn. Int. Journal Veh. Mech. Mobil.*, vol. 50, no. 3, pp. 449-470, 2012.
- [234] F. F. Saccomanno and S. El-Hage, "Minimizing Derailments of Railcars Carrying Dangerous Commodities Through Effective Marshaling Strategies," *Transp. Res. Rec.*, vol. 1245, pp. 34-51, 1989.
- [235] M. Bagheri, F. Saccomanno, S. Chenouri, and L. Fu, "Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 43, no. 3, pp. 613-620, 2011.
- [236] X. Liu, M. R. Saat, and C. P. L. Barkan, "Analysis of Causes of Major Train Derailment and Their Effect on Accident Rates," *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, vol. 2289, pp. 154-163, 2012.
- [237] A. Oggero, R. M. Darbra, M. Mu, E. Planas, and J. Casal, "A survey of accidents occurring during the transport of hazardous substances by road and rail," *J. Hazard. Mater.*, vol. 133, no. 1, pp. 1-7, 2006.
- [238] D. Manca and S. Brambilla, "Complexity and uncertainty in the assessment of the Viareggio LPG railway accident," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 23, no. 5, pp. 668-679, 2010.
- [239] X. Liu, M. R. Saat, and C. P. L. Barkan, "Probability analysis of multiple-tank-car release incidents in railway hazardous materials transportation," *J. Hazard. Mater.*, vol. 276, pp. 442-451, 2014.
- [240] X. Liu, M. R. Saat, and C. P. L. Barkan, "Freight-train derailment rates for railroad safety and risk analysis," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 98, pp. 1-9, 2017.
- [241] S. Dindar, S. Kaewunruen, M. An, and A. Gigante-Barrera, "Derailment-based Fault Tree Analysis on Risk Management of Railway Turnout Systems," in *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2017, pp. 1-8.
- [242] X. Liu, M. R. Saat, and C. P. L. Barkan, "Integrated risk reduction framework to improve railway hazardous materials transportation safety," *J. Hazard. Mater.*, vol. 260, pp. 131-140, 2013.
- [243] S. Kaeni, M. Khalilian, and J. Mohammadzadeh, "Derailment accident risk assessment based on ensemble classification method," *Saf. Sci.*, vol. 110, no. November 2017, pp. 3-10, 2018.
- [244] R. T. Anderson and C. P. L. Barkan, "Derailment Probability Analyses and Modeling of Mainline Freight Trains," in *Proceedings of the Eighth International Heavy Haul Conference, Rio de Janeiro*, 2005, pp. 491-497.
- [245] T. S. Glickman, E. Erkut, and M. S. Zschocke, "The cost and risk impacts of rerouting railroad shipments of hazardous materials," *Accid. Anal. Prev.*, vol. 39, no. 5, pp. 1015-1025, 2007.
- [246] M. Djelosevic and G. Tepic, "Identification of fragmentation mechanism and risk analysis due to explosion of cylindrical tank," *J. Hazard. Mater.*, vol. 362, pp. 17-35, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.013>
- [247] G. Tepic, B. Lalic, I. Tanackov, S. Sremac, S. Milisavljevic and M. Kostelac, "Numerical model of fragmentation hazards due to tank explosion," *Transactions of FAMENA*, ISSN:1333-1124 (accepted for publication).

- [248] M. Djelosevic and G. Tepic, “Probabilistic simulation model of fragmentation risk“, *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 60, pp. 53-75, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.04.003>
- [249] G. Tepić, M. Đelošević, N. Simeunović, and Z. Bundalo, “Accidental risk analysis for rail transport of dangerous goods“, *In Proceedings on XVII International Scientific-expert Conference on Railways – RAILCON '16*, Serbia, Niš, October 13-14, 2016, pp. 101–104. ISBN 978-86-6055-060-8
- [250] M. Đelošević and G. Tepić, “Model of transport risk assessment due to derailment“, *In Proceedings on XVIII International Scientific-expert Conference on Railways – RAILCON '18*, Serbia, Niš, October 11-12, 2018, pp. 233–236. ISBN 978-86-6055-060-8

PRILOZI

PRILOG A

Koeficijent diferencijalne jednačine pomeranja ljuste:

$$\lambda^4 = \frac{3(1-\nu^2)}{R^2\delta^2} \quad (\text{A.1})$$

Svojna krutost ljuste rezervoara:

$$K = \frac{E\delta^3}{12(1-\nu^2)} \quad (\text{A.2})$$

Sila na kraju cilindra rezervoara:

$$P_o = \frac{P_g R^2}{8\lambda b^2} \quad (\text{A.3})$$

Maksimalni aksijalni napon rezervoara:

$$\bar{\sigma}_x, \max = \frac{RP_g}{2\delta} + \frac{6M_{x,\max}}{\delta^2} = \frac{RP_g}{2\delta} + \frac{6}{\delta^2} 0,0403 \frac{P_g R\delta}{8\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{R^2}{b^2} = 1,293 \frac{RP_g}{2\delta} \quad (\text{A.4})$$

Aksijalni moment savijanja ljuste rezervoara:

$$M_x = \frac{P_o}{\lambda} e^{-\lambda x} \sin \lambda x \quad (\text{A.5})$$

Nakon smene sa (A.3) se dobija:

$$M_x = \frac{P_g R^2}{8\lambda^2 b^2} e^{-\lambda x} \sin \lambda x = \frac{P_g R\delta}{8\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{R^2}{\delta^2} e^{-\lambda x} \sin \lambda x \quad (\text{A.6})$$

Prvi izvod momenta savijanja ljuste duž podužne ose rezervoara je:

$$\frac{dM_x}{dx} = \frac{P_g R\delta}{8\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{R^2}{b^2} [e^{-\lambda x} (-\lambda) \sin \lambda x + \lambda e^{-\lambda x} \cos \lambda x] = 0 \rightarrow \cos \lambda x - \sin \lambda x = 0 \quad (\text{A.7})$$

Uslov maksimuma momenta savijanja M_x :

$$tg \lambda x = 1 \rightarrow \lambda x = \frac{\pi}{4} \quad (\text{A.8})$$

Pozicija sa maksimalnim momentom savijanja M_x :

$$x = \frac{\pi}{4} [cm] \quad (\text{A.9})$$

Maksimalni moment savijanja ljuste rezervoara:

$$M_{x,\max} = \frac{P_g R\delta}{8\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{R^2}{b^2} e^{-\lambda \frac{\pi}{4\lambda}} \sin \lambda \frac{\pi}{4\lambda} \quad (\text{A.10})$$

ili

$$M_{x,\max} = 0,0403 \frac{P_g R\delta}{8\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{R^2}{b^2} \quad (\text{A.11})$$

Opšti oblik cirkulacionog napona:

$$\bar{\sigma}_\theta = \frac{RP_g}{\delta} + \varepsilon_0^w E + \mu \frac{M_x}{W_x} \quad (\text{A.12})$$

Cirkulacioni napon nakon zamene w i M_x u (A.12) iznosi:

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma}_\theta &= \frac{RP_g}{\delta} \frac{E}{R} \frac{P_0}{2K\lambda^3} e^{-\lambda x} \cos \lambda x + \frac{6\mu}{\delta^2} \frac{P_g R \delta}{8\sqrt{3(1-\vartheta^2)}} \frac{R^2}{b^2} e^{-\lambda x} \sin \lambda x \\ \bar{\sigma}_\theta &= \frac{RP_g}{\delta} \left[1 - \frac{E P_g R^2}{R 8\lambda b^2} \frac{1}{2K\lambda^3} e^{-\lambda x} \cos \lambda x + \frac{3}{4\delta^2} \frac{\mu P_g R \delta}{\sqrt{3(1-\vartheta^2)}} \frac{R^2}{b^2} e^{-\lambda x} \sin \lambda x \right] \\ \bar{\sigma}_\theta &= \frac{RP_g}{\delta} \left[1 - \frac{1 R^2}{4 b^2} e^{-\lambda x} \cos \lambda x + \frac{3}{4} \frac{\mu}{\sqrt{3(1-\vartheta^2)}} \frac{R^2}{b^2} e^{-\lambda x} \sin \lambda x \right] \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.13})$$

Prvi izvod cirkulacionog napona po koordinati x je:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{\sigma}_\theta}{dx} &= \frac{RP_g}{\delta} \left\{ -\frac{1 R^2}{4 b^2} [(-\lambda)e^{-\lambda x} \cos \lambda x - \lambda e^{-\lambda x} \sin \lambda x] \right. \\ &\quad \left. + \frac{3}{4} \frac{\mu}{\sqrt{3(1-\vartheta^2)}} \frac{R^2}{b^2} [-\lambda e^{-\lambda x} \sin \lambda x + \lambda e^{-\lambda x} \cos \lambda x] \right\} \end{aligned} \right\} \quad (\text{A.14})$$

ili

$$\left. \frac{d\bar{\sigma}_\theta}{dx} = \frac{RP_g}{\delta} \left\{ \frac{1 R^2}{4 b^2} \lambda e^{-\lambda x} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) + \frac{3}{4} \frac{\mu}{\sqrt{3(1-\vartheta^2)}} \frac{R^2}{\delta^2} \lambda e^{-\lambda x} (\cos \lambda x - \sin \lambda x) \right\} \right\}$$

Maksimalne vrednosti cirkulacionog napona se nalaze iz uslova:

$$\frac{1}{4} (\cos \lambda x + \sin \lambda x) = -0,136 (\cos \lambda x - \sin \lambda x)$$

ili

$$t_g \lambda x = -3,38596 \rightarrow \lambda x = \text{akct}_g(-3,38596) = 1,2836228 \text{ rad}$$

Cirkulacioni napon ima maksimalnu vrednost, ako je:

$$\lambda x = \pi - 1,2836225 = 1,8579699 \text{ rad}$$

Karakteristične vrednosti u kritičnoj tački su:

$$e^{-\lambda x} \cos \lambda x = -0,04418$$

i

$$e^{-\lambda x} \sin \lambda x = 0,14959$$

Aksijalni napon rezervoara u kritičnoj tački je:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{Rp}{2\delta} + \frac{6}{\delta^2} \frac{pR\delta}{4 \cdot 8\sqrt{3(1-\vartheta^2)}} \frac{R^2}{b^2} e^{-\lambda x} \sin \lambda x \quad (\text{A.17})$$

Sprovedene transformacije, daju:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{Rp}{2\delta} \left[1 + \frac{3}{2} \frac{1}{\sqrt{3(1-\vartheta^2)}} \frac{R^2}{b^2} e^{-\lambda x} \sin \lambda x \right]$$

ili

$$\bar{\sigma}_x = \frac{Rp}{2\delta} \left[1 + \frac{3}{2} \frac{1}{\sqrt{3(1-\vartheta^2)}} \left(\frac{D}{2b} \right)^2 e^{-\lambda x} \sin \lambda x \right]$$

ili

$$\bar{\sigma}_x = \frac{Rp}{2\delta} + \frac{6}{\delta^2} \frac{p}{8\lambda^2} \left(\frac{D}{2b} \right)^2 e^{-\lambda x} \sin \lambda x$$

Konačno, aksijalni napon rezervora je:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{Dp}{4\delta} \left[1 + \frac{3}{2\sqrt{3(1-\vartheta^2)}} \left(\frac{D}{2b} \right)^2 e^{-\lambda x} \sin \lambda x \right] \quad (\text{A.19})$$

Cirkulacioni napon rezervoara se određuje iz:

$$\bar{\sigma}_x = \frac{Dp}{2\delta} \left[1 - \frac{1}{4} \left(\frac{D}{2b} \right)^2 e^{-\lambda x} \cos \lambda x + \frac{3}{4\sqrt{3(1-\vartheta^2)}} \left(\frac{D}{2b} \right)^2 e^{-\lambda x} \sin \lambda x \right] \quad (\text{A.20})$$

Gde je koeficijent λ :

$$\lambda^4 = \frac{12(1-\nu^2)}{D^2 a^2} \quad (\text{A.21})$$

PRILOG B

Komponentne jednačine kretanja fragmenta imaju sledeći konačni oblik:

$$a_{x,fr} = \dot{v}_{x,fr} = (-k_D v_{x,fr} - k_L v_{z,fr}) \sqrt{v_{x,fr}^2 + v_{z,fr}^2} \quad (\text{B.1})$$

$$a_{z,fr} = \dot{v}_{y,fr} = (k_L v_{x,fr} - k_D v_{z,fr}) \sqrt{v_{x,fr}^2 + v_{z,fr}^2} - g \quad (\text{B.2})$$

Vrednosti aerodinamičkog i potisnog ubrzanja, respektivno iznose:

$$a_{drag} = k_D v^2 \quad (\text{B.3})$$

$$a_{lift} = k_L v^2 \quad (\text{B.4})$$

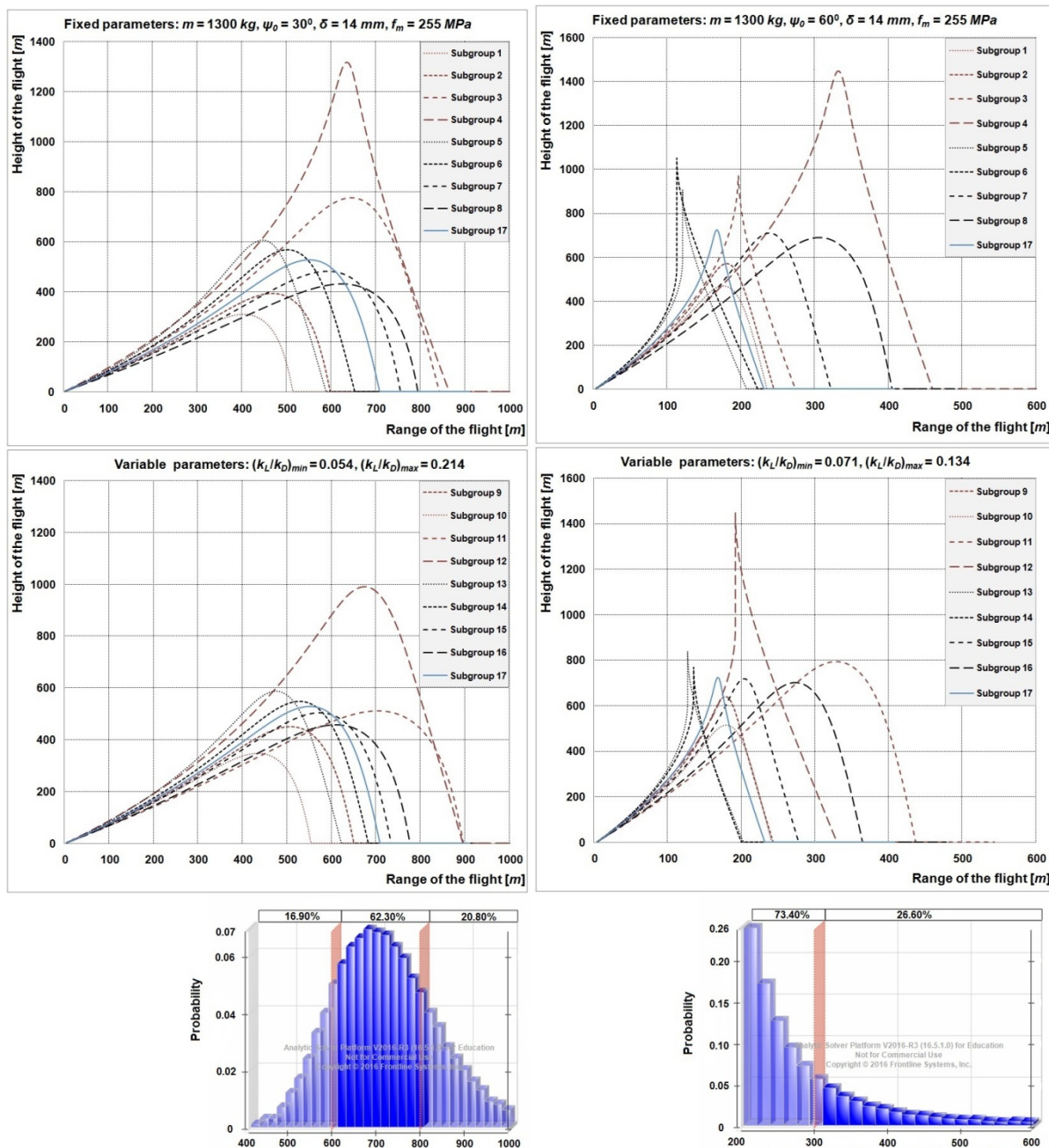
Koeficijenti aerodinamičkog i potisnog ubrzanja su:

$$k_D = \frac{1}{2} \frac{\rho_v C_D A_D}{m_{fr}} \quad (\text{B.5})$$

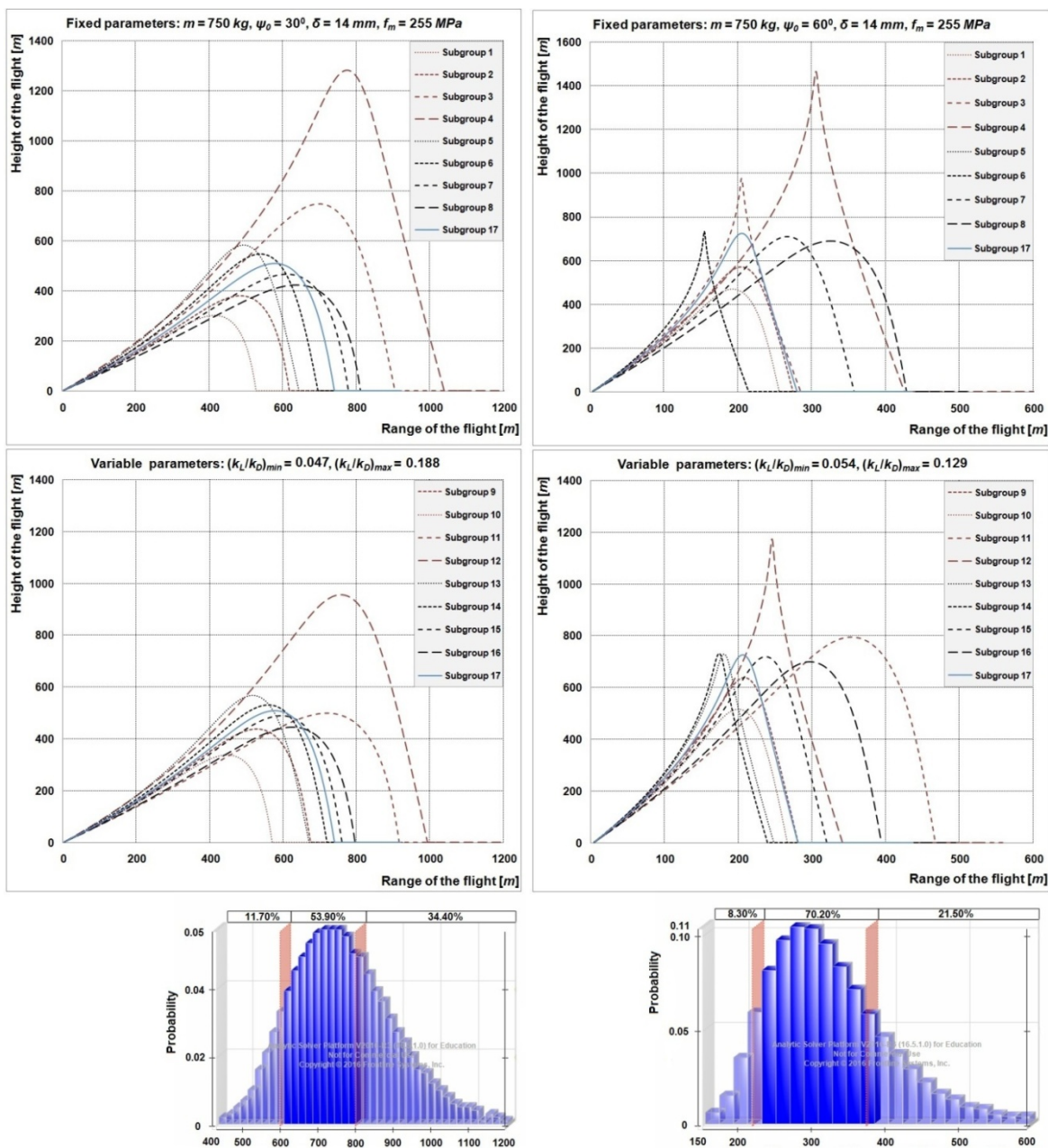
$$k_L = \frac{1}{2} \frac{\rho_v C_L A_L}{m_{fr}} \quad (\text{B.6})$$

PRILOG C

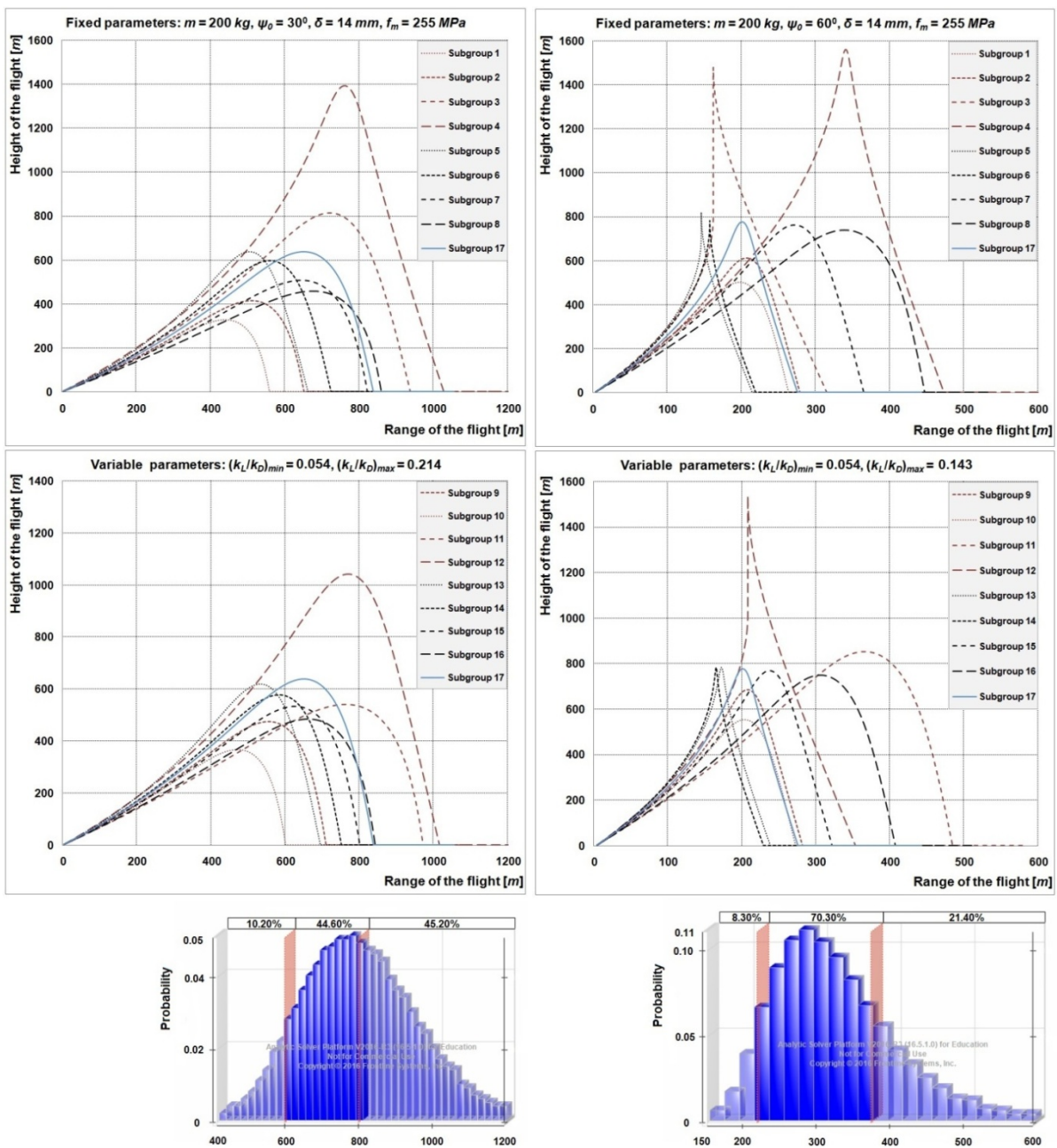
Trajektorije karakterističnih fragmenata su prikazane na slikama C1, C2 i C3.



Slika C1. Funkcije gustine verovatnoće dometa fragmenta za masu 1300 kg: $\psi_0 = 30^\circ$ (levo) i $\psi_0 = 60^\circ$ (desno)



Slika C2. Funkcije gustine verovatnoće dometa fragmenta za masu 750 kg: $\psi_0 = 30^\circ$ (levo) i $\psi_0 = 60^\circ$ (desno)



Slika C3. Funkcije gustine verovatnoće dometa fragmenta za masu 200 kg: $\psi_0 = 30^\circ$ (levo) and $\psi_0 = 60^\circ$ (desno)

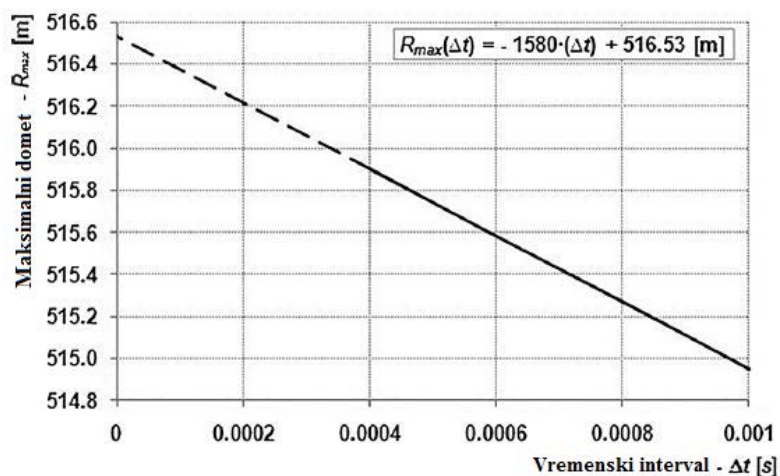
PRILOG D

Numerička procedura za rešavanje (B.1) i (B.2) koristi metod Tejlorovih redova koji se zasniva na pretpostavci da između dva bliska vremenska trenutka, označenih sa t_i i t_{i+1} , nema promene ubrzanja a_{fr} , što je tačno samo kada vremenski interval $\Delta t = (t_{i+1} - t_i) \rightarrow 0$. Tada se promene koordinata fragmenta koje odgovaraju vremenskom trenutku t_{i+1} izražavaju sa:

$$x(t_{i+1}) \approx x(t_i) + v_x(t_i) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_x(t_i) \cdot (\Delta t)^2 \quad (D.1)$$

$$y(t_{i+1}) \approx y(t_i) + v_y(t_i) \cdot \Delta t + \frac{1}{2} a_y(t_i) \cdot (\Delta t)^2 \quad (D.2)$$

Primena izloženog numeričkog postupka je uslovljena konvergencijom (D.1) i (D.2). Smanjenjem vremenskog intervala Δt , numerička vrednost dometa teži egzaktnoj vrednosti. Primer konvergencije rezultata prikazanog na slici D1 odgovara dometu fragmenta najveće verovatnoće sa slike C1, levo. Domet fragmenta i vremenski interval Δt su povezani linearnom korelacijom (Slika D1).

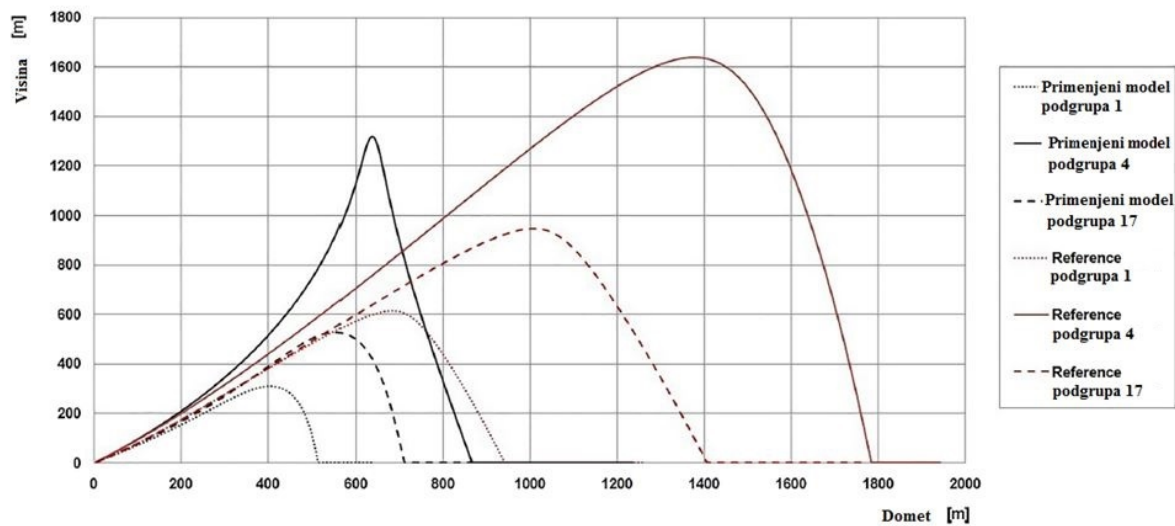


Slika D1. Konvergencija numeričkih rezultata i egzaktna vrednost dometa

Numerički proračuni su izvedeni sa $\Delta t = 1 \text{ ms}$ i domet za dati primer ima vrednost $R_{num} = 514.95 \text{ m}$, dok se egzaktna vrednost određuje kada je $\Delta t = 0$ i ima vrednost $R_{egz} = 516.53 \text{ m}$ (slika D1). Odstupanje rezultata iznosi 0.3%, pa je sasvim prihvatljivo korišćenje numeričkih rešenja kao validnih vrednosti.

PRILOG E

Kvalitativno i kvantitativno odstupanje trajektorija matematičkog modela izloženog u tački 6.5.9 naspram [209] i [213] je dato na slici E1.



Slika E1. Komparativna analiza trajektorija prema egzaktnom i uprošćenom modelu