



Univerza v Mariboru
Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo



Varnost kemijskih procesov

(Zbrano gradivo)

Zorka Novak Pintarič

Maribor, 2008/2009

Naslov: Varnost kemijskih procesov

Avtor: Zorka Novak Pintarič

Strokovna recenzenta: prof. dr. Zdravko Kravanja
prof. dr. Igor Plazl

Izdala: Univerza v Mariboru, Fakulteta za kemijo in kemijsko tehnologijo

UVOD

V kemijski in drugih procesnih industrijah nenehno naraščata tehnološka kompleksnost in raznolikost proizvodov. Vse pogostejša je prisotnost nevarnih snovi v reaktorjih, cevovodih in hranilnikih pri visokih temperaturah in tlakih. Z razvojem industrije v 20. stoletju je narasla količina energije v procesih, velikost obratov se je povečala za faktor 10 krat, obrati vsebujejo ogromne kompresorje in destilacijske kolone, velike količine kemikalij prevažajo z različnimi prevoznimi sredstvi, obrati so povezani med seboj in izmenjujejo snovi, povečala se je množina surovin, produktov in intermediatov v procesih. Ti dejavniki povečujejo tveganje in otežujejo nadzorovanje nevarnosti. Zato prihaja v obratih do nezgod, ki so posledica napak v materialu (npr. zaradi korozije) ali zaradi napak pri obratovanju, kot je npr. porast temperature ali tlaka preko kritičnih vrednosti.

V kemijski industriji so varnosti vedno posvečali veliko pozornosti in število nesreč s smrtnim izidom ne presega drugih industrijskih panog. Vendar pa velike nesreče vedno znova opozarjajo, da je potrebno področje varnosti obravnavati skrbno, temeljito in sistematično. V razvoju področja varnosti in varovanja pred izgubami (Safety and Loss Prevention) sta pomembno vlogo odigrali nesreči v Flixbouroughu, Velika Britanija, kjer je leta 1974 eksplodiral cikloheksan, in v Sevesu, Italija, kjer je leta 1976 prišlo do izpusta TCDD (tetrakloro dibenzo para dioksina). V javnosti je močno odmevala nesreča v Bhopalu, Indija, leta 1984, kjer je preko 2000 ljudi umrlo zaradi zastrupitve z metil izocianatom, več kot 200 000 pa je bilo poškodovanih.

Da bi preprečili takšne nezaželene dogodke ali vsaj zmanjšali njihovo pogostost, si v razvitih državah prizadevajo dvigniti nivo varnosti v procesni industriji s premišljenim vodenjem varnostne politike in z načrtovanjem ter pripravami na ravnanje v primeru nezgod. Učinkovito nadzor nevarnosti je v današnjem času mogoč samo s sistematskim pristopom, učinkovito organizacijo, predpisi, standardi, zakonodajo in strokovnjaki. Pomembno je, da ugotovimo, kje so možne nevarnosti, saj lahko preučimo samo tiste nevarnosti, ki jih poznamo in se nanje tudi ustrezno pripravimo. Nekateri celo pravijo, da nevarnost, ki jo poznamo, ni več nevarnost.

V industrijsko razvitih državah je potrebno za vsak obrat pripraviti študijo varnosti, v kateri so identificirane potencialne nevarnosti in zraven tega ocenjena raven tveganja, ki ga obrat predstavlja za zaposlene in prebivalce v okolici. V Sloveniji je leta 1999 začel veljati Zakon o varnosti in zdravju pri delu, v katerem je predpisano, da mora vsak delodajalec izdelati in sprejeti izjavo o varnosti, katere sestavni del je ocena tveganja za nastanek poškodb in zdravstvenih okvar. Pravilnik o načinu izdelave izjave o varnosti z oceno tveganja predpisuje smernice, kako izdelati oceno tveganja. Maja 2002 je vlada Republike Slovenije izdala Uredbo o ukrepih za zmanjševanje tveganja za okolje zaradi večjih nesreč z nevarnimi kemikalijami, ki zahteva uvajanje Direktive Evropskega sveta 96/82/EC (t.i. Seveso II Directive) v slovenskih podjetjih.

Zapiski so namenjeni študentom drugega letnika visokošolskega strokovnega programa Kemijska tehnologija na Fakulteti za kemijo in kemijsko tehnologijo Univerze v Mariboru. V njih je prikazana metodologija za kvantitativno ocenjevanje tveganj v kemijski procesni industriji, ki jo priporoča center za varnost kemijskih procesov pri ameriškem inštitutu kemijskih inženirjev (AIChE) in jo kratko imenujejo CPQRA (Chemical Process Quantitative Risk Analysis). Podobno metodologijo predlaga tudi evropska federacija kemijskih inženirjev (EFCE) in jo imenujejo QRA (Quantitative Risk Assessment). Razvila se je v osemdesetih letih na osnovi postopkov in metod, ki so jih sprva uporabljali v letalski industriji, elektroniki in pri jedrskih reaktorjih.

V prvem poglavju so podane definicije nekaterih izrazov, ki se pogosto pojavljajo v zapiskih, in je njihovo pravilno razumevanje velikega pomena za temeljito dojetje celotne snovi.

V drugem poglavju so prikazane značilne nevarnosti v kemijskih procesih: izpust strupenih snovi, požar, eksplozija in kemijska reakcija. Razloženi so nekateri izrazi, ki jih pogosto srečujemo pri obravnavanju varnosti v obratih oz. pri transportu nevarnih snovi.

Tretje poglavje shematsko prikazuje potek metode za kvantitativno ocenjevanje tveganja in na kratko opisuje posamezne korake. Najpomembnejše stopnje so podrobno razložene v naslednjih poglavjih.

V četrtem poglavju je podrobno opisana kvalitativna metoda HAZOP za identifikacijo nevarnosti.

V petem poglavju je zbranih nekaj matematičnih modelov za izračunavanje posledic nevarnih dogodkov, kot so npr. modeli za izračun pretoka izhajajoče snovi, modeli za razpenjanje in uparjevanje ter disperzijski modeli, ki opisujejo spreminjanje koncentracije snovi z oddaljevanjem od izvora.

Šesto poglavje na začetku opisuje osnovne principe teorije zanesljivosti in razpoložljivosti. V nadaljevanju sta prikazani metodi za ocenjevanje frekvence oz. verjetnosti nevarnih dogodkov: drevo odpovedi in drevo okvar.

Zadnje, sedmo poglavje obravnava pojem tveganja ter načine, kako ga izražamo, prikazujemo in izračunavamo.

KAZALO

1. OSNOVNE DEFINICIJE	1
1.1. Definicija in značilnosti procesnih industrij	1
1.2. Definicija varnosti procesov	1
1.3. Definicija nevarnosti	2
1.4. Definicija tveganja	2
2. NEVARNOSTI V PROCESU	3
2.1. Nevarnost zaradi strupenih in zdravju škodljivih snovi	3
2.1.1. Ocenjevanje strupenosti	4
2.1.2. Mejne strupenosti	5
2.1.3. Vrednosti ERPG	8
2.2. Požar	9
2.2.1. Proces gorenja	9
2.2.2. Razvrstitev požarov	10
2.2.3. Ocenjevanje požarne nevarnosti	10
2.2.4. Viri vžiga	11
2.2.5. Zaščita pred požarom	12
2.3. Eksplozija	13
2.3.1. Energija eksplozije	14
2.3.2. Ocenjevanje eksplozijske nevarnosti	18
2.3.3. Vrste eksplozij v procesni industriji	20
2.3.4. Preprečevanje eksplozije	21
2.4. Nevarnost zaradi kemijske reakcije	22
2.5. Indeksi nevarnosti	26
2.5.1. Snovni faktor (F_1)	26
2.5.2. Faktor za splošne nevarnosti (F_2)	27
2.5.3. Faktor za posebne nevarnosti (F_3)	28
3. KVANTITATIVNO OCENJEVANJE TVEGANJ V KEMIJSKI PROCESNI INDUSTRIJI	32
4. PREPOZNAVANJE (IDENTIFIKACIJA) NEVARNOSTI	35
4.1. Uporaba vprašalnikov	35
4.2. Študije obratovanja in nevarnosti (HAZOP)	35
4.2.1. Princip metode HAZOP	36
4.2.2. Odstopanja procesnih parametrov	36
4.2.3. Ključne besede	38
4.2.4. Kombinacija ključnih besed in procesnih parametrov	38
4.2.5. Izvedba metode HAZOP	43
4.2.6. HAZOP za šaržne procese	46
4.2.5. Povzetek metode HAZOP	47
5. OCENJEVANJE POSLEDIC	48
5.1. Modeli za izhajanje snovi iz sistema	48
5.1.1. Izhajanje plinov	48
5.1.2. Izhajanje tekočin	49
5.2. Modeli za razpenjanje in uparevanje	50
5.3. Disperzijski modeli	51
5.4. Učinki požarov in eksplozij	53
6. DOLOČANJE VERJETNOSTI IN POGOSTOSTI	54
6.1. Teorija zanesljivosti in razpoložljivosti	54
6.1.1. Verjetnost	55
6.1.2. Funkcija zanesljivosti	57
6.1.3. Funkcija nezanesljivosti	57
6.1.4. Funkcija pogostosti okvar	58
6.1.5. Krivulja pogostosti okvar	59
6.1.6. Povprečni čas med okvarama	60
6.1.7. Zanesljivost nekaterih standardnih sistemov	60

6.1.8.	Razpoložljivost.....	63
6.1.9.	Razpoložljivost varnostnih sistemov, ki jih redno preverjamo.....	64
6.2.	Določanje pogostosti z uporabo preteklih podatkov.....	66
6.3.	Drevo odpovedi (FTA - angl. Fault Tree Analysis).....	67
6.3.1.	Izrazi.....	67
6.3.2.	Opis metode.....	67
6.4.	Drevo dogodkov (ETA - angl. Event Tree Analysis).....	72
6.4.1.	Opis metode.....	73
7.	OCENJEVANJE TVEGANJA.....	75
7.1.	Polkvantitativno izražanje tveganja.....	76
7.2.	Indeksi tveganja.....	77
7.2.1.	Pogostost nesreč s smrtnim izidom (FAR).....	77
7.2.2.	Povprečna stopnja smrtnosti (ARD).....	78
7.3.	Tveganje posameznika.....	78
7.3.1.	Krivulje individualnega tveganja.....	78
7.3.2.	Maksimalno individualno tveganje.....	80
7.3.3.	Povprečno individualno tveganje.....	80
7.4.	Skupinsko tveganje.....	80
7.5.	Postopek za izračunavanje tveganja.....	81
7.5.1.	Analiza individualnega tveganja.....	81
7.5.2.	Analiza skupinskega tveganja.....	84
7.5.3.	Izračun indeksov tveganj.....	87
8.	LITERATURA.....	90
Priloga 1:	Obrazec za določanje požarnega in eksplozijskega indeksa nevarnosti (DOW).....	91
Priloga 2:	Standardi za varnostni pregled procesa.....	92
Priloga 3:	HAZOP študija za primer 4.3.....	95
Priloga 4:	Dovoljene enačbe na pisnem izpitu.....	97

1. OSNOVNE DEFINICIJE

Osnovna tema predmeta varnost dela in teh zapiskov je *varnost procesov*. S tem izrazom označujemo varnost v *procesnih industrijah*.

1.1. Definicija in značilnosti procesnih industrij

Med procesne industrije štejemo obrate, ki izdelujejo ali predelujejo anorganske in organske kemikalije, nafto, zemeljski plin, farmacevtske izdelke, milo, olja, maščobe, gumo, papir, plastične mase, umetna vlakna, industrijske pline in obrate za čiščenje odpadnih voda. Kemijska industrija je torej ena izmed vej procesne industrije.

Večina obratov procesne industrije predeluje pline in tekočine, nekateri pa tudi trdne snovi v obliki prahu, gošč ali suspenzij. Procesno opremo v takšnih obratih predstavljajo pretežno zaprte posode (vessel), ki so med seboj povezane s cevovodi (piping), skozi katere se pretakajo fluidi, katerih pretok uravnavamo z ventili (valve). K procesni opremi sodijo tudi rezervoarji oz. hranilniki fluidov.

Procesno opremo v kemijski industriji pogosto imenujemo tudi *procesne enote*, npr. reaktor, mešalnik, destilacijska kolona, kompresor, črpalka, toplotni prenosnik itd. Procesne enote in njihove medsebojne povezave prikazujemo grafično v obliki *procesne sheme*.

Snovi, ki se pojavljajo v obratih procesne industrije, imajo zelo različne lastnosti. Nekatere so popolnoma neškodljive, druge zelo vnetljive, eksplozivne, močno reaktivne, strupene, dušljive ali korozivne. Te snovi obdelujejo oz. predelujejo pri zelo različnih *obratovalnih pogojih*, npr. pri podtlaku (vakuumu) ali pri zelo visokem tlaku in v širokem območju temperature od bližine absolutne ničle vse do 2000 °C in več.

Zaradi hitrega gospodarskega razvoja prihaja v obratih procesne industrije pogosto do povečevanja obsega proizvodnje (scale-up). Tako je npr. kapaciteta obratov za proizvodnjo žveplove kisline v zadnjih petdesetih letih narasla od 10 t dnevno na 1000 t dnevno, kar predstavlja stokratno povečanje. Povečevanje obsega proizvodnje ima za posledico povečevanje vsebnosti nevarnih snovi v procesih, kar je glavni vzrok nevarnosti v procesnih industrijah.

1.2. Definicija varnosti procesov

V okviru predmeta varnost dela ne bomo obravnavali nevarnosti, ki so skupne tako procesnim kot tudi predelovalnim industrijam v splošnem, kot npr. padci oseb ali materiala na osebe, nevarnosti zaradi električnega toka, strojev in ročnih orodij ter premikajočih se objektov. Naštete nevarnosti sicer predstavljajo vzrok za večino nesreč v tovarnah, vendar pa običajno nimajo katastrofalnih posledic. Ta skupina nevarnosti in ukrepi za njihovo preprečevanje so ponavadi predmet nacionalnih programov in zakonodaje v posameznih državah, kot je v Sloveniji npr. Zakon o varnosti in zdravju pri delu (1999) ter drugi. Ravno tako v tem okviru ne bomo obravnavali posledic dolgotrajnih izpostavljenosti, ki povzročajo kronične posledice npr. poklicne bolezni.

Za potrebe našega predmeta bomo definirali *varnost procesov* kot tisto vejo vede o varnosti, ki se ukvarja s preučevanjem in preprečevanjem nevarnosti, ki so značilne za procesne industrije. Osnovni vir nevarnosti v procesnih industrijah pa je nezaželen in nenadzorovan *izpust snovi ali energije* iz procesa, ki lahko povzroči škodo ne samo zaposlenim, ampak tudi ljudem, ki živijo ali se nahajajo v okolici, poškoduje objekte znotraj tovarniške ograje pa tudi zunaj nje ter lahko povzroči škodo okolju.

Varnost procesov dosežemo tako, da zmanjšujemo nevarnosti v procesu oz. tveganje, ki ga te nevarnosti predstavljajo za ljudi in premoženje, na raven, ki je sprejemljiva tako za podjetje kot tudi za širšo družbo.

V vsakdanjem življenju pogosto zamenjujemo izraza nevarnost in tveganje. Pogosto nevarnim dejavnostim, npr. gorskemu plezanju, pravimo tvegane dejavnosti. V vsakdanjem

izražanju je takšno enačenje dopustno, če pa pristopamo k analizi varnosti na znanstven način, moramo oba pojma jasno ločevati.

1.3. Definicija nevarnosti

Nevarnost je fizikalni dogodek, ki nosi v sebi potencial (sposobnost), da povzroči škodo ljudem, premoženju ali okolju. Zato bomo nevarnosti pogosto imenovali tudi *nevarni dogodki*. V kemijski industriji so to npr. eksplozije, požari, izpusti nevarnih snovi.

Vsak nevarni dogodek ima svoj izvor, ki je lahko primaren ali sekundaren. *Primarni izvori* nevarnih dogodkov so dejavniki oz. značilnosti procesa, ki so nevarne same po sebi, npr. prisotnost nevarnih snovi in reakcij, toplote, tlaka, kisika, virov energije, virov vžiga, možnost človeških napak, mehanskih okvar, gibanje ljudi in komponent v procesu, zmanjšana vidljivost... Primer primarnega izvora je mehanska okvara varnostnega ventila na tlačni posodi, ki lahko ima za posledico nevarni dogodek npr. izpust strupene snovi iz posode, če okvara ni pravočasno odkrita.

Sekundarni izvori nevarnih dogodkov so rezultat nevarnih dogodkov, ki so jih povzročili primarni izvori: požar in širjenje požara, eksplozija in sekundarna eksplozija, izpust nevarnih snovi itd. Primer sekundarnega izvora je npr. poškodba v steni tlačne posode, ki je posledica udarnega vala eksplozije.

Primarne izvore nevarnosti preprečujemo z dobrim načrtovanjem, vodenjem in vzdrževanjem procesa. Za sekundarne izvore pa je treba poskrbeti, da bodo v primeru nevarnega dogodka minimalni.

1.4. Definicija tveganja

Tveganje izraža možnost, da se bo zgodil nek nevarni dogodek v določenem časovnem obdobju in pod določenimi pogoji. To možnost lahko izrazimo na dva načina: kot frekvenco ali kot verjetnost.

Frekvenca je število nevarnih dogodkov, ki se zgodijo v enoti časa. Zato ima frekvenca dimenzijo T^{-1} .

Verjetnost je brezdimenzijsko število med 0 in 1, ki izraža možnost oz. pričakovanje, da se bo nek dogodek dejansko zgodil.

2. NEVARNOSTI V PROCESU

V modernih obratih procesnih industrij so najpomembnejše tri vrste nevarnih dogodkov: požar, eksplozija in izpust strupenih oz. zdravju škodljivih snovi. Pri tem je požar najpogostejši dogodek, eksplozija pa najhujši glede smrtnih žrtev in škode. Na obseg nevarnega dogodka, ki mu v vsakdanjem življenju pogosto rečemo tudi nesreča, vplivajo naslednji dejavniki:

- **Velikost zaloge**
Večje kot so zaloge nevarnih snovi v procesu, večja je nevarnost.
- **Energija**
Vsebovana je npr. v kemijski reakciji ali v stanju snovi, npr. tekočina pri visokem tlaku nad svojim normalnim vreliščem vsebuje veliko energije.
- **Čas**
Nevarnost ob izpustu strupenih snovi je odvisna od hitrosti izpusta; čas je pomemben pri sprejemanju ukrepov v sili in pri evakuaciji ljudi; pomembna je dolžina intervala med prvim opozorilnim znakom in eksplozijo ali izpustom.
- **Razdalja**
Pomembna značilnost nevarnosti je razdalja, na kateri lahko nesreča povzroči škodo. V splošnem učinkuje požar na manjšem območju, eksplozija na večjem in izpust strupenih snovi na največjem.
- **Ravnanje v sili**
Obseg posledic nesreče se zmanjša, če zmanjšamo izpostavljenost ljudi na prizadetem območju, kar dosežemo z ustreznim ravnanjem in ukrepi, ki so specifični za nesrečo.

Prisotnost nevarnih snovi je eden najpomembnejših virov nevarnosti v procesih. Po smernicah Evropske skupnosti uvrščamo med nevarne snovi tiste, ki imajo eno ali več naslednjih lastnosti:

- strupenost in škodljivost za zdravje (zelo strupene, strupene, škodljive, karcinogene, mutagene, toksične za reprodukcijo, jedke, dražljive),
- vnetljivost (zelo lahko vnetljive, lahko vnetljive in vnetljive snovi),
- povzročanje vžiga
- eksplozivnost,
- oksidativnost,
- jedkost,
- radioaktivnost,

2.1. Nevarnost zaradi strupenih in zdravju škodljivih snovi

Nevarnost, ki jo predstavljajo strupene snovi, je odvisna od pogojev izpostavljenosti (trajanje in koncentracija) in od lastnosti strupene snovi. Mejna primera sta kratkotrajna izpostavljenost visoki koncentraciji in dolgotrajna izpostavljenost nizki koncentraciji, npr. vso delovno dobo. Oba primera sta zelo nevarna, npr. izpust velike množine klora pri neugodnih pogojih, lahko ima težje posledice kot velik požar ali eksplozija. Posledice so odvisne od vremenskih razmer, gostote populacije na prizadetem območju, od učinkovitosti evakuacije itd.

Strupene snovi lahko vstopijo v organizem z vdihavanjem, zaužitjem in skozi kožo. Na to vpliva agregatno stanje snovi:

Plini delujejo preko dihalnega trakta, dražijo oči in kožo. (CO je krvni strup, ozon ogroža delavce pri varjenju, NO in NO₂ povzročata stalne poškodbe pljuč, Cl draži dihala). Nekateri plini nas z draženjem opozarjajo, še preden dosežejo kritično koncentracijo, drugi pa ne.

Tekočine delujejo na kožo, tako da jo najedajo (kisline, baze) ali pronicajo skozi kožo (npr. organska topila).

Hlapi prodirajo skozi dihala, lahko pa dražijo tudi oči. Posebej nevarni so hlapi organskih topil (npr. trikloroetan): škodujejo lahko kratkotrajno (omotica, nezavest) ali povzročajo dolgotrajne poškodbe (npr. pljuč).

Prah in dim sta zelo škodljiva. Na to pomembno vpliva velikost delcev:

- prah z velikostjo delcev pod 0,5 μm običajno ne ostane v pljučih,
- prah z velikostjo delcev nad 10 μm tako hitro sedimentira, da ne predstavlja nevarnosti,
- nevaren je prah z velikostjo delcev med 1 in 5 μm .

Po zaužitju strupene snovi potečejo v prebavilih kemijske reakcije, ki lahko dajejo še bolj strupene produkte (metabolična aktivacija) ali pa manj strupene (detoksifikacija). Kisle snovi se v glavnem absorbirajo v želodcu, bazične v črevesju, nekatere pa se sploh ne absorbirajo in tako ne povzročijo škodljivih posledic (npr. barijev sulfat).

Koža predstavlja dobro zaščito proti snovem, ki se topijo v vodi, ne pa tudi za snovi, ki raztapljajo maščobe (npr. organska topila). Posebej uničujoče so močno korozivne snovi, kamor sodijo anorganske kisline in baze. Pri tem je korozivno delovanje baz močnejše od kislin. Korozivno delovanje snovi povzroči nepopravljive poškodbe, posebej občutljive so oči.

Nekatere snovi škodljivo vplivajo na reprodukcijo, bodisi zmanjšujejo rodnost (**oznaka R_F**) ali povzročajo poškodbe zarodka (**oznaka R_E**). Snovem, ki povzročajo poškodbe plodu, pravimo teratogene snovi. Te snovi lahko povzročijo poškodbe tudi če vrednosti maksimalno dovoljenih koncentracij niso presežene.

Mutagene snovi povzročajo dedne genetske spremembe pri ljudeh.

Veliko industrijskih snovi povzroča raka oz. rakaste tumorje (karcinome). Število snovi, za katere predvidevajo, da so karcinogene, nenehno raste zaradi intenzivnih raziskav v zadnjem času. Kljub temu je na področju raziskav karcinogenih snovi veliko težav zaradi tega, ker je trajanje med izpostavljenostjo nevarni snovi in izbruhom bolezni med 20 in 40 let. Med prvimi snovmi, pri katerih so odkrili karcinogeni učinek, je 2-naftilamin, sledila sta azbest in vinilklorid.

Po kriterijih Evropske skupnosti se delijo karcinogene snovi v tri skupine:

- 1) snovi, ki zagotovo povzročajo rakasta obolenja in s katerimi ljudje v nobenem primeru ne smejo priti v stik (azbest, benzen, benzidin, nikelj, premogov katran, vinilklorid ...),
- 2) snovi, ki delujejo karcinogeno na poskusne živali (akrilonitril, etilenamin, berilij, hidrazin...),
- 3) snovi, za katere domnevajo, da bi lahko delovale karcinogeno (bitumen, svinčev kromat, klorirani bifenili, kloroform ...).

Vse snovi, ki so uvrščene na seznam v 1., 2. ali 3. skupino, je treba zamenjati z manj škodljivimi snovmi. Za nekatere snovi, ki pa jih kljub temu ne moremo odstraniti iz proizvodnje, so v Nemčiji za prehodni čas izdelali tehnične smernice za koncentracije, ki naj zmanjšajo nevarnost obolenj na minimum.

Zaradi velike nevarnosti pred zastrupitvijo so strupene snovi označene z **R in S stavki**. R stavki (risk) opozarjajo na nevarnosti, S stavki (safety) pa na varnostna navodila.

2.1.1. Ocenjevanje strupenosti

Podatki o strupenosti snovi so pogosto nepopolni ali pa jih sploh ni, ker je število kemikalij, ki jih uporabljajo v industriji, izredno veliko in stalno narašča. Preverjanje strupenosti je danes dobro razvito in razširjeno v kemijski, prehrambeni, farmacevtski in kozmetični industriji. Metode, ki jih uporabljajo za ocenjevanje strupenosti, so:

1. epidemiološke raziskave temeljijo na primerjavi bolezni in poškodb med študijsko skupino in primerjalno skupino. Primerne so, kadar je veliko ljudi izpostavljen nevarni snovi dalj časa. Pomembne epidemiološke raziskave v preteklosti so izvedli za radij, naftilamin, svinec, azbest

in vinilklorid. Slaba stran teh študij je, da temeljijo na že izpostavljenih ljudeh, pri katerih so že očitne poškodbe in bolezni.

2. eksperimenti na živalih so moralno sporni, zraven tega pa obstaja negotovost pri interpretaciji in prenosu rezultatov, ki jih dobijo na živalih, na ljudi. Npr. penicilin povzroča pri prašičih črevesne krvavitve, medtem ko naftilamin, ki je kancerogen za ljudi, ne povzroči raka pri podganah.
3. eksperimenti z mikroorganizmi - raziskujejo snovi z mutagenim in karcinogenim potencialom.

2.1.2. Mejne strupenosti

Poznamo dve vrsti mejnih strupenosti. Meja za kratkotrajno izpostavljenost smrtni (letalni) koncentraciji je smrtonosna množina (Lethal Dose, LD) in meja za dolgotrajnejšo izpostavljenost nizki koncentraciji preko delovne dobe je mejna koncentracija.

a) Smrtonosna množina – letalna doza (Lethal Dose, LD)

LD določajo na osnovi eksperimentov z živalmi. LD₅₀ je množina snovi, ki povzroči smrt 50 % testne skupine z oralnim zaužitjem v 14 dneh, z resorpcijo skozi kožo v 24 urah oz. pri vdihavanju v 4 urah. Glede na smrtonosno množino ob oralnem zaužitju so strupene snovi po smernicah Evropske skupnosti razvrščene v 4 skupine:

Snovi, ki imajo LD₅₀ < 25 mg/kg so izjemno strupene (oznaka **T+**).

Snovi, ki imajo 25 < LD₅₀ < 200 mg/kg so strupene (oznaka **T**).

Snovi, ki imajo 200 < LD₅₀ < 2000 mg/kg so škodljive (oznaka **Xn**).

Snovi z LD₅₀ > 2 g/kg so relativno neškodljive.

b) Mejne vrednosti

Mejna vrednost (MV) je koncentracija škodljive snovi v zraku, za katero glede na sedanje znanje ni nevarnosti, da bi škodovala zdravju delavca, če je delavec izpostavljen takšni ali nižji vrednosti v vsej delovni dobi. Pri tem je standardni delovni dan dolg 8 ur in standardni delovni teden 40 ur. Mejne vrednosti ne predstavljajo ostre meje med varnim in nevarnim. So le priporočene orientacijske vrednosti, ki veljajo za povprečnega zdravega človeka pri normalnih mikroklimatskih razmerah in pri fizično lahkem delu.

V svetu so trije najpomembnejši sistemi za izražanje mejnih vrednosti: v ZDA je to sistem TLV (Threshold Limit Values), v Veliki Britaniji sistem OEL (Occupational Exposure Limits) in v Nemčiji sistem MAK-Werte.

Mejne vrednosti izražamo na naslednje načine:

- kot masno koncentracijo, γ , ki predstavlja mg strupene snovi na m³ zraka (mg/m³)
- kot prostorninsko koncentracijo, ki predstavlja volumen plina ali pare strupene snovi (v ml) v določenem volumnu zraka (v m³) pri 20 °C in tlaku 1 atm (ml/m³). Zastarela mera je ppm (parts per million).
- za nekatere snovi v milijonih delcev na m³ zraka.

Poznamo različne vrste mejnih vrednosti:

1. povprečna MV je časovno uravnotežena koncentracija za 8 urni delovni dan in 40 urni delovni teden. Odstopanja nad to vrednost so dovoljena, če so uravnotežena z odstopanji pod njo. Dovoljena odstopanja so določena približno. Pogost angleški izraz za povprečno MV je Time Weighted Average exposure (TWA).

2. kratkotrajna vrednost (KTV) je dovoljena koncentracija, ki je višja od MV in ji je delavec lahko izpostavljen le kratek čas. Izpostavljenost KTV lahko traja največ 15 min in se sme ponoviti največ 4 krat dnevno, pri čemer mora biti čas med dvema izpostavitvama takšni koncentraciji daljši od 1 ure. Seveda pa dnevna povprečna MV ne sme biti presežena. Angleški izraz za kratkotrajno vrednost je Short-Term Exposure Limit (STEL).
3. najvišja MV je koncentracija, ki ne sme biti presežena niti za kratek čas. Te vrednosti so podane za substance z izjemno hitrim učinkovanjem. V tuji literaturi so označene s podaljškom C – ceiling, npr. TLV-C.

Pri merjenju koncentracij škodljivih snovi lahko opazimo, da so včasih trenutno presežena največja dovoljena odstopanja. Za snovi, ki učinkujejo počasi, to ni kritično (npr. kremenčev pesek, svinec, CO), pač pa je nevarno pri snoveh, ki učinkujejo hitro (npr. H₂S, amoniak, CO₂).

Mejne vrednosti se pogosto spreminjajo, ker napreduje znanje, ki ga imamo o škodljivih snoveh, zato je treba podatke redno obnavljati. Tako npr. je bila največja dovoljena koncentracija za vinilklorid leta 1973 200 ppm in leta 1975 le še 10 ppm. Uporaba mejnih vrednosti ima tudi nekatere pomanjkljivosti:

- v različnih državah veljajo različne vrednosti,
- ne veljajo za posebej občutljive ljudi,
- ne veljajo za ljudi z zdravstvenimi motnjami,
- ne veljajo za nosečnice,
- ne veljajo za delo v posebnih razmerah (npr. pri težkem fizičnem delu),
- ne veljajo za kadilce in alkoholike,
- veljajo za čiste snovi, medtem ko so delavci večkrat izpostavljeni več snovem.

PRIMER 2.1: Na nekem delovnem mestu smo pri temperaturi 20 °C in tlaku 1 atm odvzeli vzorec zraka prostornine 2 l in v njem določili 0,1 mg ogljikovega disulfida. Izračunajmo prostorninsko in masno koncentracijo. Ali je presežena mejna vrednost, ki znaša za CS₂ 30 mg/m³ oz. 10 ml/m³.

Rešitev: Najprej izračunajmo volumen, ki ga pri danih pogojih zavzame 0,1 mg ogljikovega disulfida. Ker nimamo na voljo podatka o gostoti, uporabimo enačbo za idealne pline:

$$P \cdot V = \frac{m}{M} RT \quad \text{oz.} \quad V = \frac{mRT}{PM}$$

$$V_{\text{CS}_2} = \frac{0,0001 \text{ g} \cdot 8,314 \text{ kPa} \cdot \text{L} \cdot 293 \text{ K}}{100 \text{ kPa} \cdot \text{mol} \cdot 76 \text{ g}} = 3,205 \cdot 10^{-5} \text{ L} = 0,03205 \text{ ml}$$

Zdaj lahko izračunamo prostorninsko koncentracijo:

$$\sigma_{\text{CS}_2} \approx \frac{V_{\text{CS}_2}}{V_{\text{zraka}}} = \frac{0,03205 \text{ ml}}{0,002 \text{ m}^3} = 16,0 \frac{\text{ml}}{\text{m}^3} \quad \text{ali (zastarelo) 16 ppm}$$

$$\text{Masna koncentracija je: } \gamma_{\text{CS}_2} = \frac{m_{\text{CS}_2}}{V_{\text{zraka}}} = \frac{0,1 \text{ mg}}{0,002 \text{ m}^3} = \underline{\underline{50,0 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}}}$$

Ker je izračunana koncentracija (50 mg/m³) višja od maksimalno dovoljene (30 mg/m³), lahko zaključimo, da je vsebnost CS₂ na delovnem mestu previsoka in potrebni bodo ukrepi za njeno zmanjšanje.

PRIMER 2.2: V delavnici polnijo in umerjajo živosrebrne barometre. Živo srebro shranjujejo v majhni sobi brez prezračevanja. Nekoč se je živo srebro razlilo in ni bilo popolnoma odstranjeno.

- Kakšna je največja možna (ravnotežna) koncentracija Hg vzraku pri 20 °C?
- Ali je dopustna za delavce, če znaša mejna vrednost 0,1 mg/m³?
- Ponovite izračun pri 10 °C.

Podatki: parni tlak Hg pri 20 °C je 0,1729 Pa in pri 10 °C je 0,07101 Pa.

Rešitev: a) 14,24 mg/m³; b) ne; c) 6,05 mg/m³

c) Mejne vrednosti zmesi

Mejne vrednosti so večinoma podane za individualne substance. V praksi so delavci pogosto izpostavljeni zmesem nevarnih snovi. Učinek takšne zmesi na ljudi je odvisen od narave komponent v zmesi. Te lahko imajo 1) sinergistični učinek, kar pomeni, da ena substanca poveča škodljiv vpliv druge substance, 2) aditivni učinek, kar pomeni, da se učinki substanc seštevajo ali 3) medsebojno neodvisni učinek. Če imajo snovi medsebojno neodvisne učinke, preverjamo mejno vrednost za vsako komponento posebej in če nobena ni presežena, je stanje sprejemljivo. Če imajo snovi podobne toksične učinke, govorimo o aditivnem učinku in s seštevanjem preverimo, ali je mejna vrednost zmesi presežena:

$$\Psi = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i}{\gamma_{MV,i}} \quad (2.1)$$

kjer je γ_i masna koncentracija komponente i (v mg/m³) in $\gamma_{MV,i}$ mejna koncentracija komponente i (v mg/m³).

Velja naslednje: če je $\Psi > 1$, je mejna vrednost zmesi presežena.

PRIMER 2.3: Preverimo, ali zmes, ki vsebuje 8 ml/m³ tetraklorometana in 25 ml/m³ 1,2-dikloroetana v zraku, presega mejno vrednost.

$$\begin{aligned} \sigma_{MV}(\text{tetraklorometana}) &= 10 \text{ ml/m}^3 \\ \sigma_{MV}(1,2\text{-dikloroetana}) &= 50 \text{ ml/m}^3 \end{aligned}$$

Rešitev: Najprej uporabimo enačbo (2.1). Ker nastopa v števcu in imenovalcu ista snov pri istih pogojih, prostorninske koncentracije ni potrebno pretvarjati v masno koncentracijo:

$$\Psi = \frac{8}{10} + \frac{25}{50} = 1,3$$

Ker je $\Psi > 1$, zmes presega mejno vrednost

PRIMER 2.4: V 200 l zraka smo izmerili 3 mg toluena in 8 mg tetraklorometana. Preverimo, ali zmes presega mejno vrednost.

$$\begin{aligned} \sigma_{MV}(\text{toluena}) &= 60 \text{ ml/m}^3, \quad \rho(\text{toluena,g}) = 0,0033 \text{ g/ml} \\ \sigma_{MV}(\text{tetraklorometana}) &= 10 \text{ ml/m}^3, \quad \rho(\text{tetraklorometana,g}) = 0,0065 \text{ g/ml} \end{aligned}$$

Rešitev: Najprej izračunamo dejansko masno koncentracijo toluena:

$$\gamma(\text{toluena}) = \frac{m}{V} = \frac{0,003 \text{ g}}{0,2 \text{ m}^3} = 0,015 \text{ g/m}^3 = 15 \text{ mg/m}^3$$

Nato pretvorimo mejno vrednost, ki je izražena z volumsko koncentracijo, v masno koncentracijo:

$$\gamma_{\text{MV}}(\text{toluena}) = \sigma_{\text{MV}} \cdot \rho = 60 \frac{\text{ml}}{\text{m}^3} \cdot 0,0033 \frac{\text{g}}{\text{ml}} = 0,198 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 198 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

Izračun ponovimo še za tetraklorometan:

$$\gamma(\text{CCl}_4) = \frac{m}{V} = \frac{0,008 \text{ g}}{0,2 \text{ m}^3} = 0,04 \text{ g/m}^3 = 40 \text{ mg/m}^3$$

$$\gamma_{\text{MV}}(\text{CCl}_4) = \sigma_{\text{MV}} \cdot \rho = 10 \frac{\text{ml}}{\text{m}^3} \cdot 0,0065 \frac{\text{g}}{\text{ml}} = 0,065 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 65 \frac{\text{mg}}{\text{m}^3}$$

$$\psi = \frac{15}{198} + \frac{40}{65} = \underline{\underline{0,69}}$$

Ker je $\psi < 1$, zmes ne presega mejne vrednosti.

Omeniti velja, da lahko v primeru, ko gostote hlapov niso podane, uporabimo plinsko enačbo za preračunavanje prostorninskih koncentracij v masne in obratno.

PRIMER 2.5: Človek izgubi zavest, če pade povprečni prostorninski delež kisika v pljučih pod 11 %. Predpostavimo, da je v normalnih pogojih prostorninski delež kisika v pljučih enak 16 % in to je enako deležu kisika v izdihanem zraku. Človek vsakič vdihne približno 0,5 litra zraka, število vdihov je 30 na minuto. Povprečna prostornina pljuč je 5,5 l. Izračunajte:

- v kolikšnem času človek izgubi zavest, če vstopi v prostor brez kisika in
- v kolikšnem času pade delež kisika pod 6 %. Pri tej vsebnosti kisika se dihanje ustavi.

Rešitev: a) 8,2 s; b) 21,6 s

2.1.3. Vrednosti ERPG

Vrednosti ERPG objavlja Ameriško združenje za industrijsko higieno (AIHA – American Industrial Hygiene Association). Gre za vrednosti koncentracij, ki predstavljajo smernice za načrtovanje zaščite in reševanja ob izrednih dogodkih, od tod tudi kratica ERPG, ki pomeni Emergency Response Planning Guidelines. V letu 2008 so bile objavljene vrednosti za preko 130 kemikalij, več deset kemikalij je bilo v fazi testiranja oz. preverjanja. Za vsako snov so praviloma podane tri vrednosti: ERPG-1, ERPG-2 in ERPG-3. Podane so pretežno kot volumske koncentracije (v ml/m^3 oz. ppm), nekatere pa kot masne koncentracije (mg/m^3).

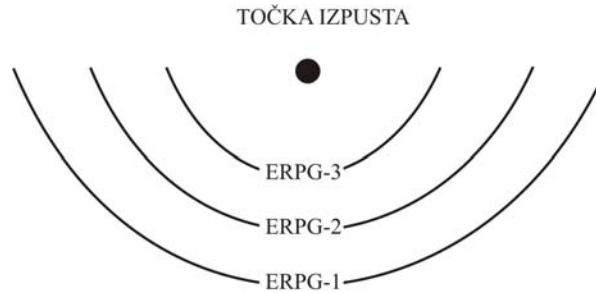
Vrednosti ERPG predstavljajo koncentracije strupenih oz. zdravju škodljivih snovi v zraku, ki so jim skoraj vsi posamezniki lahko izpostavljeni eno uro brez določenih posledic. Te posledice so definirane na naslednji način:

- ERPG-1 je najvišja imisijska koncentracija določene snovi v zraku, pod katero skoraj vsi posamezniki, ki bi bili izpostavljeni do ene ure, ne bi imeli drugih posledic za svoje zdravje kot prehodne zdravstvene vplive, ali občutili jasno zaznaven vonj,
- ERPG-2 je najvišja imisijska koncentracija določene snovi v zraku, pod katero skoraj vsi posamezniki, ki bi bili izpostavljeni do ene ure, ne bi imeli nepopravljivih posledic za svoje

zdravje ali drugih simptomov, ki bi preprečili njihovo sposobnost, da se sami zaščitijo oz. rešijo,

- ERPG-3 je najvišja imisijska koncentracija določene snovi v zraku, pod katero skoraj vsi posamezniki, ki bi bili izpostavljeni do ene ure, ne bi bili življenjsko ogroženi.

Koncentracije snovi v zraku se z oddaljevanjem od izvora manjšajo, zato je vrednost ERPG-1 najnižja in ERPG-3 najvišja (slika 2.1). Za klor npr. je vrednost ERPG-1 enaka 1 ppm, ERPG-2 je 3 ppm in ERPG-3 je 20 ppm.



Slika 2.1. Območja koncentracij ERPG

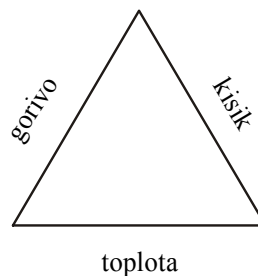
2.2. Požar

Požari predstavljajo v procesni industriji največjo nevarnost, saj se dogajajo pogosteje kot izpusti nevarnih snovi ali eksplozije, čeprav slednje običajno povzročijo večjo škodo in izgubo življenj. Ob požaru pride do intenzivnega sevanja toplote, ki je lahko usodno za ljudi, zraven tega se pojavi tudi pomanjkanje kisika. Požari lahko povzročijo veliko škodo v procesu in v zgradbah.

2.2.1. Proces gorenja

Požar ali gorenje je kemijska reakcija, v kateri snov reagira s kisikom in se sprošča toplota. Če pride trdna ali tekoča gorljiva snov v stik z virom toplote, se prične segrevati in razvijati hlapne. Pri zadostni množini hlapov nastane vnetljiva zmes hlapov in zračnega kisika, ki se ob nadaljnjem segrevanju vnema.

Trije osnovni pogoji za gorenje so gorivo, kisik in toplota (slika 2.2). Če manjka eden od teh dejavnikov, ne pride do gorenja oz. če enega od njih odstranimo, gorenje preneha. Npr. če pride do požara zaradi iztekanja vnetljive snovi, lahko požar ustavimo, če ustavimo dotok te snovi; toploto odvezujemo npr. z gašenjem z vodo; vsebnost kisika zmanjšamo z inertnimi plini ali s peno pod vrednost, ki ne omogoča več gorenja (pod 12 % - 16 % za tekoče snovi in pod 2 % - 5 % za trdne snovi).



Slika 2.2. Osnovni dejavniki gorenja

Za vzdrževanje gorenja je potrebna pozitivna toplotna bilanca, to pomeni, da mora biti toplota, ki se sprošča z gorenjem, večja od toplote, ki je potrebna za uparjevanje snovi. Pri gorenju tekočin in trdnih snovi, je ponavadi sproščene toplote toliko, da povzroči uparjevanje vedno večje množine snovi in požar se razširi.

Požar se širi z direktnim stikom plamena in vnetljive snovi, s prenosom toplote in s širjenjem gorečega materiala. Glavni načini prenosa toplote so kondukcija, konvekcija in radiacija (sevanje). Največji delež (okrog 75 %) pripada konvekciji, do katere prihaja zaradi gibanja vročih produktov gorenja, ki imajo temperaturo med 800 °C in 1200 °C. Sevanje je pomembno pri prenosu toplote na bližnje objekte, kondukcija pa pri prehodu toplote skozi trdne ovire npr. stene.

2.2.2. Razvrstitev požarov

Požari so razvrščeni glede na agregatno stanje snovi, ki gori, v štiri skupine:

A	požari trdnih snovi
B	požari tekočih snovi
C	požari plinov
D	požari kovin

2.2.3. Ocenjevanje požarne nevarnosti

Pomembni podatki za ocenjevanje požarne nevarnosti vnetljivih plinov in tekočin so:

a) Območje vnetljivosti (eksplozijsko območje)

Vnetljive snovi lahko gorijo samo v omejenem območju sestave. Meji vnetljivosti sta najnižja in najvišja koncentracija vnetljive snovi v zraku, ki določata območje koncentracij, v katerem lahko plamen napreduje skozi zmes. Pod spodnjo mejo vnetljivosti (spodnjo eksplozijsko mejo) je v zmesi premalo vnetljive snovi, nad zgornjo mejo vnetljivosti (zgornjo eksplozijsko mejo) je preveč. Meje vnetljivosti so izražene v prostorninskih deležih, npr. za vodik 4 % do 75 %, za bencin 1,4 % do 7,6 %. V literaturi srečamo oznako % v/v, ki pomeni, da gre za prostorninski delež.

Na območje vnetljivosti vplivata tlak in temperatura. Z naraščanjem temperature se območje vnetljivosti širi, medtem ko je vpliv tlaka pri različnih snoveh različen.

b) Vnetišče

Vnetišče je temperatura, pri kateri se snov spontano vname brez zunanega vira vžiga (npr. za aceton 540 °C).

c) Plamenišče

Plamenišče je temperatura, pri kateri se iz tekočine razvijejo hlapi v taki količini, da se lahko vnamejo, če se nad površino pojavi plamen. Hlapi trenutno zagorijo in nato ugasnejo, ker snov še ni dovolj segreti, da bi oddajala hlape v zadostni količini. Plamenišča večine hlapnih snovi so nižja od običajne temperature okolja (npr. za aceton -20 °C).

d) Vrelišče

Čim nižje je vrelišče vnetljive tekočine, tem prej se začne intenzivnejše gorenje. Med dvema tekočinama z istim plameniščem je nevarnejša tista, ki ima nižje vrelišče.

Vnetljive tekočine delimo v tri glavne skupine, tekočine prve in tretje skupine pa še v podskupine (tabela 2.1). Za zelo vnetljivo šteje snov, ki ima nizko plamenišče, nizko vrelišče in široko območje vnetljivosti.

Tabela 2.1. Razvrstitev vnetljivih tekočin

		plamenište	vrelišče
I. skupina	A	< 23 °C	< 38 °C
	B	< 23 °C	> 38 °C
	C	23 – 38 °C	
II. skupina		38 – 60 °C	
III. skupina	A	60 – 93 °C	
	B	> 93 °C	

PRIMER 2.6: Viski hranijo v hrastovih sodih pri (maksimalni) temperaturi 20 °C. Delež etanola v njem je 50 % v/v. Izračunajte:

- ali delež hlapov etanola v zraku pri 20 °C lahko preseže spodnjo mejo vnetljivosti, ki za etanol znaša 3,3 % v/v,
- ali je spodnja meja vnetljivosti dosežena pri temperaturi 35 °C?

Podatki: parni tlak čistega etanola pri 20 °C je 5899 Pa in pri 35 °C 13 832 Pa. Pri obeh temperaturah vzamite za gostoto etanola vrednost 0,78 g/ml in za gostoto viskija 0,91 g/ml.

Rešitev: a) 1,32 % v/v; b) 3,10 % v/v

2.2.4. Viri vžiga

a) Plamen in vroče površine

Potencialni viri vžiga v procesih so plamenski gorilniki grelnih naprav in peči, procesne operacije, ki vključujejo gorenje (npr. sežiganje odpadkov), saje iz dimnikov, kajenje, varjenje, tleče snovi, procesne naprave, ki obratujejo pri visokih temperaturah in so zaradi tega vroče, majhni požari npr. na črpalkah itd.

b) Iskre

Kovinska orodja oz. deli procesnih naprav, ki se gibljejo ali vrtijo, lahko povzročijo iskre, kar je izredno nevarno v prostorih, kjer so prisotni vnetljivi plini.

c) Električni tok

V procesih so praktično vedno prisotne tudi električne naprave, ki lahko delujejo kot vir vžiga, če povzročijo iskre ali gretje določenih površin. Za uporabo električnih naprav v vnetljivi atmosferi so izdelani številni standardi in predpisi. Osnova za nadzor električnih naprav je razdelitev obrata na posamezna področja glede na stopnjo nevarnosti:

- Območje 0 Prostor, v katerem so vedno prisotne vnetljive ali eksplozivne snovi (plini, pare ali tekočine) v koncentracijah med spodnjo in zgornjo mejo vnetljivosti.
- Območje 1 Prostor, v katerem se uporabljajo ali skladiščijo vnetljive ali eksplozivne snovi in kjer med normalnim obratovanjem pogosto prihaja do vnetljivih oz. eksplozivnih koncentracij.
- Območje 2 Prostor, v katerem se uporabljajo ali skladiščijo vnetljive ali eksplozivne snovi pod takšnim nadzorom, da le v izjemnih okoliščinah prihaja do nevarnih koncentracij.

Osnovno pravilo pri nameščanju električnih naprav je, naj le-te ne bodo nameščene v nevarnih območjih, če to ni nujno potrebno. Naprave, ki se nahajajo v nevarnih območjih, morajo biti požarno oz. eksplozijsko varne. Posebna izvedba teh naprav se imenuje "S" izvedba. "S" predpisi določajo izvedbo električnih naprav, njihovo instalacijo, preizkušanje, montažo in izobraževanje tistih, ki z njimi ravnajo. Električne naprave so lahko zaščitene na naslednje načine: neprodorno ohišje, povečana varnost, polnjenje s plini, tekočinami ali trdnimi snovmi, majhna energija tokokroga...

d) Statična elektrika

O nastanku statične elektrike in njenemu preprečevanju je znanega že veliko, kljub temu pojav še ni popolnoma pojasnjen. Statična elektrika se pojavi pri stiku dveh teles, ki nista iz podobnih materialov, kar povzroči motnje električnega naboja na površini. Ko telesi ločimo, ostane na enem telesu pozitivni naboj in na drugem negativni. Če sta telesi dobra prevodnika, se preko zadnje stične točke vrneta v stanje brez naboja. Če sta obe telesi ali eno od njiju slaba prevodnika, je prenos naboja otežen in telesi po ločitvi obdržita naboj, ki povzroči rast potenciala teles, zaradi česar nastane iskra.

Pojav statične elektrike je povezan z nizkim tokom in visoko napetostjo, npr. izoliran rezervoar lahko ima potencial 10 000 V. Dejavnosti, kjer je nevaren pojav statične elektrike, so:

- Pretakanje tekočin. Nevarno je pretakanje po ceveh, vlivanje in pršenje. Naboj narašča z naraščanjem hitrosti tekočine in z naraščanjem premera cevi. Pri prelivanju tekočina ne sme brizgati ali pršiti, iztok cevi mora biti vedno pod gladino. Posebej nevarne tekočine so: CS₂, bencin, benzen in njegovi homologi, kerozin, klorirani ogljikovodiki in estri. Z vidika statične elektrike niso nevarni npr. voda, surova nafta in etanol.
- Prah. V večini primerov je prah, ki se pojavlja v procesni industriji, slabo prevoden, zato se ob premikanju naelektri zaradi udarcev in trenja. Nevarnost je tem večja, čim manjši so delci. Posebno nevarne so naslednje operacije: brušenje, mešanje, drobljenje, sejanje, mehanski transport.
- Lakiranje z brizganjem. V lakih so prisotna topila, ki z zrakom tvorijo eksplozivne zmesi.
- Kemično čiščenje. Posebej nevarno je čiščenje svilenih in sintetičnih tkanin.
- Navijanje papirja in folije. Naboj nastane tam, kjer se material dviguje od osnove, valjev, kolutov.
- Osebj. Osebj se lahko naelektri npr. pri gibanju, če oblačila in obutev niso dovolj prevodna.

Kjer je nevarnost statične elektrike velika, se ne smejo pojaviti vnetljive in eksplozivne zmesi. Naprave morajo biti ozemljene. Ozemljitev ne prepreči kopičenja naboja na tekočinah, zato le-tem dodajajo aditive, s katerimi povečajo prevodnost. Hitrost pretakanja tekočin ne sme biti prevelika (največ 7 m/s). Pri polnjenju rezervoarjev in cistern se izogibamo prostemu padu in brizganju tekočine. Osebj mora nositi antistatično in prevodno obleko (iz bombaža) in obutev. Tudi tla morajo biti iz prevodnega materiala. Velik vpliv na pojav statične elektrike ima vlažnost zraka. Relativna vlažnost višja od 65 % prepreči nevarnost statične elektrike.

2.2.5. Zaščita pred požarom

Zaščita pred požarom je pasivna in aktivna. S pasivno zaščito preprečujemo nastanek požara, k aktivni zaščiti pa prištevamo ukrepe ob nastanku požara. Ukrepe pasivne zaščite upoštevamo že pri načrtovanju obrata, kot npr. uporaba negorljivih materialov, preprečevanje izpusta snovi, odstranitev virov vžiga, namestitve varnostnih ventilov, ustrezna namestitve rezervoarjev itd. Dejavnosti aktivne zaščite so: alarmni sistemi, detektorji ognja, sredstva za gašenje požara itd.

Sredstva za gašenje požarov delujejo na naslednjih principih:

- a) hlajenje plamena
- b) zmanjšanje dotoka goriva (s hlajenjem ali razredčenjem)
- c) zmanjšanje vsebnosti kisika

Najpomembnejša sredstva za gašenje so:

1. voda je najpogostejše gasilno sredstvo, ker je poceni in skoraj povsod dostopna. Ima veliko sposobnost absorpcije toplote zaradi visoke izparilne entalpije in toplotne kapacitete. Primerna je za gašenje požarov trdnih snovi in tekočin z visokim plameniščem. Ni primerna za gašenje tekočin z nizkim plameniščem, utekočinjenih plinov in električnih naprav.
2. pene so izdelane na vodni osnovi in učinkujejo tako, da preprečujejo dostop kisika do goreče snovi, potem ko se iz pene izloči voda, pa tudi hladijo. Pene pridobivajo z reakcijo med vodnima raztopinama natrijevega hidrogen karbonata in aluminijevega sulfata ob prisotnosti stabilizatorjev pene. Druga vrsta pene je iz detergentov.
3. halon je snov, ki jo sestavljajo klorirani ogljikovodiki (npr. CCl_4 , CH_3Br , CH_2ClBr itd.) in se zaradi strupenih snovi uporablja samo v posebne (npr. vojaške) namene.
4. CO_2 spada med inertne pline, ki vplivajo na atmosfero tako, da zmanjšujejo vsebnost kisika v njej. Primeren je za gašenje požarov na električnih napravah.
5. prah se uporablja za gašenje posebnih požarov npr. komprimiranih plinov. Po sestavi gre za natrijev hidrogen karbonat, kalijev hidrogen karbonat, kalijev sulfat ipd.

2.3. Eksplozija

Eksplozije v procesni industriji niso tako pogoste kot požari, vendar ponavadi povzročijo večjo škodo. Nevarne so eksplozivne zmesi z zrakom, eksplozivne zmesi plinov (npr. klor in vodik), eksplozivi in nekatere občutljive snovi kot npr. kovinske soli.

Eksplozija je izjemno hitra in silovita sprostitvev energije. Pri tem ločimo tri vrste energije:

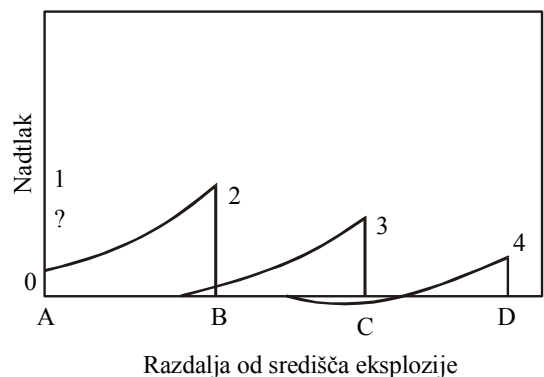
1. **fizikalna energija** (npr. tlačna energija plinov, toplotna energija pregretyh tekočin pri visokih tlakih),
2. **kemijska energija** izvira iz kemijske reakcije (npr. nenadzorovana eksotermna reakcija kot je razpad snovi ali polimerizacija),
3. **jedrska energija**.

Glede na hitrost širjenja razlikujemo dve vrsti eksplozij:

1. **deflagracija**, kjer vnetljiva zmes gori relativno počasi (do 400 m/s). Za zmesi ogljikovodikov in zraka je hitrost 1 m/s. Pogoji za deflagracijo je, da je sestava zmesi v območju vnetljivosti in da je prisoten vir vžiga ali pa je zmes segreta na temperaturo vnetišča.
2. **detonacija** je vrsta eksplozije, pri kateri nastane udarni val, ki se premika z veliko hitrostjo (1000 m/s do 8000 m/s), sledi mu toplotni val, kjer snov gori in oddaja toploto za vzdrževanje udarnega vala. Pogoji za nastanek detonacije so enaki kot pri deflagraciji, le da mora v tem primeru biti sestava v detonacijskem območju, ki je običajno ožje od območja vnetljivosti. Načeloma lahko vsaka vnetljiva plinska zmes eksplodira z detonacijo, če je prisoten dovolj močan vir vžiga. Za detonacijo je posebej nevaren etin (starejši izraz je acetilen).

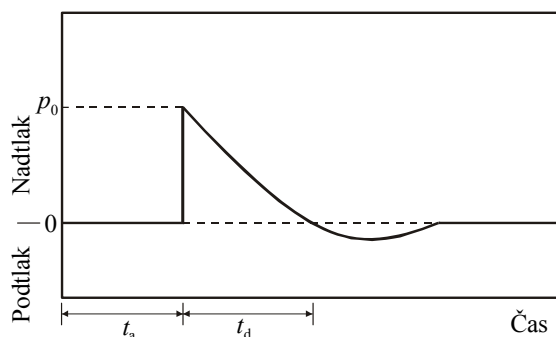
Detonacija povzroči večji dvig tlaka kot deflagracija in je tudi bolj uničujoča. Tako je npr. razmerje med končnim in začetnim tlakom pri deflagraciji zmesi ogljikovodikov in zraka 8 bar, pri detonaciji pa 20 bar. V cevovodih včasih deflagracija preraste v detonacijo: zmes se vname na enem koncu cevi, goreči plini se razpnejo in hitrost deflagracije je enaka vsoti hitrosti gorenja in razpenjanja. Če je ta hitrost dovolj majhna, se gorenje širi s konstantnim tlakom. Če pa je dovolj visoka, se pojavijo območja z velikimi nihanjem tlaka, ki povzročijo pospeševanje plamena. Zaradi velike hitrosti nastane udarni val in deflagracija preraste v detonacijo.

Slika 2.3 prikazuje, kako se spreminja tlak v udarnem valu z oddaljenostjo od središča eksplozije. Udarni val ima na svoji poti od središča eksplozije območja nadtlaka, ki v določenih točkah doseže maksimum ("pik"), npr. v točkah B, C in D. Območjem nadtlaka sledi območje podtlaka.



Slika 2.3. Potek udarnega vala

Slika 2.4 prikazuje spreminjanje tlaka s časom na fiksni oddaljenosti od središča eksplozije. p_0 je maksimalni tlak ("pik"). t_a je čas, v katerem udarni val doseže opazovano točko in t_d je čas trajanja udarnega vala v tej točki.



Slika 2.4. Spreminjanje tlaka v udarnem valu s časom za fiksno točko

2.3.1. Energija eksplozije

Pri eksplozijah v kemijskih procesih sta najpomembnejši kemijska energija in energija razpenjajočega fluida.

a) Kemijska energija

Sprostitev energije v kemijski eksploziji je odvisna od lastnosti in stanja reaktantov in produktov. Slednji največkrat niso dobro znani. Močno eksplozivne snovi vsebujejo dovolj kisika, da lahko eksplodirajo celo v odsotnosti zraka. V tem primeru vsebujejo produkti kisik, vodo in CO_2 . Če kisika ni dovolj, vsebujejo produkti CO in H_2 . Dejansko vsebujejo produkti zmesi naštetih plinov. Vnetljive organske snovi, ki eksplodirajo v prebitku kisika, dajejo CO_2 in H_2O .

Največja možna energija eksplozije je podana z Gibbsovo prosto energijo, ki jo izračunavamo z uporabo termodinamskih zvez (dejansko je sproščena energija nekoliko manjša, ker proces ni reverzibilen):

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.2)$$

ΔG je sprememba Gibbsove proste energije (J/mol),

ΔH je sprememba entalpije (J/mol),

ΔS je sprememba entropije (J/(mol·K)),

T je temperatura (K).

Energijo eksplozije izračunavamo pri standardnih pogojih, t.j. 25 °C in 1 bar. Spremembo entalpije izračunamo iz razlike standardnih tvornih entalpij produktov in reaktantov:

$$\Delta H = \sum_i \nu_i \cdot \Delta_f H_i^0 - \sum_j \nu_j \cdot \Delta_f H_j^0 \quad (2.3)$$

i indeks, ki se nanaša na produkte,

j indeks, ki se nanaša na reaktante,

ν stehiometrijski koeficient,

$\Delta_f H^0$ standardna tvorbena entalpija, ki jo dobimo v tabelah s termodinamskimi podatki komponent (J/mol). Tvorbena entalpija elementov je 0!

Spremembo entropije v enačbi (2.2) izračunamo z enačbo:

$$\Delta S = \sum_i \nu_i (S_i^0 - R \ln p_i) - \sum_j \nu_j S_j^0 \quad (2.4)$$

S^0 standardna entropija, ki jo dobimo iz tabel (J/(mol·K)),

R plinska konstanta (8,314 J/(mol·K)),

p parcialni tlak (bar).

Pri tekočinah in trdnih snoveh lahko v enačbi (2.4) zanemarimo člen $-R \ln p_i$. Parcialni tlaki plinskih komponent so sorazmerni njihovim množinskim deležem; ker računamo energijo eksplozije pri normalnem tlaku 1 bar, izračunamo parcialni tlak komponente i z uporabo stehiometrijskih koeficientov:

$$p_i = \frac{\nu_i}{\sum_i \nu_i} \cdot P^0 \quad (2.5)$$

kjer je P^0 zunanji tlak (1 bar), indeks i pa tukaj zajema samo plinaste produkte.

Za vnetljive pline in pare npr. ogljikovodikov lahko enačbo (2.2) za izračun Gibbsove proste energije poenostavimo v:

$$\Delta G \cong \Delta H \quad (2.6)$$

in ΔH izračunamo z enačbo (2.3).

b) Izračun ekvivalentne mase TNT

Model ekvivalentne mase TNT predpostavlja ekvivalentnost med vnetljivo snovjo in TNT. Z modelom preračunamo, kolikšni masi TNT ustreza energija eksplozije neke snovi, t.j. *ekvivalentna masa TNT*. Izračunamo jo tako, da sproščeno energijo pri eksploziji določene množine snovi delimo z eksperimentalno dobljeno vrednostjo za energijo eksplozije TNT, ki znaša $E_{\text{TNT}} = \mathbf{4688 \text{ J/g}}$.

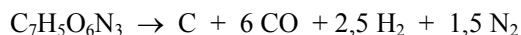
$$\Delta G' = \Delta G \cdot n \quad (2.7)$$

$$m_{\text{eq,TNT}} = \frac{|\Delta G'|}{E_{\text{TNT}}} \quad (2.8)$$

kjer je:

- n množina snovi, ki eksplodira (mol),
 $\Delta G'$ sprememba Gibbsove proste energije za določeno množino snovi (J),
 $m_{\text{eq,TNT}}$ ekvivalentna masa TNT (g),
 E_{TNT} energija eksplozije TNT (4688 J/g).

PRIMER 2.7: Izračunajmo energijo eksplozije trinitrotoluena (TNT) brez prisotnosti zraka v J/mol. Izrazite jo tudi v J/g TNT. Predpostavimo naslednjo reakcijo:



Podatki:	ΔH_f^0 (J/mol)	S^0 (J/(mol·K))
TNT	- 54 430	272,1
C	0	5,7
CO	-111 880	198,0
H ₂	0	130,7
N ₂	0	191,6

Rešitev: Spremembo entalpije izračunamo z enačbo (2.3):

$$\Delta H = [1 \cdot 0 + 6 \cdot (-111\,880) + 2,5 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0] - [1 \cdot (-54\,430)] = -616\,850 \text{ J/mol}$$

Spremembo entropije izračunamo z enačbo (2.4), pri čemer potrebujemo še vrednosti člena $-R \ln p_i$ za plinske produkte; parcialne tlake izračunamo z enačbo (2.5):

	p (bar)	$R \ln p$
CO	$6 / (6+2,5+1,5) = 0,6$	- 4,25
H ₂	$2,5/10 = 0,25$	-11,53
N ₂	$1,5/10 = 0,15$	-15,77

$$\begin{aligned} \Delta S &= [1 \cdot 5,7 + 6 \cdot (198 + 4,25) + 2,5 \cdot (130,7 + 11,53) + 1,5 \cdot (191,6 + 15,77)] - [1 \cdot 272,1] \\ &= 1614 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

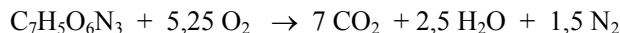
Zdaj lahko izračunamo spremembo Gibbsove proste energije z enačbo (2.2):

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S = -616\,850 \frac{\text{J}}{\text{mol}} - 298 \text{ K} \cdot 1614 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} = -1,1 \frac{\text{MJ}}{\text{mol}}$$

Preračunamo še na g TNT (molska masa TNT je 227 g/mol):

$$-1,1 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{mol}} \frac{\text{mol}}{227 \text{ g}} = -4845 \frac{\text{J}}{\text{g}} \text{ (eksperimentalna vrednost je } -4688 \text{ J/g)}$$

PRIMER 2.8: Izračunajte energijo eksplozije trinitrotoluena (TNT) v prebiku zraka v J/mol. Izrazite jo tudi v J/g. Predpostavite naslednjo reakcijo:



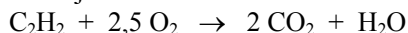
Podatki:	ΔH_f^0 (J/mol)	S^0 (J/(mol·K))
TNT	- 54 430	272,1
O ₂	0	205,2
CO ₂	-393 780	213,7
H ₂ O (g)	-241 990	188,8
N ₂	0	191,6

Rešitev: $\Delta G = -3,6 \text{ MJ/mol}$ oz. $-15 865 \text{ J/g}$

PRIMER 2.9: Izračunajmo energijo eksplozije za etin v prebitku kisika. Kolikšni masi TNT ustreza energija eksplozije 1 m³ etina, če je njegova gostota 0,0011 g/ml?

Podatki:	ΔH_f^0 (J/mol)
C ₂ H ₂	226 910
O ₂	0
CO ₂	-393 780
H ₂ O (g)	-241 990
N ₂	0

Rešitev: Ker poteka reakcija v prebitnem kisiku, predpostavimo popolno izogorevanje z naslednjo reakcijo:



$$\Delta G \cong \Delta H = [2 \cdot (-393 780) + 1 \cdot (-241 990)] - [1 \cdot 226 910 + 2,5 \cdot 0] = \underline{\underline{-1,256 \text{ MJ/mol}}}$$

$$m = \rho V = 0,0011 \frac{\text{g}}{\text{ml}} \cdot 10^6 \text{ ml} = 1100 \text{ g}$$

$$n = \frac{m}{M} = \frac{1100 \text{ g}}{26 \text{ g/mol}} = 42,3 \text{ mol}$$

$$\Delta G' = -1,256 \frac{\text{MJ}}{\text{mol}} \cdot 42,3 \text{ mol} = -53,138 \text{ MJ}$$

$$m_{\text{eq,TNT}} = \frac{|-53,138 \cdot 10^6 \text{ J}| \cdot g_{\text{(TNT)}}}{4688 \text{ J}} = \underline{\underline{11,3 \text{ kg}}}$$

PRIMER 2.10: Izračunajte energijo, ki se sprosti pri eksploziji 30 t cikloheksana. Koliko t TNT ustreza ta energija? Reakcija je $\text{C}_6\text{H}_{12} + 0,75 \text{ O}_2 \rightarrow 4,5 \text{ C} + 1,5 \text{ CO} + 6 \text{ H}_2$. Standardna tvorna entalpija za cikloheksan je -155,15 kJ/mol, standardna entropija pa 298,3 J/(mol·K). Podatki za preostale komponente so enaki kot v primerih 2.6. in 2.7.

Rešitev: $\Delta G = -77,5 \text{ GJ}$, $m_{\text{eq,TNT}} = 16,5 \text{ t}$.

c) Energija razpenjajočega fluida

Eksplozijo lahko povzroči tudi plin ali tekočina pod visokim tlakom. Energijo eksplozije izračunamo ob predpostavki idealnega plina in izotermnega širjenja kot delo, ki ga opravi plin, ko se širi:

$$W_e = \int_1^2 P dV = n R T \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) \quad (2.9)$$

W_e energija eksplozije oz. delo, ki ga opravi plin pri širjenju (J),
 n množina (mol),
 p tlak (Pa ali bar, ker je v enačbi razmerje tlakov),
 T temperatura (K).

Podpis 1 se nanaša na začetno stanje in podpis 2 na končno stanje.

PRIMER 2.11: Izračunajmo energijo za eksplozijo 1 kmol zraka pri temperaturi 20 °C in tlaku 100 bar. Koliko kg TNT ustreza energija te eksplozije?

Rešitev: Energijo eksplozije izračunamo z enačbo (2.9), v kateri vzamemo, da je končni tlak enak 1 bar:

$$W_e = 1000 \text{ mol} \cdot 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}} \cdot 293 \text{ K} \cdot \ln \frac{100}{1} = \underline{\underline{11,2 \text{ MJ}}}$$

Ta energija ustreza naslednji masi TNT:

$$m_{\text{eq,TNT}} = 11,2 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \frac{\text{g}_{(\text{TNT})}}{4688 \text{ J}} = \underline{\underline{2,4 \text{ kg}}}$$

2.3.2. Ocenjevanje eksplozijske nevarnosti

Nevarnost za eksplozivni razpad neke snovi ocenjujemo z naslednjimi kriteriji:

- eksplozijsko območje** – večje kot je območje med spodnjo in zgornjo eksplozijsko mejo, večja je nevarnost eksplozije.
- reaktivne skupine** v molekuli:
 - $-\text{NO}_2$, $-\text{ONO}_2$ npr. HNO_3 ali $-\text{C}-\text{NO}_2$
 - $-\text{N}=\text{N}-$, $-\text{N} \equiv \text{N}-$
 - NX_n npr. NCl_3 ali RNCl_2
 - $-\text{C}=\text{N}-$
 - $-\text{OCIO}_2$ in $-\text{OCIO}_4$
 - $-\text{O}-\text{O}-$ in $-\text{O}-\text{O}-\text{O}-$
 - $-\text{C} \equiv \text{C}-$ npr. etin

Znane so skupine, ki povzročajo eksplozivnost npr. nitratni estri, aromatske nitro skupine, alifatske nitro skupine, azo, azidi, nitrozo, peroksidi, ozonidi, klorati... in skupine, ki lahko prispevajo k eksplozivnosti npr. hidroksilna, karbonilna, eter, amino, sulfonska...

- c) **reakcijska entalpija** – entalpijo reakcije izračunamo z enačbo (2.3) kot razliko med vsoto standardnih tvornih entalpij produktov in reaktantov. Na osnovi reakcijske entalpije izračunamo adiabatni porast temperature:

$$\Delta T_{\text{ad}} = \frac{\Delta H}{m c_p} \quad (2.10)$$

ΔT_{ad} sprememba temperature (K),
 ΔH reakcijska toplota (J),
 m masa reaktantov (g),
 c_p specifična toplotna kapaciteta reakcijske zmesi (J/(g·K)).

Končno temperaturo reakcije potem izračunamo z enačbo:

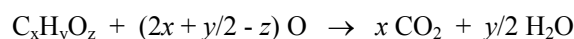
$$T_2 = T_1 + \Delta T_{\text{ad}} \quad (2.11)$$

v kateri se indeks 1 nanaša na normalno procesno temperaturo, indeks 2 pa na maksimalno končno temperaturo.

Če je končna temperatura (T_2) nižja od temperature, kjer snov prične toplotno razpadati in nižja od temperature vrelišča zmesi, potem reakcija ni nevarna.

- d) **masna bilanca kisika** za organsko snov je merilo za težnjo snovi k razpadu, deflagraciji ali detonaciji z uporabo kisika, ki je vezan v molekuli. Ta izračun uporabljamo za snovi, ki vsebujejo oksidirajoče skupine, npr. nitro, nitratno, kloratno ali peroksidno. Zaradi enostavnosti ne upoštevamo atomov, kot sta npr. dušik in klor.

Za molekulo $C_xH_yO_z$, ki reagira s kisikom po reakciji



izračunamo delež kisika z enačbo:

$$w(O) = -1600 \cdot \frac{2x + \frac{y}{2} - z}{M} \quad (2.12)$$

M molska masa (g/mol).

Večina eksplozivnih snovi, ki eksplodirajo z detonacijo, ima vrednost $w(O)$ med (-100 in +40). Vsaka snov, ki ima ta parameter večji od -200, je potencialno nevarna za eksplozijo, kar preverimo eksperimentalno.

- e) **eksperimentalno testiranje eksplozivnosti** - za snov, ki ima masno bilanco kisika večjo od -200 ali vsebuje v molekuli nestabilne skupine, moramo eksplozivnost preveriti eksperimentalno. Enostaven test naredimo tako, da damo nekaj mg snovi na segreto ploščo. Če snov burno razpade ali zagori, je to znak, da je verjetno eksplozivna. Za zahtevnejše eksperimente uporabimo posebne naprave.

PRIMER 2.12: Izračunajmo največji porast temperature pri reakciji 32 g metanola in 51 g acetanhidrida. Pri tem predpostavimo, da komponente ne spremenijo agregatnega stanja. Standardne tvorne entalpije v kJ/mol so: za metanol -239,1, za acetanhidrid -624,4, za metilacetat -445,8 in za vodo -285,8. Specifična toplotna kapaciteta reakcijske zmesi je 4 J/(g·K).

Rešitev: reakcija je $2 \text{CH}_3\text{OH} + (\text{CH}_3\text{CO})_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CH}_3\text{COOCH}_3 + \text{H}_2\text{O}$

$$\Delta H = [2 \cdot (-445,8) + (-285,8)] - [2 \cdot (-239,1) + (-624,4)] = -74,8 \text{ kJ / mol acetanhidrida}$$

Množina acetanhidrida je 51 g / (102 g/mol) = 0,5 mol, zato je dejanska toplota, ki se sprosti pri reakciji - 74,8 kJ/mol · 0,5 mol = - 37,4 kJ.

Porast temperature izračunamo z enačbo (2.10):

$$\Delta T = \frac{\Delta H}{m c_p} = \frac{37400 \text{ J}}{(32 + 51) \text{ g} \cdot 4 \text{ J / (g} \cdot \text{K)}} = \underline{\underline{112,6 \text{ K}}}$$

PRIMER 2.13: Izračunajmo masno bilanco kisika za dinitroanilin, $\text{C}_6\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_4$ in ocenimo njegovo eksplozivnost.

Rešitev: Uporabimo enačbo (2.12) za $x = 6$, $y = 5$ in $z = 4$

$$w(\text{O}) = -1600 \frac{2 \cdot 6 + 5/2 - 4}{183} = \underline{\underline{-91,8}}$$

Glede na zgornjo vrednost ocenjujemo, da je snov potencialno eksplozivna in priporočamo eksperimentalno testiranje.

PRIMER 2.14: Izračunajte masno bilanco kisika za trinitroglicerol, ki je ester glicerola in dušikove (V) kisline.

Rešitev: $w(\text{O}) = 3,5$

2.3.3. Vrste eksplozij v procesni industriji

V procesih so najpogostejše naslednje vrste eksplozij: eksplozije v kemijskih reaktorjih, eksplozije visokotlačnih plinov ali vnetljivih snovi v zaprtih sistemih, eksplozija parnega oblaka, eksplozija razpenjajoče vrele tekočine in prašna eksplozija. Zadnje tri vrste eksplozij bomo opisali nekoliko podrobneje.

a) Eksplozija parnega oblaka (VCE - angl. Vapour Cloud Explosion)

Do eksplozije plinskega oblaka pride zaradi izpusta eksplozivne snovi v atmosfero na odprtem prostoru (UVCE - Unconfined Vapour Cloud Explosion) ali v omejenem prostoru (CVCE - Confined Vapour Cloud Explosion). Do izpusta pride najpogosteje na procesnih enotah in rezervoarjih - vzroki so okvare reakcijskih posod, ventilov, cevi ipd. Izpušeni plin tvori oblak, ki se lahko ob ugodnih vremenskih pogojih razprši, ali v nasprotnem primeru eksplodira, če se pojavi primeren vir vžiga. Eksplozija oblaka pare predstavlja eno izmed največjih nevarnosti v procesih, ker je zelo uničujoča in ker lahko pride do nje razmeroma daleč od vira izpusta plina ali pare, kar pomeni nevarnost za širšo okolico obrata.

b) Eksplozija razpenjajoče vrele tekočine (BLEVE - angl. Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion)

Do te vrste eksplozije pride zaradi nenadnega izpusta velike količine tekočine pri visokem tlaku in pri temperaturi, ki je višja od temperature vrelišča pri atmosferskem tlaku. Običajno je vzrok segrevanje posode z nekim zunanjim virom (npr. požarom), ki povzroči oslabitev sten posode in le-ta zato nenadoma popusti. Običajno je obdobje med prvo izpostavljenostjo ognju in poškodbo posode dolgo 0,5 do 1 ure.

c) Prašna eksplozija

Fino porazdeljena, gorljiva trdna snov pomešana z zrakom lahko eksplodira (npr. hude eksplozije v žitnih silosih). Prašna eksplozija ima dve stopnji: v prvi eksploziji pride do dvigovanja nakopičenega prahu, nato pa sledi sekundarna eksplozija prahu, ki se je dvignil v ozračje. Nevarne so predvsem naslednje procesne enote: sušilniki, elevatorji, cikloni, hranilniki polimerov in drugih gorljivih snovi...

Značilni obrati s prašnimi snovmi so lesni obrati, rudniki in obrati za obdelavo premoga, prehrabeni obrati (npr. škrob, moka, sladkor, kakav), kemijski obrati (zdravila, barvila), obrati za izdelavo in predelavo plastičnih materialov (sečninsko formaldehidne smole, polieten, polistiren), obrati kovinske industrije (aluminij, magnezij).

2.3.4. Preprečevanje eksplozije

Ukrepi za preprečevanje eksplozije so:

- a) izogibamo se vnetljivim zmesem, če je le mogoče,
- b) odstranimo vire vžiga,
- c) nadzorujemo sestavo zraka. To dosežemo z uporabo inertnega plina, ki vzdržuje sestavo atmosfere izven območja vnetljivosti. Nadzor sestave zraka je zanesljivejši ukrep kot popolna odstranitev virov vžiga, ki jo je izredno težko doseči.
- d) deli procesa, kjer je nevarnost eksplozije, naj bodo ustrezno oddaljeni od drugih delov, da preprečimo širjenje eksplozije.
- e) v cevovodih uporabimo prestreznike plamena, ki preprečujejo prehod plamena vzdolž cevi.
- f) širjenje eksplozije iz enega dela obrata v drugega lahko preprečimo z avtomatskim mehanizmom za izolacijo eksplozije, ki pa mora delovati izredno hitro.
- g) širjenje eksplozije lahko zaznamo in preprečimo z avtomatskim dušilnim sistemom, ki uporablja gasilne snovi npr. halogenirane ogljikovodike in vodo.
- h) procesne enote (npr. reaktorje, rezervoarje in druge posode) ter zgradbe opremimo z varnostnimi napravami (loputami, diski, ventili), ki ob določenem porastu tlaka izpustijo plin na prosto in s tem razbremenijo procesne enote.

Za preprečevanje prašne eksplozije priporočajo še nekaj posebnih ukrepov:

- a) vlaženje procesa, s čemer preprečimo nastanek prašne suspenzije.
- b) izogibamo se posodam z velikimi prostorninami. Bolje je uporabiti več posod z manjšo prostornino kot eno veliko. Predimenzioniranje procesnih enot z vidika nevarnosti prašne eksplozije ni zaželeno.
- c) izogibamo se prostemu padu prahu. Prah odstranimo, takoj ko se pojavi v procesu. Zbiranje prahu v centralni čistilni napravi ni priporočljivo.
- d) v objektih, kjer se nabira prah, mora biti poskrbljeno za njegovo odstranjevanje oz. čiščenje.

2.4. Nevarnost zaradi kemijske reakcije

Veliko večino kemijskih reakcij spremlja sproščanje toplote, kar pomeni, da je sprememba entalpije med reaktanti in produkti negativna (eksotermna). Proizvedena toplota ogreje reakcijsko zmes, reaktor in okolico. Nevarnost kemijske reakcije izvira iz nenadzorovane eksotermne aktivnosti, do katere lahko pride pri hranjenju reaktivnih snovi, med samo kemijsko reakcijo ali pri čiščenju reakcijskih produktov. Reakcijska nevarnost je povezana s »pobegom« toplote (thermal runaway), do katerega pride, ko toplota proizvedena z reakcijo, preseže odvedeno toploto. Presežna toplota poviša temperaturo reakcijske zmesi, to pospeši reakcijo, kar še poveča proizvodnjo toplote.

Reakcije z velikim porastom temperature so zelo nevarne, ker zaradi visokih temperatur reakcijska zmes upari, sprožijo se nadaljne in stranske reakcije, pri čemer se tvorijo plinasti produkti. Reakcija preraste v termično eksplozijo.

Na nastanek termične eksplozije vpliva hitrost proizvodnje toplote zaradi kemijske reakcije in hitrost odvajanja toplote. Za eksotermne reakcije velja Arrheniusov zakon, po katerem hitrost reakcije in s tem tudi hitrost proizvodnje toplote narašča **eksponentialno** s temperaturo:

$$\Phi_r = Z \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)} \quad (2.13)$$

Φ_r hitrost proizvodnje toplote (J/s = W),
 Z Arrheniusov faktor,
 E_a aktivacijska energija (J/mol),
 R plinska konstanta (J/(mol·K)),
 T temperatura (K).

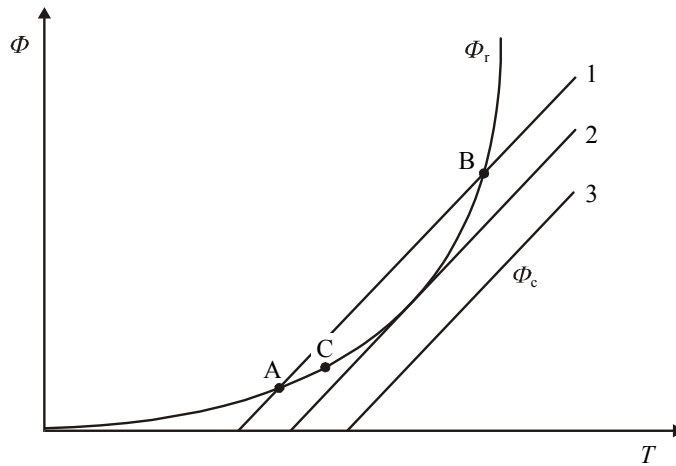
Hitrost hlajenja je **linearno** odvisna od temperature:

$$\Phi_c = U A (T - T_a) \quad (2.14)$$

Φ_c hitrost odvajanja toplote (J/s = W)
 U koeficient toplotne prehodnosti (W/(m²·K))
 A ploščina, skozi katero poteka prenos toplote (m²)
 T temperatura sistema (K)
 T_a temperatura okolice (K)

Enačbi sta prikazani na sliki 2.5 za tri različne temperature okolja:

1. primer (nizka T_a) premica za hitrost odvajanja toplote seka eksponentno krivuljo hitrosti proizvodnje toplote v dveh točkah A in B, v katerih sta obe hitrosti izenačeni. Točka A predstavlja stabilno stanje, kar lahko razložimo, če se premaknemo iz točke A v C. V točki C je hitrost odvajanja toplote še vedno večja od hitrosti proizvodnje toplote, zato se temperatura vrne v stanje A. Točka B je nestabilna, ker vsako majhno naraščanje temperature povzroči povečanje hitrosti proizvodnje toplote, ki tako preseže hitrost hlajenja in reakcija uide nadzoru.
2. primer (srednja T_a) predstavlja mejni primer, kjer se premica in krivulja sekata v eni sami točki, v kateri je hitrost proizvodnje toplote enaka hitrosti odvajanja toplote.
3. primer (visoka T_a) predstavlja situacijo, pri kateri je hitrost odvajanja toplote manjša od hitrosti proizvodnje, zato bo vedno prišlo do termične eksplozije.



1) nizka T_a ; 2) srednja T_a ; 3) visoka T_a

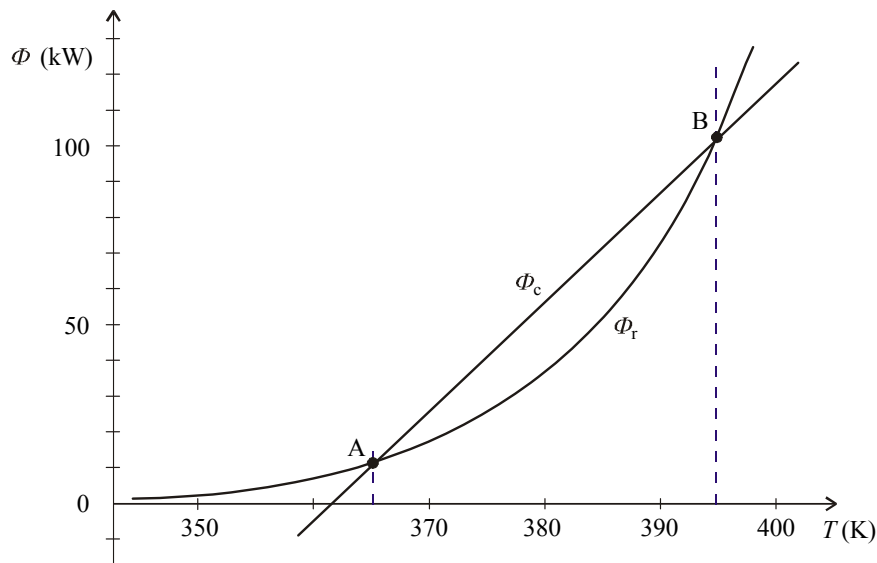
Slika 2.5. Toplotna bilanca eksotermne reakcije

PRIMER 2.15: Hitrost hlajenja je dana z enačbo: $\Phi_c = 3,125 \cdot T - 1130$ (T v K, Φ_c v kJ/s), hitrost proizvodnje toplote pa z enačbo: $\Phi_r = 1,3 \cdot 10^{14} \cdot \exp(-11\,000/T)$ (T v K, Φ_r v kJ/s). Določimo presečišči krivulje Φ_r in premice Φ_c ter označimo točko stabilnega in nestabilnega obratovanja.

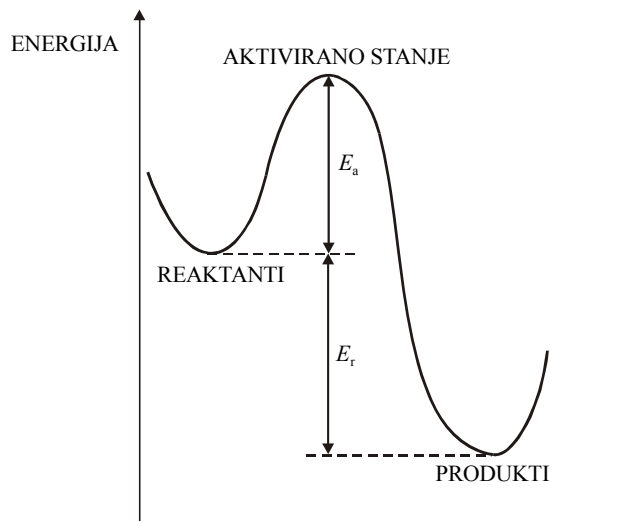
Rešitev: Izračunajmo vrednosti za Φ_c in Φ_r pri nekaterih izbranih temperaturah:

T (K)	Φ_c (kJ/s)	Φ_r (kJ/s)
350	-36,2	2,9
360	-5,0	7,0
370	26,3	15,9
380	57,5	34,8
390	88,8	73,2
400	120,0	148,2

Izračunane vrednosti vrišemo v koordinatni sistem. Točka stabilnega stanja (A) je pri 365 K (92 °C) in nestabilna točka (B) je pri 395 K (122 °C).



Kinetiko kemijske reakcije prikažemo z energijskim diagramom (slika 2.6). Reaktanti absorbirajo aktivacijsko energijo, E_a , in preidejo v metastabilno stanje, nato pa tvorijo stabilne produkte in pri tem oddajo aktivacijsko in reakcijsko energijo, E_r .



Slika 2.6. Energijski diagram kemijske reakcije

S povezavo kinetičnih in termodinamskih meritev so razvili empirično zvezo za določanje nevarnosti kemijske reakcije, ki se imenuje indeks reakcijske nevarnosti oz. indeks RHI (Reaction Hazard Index):

$$I_{\text{RHI}} = \frac{10 \cdot T_d}{T_d + 7,17 \cdot E_a} \quad (2.15)$$

I_{RHI} indeks reakcijske nevarnosti,
 T_{d} je adiabatna temperatura dekompozicije (K),
 E_{a} aktivacijska energija (kJ/mol).

Adiabatno temperaturo dekompozicije, T_{d} , izračunamo enako kot maksimalno končno temperaturo T_2 , z uporabo enačb (2.10) in (2.11).

Indeks RHI ima ponavadi vrednosti med 0 (minimalna nevarnost) in 10 (maksimalna nevarnost).

PRIMER 2.16: Eksperimentalno smo določili, da se pri razpadu 10 g neke snovi sprosti 1115 J toplote. Reakcijska zmes ima specifično toplotno kapaciteto 3,5 J/(g·K) in aktivacijsko energijo 42 kJ/mol. Reakcijo pričnemo pri temperaturi 25 °C. Izračunajte indeks reakcijske nevarnosti za razpad izbrane snovi.

Rešitev: adiabatno temperaturo dekompozicije izračunamo z enačbama (2.10) in (2.11):

$$\Delta T_{\text{ad}} = \frac{\Delta H}{mc_p} = \frac{1115 \text{ J}}{10 \text{ g} \cdot 3,5 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}} = 32 \text{ K}$$

$$T_{\text{d}} = T_1 + \Delta T_{\text{ad}} = 298 \text{ K} + 32 \text{ K} = 330 \text{ K}$$

$$I_{\text{RHI}} = \frac{10 \cdot 330}{330 + 7,17 \cdot 42} = \underline{\underline{5,22}}$$

PRIMER 2.17: Določite indeks RHI za snov A, ki razpada po naslednji reakciji:

	A	→	2 B	+	C
ΔH_{f}^0 (kJ/mol)	-152		-74		-82
M (g/mol)	92		38		16

Ostali podatki: aktivacijska energija je 205 kJ/mol, $c_p = 2,2 \text{ J/(g} \cdot \text{K)}$, začetna temperatura je 20 °C.

Rešitev: $I_{\text{RHI}} = 3,16$

Pri študiju nevarnosti, ki izhajajo iz določene kemijske reakcije, je potrebno poznati termično stabilnost posameznih komponent in lastnosti reakcij, ki jih želimo vključiti v proces. Termično stabilnost snovi preverjamo v Dewarjevi posodi z zaporedjem eksperimentov, v katerih snov segrejemo na različne temperature v korakih po 10 °C. Pri vsakem eksperimentu počakamo, da se temperatura ustali. Če prične temperatura vzorca naraščati, se je pričel eksotermni razpad. Podatke, ki so potrebni za študij reakcij pri normalnih in pri izrednih pogojih, dobimo eksperimentalno z različnimi kalorimetričnimi metodami npr. diferencialna termična analiza (DTA), Dewarjeva kalorimetrija, naprava RSST (reactive systems screening tool) ipd. Pri DTA metodi segrevamo majhno količino vzorca in inertne referenčne snovi s konstantno hitrostjo. Senzor spremlja naraščanje temperature in zabeleži morebitno absorbirano ali sproščeno toploto.

2.5. Indeksi nevarnosti

Obstaja več vrst indeksov za ocenjevanje nevarnosti zaradi strupenih snovi, požara, eksplozije in kemijske reakcije. Med njimi se je najbolj uveljavil indeks požarne in eksplozijske nevarnosti, ki ga je razvilo podjetje DOW ali kratko **Dow indeks** (i_{DOW}).

i_{DOW} določamo ločeno za posamezne enote procesa. Enota je definirana kot del obrata, ki ga lahko lokalno smatramo za celoto. V nekaterih primerih je lahko enota del obrata, ki je od preostalega obrata ločen prostorsko ali s požarnim zidom. i_{DOW} je merilo za nevarnost požara in/ali eksplozije za določeno enoto. Za izračun indeksa uporabimo naslednje faktorje:

1. snovni faktor (F_1),
2. faktor za splošne nevarnosti (F_2) in
3. faktor za posebne nevarnosti (F_3).

Ko določimo vrednosti vseh treh omenjenih faktorjev, izračunamo i_{DOW} z naslednjo enačbo:

$$i_{DOW} = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 \quad (2.16)$$

2.5.1. Snovni faktor (F_1)

Snovni faktor je merilo za energijski potencial najbolj nevarne snovi ali zmesi v procesu, ki je prisotna v takšni množini, da predstavlja nevarnost. Vrednost snovnega faktorja je med 1 in 40 in se določa na osnovi dveh lastnosti komponente: vnetljivosti in reaktivnosti. Metoda razvršča snovi glede na vnetljivost v pet skupin z določenim koeficientom N_f in glede na reaktivnost v pet skupin z določenim koeficientom N_r . Osnova za razvrstitev glede na vnetljivost je temperatura plamenišča in osnova za razvrstitev glede na reaktivnost je adiabatna temperatura razpada, T_d :

Tabela 2.2. Določitev koeficientov vnetljivosti in reaktivnosti

Plamenišče (°C)	N_f	T_d (K)	N_r
Nevnetljivo	0	< 830	0
> 93 °C	1	830 do 935	1
38 do 93 °C	2	935 do 1010	2
-18 do 38 °C	3	1010 do 1080	3
< -18 °C	4	> 1080	4

Ko za komponento določimo N_f in N_r , odčitamo snovni faktor iz naslednje tabele:

Tabela 2.3. Določitev snovnega faktorja

N_r	Snovni faktor F_1				
	0	1	2	3	4
N_f					
0	0	14	24	29	40
1	4	14	24	29	40
2	10	14	24	29	40
3	16	16	24	29	40
4	21	21	24	29	40

Za nekatere snovi so vrednosti snovnega faktorja tabelirane:

Tabela 2.4. Indeks DOW – vrednost snovnega faktorja za nekatere spojine

	F_1		F_1		F_1
Aceton	16	Cikloheksan	16	Propan	21
Acetilen	29	Etan	21	Propen	21
Amoniak	4	Eten	24	Stiren	24
Benzen	16	Etilen diklorid	16	Toluen	16
Butan	21	Etilen oksid	29	Vinilklorid	21
CS ₂	16	Vodik	21		
CO	21	Metan	21		

2.5.2. Faktor za splošne nevarnosti (F_2)

Metoda priporoča vrednosti faktorjev za posamezne splošne nevarnosti, vendar pa je končna izbira prepuščena oceni inženirja, ki najbolj pozna proces. Skupni faktor splošnih nevarnosti, F_2 , dobimo tako, da seštejemo vse izbrane postavke iz naslednje tabele in prištejemo 1:

Tabela 2.5. Ocene za splošne nevarnosti

A	Eksotermne reakcije	
1	hidrogeniranje, hidroliza, aromatizacija, izomerizacija, sulfoniranje, nevtralizacija	0,30
2	alkiliranje, aminiranje, kondenzacija, oksidacija*, polimerizacija	0,50
3	halogeniranje	0,75
4	nitiranje	1,25
B	Endotermne reakcije	
	kalciniranje, elektroliza, piroliza, cracking	0,20
C	Ravnanje s snovmi in transport	
1	nakladanje in iztovarjanje vnetljivih snovi I. skupine (plamenišče < 38 °C)	0,50
2	uporaba centrifug, odprtih mešalnikov, več reakcij v isti enoti	0,50
3	prisotnost vnetljivega prahu (brušenje, mešanje, filtriranje, sušenje)	0,50
4	skladiščenje v zaprtem prostoru	
	vnetljive tekočine II. skupine	0,25
	vnetljive trdne snovi	0,75
	vnetljive tekočine I. skupine	1,00
D	Procesne enote v zaprtih prostorih	
	predelava vnetljivih tekočin ali plinov ali zbiralniki prahu v zgradbah	0,30
E	Neurejen ali slabo urejen dostop do naprav za gašenje in druge nujne ukrepe	0,35
F	Slabo načrtovana drenaža	0,50

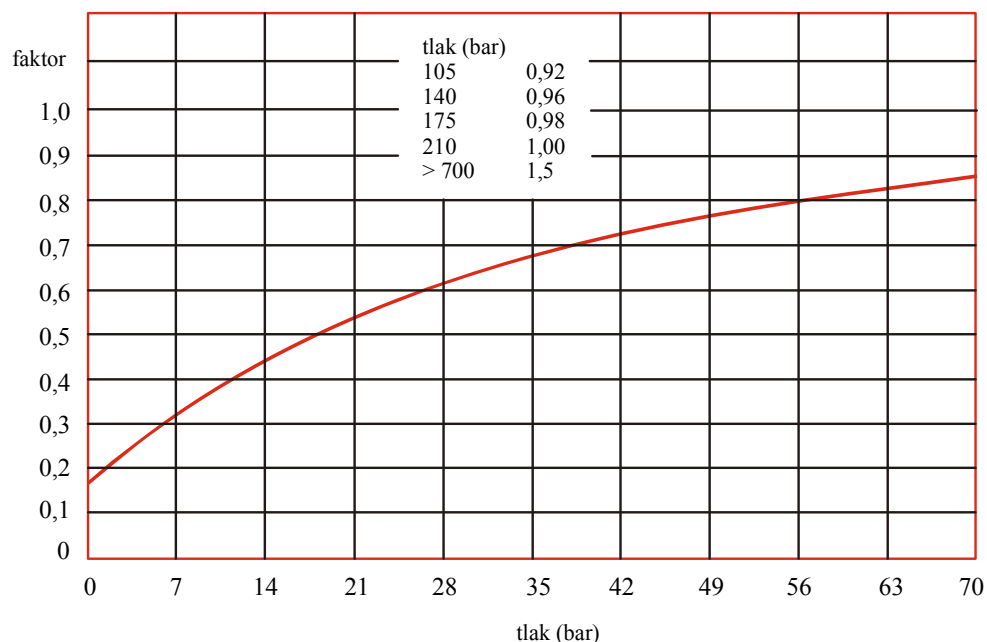
* Za oksidacije, v katerih nastopajo močni oksidanti (klorati, perklorati, permanganati, dušikova kislina, anorganski peroksidi ipd.), vzamemo vrednost 1,00.

2.5.3. Faktor za posebne nevarnosti (F_3)

Skupni faktor posebnih nevarnosti, F_3 , dobimo tako, da seštejemo vse izbrane postavke iz naslednje tabele in prištejemo 1:

Tabela 2.6. Ocene za posebne nevarnosti

A	Temperatura procesa	
	1 višja od temperature plamenišča snovi	0,25
	2 višja od temperature vrelišča	0,60
	3 prisotnost snovi z nizko temperaturo vnetišča (npr. heksan, CS ₂)	0,75
B	Podtlak ($P < 0,66$ bar)	0,75
C	Obratovanje v območju vnetljivosti	
	1 hranjenje vnetljivih tekočin I. skupine v rezervoarjih na prostem	0,50
	2 procesi, ki obratujejo blizu območja vnetljivosti ali uporabljajo inertni plin za preprečevanje vnetljivih sestav (npr. oksidacija toluena do benzojske kisline, oksidacija v procesu etilenoksida)	0,75
	3 procesi, ki obratujejo v območju vnetljivosti	1,00
D	Nevarnost prašne eksplozije	
	Faktor je odvisen od velikosti delcev in ima vrednosti od 0,25 za delce nad 175 μ m in 2,0 za delce pod 75 μ m.	0,25 - 2,0
E	Obratovalni tlak (faktor odčitamo na sliki 2.7)	
F	Nizka temperatura	
	S tem upoštevamo dejstvo, da postane ogljikovo jeklo pri nizkih temperaturah krhko.	
	1 -29 °C do 10 °C	0,3
	2 < -29 °C	0,5
G	Množina vnetljivih snovi	
	Nevarnost je tem večja, čim večja je množina nevarnih snovi v procesu. Faktor določamo z uporabo grafov iz originalnih navodil firme DOW in to posebej za vnetljive tekočine in pline v procesu, v hranilnikih in za vnetljive trdne snovi. Tukaj bomo podali nekaj vrednosti za vnetljive tekočine in pline.	
	1 9 m ³ do 27 m ³	0,5
	2 27 m ³ do 90 m ³	0,65
	3 90 m ³ do 230 m ³	0,9
	4 > 230 m ³	1,2
H	Korozija (glede na hitrost koroziije je faktor med 0,1 in 0,5)	0,1 - 0,5
I	Tesnenje (Varjeni spoji niso problematični, faktor je 0. Za črpalke, ki malo puščajo, je faktor 0,1, za problematične črpalke 0,2 in za fluide, ki penetrirajo, 0,4.)	0,1 - 0,4
J	Uporaba odprtega plamena	
K	Gretje z vročim oljem	0,15 do 1,5
L	Rotirajoče procesne enote (kompresorji, centrifuge, mešalniki)	0,5



Slika 2.7. Faktor za tlak v odvisnosti od obratovalnega tlaka

Ko poznamo vse tri faktorje (F_1 , F_2 in F_3), izračunamo indeks nevarnosti z enačbo (2.16). Glede na dobljeno vrednost ocenimo požarno in eksplozijsko nevarnost po smernicah v tabeli 2.7. Obrazec za lažje izračunavanje DOW indeksa je v prilogi 1.

Tabela 2.7. Ocena nevarnosti glede na vrednost indeksa DOW

Nevarnost	i_{DOW}
zelo majhna	0 - 20
majhna	20 - 40
srednja	40 - 60
srednja do velika	60 - 75
velika	75 - 90
izjemno velika	> 90

PRIMER 2.18: Določimo snovni faktor F_1 za propilen oksid, ki ima temperaturo plamenišča nižjo od -29 °C in temperaturo dekompozicije 675 °C .

Rešitev: Glede na temperaturo plamenišča je koeficient $N_f = 4$ in glede na temperaturo dekompozicije je $N_r = 2$ (tabela 2.2). Iz tabele 2.3 odčitamo vrednost $F_1 = 24$.

PRIMER 2.19: Izračunajmo indeks DOW za proces pridobivanja dušikove kisline.

Rešitev: Proces je prikazan na sliki 2.8. Indeks DOW bomo izračunali za celoten proces, pri čemer bomo izključili hranilnike reaktantov in produktov.

V reaktorju poteka oksidacija amoniaka v dušikov oksid pri tlaku 8 bar. Na vtoku v reaktor je temperatura 204 °C, izhodni produkti imajo temperaturo 907 °C.

1. snovni faktor

Za najnevarnejšo komponento vzamemo amoniak, ki ima snovni faktor 4.

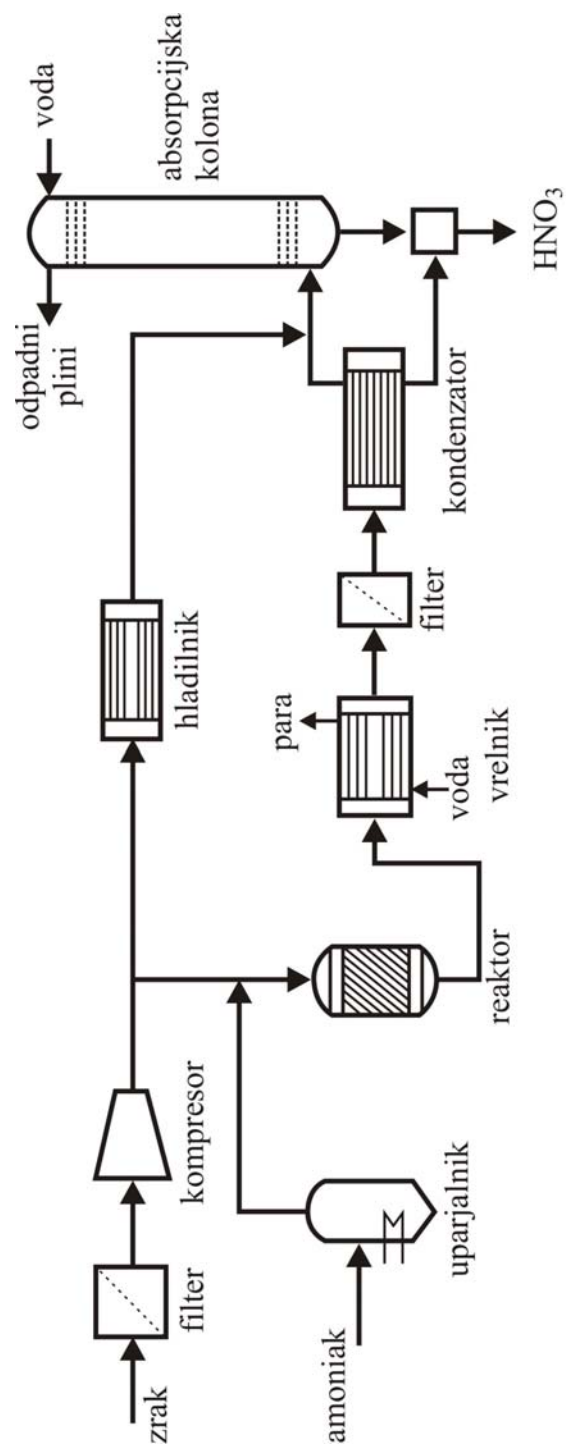
2. splošne nevarnosti

- A. Reakcija je eksotermna oksidacija \Rightarrow 0,50.
- B. Ne uporabimo.
- C. Ne uporabimo.
- D. Ne uporabimo.
- E. Načrtujemo urejen dostop do naprav za gašenje \Rightarrow 0.
- F. Načrtujemo primerno in učinkovito drenažo \Rightarrow 0.

3. posebne nevarnosti

- A. Temperatura v procesu je višja od temperature vrelišča amoniaka (20 °C pri tlaku 8 bar) \Rightarrow 0,60.
- B. Podtlaka ni.
- C. V nekaterih procesnih enotah je sestava plinov vselej v območju vnetljivosti \Rightarrow 1.
- D. Nevarnosti prašne eksplozije ni.
- E. Tlak v procesu je 8 bar. Iz slike 2.7 \Rightarrow 0,33.
- F. Nizkih temperatur ni.
- G. Največja količina utekočinjenega amoniaka v procesu bo v uparjalniku, ocenimo jo na okoli 500 kg. Gostota tekočega amoniaka pri 15 °C je 620 kg/m³, torej je volumen 0,8 m³ \Rightarrow 0.
- H. Predpostavimo, da bodo procesne enote izdelane iz korozijsko odpornih materialov, vendar je korozija možna, ker bodo prisotne pare dušikovih oksidov in dušikove kisline \Rightarrow 0,10.
- I. Spoji v procesu bodo varjeni. Ker vsi podatki v fazi načrtovanja procesa še niso znani, uporabimo minimalni faktor \Rightarrow 0,10.
- J. Naprav z odprtim plamenom v procesu ni.
- K. Vročega olja ni.
- L. V procesu so velike turbine in kompresorji \Rightarrow 0,50.

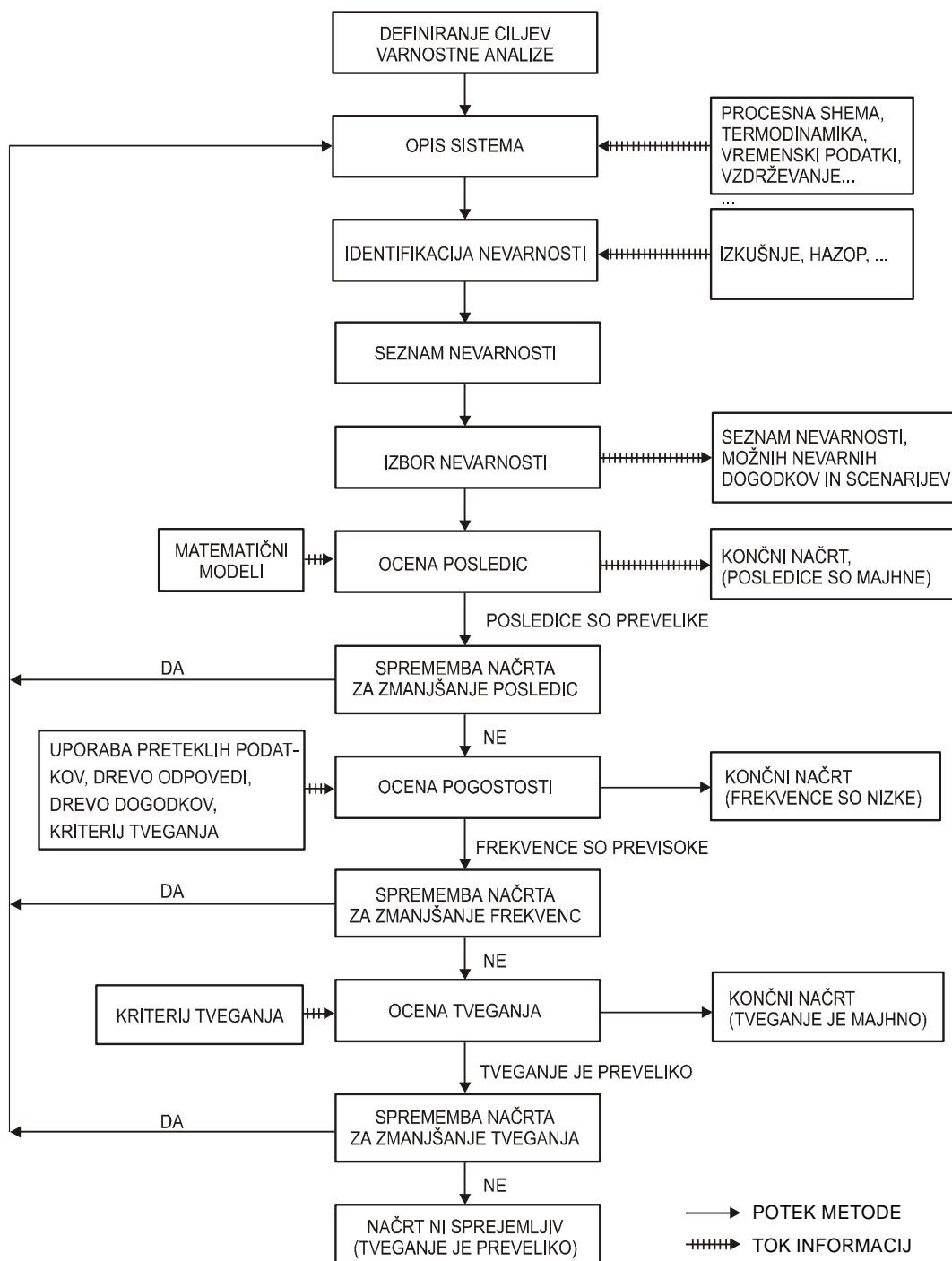
Ocenjene podatke vnesite v obrazec in izračunajte indeks DOW. Rezultat je $i_{DOW} = 22$, kar uvršča ta proces med takšne, kjer je nevarnost majhna (tabela 2.7). Amoniak običajno ne predstavlja nevarnosti zaradi vnetljivosti, ampak je največja nevarnost eksplozija v reaktorju.



Slika 2.8. Poenostavljena procesna shema za pridobivanje dušikove kisline

3. KVANTITATIVNO OCENJEVANJE TVEGANJ V KEMIJSKI PROCESNI INDUSTRIJI

Postopek, s katerim izvedemo analizo tveganja za kemijski proces, lahko prikažemo z naslednjim diagramom poteka:



Slika 3.1. Postopek analize tveganja kemijskega procesa

a) Definiranje ciljev varnostne analize

Za uspešno izpeljavo projekta je izjemnega pomena, da so namen in cilji varnostne analize natančno znani in definirani. Izbrati je potrebno merila za kvantitativno vrednotenje tveganja in načine za njihovo predstavitev. Cilji varnostne analize so lahko naslednji:

- ocena tveganja za zaposlene,
- ocena tveganja za prebivalce v okolici,
- ocena finančnega tveganja,
- zadostitev zakonskim predpisom,
- priprava načrta za ravnanje v primeru nesreče,
- določitev prioritete za zmanjšanje tveganja itd.

b) Opis sistema

pomeni, da moramo priskrbeti vse podatki o procesu, ki so potrebni pri analizi tveganja, npr. lokacija obrata, okolica, populacija v okolici, vremenski pogoji, procesna shema, shema instrumentacije, postopki obratovanja in vzdrževanja, procesna dokumentacija, kemizem v procesu, termodinamika itd.

c) Prepoznavanje nevarnosti

je kritični korak pri analizi tveganja, kajti nevarnosti, ki jo spregledamo, ne moremo analizirati in tudi ne predvideti njenih posledic. Za prepoznavanje nevarnosti je na voljo veliko orodij, npr. uporaba preteklih izkušenj, HAZOP metoda, metoda "kaj-če" (What-If Analysis) in druge.

d) Seznam nevarnosti

je zapis vseh prepoznanih nevarnosti v obliki pregledne tabele.

e) Izbor nevarnosti

je postopek, pri katerem izmed vseh nevarnih dogodkov izberemo tiste, ki so najpomembnejši oz. najnevarnejši ter določimo njihove posledice.

f) Ocena posledic

Posledice nevarnih dogodkov (materialno škodo in ogroženost ljudi) ocenimo z uporabo različnih metod. Nevarni dogodek lahko ima več različnih posledic oz. scenarijev, npr. nevarni dogodek "odprtina v posodi z vnetljivo tekočino pri visokem tlaku" ima možne posledice: eksplozija parnega oblaka (UVCE), vžig pare, eksplozija razpenjajoče vrele tekočine (BLEVE), požar razlite tekočine (pool fire), požar curka tekočine (jet fire) itd. Te različne scenarije analiziramo z matematičnimi modeli, s katerimi lahko ocenimo vpliv na ljudi in zgradbe. Če so posledice nevarnega dogodka na ljudi in premoženje zanemarljive, je načrt obrata z varnostnega vidika sprejemljiv in varnostna analiza je končana.

g) Sprememba načrta za zmanjšanje posledic

Če so posledice nevarnega dogodka prevelike, je potrebno predlagati spremembo načrta. Postopek nato ponovimo od točke b), da ugotovimo, ali smo s spremembo načrta zmanjšali posledice nevarnih dogodkov, oz. ali prinaša sprememba načrta nove, dodatne nevarnosti.

h) Ocena pogostosti (frekvence) nevarnih dogodkov

Za izbrane nevarne dogodke ocenimo pogostost z uporabo podatkov o podobnih dogodkih v preteklosti, z metodo drevesa odpovedi ali drevesa dogodkov. Če so ocenjene frekvence sprejemljivo nizke, je načrt obrata sprejemljiv in analiza je končana.

i) Sprememba načrta za zmanjšanje pogostosti nevarnih dogodkov

Če je pogostost nevarnega dogodka prevelika, je potrebno predlagati spremembo načrta, podobno kot v točki g).

j) Ocena tveganja

Za izbrane nevarne dogodke izračunamo tveganje, ki ga predstavljajo za ljudi, in vse vrednosti seštejemo, da dobimo merilo za skupno tveganje. Če je tveganje enako ali manjše od sprejetega kriterija, je načrt sprejemljiv.

k) Sprememba načrta za zmanjšanje tveganja

Korak je enak, kot v točkah g) in i). Če načrta na noben način ni mogoče spremeniti tako, da bi zmanjšali tveganje na sprejemljivo raven, načrt obrata ni sprejemljiv in ga je potrebno v celoti spremeniti.

Naslednja poglavja opisujejo najpomembnejše korake postopka za analizo tveganj.

4. PREPOZNAVANJE (IDENTIFIKACIJA) NEVARNOSTI

Za preprečevanje škodljivih dogodkov je osnovnega pomena prepoznavanje (identifikacija) varnostno občutljivih delov procesa in posebnih nevarnosti v procesu. Kako velik pomen pripisujejo (kvalitativnemu) odkrivanju potencialnih nevarnosti, kaže mnenje strokovnjakov, ki pravijo, da pravočasno odkrita nevarnost sploh ni več nevarnost. Z razvojem tehnologije postaja takšna identifikacija vse težavnejša, po drugi strani pa je sedaj na voljo cela vrsta metod za varnostno oceno in prepoznavanje nevarnosti v obratu. Seveda nobena od teh metod ni idealna in uporabna v vseh primerih. Od vrste oz. panoge obrata je odvisno, kateri pristop bo najprimernejši. Pomembno vodilo pri prepoznavanju nevarnosti je uporaba preteklih izkušenj, zato je le-te potrebno sistematično dokumentirati v pregledni obliki, npr. s kontrolnim seznamom (check list).

V tem poglavju si bomo ogledali dva pristopa za identifikacijo nevarnih dogodkov: uporabo vprašalnikov in metodo HAZOP.

Zraven teh dveh metod sta znani tudi metodi »Kaj če?« (angl. »What if?«) in metoda FMEA. Pri metodi »Kaj če?« uporabljamo serijo vprašanj tipa »Kaj se bo zgodilo, če odpove npr. črpalka?«. Tako obdelamo vse sestavne dele sistema, ki bi s svojo okvaro lahko prispevali k nastanku nezaželenega dogodka (nesreče). Skupina strokovnjakov, ki izvajajo varnostno analizo, išče možne odgovore na takšna vprašanja. Kvaliteta izvedbe metode je odvisna od izkušenj in iznajdljivosti članov skupine.

Metoda FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) je analitska metoda, ki uporablja pregled možnih načinov odpovedi ali okvar procesnih enot oz. posameznih delov sistema ter išče vzroke in posledice teh odpovedi. Razširjena je pri raziskovanju zanesljivosti elektronskih, električnih in mehanskih sistemov.

4.1. Uporaba vprašalnikov

V kemijski industriji razvitih držav so varnostni pregledi procesov z uporabo vprašalnikov nekaj običajnega. Z njimi sistematično in kritično obravnavajo vsa področja aktivnosti v podjetju z namenom minimirati izgube v primeru škodljivih dogodkov. Varnostni pregled se izvede z uporabo vnaprej pripravljenega vprašalnika, v katerem so navedene in opisane različne aktivnosti s področja obratovanja, vzdrževanja itd. ter ocena kako dobro ali slabo je aktivnost izvedena. Te standarde nato uporabijo kot osnovo za oceno varnosti. Varnostni pregledi imajo poleg odkrivanja in odpravljanja nevarnosti tudi pomembno vlogo pri izobraževanju zaposlenih.

V prilogi 2 je podan skrčen seznam aktivnosti, ki jih običajno ocenjujejo pri varnostnem pregledu procesov in opis načinov izvajanja teh aktivnosti.

Uporaba vprašalnikov je enostavna in varnostni pregled lahko izvedejo celo osebe, ki za to niso posebej izurjene. Vendar ima nekatere pomembne pomanjkljivosti:

- priprava vprašalnikov zahteva veliko časa, zraven tega jih je potrebno sproti dopolnjevati in posodabljati. Kvaliteta rezultatov je odvisna od znanja in izkušenj ljudi, ki vprašalnike pripravljajo, zato vedno obstaja verjetnost, da bomo kaj spregledali;
- dobljeni rezultati so lahko le kvalitativni;
- metoda ne omogoča prepoznavanja nevarnosti glede na vrsto procesne operacije (reakcija, prenos toplote, hranjenje ipd.), obratovalne pogoje (temperaturo, tlak) ali motnje v obratovanju (npr. prekomerno sproščanje toplote).

4.2. Študije obratovanja in nevarnosti (HAZOP)

HAZOP (Hazard and Operability Studies) je skupina metod, s katerimi sistematično iščemo možne nevarnosti v procesu. Razvijali so jo od leta 1963, prvi (zdaj že klasični) članek o njej pa je

bil objavljen leta 1974 (Lawley, H. G., Operability studies and hazard analysis. *Chemical Engineering Progress*, 70 (4), 45-56, 1974.) Od takrat se metoda ni bistveno spremenila in je doživela izjemno široko uporabo. V razvitih evropskih državah in v ZDA je identifikacija nevarnosti obvezna po zakonu.

4.2.1. Princip metode HAZOP

Metoda HAZOP temelji na predpostavki, da so načrtovani obratovalni pogoji varni, odstopanja od teh pogojev pa predstavljajo potencialne nevarnosti. Zato je bistvena značilnost metode sistematično iskanje najrazličnejših nevarnih motenj, do katerih bi lahko prišlo v procesu med obratovanjem. Ker temelji na sistematičnem pristopu, je možnost, da bi katero od nevarnosti spregledali, zelo zmanjšana.

Metoda HAZOP temelji na raziskavi odstopanj različnih procesnih parametrov (npr. pretoka, tlaka, temperature) od načrtovanih vrednosti, t.j. od tistih vrednostih, ki so jih načrtovalci procesa določili (izračunali) pri normalnem obratovanju.

Za izvedbo metode HAZOP potrebujemo popolni opis procesa, t.j. procesno shemo z vsemi procesnimi enotami in njihovimi medsebojnimi povezavami. Za vsako povezavo (cev, linijo) med dvema procesnima enotama raziskujemo, katera odstopanja procesnih parametrov (pretoka, temperature, tlaka in koncentracije) od normalnih obratovalnih vrednosti so možna in kakšne so posledice teh odstopanj. Izrazi, ki jih pri tem uporabljamo, so:

NAMEN

Z namenom definiramo, kako naj proces obratuje pri normalnih obratovalnih pogojih, t.j. pri pogojih, ki so jih predvideli načrtovalci procesa.

ODSTOPANJE

Odstopanja so odmiki od tistega, kar so predvideli načrtovalci procesa, t.j. odmiki od namena.

VZROK

Pomeni odgovor na vprašanje, zakaj lahko pride do odstopanja.

POSLEDICA

Pomeni, kakšen vpliv ima odstopanje od načrtovanega obratovanja.

NEVARNOST

Je posledica, ki lahko povzroči škodo, izgubo oz. poškodbe.

4.2.2. Odstopanja procesnih parametrov

Značilni procesni parametri v procesni industriji so temperatura, tlak, pretok, sestava in nivo. Pri normalnem obratovanju imajo ti parametri določene vrednosti, ki določajo "normalne" obratovalne pogoje. Zaradi različnih razlogov pa lahko prične vrednost nekega parametra odstopati od "normalne", npr. temperatura nepričakovano naraste, pretok se zmanjša ipd. Takšna odstopanja so lahko vzrok za nevarne dogodke v procesih.

▪ Odstopanje pretoka

Pretok lahko odstopa od načrtovanih vrednosti na naslednje načine: previsok pretok, prenizek pretok, pretok v obratni smeri, nestabilen pretok ali ničelni pretok.

Previsok pretok povzroča erozijo, kavitacijo, preobremenitve elektromotorjev in procesnih naprav. Pretok se lahko poveča zaradi produktov reakcije ali korozije, zaradi mešanja z

drugimi procesnimi tokovi ali s tokovi iz okolice, neučinkovitega ločevanja, nečistoč v vtoku itd.

Prenizek pretok lahko povzroči nabiranje oblog v uparjalnikih in toplotnih prenosnikih. Vlek v pečeh lahko postane neučinkovit in plin udari nazaj. Do prenizkega pretoka lahko pride v enotah, ki imajo več iztokov ali zaradi odločitve o zmanjšanju kapacitete obrata.

Pretok v obratni smeri se lahko pojavi povsod, kjer pride do povečanja tlaka nad dobavni tlak, npr. v reaktorju. Do povratnega pretoka lahko pride zaradi okvare na osnovni pogonski napravi, zato je potrebno namestiti nepovratne ventile, ki dovoljujejo pretok le v eni smeri.

Ničelni pretok pomeni blokado procesa, odsotnost vtoka, odsotnost tlačnih razlik in lom cevi ali procesnih naprav. Nevarno je trenutno znižanje pretoka, npr. če ni vtoka goriva v peč, plamen ugasne, ko gorivo spet priteče, se ne vžge in zalije peč.

▪ **Odstopanje tlaka**

Do naraščanja tlaka v procesu ponavadi pride zaradi različnih blokad, ki nastanejo zaradi različnih trdnih delov in odkruškov ter lahko poškodujejo ventile in drugo opremo. V toplotnih prenosnikih naraste temperatura in s tem tudi tlak, če ni pretoka hladnega toka. Ogljik, guma in smole se lahko kopičijo v cevovodih, snov v cevovodu lahko tudi zmrzne.

Zaželeno je, da je tlak v procesu stabilen, kar velja še posebej za pogonska sredstva, npr. paro. Sprememba tlaka pare vpliva na toplotne prenosnike in črpalke, ki jih poganja para.

Povsod, kjer se snovi lahko razpenjajo ali krčijo, je potrebno poskrbeti za odzračevanje (angl. relief), s katerim zaščitimo konstrukcije pred poškodbami zaradi porasta tlaka. Zaprte posode, ki so napolnjene s tekočinami, morajo biti zaščitene, ker lahko pride do toplotnega razpenjanja vsebine. Preprečiti je treba vsako pregrevanje tekočin zaradi toplotnih, mehanskih, električnih ali kemijskih vzrokov, ognja, sonca ali eksplozije, ker to povzroči porast tlaka. Del procesa, kjer je velika tendenca za pojavljanje blokad, opremimo s filtri, ali z obtokom (bypass). Poskrbimo za redno čiščenje. Skrbno nadzorujemo iztočno temperaturo v toplotnih menjalnikih, da preprečimo zmrzovanje. Nevarno je tudi nenadno zmanjšanje prostornine pare, npr. ob kondenzaciji ali če po pomoti pride do mešanja s hladno tekočino. Ker rezervoarji in cisterne prenesejo le majhen podtlak, lahko pride do porušenja.

▪ **Odstopanje temperature**

Spremembe temperature imajo velike posledice v reaktorjih (nezaželene stranske reakcije, nabiranje oblog, temperaturni "pobeg" reakcije). Do sprememb temperature lahko pride v pečeh ali toplotnih prenosnikih zaradi nenadnega zmanjšanja pretoka tekočine. Izogibati se je treba prevelikim hitrostim tekočin. Zaradi preobremenjenosti se lahko pričnejo pregrevati ležaji črpalk in kompresorjev. Zato morajo biti le ti opremljeni z napravami za merjenje temperature. Previsoka temperatura v določenem delu procesa lahko povzroči nenadzorovane dogodke v sledečih procesnih enotah.

▪ **Odstopanje nivoja**

Do nihanja nivoja in morebitnega razlitja lahko pride zaradi prekomernega polnjenja posod, prevelikega pretoka tekočine, brizganja, valovanja, penjenja, toplotnega razpenjanja, nepravilne nastavitve ventilov, vibracij posod itd. Tudi odčitavanje vrednosti nivoja je lahko napačno, še posebej kadar sta prisotni dve fazi ali trdne snovi. Akumulacija inertnih snovi, vode ali usedlin lahko ima za posledico nepravilen nadzor nivoja. Plin, ki vstopa v tekočo fazo, lahko povzroči zvišanje nivoja (npr. v absorpcijski koloni). Prenizek nivo v posodi lahko povzroči, da vstopi plin v črpalko ali toplotni prenosnik.

Običajno so posode dimenzionirane tako, da je dopuščeno določeno nihanje nivoja, na vtoku in iztoku pa so opremljene z ventili.

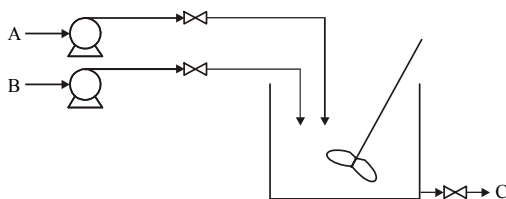
4.2.3. Ključne besede

Možna odstopanja od načrtovanih obratovalnih pogojev iščemo sistematično z uporabo ključnih besed. S kombinacijo ključnih besed in procesnih parametrov smiselno definiramo možna odstopanja.

NI ali NIČ	negacija cilja
VEČJE	kvantitativno naraščanje
MANJŠE	kvantitativno zmanjševanje
DODATNO	kvalitativno naraščanje
DELNO	kvalitativno zmanjševanje
NASPROTNO	logično nasprotje cilja
DRUGO	popolna zamenjava

4.2.4. Kombinacija ključnih besed in procesnih parametrov

Za ilustracijo principa in uporabe ključnih besed pogledajmo naslednji primer. Komponenti A in B črpamo s črpalko v reaktor, kjer reagirata v produkt C. Pretok komponente B ne sme preseči pretoka komponente A, ker lahko pride do eksplozije.



Za cevovod, po katerem priteka A v reaktor, lahko definiramo naslednje odstopanje:

Namen: PRENOS (VTOK) KOMPONENTE A V REAKTOR

Ključna beseda: NI

Procesni parameter: PRETOK

S kombinacijo ključne besede in procesnega parametra definiramo eno izmed možnih odstopanj:

Odstopanje: NI PRETOKA (VTOKA) komponente A v reaktor

Vzrok za to odstopanje je lahko okvara črpalke, prazen rezervoar komponente A, poškodba cevi, okvara ventila.

Posledica je, da pretok B preseže pretok A in pojavi se

nevarnost eksplozije.

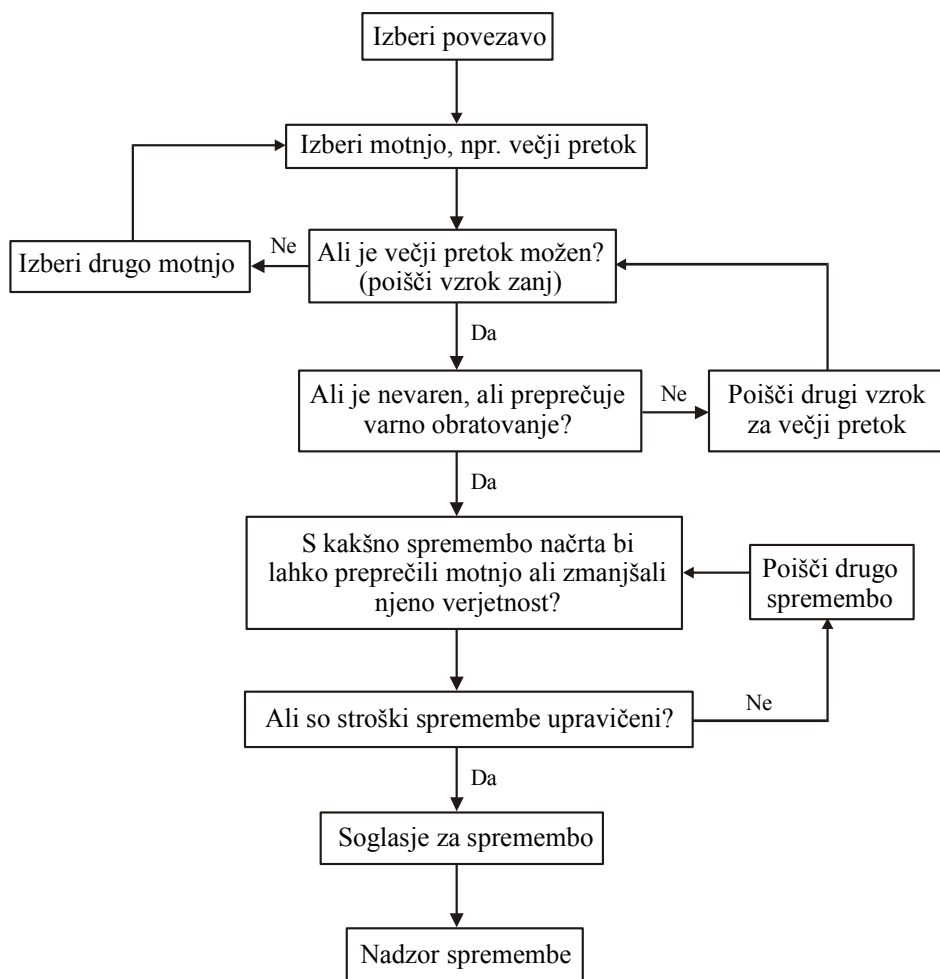
S kombinacijo preostalih ključnih besed in procesnega parametra (v tem primeru pretoka) raziščemo še preostala možna odstopanja glede vtoka komponente A:

NI ali NIČ	Ni vtoka komponente A.
VEČJE	Vtok komponente A je večji od načrtovanega.
MANJŠE	Vtok komponente A je manjši od načrtovanega.
DODATNO	Zraven komponente A vteka v reaktor še dodatna komponenta.
DELNO	Vtok komponente A je zaradi določenih razlogov opravljen samo delno.
NASPROTNO	Pretok komponente A v nasprotni smeri od načrtovane.
DRUGO	Vtok druge komponente (ne A). Pojav druge operacije (ne vtok A).

Vse kombinacije procesnih parametrov in ključnih besed niso smiselne, npr. ni temperature ali delna temperatura sta nesmiselni kombinaciji. Tabela 4.2 prikazuje značilna odstopanja različnih procesnih parametrov z možnimi vzroki, slika 4.1 pa shematsko prikazuje metodo HAZOP.

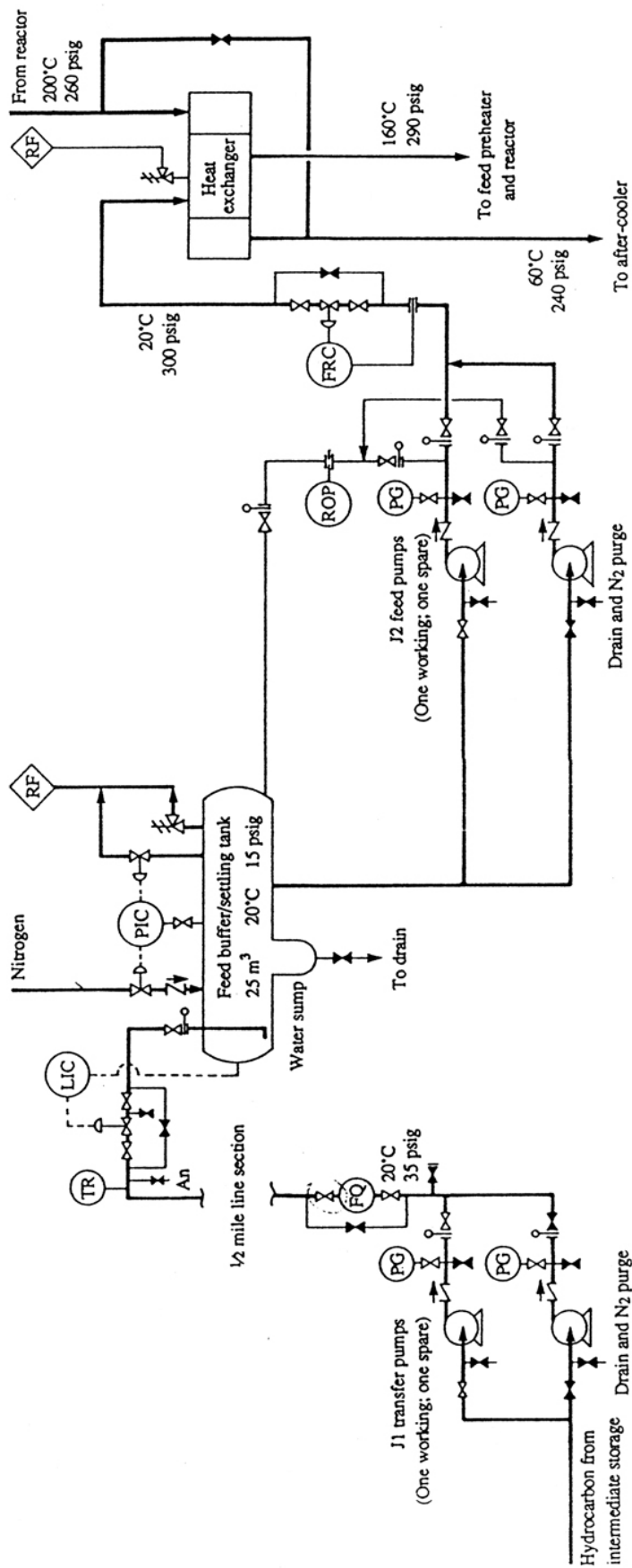
Tabela 4.2. Ključne besede in primeri odstopanj z možnimi vzroki

Ključna beseda	Odstopanje	Možni vzroki
NIČ	Ni pretoka	Blokada; okvara črpalke; zaprt ali blokiran ventil; izlitje; odprt ventil; prazen rezervoar; okvara regulacijskega sistema; porast tlaka na dobavni strani
	Pretok v nasprotni smeri	Okvara črpalke; porast tlaka na dobavni strani; napačna povezava cevi
VEČJE	Večji pretok	Zmanjšanje črpalne višine; valovanje; porast tlaka na črpalni strani; zataknjen ventil; izlitje; napačno odčitavanje z instrumentov; okvara regulacijskega sistema
	Višja temperatura in tlak	Požar; blokada; vroče površine; izguba nadzora; reakcija; eksplozija; zaprt ventil; znižanje nivoja v grelniku; sonce
MANJŠE	Manjši pretok	Okvara črpalke; izlitje; delna blokada; povečana poraba; sedimenti; kavitacija; ustavitev procesa
	Nižja temperatura in tlak	Ohladitev; izparevanje; vplivi okolja; dež; blokiran sistem za odzračevanje, neuravnoveženost vtoka in iztoka
DODATNO	Nečistoče ali dodatna faza	Vtok nezaželenih komponent, npr. vode, zraka, mazalnega olja, produktov korozije; napaka v izolaciji; zagon procesa
DELNO	Sprememba sestave	Sprememba sestave vtoka; dodatni reaktanti v reaktorju; delna realizacija namena
DRUGO	Druga odstopanja od normalnega obratovanja	Zagon in ustavitev obrata; testiranje in pregledovanje; vzorčenje; vzdrževanje; aktiviranje katalizatorja; odstranjevanje blokade; korozija, aktiviranje varnostnih postopkov; napaka pri dobavi električne energije, pare, goriva, zraka, vode



Slika 4.1. Shematski prikaz metode HAZOP

PRIMER 4.1: Kot osnovo bomo vzeli del obrata, ki ga prikazuje slika 4.2. Gre za napajalni del obrata za dimerizacijo zmesi alkenov. Napajalno zmes, ki vsebuje sledi vode, črpajo (črpalki J1) po 1 km dolgi cevi iz vmesnega hranilnika v ločilnik, kjer se voda loči od ogljikovodikov in usede na dno. Vodo, ki ima neugoden vpliv na katalizator v reaktorju, spuščajo iz ločilnika ročno v določenih časovnih intervalih. Zmes ogljikovodikov nato črpajo (črpalki J2) skozi toplotni prenosnik in grelnik v reaktor. Zadrževalni čas v reaktorju ne sme odstopati od predpisanega, zato da dosežemo zahtevano presnovo in preprečimo nastanek polimerov. Tabela 4.3 prikazuje rezultat metode HAZOP za cevovod, ki povezuje vmesni hranilnik in ločilnik.



Slika 4.2. Napajalni del obrata za dimerizacijo alkenov

Tabela 4.3. Rezultat HAZOP študije za cevovod med vmesnim hranilnikom in ločilnikom

Ključna beseda	Odstopanje	Možni vzroki	Posledice	Predlagani ukrepi
NIČ	Ni pretoka	(1) Prazen vmesni hranilnik	V reaktorski del ni več vtoka; pregrevanje v toplotnem prenosniku in grelniku. Nezaželena polimerizacija.	(a) Poskrbimo za dobro komunikacijo s tehnologom, ki odgovarja za vmesni hranilnik. (b) Na ločilniku namestimo alarm za prenizki nivo.
		(2) Okvara črpalke J1 (okvara motorja, ni električnega toka, korozija pogonske osi)	Kot pri (1).	Kot pri (b).
		(3) Blokada cevovoda, zaprt izolacijski ventil, zaprt ventil za regulacijo nivoja v ločilniku (LCV)	Kot pri (1). Pregretje črpalk J1.	Kot pri (b). (c) Črpalke J1 opremimo z varnostnim obtokom. (d) Preverimo dimenzioniranje črpalk
		(4) Lom cevovoda.	Kot pri (1). Izlitje zmesi alkenov.	Kot pri (b). (e) Poskrbimo za redni nadzor cevovoda.
VEČJE	Večji pretok	(5) Zaradi napake odprt LCV in/ali njegov obtok	Poplavljenje ločilnika. Nepopolna ločitev vode v ločilniku povzroči probleme v reaktorskem delu.	(f) Na ločilniku namestimo alarm za previsok nivo. (g) Preverjamo zaprtost ventila na obtoku LCV, kadar obtok ni v uporabi. (h) Zvišamo iztok iz ločilnika v črpalke J2.
		Višji tlak	(6) Zaprt izolacijski ventil ali LCV medtem ko črpalka J1 obratuje (7) Toplotno razpenjanje v izolacijskem ventilu zaradi požara ali vročega sonca.	Maksimalna obremenitev cevovoda ali nihanje tlaka. Lom cevovoda.
	Višja temperatura	(8) Povišanje temperature v vmesnem hranilniku.	Porast tlaka v cevovodu in ločilniku.	(l) Na vmesni hranilnik namestimo alarm za previsoko temperaturo.
	MANJŠE	Manjši pretok	(9) Puščanje prirobnic in ventilov	Iztekanje snovi.
Nižja temperatura		(10) Zima.	Zbiralnik in odtok vode v ločilniku zmrzneta.	(m) Zbiralnik in odtok vode v ločilniku izoliramo in po potrebi grejemo.
DELNO	Visok delež vode v vtoku	(11) Visok nivo vode v vmesnem hranilniku.	Zbiralnik vode se hitro napolni. Poveča se možnost za vstop vode v reaktorski del.	(n) Poskrbimo za redno praznjenje zbiralnika vode. Namestimo alarm previsokega nivoja.
	Visok delež nižjih alkenov	(12) Motnje v obratovanju destilacijske kolone pred vmesnim hranilnikom.	Porast tlaka v sistemu.	(p) Preverimo, ali so ločilnik, cevovodi in odzračevalna naprava ustrezno dimenzionirani tudi za vtok hlapnejših ogljikovodikov.

Tabela 4.3. nadaljevanje

DODATNO	Prisotnost organskih kislin	(13) Kot pri (12).	Povečana hitrost korozije ločilnika, zbiralnika in odtoka vode	(q) Preverimo primernost materialov, iz katerih so ločilnik, zbiralnik in odtok vode
DRUGO	Vzdrževanje	(14) Okvara na ločilniku.	Cevovoda ni mogoče popolnoma izprazniti.	(r) Na najnižji točki za LCV namestimo odtok in točko za uvajanje N ₂ . Enako na ločilniku.

4.2.5. Izvedba metode HAZOP

a) Kaj potrebujemo za izvedbo HAZOP študije?

Za izvedbo HAZOP študije potrebujemo popolni opis procesa, t.j. procesno shemo (angl. P&ID, piping and instrumentation diagram) z vsemi procesnimi enotami in njihovimi medsebojnimi povezavami (angl. pipe, line), za podrobnejšo študijo pa tudi vse instrumente, npr. ventile, merilnike pretoka, tlaka, temperature itd. Nato raziskujemo eno za drugo vse povezave oz. procesne parametre (pretok, tlak, temperaturo in koncentracijo) na teh povezavah z uporabo ključnih besed. S takšno "cevovodno" varianto metode HAZOP preiskujemo samo povezave med procesnimi enotami, ne pa tudi samih procesnih enot. Motnje v obratovanju procesnih enot so namreč vključene v študijo kot vzrok ali posledica odstopanja nekega procesnega parametra v cevovodu, ki vodi do te procesne enote. Ekipa, ki izvaja študijo HAZOP, mora imeti najnovejšo verzijo procesne sheme, sicer je njeno delo popolnoma nekoristno.

b) Kdo izvaja HAZOP študijo?

HAZOP študijo obstoječega procesa izvede skupina strokovnjakov (team), v katerem so:

- vodja raziskave, ki dobro pozna metodo HAZOP, ni pa nujno, da dobro pozna proces. Njegova naloga je, da vodi ekipo pri pravilnem izvajanju procedure in da posveča izjemno pozornost vsaki najmanjši podrobnosti.
- vodja obrata,
- procesni tehnolog, ki zelo dobro pozna proces,
- vodja vzdrževanja, ki je odgovoren za mehansko vzdrževanje,
- vzdrževalec regulacijskih in alarmnih instrumentov,
- razvojni inženir, ki raziskuje tehnične probleme in je odgovoren za prenos rezultatov laboratorijskih raziskav v industrijsko merilo.

Običajno je v skupini šest do sedem ljudi, za katere se pričakuje, da so kreativni in imajo bujno domišljijo, da predlagajo nove, na prvi pogled celo nemogoče variante motenj, vzrokov in posledic. S tem vzpodbujajo tudi druge člane ekipe k iskanju podobnih motenj. Vsi člani skupine, razen vodje, so dobri poznavalci procesa in naj bi delali na njem vsaj eno do dve leti. Zaželeno je, da sodelujejo v skupini tudi ljudje, ki imajo dolgoletne izkušnje in dober pregled nad podobnimi nevarnimi dogodki, ki so se zgodili v preteklosti in so jih doživeli osebno ali pa jih poznajo iz literature. S tem usmerijo ostale člane skupine k nadaljnjemu raziskovanju.

HAZOP študijo novega procesa izvede podobna skupina strokovnjakov: vodja, inženir, ki je vodil načrtovanje procesa in pripravo procesne sheme, tehnolog, ki bo vodil zagon in obratovanje procesa, inženir, ki je vodil načrtovanje regulacijskih in alarmnih instrumentov, razvojni tehnolog (običajno kemik) ter vodja projekta, ki skrbi, da ostanejo stroški znotraj predvidenih okvirov.

c) Kdaj se izvede HAZOP študija in kako dolgo traja?

HAZOP študijo novega procesa izvedemo takoj zatem, ko je pripravljena natančna procesna shema z vso instrumentacijo. Običajno je potrebno po opravljeni študiji v procesno shemo še dodati nadzorne instrumente. Pri študiji obstoječega procesa je potrebno najprej preveriti, ali procesna shema ustreza dejanskemu stanju in jo po potrebi posodobiti.

Študija vsake pomembne procesne enote (npr. peči, reaktorja, grelnika, kolone, zbiralnika) oz. cevovoda, ki vodi do nje, traja od 1,5 do 3 ure. Priporočajo, naj bi srečanja ekipe potekala dva do trikrat tedensko po 3 ure. Tako lahko študija velikega procesa traja nekaj mesecev, četudi formiramo dve ali tri skupine, ki delajo vzporedno na različnih delih procesa.

d) Kje uporabljajo metodo HAZOP?

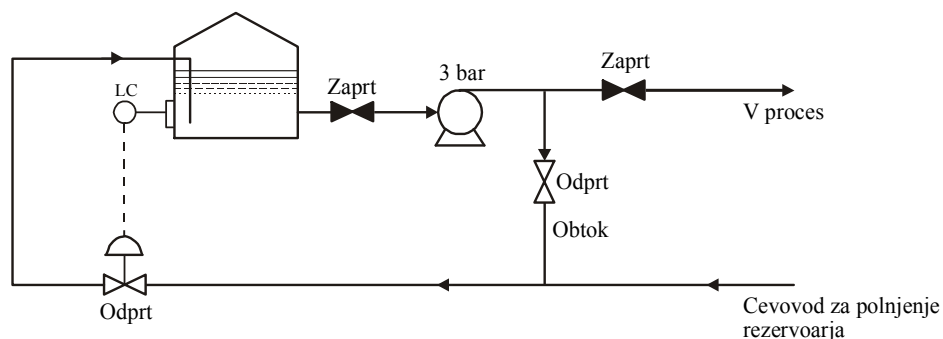
Metodo so razvili za potrebe kemijske industrije, vendar se je kmalu uveljavila tudi v prehrabeni in naftni industriji. V prehrabeni industriji je poudarek na iskanju možnih virov kontaminacije in ne toliko na problemih obratovanja in varnosti. V zadnjih letih se za proizvodnjo varnih živil zelo uveljavlja nadzorni sistem HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Point). HAZOP uporabljajo pri načrtovanju laboratorijev in v zadnjem času tudi pri proizvodnji genetsko spremenjenih produktov (GENHAZ). Pri tem gre predvsem za identifikacijo vplivov genetsko spremenjenih produktov na okolje. Delno se je metoda uveljavila tudi v nuklearni tehniki.

PRIMER 4.2: Slika 4.3 prikazuje del procesa, kjer je prišlo do nezgode, ki bi jo lahko preprečili, če bi uporabili metodo HAZOP.

V rezervoar je pritekala tekočina iz drugega oddaljenega rezervoarja. Črpalka, s katero so praznili rezervoar, ni delovala, vendar pa je bil odprt ventil na njeni obtočni cevi. Ko se je rezervoar napolnil, je regulator zaprl ventil na dovodni cevi, tlak je narasel na 20 bar in zlomil črpalko, ki je normalno obratovala pri tlaku 3 bar.

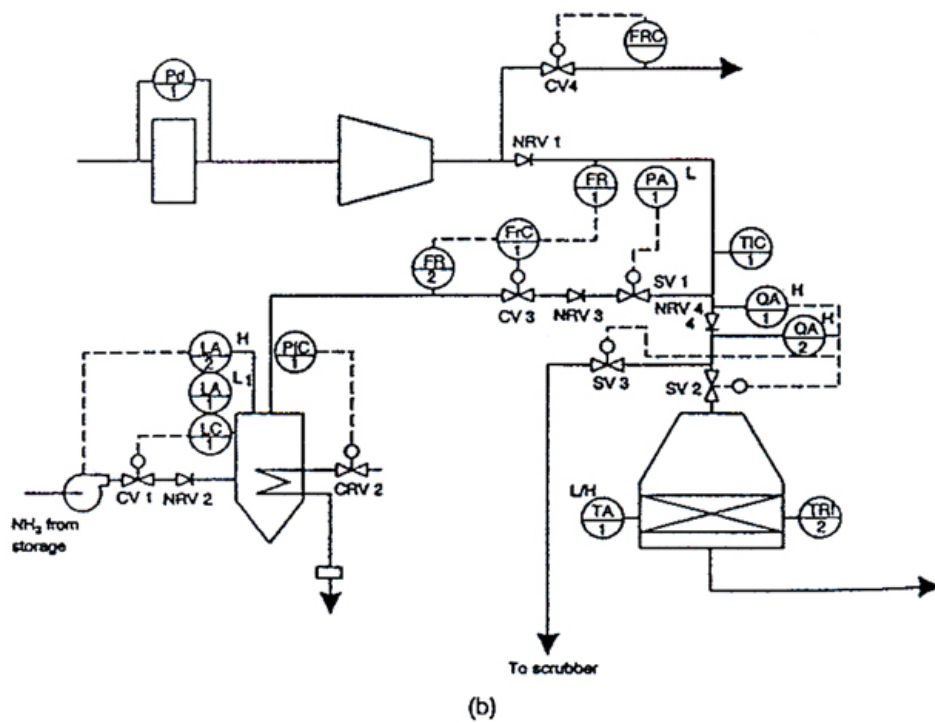
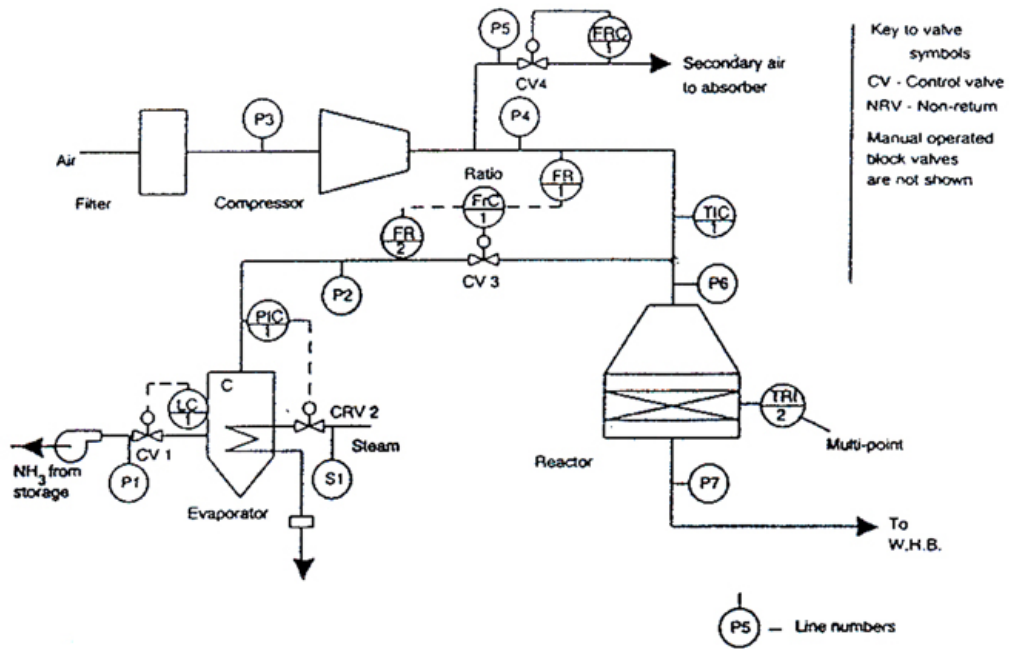
Zanimivo je, da so za preostali del obrata naredili HAZOP študijo, za ta del pa so menili, da je tako enostaven (samo rezervoar, črpalka in nekaj ventilov), da študija ni potrebna. Če bi v obtoku črpalke predvideli možnost toka v nasprotni smeri, bi odkrili nevarnost in preprečili nezgodo.

Po nezgodi so obtok črpalke preusmerili v rezervoar.



Slika 4.3. Del procesa, kjer se je zgodila nezgoda

PRIMER 4.3: Izvedimo HAZOP študijo za reaktorski del procesa pridobivanja dušikove kisline, s katerim smo se srečali že pri primeru 2.18. Slika 4.4a prikazuje reaktorski del procesa z instrumentalno in regulacijsko opremo, ki je potrebna za stacionarno obratovanje. Slika 4.4b prikazuje dodatne instrumente, ki jih določimo s HAZOP analizo. Največja nevarnost tega procesa je možnost eksplozije, če koncentracija amoniaka doseže eksplozijsko mejo 14 %. Rešitev je v prilogi 3.



Slika 4.4. Reaktorski del procesa dušikove kisline, (a) osnovna oprema, (b) razširjena oprema

4.2.6. HAZOP za šaržne procese

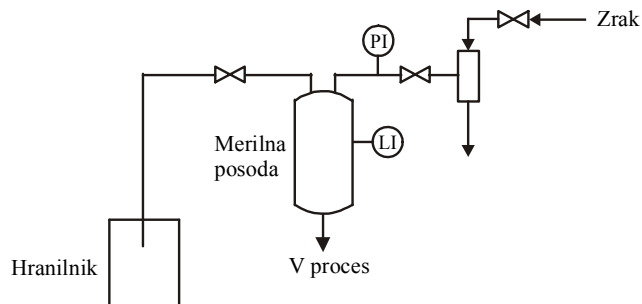
Pri HAZOP študiji šaržnih procesov uporabimo ključne besede za povezave med procesnimi enotami in tudi za obratovalne postopke procesnih enot. Slednje pomeni zaporedje opravil (operacij), ki se morajo izvesti v neki procesni enoti. Zraven ključnih besed, ki se uporabljajo pri kontinuirnih procesih, upoštevamo pri šaržnih procesih tudi časovna odstopanja v izvajanju opravil s ključnimi besedami kot npr. PREZGODAJ, PREPOZNO, PREPOČASI, PREHITRO. To pride v poštev pri tistih procesnih enotah oz. opravilih, kjer lahko časovna odstopanja povzročijo motnje in s tem nevarnosti, npr. v reaktorjih.

Vzemimo na primer, da je eno izmed opravil v reaktorju naslednje: napolni reaktor z 1 t komponente A. Motnje, ki jih bomo pri tem obravnavali, so naslednje:

- rezervoarja NE napolnimo s komponento A
- rezervoar napolnimo z VEČJO maso A od predpisane
- rezervoar napolnimo z MANJŠO maso A od predpisane
- rezervoar napolnimo z A in še z neko DODATNO komponento
- rezervoar le DELNO napolnimo z A
- rezervoar napolnimo z DRUGO komponento (ne A)
- rezervoar napolnimo z A, vendar ta steče v NASPROTNI smeri od načrtovane
- rezervoar napolnimo s komponento A PREZGODAJ
- rezervoar napolnimo s komponento A PREPOZNO
- rezervoar polnimo s komponento A PREHITRO
- rezervoar polnimo s komponento A PREPOČASI

Kot pri kontinuirnih procesih, tudi pri šaržnih procesih raziskujemo, kaj se zgodi, če tlak in temperatura odstopata od načrtovanih vrednosti.

Kor primer HAZOP študije si pogledjmo del procesa, ki ga prikazuje slika 4.5. Gre za merilno posodo, v katero prečrpamo tekočino iz hranilnika z uporabo zračnega ejektorja. Vzemimo pod drobnogled naslednjo operacijo: "izsesaj nekaj zraka iz merilne posode", ki je potrebna, da lahko posodo napolnimo s tekočino iz hranilnika. Tabela 4.4 prikazuje rezultate študije za to opravilo.



Slika 4.5. HAZOP študija opravila v šaržnem procesu

Tabela 4.4. HAZOP študija opravila "odstrani nekaj zraka iz merilne posode"

Odstopanje	Možni vzroki	Posledice
NE ODSTRANIMO ZRAKA	Napaka pri dovodu zraka, okvara ejektorja, zaprt ventil.	Težave pri obratovanju vendar brez nevarnosti.
ODSTRANIMO PREVEČ ZRAKA	Popolna izpraznitev merilne posode.	Ali merilna posoda prenese takšen podtlak? Konstrukcijske težave.
ODSTRANIMO PREMALO ZRAKA	Premajhen podtlak, da bi tekočina stekla iz hranilnika v merilno posodo.	Težave pri obratovanju vendar brez nevarnosti.
ZRAVEN ZRAKA ODSTRANIMO ŠE DRUGO KOMPONENTO	Poleg zraka potegnemo v izhodno cev še kapljice tekočine iz hranilnika.	Preverimo možnost požara, statičnega nabitja, korozije, onesnaženja okolja.
ODSTRANIMO LE DEL ZRAKA	Odstranimo le kisik ali dušik, kar pa ni možno.	
ZRAK ODSTRANIMO V NASPROTNI SMERI	Če je cev iz ejektorja blokirana, bo komprimiran zrak vtekal v merilno posodo.	Nadtlak v merilni posodi, prodor zraka v hranilnik in razpršitev tekočine v okolico, prodor zraka v druge procesne enote.
DRUGO	Ejektor deluje, ko je merilna posoda polna.	V izhodno cev vstopijo kapljice tekočine. Preverimo možnost požara, statičnega nabitja, korozije, onesnaženja okolja.

4.2.5. Povzetek metode HAZOP

Metoda HAZOP se je skozi leta potrdila kot učinkovita tehnika za odkrivanje nevarnosti in težav pri obratovanju v fazi načrtovanja procesa. Izkušnje kažejo, da se število nevarnih dogodkov in težav v obratovanju zmanjša za velikostni razred, če uporabimo to metodo. Seveda pa izvedba študije nevarnosti in obratovanja ne more nadomestiti dobrega načrtovanja procesa. Če namreč s študijo odkrijemo preveč osnovnih napak, je načrt procesa v osnovi zgrešen.

Osnovne značilnosti metode lahko strnemo v naslednjih točkah:

- HAZOP metoda je kvalitativna metoda za prepoznavanje nevarnosti ter iskanje vzrokov in posledic nevarnih dogodkov,
- temelji na predpostavki: načrtovani obratovalni pogoji so varni, odstopanja od teh vrednosti so nevarna,
- z metodo obdelamo vsako povezavo (cevovod) med dvema procesnima enotama v procesni shemi,
- metoda uporablja ključne besede,
- osnova so procesni parametri (tlak, temperatura, pretok, sestava),
- s kombinacijo ključnih besed in procesnih parametrov definiramo smiselna odstopanja,
- predvidimo vzroke in posledice odstopanj,
- vse naštetu vnaša v metodo precejšnjo mero sistematičnosti, kar je tudi njena prednost pred npr. metodo vprašalnikov.

5. OCENJEVANJE POSLEDIC

Za oceno posledic nevarnega dogodka uporabljamo metode, s katerimi določimo potencial dogodka, da povzroči škodo ljudem in premoženju. Nevarni dogodek ima lahko več različnih posledic, npr. zaradi poškodbe v steni tlačne posode z vnetljivo tekočino lahko pride do eksplozije par ali vrele tekočine ali do požara. Za analizo možnih posledic so razvili številne matematične modele in obstajajo že komercialni računalniški programi za simulacijo omenjenih dogodkov. Glavne skupine matematičnih modelov so:

- modeli, s katerimi izračunavamo masni pretok, s katerim snov izhaja iz sistema in disperzijski modeli, s katerimi izračunavamo koncentracijski profil nevarne snovi z oddaljevanjem od vira izhajanja.
- požarni in eksplozijski modeli, kamor spadajo modeli za izračunavanje jakosti udarnega vala pri eksplozijah par (UVCE in VCE), fizikalnih eksplozijah in eksplozijah vrelih tekočin (BLEVE) ter za izračunavanje toplotnega sevanja pri požarih razlitih oz. brizgajočih tekočin.
- modeli vpliva, s katerimi ovrednotimo posledice nevarnega dogodka za ljudi in premoženje, npr. učinek izpostavljenosti strupenim plinom, učinek toplotnega sevanja in udarnega vala na ljudi in zgradbe. Pri tem se najpogosteje uporablja t.i. *probit* metoda, s katero določimo delež populacije, ki je ogrožena ob določenem nevarnem dogodku.

5.1. Modeli za izhajanje snovi iz sistema

Največkrat se nevarni dogodek prične z nenadzorovanim izpustom vnetljive ali strupene snovi iz sistema. Do tega lahko pride zaradi razpoke ali loma procesne posode ali poškodbe cevi. Do izpusta lahko pride tudi skozi ventile ali varnostne odprtine (npr. varnostne ventile, lopute ipd.). Snov, ki uhaja, je lahko v plinastem ali tekočem agregatnem stanju, lahko je tudi dvofazna zmes plin-tekočina. Za vsakega od teh primerov obstajajo matematični modeli, s katerimi določimo masni pretok izhajajoče snovi. Ta podatek je skupaj s podatkom o trajanju izpusta zelo pomemben za izračun ostalih parametrov razširjanja strupene snovi.

5.1.1. Izhajanje plinov

Ob izpustu plina v atmosfero lahko v določenih pogojih nastane oblak nevarnih razsežnosti. Sistemi, ki so nevarni v tem smislu, so:

- utekočinjeni plini pod visokim tlakom (posebej nevaren je izpust plinov, ki so težji od zraka, ker se ne razpršijo v atmosfero, ampak se kopičijo),
- vnetljive tekočine nad svojim normalnim vreliščem, ker ob izpustu del tekočine upari – flash.

Masni tok, s katerim uhaja plin skozi odprtino, izračunamo z naslednjo enačbo:

$$q_m = C_D A p \left[\frac{\gamma M}{1000 RT} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{0,5} \quad (5.1)$$

kjer je:

- q_m masni tok (kg/s),
- C_D brezdimenzijski koeficient (angl. discharge coefficient),
- A ploščina preseka odprtine (m²),

p tlak (Pa),
 γ razmerje specifičnih toplotnih kapacitet ($\gamma = c_p/c_v$)
 M molska masa (g/mol),
 R plinska konstanta (8,314 J/(mol·K)),
 T temperatura (K).

C_D je empirični faktor, ki upošteva izgube zaradi viskoznosti in turbulence. V primeru loma stene posode ali cevovoda ponavadi vzamemo vrednost 0,85.

PRIMER 5.1: Izračunajmo masni pretok propana, ki uhaja skozi odprtino premera 10 mm. Tlak v posodi je 5 bar, temperatura 25 °C. Parni tlak propana pri 25°C je 9,3 bar, razmerje toplotnih kapacitet je 1,15.

Rešitev: Ker je tlak v posodi nižji od parnega tlaka propana, je propan v plinastem agregatnem stanju in lahko uporabimo enačbo (5.1). Najprej izračunamo ploščino preseka odprtine, za katero predpostavimo, da je okrogla.

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,01 \text{ m})^2}{4} = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$q_m = 0,85 \cdot 7,85 \cdot 10^{-5} \cdot 5 \cdot 10^5 \left[\frac{1,15 \cdot 44}{1000 \cdot 8,314 \cdot 298} \left(\frac{2}{1,15 + 1} \right)^{\frac{1,15+1}{1,15-1}} \right]^{0,5} = \underline{\underline{0,09 \text{ kg/s}}}$$

5.1.2. Izhajanje tekočin

Masni pretok čistih tekočin skozi odprtino izračunamo z enačbo:

$$q_m = C_D A \rho \sqrt{\frac{2(p - p_a)}{\rho} + 2gh} \quad (5.2)$$

kjer je:

q_m masni tok (kg/s),
 C_D brezdimenzijski koeficient,
 A ploščina preseka odprtine (m²),
 ρ gostota tekočine (kg/m³),
 p tlak v posodi (Pa),
 p_a zunanji tlak (Pa),
 g težni pospešek (9,81 m/s²),
 h višina tekočine nad odprtino (m).

Koeficient C_D znaša 0,6 do 0,64 za turbulentni tok skozi majhno odprtino.

PRIMER 5.2: Ob zagonu obrata so pozabili zapreti iztočni ventil s premerom 50 mm. Nato so napolnili cevi z benzenom pri 15 bar in 20 °C. Izračunajmo, koliko tekočine je izteklo, če so napako odkrili po 2 min. Gostota benzena je 770 kg/m³.

Rešitev: Najprej izračunamo ploščino preseka in nato masni tok z enačbo (5.2), pri čemer vzamemo za $h = 0$, ker gre za izlitje iz cevi:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot (0,05 \text{ m})^2}{4} = 0,002 \text{ m}^2$$

$$q_m = 0,6 \cdot 0,002 \cdot 770 \sqrt{\frac{2(15-1)10^5}{770} + 2 \cdot 9,81 \cdot 0} = \underline{\underline{55,7 \text{ kg/s}}}$$

$$m = 55,7 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 120 \text{ s} = \underline{\underline{6684 \text{ kg}}}$$

5.2. Modeli za razpenjanje in uparevanje

Tekočine, ki so pregrete čez temperaturo vrelišča pri atmosferskem tlaku, se ob izpustu na atmosferski tlak razpenjajo. Pri tem del tekočine upari. Z modeli razpenjanja in uparevanja izračunamo, kolikšen delež tekočine upari in pri tem tvori nevaren oblak par. Standardna enačba za razpenjanje (flash) je:

$$F_v = \frac{q_{m,g}}{q_{m,\ell}} = c_p \frac{(T - T_b)}{\Delta_{izp} H} \quad (5.3)$$

kjer je:

- F_v delež uparele tekočine,
 - $q_{m,g}$ masni tok pare (kg/s),
 - $q_{m,\ell}$ masni tok tekočine (kg/s),
 - c_p specifična toplotna kapaciteta tekočine (J/(g·K)),
 - T začetna temperatura tekočine (K),
 - T_b temperatura vrelišča tekočine pri tlaku 1 bar (K),
 - $\Delta_{izp} H$ izparilna entalpija tekočine pri T_b (J/g).
-

PRIMER 5.3: Izračunajmo delež tekočega propana, ki upari pri razpenjanju iz 11 bar in 25 °C na atmosferski tlak.

Podatki: vrelišče propana je -42°C, izparilna toplota 429 J/g (pri -42°C), specifična toplota 2,45 J/(g·K).

Rešitev: Z uporabo enačbe (5.3) izračunamo:

$$F_v = 2,45 \frac{\text{J}}{\text{gK}} \frac{(298 - 231) \text{ K g}}{429 \text{ J}} = \underline{\underline{0,38}}$$

To pomeni, da upari 38 % izteklega propana.

5.3. Disperzijski modeli

Ob nenadzorovanem izpustu strupene snovi se le-ta razprši v ozračje. Na disperzijo (razpršitev, razredčenje) imajo največji vpliv vremenski pogoji v času izpusta. Najpomembnejša dejavnika vremenskih pogojev sta hitrost vetra in stabilnost ozračja.

Hitrost vetra merijo običajno na višini 10 m, saj je bližje tlem veliko manjša zaradi strižnih sil. Ob vetrovnem vremenu je hitrost vetra okoli 5 m/s, medtem ko je ob mirnem vremenu okoli 2 m/s.

Stabilnost ozračja je povezana s turbulenco. Pri stabilnih pogojih bo mešanje izpuščene snovi z zrakom slabo, pri nestabilnih pogojih bo mešanje znatno. Stabilnost je običajno definirana z vertikalnim temperaturnim gradientom, ki ga primerjamo z vrednostjo ALR (Adiabatic Lapse Rate). Le-ta znaša za suh zrak $ALR = 0,98^{\circ}C/100\text{ m}$, kar pomeni, da se temperatura suhega zraka spremeni za približno $1^{\circ}C$ na vsakih 100 m višine. Pri zelo stabilnih pogojih je temperaturni gradient nižji od vrednosti ALR, pri nestabilnih je višji.

Glede na hitrost vetra in stabilnost ozračja razdelimo vremenske pogoje v Pasquill-ove razrede, ki jih prikazuje tabela 5.1.

Tabela 5.1. Pasquill-ovi razredi stabilnosti ozračja

Hitrost vetra (m/s) na višini 10 m	Dnevni pogoji			Nočni pogoji	
	Jasno	Delno jasno	Oblačno	Jasno	Oblačno
< 2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-4	B	B-C	C	D	E
4-6	C	C-D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Difuzija izpuščene snovi v atmosfero je naključni proces mešanja, ki ga povzročajo zračne turbulence. Spreminjanje koncentracije snovi z oddaljevanjem od točke izpusta v smeri vetra najboljše opisuje Gaussov koncentracijski profil v vodoravni in navpični smeri. Opisan je z Pasquill-Gifford-ovim modelom:

$$\gamma = \frac{q_m}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \left[\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right] \left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (5.4)$$

kjer je:

- x, y, z razdalja od izvora: $x = v$ smeri vetra, $y =$ bočno na smer vetra, $z =$ pravokotno, (m)
- γ masna koncentracija snovi (kg/m^3) v točki (x, y, z) ,
- q_m masni tok izhajajoče snovi (kg/s),
- h višina izvora glede na tla (m),
- σ_y, σ_z disperzijska koeficienta (m),
- u hitrost vetra (m/s).

Disperzijska koeficienta σ_y, σ_z sta funkciji oddaljenosti od izvora v smeri vetra. Odčitamo ju lahko v posebnih diagramih ali uporabimo približne enačbe, kot sta npr. naslednji, ki veljata za urbana področja ob stabilnostnih pogojih razreda D:

$$\sigma_y = \exp \left[4,23 + 0,9222 \ln \left(\frac{x}{1000} \right) - 0,0087 \left[\ln \left(\frac{x}{1000} \right) \right]^2 \right] \quad (5.5)$$

$$\sigma_z = \exp \left[3,414 + 0,7371 \ln \left(\frac{x}{1000} \right) - 0,0316 \left[\ln \left(\frac{x}{1000} \right) \right]^2 \right] \quad (5.6)$$

PRIMER 5.4: Klor izhaja iz točkastega izvora 1 m nad tlemi s pretokom 0,3 kg/s. Izračunajmo masno koncentracijo klora na lokaciji, ki je od izvora oddaljena 120 m v smeri vetra, 10 m bočno na smer vetra in je 2 m nad tlemi. Hitrost vetra na tej višini je 3,3 m/s, stabilnost ozračja je definirana z razredom D. Masno koncentracijo preračunajte še v volumski delež izražen v ppm.

Rešitev: Z uporabo enačb (5.5) in (5.6) izračunamo disperzijska koeficienta za $x = 120$ m:

$$\begin{aligned} \sigma_y &= \exp \left[4,23 + 0,9222 \ln \left(\frac{120}{1000} \right) - 0,0087 \left[\ln \left(\frac{120}{1000} \right) \right]^2 \right] \\ &= \exp [4,23 - 1,9553 - 0,0391] = 9,352 \end{aligned}$$

$$\sigma_z = 5,524$$

Masno koncentracijo izračunamo z enačbo (5.4):

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{0,3}{2\pi \cdot 9,352 \cdot 5,524 \cdot 3,3} \left[\exp \left(-\frac{10^2}{2 \cdot 9,352^2} \right) \right] \cdot \left[\exp \left(-\frac{(2-1)^2}{2 \cdot 5,524^2} \right) + \exp \left(-\frac{(2+1)^2}{2 \cdot 5,524^2} \right) \right] \\ &= 2,8 \cdot 10^{-4} \cdot 0,5646 \cdot [0,9837 + 0,8629] = \underline{\underline{2,92 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3}} \end{aligned}$$

Masno koncentracijo pretvorno še v volumski delež klora, ϕ (v ppm). Predpostavimo temperaturo 20 °C. Uporabimo plinsko enačbo:

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad \text{oz.} \quad V = m \frac{RT}{pM}$$

Na osnovi tega izračunamo volumen (v ml), ki ga zavzema $2,92 \cdot 10^{-4} \text{ kg} = 0,292 \text{ g}$ klora:

$$V = m \frac{RT}{pM} = 0,292 \text{ g} \frac{8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \cdot 293 \text{ K}}{10^5 \text{ Pa} \cdot 71 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 100 \text{ ml}$$

$$\text{Volumski delež je potem:} \quad \phi = \frac{100 \text{ ml}}{\text{m}^3} = \underline{\underline{100 \text{ ppm}}}$$

Izračunana vrednost presega vse tri vrednosti ERPG za klor.

5.4. Učinki požarov in eksplozij

Učinke požarov vrednotimo glede na doseženo toplotno sevanje, učinke eksplozij pa glede na dosežen nadtlak. Pri tem računamo razdalje, na katerih je dosežena določena raven sevanja oz. nadtlaka, ki povzroči specifične posledice na ljudeh in premoženju.

a) Učinki toplotnega sevanja

Učinek toplotnega sevanja je odvisen od gostote toplotnega (sevalnega) toka (v kW/m²) in časa izpostavljenosti. Prag bolečine pri človeku je dosežen, če je 20 s izpostavljen sevanju jakosti 4 kW/m². Pri višjih ravneh sevanja se ta čas hitro zmanjšuje. Za izračun toplotnega sevanja uporabimo računalniške programe, npr. PHAST (www.dnv.com), s katerimi lahko izračunamo razdalje za specifične ravni toplotnega sevanja. Nekatere od njih so prikazane v tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Referenčne vrednosti toplotnega sevanja

Toplotno sevanje (kW/m ²)	Opis učinkov
1,6	Neugodje pri dolgi izpostavljenosti
4	Bolečina po 20 s, opekline 3. stopnje niso pogoste, smrtnost 0 %
9,5	Prag bolečine dosežen v 8 s, opekline 2. stopnje po 20 s
12,5	Vžig lesa z inicialnim plamenom, taljenje plastičnih materialov
25	Vžig lesa brez inicialnega plamena
37,5	Poškodbe procesnih naprav

b) Učinki nadtlaka

Najznačilnejši učinek eksplozije je nadtlak, ki lahko poruši oz. poškoduje stavbe, opremo in ljudi. Za poškodbe stavb so potrebni bistveno višji nadtlaki kot za poškodbe ljudi. Vendar so ljudje pri eksplozijah pogosteje žrtve drugih (sekundarnih) učinkov, kot so npr. leteči predmeti, podirajoče se stavbe, oprema ipd. Zato računamo razdalje za vrednosti nadtlakov, ki povzročijo poškodbe na stavbah in opremi (tabela 5.3).

Tabela 5.3. Referenčne vrednosti nadtlaka

Nadtlak (mbar)	Opis učinkov
20	Varna razdalja; manjše poškodbe stropov; 10 % zlomljenih oken
70	Delno uničenje stavb – niso primerne za bivanje
140	Delna porušitev zidov in streh
207	Jeklene konstrukcije uničene, izpuljene iz temeljev; težke naprave (1,5 t) malo poškodovane
340-480	Skoraj popolno uničenje stavb, pri ljudeh poškodbe bobničev
690	Popolno porušenje stavb in opreme, razen naprav težjih od 6 t; pri ljudeh poškodbe pljuč

6. DOLOČANJE VERJETNOSTI IN POGOSTOSTI

Pogostost okvar ali nevarnih dogodkov izražamo s številom okvar ali nevarnih dogodkov na časovno enoto, kar imenujemo tudi **frekvenca** nevarnih dogodkov. Lahko pa jo izrazimo z **verjetnostjo**, ki je realno število med 0 in 1, je brez enote in predstavlja verjetnost, da se bo nevarni dogodek zgodil v opazovanem časovnem obdobju npr. v enem letu.

Kadar je na voljo dovolj podatkov iz preteklosti, lahko izračunamo pogostost nevarnih dogodkov na osnovi teh podatkov. V nasprotnem primeru uporabimo modelirne tehnike, kjer na osnovi podatkov o pogostosti okvar enostavnejših komponent sistema izračunavamo pogostost nevarnih dogodkov za sistem.

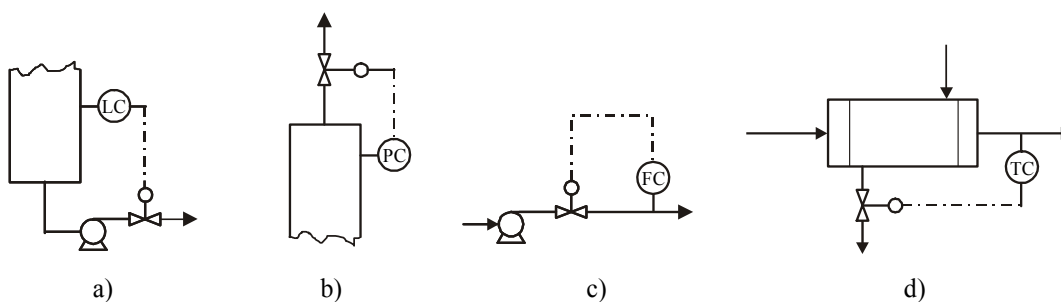
Najprimernejši pristop za določanje pogostosti nevarnih dogodkov je uporaba preteklih podatkov. Kadar pa preteklih podatkov ni na voljo, uporabimo različne modelirne metode, npr. **analizo drevesa odpovedi**, s katero izračunavamo pogostost nevarnega dogodka (npr. izpusta vnetljive tekočine) in **analizo drevesa dogodkov**, s katero določimo pogostosti različnih nevarnih dogodkov (npr. eksplozije, požara, razlitja ipd.).

Preden se lotimo omenjenih metod, si oglejmo osnove teorije zanesljivosti in razpoložljivosti.

6.1. Teorija zanesljivosti in razpoložljivosti

Področje, ki se ukvarja z verjetnostnimi metodami pri obravnavanju okvar v procesni industriji, se imenuje inženiring zanesljivosti. Pristop se je začel razvijati po II. svetovni vojni predvsem za potrebe ameriške vojske, ki je imela probleme z zanesljivostjo elektronskih naprav v orožju. Danes ga uporabljajo na področju obrambe, letalstva, elektronike in računalnikov. Teorija zanesljivosti je ključna pri poletih v vesolje oz. vesoljski tehniki in na področju nuklearne energije.

V procesni tehniki se uporablja veliko instrumentov (ventilov, črpalk, alarmov, regulatorjev, stikal itd.), ki merijo motnje in izvajajo ustrezne akcije, da motnja ne bi pripeljala do škodnega dogodka (slika 6.1). Od zanesljivosti takšnih instrumentov je odvisna varnost procesa.



Slika 6.1. Shematski prikaz regulacije a) nivoja, b) tlaka, c) pretoka, d) temperature

Zanesljivost je definirana kot verjetnost, da bo neka enota (sistem, del sistema) opravljala zahtevano funkcijo pod določenimi pogoji v določenem času. Iz definicije sta razvidni naslednji lastnosti zanesljivosti:

- zanesljivost je verjetnost in
- zanesljivost je funkcija časa.

Najprej bomo uvedli nekaj osnovnih pojmov verjetnosti.

6.1.1. Verjetnost

Intuitivno si vsakdo predstavlja, kaj pomeni beseda verjetnost, vendar pa lahko definiramo verjetnost na različne načine. Pri tem uporabljamo algebro dogodkov. Eksperiment, ki ga opazujemo, ima različne možne izhode. Dogodek je predstavljen z določeno množico izhodov, s katerimi se ta dogodek realizira. Npr. pri metu kocke je eden izmed dogodkov "met števila, ki je deljivo s 3". Ta dogodek predstavlja množica, v kateri sta dva izhoda: met števila 3 in met števila 6.

Med možnimi dogodki sta tudi nemogoč dogodek, za katerega velja, da se v eksperimentu ne more zgoditi in gotov dogodek, ki se pri eksperimentu vedno zgodi. Nemogoč dogodek pri metu kocke je, da ne vržemo nobenega števila in gotov dogodek je, da vržemo katerokoli število med 1 in 6.

a) Enaka verjetnost

Ena od definicij verjetnosti je zasnovana na principu enako verjetnih dogodkov. Vzemimo, da ima eksperiment n enako verjetnih in medsebojno neodvisnih izhodov. Med temi izhodi naj bo n_A takšnih, ki predstavljajo realizacijo dogodka A . Verjetnost dogodka A , $P(A)$, je potem enaka:

$$P(A) = \frac{n_A}{n} \quad (6.1)$$

Na ta način lahko izračunamo verjetnost vnaprej brez eksperimentov. Npr. pri metu kocke je možnih šest enako verjetnih dogodkov, verjetnost vsakega je $1/6$. Ali pri 52 igralnih kartah s štirimi asi je verjetnost, da potegnemo asa, enaka $4/52$.

PRIMER 6.1: Kakšna je verjetnost, da bomo pri metu kocke vrgli sodo število.

Rešitev: Dogodek A je v tem primeru met sodega števila in se lahko zgodi s tremi izhodi eksperimenta: če vržemo 2, 4 ali 6. Torej je verjetnost dogodka A enaka:

$$P(A) = \frac{n_A}{n} = \frac{3}{6} = \frac{1}{2}$$

PRIMER 6.2: V posodi je pet belih in tri rdeče žogice. Kakšna je verjetnost, da potegnemo iz posode rdečo žogico?

Rešitev: Ta primer ima osem enako verjetnih izhodov, od tega so trije izhodi poteg rdeče žogice, torej dogodek A . Verjetnost dogodka A je tako enaka:

$$P(A) = \frac{n_A}{n} = \frac{3}{8}$$

b) Relativna frekvenca

Inženirji najpogosteje uporabljajo definicijo verjetnosti, ki temelji na relativni frekvenci nekega dogodka: če izvedemo nek eksperiment n krat in se dogodek A zgodi n_A krat, potem je verjetnost dogodka A :

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_A}{n} \quad (6.2)$$

To verjetnost oz. njen približek lahko določimo eksperimentalno, če eksperiment ponovimo dovoljkrat.

Lastnosti verjetnosti so:

Verjetnost zavzame vrednosti med 0 in 1.

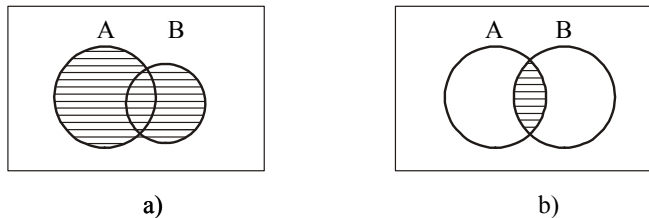
Verjetnost nemogočega dogodka je enaka 0.

Verjetnost gotovega dogodka je enaka 1.

c) Množice

Uporabljali bomo pojme, ki jih poznamo že iz osnovne šole:

- unija množic A in B (slika 6.2 a): $A \cup B$ ali $A + B$
- presek množic A in B (slika 6.2 b): $A \cap B$ ali $A \cdot B$
- prazna množica.



Slika 6.2. Unija (a) in presek (b) množic

d) Verjetnost unije dogodkov

Naj bo X dogodek, ki se zgodi, če se zgodi katerikoli izmed dogodkov A_i . Torej je X unija dogodkov A_i in njegova verjetnost je:

$$P(X) = P(\cup A_i) \quad (6.3)$$

Če so dogodki medsebojno neodvisni, se gornji izraz poenostavi v:

$$P(X) = P(A_1) + P(A_2) + \dots + P(A_n) = \sum_{i=1}^n P(A_i) \quad (6.4)$$

kar pomeni, da je verjetnost unije dogodkov, ki so med seboj neodvisni, vsota verjetnosti posameznih dogodkov.

e) Verjetnost preseka dogodkov

Naj bo X dogodek, ki se zgodi, ko se zgodijo vsi od n dogodkov A_i . Torej je X presek dogodkov A_i in njegova verjetnost je:

$$P(X) = P(\cap A_i) \quad (6.5)$$

Če so dogodki medsebojno neodvisni, se gornji izraz poenostavi v:

$$P(X) = P(A_1) \cdot P(A_2) \cdot \dots \cdot P(A_n) = \prod_{i=1}^n P(A_i) \quad (6.6)$$

kar pomeni, da je verjetnost preseka dogodkov, ki so med seboj neodvisni, produkt verjetnosti posameznih dogodkov.

Različni pojavi imajo različne predpise, s katerimi lahko izračunavamo verjetnosti. Te predpise imenujemo verjetnostne porazdelitve, npr. normalna ali Gaussova, lognormalna, eksponentna, pravokotna, binomna, Poissonova distribucija itd.

6.1.2. Funkcija zanesljivosti

Število komponent, ki so na začetku opazovanja pripravljene za obratovanje, naj bo n (npr. avtomobili voznega parka v nekem podjetju). Če je v času t odpovedalo $n_f(t)$ komponent (avtomobilov), je verjetnost zanesljivega delovanja ali zanesljivost, $R(t)$:

$$R(t) = 1 - \frac{n_f(t)}{n} \quad (6.7)$$

n število komponent na začetku opazovanja v času $t = 0$,
 $n_f(t)$ število komponent, ki so v času $(0, t]$ odpovedale.

Tako definirana zanesljivost pove, kakšna je verjetnost, da sistem ne bo odpovedal v času $(0, t]$. Na začetku intervala opazovanja je zanesljivost enaka 1, ker predpostavljamo, da so vse komponente brezhibno pripravljene za uporabo in je število okvarjenih komponent $n_f(t=0)$ enako nič. Zanesljivost nima enote, izražamo jo v odstotkih oz. deležih med 0 in 1. Zanesljivost lahko določimo tudi s štejetjem časovnih enot (dni, ur), v katerih sistem ne deluje zaradi okvare oz. popravila:

$$R(t) = 1 - \frac{t_n}{t} \quad (6.8)$$

t celotno časovno obdobje opazovanja (leta, dnevi, ure),
 t_n čas, ko sistem v opazovanem obdobju ne deluje (leta, dnevi, ure).

6.1.3. Funkcija nezanesljivosti

Nasprotje zanesljivosti je nezanesljivost, $F(t)$, ki izraža verjetnost, da bo sistem odpovedal v času $(0, t]$:

$$F(t) = \frac{n_f(t)}{n} \quad (6.9)$$

Zanesljivost in nezanesljivost sta povezani z naslednjo zvezo:

$$F(t) + R(t) = 1 \quad (6.10)$$

6.1.4. Funkcija pogostosti okvar

Pogostost okvar, $\lambda(t)$, je število okvar na enoto časa, ki ga delimo s številom delujočih komponent ob času t . Enota pogostosti okvar je 1/časovno enoto, npr. a^{-1} .

$$\lambda(t) = \frac{1}{n - n_f(t)} \frac{dn_f(t)}{dt} \quad (6.11)$$

Če zgornjo enačbo pomnožimo z n/n , dobimo:

$$\lambda(t) = \frac{n}{n - n_f(t)} \frac{dn_f(t)}{n dt} = \frac{1}{R(t)} \frac{dF(t)}{dt} = - \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt}$$

in sledi

$$- \frac{dR(t)}{R(t)} = \lambda(t) dt \quad (6.12)$$

Če je $\lambda(t)$ konstantna, jo označimo samo z λ in z integriranjem gornjega izraza dobimo eksponentno funkcijo:

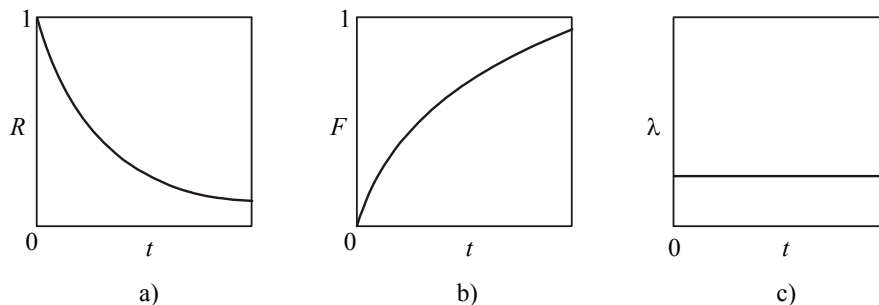
$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (6.13)$$

in $F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (6.14)$

kjer je $\lambda(t) = \lambda = \text{konst.}$

Pogostost okvar sistema izražamo v številu okvar sistema na časovno enoto delovanja, ali pri avtomobilih npr. na število prevoženih kilometrov.

Slika 6.3 kaže potek funkcij zanesljivosti, nezanesljivosti in pogostosti okvar.



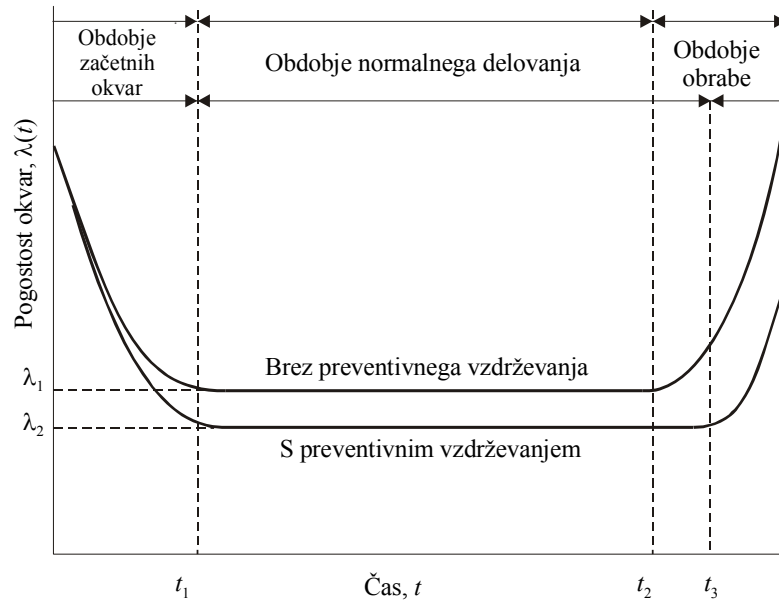
Slika 6.3. Funkcija zanesljivosti a), nezanesljivosti b) in pogostosti okvar c)

Iz slike 6.3a je razvidno, da zanesljivost s časom pada od 1 proti 0, nezanesljivost raste od 0 proti 1 (slika 6.3b) in pogostost okvar je konstantna (slika 6.3c).

6.1.5. Krivulja pogostosti okvar

Za pogostost okvar, λ , smo v prejšnjem poglavju predpostavili, da se s časom ne spreminja, zato je na sliki 6.3c predstavljena z vodoravno črto. Dejansko je pogostost okvar nekega sistema konstantna le v določenem življenjskem obdobju, sicer pa se spreminja; vemo namreč, da se stare naprave kvarijo bolj kot nove.

Celotno življenjsko dobo sistemov lahko razdelimo na tri obdobja: obdobje začetnih okvar, obdobje normalnega delovanja in obdobje izrabe. Za večino procesnih enot ima funkcija pogostosti okvar karakteristično krivuljo kopalne kadi (angl. Bath tub Curve) s tremi značilnimi obdobji (slika 6.4):



Slika 6.4. Krivulja pogostosti okvar v obliki kopalne kadi

a) Obdobje začetnih okvar

V začetnem obdobju prihaja do okvar zaradi napak pri proizvodnji (sestavi, montaži) sistema in zaradi človeških napak, ker uporabniki še ne znajo ravnati s sistemom. V tem obdobju se pojavijo okvare kot npr. poškodovani deli, slabi spoji, onesnažen material, napake pri zatesnitvi itd. Vendar prične pogostost okvar $\lambda(t)$ po odpravi začetnih težav padati do neke konstantne vrednosti.

b) Obdobje normalnega delovanja

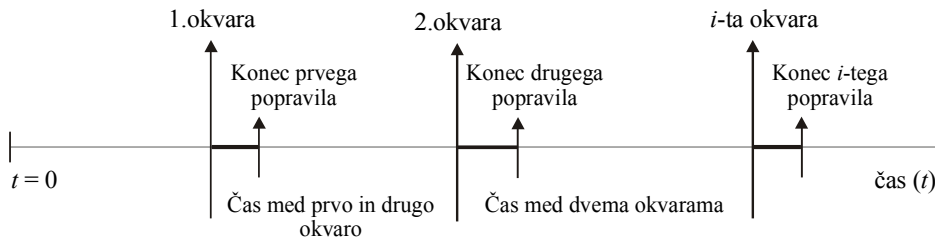
V obdobju normalnega delovanja prihaja do okvar zaradi naključnih in nepovezanih vzrokov. To obdobje je najboljše obdobje v življenjski dobi sistema, saj je pogostost napak najmanjša in zanesljivost sistema največja. Pogostost napak je konstantna in jo označimo samo z λ . Za zanesljivost in nezanesljivost uporabljamo enačbi (6.13) in (6.14). Ob koncu tega obdobja se začnejo pojavljati okvare zaradi obrabe.

c) Obdobje obrabe

V obdobju obrabe pogostost okvar $\lambda(t)$ s časom narašča. Zraven naključnih okvar se pojavijo predvsem okvare zaradi obrabe in staranja materiala. S preventivnim vzdrževanjem sistema lahko podaljšamo obdobje normalnega obratovanja, zmanjšamo pogostost napak v tem obdobju in skrajšamo obdobje obrabe.

6.1.6. Povprečni čas med okvarama

Podatki o pogostosti okvar so pogosto podani s srednjim časovnim intervalom med dvema okvarama, t_{MTBF} (slika 6.5).



Slika 6.5. Čas med dvema okvarama

Povprečni čas med okvarama izračunamo tako, da skupni obratovalni čas komponent v sistemu delimo s skupnim številom okvar. Če je pogostost okvar konstantna in enaka λ , je:

$$t_{\text{MTBF}} = \frac{1}{\lambda} \quad (6.15)$$

PRIMER 6.3: 10 enot v sistemu obratuje leto in pol. V tem času pride do treh okvar. Izračunajmo srednji časovni interval med okvarami, t_{MTBF} in pogostost okvar, λ .

Rešitev:

$$t_{\text{MTBF}} = \frac{10 \cdot 1,5 \text{ a}}{3} = \frac{15 \text{ a}}{3} = 5 \text{ a}$$

$$\lambda = \frac{1}{t_{\text{MTBF}}} = \frac{1}{5 \text{ a}} = 0,2 \text{ a}^{-1}$$

6.1.7. Zanesljivost nekaterih standardnih sistemov

a) Zaporedni sistemi

Zaporedni sistem deluje, če delujejo vsi njegovi členi. Zanesljivost zaporednega sistema, R , je produkt zanesljivosti njegovih členov, R_i :

$$R = \prod_{i=1}^n R_i = R_1 \cdot R_2 \cdot \dots \cdot R_n \quad (6.16)$$

Za eksponentno porazdelitev ob konstantni pogostosti okvar, λ_i , je:

$$R_i = \exp(-\lambda_i t) \quad (6.17)$$

in zato je zanesljivost sistema:

$$R = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right) \quad (6.18)$$

Če je pogostost okvar za celotni sistem enaka

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (6.19)$$

je zanesljivost zaporednega sistema

$$R = e^{-\lambda \cdot t} \quad (6.20)$$

b) Vzporedni sistemi

Vzporedni sistem deluje, če deluje vsaj eden od členov, ki sestavljajo sistem, oz. ne deluje, če so v okvari vsi členi. Nezanesljivost vzporednega sistema je produkt nezanesljivosti njegovih členov, F_i :

$$F = \prod_{i=1}^n F_i = F_1 \cdot F_2 \cdot \dots \cdot F_n = (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdot \dots \cdot (1 - R_n) \quad (6.21)$$

Zanesljivost sistema, R , je tako:

$$R = 1 - F = 1 - \prod_{i=1}^n F_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) \quad (6.22)$$

Za eksponentno porazdelitev velja:

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \exp(-\lambda_i t)) \quad (6.23)$$

PRIMER 6.4: Vzemimo letalo z dvema enakima motorjema, ki imata karakteristiko 1 okvara na 10 000 ur letenja ($t_{\text{MTBF}} = 10\,000$ h). Izračunajte zanesljivost letala za 4 ure letenja, če sta motorja vezana zaporedno in če sta vezana vzporedno.

Rešitev: za pogostost okvar in zanesljivost enega motorja uporabimo enačbi (6.15) in (6.13):

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \frac{1}{t_{\text{MTBF}}} = \frac{1}{10\,000 \text{ h}} = 0,0001 \text{ h}^{-1}$$

$$R_1 = R_2 = e^{-\lambda_1 t} = e^{-\lambda_2 t} = e^{-0,0001 \cdot 4} = \underline{\underline{0,99960}}$$

Za zaporedni sistem dveh motorjev velja enačba (6.16):

$$R = R_1 \cdot R_2 = 0,99960 \cdot 0,99960 = \underline{\underline{0,99920}}$$

Če lahko letalo deluje tudi z enim motorjem, uporabimo enačbo (6.22) za vzporedni sistem:

$$\begin{aligned} R &= 1 - (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) = 1 - (1 - 0,99960) \cdot (1 - 0,99960) \\ &= \underline{\underline{0,9999984}} \end{aligned}$$

c) Sistemi s komponentami v pripravljenosti (Standby systems)

Najenostavnejši sistem v pripravljenosti je takšen, kjer ena komponenta obratuje, ena ali več pa jih je v pripravljenosti. Vse komponente imajo enako pogostost napak v času obratovanja, medtem ko je pogostost napak v času mirovanja enaka 0. Če je pogostost okvar za takšen sistem λ in število napak, ki jih sistem lahko prenese oz. število enot v pripravljenosti, r , je zanesljivost:

$$\begin{aligned} R &= \exp(-\lambda t) \sum_{k=0}^r \frac{(\lambda t)^k}{k!} = \\ &= \exp(-\lambda t) \left(1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^r}{r!} \right) \end{aligned} \quad (6.24)$$

d) Zanesljivost sestavljenih sistemov

Zanesljivost sestavljenih sistemov izračunavamo postopoma z upoštevanjem enačb za zaporedne oz. vzporedne sisteme.

PRIMER 6.6: Izračunajte zanesljivost sistema, v katerem ena naprava obratuje, druga pa je v pripravljenosti. Naprava se pokvari enkrat na 100 ur. Čas obratovanja je 50 ur.

Rešitev: Zanesljivost ene same naprave, ki obratuje, izračunamo z enačbo (6.13), kjer je $\lambda = 1/100 \text{ h} = 0,01 \text{ h}^{-1}$.

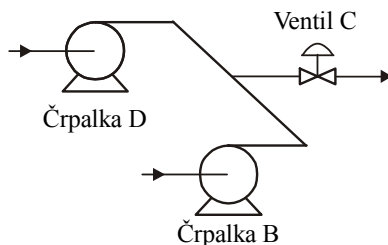
$$R = e^{-\lambda t} = e^{-0,01 \cdot 50} = \underline{\underline{0,6065}}$$

Če dodamo še eno napravo, ki ne obratuje, a je v pripravljenosti, uporabimo za izračun zanesljivosti enačbo (6.24) za $r=1$:

$$R = e^{-0,01 \cdot 50} (1 + 0,01 \cdot 50) = \underline{\underline{0,9098}}$$

Za vajo izračunajte, kako se spremeni zanesljivost sistema, če namestimo še eno rezervno napravo, tako da je $r = 2$.

PRIMER 6.7: Izračunajte, kakšna je verjetnost, da bo sistem, ki je prikazan na sliki, deloval. Črpalke B in D imata verjetnost brezhibnega delovanja 99 %, pri čemer je dovolj, da deluje ena črpalka. Pretok skozi črpalko uravnava ventil C, ki ima verjetnost zanesljivega delovanja 98 %.



Rešitev: Verjetnost zanesljivega delovanja črpalk, R_p , izračunamo z enačbo (6.22) za vzporedne sisteme:

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i) = 1 - (1 - 0,99)^2 = 0,9999$$

Zanesljivost ventila je $R_v = 0,98$. Zanesljivost celotnega sistema izračunamo z enačbo (6.16) za zaporedne sisteme:

$$R = R_p \cdot R_v = 0,9999 \cdot 0,98 = \underline{\underline{0,979902}}$$

6.1.8. Razpoložljivost

Delovanje popravljivih sistemov pogosto opišemo s funkcijo razpoložljivosti, $A(t)$. Definiramo jo kot verjetnost, da bo sistem deloval v poljubnem trenutku t , za razliko od zanesljivosti, ki predstavlja verjetnost, da bo sistem deloval ves časovni interval $(0, t]$. Če popravil ne opravljamo, je funkcija razpoložljivosti enaka funkciji zanesljivosti. Če popravila izvajamo, je funkcija razpoložljivosti enaka ali večja od funkcije zanesljivosti. Razpoložljivost je podana z enačbo:

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (6.25)$$

kjer je λ pogostost okvar sistema in μ pogostost popravil na časovno enoto.

μ je definirana kot obratna vrednost povprečnega časa trajanja popravila, t_{MTTR} , ki ga izračunamo tako, da vsoto časov trajanj vseh popravil delimo s številom popravljenih primerkov:

$$\mu = \frac{1}{t_{MTTR}} \quad (6.26)$$

Funkcijo razpoložljivosti lahko izračunamo, če poznamo povprečni čas popravila, t_{MTTR} , in povprečni čas med okvarami, t_{MTBF} :

$$A = \frac{t_{MTBF}}{t_{MTBF} + t_{MTTR}} \quad (6.27)$$

Razpoložljivost zaporednega sistema k komponent izračunamo z enačbo:

$$A = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^k \frac{1 - A_i}{A_i}} \quad (6.28)$$

kjer je A_i , razpoložljivost komponente i .

PRIMER 6.8: Proces ima dva dela, A in B, tako da B sledi A. Izračunajte razpoložljivost sistema z naslednjimi podatki: v sistemu A pride do okvare na 40 dni obratovanja, popravilo traja 6 dni. V sistemu B je okvara vsakih 30 dni in sledi 6 dni za popravilo.

Rešitev: enota A: $t_{MTBF} = 40$ d enota B: $t_{MTBF} = 30$ d
 $t_{MTTR} = 6$ d $t_{MTTR} = 6$ d

razpoložljivost obeh delov procesa izračunamo z enačbo (6.27):

$$A_A = \frac{40}{40 + 6} = 0,869 \quad \text{in} \quad A_B = \frac{30}{30 + 6} = 0,833$$

Razpoložljivost procesa je po enačbi (6.28):

$$A = \frac{1}{1 + \frac{1 - 0,869}{0,869} + \frac{1 - 0,833}{0,833}} = \underline{\underline{0,74}}$$

Podobno kot smo definirali nezanesljivost kot nasprotje zanesljivosti, lahko definiramo tudi nerazpoložljivost, $1 - A$, ki predstavlja verjetnost, da v trenutku t sistem ne bo deloval zaradi okvare.

6.1.9. Razpoložljivost varnostnih sistemov, ki jih redno preverjamo

Varnostni sistemi (kot npr. varnostni ventili na tlačnih posodah) so namenjeni preprečevanju nevarnih dogodkov. Nekateri varnostni sistemi delujejo tako, da omogočijo sprostitev presežne energije (npr. varnostni ventili), drugi pa energijo izolirajo (npr. alarmi in sistemi za izključitev). Veliko okvar varnostnih sistemov ostane skritih, dokler se ne pojavi dogodek, ki zahteva njihovo delovanje. Zaradi tega je potrebno takšne sisteme redno preverjati (testirati). Včasih se sproži delovanje varnostnega sistema brez potrebe zaradi okvare, kar imenujemo "varna okvara sistema" (fail-safe failure), npr. varnostni ventil se odpre pri nižjem tlaku od nastavljenega. Kadar sistem ne reagira, ko bi moral, je to "nevarna okvara sistema" (fail-danger failure).

Pomemben podatek za delovanje varnostnih sistemov je njihova nerazpoložljivost, ki je definirana kot verjetnost, da ne bodo delovali ravno takrat, ko jih bomo potrebovali. Definirajmo nekaj izrazov:

- **POGOSTOST NEVARNIH DOGODKOV V PROCESU ALI DELU PROCESA (H)** je število nevarnih dogodkov na enoto časa in ima dimenzijo T^{-1} (npr. dogodki/leto = a^{-1}). Npr. kako pogosto tlak v posodi naraste čez načrtovano vrednost in povzroči eksplozijo ali kako pogosto naraste nivo v hranilniku previsoko in poplavi hranilnik.
- **VARNOSTNI SISTEM** je skupina instrumentov, ki preprečuje pojav nevarnega dogodka, npr. varnostni ventil, eksplozijska loputa, sistem za prekinitev neke operacije ali obratovanja procesa.
- **TESTNI INTERVAL (τ_p)** je časovno obdobje med dvema zaporednima preizkusoma varnostnega sistema in ima dimenzijo časa (npr. teden, mesec, leto).
- **POGOSTOST POJAVLJANJA POTREBE PO DELOVANJU VARNOSTNEGA SISTEMA (D)** je število dogodkov, ki zahtevajo aktiviranje varnostnega sistema, na časovno enoto. Npr. kako pogosto naraste tlak v posodi na nastavljeni tlak varnostnega ventila (dimenzija T^{-1} , enota npr. a^{-1}).

- POGOSTOST OKVAR (λ) je število okvar varnostnega sistema na časovno enoto, pri čemer je večina okvar naključnih (dimenzija T^{-1} , enota npr. a^{-1}).
- ČASOVNI DELEŽ NEDELOVANJA (ϕ) je nerazpoložljivost varnostnega sistema, $\phi = 1 - A$, in predstavlja delež "mrtvega časa", ko varnostni sistem ne deluje, pa tega ne opazimo. To je dejansko časovno obdobje od takrat, ko je varnostni sistem odpovedal, do takrat, ko varnostni sistem spet testiramo in opazimo okvaro, izražen kot delež obdobja med dvema okvarama.

Če pride do potrebe po delovanju varnostnega sistema ravno takrat, ko je varnostni sistem v okvari, bo prišlo do nevarnega dogodka, če ne, bomo odpoved varnostnega sistema odkrili pri naslednjem testiranju.

Ker smo predpostavili, da so okvare naključne, lahko predpostavimo, da pride do okvare na sredini časovnega intervala med dvema testiranjema, τ_p , torej je čas, ko instrument ne deluje, enak $\tau_p/2$. Ta interval preračunamo kot delež časovnega intervala med dvema okvarama:

$$\phi = \frac{\frac{\tau_p}{2}}{t_{MTBF}} = \lambda \frac{\tau_p}{2} \quad (6.29)$$

Pogostost nevarnih dogodkov v procesu lahko zapišemo kot produkt pogostosti okvar varnostnega sistema in verjetnosti, da bo prišlo do potrebe po delovanju varnostnega sistema ravno takrat, ko bo le-ta v okvari, torej v času $\tau_p/2$:

$$H = \lambda \cdot \left(1 - e^{-\frac{D\tau_p}{2}} \right) \quad (6.30)$$

Z enačbo (6.30) lahko napovemo pogostosti nevarnih dogodkov H , ki jih ne bi mogli določiti s štetjem, ker se zgodijo prereditko (npr. eksplozije), lahko pa jih določimo na osnovi rezultatov testiranj varnostnih sistemov (npr. ventilov).

PRIMER 6.9: Izračunajmo nerazpoložljivost varnostnega ventila in pogostost eksplozije tlačne posode zaradi odpovedi varnostnega ventila. Proizvajalec zagotavlja, da varnostni ventil odpove enkrat v sto letih. Vzdrževalci v podjetju ga testirajo enkrat letno. Tehnologi so zabeležili, da tlak v posodi naraste čez načrtovanega enkrat letno.

Rešitev: Iz besedila naloge razberemo, da je pogostost okvare varnostnega ventila $\lambda = \frac{1}{100 \text{ a}} = 0,01 \text{ a}^{-1}$ in testni interval $\tau_p = 1 \text{ a}$. Z enačbo (6.29) izračunamo nerazpoložljivost varnostnega ventila:

$$\phi = \lambda \frac{\tau_p}{2} = 0,01 \text{ a}^{-1} \cdot \frac{1 \text{ a}}{2} = 0,005$$

kar pomeni, da ventil 0,5 % časa ni na razpolago oz. ne deluje. Če ravno v tem času tlak v posodi prekomerno naraste, bo posoda eksplodirala.

Z enačbo (6.30) izračunamo pogostost eksplozije, pri čemer vzamemo podatek tehnologov za $D = 1 \text{ a}^{-1}$:

$$H = 0,01 \text{ a}^{-1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{1 \text{ a}^{-1} \cdot 1 \text{ a}}{2}} \right) = 0,0039 \text{ a}^{-1} = \frac{1}{254 \text{ a}}$$

To pomeni, da ocenjujemo, da bo prišlo do eksplozije tlačne posode enkrat v okoli 250 letih.

PRIMER 6.10: Za enostavni varnostni sistem izračunajte časovni delež nedelovanja in pogostost nevarnih dogodkov, če je:

- pogostost okvar varnostnega sistema enkrat na dve leti
- varnostni sistem testiramo enkrat na teden
- potreba po delovanju varnostnega sistema se pojavi enkrat na leto.

Rešitev: $\phi = 0,48 \%$, $H = 0,00477 \text{ a}^{-1}$ ali enkrat na 210 let.

PRIMER 6.11: Izračunajte časovni delež nedelovanja in pogostost nevarnih dogodkov za varnostni sistem iz primera 6.10, če testiramo varnostni sistem enkrat mesečno ter enkrat letno.

Rešitev: pri mesečnem testiranju $\phi = 2,08 \%$ in $H = 0,0204 \text{ a}^{-1}$ ali enkrat na 50 let,
pri letnem testiranju $\phi = 25 \%$ in $H = 0,1967 \text{ a}^{-1}$ ali enkrat na 5 let.

PRIMER 6.12: Izračunajte, kako pogosto se lahko zgodi avtomobilska nesreča zaradi odpovedi zavor. Podatki so naslednji:

- zavore pregleđamo enkrat letno (kot je predpisano po zakonu),
- zavore odpovejo enkrat na 10 let,
- ocenimo, da potrebujemo zavore 10 000 krat na leto.

Rešitev: $\phi = 0,05$ in $H = 0,1 \text{ a}^{-1}$ ali enkrat na 10 let.

Ta rezultat kaže, da je pogostost nesreč zaradi zavor enaka pogostosti odpovedi zavor.

6.2. Določanje pogostosti z uporabo preteklih podatkov

Ta pristop je uporaben, kadar imamo o nevarnem dogodku, ki ga raziskujemo, na voljo dovolj podatkov iz preteklosti. Opazovano obdobje mora biti dovolj dolgo (5 ali več let), da dobimo ustrezno velik vzorec. Pogostost ponavljanja dogodka izračunamo tako, da število dogodkov, ki smo ga dobili v literaturi, delimo s številom vseh izpostavljenih sistemov. Npr. če je bilo med 250 opazovanimi hranilniki amoniaka v desetih letih 5 velikih izpustov amoniaka, je pogostost izpusta $5/(250 \cdot 10) = 0,002$ izpusta na hranilnik na leto.

Obstaja veliko pisnih in elektronskih baz podatkov o nesrečah in okvarah, ki so se zgodile v preteklosti, iz katerih lahko dobimo informacije o njihovi pogostosti .

6.3. Drevo odpovedi (FTA - angl. Fault Tree Analysis)

Drevo odpovedi je logični diagram, ki pokaže, kako lahko pride do odpovedi sistema oz. do nevarnega dogodka. Z njim določamo pogostost ali verjetnost nevarnih dogodkov na osnovi logičnega modela, ki temelji na kombiniranju odpovedi osnovnih komponent sistema, okvar varnostnih sistemov in človeške (ne)zanesljivosti (npr. določimo pogostost velikega požara, ki je posledica okvare črpalke, ki črpa vnetljivo tekočino).

Metoda temelji na kombiniranju enostavnih logičnih vrat IN ter ALI, s čemer ustvarimo model, ki opisuje odpoved sistema. Pogostost ali verjetnost nevarnega dogodka (npr. eksplozije vrele tekočine, izpust varnostnega ventila, pobeg kemijske reakcije) izračunamo z uporabo podatkov o pogostosti enostavnejših nezaželenih dogodkov. Osnovna predpostavka metode je, da so vse odpovedi v sistemu **binarne**, to pomeni, da komponenta sistema bodisi deluje bodisi ne deluje. Zraven kvantitativnega ovrednotenja nevarnega dogodka, s to metodo poglobimo tudi razumevanje nastanka potencialno nevarnega dogodka. Metoda je v kemijski procesni industriji zelo razširjena, še zlasti na področju zanesljivosti kompleksnih varnostnih in kontrolnih sistemov.

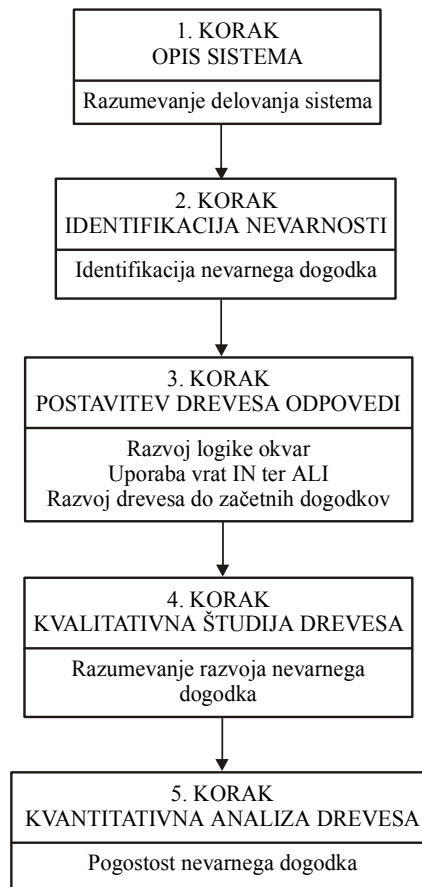
6.3.1. Izrazi

Izrazi, ki jih uporabljamo v analizi drevesa odpovedi, so naslednji:

Nezaželen dogodek	je nezaželeno odstopanje od normalnega stanja sistema oz. odpoved neke komponente sistema.
Nevarni dogodek	je nezaželen dogodek na vrhu drevesa, ki ga razvijamo v smeri od osnovnejših dogodkov z uporabo logičnih vrat.
Osnovni dogodek	je dogodek, ki je dovolj osnoven, da ne zahteva nadaljnjega razvoja. Njegovo pogostost ali verjetnost ocenimo na osnovi teorije zanesljivosti in razpoložljivosti.
Vmesni dogodek	je dogodek, preko katerega začetni (osnovni) dogodek napreduje skozi zaporedje do končnega dogodka.
Neraziskan dogodek	je dogodek, ki ni dovolj raziskan zaradi pomanjkanja podatkov.
Robni dogodek	je dogodek, ki je določen s pogoji na postavljeni meji (robu) sistema.
Logična vrata	predstavljajo logično zvezo med vhodnimi dogodki in izhodnim dogodkom in so lahko dveh vrst: logična vrata IN povezujejo vhodne dogodke tako, da obstaja izhod iz vrat samo, če obstajajo vsi vhodi. logična vrata ALI povezujejo vhodne dogodke tako, da dobimo izhod, če obstaja vsaj en vhod.

6.3.2. Opis metode

Postopek poteka v zaporednih stopnjah, kot jih prikazuje slika 6.6.



Slika 6.6. Prikaz uporabe drevesa odpovedi

a) Opis sistema in postavitve mej

Ta stopnja je zelo pomembna, ker lahko dobro razumemo vzroke za nevarne dogodke samo, če dobro vemo, kako sistem deluje. Zato je potrebno poznati:

- kemijske in fizikalne pojave, ki potekajo v procesu,
- posebne informacije za vsak tok v procesu (npr. termodinamika),
- nevarne lastnosti snovi,
- procesno shemo,
- shemo procesne regulacije in varnostnih elementov,
- obratovanje procesa (normalno obratovanje, vzdrževanje, zagon, ustavitve...),
- človeški faktor,
- dejavnike okolja itd.

b) Identifikacija nevarnosti

Za identifikacijo nevarnosti lahko uporabimo npr. metodo HAZOP. Namen tega koraka je identifikacija najpomembnejših nevarnih oz. nezaželenih dogodkov, ki bodo na vrhu drevesa in jih bomo razvijali v drevesu okvar. Ker je razvoj drevesa odpovedi zamuden, priporočajo, naj bo število nevarnih oz. nezaželenih dogodkov med 10 in 20.

c) Razvoj drevesa odpovedi

Izgradnja drevesa odpovedi je ustvarjalna naloga, zato ni splošnih pravil, katere vmesne dogodke in katera logična vrata naj vključimo v drevo. Običajno gradimo drevo od vrha proti dnu, pri čemer je na vrhu drevesa nezaželen nevarni dogodek (npr. eksplozija, izpust nevarne snovi...), za katerega ne moremo oceniti frekvence na osnovi preteklih podatkov. Za ta

dogodek nato iščemo zadostne in potrebne vzroke z uporabo logičnih vrat. Pri tem se sprašujemo: kako lahko pride do tega dogodka? Ali, kakšni so vzroki za ta dogodek? Takšno deduktivno razmišljanje nadaljujemo, dokler ne pridemo do začetnega dogodka, ki je dovolj jasen, da lahko ocenimo njegovo pogostost ali verjetnost. Takšni osnovni dogodki v procesu so npr. odpoved črpalke, odpoved ventila, človeška napaka ipd., za katere lahko najdemo podatke o frekvencah oz. verjetnostih odpovedi pri proizvajalcih ali v literaturi.

Vzemimo, naj bo na vrhu drevesa nezaželen dogodek "svetilka v sobi ne sveti". Drevo razvijamo tako, da razmišljamo, zakaj se takšen dogodek lahko zgodi:

1. vzrok je lahko v žarnici ali v
2. elektriki.

Sedaj iščemo vzroke za ti dve možnosti. Vzroka za problem z žarnico sta lahko:

1. žarnica je pregorela ali
2. žarnice v luči sploh ni.

Do problemov z elektriko lahko pride zaradi tega, ker:

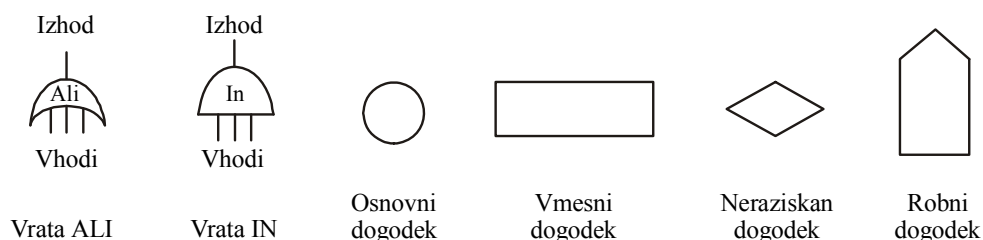
1. svetilka ni povezana z električno vtičnico,
2. v vtičnici ni elektrike ali
3. je pokvarjeno stikalo.

Naprej lahko raziskujemo, zakaj v vtičnici ni elektrike:

1. pregorela je varovalka,
2. kratek stik v vodniku,
3. v vsej hiši ni elektrike.

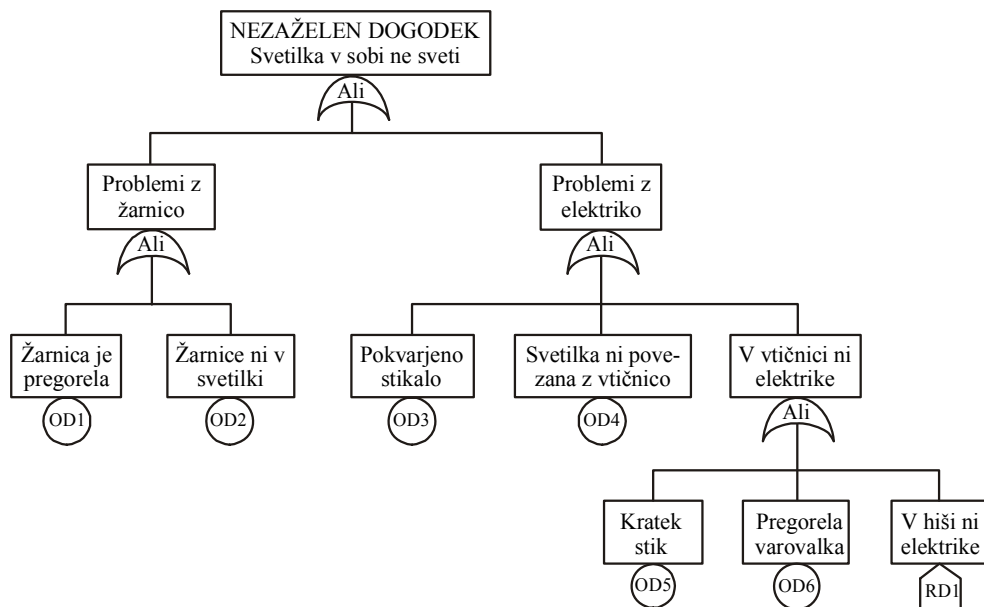
S proceduro nadaljujemo tako dolgo, dokler nismo zadovoljni z modelom, ki opisuje nastanek preiskovanega dogodka. Seveda se pojavi vprašanje, kdaj končati. V zgornjem primeru bi npr. lahko nadaljevali z raziskovanjem vzrokov, zakaj v hiši ni elektrike in bi našli naslednje vzroke: zaradi motenj v električnem distribucijskem sistemu, ali zaradi problemov pri proizvodnji električne energije, ali je motena dobava goriva proizvajalcu elektrike ipd. To kaže, kako pomembno je natančno definirati meje sistema, kajti problemov izven teh meja ne bomo analizirali dalje.

Ko smo končali zgornji postopek, se lotimo izgradnje drevesa odpovedi. Pri tem uporabljamo standardne simbole (slika 6.7), zraven katerih pa vseeno še na kratko označimo, kaj predstavljajo, za tiste uporabnike, ki ne poznajo metode.



Slika 6.7. Standardni simboli v drevesu odpovedi

Z uporabo teh simbolov lahko za primer odpovedi svetilke narišemo naslednje drevo odpovedi (slika 6.8), kjer OD označuje osnovni dogodek:



Slika 6.8. Drevo odpovedi za primer "svetilka v sobi ne sveti"

d) Kvalitativna analiza drevesa odpovedi

Ko je drevo odpovedi sestavljeno, je potrebno natančno pregledati njegovo strukturo, da bi čim boljše razumeli, kako pride do odpovedi. Pri tem je pomembno tudi to, da raziščemo odpovedi, ki nastanejo zaradi istega vzroka, npr. odpovedi različnih varnostnih sistemov zaradi izpada električnega toka. Če se takšen vzrok pojavi v dveh različnih vejah drevesa, ki sta povezani z vrati IN, bomo dobili pri kvantitativni analizi drevesa nepravilen rezultat.

e) Kvantitativna analiza drevesa odpovedi

Zadnji korak procedure je kvantitativna analiza drevesa, s katero lahko izračunamo pogostost (frekvenco) ali verjetnost nezaželenega dogodka na vrhu drevesa. Najprej moramo oceniti ali poiskati v literaturi frekvence vseh osnovnih in neraziskanih dogodkov.

Za izračun frekvence dogodka na vrhu drevesa uporabimo pristop "od vrat do vrat" (obstajajo tudi kompleksnejše metode, ki so primernejše za zelo velika drevesa, vendar jih tukaj ne bomo obravnavali). Pri tej metodi začnemo na dnu drevesa z osnovnimi dogodki in nadaljujemo proti vrhu drevesa. Vsi vhodi v vrata morajo biti definirani, preden izračunamo izhod. Vsa nižja vrata morajo biti definirana, preden nadaljujemo na višji nivo. Matematične zveze, ki jih uporabljamo, so zbrane v tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Pravila za računanje po metodi "od vrat do vrat"

Vrata	Kombinacije vhodov	Izračun izhoda	Enota
ALI	P_A ALI P_B	$P(A \text{ ALI } B) \approx P_A + P_B$	
	F_A ALI F_B	$F(A \text{ ALI } B) = F_A + F_B$	t^{-1}
	P_A ALI F_B	kombinacija ni dovoljena	
IN	P_A IN P_B	$P(A \text{ IN } B) = P_A \cdot P_B$	
	F_A IN P_B	$F(A \text{ IN } B) = F_A \cdot P_B$	t^{-1}

S P je označena verjetnost, ki nima enote in z F je označena pogostost ali frekvenca z enoto čas^{-1} (t^{-1}), najpogosteje leto (a^{-1}). Za vse vhode v vrata velja, da so medsebojno neodvisni. Posebnost vrat IN je v tem, da lahko imajo poljubno število vhodov, ki so podani z verjetnostmi, vendar pa samo en vhod s frekvenco.

PRIMER 6.13 Izdelajte drevo odpovedi za dogodek, ki je opisan v nadaljevanju in izračunajte njegovo pogostost. Nevarni dogodek je eksplozija posode zaradi prevelikega porasta tlaka.

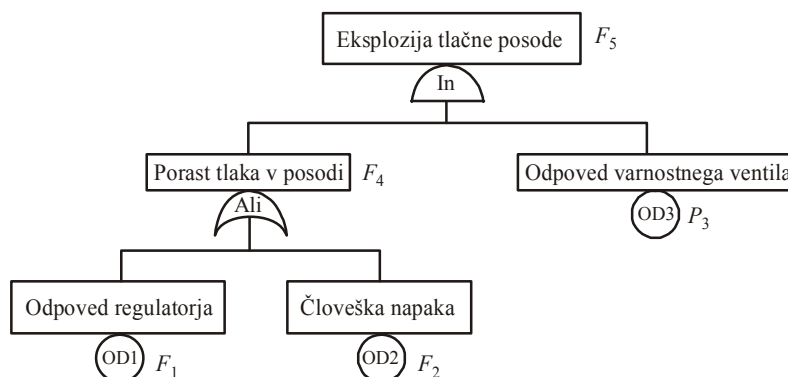
Do tega dogodka pride, če:

- v posodi naraste tlak in hkrati
- odpove varnostni ventil (verjetnost odpovedi varnostnega ventila je 0,5 %).

Tlak v posodi naraste, če:

- odpove regulator (pogostost odpovedi regulatorja je enkrat na 15 mesecev) ali
- če naredi napako operater (operater naredi napako enkrat v 4 letih).

Rešitev: Najprej gradimo drevo od vrha proti dnu, nato računamo v obratni smeri.



$$F_1 = \frac{1}{15 \text{ mesecev}} = \frac{1}{15 \text{ mesecev}} \cdot \frac{12 \text{ mesecev}}{a} = 0,8 a^{-1}$$

$$F_2 = \frac{1}{4 a} = 0,25 a^{-1}$$

$$F_4 = F_1 + F_2 = 0,8 a^{-1} + 0,25 a^{-1} = 1,05 a^{-1}$$

$$F_5 = F_4 \cdot P_3 = 1,05 a^{-1} \cdot 0,005 = 0,00525 a^{-1} = \frac{1}{190 a}$$

Osnovne značilnosti metode FTA lahko strnemo v naslednjih točkah:

- metoda FTA je kvantitativna metoda za ocenjevanje frekvenc nevarnih dogodkov, ki jih sicer ne bi mogli določiti s štetjem, ker se zgodijo prereditko,
- metoda ima tudi kvalitativen pomen, saj omogoča natančen vpogled v različne možne scenarije, ki z določenim zaporedjem dogodkov lahko privedejo do hudih nezgod,
- na vrhu drevesa je nevarni dogodek, nato pa drevo razvejujemo z uporabo vprašanj: kako, zakaj, čemu pride do določenega dogodka oz. iščemo različne možne vzroke za "nastanek" tega dogodka in pri tem uporabljamo logična vrata IN ter ALI,
- drevo razvejujemo tako dolgo, dokler ne pridemo do robnih ali osnovnih dogodkov, ki so toliko elementarni, da so njihove frekvence znane iz literature (npr. odpoved ventila, črpalke...),

- izračun izvajamo od dna drevesa, t.j od osnovnih dogodkov proti vrhu drevesa do vrhnjega dogodka ob upoštevanju računskih pravil iz tabele 6.1.

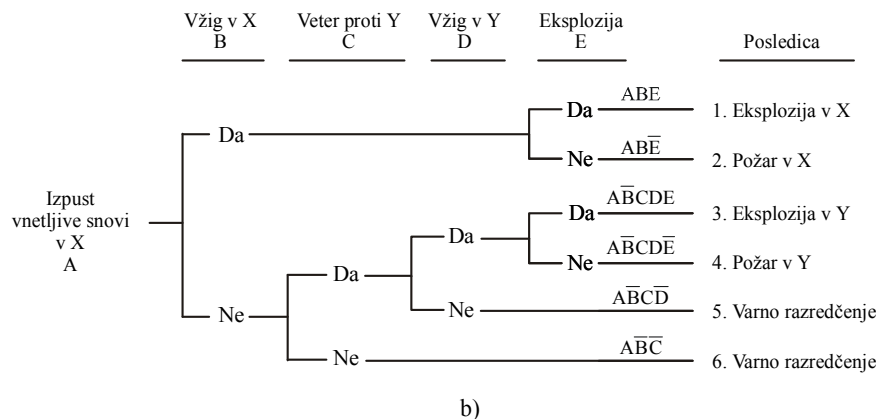
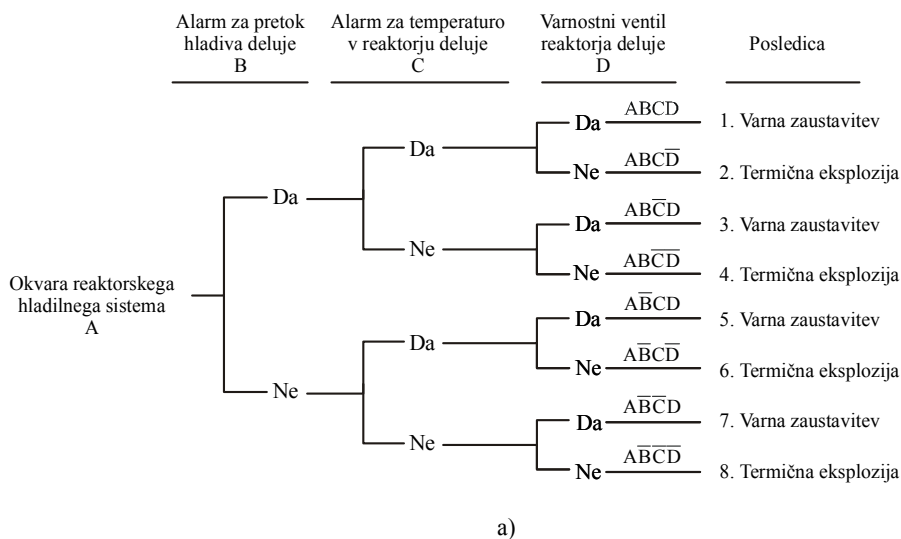
6.4. Drevo dogodkov (ETA - angl. Event Tree Analysis)

Drevo dogodkov je logični grafični model, ki identificira in ovrednoti možne posledice nekega začetnega dogodka ter prikazuje časovno zaporedje napredovanja tega dogodka.

Metoda drevesa dogodkov je zelo razširjena v nuklearni in kemijski procesni industriji. uporablja se na dva načina:

1. "pred dogodkom" za raziskovanje sistemov, ki preprečujejo razvoj nekega začetnega dogodka v nevarni dogodek (nesrečo). Lahko se uporablja za ocenjevanje učinkovitosti varnostnih sistemov.
2. "po dogodku" za raziskovanje možnih posledic nevarnega dogodka (npr. požar, eksplozija vrele tekočine, izpust nevarne snovi itd.) in ocenjevanje verjetnosti teh posledic.

Slika 6.9 prikazuje obe možni uporabi. Primer metode "pred dogodkom" (slika 6.9a) prikazuje, kako začetni dogodek (okvara reaktorskega hladilnega sistema) napreduje do nevarnega dogodka (termična eksplozija v reaktorju). Drugi primer (slika 6.9b) prikazuje, kakšne posledice lahko ima izpust vnetljive snovi v točki X na neki lokaciji Y v smeri vetra.



Slika 6.9. Primer uporabe drevesa dogodkov pred (a) in po dogodku (b)

6.4.1. Opis metode

Drevo dogodkov ima enako strukturo kot drevo odpovedi. Vsak naslednji dogodek je posledica predhodnega dogodka. Končni dogodek (na vrhu) drevesa odpovedi je lahko začetni dogodek drevesa dogodkov. Razlika med drevesom odpovedi in dogodkov je v tem, da ima drevo odpovedi več začetnih dogodkov, ki vodijo do končnega dogodka na vrhu drevesa, medtem ko ima drevo dogodkov en sam začetni dogodek, ki vodi do več možnih končnih dogodkov. Tudi razvoj dogodkov je enak pri obeh drevesih, le da drevo dogodkov običajno razvijamo od leve proti desni, drevo odpovedi pa od dna proti vrhu.

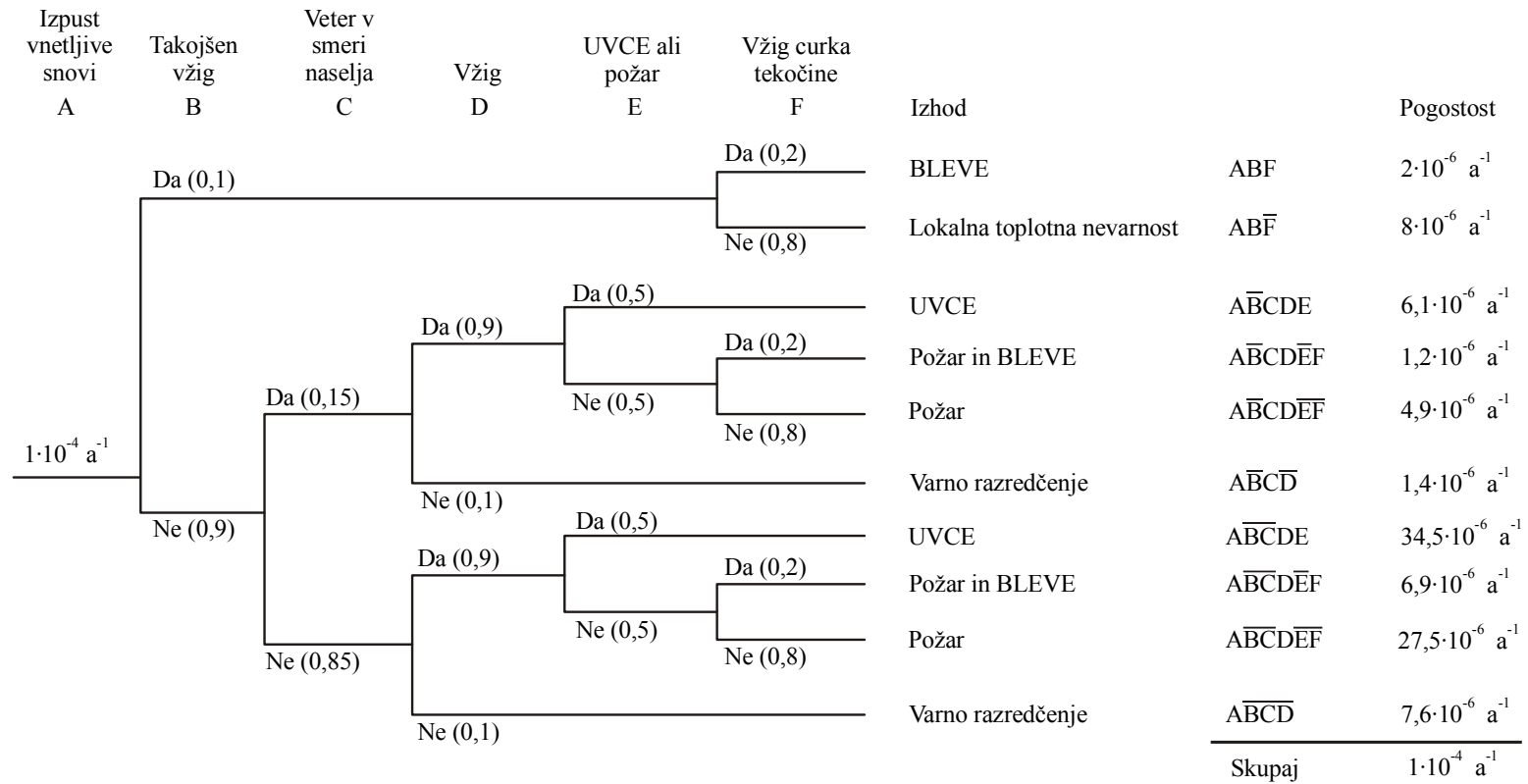
V večini primerov je začetni dogodek neka okvara, ki povzroči izpust nevarne snovi, npr. počena cev, poškodba v steni rezervoarja, notranja eksplozija itd. Drevo dogodkov kaže napredovanje tega dogodka do različnih nevarnih posledic (izhodov). Pogostost izhodov dobimo z množenjem pogostosti začetnega dogodka in verjetnosti različnih pogojev vzdolž vseh poti drevesa od leve proti desni.

PRIMER 6.14: Izdelajmo drevo dogodkov za izpust velike količine vnetljive snovi iz hranilnika. Analiza je pokazala, da so možne posledice tega dogodka eksplozija razpenjajoče tekočine (BLEVE), če pride do vžiga. Če se snov ne vžge takoj, para potuje proti naselju, kjer lahko eksplodira (UVCE) ali se vname. Podatki so naslednji:

Dogodek	Pogostost ali verjetnost dogodka
A Izpust vnetljive snovi	$1 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$
B Takojšen vžig	0,1
C Veter v smeri naselja	0,15
D Vžig blizu naselja	0,9
E Eksplozija ali velik požar	0,5
F Vžig curka tekočine	0,2

Rešitev: prikazuje slika 6.10. Izhodi in njihove pogostosti so prikazane v spodnji tabeli.

Izhod (posledica)	Pogostost
BLEVE	$2,0 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$
Požar	$4,9 \cdot 10^{-6} + 27,5 \cdot 10^{-6} = 32,4 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$
Požar in BLEVE	$1,2 \cdot 10^{-6} + 6,9 \cdot 10^{-6} = 8,1 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$
UVCE	$6,1 \cdot 10^{-6} + 34,5 \cdot 10^{-6} = 40,6 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$
Lokalne toplotne nevarnosti	$8,0 \cdot 10^{-6} = 8,0 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$
Varno razredčenje	$1,4 \cdot 10^{-6} + 7,6 \cdot 10^{-6} = 9,0 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$
Skupaj	$= 100,0 \cdot 10^{-6} \text{ a}^{-1}$



Slika 6.10. Rešitev primera 6.14

7. OCENJEVANJE TVEGANJA

Nevarni dogodek, ki je prerasel v nesrečo, lahko povzroči po eni strani materialno škodo in po drugi strani poškodbe in celo smrt ljudi. Če lahko posledice nekega incidenta ocenimo kvantitativno, lahko zapišemo enačbo za oceno tveganja:

$$R = f \cdot L \quad (7.1)$$

kjer je:

- R tveganje (denarna enota / časovna enota; npr. \$/a),
 f pogostost (frekvenca) dogodka (t^{-1} ; npr. a^{-1}),
 L škoda, ki jo povzroči dogodek (denarna enota na dogodek; npr. \$).

Če lahko škodo ocenimo v denarnem znesku, lahko to vrednost primerjamo s stroški varnostnih sistemov ali s stroški za spremembo načrta, ki je potrebna za preprečevanje dogodka oz. zmanjšanje tveganja. Če npr. ocenjena škoda znaša 1 milijon \$ in se dogodek zgodi enkrat v 1000 letih, je povprečni letni znesek 1000 \$/a. Iz tega sledi, da se za preprečevanje tega incidenta splača porabiti največ 1000 \$ letno in ne več.

Vendar pa je škodo največkrat težko oceniti, še posebej v primeru izgube življenj, saj velja pravilo, da vrednosti človeškega življenja ni dovoljeno vrednotiti v denarnem smislu. Zato ocenjeno tveganje primerjamo z nekimi kriteriji, ki jih postavimo glede na tveganje, ki so mu ljudje izpostavljeni v vsakodnevem življenju ali glede na povprečno tveganje v določeni industrijski panogi.

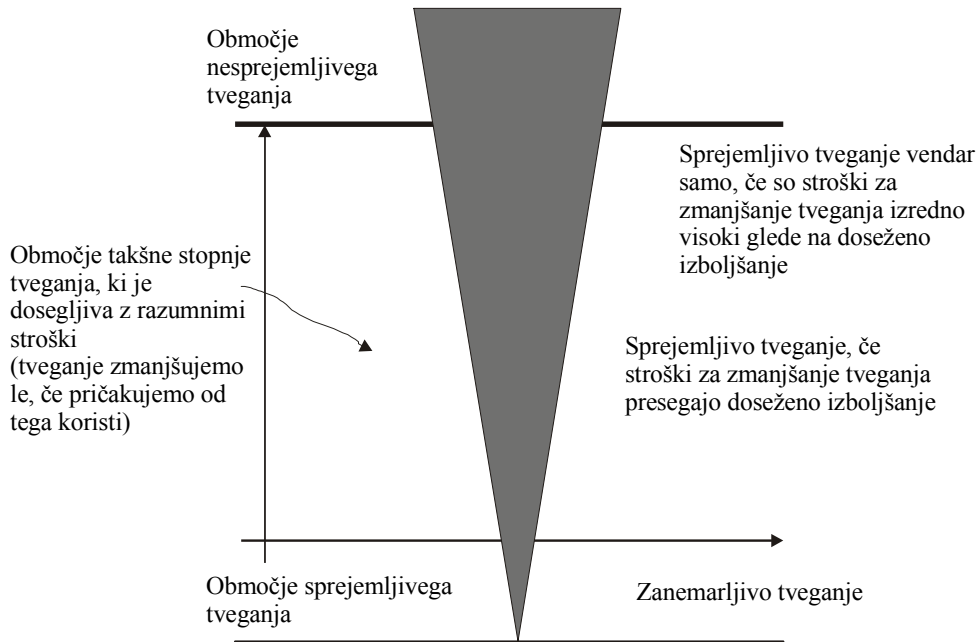
Ljudje smo namreč ves čas izpostavljeni tveganju, ki smo ga pripravljani sprejeti, če ocenjujemo, da je dejavnost, ki je z njim povezana, za nas koristna ali pomembna. Tabela 7.1 prikazuje tveganje za izgubo življenja pri različnih dejavnostih, ki jih sprejemamo prostovoljno in tveganja, na katera nimamo vpliva.

Tabela 7.1. Nekatere vsakodnevne dejavnosti, ki so povezane s tveganjem

	Tveganje na osebo na leto	
Rak	$280 \cdot 10^{-5}$	(1 na 360)
Nesreče na cesti (ZDA)	$24 \cdot 10^{-5}$	(1 na 4000)
Umor	$1 \cdot 10^{-5}$	(1 na 100 000)
Kajenje (20 cigaret na dan)	$500 \cdot 10^{-5}$	(1 na 200)
Pitje (1 steklenica vina na dan)	$75 \cdot 10^{-5}$	(1 na 1300)
Gorsko plezanje (100 h/a)	$400 \cdot 10^{-5}$	(1 na 250)
Skupno tveganje (človek pri 20ih)	$100 \cdot 10^{-5}$	(1 na 1000)
Skupno tveganje (človek pri 60ih)	$1000 \cdot 10^{-5}$	(1 na 100)
Udar strele	10^{-7}	(1 na $10 \cdot 10^6$)
Nesreča v jedrski elektrarni	10^{-7}	(1 na $10 \cdot 10^6$)
Poplave (Nizozemska)	10^{-7}	(1 na $10 \cdot 10^6$)
Letalska nesreča	$0,2 \cdot 10^{-7}$	(1 na $50 \cdot 10^6$)
Meteorit	10^{-11}	(1 na $100 \cdot 10^9$)

Mejo med sprejemljivim in nesprejemljivim tveganjem je težko postaviti, ker nihče ne more v imenu drugega odločati, kakšno tveganje je zanj sprejemljivo in kakšno ne. Zato ponekod namesto enega nivoja tveganja uporabljajo dva: zgornja meja predstavlja tveganje, ki ne sme biti nikoli preseženo in spodnja meja predstavlja tveganje, ki ga ni potrebno zmanjševati, ker je zanemarljivo majhno (slika 7.1). V vmesnem območju sicer težimo k zmanjšanju tveganja, vendar

samo, če so vlaganja, ki so potrebna, sorazmerna z doseženim izboljšanjem. Tveganje blizu zgornje meje je sprejemljivo samo, če so za majhno zmanjšanje tveganja potrebna nesorazmerno velika vlaganja. Takemu načinu obravnavanja tveganja pravimo tudi princip ALARP (angl. As Low As Reasonably Practicable).



Slika 7.1. Območja tveganja

Tveganje je definirano kot merilo za ekonomsko škodo, poškodbe ljudi ali izgubo življenj in smo ga izrazili z zvezo med pogostostjo in obsegom škode nekega dogodka. V tem poglavju bomo predstavili, kako izražamo tveganje, kako ga prikazujemo in kako ga izračunavamo. Kvantitativno ga izražamo na tri načine: z indeksi tveganja, kot tveganje posameznika in kot skupinsko tveganje. Pri tem se je treba zavedati, da imamo pri analizi tveganja vedno opravka z ocenjenimi vrednostmi.

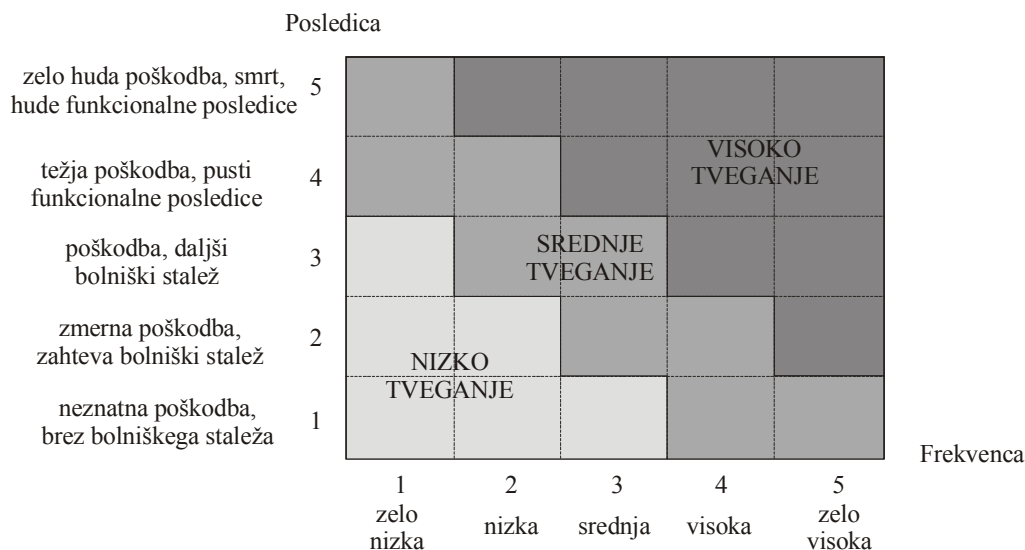
Popolnoma kvantitativno izražanje tveganja je za prakso ponavadi prezahtevno, zato za hitre ocene pogosto uporabimo različne kvalitativne ali polkvantitativne tehnike (npr. "semaforski" sistem).

7.1. Polkvantitativno izražanje tveganja

Polkvantitativno izražanje tveganja temelji na naslednji definiciji:

$$\text{tveganje} = \text{posledica} \times \text{frekvenca}$$

pri čemer posledico in frekvenco (pogostost) nevarnosti izrazimo opisno kot npr. nizka, srednja, visoka ali s števili od 1 do 5. Nato s pomočjo tabele (slika 7.2.) ovrednotimo tveganje npr. kot nizko (ukrepanje ni potrebno), srednje (potrebno je srednjeročno ukrepanje) ali visoko (potrebno je takojšnje ukrepanje).



Slika 7.2. Polkvantitativna ocena tveganja

7.2. Indeksi tveganja

Indeksi tveganja so izraženi s samostojnimi številčnimi vrednostmi ali tabelarično. Izračunane vrednosti primerjamo z vnaprej postavljenimi kriteriji.

7.2.1. Pogostost nesreč s smrtnim izidom (FAR)

Indeks FAR (Fatal Accident Rate) predstavlja število smrtnih primerov na 10^8 ur izpostavljenosti. To ustreza približno celotni delovni dobi 1000 ljudi ($1000 \cdot 50 \text{ let} \cdot 260 \text{ delovnih dni / leto} \cdot 8 \text{ ur / dan} \approx 10^8 \text{ ur}$). FAR pove, koliko ljudi bo izgubilo življenje v tovarni s 1000 zaposlenimi v celotni delovni dobi, npr. 40 let.

FAR izračunavajo iz statističnih podatkov za različne industrijske panoge, nekaj tipičnih vrednosti prikazuje tabela 7.2.

Tabela 7.2. Indeks FAR za nekatere poklicne in nepoklicne dejavnosti

	FAR	Tveganje na osebo na leto
Profesionalni boksarji	20 000	0,4
Posadka letala	200	$4 \cdot 10^{-3}$
Delo na naftni ploščadi	82	$165 \cdot 10^{-5}$
Ribolov	44	$88 \cdot 10^{-5}$
Miniranje v premogovniku	10	$20 \cdot 10^{-5}$
Gradbeništvo	7,5	$17,5 \cdot 10^{-5}$
Delo v ladjedelnici	5,25	$10,5 \cdot 10^{-5}$
Kemijska in sorodne industrije	4,25	$8,5 \cdot 10^{-5}$
Skupaj proizvodna industrija	1,15	$2,3 \cdot 10^{-5}$
Proizvodnja tovornih vozil	0,75	$1,5 \cdot 10^{-5}$
Proizvodnja oblačil	0,25	$0,5 \cdot 10^{-5}$

Tabela 7.2. Nadaljevanje

Vožnja z vlakom	3	$6 \cdot 10^{-5}$
Vožnja z avtobusom	4	$8 \cdot 10^{-5}$
Doma	4	$8 \cdot 10^{-5}$
Vožnja z avtomobilom	48	$9,6 \cdot 10^{-4}$
Vožnja z letalom	190	$3,8 \cdot 10^{-3}$
Kanjoning	670	0,0134
Jadrarno letenje	1000	0,02
Vožnja z motorjem	1040	0,021

Iz tabele 7.2 je razvidno, da je indeks FAR za kemijsko industrijo okoli 4. Sestavljen je iz običajnega tveganja (npr. padeč po stopnicah, udarec predmeta ipd.) in kemijskega tveganja (požar, izpust strupenih snovi...). V kemijski procesni industriji je splošno sprejeto pravilo, da je treba prioriteto odpraviti vsa tveganja, za katera je FAR večji od 0,4, odpravljanje manjših tveganj pa je odvisno od razpoložljivih sredstev. To velja za tveganje zaposlenih ljudi, medtem ko predlagajo, da tveganje prebivalcev, ki živijo ob tovarni, naj ne bi presevalo vrednosti indeksa FAR 0,001, kar ustreza verjetnosti izgube življenja zaradi udara strele.

PRIMER 7.1: Izračunajmo maksimalno dopustno pogostost nesreče, da indeks FAR ne bo presegel vrednosti 0,4. Ob tem predpostavimo, da je čas izpostavljenosti 365 dni letno in 24 h dnevno.

Rešitev:

$$FAR = 0,4 \Rightarrow f = \frac{0,4}{10^8 \text{ h}} \frac{365 \cdot 24 \text{ h}}{\text{a}} = 3,504 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1} \approx \frac{1}{28500 \text{ a}}$$

Največja dovoljena frekvenca nesreče je torej $3,5 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$.

7.2.2. Povprečna stopnja smrtnosti (ARD)

Indeks ARD (Average Rate of Death) je definiran kot število smrtnih slučajev, ki jih pričakujemo zaradi vseh možnih vzrokov na enoto časa.

7.3. Tveganje posameznika

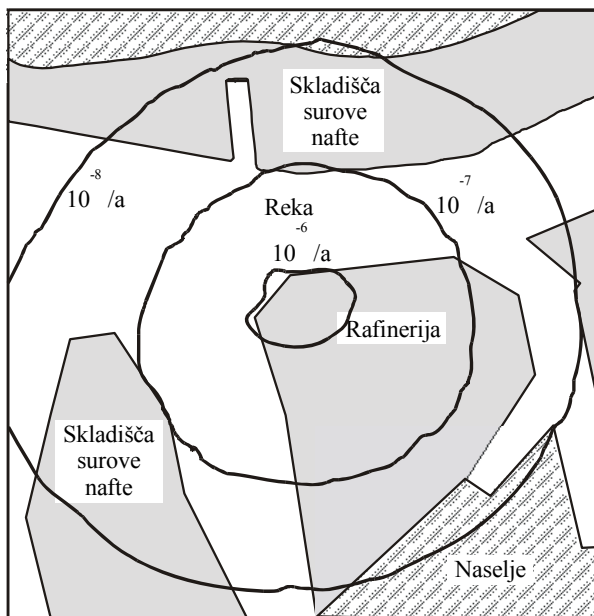
Tveganje posameznika je definirano kot tveganje osebe, ki se nahaja v bližini nevarnosti. Odvisno je od vrste poškodbe, ki jo lahko povzroči nesreča, od verjetnosti nesreče in od časa izpostavljenosti. Izražamo ga lahko za najbolj izpostavljene osebe, za skupine oseb na določenih mestih ali kot povprečno tveganje posameznika.

7.3.1. Krivulje individualnega tveganja

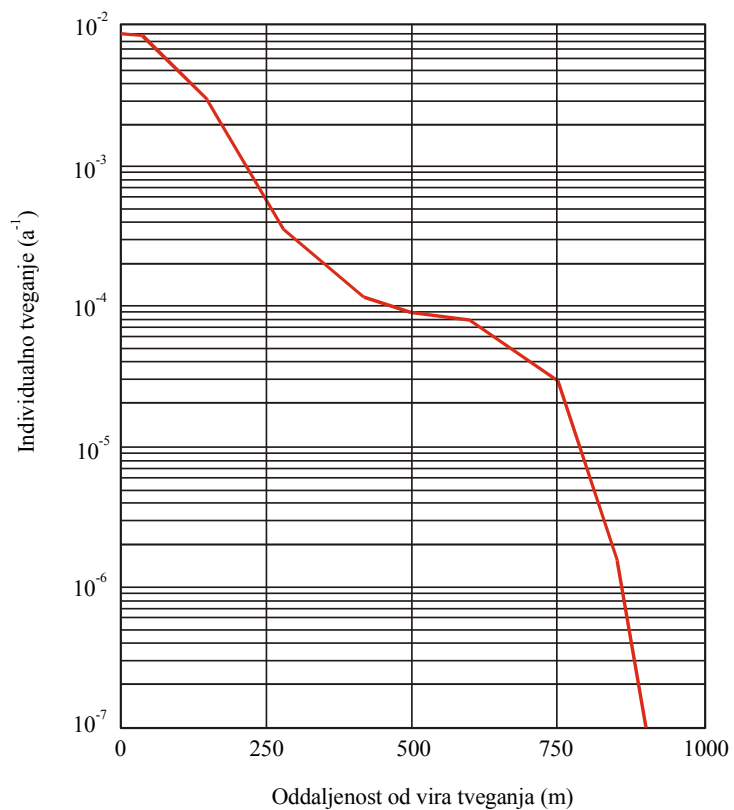
Individualno tveganje običajno predstavimo grafično s krivuljami enakega tveganja (slika 7.3) in s profili tveganja (slika 7.4).

Krivulje kažejo prostorsko porazdelitev tveganja posameznika, oz. pričakovano frekvenco dogodka, ki lahko povzroči škodo na določeni lokaciji ne glede na to, ali je tam kdo prisoten ali ne. Krivulje tveganja povezujejo točke z enakim tveganjem (krivulje "izotveganja", po analogiji npr. izobare - točke z enakim tlakom).

Profili individualnega tveganja kažejo individualno tveganje kot funkcijo oddaljenosti od vira nevarnosti in predstavljajo poenostavitev krivulj enakega tveganja.



Slika 7.3. Krivulje individualnega tveganja



Slika 7.4. Profil individualnega tveganja

7.3.2. Maksimalno individualno tveganje

Je največje tveganje, ki mu je lahko izpostavljen posameznik. Tu gre najpogosteje za tehnologe in zaposlene na konkretnem nevarnem delu procesa. Določimo ga z uporabo kontur individualnega tveganja tako, da določimo maksimalno vrednost.

7.3.3. Povprečno individualno tveganje

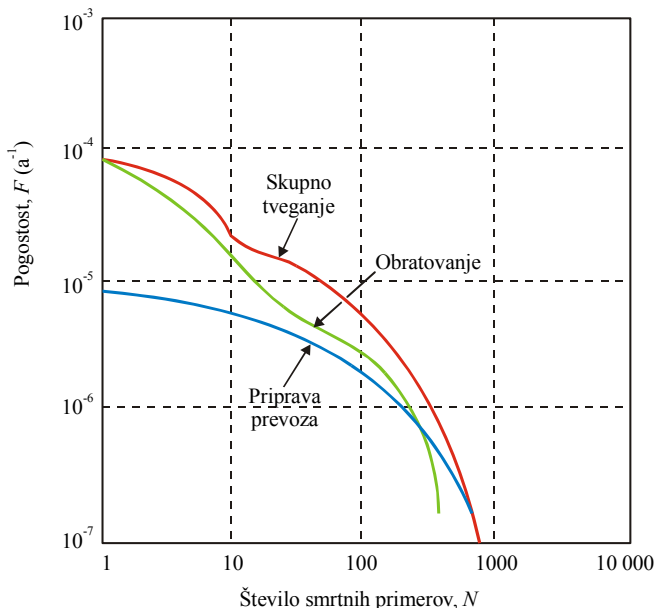
je tveganje, ki so mu v povprečju izpostavljeni ljudje zaradi neke nevarnosti. Uporabno je samo v primeru, ko je tveganje enakomerno porazdeljeno, sicer so rezultati napačni.

7.4. Skupinsko tveganje

Nekatere nesreče lahko prizadenejo veliko množico ljudi in skupinsko tveganje je merilo za tveganje, ki mu je izpostavljena skupina ljudi. Največkrat je izraženo grafično kot pogostost incidenta v odvisnosti od števila smrtnih žrtev incidenta. Izračun skupinskega tveganja zahteva definiranje naseljenosti v okolici obrata in tudi vrsto naseljenosti (npr. stanovanjsko območje, šole in vrtci, industrijsko območje).

Razliko med tveganjem posameznika in skupine pojasnjuje naslednji primer: v poslovni zgradbi blizu kemijske tovarne je v delovnem času 400 zaposlenih, izven delovnega časa pa le en čuvaj. Če je verjetnost nekega incidenta, ki lahko povzroči smrtne žrtve, enaka skozi cel dan, je vsak posameznik v tej zgradbi izpostavljen določenemu individualnemu tveganju, ki je neodvisno od števila prisotnih ljudi. Skupinsko tveganje pa je veliko večje v delovnem času, ko je prisotno 400 ljudi, kot sicer, ko je izpostavljena ena sama oseba.

Skupinsko tveganje izraža število ljudi, ki bi lahko bili izpostavljeni nekemu nevarnemu dogodku. Običajno ga predstavljamo z grafom $F-N$ (frekvenca-število). Krivulja $F-N$ predstavlja kumulativno frekvenco v odvisnosti od posledice, ki je izražena s številom smrtnih primerov. Običajno na ordinati in abscisi uporabimo logaritemsko skalo, ker zajemata frekvenca in število smrtnih primerov zelo široko območje vrednosti (več velikostnih razredov). Slika 7.5 prikazuje krivuljo $F-N$ za obrat s tekočim vnetljivim plinom.



Slika 7.5. Krivulja $F-N$ skupinskega tveganja

7.5. Postopek za izračunavanje tveganja

Izračunavanje tveganja začnemo z analizo individualnega tveganja, sledi analiza skupinskega tveganja in nazadnje lahko izračunamo indekse tveganja.

7.5.1. Analiza individualnega tveganja

Metoda, ki jo uporabimo za izračun individualnega tveganja na neki geografski lokaciji v bližini obrata, predpostavlja, da so prispevki vseh nevarnih dogodkov (incidentov) aditivni, to pomeni, da se seštevajo. Zato je tveganje posameznika v vsaki točki enako vsoti tveganj, ki izhajajo iz vseh nevarnih dogodkov:

$$IR = \sum_{i=1}^n IR_i \quad (7.2)$$

kjer je:

IR celotno individualno tveganje na neki geografski lokaciji (a^{-1}),
 IR_i individualno tveganje na neki geografski lokaciji, ki izhaja iz nevarnega dogodka i (a^{-1}),
 n število nevarnih dogodkov.

Primer: izpust nestrupene vnetljive snovi lahko povzroči naslednje dogodke, ki predstavljajo nevarnost oz. tveganje za ljudi: vžig curka tekočine, vžig razlite tekočine, eksplozija vrele tekočine (BLEVE), eksplozija parnega oblaka (UVCE) ali varno razredčenje, če ne pride do vžiga.

Tveganje ljudi zaradi nevarnega dogodka i izračunamo z enačbo:

$$IR_i = f_i p_i \quad (7.3)$$

kjer je:

f_i pogostost (frekvenca) dogodka i (a^{-1}),
 p_i verjetnost, da bo dogodek i povzročil smrtne žrtve.

a) Krivulje individualnega tveganja

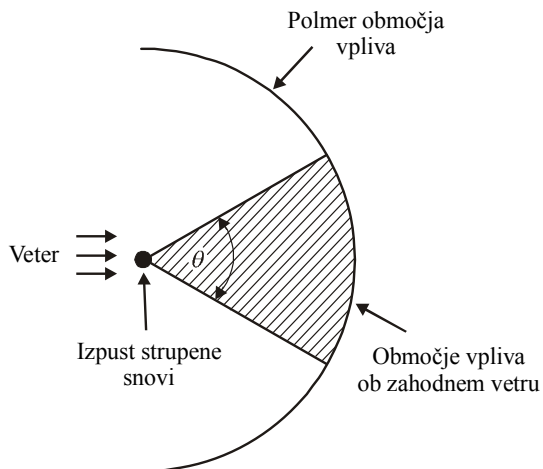
Krivulje individualnega tveganja izračunamo na predpostavkah, da vse nevarnosti izhajajo iz točkastega izvora in da lahko veter piha v katerokoli smer z enako verjetnostjo. Na ta način dobimo krivulje v obliki krožnic. Krožnice izračunamo v naslednjih korakih:

1. Najprej naredimo seznam nevarnih dogodkov.
2. Za vse nevarne dogodke določimo pogostost in velikost območja, na katerem imajo negativen vpliv na ljudi. Poenostavljeno je to področje določeno s krožnico, katere polmer je enak razdalji od točke, kjer se je zgodil nevarni dogodek, do točke, kjer le-ta ne predstavlja več nevarnosti za ljudi.
3. Za tiste nevarne dogodke, na katere vpliva smer vetra (npr. širjenje oblaka strupene ali vnetljive snovi), ima območje vpliva obliko krožnega izseka, ki je podan s kotom θ (slika 7.6). Če predpostavimo, da lahko piha veter v katerokoli smer z enako verjetnostjo, moramo ocenjeno frekvenco nevarnega dogodka ($f_{i,oc}$) ustrezno zmanjšati:

$$f_i = f_{i,oc} \frac{\theta}{360} \quad (7.4)$$

kjer je:

θ kot, ki določa območje vpliva ($^{\circ}$).



Slika 7.6. Območje vpliva nevarnega dogodka v odvisnosti od smeri vetra

4. Nato v ustreznem merilu vrišemo na zemljevid krožnice z ustreznimi polmeri za vse dogodke in jih oštevilčimo po vrsti od zunanje proti notranji krožnici, torej po padajočem polmeru (prva je največja krožnica, zadnja je najmanjša krožnica). Tveganje, ki je povezano z vsako krožnico, izračunamo z enačbo:

$$IR_i = IR_{i-1} + f_i \quad (7.5)$$

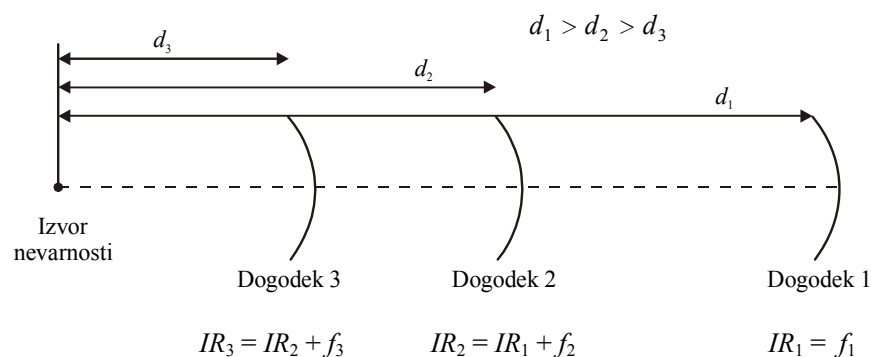
kjer je:

IR_i individualno tveganje na območju, ki ga določa krožnica dogodka i (a^{-1}),
 IR_{i-1} individualno tveganje na območju, ki ga določa krožnica dogodka $i-1$ (a^{-1}),

Za prvo (največjo) krožnico je IR_1 enak kar f_1 , saj je IR_0 enako 0. Nato pa pri vsaki naslednji krožnici prištejemo njeno frekvenco. Postopek nadaljujemo, dokler ne pridemo do zadnje (najmanjše) krožnice. Proceduro prikazuje slika 7.7 za podatke v tabeli 7.3.

Tabela 7.3. Podatki za prikaz postopka izračunavanja krivulj enakega tveganja (slika 7.7)

Dogodek	Vpliv vetra na dogodek	θ	Frekvenca dogodka (a^{-1})	Polmer območja vpliva
1	Ne	-	f_1	d_1
2	Da	45°	f_2 (korekcija z enačbo (7.4))	d_2
3	Ne	-	f_3	d_3



Slika 7.7. Prikaz postopka za izračun krivulj individualnega tveganja

PRIMER 7.2: Primer se nanaša na prečrpavanje tekočega klora iz rezervoarja v vlakovno cisterno. Denimo, da smo z metodo HAZOP določili tri najbolj nevarne dogodke, z uporabo drevesa odpovedi smo določili njihove frekvence in z uporabo Pasquill-Gifford-ove enačbe smo izračunali velikost območja vpliva za vse dogodke. Podatki so zbrani v tabeli. Za opisani primer izračunajmo in narišimo krivulje individualnega tveganja.

Dogodek	Opis	Frekvenca dogodka (a^{-1})	Vpliv vetra na dogodek	θ	Območja vpliva (m)
1	Izpust pare zaradi zunanjega požara	$3,0 \cdot 10^{-6}$	Da	15°	360
2	Izpust tekočega klora	$5,8 \cdot 10^{-4}$	Da	15°	230
3	Izpust plinastega klora	$6,6 \cdot 10^{-4}$	Da	15°	64

Rešitev: Ker veter vpliva na vse dogodke, preračunamo njihove ocenjene frekvence z uporabo enačbe (7.4):

$$f_1 = 3,0 \cdot 10^{-6} \frac{15}{360} = 1,25 \cdot 10^{-7} a^{-1}$$

$$f_2 = 5,8 \cdot 10^{-4} \frac{15}{360} = 2,42 \cdot 10^{-5} a^{-1}$$

$$f_3 = 2,75 \cdot 10^{-5} a^{-1}$$

Dogodki so že razporejeni po padajočem polmeru, zato lahko z enačbo (7.5) izračunamo tveganje za prvo krožnico:

$$IR_1 = f_1 = \underline{\underline{1,25 \cdot 10^{-7} a^{-1}}}$$

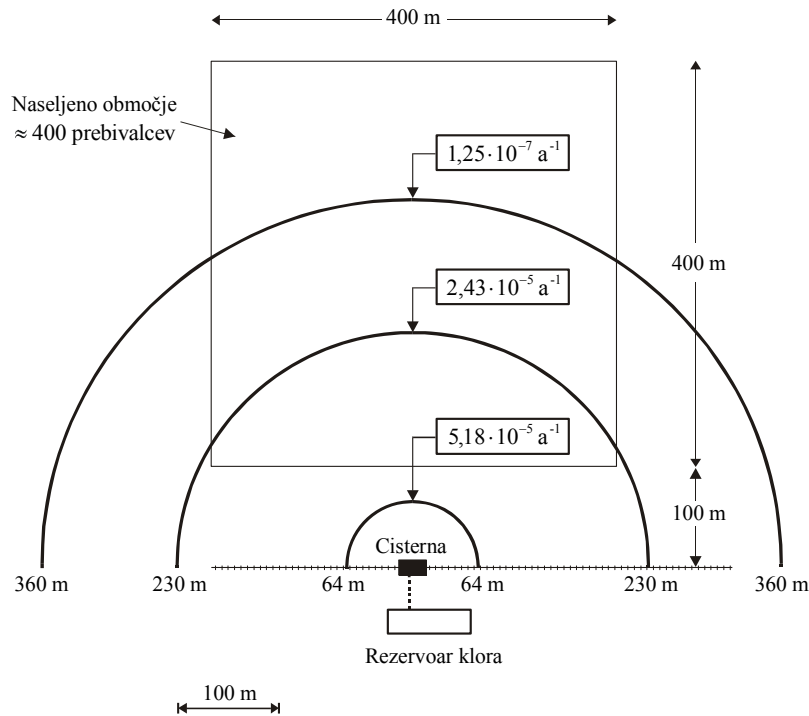
Vrednost za drugo krožnico dobimo tako, da prištejemo frekvenco drugega dogodka:

$$IR_2 = IR_1 + f_2 = 1,25 \cdot 10^{-7} + 2,42 \cdot 10^{-5} = \underline{\underline{2,43 \cdot 10^{-5} a^{-1}}}$$

In še za tretjo:

$$IR_3 = IR_2 + f_3 = 2,43 \cdot 10^{-5} + 2,75 \cdot 10^{-5} = \underline{\underline{5,18 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}}}$$

Rešitev je grafično prikazana na sliki 7.8.



Slika 7.8. Krivulje individualnega tveganja za primer 7.2

b) Maksimalno individualno tveganje

Maksimalno individualno tveganje določimo tako, da določimo individualno tveganje na vseh lokacijah, kjer se nahajajo ljudje in poiščemo največjo vrednost.

c) Povprečno individualno tveganje izpostavljene populacije

Povprečno individualno tveganje izračunamo iz vrednosti individualnih tveganj za vse ljudi, ki so izpostavljeni tveganju zaradi nekega obrata. Zato določimo vsa območja, kjer se nahajajo ljudje. Nato določimo tveganja na teh območjih in število ljudi, ki se tam nahajajo.

7.5.2. Analiza skupinskega tveganja

Za izračun krivulje $F-N$, s katero izražamo skupinsko tveganje, moramo oceniti, koliko ljudi je ogroženih zaradi nekega nevarnega dogodka. Zato moramo dobiti podatke o tem, koliko ljudi se nahaja na območju, na katerem lahko nevarni dogodek povzroči smrt ljudi. Postopek poteka tako:

1. Iz analize individualnega tveganja uporabimo podatke o frekvencah nevarnih dogodkov in velikostih njihovih območij vpliva.

2. Nato te podatke povežemo s podatki o naseljenosti, tako da z naslednjo enačbo ocenimo, koliko ljudi je ogroženo zaradi nevarnega dogodka:

$$N_i = N_{p,i} p_i \quad (7.6)$$

kjer je:

- N_i število ogroženih ljudi zaradi nevarnega dogodka i ,
- $N_{p,i}$ celotno število ljudi na območju vpliva dogodka i ,
- p_i verjetnost, da bo dogodek i povzročil smrtne žrtve.

Podatke prikažemo v tabeli, kjer navedemo seznam vseh nevarnih dogodkov z njihovimi frekvencami in številom ogroženih ljudi. Nato izračunamo kumulativne frekvence z enačbo:

$$F_N = \sum_i f_i \quad \text{za vse dogodke, za katere je } N_i < N \quad (7.7)$$

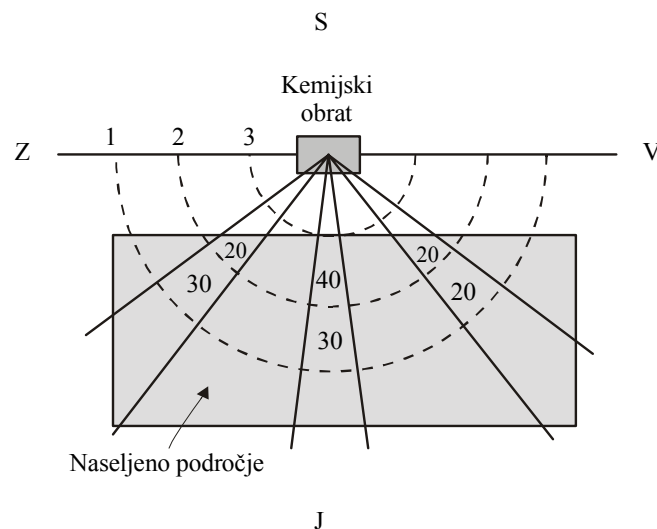
kjer je:

- F_N frekvenca vseh nevarnih dogodkov, ki ogrožajo N ali več ljudi,
- f_i pogostost (frekvenca) dogodka i ,

Iz dobljenih vrednosti narišemo krivuljo $F-N$, pri čemer na obeh oseh ponavadi uporabimo logaritemsko skalo.

Izračun krivulje $F-N$ je lahko izjemno dolgotrajen, saj je potrebno upoštevati različne vremenske pogoje, smeri vetra, vrsto populacije. Za poenostavljen izračun upoštevamo le različne smeri vetra, npr. S, J, V, Z, SV, JV, JZ in SZ, tako da dobimo za en dogodek 8 različnih situacij.

PRIMER 7.3: Slika 7.9 prikazuje kemijski obrat v okolici naseljenega območja. Tabela 7.4 prikazuje tri nevarne dogodke, ki ogrožajo prebivalce. Izračunajte in narišite graf $F-N$, ki prikazuje zvezo med številom ogroženih ljudi in pogostostjo nevarnih dogodkov. Število prebivalcev v posameznih območjih je razvidno iz slike. Skupno število prebivalcev v osenčenem pravokotniku je 1000.



Slika 7.9. Območja vpliva za nevarne dogodke v primeru 7.3

Tabela 7.4. Podatki za primer 7.3

Dogodek	Frekvenca (a^{-1})	Vpliv vetra	θ
1	$2,8 \cdot 10^{-6}$	Da	15°
2	$6,5 \cdot 10^{-4}$	Da	15°
3	$7,3 \cdot 10^{-4}$	Da	15°

Rešitev: Dogodek 3 nima vpliva na naseljeno področje, zato bomo pri analizi upoštevali le dogodka 1 in 2. Predpostavimo 8 različnih smeri vetra, ki so vse enako verjetne (S, SV, V, JV, J, JZ, Z, SZ). Tako dobimo dogodka 1 in 2 osem možnih variant:

Dogodek	Frekvenca (a^{-1})	Smer vetra	Verjetnost smeri vetra	Korigirana frekvenca (a^{-1})	Vpliv na naseljeno območje
1	$2,8 \cdot 10^{-6}$	S	1/8	$3,5 \cdot 10^{-7}$	Da
		SV	1/8	$3,5 \cdot 10^{-7}$	Da
		V	1/8	$3,5 \cdot 10^{-7}$	Ne
		JV	1/8	$3,5 \cdot 10^{-7}$	Ne
		J	1/8	$3,5 \cdot 10^{-7}$	Ne
		JZ	1/8	$3,5 \cdot 10^{-7}$	Ne
		Z	1/8	$3,5 \cdot 10^{-7}$	Ne
		SZ	1/8	$3,5 \cdot 10^{-7}$	Da

Dogodek	Frekvenca (a^{-1})	Smer vetra	Verjetnost smeri vetra	Korigirana frekvenca (a^{-1})	Vpliv na naseljeno območje
2	$6,5 \cdot 10^{-4}$	S	1/8	$8,125 \cdot 10^{-5}$	Da
		SV	1/8	$8,125 \cdot 10^{-5}$	Da
		V	1/8	$8,125 \cdot 10^{-5}$	Ne
		JV	1/8	$8,125 \cdot 10^{-5}$	Ne
		J	1/8	$8,125 \cdot 10^{-5}$	Ne
		JZ	1/8	$8,125 \cdot 10^{-5}$	Ne
		Z	1/8	$8,125 \cdot 10^{-5}$	Ne
		SZ	1/8	$8,125 \cdot 10^{-5}$	Da

Iz tabele je razvidno, da vplivata dogodka 1 in 2 na naseljeno območje, kadar piha veter s severa, severovzhoda ali severozahoda. Za te situacije ocenimo število ogroženih ljudi:

Tabela 7.5. Število ogroženih ljudi za različne situacije

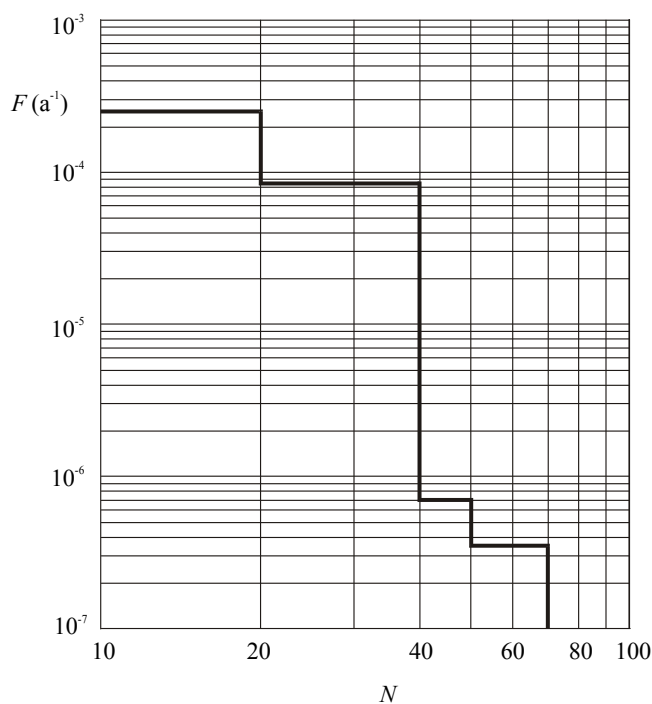
Dogodek	Frekvenca (a^{-1})	Število ogroženih ljudi
1 S	$3,5 \cdot 10^{-7}$	70
1 SV	$3,5 \cdot 10^{-7}$	50
1 SZ	$3,5 \cdot 10^{-7}$	40
2 S	$8,125 \cdot 10^{-5}$	40
2 SV	$8,125 \cdot 10^{-5}$	20
2 SZ	$8,125 \cdot 10^{-5}$	20

in izračunamo kumulativne frekvence za dogodke z več kot N ogroženimi ljudmi:

Tabela 7.6. Izračun točk za diagram $F-N$

Število ogroženih ljudi	Kumulativna frekvenca (a^{-1})	Upoštevani dogodki
$70 < N$	0	
$50 < N$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	1 S
$40 < N$	$7,0 \cdot 10^{-7}$	1 S, 1 SV
$20 < N$	$8,23 \cdot 10^{-5}$	1 S, 1 SV, 1 SZ, 2 S
$0 < N$	$2,45 \cdot 10^{-4}$	1 S, 1 SV, 1 SZ, 2 S, 2SV, 2 SZ

S temi podatki narišemo diagram $F-N$ (slika 7.10). Pri tem uporabimo logaritemsko skalo na obeh oseh.



Slika 7.10. Diagram $F-N$ za primer 7.3

7.5.3. Izračun indeksov tveganj

a) Povprečna stopnja smrtnosti

Povprečna stopnja smrtnosti je merilo za skupinsko tveganje in ga ni mogoče uporabiti za oceno tveganja posameznika. Izračunamo ga z naslednjo enačbo:

$$ARD = \sum_{i=1}^n f_i N_i \quad (7.8)$$

kjer je:

ARD povprečna stopnja smrtnosti (a^{-1}),
 f_i pogostost (frekvenca) dogodka i (a^{-1}),
 N_i število ljudi, ki so ogroženi zaradi dogodka i ,
 n število nevarnih dogodkov.

Z uporabo indeksa ARD lahko enostavneje izračunamo tudi povprečno individualno tveganje:

$$\overline{IR} = \frac{ARD}{N_p} \quad (7.9)$$

kjer je:

\overline{IR} povprečno individualno tveganje izpostavljenih ljudi (a^{-1}),
 N_p celotno število ljudi, ki so izpostavljeni tveganju zaradi obrata, to pomeni število ljudi, ki se nahajajo na območju, ki ga omejuje največja krivulja tveganja.

b) Indeks pogostosti nesreč s smrtnim izidom (FAR)

Indeks FAR je tesno povezan s povprečnim individualnim tveganjem, razlikujeta se le po opazovanem časovnem obdobju, ki je pri povprečnem individualnem tveganju 1 leto, pri indeksu FAR pa 10^8 ur. FAR izračunamo z naslednjo enačbo:

$$FAR = \overline{IR} \cdot \frac{10^8}{t_{izp}} \quad (7.10)$$

kjer je:

t_{izp} število ur izpostavljenosti v enem letu (h).

Ta definicija indeksa FAR se nanaša na osebo, ki je izpostavljena nespremenljivemu tveganju na določeni lokaciji.

PRIMER 7.4: Ocenili smo, da je frekvenca nekega nevarnega dogodka $6 \cdot 10^{-4} a^{-1}$. Ocenjujemo, da bi v primeru nesreče dve osebi izgubili življenje. Izračunajmo vrednost indeksa FAR , če je število izpostavljenih ljudi 30 in proces obratuje 330 dni na leto.

Rešitev: Najprej izračunamo povprečno stopnjo smrtnosti z enačbo (7.8):

$$ARD = 6 \cdot 10^{-4} a^{-1} \cdot 2 = 1,2 \cdot 10^{-3} a^{-1}$$

Nato izračunamo povprečno tveganje posameznika z enačbo (7.9) in indeks FAR z enačbo (7.10):

$$\overline{IR} = \frac{ARD}{N_p} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3} a^{-1}}{30} = 4 \cdot 10^{-5} a^{-1}$$

$$FAR = 4 \cdot 10^{-5} a^{-1} \cdot \frac{10^8}{24 \cdot 330} = \underline{\underline{0,51}}$$

PRIMER 7.5: Na osnovi podatkov primera 7.3 izračunajmo indeksa povprečne stopnje smrtnosti (ARD) in FAR.

Rešitev: V tabeli 7.5 smo zbrali podatke o številu ogroženih ljudi za šest nevarnih situacij, do katerih lahko pride zaradi dogodkov 1 in 2 (vpliv tretjega dogodka ne seže na naseljeno območje). Te podatke vnesemo v enačbo (7.8) in izračunamo ARD:

$$\begin{aligned}ARD &= \sum_{i=1}^6 f_i N_i = 3,5 \cdot 10^{-7} \cdot 70 + 3,5 \cdot 10^{-7} \cdot 50 + 3,5 \cdot 10^{-7} \cdot 40 + \\ &8,125 \cdot 10^{-5} \cdot 40 + 8,125 \cdot 10^{-5} \cdot 20 + 8,125 \cdot 10^{-5} \cdot 20 = \\ &= \underline{\underline{6,56 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1}}}\end{aligned}$$

(ali 1 smrtna žrtev na 150 let)

Z enačbo (7.9) izračunamo povprečno individualno tveganje. Pri tem predpostavimo, da je prebivalstvo enakomerno porazdeljeno po celotnem območju. Dogodek 1, ki ima največje območje vpliva, omejuje približno polovico naseljenega področja, zato ocenimo, da je število prebivalcev na tem območju 500.

$$\overline{IR} = \frac{ARD}{N_p} = \frac{6,56 \cdot 10^{-3} \text{ a}^{-1}}{500} = 1,31 \cdot 10^{-5} \text{ a}^{-1}$$

Z enačbo (7.10) izračunamo še indeks FAR:

$$FAR = \overline{IR} \cdot \frac{10^8}{24 \cdot 365} = 1,31 \cdot 10^{-5} \cdot 11415,5 = \underline{\underline{0,15}}$$

Dobljena vrednost indeksa FAR je večja od 0,001, kolikor znaša priporočena vrednost za prebivalce, ki živijo v okolici obrata, zato je treba poiskati ukrepe za zmanjšanje tega tveganja.

8. LITERATURA

- Barton J., Rogers R., *Chemical Reaction Hazards – A Guide*. IChemE, Rugby, UK, 1993.
- Centre for Chemical Process Safety of the AIChE, *Guidelines for chemical process quantitative risk analysis*. AIChE, New York, USA, 2003.
- Centre for Chemical Process Safety of the AIChE, *Guidelines for process equipment reliability data, with data tables*. AIChE, New York, USA, 2003.
- Kletz T., *HAZOP and HAZAN*, IChemE, Rugby, UK, 1992.
- Lees F. P., *Loss prevention in the process industries. Hazard identification, assessment and control*. Butterworth-Heinemann, Oxford, 2001.
- Marshall V. C., Ruhemann S., *Fundamentals of Process Safety*, IChemE, Rugby, UK, 2001.
- Barton J., Rogers R., (Eds.), *Chemical Reaction Hazards – A Guide*. IChemE, Rugby, UK, 1993.
- Pitblado R., Turney R., *Risk assessment in the process industries*. IChemE, Rugby, UK, 1996.
- Vakselj M., *Zakon o varnosti in zdravju pri delu*. Primath, Ljubljana, 2000.

Priloga 1: Obrazec za določanje požarnega in eksplozijskega indeksa nevarnosti (DOW)

		Datum:	Izdelal:
Obrat:	Procesna enota:		Pregledal:
Snovi v procesni enoti:			
Snov za določitev faktorja materiala:			
Faktor materiala (F_1)			
1. Splošne procesne nevarnosti		Faktor	
Osnovni faktor		1	
	A. eksotermna kemijska reakcija (0,3 do 1,25)		
	B. endotermni proces (0,2)		
	C. ravnanje s snovmi in transport (0,25 do 1,00)		
	D. procesne enote v zaprtih prostorih (0,30)		
	E. dostopnost (0,35)		
	F. drenaža (0,50)		
Faktor za splošne nevarnosti (F_2)			
2. Posebne procesne nevarnosti			
Osnovni faktor		1	
	A. temperatura		
	1. višja od plamenišča (0,25)		
	2. višja od vrelišča (0,60)		
	3. snovi z nizkim vnetiščem (0,75)		
	B. podtlak ($P < 0,67$ bar) (0,75)		
	C. Obratovanje v ali blizu eksplozijskega območja		
	1. hranjenje vnetljivih tekočin (0,50)		
	2. blizu vnetljivega območja (0,75)		
	3. vedno v vnetljivem območju (1,00)		
	D. prašne eksplozije (0,25 do 2)		
	E. tlak (slika) obratovalni tlak = bar		
	F. nizka temperatura 1. 10 °C do -29 °C (0,30)		
	2. < -30 °C (0,50)		
	G. volumen vnetljive tekočine: 1. 9 m ³ do 27 m ³ (0,50)		
	2. 27 m ³ do 90 m ³ (0,65)		
	3. 90 m ³ do 230 m ³ (0,90)		
	4. > 230 m ³ (1,20)		
	H. korozija in erozija (0,1 do 0,50)		
	I. tesnenje (0,1 do 0,4)		
	J. uporaba gretja z odprtim ognjem		
	K. toplotni prenos z vročim oljem (0,15 do 1,5)		
	L. rotirajoče procesne enote (0,50)		
Faktor za posebne nevarnosti (F_3)			
$i_{DOW} = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3$			

Priloga 2: Standardi za varnostni pregled procesa

Aktivnost	Nezadostna	Zadostna	Dobra	Odlična
A Organizacija in administracija:				
1. Varnostna politika, določitev odgovornosti	Ni izdelane varnostne politike, odgovornost ni jasno določena.	Splošno razumevanje varnosti in odgovornosti, vendar ni nobenega dokumenta v pisni obliki.	Varnostna politika in odgovornost sta jasno zapisani in predani vodjem obratov.	Enako kot pri "dobra", zraven tega pa je varnostna politika obnovljena vsako leto.
2. Postopki varnega obratovanja	Niso napisani.	So napisani za nekatere nevarne situacije.	So napisani za vse nevarne situacije.	Vse nevarne situacije so zapisane, razstavljene ob delovnih mestih in vsako leto pregledane in dopolnjene.
3. Načrt ravnanja v nujnih primerih	Ni pripravljen.	Ustno posredovanje navodil.	Izdelan je načrt ravnanja v pisni obliki, ki vsebuje osnovna navodila.	Za vse nevarne dogodke so izdelana pisna navodila. Jasno so definirane odgovornosti zaposlenih.
4. Varnostni načrt podjetja	Ni pripravljen.	Varnostni načrt je pripravljen.	Varnostni načrt je vključen v delovni načrt podjetja.	Zraven prej navedenega: delovni načrt obnovijo vsako leto.
B Industrijske nevarnosti				
1. Hranjenje snovi	Hranjenje reaktantov, intermediatov in produktov ni v skladu s predpisi.	Hranjenje je samo delno v skladu s predpisi. Aktivnosti za izboljšanje stanja so v pripravi.	Hranjenje je v skladu s predpisi, veliki in težki objekti so odmaknjeni od prehodov.	Hranjenje je v skladu z vsemi predpisi in idealno nadzorovano.
2. Vzdrževanje procesnih enot, varnostnih naprav in orodij	Program za sistematično vzdrževanje varnostnih elementov v procesu ni pripravljen.	Delno ali neučinkovito vzdrževanje.	Program za sistematično vzdrževanje procesnih enot in varnostnih elementov v procesu je pripravljen in se izvaja. Električne naprave redno testirajo.	Enako kot pri "dobra", zraven tega redno preventivno testirajo nevarne naprave, vodijo dokumentacijo testiranj in se posvetujejo s strokovnjaki, če najdejo nepravilnosti.
3. Uporaba osebnih zaščitnih sredstev	Zaposleni nimajo na razpolago primernih osebnih zaščitnih sredstev.	Neustrezna ali neučinkovita uporaba osebnih zaščitnih sredstev.	Primerna osebna zaščitna oprema je na voljo. Zaposleni jo morajo uporabljati. Poskrbljeno je za nadzor.	Na voljo je osebna zaščitna oprema, ki ustreza vsem standardom in jo redno vzdržujejo. Dolžnost zaposlenih je, da jo uporabljajo.
C Požarna varnost in industrijska higiena				
1. Nadzor vnetljivih in eksplozivnih snovi	Hranjenje ni v skladu s požarnimi predpisi. Na rezervoarjih ni označena vsebina. Količine snovi v obratu so nad dovoljenimi.	Nekateri rezervoarji izpolnjujejo minimalne zahteve predpisov. Na večini rezervoarjev je navedena vsebina.	Enako kot pri "zadostna", zraven tega pa je količina teh snovi v obratu omejena na dnevno porabo.	Enako kot pri "dobra", zraven tega pa rezervoarji presegajo minimalne zahteve predpisov in imajo vedno označeno vsebino. Pripravljen je natančna politika nadzora za ravnanje in hranjenje vnetljivih snovi.

Aktivnost	Nezadostna	Zadostna	Dobra	Odlična
C Požarna varnost in industrijska higiena (nadaljevanje)				
2. Ventilacija, prah, kajenje	Ventilacija ni ustrezna.	Ventilacija dosega minimalne standarde.	Enako kot pri "zadostna", zraven tega pa učinkovitost ventilacije beležijo, redno preverjajo in vzdržujejo.	Enako kot pri "dobra", zraven tega pa je ventilacija ustrezna izbrana in deluje z maksimalno učinkovitostjo.
3. Kontaminacija kože	V nadzor in odpravljanje virov draženja kože vlagajo zelo malo truda.	Program za zaščito kože je nepopoln. Prvo pomoč in nasvete pri problemih s kožo dobivajo zaposleni individualno.	Večina zaposlenih je seznanjena s snovmi, ki dražijo kožo. Na voljo imajo osebna zaščitna sredstva in predpostavljajo jih vzpodbujajo k njihovi uporabi.	Vsi zaposleni so seznanjeni s snovmi, ki dražijo kožo. Na voljo imajo osebna zaščitna sredstva, ki jih vedno uporabljajo. Kožo si redno umivajo.
4. Požarna varnost	Ne ustreza niti minimalnim zahtevam.	Ustreza minimalnim zahtevam.	Ustreza minimalnim zahtevam, pripravljene so dodatne gasilne cevi in gasilni aparati. Za varjenje je potrebno posebno dovoljenje.	Enako kot pri "dobra", zraven tega pa je organizirana gasilska enota, ki jo redno urijo za ravnanje ob požaru in za uporabo gasilnih naprav.
5. Zbiranje in odstranjevanje odpadkov, onesnaževanje vode in zraka	Metode zbiranja in odstranjevanja odpadkov so neustrezne. Nadzor onesnaževanja je neustrezen.	Odstranjevanje škodljivih snovi je delno nadzorovano, vendar so metode za zbiranje in odstranjevanje odpadkov neučinkovite.	Večina problemov z odstranjevanjem odpadkov je znana in program za nadzor odstranjevanja je pripravljen.	Odstranjevanje odpadkov je ustrezno nadzorovano. Vplivi na zrak in vodo so minimalni.
D Motivacija in izobraževanje zaposlenih				
1. Izobraževanje tehnologov	Osnovnega izobraževanja o varnosti so deležni le nekateri tehnologi.	Vsi tehnologi so deležni osnovnega urjenja v varnosti.	Vsi tehnologi se udeležujejo izobraževanj o varnosti vsaj dvakrat na leto.	Enako kot pri "dobra", zraven tega pa za posebne varnostne probleme organizirajo dodatna izobraževanja.
2. Izobraževanje na novo zaposlenih	Na novo zaposleni ne dobijo informacij o varnostnih predpisih in o ukrepih za varovanje zdravja.	Navodila o varnostnih predpisih in ukrepih za varovanje zdravja so ustna.	Pripravljena so pisna navodila za poučevanje varnostnih predpisov in varovanje zdravja.	Podjetje ima izdelan program za načrtno vzgajanje novozaposlenih o varovanju zdravja in varnostnih predpisih.
3. Urjenje za posebne delovne operacije (brušenje, ravnanje s topli...)	Nezadostno urjenje za posebne delovne operacije.	Urjenja za posebne delovne operacije so organizirana občasno.	Za vse posebne operacije so redno organizirana varnostna urjenja.	Enako kot pri "dobra", zraven tega pa vsako leto opredelijo potrebe po posebnih urjenjih.
4. Obveščanje o varnosti	Za obveščanje v zvezi z varnostjo uporabljajo oglasne deske in posterje.	Občasno uporabljajo dodatne dispeje, demonstracije, filme.	Dispeje in demonstracije v zvezi z varnostjo redno uporabljajo.	Obveščanje o varnosti poteka v posebnih prostorih in izložbah, kjer redno obdelujejo posebne varnostne probleme.

Aktivnost	Nezadostna	Zadostna	Dobra	Odlična
D Motivacija in izobraževanje zaposlenih (nadaljevanje)				
5. Komunikacija med zaposlenimi in njihovimi predpostavljenimi glede varnosti	Predpostavljeni se zelo malo ali pa sploh ne pogovarjajo z zaposlenimi o varnosti.	Diskusije o varnosti med zaposlenimi in predpostavljenimi so občasne.	Predpostavljeni se redno pogovarjajo o varnosti z zaposlenimi individualno.	Enako kot pri "dobra", zraven tega pa predpostavljeni redno diskutirajo o varnostnih zadevah vsak dan z vsaj enim delavcem.
E Raziskava nezgod, statistika in poročanje o nezgodah				
1. Raziskava nezgod	Tehnologi ne raziščejo nobene nezgode.	Tehnologi raziskujejo samo nezgode s telesnimi poškodbami.	Tehnologi so usposobljeni za učinkovito raziskovanje nezgod. Določijo vzroke nezgode in takoj predlagajo ukrepe za preprečevanje.	Enako kot pri "dobra", zraven tega raziščejo vsako nezgodo v 24 urah. O nezgodah izdelajo pisna poročila, ki jih pregledata vodji obrata in podjetja.
2. Vzroki nezgod in statistika	Vzroka in lokacije nezgod ne raziskujejo.	Vodijo evidenco o nezgodah glede na vzrok, lokacijo, škodo, poškodbe itd.	Natančno vodijo in analizirajo evidenco o nezgodah in uporabljajo rezultate za preprečevanje nezgod.	Vzroke in posledice nezgod prikazujejo grafično in raziskujejo trende, s katerimi je vodstvo dobro seznanjeno.
3. Določanje materialne škode	Postopki za določanje materialne škode niso pripravljene.	Zahteve po preiskavi nezgod z materialno škodo so podane ustno.	Preiskava je pisno zahtevana za vsako nezgodo z materialno škodo večjo od 50 \$.	Enako kot pri "dobra", zraven tega pa vodstvo podjetja zahteva podrobno preiskavo vsake nezgode z materialno škodo.
4. Poročila o nezgodi	Postopek izdelave poročila o nezgodi je neustrezen.	Poročila o nezgodah so pravočasno pripravljena.	Enako kot pri "zadostna", zraven tega pa uporabljajo poročila o nezgodah tudi za analize nezgod.	Enako kot pri "dobra", zraven tega pa sodelujejo tudi z zavarovalniškim zastopnikom.

Priloga 3: HAZOP študija za primer 4.3

Ključna beseda	Motnja	Vzrok	Posledica	Ukrep
Povezava P3: tok čistega zraka pri atmosferskem tlaku in temperaturi okolja v kompresor				
NI	pretok	zamašen, blokiran filter	a) porast koncentracije NH ₃	a) namestitev merilnika tlačne razlike (Pd)
MANJŠE	pretok	delno zamašen, blokiran filter	b) enako kot a)	b) enako kot a)
DODATNO	sestava	poškodovan ali napačno nameščen filter	c) nečistoče, zastrupitev katalizatorja	c) primerno vzdrževanje in čiščenje filtra
Povezava P4: tok 12 000 kg/h zraka pri tlaku 8 bar in temperaturi 250°C				
NI ali MANJŠE	pretok	okvara kompresorja	d) porast koncentracije NH ₃	d) namestitev alarma nizkega tlaka (PA1) v povezavi z instrumentom za ustavitev pretoka NH ₃
	pretok v nasprotni smeri	padec tlaka (okvara kompresorja), porast tlaka v reaktorju	e) NH ₃ v kompresorju, nevarnost eksplozije f) pospešena korozija zaradi vročih kislih plinov iz reaktorja	e) namestitev nepovratnega ventila (NRV1) f) namestitev nepovratnega ventila (NRV4)
VEČJE	pretok	napaka v regulacijskem sistemu kompresorja	g) pospešitev reakcije, porast temperature	e) namestitev alarma za visoko temperaturo (TA1)
Povezava P5: tok zraka v absorber				
NI ali MANJŠE	pretok	okvara kompresorja, okvara ali zamašitev ventila CV4, okvara regulatorja pretoka FRC1	h) nepopolna oksidacija, onesnaženje zraka	h) primerno vzdrževanje in nadzorovanje kompresorja in ventila CV4
Povezava P1: tok tekočega amoniaka iz rezervoarja				
NI ali MANJŠE	pretok	(delna) okvara črpalke ali ventila CV1	i) znižanje nivoja v uparjalniku	i) namestitev alarma za prenizki nivo (LA1)
	pretok v nasprotni smeri	okvara črpalke → tlak v uparjalniku postane višji od dobavnega tlaka črpalke	j) para steče iz uparjalnika v rezervoar amoniaka	j) namestitev nepovratnega ventila (NRV2)
VEČJE	pretok	okvara regulatorja nivoja LC1, ventil CV1 se zatakne	k) poplavljenje uparjalnika, vtok tekočine v reaktor	k) namestitev alarma za previsok nivo (LA2) v povezavi z instrumentom, ki ustavi črpalko
DODATNO	sestava (voda v vtoku)	vdor vode v rezervoar amoniaka	l) nastanek NH ₄ OH v uparjalniku	l) redno merjenje koncentracije

Ključna beseda	Motnja	Vzrok	Posledica	Ukrep
Povezava P2: tok par amoniaka				
NI	pretok	ni pretoka pare ali zaprt ventil CV3	m) ustavitev reakcije	m) namestitev alarma za prenizek nivo (LA1)
	pretok v nasprotni smeri	ni pretoka pare, porast tlaka v reaktorju	n) pospešena korozija zaradi vročih kislih plinov iz reaktorja	n) namestitev nepovratnega ventila (NRV3)
MANJŠE	pretok	delno zaprt ali blokiran ventil CV3	o) ustavitev reakcije	o) namestitev alarma za prenizek nivo (LA1)
VEČJE	pretok	okvara regulatorja za razmerje pretokov FrC	p) porast koncentracije NH ₃	p) namestitev dveh merilnikov koncentracije NH ₃ z alarmom pri vsebnosti NH ₃ = 12 % (QA1 in QA2)
MANJŠE	nivo	okvara regulatorja nivoja LC1	r) zmanjšanje ali ustavitev pretoka NH ₃	r) namestitev alarma za prenizek nivo (LA1)
VEČJE	nivo	okvara regulatorja nivoja LC1	s) poplavljenje uparjalnika, vtok tekočine v reaktor	s) namestitev alarma za prenizek nivo (LA1)
Povezava P6: tok zmesi amoniaka in zraka v reaktor				
NI	pretok	okvara ventila NRV4	t) upočasnitev in ustavitev reakcije	m) namestitev alarma za prenizko temperaturo (TA1)
MANJŠE	pretok	ventil NRV4 delno zaprt	u) upočasnitev in ustavitev reakcije	u) namestitev alarma za prenizko temperaturo (TA1)
VEČJE	pretok	okvara regulacijskega sistema	v) pospešitev reakcije, naraščanje temperature	v) namestitev alarma za previsoko temperaturo (TA1)
MANJŠE	sestava (koncentracija NH ₃)	okvara regulatorja za razmerje pretokov FrC	z) padec temperature v reaktorju	z) namestitev alarma za prenizko temperaturo (TA1), namestitev alarmov za prenizko koncentracijo (QA1 in QA2)
VEČJE	sestava (koncentracija NH ₃)	okvara regulatorja za razmerje pretokov FrC, zmanjšan pretok zraka	x) porast temperature v reaktorju, nastanek eksplozivne zmesi, eksplozija	x) namestitev alarma za previsoko temperaturo (TA1), namestitev alarmov za previsoko koncentracijo (QA1 in QA2), obtok za avtomatsko zaustavitev reakcije preko QA1, QA2 in ventilov SV1, SV2, SV3
Povezava P7: tok amoniaka in zraka v reaktor				
DODATNO	sestava	različni trdi delci, odkruški iz reaktorja	y) zamašitev procesnih enot, ki sledijo reaktorju	y) namestitev filtra

Priloga 4: Dovoljene enačbe na pisnem izpitu

2. poglavje

$$\gamma_A = \frac{m_A}{V_{\text{zraka}}} \left[\frac{\text{mg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\sigma_A = \frac{V_A}{V_{\text{zraka}}} \left[\frac{\text{ml}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\psi = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i}{\gamma_{\text{MV},i}}$$

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S$$

$$\Delta G \cong \Delta H$$

$$\Delta H = \sum_{i \in \text{prod}} \nu_i \Delta H_{f,i}^0 - \sum_{j \in \text{reak}} \nu_j \Delta H_{f,j}^0$$

$$\Delta S = \sum_{i \in \text{prod}} \nu_i (S_i^0 - R \ln p_i) - \sum_{j \in \text{reak}} \nu_j S_j^0$$

$$p_i = \frac{\nu_i}{\sum_i \nu_i} \cdot P^0 \quad (\text{samo za plinaste produkte})$$

$$W_c = \int_1^2 P dV = n R T \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right)$$

$$\Delta G' = \Delta G \cdot n$$

$$m_{\text{eq,TNT}} = \frac{|\Delta G'|}{E_{\text{TNT}}}$$

$$E_{\text{TNT}} = \underline{\underline{4688 \text{ J/g}}}$$

$$\Delta T_{\text{ad}} = \frac{\Delta H}{m c_p}$$

$$T_2 = T_1 + \Delta T_{\text{ad}}$$

$$w(\text{O}) = -1600 \frac{2x+y/2-z}{M}$$

$$\Phi_r = Z \cdot e^{\left(\frac{-E_a}{RT} \right)}$$

$$\Phi_c = U A (T - T_a)$$

$$i_{\text{DOW}} = F_1 \cdot F_2 \cdot F_3$$

$$I_{\text{RHI}} = \frac{10 \cdot T_d}{T_d + 7,17 \cdot E_a}$$

$$T \text{ [K]}, E_a \text{ [kJ/mol]}$$

5. poglavje

$$q_m = C_D A p \left[\frac{\gamma M}{1000 RT} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{0,5}$$

$$F_v = \frac{q_{m,g}}{q_{m,\ell}} = c_p \frac{(T - T_b)}{\Delta_{\text{izp}} H}$$

$$q_m = C_D A \rho \sqrt{\frac{2(p - p_a)}{\rho} + 2gh}$$

$$q_m \text{ [kg/s]}, A \text{ [m}^2\text{]}, \rho \text{ [kg/m}^3\text{]}, p \text{ [Pa]},$$

$$T \text{ [K]}, h \text{ [m]}, g \text{ [9,81 m/s}^2\text{]}, M \text{ [g/mol]},$$

$$R \text{ [8,314 J/(mol}\cdot\text{K)}]$$

$$\gamma = \frac{q_m}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \left[\exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right] \left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

$$\sigma_y = \exp \left[4,23 + 0,9222 \ln \left(\frac{x}{1000} \right) - 0,0087 \left[\ln \left(\frac{x}{1000} \right) \right]^2 \right]$$

$$\sigma_z = \exp \left[3,414 + 0,7371 \ln \left(\frac{x}{1000} \right) - 0,0316 \left[\ln \left(\frac{x}{1000} \right) \right]^2 \right]$$

$$\gamma \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$q_m \text{ [kg/s]}$$

$$x, y, z \text{ [m]}$$

$$h \text{ [m]}$$

$$u \text{ [m/s]}$$

6. poglavje

$$R(t) = 1 - \frac{n_f(t)}{n}$$

$$F(t) = \frac{n_f(t)}{n}$$

$$R(t) + F(t) = 1$$

Če velja $\lambda = \text{konst}$:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$F(t) = 1 - R = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$t_{\text{MTBF}} = \frac{1}{\lambda}$$

$$\text{Zaporedni: } R = \prod_{i=1}^n R_i$$

$$R = \prod_{i=1}^n \exp(-\lambda_i t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^n \lambda_i t\right)$$

$$\text{Vzporedni: } F = \prod_{i=1}^n F_i$$

$$R = 1 - F = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

$$R = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \exp(-\lambda_i t))$$

V pripravljenosti:

$$R = \exp(-\lambda t) \sum_{k=0}^r \frac{(\lambda t)^k}{k!} = \exp(-\lambda t) \left(1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^r}{r!} \right)$$

Razpoložljivost:

$$A = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad \mu = \frac{1}{t_{\text{MTTR}}} \quad A = \frac{t_{\text{MTBF}}}{t_{\text{MTBF}} + t_{\text{MTTR}}} \quad A = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^k \frac{1 - A_i}{A_i}}$$

Zanesljivost sistemov, ki jih redno preverjamo:

$$\phi = \frac{\frac{\tau_p}{2}}{t_{\text{MTBF}}} = \lambda \frac{\tau_p}{2} \quad H = \lambda \cdot \left(1 - e^{-\frac{D\tau_p}{2}} \right)$$

Drevo odpovedi:

$$\text{ALI: } P \approx P_A + P_B \\ F = F_A + F_B$$

$$\text{IN: } P = P_A \cdot P_B \\ F = F_A \cdot P_B$$

7. poglavje

$$f_i = f_{i,\text{oc}} \frac{\theta}{360} \quad IR_i = IR_{i-1} + f_i$$

$$ARD = \sum_{i=1}^n f_i N_i \quad \overline{IR} = \frac{ARD}{N_p} \quad FAR = \overline{IR} \cdot \frac{10^8}{t_{\text{izp}}}$$