4.1
2.6

A vegyiparban bekövetkezett balesetek statisztikai értékelésének lehetőségei

Tárgyszavak: baleset; vegyipar; veszélyes anyag; kockázatértékelés; biztonságirányítási rendszer; cseppfolyós kőolajgáz; mosótorony.

A veszélyes üzemekben az elmúlt években bekövetkezett balesetek felvetették a kérdést, hogy a lakosság biztonságban érezheti-e magát a veszélyes vegyipari üzemektől.

Statisztikailag kétféle módon elemezték a vegyipari üzemekben bekövetkezett baleseteket.

Az első esetben a bekövetkezett halálesetek függvényében vizsgálták a balesetek és bizonyos változóik hatását az esetek súlyosságára. Az elemzéshez a súlyos balesetek dokumentációját összegyűjtő MHIDAS (Major Hazard Incident Data Service) adatbázisban 2001 júliusában rendelkezésre álló adatokat használták fel (referencia adatbázis) új mennyiségi megközelítésben, szemben a korábban végzett minőségi elemzésekkel. Az értékelés során a halálozások valószínűségét elemző diagramokat alkalmaztak, ahol 1 volt a valószínűsége az MHIDAS adatbázisban nyilvántartott, halálesettel járó baleseteknek. Eljárást dolgoztak ki az üzemekben előforduló kockázatok becslésére, amit összehasonlítottak megadott, kiemelt tűrési kritériumokkal.

A második esetben a legtöbb vegyipari és petrolkémiai társaság által már alkalmazott biztonságirányítási (SMS, Safety Management Systems) rendszerek alkalmazását mutatják be, amelynek használatát meghatározott veszélyes anyagok esetén a 96/82/EU (Seveso) irányelv is előírja.

A kockázatbecslés során az üzem biztonsági szintjére jellemző mennyiségi kockázati mutatókat határoztak meg, a berendezések meghibásodásának és az emberi tevékenység hatásának figyelembevételével. Azonosították a balesetek okait és a balesetek valószínűségének csökkentési lehetőségeit.

Bemutatják a vegyipari berendezések veszélyesanyag-kibocsátása gyakoriságának becslését és az alkalmazott SMS rendszer hatásait. Az I-RISK projekt feladata, hogy a technika mai szintjén meghatározza a veszélyesanyag-kibocsátások gyakoriságát.

Az 1. vizsgálat

Az értékeléshez kiválasztott balesetek

Az adatbázis (MHIDAS) az iparban és a szállításban a veszélyes anyagok használatával kapcsolatos baleseteket tartalmazza. Az adatbázis 2001 júliusában 10 252 balesetről 11 729 jelentést tartalmazott. A statisztikai számítások során csak az 1974 után az iparban bekövetkezett baleseteket vették figyelembe, ahol a halálesetek száma ismert volt (N≥1, *1. táblázat*). 1975 előtti adatokat nem használtak fel, mert ezek a balesetek túl régen történtek, a maiakkal már össze nem hasonlítható technológiai környezetben. Ajánlották a fuzzy logikai (bizonytalan logikai) eljárások alkalmazását a változók súlyozására, ekkor azonban rendkívüli mértékben csökkent volna az elemzés során értékelhető balesetek száma. Az egyetlen, a balesetek súlyosságát jelző változó a halálozások száma volt, amely objektív és az értékelés során rendelkezésre áll. A statisztikai adatokat erősen torzító baleseteket nem vették figyelembe. A statisztikai vizsgálatokba bevont balesetek időbeni megoszlása az *1. ábrán* látható.

A kevesebb számú halálesettel járó balesetek során felvett görbék a valós értékektől a nagyobb valószínűségértékek felé hajlanak.

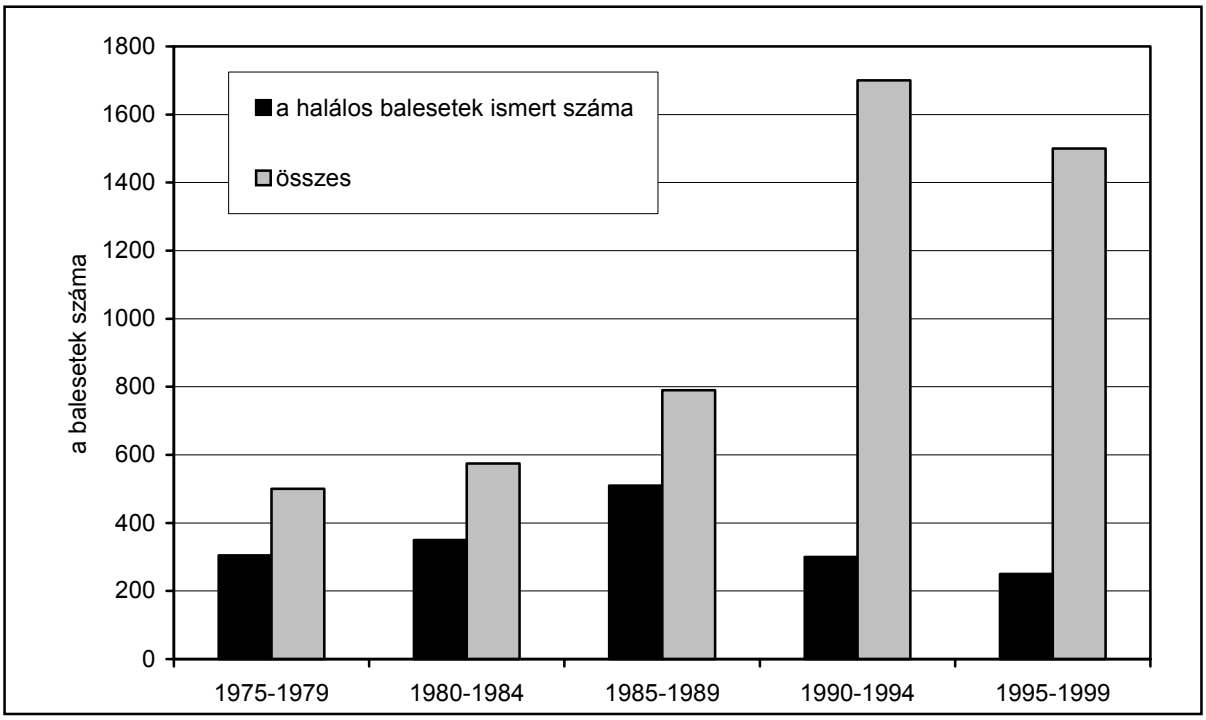
1. táblázat

A balesetek elemzése során vizsgált változók
átlagos statisztikai értékei

	Halálos áldozatok száma	**Sérültek száma**	**Kitelepítettek száma**	**Anyagi kár (2000-ben, M USD)**
Balesetek száma	1694	1 482	554	280
Minimum	0	0	0	0
Maximum	2001	10 000	200 001	428,46
Átlag	5,090	26,20	2 157,7	23,98
Módusz (leggyakoribb érték)	0	0	0	5,469
Középérték	1	3	2	3,845
Szórás	51,91	280,6	13 932	60,208

A balesetek súlyossága az egyes országok fejlettségi szintje szerint

A *2. táblázat* adataiból látható, hogy a fejlett és a fejlődő országokban („egyéb országok”) bekövetkezett balesetek sokkal súlyosabbak, mint az Európai Unió országaiban, Észak-Amerikában, Japánban vagy Ausztráliában bekövetkezett balesetek, ezért ezeket az adatbázisokat külön kell kezelni, a statisztikailag értékelhető, mennyiségi adatok nyeréséhez.



1. ábra Az MHIDAS adatbázisban regisztrált balesetek számának megoszlása ötéves időintervallumonként

2. táblázat

A halálos áldozatok aránya a fejlettségi szinttől függően

	Halálos áldozatok száma (N)	**Balesetek száma (A)**	**N/A arány**
EU	704	591	1,2
Észak-Amerika, Japán és Ausztrália	912	619	1,5
Egyéb országok	7032	484	14,5[a]
Összes	8648	1694	5,1

[a] Ha az 1984-es bhopali katasztrófa nem következett volna be, az arány értéke 10,49 lett volna

A balesetek súlyossága a veszélyesanyag-kategóriák szerint

Vizsgálták a balesetek relatív súlyosságát az okozó anyag típusának (robbanásveszélyes, éghető, toxikus anyag) függvényében. Figyelembe kell venni, hogy egy baleset több jelentésben is szerepelhet, ha több anyagtípus érintett benne, vagy az anyag különböző kategóriákba is besorolható.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy azok a balesetek, amelyekben robbanásveszélyes anyag is szerepel, súlyosabbak, mint amelyekben csak éghető vagy toxikus anyagok vesznek részt. A robbanásveszélyes

anyagkategóriában a hagyományos robbanószerekkel (TNT, dinamit, fekete lőpor) bekövetkezett balesetek súlyosabbak. Azonos baleseti kategórián belül az „egyéb országokban” bekövetkezett balesetek sokkal súlyosabbak.

A balesetek súlyossága a baleset típusa szerint

A statisztikai számítások alapján meghatározható, hogy melyik balesettípus (tűzeset, robbanás, toxikusanyag-kibocsátás) a legsúlyosabb. Az adatbázis „baleset típusa” mezője információt ad a balesetek kialakulásáról, és egyszerűsített formában leírja az eseményt. A baleseteket súlyosság szerinti osztályozáshoz ROBBANÁS, TŰZ, GÁZFELHŐ-KIBOCSÁTÁS csoportokba sorolták. A p–N valószínűségi görbék szerint a legsúlyosabbak a robbanások, ezt követik a tüzek, végül a gázfelhő-kibocsátások.

A balesetek súlyossága a balesetben érintett anyagok mennyisége szerint

Csak kevés olyan baleset van, amelyben ez az információ rendelkezésre áll, ezért nem határozható meg egyértelmű összefüggés a balesetben érintett anyagmennyiség és a halálos áldozatok száma között. A szerzők szerint ha egy robbanásban több, mint 7 t anyag vesz részt, a halálesetek feltételezhető maximális száma állandó, és független az anyag mennyiségétől. A fejlődő országokban bekövetkező balesetek általában súlyosabbak, ami igazolja a technológiailag fejlettebb országokban a kockázattervezési és megelőzési politika kidolgozásának helyességét.

Az f–N görbék felvételének új módszere

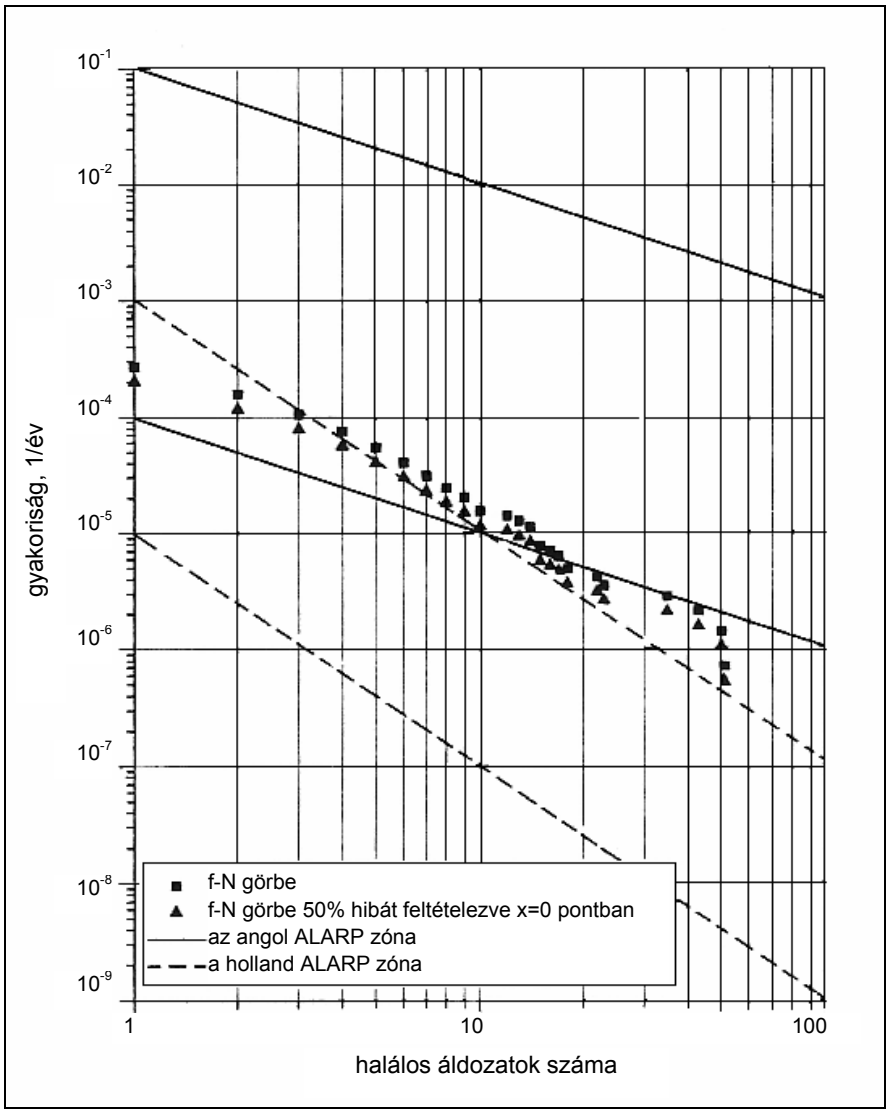
A társadalmi kockázat azon, adott számú embercsoport nagyságát jelenti, amely minden évben valamilyen balesetet szenved. Ez az adat jelzője lehet a veszélyes anyagokkal végzett tevékenység emberekre gyakorolt hatásának, és lehetővé teszi az összehasonlítást a hatóságok által előírt tűrési kritériumokkal. Ezek a korlátozások meghatározzák, hogy mennyire hasonlítható össze a populáció eloszlása a kockázatok forrásának eloszlásával.

Több európai ország tűrési kritériumokat határozott meg. A holland kormány előírása szerint a maximálisan megengedhető kockázat a 10 vagy több halálos áldozattal járó (N = 10) balesetek esetében 10^{-5}/év, a 100 vagy több halálos áldozattal járó balesetek esetében (N = 100) 10^{-7}/év. Ugyanezek az értékek a nem jelentős kockázatok esetében 10^{-7}/év N = 10, 10^{-9}/év N = 100 esetén.

Nagy-Britanniában ugyanezek az adatok az alábbiak szerint alakulnak: a maximálisan megengedhető kockázat 10^{-2}/év N = 10, 10^{-3}/év N = 100 esetén,

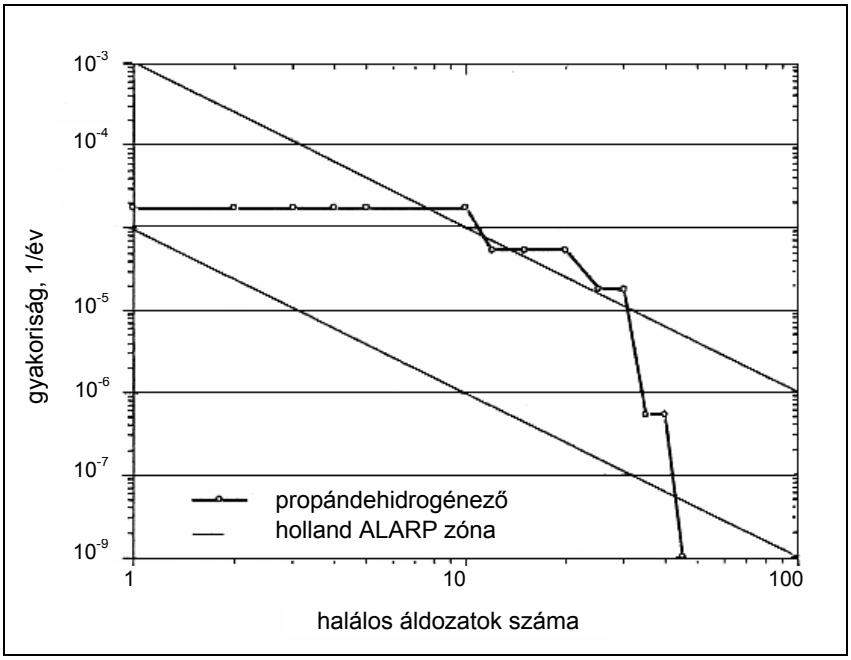
a nem jelentős kockázatok esetében pedig 10^{-5}/év N = 10, 10^{-6}/év N = 100 esetén.

A felső és az alsó határértékek közötti területet az ún. ALARP (olyan alacsony, amennyire ésszerűen megvalósítható) zóna. Az ezen zónába eső kockázatok csak korlátozással fogadhatók el. A holland előírások jelentősen korlátozóbbak, mert az ALARP zónájuk alacsonyabb gyakorisági értékeken alapul. Ha figyelembe vesszük, hogy a robbanással járó balesetek sokkal súlyosabbak, mint a többi baleset, felvehető egy általános f–N diagram, pl. a hibafa technika alkalmazásával. Becslések szerint a kőolajfinomítókban a robbanással járó balesetek gyakorisága 4,3x10^{-4}/év. Ha ezt az értéket egyéb vegyipari berendezésekre is elfogadjuk, a *2. ábrán* látható diagramot kapjuk.



2. ábra A társadalmi kockázat (f–N görbe) a robbanással járó balesetek esetében és a tűrési határ

A *3. ábrán* egy 350 000 t/év kapacitású, propándehidrogénező berendezés társadalmi kockázatának f–N diagramja látható. A diagram felvételekor csak a berendezést érő katasztrofális veszélyeket vettek figyelembe, a kevésbé súlyos baleseteket nem. Ez azt jelenti, hogy a 7-nél kevesebb halálos áldozattal járó balesetekre számított gyakorisági értékek kisebbek, mint a 2. ábra f–N diagramja. A becsült kockázat ebben az esetben elfogadható a brit előírások szerint, a holland előírások szerint azonban nem, mert ebben az esetben az f–N görbe a kockázat elfogadhatóságának felső határa felett halad.



3. ábra A társadalmi kockázat (f–N diagram) egy propándehidrogénező berendezés esetében

A 2. vizsgálat

Felismerték, hogy a biztonság magas szintjének elérésében és fenntartásában fontos szerepet játszik a vezetés és szervezés. Ezért a legtöbb vegyi és petrolkémiai üzem már bevezette a biztonságirányítási rendszert (SMS). A 2. vizsgálat ennek alkalmazását mutatja be.

A minta logikai diagram felvétele

A kiváltó esemény azonosítása az összehasonlító logikai diagram (MLD = Master Logic Diagram) felvételével történik, amely formális matematikai tulajdonságok nélküli hibafa. „Csúcseseménnyel” indul, amely maga a nemkívánatos esemény, majd lebontja azt egyszerűbb, összeadódó eseményekké,

úgy, hogy az események egy bizonyos szinten logikai kombinációt alkotnak. A lebontás addig tart, amíg egy szint elér odáig, ahol a berendezések biztonságtechnikai funkcióit közvetlenül befolyásoló események azonosíthatók. Vegyipari berendezéseknél mindig fennáll a lehetősége veszélyes anyagok környezetbe kerülésének. A tömítettség csökkenése vagy megszűnése (LOC, loss of containment) következtében veszélyes anyag kerülhet a környezetbe. A LOC-ot előidéző események két kategóriába sorolhatók:

- Szerkezeti meghibásodás, amelyet okozhat: túlnyomás, vákuum, korrózió, erózió, külső terhelés, magas hőmérséklet, rezgés. A fizikai folyamatok feszültséget indukálnak, amelyek meghaladhatják vagy olyan szintre csökkenthetik az anyag szilárdságát, hogy az ne álljon ellen a normál feszültségeknek. A meghibásodás egy „kiváltó esemény" eredménye lehet, egy vagy több biztonsági funkció meghibásodása mellett. A kiváltó esemény várható bekövetkezésének gyakorisága az egészen kis értékektől (pl. földrengés gyakorisága) a nagyon nagy értékekig (pl. folyamatos munkavégzés korrozív környezetben) változhat.
- LOC bekövetkezése a kerülővezetéken (pl. a működés elindul, miközben a kerülővezeték nyitva van, vagy a kerülővezeték kinyílik a berendezés működése során).

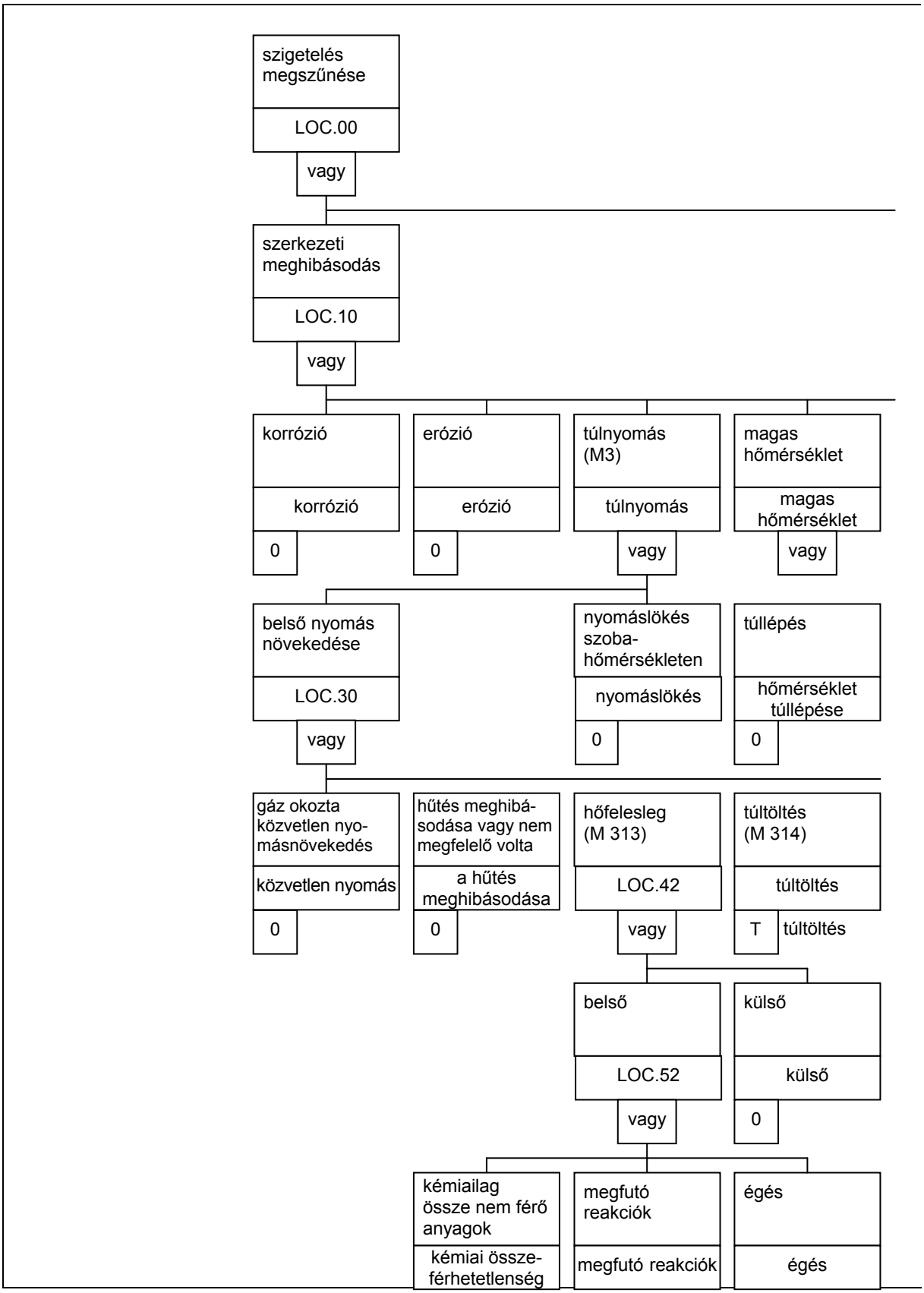
A berendezés tömörségének, szigetelésének meghibásodásához vezethetnek: a túlnyomás, vákuum, korrózió, erózió, külső terhelés, magas hőmérséklet, rezgés stb.

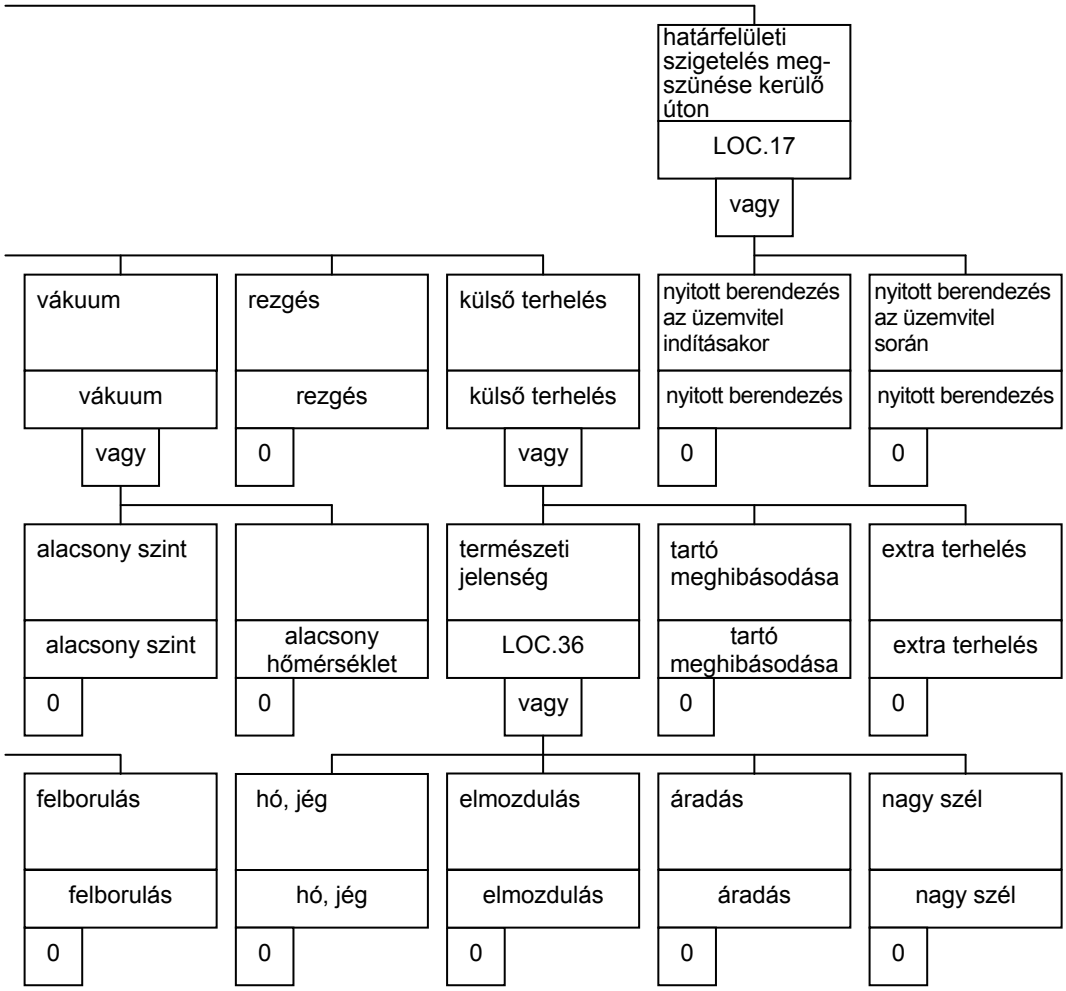
A vegyipari berendezések minta logikai diagramját a *4. ábra* mutatja.

Eseményfa – hibafaelemzés

Az LOC közvetlen okai tovább bonthatók és modellezhetők. A balesetnek van egy kiváltó eseménye, ill. egy vagy több biztonsági funkció meghibásodhat. A közvetlen okok az eseményfa – hibafa elemzéssel modellezhetők. A logikai modellek minősítésére az alábbi paramétereket alakították ki:

- A kiváltó események gyakorisága akár történeti adatokból, akár logikai modellekből (pl. hibafa) becsülhető. Az utóbbira akkor van szükség, ha függőség van a kiváltó események és egy vagy több rendszer sikeres működése között.
- Az elemek folyamatosan vagy szakaszosan ellenőrizhetők. A folyamatosan ellenőrzött elemek állapota ismert, az elemek a meghibásodásuk esetében lehetnek javíthatatlanok, ill. javíthatók. A szakaszosan ellenőrzött elemek vizsgálata periodikusan történik. Ezen komponensek kiesése a berendezések meghibásodása, a feltárt hibák javítása, az üzemeltetés során bekövetkező emberi mulasztás, illetve a karbantartás során következhet be.
- Emberi mulasztás, ha valaki nem hajt végre egy szükséges műveletet és ezt a hibát egy másik munkás sem veszi észre.


szigetelés megszűnése
LOC.00
vagy
szerkezeti meghibásodás
LOC.10
vagy
korrózió
korrózió
0
erózió
erózió
0
túlnyomás (M3)
túlnyomás
vagy
magas hőmérséklet
magas hőmérséklet
vagy
belső nyomás növekedése
LOC.30
vagy
nyomáslökés szoba-hőmérsékleten
nyomáslökés
0
túllépés
hőmérséklet túllépése
0
gáz okozta közvetlen nyo-másnövekedés
közvetlen nyomás
0
hűtés meghibá-sodása vagy nem megfelelő volta
a hűtés meghibásodása
0
hőfelesleg (M 313)
LOC.42
vagy
túltöltés (M 314)
túltöltés
T
túltöltés
belső
LOC.52
vagy
külső
külső
0
kémiailag össze nem férő anyagok
kémiai össze-férhetetlenség
megfutó reakciók
megfutó reakciók
égés
égés



4. ábra Az összehasonlító minta logikai diagramja vegyipari üzemekben

A következő lépés a mennyiségi kockázatelemzés, amely magában foglalja a balesetsorozatok mennyiségi meghatározásával kapcsolatos összes feladatot (a balesetsorozatok eseményfájának a megszerkesztése és feldolgozása a Boole-algebra szabályai szerint, majd a balesetsorozatok gyakoriságának kifejezése a balesetek számának függvényében).

A biztonságirányítási (SMS) rendszer

Az I-RISK projekt keretében kifejlesztett SMS rendszer feltételezi, hogy a társaság ellenőrzést gyakorol a fő veszélyforrások felett az elsődleges üzemi tevékenységek irányításával: normál üzemvitel, vészhelyzeti üzemvitel, karbantartás. A tevékenységeket a megfelelő források és kritériumok meghatározásával ellenőrzik. A források rendelkezésre állását és az ellenőrzést másodlagos irányítási folyamatokkal (az I-RISK projektben a szolgáltató rendszerek) vezérlik. Nyolc alapvető szolgáltató rendszert definiáltak: a személyzet rendelkezésre állása, kötelezettség és motiváció a munka biztonságos kivitelezésére, a személyzet belső kommunikációs és koordináló tevékenysége, a személyzet szakértelme, a biztonság szempontjából antagonisztikus elemek és igények konfliktusának feloldása, a berendezés interfészei, tervei és eljárásai, valamint a javításokhoz szükséges alkatrészek beszerzése.

A modellezés során bemutatják, hogyan járulnak hozzá a szolgáltatások és az ellenőrzés a normál működéshez, a vészhelyzeti működéshez és a karbantartáshoz. A veszélykezelési rendszerek reaktívan működő elemeket tartalmaznak. Legfontosabb lépései a rendszer teljesítményének rögzítése, elemzése és értékelése, beleértve az eltéréseket és a baleseteket. A visszacsatoló és értékelő hurokrendszerek az alábbi szinteken üzemelnek: korrekció, helyi javítás, a szolgáltató rendszer javítása, a teljes rendszer felülvizsgálata és javítása. A szolgáltató, a visszacsatoló és az értékelő rendszereket rendszeresen és hozzáértően ellenőrizni és elemezni kell a szolgáltatások színvonalának javítása érdekében. Az SMS minősítése az I-RISK modell keretében kifejlesztett audittal történik, amelynek célja az irányítási rendszerek, valamint a műszaki paraméterek és/vagy emberi hibák mennyiségi és minőségi értékelése, amelyek kritikusnak tekinthetők a főbb veszélyek csökkentésében, ill. elkerülésében.

Esettanulmány

Az esettanulmány során alkalmazott berendezés három toronyból áll, amelyekben cseppfolyósított kőolajgázból, LPG-ből hidrogén-szulfidot mosnak ki. Az első toronyban a metil-etil-amin (MEA) abszorbeálja az LPG-ben található H_2S legnagyobb részét. A 2. toronyban (LPG/NaOH) az NaOH kimossa a H_2S maradékát, a harmadik toronyban vízzel kimossák az LPG-ből az NaOH maradékát. Az utolsó tornyon két biztonsági szelep található, amelyet nyomásnövekedés esetén kinyitnak.

A torony minta logikai diagramja (MLD)

Az MLD eljárás alkalmazása során az alábbiak szerint azonosították az LOC közvetlen kiváltó okait: a torony meghibásodása az anyag elöregedése vagy korróziója miatt, külső hő hatására bekövetkező nyomásnövekedés okozta túlnyomás, túltöltés miatti nyomásnövekedés, elfagyás, illetve balesetek során bekövetkező túlterhelés.

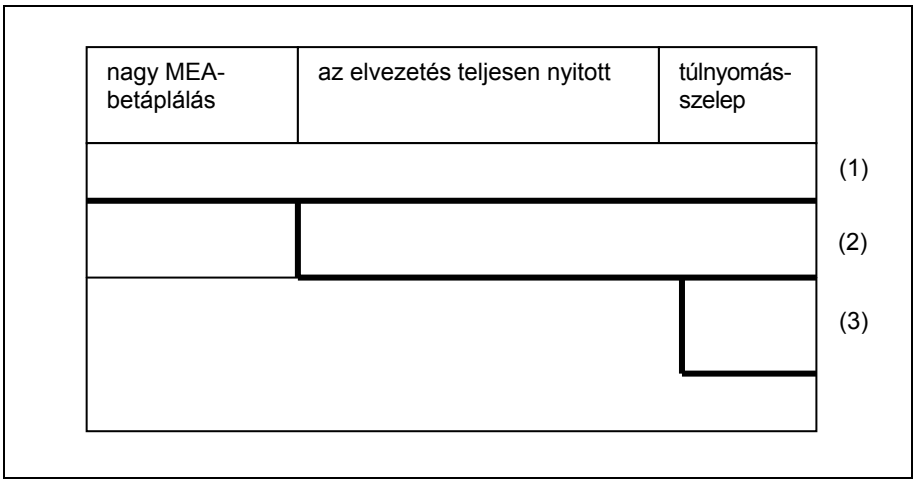
Az MLD-ben az LOC közvetlen oka egy olyan együttes esemény, amely egy kiváltó eseményből és egy vagy több biztonsági funkció hibájából tevődik össze. Bizonyos esetekben nincsenek jelen biztonsági funkciók, ekkor az LOC közvetlen oka maga a kiváltó esemény. Az anyag öregedése vagy fagyása a torony meghibásodásához vezet, mivel a biztonsági funkció ebben az esetben a torony anyagának a szerkezeti szilárdsága, amelyet meghalad a keletkező feszültségérték. A külső hő hatására, illetve a túltöltés miatt fellépő nyomásnövekedés esetén egy kiváltó esemény van és egy vagy több biztonsági funkció hibásodik meg. Ezt a két eseményt tovább elemezték, és az alábbiak szerint azonosították a kiváltó eseményeket:

- nem előírásszerű üzemeltetés,
- külső tűz,
- az adagoló szelep hibája miatt túl sok MEA adagolása,
- MEA-elvezetés hiánya,
- túl sok NaOH adagolása,
- NaOH-elvezetés hiánya,
- túl sok víz bevezetése (szelephiba miatt),
- vízelvezetés hiánya,
- túl sok LPG bevitele,
- LPG-elvezetés hiánya.

A rendszerre jellemző „nagy MEA-betáplálás a szelep meghibásodása miatt” eseményfát az *5. ábra* mutatja be, ahol az 1. és a 2. út a biztonságos üzemvitelt, a 3. pedig a torony túlnyomás miatti felhasadását jelzi. Ugyanilyen eseményfákkal írták le a többi kiváltó eseményt is. A rendszerek meghibásodását a hibafa felvételével modellezték, és kilenc hibafát szerkesztettek az alábbi kilenc biztonsági rendszerre: a nyomásmérő rendszer, a tűzoltó rendszer, biztonsági szelepek, a három toronyra alacsony és magas szintű védelmi rendszer.

Az LOC gyakorisága a három torony bármelyikében 41 alapeseménnyel fejezhető ki. A biztonságtechnikai auditáló csoport szerint mindegyik eseményt egyetlen irányítási rendszer befolyásol. Nyolc szolgáltató rendszert kellett felmérni és minősíteni.

Mindhárom torony esetében rögzítették a csúcs eseményekhez rendelhető, „VAGY” kaput tartalmazó hibafákat. „ÉS” kaput tartalmaznak a betápláló rendszerekkel és a balesetsorozatot kiváltó eseményekkel kapcsolatos meghibásodások. A minősítést az alábbi három esetre hajtották végre:



5. ábra Eseményfa „nagy MEA-betáplálás a szelep meghibásodása miatt” kiváltó eseménnyel

- a legjobb, illetve
- a legrosszabb irányítási rendszernek megfelelő paraméterek,
- módosított paraméterek.

A balesetek következményeinek a meghatározásakor az alábbiakat vették figyelembe: a három torony éghető LPG-t tartalmaz, amely a LOC bekövetkezése esetén a környezetbe kerül. Ha az LPG azonnal begyullad, a forró folyadékból távozó gőz berobban. Egyéb esetben az LPG sűrű köd formájában eloszlik a környezetben, és fellobbanó tűz vagy robbanás következhet be. Késleltetett begyulladás esetén 33% a fellobbanó tűz és 66% a robbanás bekövetkezésének valószínűsége. A 10^{-4} egyedi feltételezett halálozási kockázat egyik esetben sem lépi túl a 300 m-es távolságot a toronytól számítva.

Mindhárom torony esetében kiszámították az aktuális berendezéshez, ill. a lehetséges legjobb és legrosszabb rendszerekhez rendelt kockázati szinteket. A legjobb irányítási rendszer alkalmazása esetén a 10^{-8}/évnél nagyobb egyedi kockázat területe 0,143 km^2, a legrosszabb irányítási rendszer alkalmazása esetén ez a terület 3,36 km^2, míg az aktuális esetben 0,231 km^2.

(Regősné Knoska Judit)

Carol, S.; Vilchez, J. A.; Casal, J.: Study of the severity of industrial accidents with hazardous substances by historical analysis. = Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 15. k. 6. sz. 2002. nov. p. 517–523.

Papazoglou, I. A.; Aneziris, O. N. stb.: Technical modeling in integrated risk assessment of chemical installations. = Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 15. k. 6. sz. 2002. nov. p. 545–554.

Grasa, G.; Navarro, V. stb.: A comparative study of risk perception in small and large communities where chemical industries are present. = Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 15. k. 6. sz. 2002. nov. p. 525–530.