



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Biztonságtudományi és Kibervédelmi Intézet

SZAKDOLGOZAT



OE-BGK
2025.

Hallgató neve: Sebestyén Ágota Lina [REDACTED]
Hallgató törzskönyvi száma: T010626/FI12904/B



1088 Budapest,
József krt. 6.

+36 (1) 666-5414
+36 (1) 666-5300

email@uni-obuda.hu
www.uni-obuda.hu



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar
Biztonságtudományi és Kibervédelmi Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Sebestyén Ágota Lina

Szakedolgozat száma: [REDACTED]

Törzskönyvi száma: T010626/FI12904/B

Neptun kódja: [REDACTED]

Szak: biztonságtechnikai mérnöki

Specializáció: biztonságtechnikai mérnöki - biztonságtechnikai

A dolgozat címe: Beépített oltóberendezésekben használt oltóanyagok egészségügyi hatásai

A dolgozat címe angolul: Health effects of extinguishing agents used in built-in fire extinguishing systems

A feladat részletezése:

1. Beépített oltóberendezésekben használt oltóanyagok.
2. Jogszabályi háttér, műszaki előírások.
3. Példák az oltást követő negatív egészségügyi hatásokra.
4. Oltógázok egészségügyi hatásai a tervezési koncentrációval összefüggésben.

Intézményi konzulens neve: Mohai Ágota Zsuzsanna

A kiadott téma elévülési határideje: 2027. 12. 15.

Beadási határidő: 2025. 12. 15.

A szakedolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2025. 10. 27.



.....
Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom: 2025. 12. 15.

.....
belső konzulens

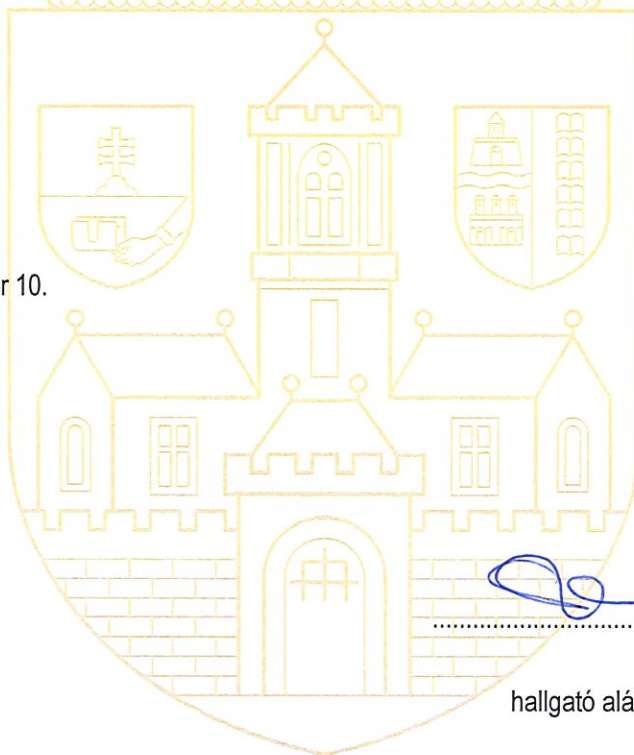
.....
külső konzulens



HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Sebestyén Ágota Lina** [REDACTED] hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2025. december 10.



hallgató aláírása

**Beépített oltóberendezésekben használt
oltóanyagok egészségügyi hatásai**

**Health Effects of Extinguishing Agents Used in
Built-in Fire Suppression Systems**

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés.....	3
2.	Beépített oltóberendezésekben használt oltóanyagok	4
2.1.	A beépített oltórendszerek szerepe a korszerű tűzvédelemben	4
2.2.	Vízalapú oltóberendezések.....	4
2.3.	Habalapú oltóberendezések.....	6
2.4.	Poralapú oltóberendezések.....	8
2.5.	Gázzal oltó berendezések.....	9
2.6.	Speciális: Beépített nagykonyhai oltóberendezéseket	9
3.	Példák az oltást követő negatív egészségügyi hatásokra.....	11
3.1.	MS Nordlys hajótűz (2011, Norvégia).....	11
3.2.	K-152 Nerpa tengeralattjáró-baleset (2008, Oroszország)	12
3.3.	Bitburg légibázis robbanás (1954, Németország)	14
3.4.	ING Bank adatközpont, Brüsszel (2016).....	14
3.5.	MT Chemical Master – Vegyianyag-szállító hajó balesete (2020).....	15
3.6.	Budapesti irodaház kapcsolóhelyiségének esete (2022)	16
3.7.	Keresztmetszeti értékelés – ismétlődő ok-okozati láncok és rejtett gyenge pontok	17
3.8.	Esetekhez kötött ellenőrző szempontok és beavatkozási pontok – narratív áttekintés	19
3.9.	Záró megállapítás – Az ismétlődő mintázatok mérnöki értelmezése és tanulságai	21
4.	Jogszabályi és szabványi háttér	25
4.1.	A nemzeti szabályozás – az OTSZ és kapcsolódó rendeletek	25
4.2.	TvMI 6.6	26
4.3.	Európai és nemzetközi szabványrendszer	27
4.4.	Az egészségvédelmi és munkabiztonsági összefüggések	28
4.5.	A mérnöki megfelelés és felelősség kérdése.....	29
4.6.	Egészségvédelem megjelenése a szabványokban.....	29
5.	Oltógázok egészségügyi hatásai a tervezési koncentrációval összefüggésben.....	30
5.1.	A tervezési koncentráció fogalma	30
5.2.	Élettani alapok és a hipoxia mechanizmusa	31
5.3.	Az inert gázok élettani hatásai.....	32
5.4.	A halogénezett és fluorozott tiszta oltóanyagok kockázatai	33
5.5.	NOAEL és LOAEL – a biztonsági küszöbértékek.....	34

5.6. Kémiai bomlástermékek és toxikológiai kockázatok	34
5.7. CO ₂ rendszerek – hatékonyság és veszélyesség.....	35
5.8. Akusztikai és nyomáshatások.....	36
5.9. Menekülési idő és expozíció-kezelés.....	36
6. Az egyéb oltóanyagok élettani hatásai és kockázatai	37
6.1. A víz- és habalapú rendszerek élettani hatásai	37
6.2. A porral oltó anyagok hatásai.....	38
6.3. Zárt téri expozíciók, menekülési idő és akusztikai mellékhatások.....	39
7. Összefoglalás és gyakorlati ajánlások.....	42
7.1. A kutatás főbb megállapításai.....	42
7.1.1. Összehasonlító értékelés.....	43
7.2. A biztonságtechnikai szemlélet átalakulása	44
7.3. Javaslatok a tervezési gyakorlat fejlesztésére	45
7.4. Ajánlások az üzemeltetés és karbantartás fejlesztésére	46
7.5. A jövő kutatási és fejlesztési irányai	47
8. Összegzés	49
9. Summary.....	51
10. Rövidítések jegyzéke	53
11. Irodalomjegyzék	54
12. Ábrajegyzék.....	57

1. BEVEZETÉS

A beépített tűzoltó rendszerek a korszerű élet- és vagyonvédelem nélkülözhetetlen eszközei. Az ipari, informatikai és közintézményi környezetben a tűzoltás már nem csak emberi beavatkozást igényel, hanem automatizált folyamatok sorozatát, amelyek gyors és precíz működése gyakran dönt az anyagi károk keletkezéséről és az emberi biztonság kimeneteléről.

A különböző oltóanyagok (víz, hab, por és gáz) eltérő fizikai és kémiai elvek alapján szakítják meg az égési folyamatot. Mindazonáltal mindegyik hordoz sajátos egészségügyi kockázatot. A víz másodlagos károkat, a por légúti irritációt, a hab környezetszennyezést, a gáznemű oltóanyagok pedig oxigénhiányos és toxikológiai kockázatot jelenthetnek.

A dolgozat célja, hogy mérnöki és humán-biztonsági nézőpontból bemutassa a beépített oltóberendezésekben alkalmazott oltóanyagok működését, alkalmazási területeit és az ezekhez kapcsolódó élettani hatásokat. Külön fejezetben kitérek, az oltógáz alapú rendszerek tervezési koncentrációval összefüggő egészségügyi kockázatokra, a tartózkodási idő és a menekülési stratégia kapcsolatára, valamint a jelzés-késleltetés-kioldás folyamatának kritikus pontjaira.

A kutatás nemzetközi esettanulmányok elemzésére is épül, amelyek során több olyan esetet vizsgállok, ahol az oltórendszerek hibás működése, tervezési hiányossága vagy emberi tényezők okán egészségkárosodás vagy haláleset történt. A példák alapján kirajzolódó mintázatok rávilágítanak a rendszertervezés és az üzemeltetés közötti kölcsönhatások fontosságára.

A záró rész gyakorlati ajánlásokat fog tartalmazni tervezők, üzemeltetők és döntéshozók számára, hogy miként biztosítható a hatékony tűzoltás mellett az emberi egészség maximális védelme. Emellett javaslatokat tartalmaz a jövőbeli kutatási irányokra, különös tekintettel az életre nagyban ható értékek pontosítására, az hang alapú mellékhatások mérséklésére és a környezetbarát oltóanyagok fejlesztésére.

2. BEÉPÍTETT OLTÓBERENDEZÉSEKBEN HASZNÁLT OLTÓANYAGOK

2.1. A beépített oltórendszerek szerepe a korszerű tűzvédelemben

A beépített oltóberendezések a tűz elleni védekezés legmegbízhatóbb és leggyorsabban reagáló eszközei közé tartoznak. Lényegük, hogy az érzékelés és az oltás között minimális idő teljen el, ezáltal a tűz kialakulásának korai szakaszában be tudnak avatkozni. A rendszer automatikus működése különösen fontos ott, ahol az emberi beavatkozás késedelme a tűz gyors terjedéséhez, súlyos anyagi károkhoz vagy emberéletet veszélyeztető helyzethez vezethet.

A beépített tűzoltó rendszerek nemcsak ipari vagy logisztikai létesítményekben, hanem közintézményekben, múzeumokban, kórházakban, adatközpontokban és közlekedési infrastruktúrákban is megtalálhatóak. Működésük több évtizedes fejlődés eredménye, amelynek során a korábbi, egyszerűbb mechanikus rendszereket fokozatosan lecserélték a komplex, elektronikus vezérlésű, több érzékelő-információra reagáló berendezésekre. [1], [2]

Ezeket a rendszereket az alkalmazott oltóanyag szerint négy fő kategóriába sorolhatjuk: víz-, hab-, por- és gázzal oltó rendszerek. Egyes speciális környezetekben (pl. ipari konyhák) beépített nagykonyhai oltóberendezéseket alkalmaznak. A következőkben ezen főcsoportok részletes ismertetésére kerül sor, külön figyelemmel az egészségügyi hatásokra és a környezeti korlátokra. [1]

2.2. Vízalapú oltóberendezések

A víz az emberiség legrégebbi és legszélesebb körben alkalmazott oltóanyaga. Népszerűsége a fizikai tulajdonságaiból fakad: nagy hőkapacitása és párolgáshője révén hatékonyan képes elvonni az égéshez szükséges hőt, ezáltal megszakítani a láncreakciót. A víz hűtőhatása mellett az oxigén elzárásával is hozzájárul az égés megszüntetéséhez: amikor a vízgőzzé alakul, térfogata akár 1600-szorosára nő, ezzel kiszorítja a levegőt az égéstérből. [2],[3]

A vízalapú rendszerek működése egyszerű, de rendkívül hatékony. Hőmérséklet-emelkedés vagy füstérzékelés hatására a sprinkler fej megnyílik, és az adott területre víz

áramlik. Az automatikus rendszer legnagyobb előnye, hogy az érzékeléstől számított néhány másodpercen belül megkezdődik az oltás, emberi beavatkozás nélkül. [1]

Rendszertípusok és felhasználási területek

A vízalapú oltórendszerek több típusa ismert:

1. **Nedves rendszer (Wet Pipe System)** – A csőhálózat állandóan vízzel van feltöltve. Az érzékelés hatására a sprinkler fej megnyílik, és azonnal víz jut a tűzfészekre.

Előnye: Egyszerű a felépítése, gyors a reakció ideje.

Hátránya: Fagyveszélyes környezetben (pl. külső terek, parkolóházak) nem alkalmazható.

2. **Száraz rendszer (Dry Pipe System)** – A csövekben levegő vagy nitrogén van túlnyomással, így a víz csak riasztás után áramlik be.

Előnye: Fagyálló, így alacsony hőmérsékletű környezetekben is biztonságosan használható.

Hátránya: Lassabb a reakcióidő és több karbantartási időt igényel.

3. **Előakciós rendszer (Pre-action System)** – Kettős feltétel szükséges az aktiváláshoz (pl. füstérzékelés és hőmérséklet-jelzés).

Előnye: csökkenti a téves kioldás veszélyét, ezért érzékeny helyeken (pl. szervertermekben) is alkalmazható.

Hátránya: Magasabb költségeket igényel, mivel több vezérlős és érzékelős rendszer, aminek a karbantartása is időigényesebb.

4. **Deluge rendszer** – Minden sprinklerfej nyitott, a víz egyszerre áramlik a teljes területre.

Előnye: gyors, nagyléptékű oltás nagy kockázatú területeken (pl. repülőgéphangárok, vegyipar).

Hátránya: magas vízigény, jelentős másodlagos kár.

5. **Vízköd rendszer (Water Mist System)** – A vizet finom cseppekké porlasztja, ezzel fokozza a hűtőhatást és csökkenti a vízkárt. *Előnye:* hatékonyabb hűtés kisebb vízmennyiséggel, ezért érzékeny környezetben (archívum, múzeum) is használható. [1],[4],[5]



1. ábra: Vízköd rendszer

Egészségügyi és környezeti hatások

A víz emberi egészségre nem jelent közvetlen veszélyt, azonban a működés közben keletkező gőz és pára irritációt okozhat zárt térben, különösen, ha éghető anyagok bomlástermékei is jelen vannak. A legnagyobb kockázatot a másodlagos sérülések jelentik: csúszás, elektromos zárlat, vízkár az elektronikai berendezésekben. Munkavédelmi szempontból ezért a vízalapú rendszerek működése után fontos a tér szellőztetése és a maradék víz gyors eltávolítása. [6],[7]

2.3. Habalapú oltóberendezések

A hab az egyik leghatékonyabb oltóanyag az éghető folyadékokkal kapcsolatos tüzek esetén. Fizikai-kémiai működése három fő elvre épül: elfojtás, hűtés és párolgásgátlás. Az elfojtás során az oltóhab réteg lefedi az égő folyadék felszínét, elzárva azt az oxigéntől. A víztartalom hőelvonással hűti a tűzteret, míg az oltóhab film csökkenti az éghető gőzök párolgását, így megelőzi a visszagyulladást.[2]

Az oltóhab anyagokat expanszió szerint három csoportba soroljuk:

- **Könnyű habok** (4–20-szoros térfogat-növekedés): sűrű, stabil, kis térfogatú terekben hatékony.
- **Közép habok** (20–200-szoros térfogat-növekedés): általános ipari alkalmazás.
- **Nehéz habok** (200–1000-szeres térfogat-növekedés): gyorsan terjed, nagy terek lefedésére alkalmas, például hangárokbán. [4]

Rendszertípusok

- **Hab-víz sprinkler rendszer:** a vízhez habképző anyagot kevernek, így a sprinklerfej habosított oldatot bocsát ki.
- **Deluge habrendszer:** a nyitott fűvókákon keresztül egyszerre árasztja el a teret habbal és vízzel.
- **Habgenerátoros rendszer:** külön habosító eszközök nagy mennyiségű, könnyű oltóhabot hoznak létre, amely elborítja a teret. [1],[4]

Környezeti és egészségügyi vonatkozások

Az oltóhabanyagok egy része tartalmaz fluorozott vegyületeket (PFAS), amelyek a környezetben nem bomlanak le, ezért 2020 után az Európai Unió fokozatosan korlátozta használatukat. Ezeket az oltóhabokat új, biológiailag lebomló összetételek váltják fel. Egészségügyi kockázat szempontjából az oltóhabok közvetlenül nem mérgezőek, azonban a lebomlási termékeik, illetve az égő anyagokkal való reakciójuk során



2. ábra: Habalapú oltóberendezés

keletkezhetnek irritáló gázok. A zárt térben végzett oltás után a légsere és az utólagos ellenőrzés ezért kötelező. [8],[9],[10]

2.4. Poralapú oltóberendezések

A porral oltás alapelve a kémiai láncreakció megszakítása. A finomszemcsés por szemcséi a lángfrontba jutva reaktív ionokat kötnek meg, ezzel megszakítják az égést fenntartó gyökgyök-reakciókat. Emellett a por bevonatot képez a felületen, hőt von el, és fizikai gátat hoz létre az oxigén és az éghető anyag között. [2],[4]

A porral oltás gyors, de a szemcsék mindenre lerakódnak, ami takarítást és helyreállítást igényel. Ezért a poros rendszereket főként olyan helyeken alkalmazzák, ahol a berendezések másodlagos sérülése elfogadható ár a gyors tűzlefogásért – például ipari üzemekben, járművekben, gépházakban vagy elektromos elosztószekrényekben. Habár a porral oltás gyors és hatékony az erre alkalmas helységeken, az általa okozott károk nem elhanyagolhatóak, emiatt Magyarországon nem túl elterjedt a használatuk beépített rendszerekben. [4],[5]

Rendszertípusok

- **Lokális poros rendszer:** egy-egy berendezés vagy zóna védelmét látja el (pl. elektromos szekrény).
- **Központi porrendszer:** egy nagy tartályból több csövön keresztül juttatja a port a különböző területekre. [1]

Egészségügyi kockázatok

A por belélegezve légúti irritációt, köhögést, szem- és nyálkahártya-irritációt okozhat. A porfelhő csökkenti a látást és növeli a csúszásveszélyt. Az oltás után elengedhetetlen a tér teljes átszellőztetése, a takarítás, valamint a munkaterület ideiglenes lezárása. Bár mérgező komponenseket a legtöbb ipari por nem tartalmaz, hosszabb távon a finom szemcsék mechanikai irritációt válthatnak ki, különösen rosszul szellőző terekben. [6],[7]

2.5. Gázzal oltó berendezések

Az oltógáz használata olyan terekben vált elsődleges választássá, ahol az oltás utáni maradványanyag hatalmas kárt okozhat – például adatközpontokban, irattárakban, múzeumokban vagy laboratóriumokban. Az oltógázok két fő csoportba sorolhatók:

- **Inert gázok** (pl. nitrogén, argon, Inergen): az oxigénszintet csökkentik, így megszüntetik az égést.
- **Kémiai tiszta oltóanyagok** (pl. FM-200, Novec 1230): kémiai reakcióval megszakítják az égési folyamatot. [11],[12]

A rendszerek jellemzően nyomás alatt tárolt palackokból, elosztócsövekből és fűvókákból állnak. A működés során az oltógáz néhány másodperc alatt elárasztja a védett teret, miközben az oxigénszint 12–15% környékére csökken.

Előnyeik: gyors működés, nincs maradvány, nem károsítja a berendezéseket.

Hátrányaik: magas költség, karbantartási igény, és a hipoxia veszélye. [4], [7], [11]

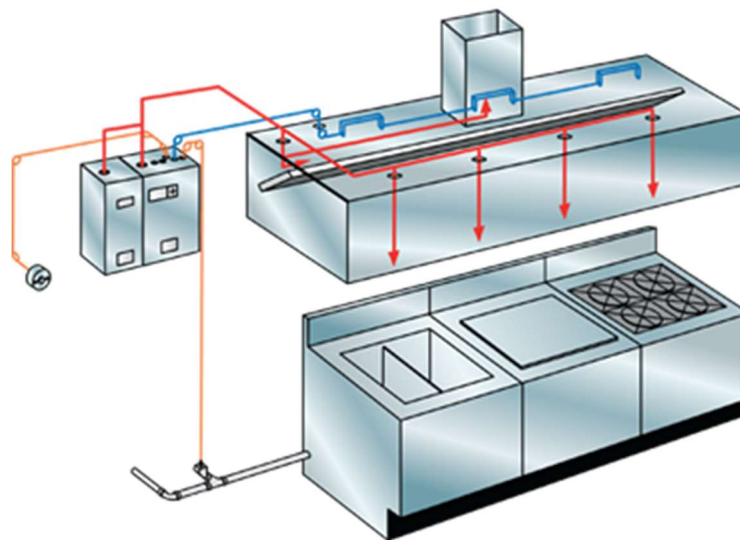
Az oltógáz használata során keletkező nyomáslengések és hanghatások további problémát jelentenek. Az oltáskor fellépő hangnyomásszint képes érzékeny adattárolók meghibásodását okozni, emellett pszichológiai stresszt és átmeneti halláskárosodást is előidézhet a térben tartózkodóknál. [11], [13],[14]

2.6. Speciális: Beépített nagykonyhai oltóberendezéseket

A beépített nagykonyhai oltóberendezéseket kifejezetten zsír- és olajtűzek oltására fejlesztették ki, ahol a víz alkalmazása veszélyes lehet. A vegyszer az égő olajjal kémiai reakcióba lép, és nem éghető, hűtő habréteget képez a felszínen. Ez a réteg elzárja az oxigént, és megakadályozza a visszagyulladást. [4]

A rendszerek automatikusan működnek: hőérzékelők vagy olvadóbetétes kábelek indítják az oltást, amelyet gyakran gáz- és áramtalanítás követ. A berendezések lokális jellegűek, a fűvókák az égésveszélyes zónák fölött helyezkednek el. [4]

Egészségügyi szempontból ezek a rendszerek biztonságosnak tekinthetők, a maradvány habszerű anyag csúszásveszélyt okozhat, de toxikus hatása nincs. Fontos ugyanakkor a karbantartás és a koncentráció minőségének rendszeres ellenőrzése, mivel az oldat hatékonysága idővel csökkenhet. [1], [15]



3. ábra: Beépített nagykonyhai oltóberendezés működési elve

3. PÉLDÁK AZ OLTÁST KÖVETŐ NEGATÍV EGÉSZSÉGÜGYI HATÁSOKRA

A tűzvédelmi rendszerek megbízhatóságát gyakran laboratóriumi körülmények között igazolják, ám a valós működés során fellépő tényezők – emberi viselkedés, döntési hibák, környezeti eltérések – sokszor más eredményre vezetnek. Az esettanulmányok ezért pótolhatatlan forrásai a biztonságtechnikai tudásnak. A mérnöki és emberi tényezők közötti kapcsolat gyakran csak utólag, egy baleset vizsgálata után válik nyilvánvalóvá.

A beépített oltórendszerek hibái ritkán vezethetőek vissza egy okra. Szinte minden komolyabb esemény mögött több láncszem található: egy elmaradt karbantartás, egy hibásan beállított érzékelő, egy félreértett riasztás vagy egy képzetlen kezelő. Az alábbi hat valós – illetve dokumentált, de az adatvédelem miatt részben anonimizált – eset olyan mintázattokat mutat, amelyek a technológiai biztonság és az emberi tényező közötti összefüggéseket világítják meg.

3.1. MS Nordlys hajótűz (2011, Norvégia)

A *Nordlys* utasszállító hajó 2011. szeptember 15-én hajnalban, Ålesund közelében haladt, amikor a gépházban tűz ütött ki. A hajó 207 utast és 55 fős legénységet szállított. A tűz keletkezési pontja a generátor egyik kenőolaj vezetéknél volt, ahol a szivárgó olaj gyúlékony aeroszolt képezett, amelyet egy elektromos szikra meggyújtott. [16]

A hajó automatikus érzékelői azonnal jeleztek, és a tűzvédelmi központban riasztás indult. A hajón két oltórendszer működött párhuzamosan: egy magasnyomású vízköd rendszer, valamint egy CO₂ alapú gázzal oltó rendszer a gépházban. A vízköd rendszer automatikus indítását azonban a legénység késleltette, mert féltek attól, hogy a CO₂-rendszerrel egy időben működve a látási viszonyokat rontja és a menekülést akadályozza. A CO₂-kioldást végül manuálisan, közel tíz perccel a riasztás után indították el, amikor már a hőmérséklet meghaladta a 600 °C-ot, és a lángok elérték a kábel vezetékeket. Az oltógáz elárasztotta a teret, de ekkorra már a gépház több része túlmelegedett, és a tűz részben a szomszédos helyiségekre is áttért. A késedelmes kioldás miatt a rendszer nem tudta megakadályozni a füstterjedést, és két tengerész a sűrű füstben életét veszítette. [16]

A norvég Tengerbiztonsági Hivatal (AIBN) vizsgálata szerint a személyzet nem kapott elegendő képzést a többfázisú oltórendszer működésére. A kézikönyv sem tartalmazta, hogy a CO₂-rendszer indítását megelőzően pontosan milyen feltételeket kell teljesíteni (pl. személymentesítés, ajtózáras). A riasztás és az indítás között eltelt tíz perc elegendő volt ahhoz, hogy a tűz energiája megnégyszereződjön. [11], [16]

A baleset után Norvégiában módosították a hajózási biztonsági előírásokat:

- kötelezővé vált a kettős jóváhagyás a gázos oltás indításához (parancsnok és géptiszt),
- a vízköd és CO₂ rendszerek közötti logikai kapcsolat felülvizsgálata,
- és a riasztási időnapló automatikus mentése minden hajón.

A *Nordlys* tragédiája a döntési késedelem klasszikus példája. A rendszer műszakilag megfelelő volt, de a személyzet félelme a hibás indítástól, valamint a hiányos eljárásrend végül emberéletekbe került. [11], [16]



4. ábra: MS Nordlys hajótűz

3.2. K-152 Nerpa tengeralattjáró-baleset (2008, Oroszország)

2008. november 8-án a K-152 *Nerpa* tengeralattjáró a Japán-tenger orosz felségvizein próbaútját végezte. A fedélzeten 208 személy tartózkodott, köztük katonai és polgári szakemberek. A hajó tűzvédelmi rendszerének tesztje közben az oltógázzal oltó rendszer váratlanul aktiválódott két rekeszben, miközben több tucat ember dolgozott ott. [17]

A rendszer Halon 2402 típusú oltógázt használt, amely kémiai úton szakította meg az égési folyamatot. A kioldás rövid időre a bent tartózkodók számára veszélyes koncentrációt eredményezett, így nem tudtak időben reagálni a riasztásra, ami csak a kioldás után néhány másodperccel szólalt meg, így a bent tartózkodók már nem tudtak reagálni. [17]

A tragédia mérlege: 20 halott, 41 sérült, többségük oxigénhiány és kémiai mérgezés miatt. A vizsgálat megállapította, hogy a rendszer késleltetési ideje nullára volt állítva, mert a tesztelés során a személyzet gyors működést akart demonstrálni. A kézi megszakító is hibás volt, a visszajelző lámpák pedig a korrozív páratartalom miatt nem működtek. [17]

A baleset hatására az orosz haditengerészet szigorította az automatikus tűzoltórendszerek tesztelésére vonatkozó előírásokat:

- bevezették a kötelező 30 másodperces késleltetést minden ember által bejárható térben,
- módosították a vészlelő készülékek elérhetőségi előírását (minden 10 m²-re 1 készülék),
- és külön riasztási szimulációt kell tartani minden próbaút előtt.

A *Nerpa*-eset nemcsak haditengerészeti, hanem ipari mérföldkő is lett. Megmutatta, hogy egy rendszer hibátlanul is működhet, mégis katasztrófához vezet, ha a humán interfész – a vezérlés, a jelzés, a protokoll – nem egyértelmű. [11], [17]



5. ábra: 971U Scsuka-B típusú tengeralattjáró

3.3. Bitburg légibázis robbanás (1954, Németország)

A NATO légibázisán 1954 nyarán egy föld alatti üzemanyagtartály karbantartása zajlott. A tartályban korábban CO₂-oltó rendszert telepítettek, hogy a tűzveszélyt csökkentsék. A próba során azonban a nagy nyomású CO₂-bevezetés statikus kisülést okozott az üzemanyag-gőzökkel telített légtérben, ami azonnali robbanást eredményezett. Hat technikus a helyszínen életét veszítette, további kilenc súlyosan megsérült. [18]

A robbanás ereje 20 méter átmérőjű krátert hagyott, és teljesen megsemmisítette az üzemanyagrendszert. A vizsgálat szerint a tartály nem volt megfelelően földelve, a csatlakozók rozsdásak voltak, és az oltógáz bevezetése túl nagy sebességgel történt. Az elektrosztatikus feltöltődés kisülése gyújtotta be a gőz-levegő keveréket. A baleset után az amerikai légierő (USAF) kiadta a TM 5-698 „Static Control in Fuel Systems” című műszaki szabályzatot, ezzel szigorításokat bevezetve. [18]

A Bitburg-incidens máig a statikus feltöltődés egyik tankönyvi esete. A robbanás fizikai háttere ma is oktatási példaként szerepel a tűzvédelmi mérnökképzésben: a széndioxid inert ugyan, de a bevezetésének dinamikája önmagában veszélyes lehet, ha a környezet gyúlékony gőzöket tartalmaz. [18]

3.4. ING Bank adatközpont, Brüsszel (2016)

2016-ban az ING Bank brüsszeli adatközpontjában – Európa egyik legnagyobb pénzügyi IT-létesítményében – téves riasztás váltotta ki az Inergen (IG-541) oltórendszer működését. Tűz nem volt, de a rendszer az érzékelők hibás értelmezése miatt automatikusan kioldott. [13]

Az oltógáz 45 másodperc alatt árasztotta el a 4000 m²-es szervertermet. A kiömlés közben a mért hangnyomásszint elérte a 132 dB-t, amely nemcsak az emberi hallás számára fájdalomküszöb feletti, hanem az adatközponti merevlemezeket is károsította. A HDD-k működését megzavaró rezgés miatt több ezer eszköz vált olvashatatlanná. Az adatvesztés több mint 50 millió eurós közvetlen kárt okozott. [13]

Az eset után műszaki elemzés készült, amely kimutatta:

- a fűvókák nyílásgeometriája nem volt akusztikailag optimalizálva,
- a gázkiáramlás sebessége meghaladta a 320 m/s-ot,

- a nyomáskiegyenlítő panelek mérete nem volt elegendő, ezért a térben akusztikus visszaverő hullámok jöttek létre.

A gyártó az eset után új fűvókatervet fejlesztett ki, amely akusztikailag csillapított perforációval csökkent a zajt 115 dB alá, és módosította az ISO 14520-hoz tartozó kiegészítő ajánlásokat is. [12], [13]

Az emberi egészség szempontjából a bent tartózkodó karbantartók enyhe halláskárosodást és átmeneti fülzúgást szenvedtek. A baleset azonban rávilágított, hogy a gázzal oltás akusztikai hatásai nemcsak a berendezésekre, hanem az emberi érzékszervekre is veszélyt jelentenek. Ez az eset elindította a „quiet discharge” irányzatot, vagyis a csendes gázkioldás-technológiák fejlesztését, amely ma már nemzetközi adatközponti szabványkövetelmény. [12], [13]

3.5. MT Chemical Master – Vegyianyag-szállító hajó balesete (2020)

2020 júniusában az indiai-óceáni *Chemical Master* vegyianyag-szállító hajón a főmotor olajvezetékének repedése okozott tüzet a géptérben. A hajó magasnyomású vízköd oltórendszerrel volt felszerelve, amelyet a hőérzékelők aktiváltak volna. A tűzjelzés megtörtént, de az oltás nem indult el, mert a szivattyú vezérlőegysége meghibásodott. [19]

A személyzet próbálta manuálisan elindítani a rendszert, de nem ismerték a kézi indítás pontos lépéseit. A karbantartási naplóban utoljára 18 hónappal korábban szerepelt szivattyúellenőrzés. Az oltás 30 perces késéssel indult el, addig a tűz kiterjedt a kábelrendszerre és a generátorokra. Bár a hajó végül megmenekült, a motor teljesen kiégett, és az anyagi kár meghaladta a 6 millió USD-t. [19]

A vizsgálat megállapította, hogy a rendszer elektromos hiba miatt nem indult el, de az üzemeltetői gyakorlat is hibás volt. A személyzet nem tudta, hogy a kézi indításkor előbb a biztonsági zárat kell mechanikusan kioldani, majd a kézi kart elforgatni. Ezt a lépést a kiképzések során soha nem gyakorolták. [19]

A hajótársaság a baleset után:

- bevezetett egy digitális karbantartás-követő rendszert, amely automatikusan figyelmeztet a lejáró ellenőrzésekre,

- frissítette az eljárásrendet,
- és kötelezővé tette a félévente végzett vészpróbát a szivattyú és a kézi indítóegység tesztelésére.

Az eset jól példázza, hogy a technológia önmagában nem helyettesíti az emberi kompetenciát. A legfejlettebb rendszer is működésképtelen, ha a kezelők nem értik a működési logikáját. [4], [19]



6. ábra: MT Chemical Master vegyihajó

3.6. Budapesti irodaház kapcsolóhelyiségének esete (2022)

Egy modern budapesti irodaház 2022 februárjában tüzesetet szenvedett a központi elektromos elosztóhelyiségben. A helyiség Inergen (IG-541) oltógázzal védett volt. A tűz érzékelés után automatikusan kioldotta a rendszert, de a helyiség tömörsége már nem felelt meg a szabványoknak: az ajtó-tömítések elöregedtek, a szellőzőrendszerben pedig kisebb szivárgások voltak. [20]

Az oltógáz elárasztotta a teret, de nem érte el a tervezett koncentrációt, így a lángok pár perc múlva újra fellobbantak. A második kioldás során az égés végleg megszűnt, viszont a rendszer teljes töltetét felhasználták, és a helyiség több berendezése is megsérült. [20]

A vizsgálat feltárta, hogy az utolsó fan door test¹ öt évvel korábban történt, holott a szabvány háromévente írja elő a megismétlését. Az üzemeltető nem követte nyomon az érvényességi dátumot, és a karbantartási szerződésben sem szerepelt a tömörségi vizsgálat határideje. [20]

A cég az eset után automatikus karbantartási értesítő rendszert vezetett be, amely a lejárát előtt 60 nappal figyelmezteti a műszaki igazgatót és a tűzvédelmi felelőst. Ezen túlmenően minden fan door test eredménye digitális naplóban rögzítésre kerül. A budapesti eset jól mutatja, hogy az oltógáz használata nemcsak tervezéskor, hanem az üzemeltetés teljes életciklusa alatt folyamatos ellenőrzést igényelnek. Egyetlen lejárt tanúsítvány vagy elfelejtett mérés elegendő lehet a rendszer hatástalanná válásához. [5], [11], [20],

3.7. Keresztmetszeti értékelés – ismétlődő ok-okozati láncok és rejtett gyenge pontok

A hat esettanulmány közös tanulsága, hogy a balesetek ritkán vezethetők vissza egyetlen „főhibára”. Sokkal inkább egymást felerősítő hiányosságok sorozatát látjuk: bizonytalan döntéshozatalt, rosszul megtervezett vezérlési logikát, elmaradt karbantartásokat, alábecsült fizikai mellékhatásokat és az emberi tényezőkhöz kapcsolódó szervezeti gyengeségeket. A *Nordlys* gépházában tapasztalt hezitálás példája jól mutatja, hogy az indítás feltételeinek nem egyértelmű megfogalmazása növeli a hő- és füstterhelést, miközben csökkenti a személyzet reakcióképességét. A mérnöki oldalon a, jelzés–késleltetés–kioldás láncnak félreérthetetlennek kell lennie és minden dolgozónak rutinszerűen tudnia kéne. Az is igen nagy előnyt jelent, ha a vizuális jelzések is egyértelműek és feltűnőek. [16], [21], [26]

A *Chemical Master* és a budapesti kapcsolóhelyiség esetei jól illusztrálják, hogy a karbantartási fegyelem hiánya miként válik közvetlen kockázattá. A fan door test érvényességének kifutása, az ajtó-tömítések előrecedése, a szivattyú-vezérlők és a biztosítékok észrevétlen hibái mind olyan „láthatatlan” tényezők, amelyek a kritikus pillanatban teszik hatástalanná a rendszert. Ezek ellen nem elég az éves általános felülvizsgálat: olyan digitális naplózásra és határidő-értesítési rendre van szükség, amely

¹ Helyiségtömörség mérésére szolgáló vizsgálat a gázzal oltó rendszerek hatékonyságának biztosítására.

a feledékenységet és a személyfüggő működést szervezeti szinten zárja ki, és amelyet független audit ellenőriz. [19]

Az ING adatközpontban történtek feltárták az oltógáz kioldása akusztikai és mechanikai mellékhatásainak régóta alulértékelt kockázatait. A 120–130 dB feletti hangnyomás nemcsak az emberi érzékszerveket terheli, hanem lerombolhatja a precíziós berendezések működési feltételeit is. A jövőbeni tervezésben ezért nem tekinthető „extra” szempontnak az akusztikai számítás, a csendesített fűvókageometria és a nyomáskiegyenlítő felületek méretezése; ezek ugyanúgy a minimális követelmények közé tartoznak, mint a hidraulikai méretezés vagy a tűzterjedési modellezés. A HDD-k mechanikai védelme, a rezgéscsillapítás, a visszaverő felületek akusztikai kezelése és a csúcshangnyomás naplózása mind olyan részlet, amely az oltás mellett a működés folytonosságát is védi. [11], [13]

A humán tényező minden esetben meghatározó lett: a kezelők gyakran nem gyakorolták a kézi indítást, a vészlelgző készülékekhez nem jutottak el időben, és a jelölések sokszor nem voltak egységesek vagy elég beszédeseek. A stressz alatti döntéshozatal nem tréninglistákkal, hanem következetesen ismételt, rövid, valóságghű gyakorlatokkal fejleszthető; a kezelőfelületek színei, formái, ikonrendszere pedig nem esztétikai kérdés, hanem biztonsági paraméter. Az egységesség hiánya közvetlenül növeli a hibakockázatot, különösen akkor, ha több gyártó berendezései keverednek egy létesítményen belül.

Végül a térzárás és a fenntartási idő kérdése emelkedik ki alapfeltételként. A gázzal oltás hatásossága és az emberi expozíció kiszámíthatósága szó szerint a helyiség tömörségén áll vagy bukik. A budapesti eset rávilágított, hogy a fenntartási idő lerövidülése nem pusztán oltástechnikai hátrány: a kétszeri kioldás nem lineárisan, hanem ugrásszerűen növeli a kitettséget, a költséget és a visszaállítás idejét. Mindez kiegészül egy kevésbé intuitív tanulsággal a Bitburg-incidens nyomán: az „inert” jelző nem azonos a „kockázat nélkülivel”. Az oltógáz bevezetésének dinamikája, különösen zárt tartályokban vagy gőzökkel telített terekben, önmagában gyújtóforrássá válhat, ha az elektrosztatikus töltések kontrollja és a földelések folytonossága nem hibátlan. [1], [11],

A közös nevezők így kijelölik a beavatkozás természetes tereit: világos, gyakorolt döntési protokollra, hibabiztos, redundáns vezérlésre, akusztikai és áramlástanai szempontokat is integráló tervezésre, fegyelmezett és nyomon követhető karbantartásra, valamint a térzárás állapotát folyamatosan figyelő dokumentált felügyeletre van szükség. Ezek nem kiegészítők, hanem a rendszer szerves részei; nélkülük a legkorszerűbb oltóanyag is csak részben képes betölteni a feladatát. [21], [22]

3.8. Esetekhez kötött ellenőrző szempontok és beavatkozási pontok – narratív áttekintés

A fenti eseményekből leszűrhető gyakorlati tanulságok nem általános jó tanácsok, hanem konkrét, ellenőrizhető működési állítások, amelyek egy átadás, audit vagy hatósági ellenőrzés során tételesen számon kérhetőek. Hajókon és gépházakban, ahol vízköd és CO₂ rendszer együtt védi a teret, az oltógázos kioldás késleltetésének rögzített, nem nullázható értéke alapfeltétel; a két rendszer indítási feltételeinek egymásra hatását úgy kell megszervezni, hogy ne blokkolják indokolatlanul egymást, ugyanakkor ne is legyen köztük olyan logikai rés, amely késedelmet okoz. A kézi megszakító és a kézi indító vizuális és ergonómiai egységesítése – azonos színek, formák és elhelyezés – elengedhetetlen ahhoz, hogy a kezelő ne tévedhessen. A gépház kiürítésének döntési fája nem lehet hosszabb néhány lépésnél, és fizikai formában, vízálló tokban a kezelőpontnál kell lennie. Ezzel párhuzamosan a vészlelő készülékek mennyiségét a rekesz térfogatához és a bent tartózkodók számához kell igazítani, hogy a tényleges menekülési időn belül mindenki hozzájuk férjen. [1], [11]

Zárt, rekeszes rendszerekben – például haditengerészeti alkalmazásoknál – a riasztásnak hardveresen is meg kell előznie a kioldást, külön tápról és külön vezetéken, hogy egyetlen hiba se némítsa el a figyelmeztetést. Az indításnak kettős lépésen kell alapulnia: az elektromos parancsot egy fizikai, nem automatizálható mozdulat teszi véglegessé, így csökken a téves aktiválás esélye. Az ember által használt terekben a 30 másodperces késleltetés nem kényelmi, hanem életvédelmi beállítás; csak magas szintű, fizikai kulcsos jogosultsággal rövidíthető. Teszteléskor a bemutató mód nem írhatja felül az éles késleltetést, és a rendszernek a próba végén automatikusan vissza kell állnia a normál állapotra. A rekeszekben előkészített, laminált, piktogramos kártyák biztosítják, hogy a vészlelő használata ne igényeljen hosszas instrukciót. [11], [12]

Üzemanyagtartályok és robbanásveszélyes közegek esetén a folyamatos, dokumentált földelés az egyetlen reális ellenszere az elektrosztatikus gyűjtásnak. Az oltógáz bevezetés sebességének szabályozhatónak kell lennie, és veszélyes közegben „lassú töltés” üzemmódot kell alkalmazni. A csatlakozók és a zárórendszerek robbanásbiztos kialakítása, a tömítések állapotának tételes ellenőrzése, valamint a próba előtti gázkoncentráció-mérés mind olyan lépés, amely nem hagyható ki büntetlenül. A szellőztetési protokollnak konkrét légcsereszámot és mérési pontokat kell tartalmaznia, különben a „szellőztessünk” típusú utasítás csak üres frázis marad. [12], [18]

Adatközpontokban és más precíziós terekben az akusztika a tűzvédelem részévé vált. A fűvókák akusztikai tanúsítványa, a várható hangnyomás plafonértéke, a nyomáskiegyenlítő nyílások méretezése és a visszaverő felületek kezelése mind a kivitelezési dokumentáció kötelező részei. A merevlemezek rögzítése, a rezgéscsillapítás és az érzékeny zónák akusztikai pajzsai nem drága extrák, hanem olcsó biztosítások a rendszerszintű kiesés ellen. Próbaüzemkor a „csendes kioldás” szimuláció és a BMS-ben naplózott csúcshangnyomás valós visszacsatolást ad a tervezésről. Mivel a karbantartók a kioldás során is a térben lehetnek, a személyi hallásvédelem rendelkezésre állása és naprakész raktárkészlete szintén ellenőrzendő tétel. [13], [14]

Víz- és vegyszeres rendszereknél a rendelkezésre állás gyakorlati biztosítéka a villamos oldalon kezdődik: a szivattyú-vezérlők biztosítékai és tápegységei ciklikus csereprogram szerint forognak, az esedékességet dátumozott címkék jelzik. A kézi indítás lépéseit a kezelőszerv mellett elhelyezett, piktogramos kártya mutatja, és félévente gyakorolni kell, mert a ritkán használt mozdulatok vészhelyzetben feledésbe merülnek. Az oltóhab koncentrátumok minőségi tanúsítványai és lejárat ideje nem csak adminisztratív részlet: a hatásosság kulcsa, ezért a tartályon jól látható jelölésnek kell utalnia rájuk. Az üzemviteli listákban rögzíteni kell, hogy az indítás pillanatában a páraelszívás és más, oltást rontó gépészeti elemek automatikusan lekapcsolnak. A kioldást követő takarítási és visszaindítási eljárás személyekhez rendelt, névvel, határidővel és visszaellenőrzéssel működik, különben a rendszer „papíron” indul újra, miközben valójában félkész állapotban marad. [4]

Az oltógázzal való oltás alapfeltételei közé tartozik a térzárás visszaigazolása. A fan door test háromévente kötelező, kritikus terekben érdemes évente megismételni; a lejáratról a rendszernek automatikus értesítést kell küldenie. Minden ajtó- és kábeláttörés-módosítás után helye van egy minitömörégi vizsgálatnak vagy legalább a számítási modell frissítésének. A fenntartási idő becslése nem lehet független a várható hőterheléstől és a rétegződéstől, a BMS-ben pedig külön vizualizáció jelezze a térzárással kapcsolatos kockázatokat és a közelgő lejáratokat. Visszaléptetés csak mért és dokumentáltan biztonságos koncentráció mellett történhet; a hordozható gázmérők kalibrációja ugyanúgy nyomon követendő, mint bármely más biztonságkritikus eszköze. [11], [12]

A humán tényező megbízhatóságát végül nem hosszas, ritka oktatások, hanem rövid, rendszeres mikrógyakorlatok adják. A havi, 15–20 perces, célzott tréningek és az évi legalább egy teljes riasztási szimuláció szinten tartja a készségeket. A kezelőhelyek egységes ikon- és színrendszere, a többnyelvű, félreérthetetlen vészkommunikációs sablonok és az, hogy minden téves vagy valós kioldást 72 órán belül strukturált eseményvizsgálat követ, a kultúra részévé teszik a tanulást. Új belépők és alvállalkozók belépése nem történhet meg célzott oktatás nélkül. [2], [11]

3.9. Záró megállapítás – Az ismétlődő mintázatok mérnöki értelmezése és tanulságai

A bemutatott esettanulmányok rávilágítanak arra, hogy a beépített oltórendszerek biztonsága nem kizárólag a technológiai fejlettségen, hanem az emberi, szervezeti és működtetési tényezők egymásra hatásán múlik. A rendszerek alapvető célja az emberi hibák kiküszöbölése, ugyanakkor éppen az ember marad az a láncszem, amely végső soron eldönti, hogy egy incidens kezelése sikeres vagy tragikus kimenetelű lesz. A *Nordlys* hajótűz, a *Nerpa* tengeralattjáró-baleset, a Bitburg robbanás, az ING Bank adatközponti esete, a *Chemical Master* hajóeset és a budapesti kapcsolóhelyiségben történt tűz különböző környezetben játszódtak le, de mindegyik azonos kockázati mintákat mutatott.

A rendszerek működése minden esetben egy komplex, egymásra épülő biztonsági láncot alkot. Az érzékelés, a riasztás, a logikai feldolgozás, a késleltetés, a kioldás, a térzárás és a visszaléptetés egymástól függő folyamatok. Ha bármelyik hibásan működik,

a teljes lánc megbízhatósága megszűnik. A *Nerpa* balesetében például a késleltetés és a riasztás logikájának összekapcsolása vezetett közvetlenül halálos következményekhez. A *Chemical Master* hajón a szivattyú meghibásodása elsőre technikai hibának tűnt, de a vizsgálat kimutatta, hogy a hiba gyökere a hiányos karbantartási dokumentációban és a képzetlen személyzetben rejtett. A biztonsági lánc tehát nem egyszerűen egymásra épülő funkciók sora, hanem dinamikus, kölcsönhatásban lévő rendszer, ahol egyetlen gyenge elem is dominánszerűen gyengíti az összes többi. [17],[19]

A biztonsági kudarcok mélyebb oka sokszor a tervezési és a valós üzemeltetési környezet közötti eltérésben keresendő. Számos rendszer laboratóriumi körülmények között hibátlanul működik, ám a valóságban a hőmérséklet, a páratartalom, a zaj, a fényviszonyok, vagy éppen a kezelők pszichés állapota olyan változó tényezők, amelyek befolyásolják a működés megbízhatóságát. A *Nordlys* hajó esete például azt mutatta meg, hogy a kezelői döntési késedelem nem pusztán tréninghiányból fakadt: a személyzet nem volt biztos abban, hogy a két oltórendszer egyidejű indítása nem veszélyezteti az életüket. A félelem a hibás döntéstől a tűzhelyzetben bénító hatású lehet, és a késlekedés sokszor többet árt, mint egy esetleges téves indítás. [16]

Az emberi tényező tehát kettős szerepet játszik: egyszerre lehet gyenge pont és biztonsági tartalék. A megfelelően képzett, a rendszer működését mélyen értő kezelő képes az automatizmusokat is korrigálni, ha azok téves irányba indulnak. Ugyanakkor, ha a kezelő nincs tisztában a rendszer logikájával, a félelem és a bizonytalanság önálló kockázati tényezővé válik. A *Nerpa* és a *Chemical Master* esete is azt igazolta, hogy a legfejlettebb technológia sem képes pótolni a jól felkészült kezelő személyzetet.

A vizsgált események fontos paradoxonra is rávilágítanak: az oltás önmagában lehet sikeres, miközben a biztonság mégis kudarcot vall. Az ING Bank adatközpontjában a rendszer tökéletesen működött, a tűzveszélyt megszüntette, de közben olyan akusztikai mellékhatások keletkeztek, amelyek adatvesztést és egészségügyi kitétséget okoztak. A budapesti irodaházban a tűzoltás fizikailag hatékony volt, de az előregedett ajtótomítések és az elmaradt tömörségi vizsgálat miatt a tűz másodszor is fellobbant. Mindkét eset arra utal, hogy a rendszer megbízhatósága nem az oltás megtörténtében, hanem a komplex hatáslánc kockázatmentes lezajlásában mérhető. Egy rendszer akkor tekinthető

biztonságosnak, ha az oltás nemcsak megszünteti a tüzet, hanem nem idéz elő új, másodlagos veszélyeket.

A technikai megbízhatóság mellett a szervezeti érettség legalább ugyanilyen fontos. A karbantartási fegyelem, a változáskezelés, az események utólagos elemzése és az adatnaplók pontossága meghatározza, hogy egy rendszer hosszú távon mennyire őrzi meg eredeti biztonsági szintjét. A *Chemical Master* és a budapesti kapcsolóhelyiség eseteiben a karbantartás adminisztratív elmaradása váltott ki tényleges fizikai veszélyhelyzetet. A korszerű üzemeltetés ezért már nem papíralapú nyilvántartásra épül, hanem automatizált, digitális felügyeletre, ahol az időszakos vizsgálatok határideje, a fan door test érvényessége vagy a szivattyú állapota valós időben követhető. [19], [21]

A biztonságtechnikai mérnöki gondolkodás ma már elmozdult a „hibamentes működés” szűk értelmezésétől. A megbízhatóság többdimenziós fogalomná vált: egyszerre jelenti a technikai paraméterek betartását, az emberi expozíció kontrollját, a szervezeti folyamatok átláthatóságát és a dokumentáltságot. Egy tűztoltórendszer csak akkor tekinthető valóban megbízhatónak, ha mind a négy dimenzió – technikai, fiziológiai, szervezeti és adminisztratív – egyaránt teljesül. Ha bármelyik gyengül, a védelem illúzióvá válik. [12], [21]

A jogszabályi és szabványi környezet éppen ezeknek a tanulságoknak a leképezése. Az OTSZ, az MSZ EN 12094, az ISO 14520 és az NFPA 2001 nem elvont előírások, hanem az ilyen múltbeli események tapasztalataiból született válaszok. A *Nerpa* után a késleltetés bevezetése, az ING Bank eset után az akusztikai korlátozások, a Bitburg robbanás után a földelési kötelezettség mind annak bizonyítéka, hogy a szabályozás a gyakorlatból tanul. A tűzvédelmi szabványok tehát nem statikus, hanem élő rendszerek: a technológiai fejlődéssel és az emberi hibák ismeretével együtt alakulnak. [12], [20], [21], [26]

A vizsgált balesetek egyértelművé teszik, hogy a beépített oltóberendezések megbízhatósága nemcsak az oltóanyag hatékonyságán múlik, hanem azon is, hogy a teljes rendszer mennyire képes tanulni önmagából. Az igazi biztonság ott kezdődik, ahol a technológia, a humán kompetencia és a szabályozás egymást erősíti, és nem egymás hiányát próbálja pótolni. A következő fejezet ezt a kapcsolatot vizsgálja meg részletesen:

miként alakult ki az a szabályozási és szabványi környezet, amely ezeket a tanulságokat rendszerszinten építette be a tűzvédelem modern gyakorlatába. [13]

4. JOGSZABÁLYI ÉS SZABVÁNYI HÁTTÉR

A tűzvédelem mindig is kettős természetű terület volt: egyfelől mérnöki és technológiai kérdés, másfelől szigorúan szabályozott biztonsági funkció. A beépített oltórendszerek esetében a jogszabályi és szabványi környezet célja, hogy a technológiai megoldások ne csupán hatékonyak, hanem biztonságosak is legyenek az emberre és a környezetre nézve. A szabályozás alapelve az, hogy az oltás nem történhet nagyobb kockázat árán, mint amekkora maga a tűz. [20], [23]

Az elmúlt hetven évben a tűzvédelmi szabványok fejlődése szorosan követte az ipari baleseteket. A halonok kivezetése, a CO₂-rendszerek emberi expozíciós határainak bevezetése, az inert gázok hipoxiás hatásának szabványosítása és a tiszta oltóanyagok toxikológiai vizsgálatai mind valós események tanulságait tükrözik. A mai szabályozás nem előz meg minden hibát, de egyre kisebb mozgásteret enged a nem megfelelő tervezésnek és üzemeltetésnek. [1], [5], [23], [24],

4.1. A nemzeti szabályozás – az OTSZ és kapcsolódó rendeletek

A beépített oltórendszerek magyarországi alkalmazását elsősorban a 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet, közismertebb nevén az Országos Tűzvédelmi Szabályzat (OTSZ) határozza meg. Az OTSZ a tűzvédelmi törvény (1996. évi XXXI. törvény) felhatalmazása alapján készült, és meghatározza a létesítmények tűzvédelmi osztályait, a védelmi szinteket, valamint a tűzoltó rendszerek tervezési, kivitelezési és karbantartási követelményeit. [20], [23]

Az OTSZ 2020-ban átfogóan megújult, hogy illeszkedjen az európai normákhoz. Az új struktúra moduláris megközelítést vezetett be: a beépített tűzoltó rendszerekre vonatkozó fejezet külön tárgyalja a víz-, hab-, por-, gáz- és vegyszeres rendszereket. Az oltógázok esetében az OTSZ kimondja, hogy a rendszer csak megfelelő szivárgási határérték mellett üzemelhet, a fan door test eredményét pedig dokumentálni kell. Előírja továbbá, hogy minden gázos oltórendszert figyelmeztető jelzéssel, késleltetéssel és kézi megszakítóval kell ellátni, valamint a rendszer indítását csak képzett és jogosult személy végezheti. [20]

Az OTSZ mellett a 9/2008. (II. 22.) ÖTM rendelet a tűzvédelmi berendezések karbantartásáról, ellenőrzéséről és felülvizsgálatáról rendelkezik. Ez a rendelet kimondja, hogy minden oltórendszert évente legalább egyszer minősített szakemberrel kell ellenőriztetni, és a vizsgálat eredményét tűzvédelmi üzemeltetési naplóban kell rögzíteni. A napló formája és adattartalma ugyan nem kötött, de a gyakorlatban a legtöbb üzemeltető digitális formában vezeti, amely lehetővé teszi az automatikus értesítéseket és az auditálható visszakeresést. [25]

A munkavédelmi szempontokat a 1993. évi XCIII. törvény a munkavédelemről, valamint annak végrehajtási rendeletei rögzítik. Ezek a szabályok a munkáltató felelősségét határozzák meg abban, hogy a beépített tűzvédelmi rendszerek működése során az emberi egészség védelme elsődleges maradjon. Az oltógázt használó rendszerekre külön kitér a 25/2000. (IX. 30.) EüM–SzCsM együttes rendelet, amely meghatározza a munkahelyi levegő megengedett oxigénhiányos állapotát, és előírja, hogy zárt térben a CO₂- és inertgáz-szintet mérni kell, ha fennáll a belépés kockázata. [15], [24]

A magyar szabályozás tehát szigorúan illeszkedik az európai irányelvekhez, ugyanakkor lehetőséget ad a mérnöki felelősség érvényesítésére: a tervezőnek kell igazolnia, hogy az alkalmazott megoldás megfelel a „rendeltetésszerű biztonság” követelményének.

4.2.TvMI 6.6

A TvMI 6.6 elsősorban az Országos Tűzvédelmi Szabályzat (OTSZ) által meghatározott követelmények értelmezésére ad szakmai útmutatást. Emiatt fontos kiemelni, hogy a beépített gázzal oltó rendszerek tervezésére nincs benne kötelező előírás, mivel a gázzal oltó berendezésekre külön, érvényes tervezési szabvány az MSZ EN 15004. A TvMI 6.6 csupán a mellékletében nyújt kiegészítő információkat és javaslatokat az ilyen rendszerek alkalmazásához, amelyek nem minősülnek kötelezően alkalmazandó műszaki előírásnak csak javaslatnak. [1], [11]

A melléklet célja, hogy a tervezők és üzemeltetők számára segédletként szolgáljon. Ilyen javaslatok például:

- a helyiség-tömörségi vizsgálat (fan door test) szükségessége,

- az indítási logika áttekinthetősége és a késleltetési idők ellenőrzése,
- a figyelmeztető jelzések, piktogramok és kezelőszervek ergonómikus kialakítása,
- valamint a dokumentáció részletessége a későbbi ellenőrizhetőség érdekében.

Bár ezek a kiegészítő információk hasznosak a biztonságos üzemeltetéshez, a gázzal oltó rendszerek kötelező tervezési és működési paramétereit kizárólag az MSZ EN 15004 szabvány határozza meg, amely tartalmazza a tervezési koncentrációk, NOAEL- és LOAEL-értékek, valamint a menekülési idő és humánfaktori szempontok részletes előírásait. [1], [11]

4.3. Európai és nemzetközi szabványrendszer

A beépített oltóberendezések nemzetközi szabályozása három fő szabványrendszerre épül: az EN, az ISO és az NFPA dokumentumokra. Ezek a szabványok gyakran egymásra hivatkoznak, és sok ponton megegyeznek, így a különböző országokban is azonos műszaki színvonalat biztosítanak. [11]

Az európai szabványok közül a MSZ EN 15004 sorozat a legmeghatározóbb. Ez a szabványcsalád az ISO 14520 honosított változata, és a gázzal oltó rendszerek tervezésének, kivitelezésének és karbantartásának alapját képezi. A dokumentum előírja a tervezési koncentráció számítási módszertanát, a NOAEL/LOAEL határértékekhez igazított expozíciós időket, valamint a helyiségtömörségi vizsgálat elvégzésének követelményeit. A szabvány mellékletei részletes adatokat tartalmaznak az egyes oltóanyagok (HFC-227ea, FK-5-1-12, IG-541 stb.) fizikai tulajdonságairól és élettani kockázatairól, így a tervező mérnök konkrét táblázatokból dolgozhat. [11],

A MSZ EN 12094 szabványsorozat a vezérlési és kioldási egységek funkcionális követelményeit határozza meg. Itt jelenik meg a késleltetési idő, a kézi indítás, a kézi megszakítás és az automatikus visszajelzés kötelező kezelése. A szabvány célja, hogy a vezérlő logika ne függjön egyetlen komponens működésétől, vagyis egy meghibásodás ne vezessen az egész rendszer hibájához. Ez az elv az ún. redundáns vezérlési architektúra, amelyet a repülőgépiparból adaptáltak a tűzvédelembe.

A nemzetközi gyakorlatban az NFPA 2001 – Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems az egyik legszélesebb körben alkalmazott referencia. Az amerikai eredetű szabvány rendkívül részletesen szabályozza az oltógázt használó rendszerek emberi expozíciós határait, és bevezeti a toxicitási egyenérték fogalmát. A szabvány minden oltóanyagra külön meghatározza, hogy a NOAEL-érték alatt mennyi ideig tartózkodhat ember a térben anélkül, hogy egészségkárosodást szenvedne. Az NFPA 2001 egyértelműen rögzíti azt is, hogy CO₂-rendszert emberi jelenlétre alkalmas térben nem szabad alkalmazni, és kötelező a „CO₂ hazard” figyelmeztető tábla minden bejáratnál.

A szabványok között nincs alá-fölérendeltségi viszony, de az európai gyakorlatban az EN- és ISO-szabványok harmonizált változatai érvényesek, az NFPA pedig irányadó referenciaként használható. Magyarországon az MSZT (Magyar Szabványügyi Testület) gondoskodik a nemzetközi dokumentumok honosításáról, így a tervezőnek lehetősége van a magyar nyelvű, de nemzetközileg elfogadott előírásokra támaszkodni. [11], [12], [21], [26],

4.4. Az egészségvédelmi és munkabiztonsági összefüggések

A tűzvédelmi szabványok többsége eredetileg technikai paraméterekre koncentrált: koncentráció, nyomás, hőmérséklet, kiáramlási idő. A 2000-es években azonban egyre több figyelmet kaptak az emberi tényezők és az élettani határértékek. Az ISO 14520 már nemcsak az oltás hatékonyságát, hanem az oxigénszint-csökkenés mértékét, a hipoxia időtartamát és a toxicitási küszöbértékeket is meghatározza. Az előírás a NOAEL (megfigyelt káros hatás nélküli szint) és a LOAEL (legalacsonyabb észlelt káros hatás szintje) értékek alapján osztályozza az oltóanyagokat, és előírja, hogy a rendszer tervezett koncentrációja a NOAEL alatt maradjon, a tartózkodási idő pedig ne haladja meg az öt percet. [12]

Az egészségvédelem szempontjából a legfontosabb, hogy az oltórendszer soha ne váljon önálló veszélyforrássá. Az oltógázzal oltás során fellépő hipoxia, a kémiai bomlástermékek (pl. HF, CF₄) és az akusztikus terhelés mind olyan tényezők, amelyeket a tervezés során előre figyelembe kell venni. A mérnöki feladat ezért nem pusztán az oltás biztosítása, hanem a megengedett emberi expozíció pontos számítása is. [14]

4.5. A mérnöki megfelelés és felelősség kérdése

A beépített oltórendszerek tervezése és kivitelezése nemcsak technikai, hanem jogi felelősséggel is jár. A magyar jogrendszer egyértelműen kimondja, hogy a tűzvédelmi tervező szakember felelős azért, hogy a tervezett rendszer megfeleljen a vonatkozó jogszabályoknak és szabványoknak, valamint, hogy a kivitelezés során az előírások betartását ellenőrizze. [23]

A megfelelés három szinten értelmezhető: először a műszaki megfelelés, amely a dokumentált tervek és szabványok szerinti megvalósítást jelenti; másodszor a funkcionális megfelelés, vagyis a rendszer tényleges működése a valós környezetben; végül az üzemeltetési megfelelés, amely azt vizsgálja, hogy a rendszer hosszú távon is képes-e teljesíteni a biztonsági célokat. Az utóbbi a legnehezebben ellenőrizhető, mivel emberi és szervezeti tényezőktől is függ. [23]

A gyakorlatban ez azt jelenti, hogy egy szabályosan átadott oltórendszer sem tekinthető automatikusan biztonságosnak, ha az üzemeltető nem tartja be a karbantartási előírásokat, vagy nem vezeti pontosan a dokumentációt. Ezért a tűzvédelmi felelősöknek, létesítményüzemeltetőknek és munkavédelmi szakembereknek közös feladatuk a folyamatos megfelelés fenntartása. [23], [24]

4.6. Egészségvédelem megjelenése a szabványokban

A tűzvédelmi szabályozás egyik legfontosabb jellemzője, hogy reagál a valós eseményekre. Minden jelentősebb baleset – legyen az a *Nerpa* tragédiája, az ING adatközpont eseménye vagy a Bitburg robbanás – hozzájárult egy-egy új követelmény beépüléséhez a szabványokba. A nemzetközi szervezetek, mint az ISO Technical Committee 21 vagy az NFPA Fire Suppression Systems Committee, rendszeresen elemzik az ipari visszajelzéseket, és ennek alapján frissítik a szabványokat. Így a tűzvédelem szabályozása nem statikus, hanem folyamatosan fejlődő, tapasztalat-alapú rendszer. [12], [21], [26]

5. OLTÓGÁZOK EGÉSZSÉGÜGYI HATÁSAI A TERVEZÉSI KONCENTRÁCIÓVAL ÖSSZEFÜGGÉSBEN

Ez a fejezet az oltógázok egészségügyi hatásaira koncentrálódik azok sokszínűsége és összetett hatásai miatt, viszont a későbbiekben kitérek majd egy fejezetben összegezve az összes többi gyakran alkalmazott oltóanyag tulajdonságaira is.

A gázzal oltó rendszerek fejlődése szorosan összefügg a modern ipari és informatikai infrastruktúrák kialakulásával. Míg a 20. század közepén a halon volt az ipari standard, addig a környezeti és egészségügyi kockázatok miatt a 2000-es évekre megjelentek a környezetbarátabb, alacsonyabb toxicitású helyettesítők. Ezek a rendszerek elsősorban ott terjedtek el, ahol a víz, a hab vagy a por másodlagos károkat okozna – például szervertermekben, múzeumokban, laboratóriumokban vagy energiaszétosztó központokban. [21]

Az oltógázok célja nem a tűz „eloltása” a klasszikus értelemben, hanem az égési folyamat megszakítása: vagy az oxigénszint csökkentésével (*inert rendszerek*), vagy az égési láncreakció kémiai megszakításával (*halogénezett, ún. tiszta oltóanyagok*). A működési elv különbsége miatt a két csoport egészségügyi kockázatai is eltérnek. [11], [21]

5.1. A tervezési koncentráció fogalma

A gázzal oltó rendszerek tervezésének egyik alapfogalma a tervezési koncentráció, amely az a térfogatszázalékban megadott oltóanyag-mennyiség, amit a rendszernek a védett térben a kioldást követően el kell érnie és a szabványban előírt ideig fenn kell tartania. A tervezési koncentráció azonban nem azonos a laboratóriumi vizsgálatokkal meghatározott oltási koncentrációval. A tesztek csupán azt mutatják meg, hogy milyen minimális koncentráció szükséges a tűz eloltásához. A tényleges tervezési koncentrációt ezekből az értékekből a vonatkozó műszaki előírások és szabványok határozzák meg, biztonsági faktor alkalmazásával, annak érdekében, hogy az oltás valós körülmények között is megbízhatóan megvalósuljon, miközben az expozíciós határértékeket sem lépi túl. [11], [21]

A nemzetközi szabványok (pl. ISO 14520, NFPA 2001) pontosan rögzítik, hogy az egyes oltóanyagok esetében mi az ajánlott tervezési koncentráció, illetve mennyi a megengedett tartózkodási idő az adott térben.

Például:

- az Inergen (IG-541) esetében tipikusan 37–43% koncentráció szükséges az oltáshoz, amely 12–15%-os oxigénszintet eredményez;
- az FM-200 (HFC-227ea) esetében a tervezési koncentráció 7–9% között van,
- a Novec 1230 (FK-5-1-12) esetében pedig 4,2–6,0% közötti érték jellemző.

A tervezés során biztonsági tényezőt (általában +20%) alkalmaznak, amely kompenzálja a szivárgást, a tér hőmérsékletváltozását és az egyenetlen eloszlást. A tervezési koncentráció tehát egyszerre szolgál technikai és egészségvédelmi célt: biztosítja az oltás hatékonyságát, miközben korlátozza az emberi expozíciót. [11], [12], [21], [22],

5.2. Élettani alapok és a hipoxia mechanizmusa

Az emberi szervezet működése az oxigénellátáson alapul. Az égés és a légzés verseng ugyanazért a gáznemű komponensért: az oxigénért. A gázzal oltó rendszerek hatásmechanizmusának lényege, hogy az égéshez szükséges oxigénrésznyomást csökkentik, így az égési folyamat megszűnik. Ugyanakkor ezzel párhuzamosan a térben tartózkodó emberek oxigénellátása is romlik, ami hipoxiához vezethet. [12], [21]

A hipoxia fiziológiai következményei az oxigén térfogatszázaléka alapján:

- **21–19%:** normál légkör, nincs tünet.
- **18–16%:** enyhe hipoxia – csökken a koncentrációképesség, nő a reakcióidő.
- **15–12%:** közepes hipoxia – fejfájás, szédülés, légszomj.
- **<10%:** súlyos hipoxia – eszméletvesztés, életveszélyes állapot.

Az inert gázokkal működő oltórendszerek (pl. Inergen, Argon, Nitrogén) jellemzően 12–14% oxigénszintre tervezettek, amely rövid ideig (30–60 másodpercig) még elviselhető, de tartós expozíció esetén már veszélyes. Ezért a rendszerekbe késleltetési

idő és figyelmeztető jelzés beépítése kötelező: a személyzetnek legalább 40-60 másodperc áll rendelkezésére a tér elhagyására. A hipoxia hatása nemcsak fiziológiai, hanem kognitív is. Számos vizsgálat igazolta, hogy 15% alatti oxigénszintnél a döntési képesség, a koordináció és a mozgási sebesség jelentősen romlik. Ez különösen veszélyes, ha a menekülés útvonalát gázkitörés, zajhatás vagy vizuális akadály is nehezíti. [7], [11], [12], [27]

5.3. Az inert gázok élettani hatásai

Az inert gázok – például az IG-541 (Inergen), az IG-55 (Argonite) vagy az IG-100 (Nitrogén) – a levegő oxigéntartalmának csökkentésével oltanak. Mivel nem égnek és nem lépnek reakcióba az égéstermékekkel, fizikai elven szakítják meg az égési láncot. Az emberi szervezetre gyakorolt hatásuk ezért közvetlenül az oxigénrészarány csökkenéséhez kapcsolódik. [21]

A normál légkör 20,9 térfogatszázalék oxigént tartalmaz. Amikor ez az érték 17 százalékos alá süllyed, a szervezet kompenzálni próbál: a pulzusszám emelkedik, a légzés gyorsul, a figyelem és a reakcióidő romlik. 14 százalékos alatt fejfájás, szédülés, hányinger léphet fel; 10 százaléknál a tudatvesztés valószínűsége már magas. Az Inergen előnye, hogy az oxigént részben szén-dioxiddal pótolja: az 1–2 százalékos CO₂-tartalom légzési reflexet vált ki, így a szervezet nagyobb hatékonysággal veszi fel az oxigént. [12], [21]

Ennek ellenére a hipoxiás környezet még Inergen esetében is csak rövid ideig tolerálható. Az ISO 14520 szerint a tervezési koncentráció 37–43 százalékos közé esik, ami 12–14 százalékos oxigénszintet eredményez. Ebben a környezetben az ember legfeljebb 5 percig tartózkodhat károsodás nélkül. Ezt az időt a tűzvédelmi jelzés és a késleltetés időtartama határozza meg: ha a rendszer 30 másodperc késleltetéssel old ki, a meneküléshez körülbelül 4–4,5 perc áll rendelkezésre. [7], [12]

A hipoxiás állapot nem mindenkit érint egyformán. A légzőszervi vagy keringési betegséggel élők, az idősek és a fizikai megterhelés alatt álló személyek gyorsabban reagálnak a csökkent oxigénszintre. A tervezés során ezért a legérzékenyebb populációra kell méretezni, nem az átlagos egészséges felnőttre. [7]

A fizikai kockázat mellett pszichés hatás is jelentkezik: az oxigénhiány korai szakaszában a tudat beszűkül, a mozgáskoordináció romlik, és az ember hajlamos a pánikra. A gázzal oltott terekben ezért kulcsfontosságú a hang- és fényjelzések egyértelműsége. A menekülési folyamatot nem akadályozhatják félreérthető vagy késve aktiválódó riasztások. [11], [12], [21],

5.4. A halogénezett és fluorozott tiszta oltóanyagok kockázatai

A halogénezett szénhidrogéneken alapuló oltóanyagok, mint a HFC-227ea (FM-200) vagy a FK-5-1-12 (Novec 1230), kémiai úton szakítják meg az égést: elnyelik a lángképződéshez szükséges energiát és megszakítják a gyökreakciókat. Az emberi szervezet számára nem oxigénhiányt, hanem toxikológiai kitettséget jelentenek. [10]

A HFC-k a tüdőbe jutva részben lebomlanak, és fluorsav (HF) szabadulhat fel, ami a légutakat irritálhatja. A koncentráció és az expozíciós idő döntő tényező. Az NFPA 2001 és az ISO 14520 is meghatározza a NOAEL (no observed adverse effect level) és LOAEL (lowest observed adverse effect level) értékeket. FM-200 esetében a NOAEL 9 százalék, a LOAEL 10,5 százalék, így a tervezési koncentráció általában 8–8,5 százalék körül van. Ezen a szinten az oltás hatékony, miközben az emberi tartózkodás még biztonságos. [12], [21]

A Novec 1230 (fluorketon alapú oltóanyag) jóval kedvezőbb élettani profillal rendelkezik. A lebomlásakor keletkező melléktermékek mennyisége csekély, és a NOAEL értéke 10 százalék fölött van, ami alacsony kockázatot jelent rövid távú expozíció esetén. Ugyanakkor nagy mennyiségű kioldáskor, különösen zárt térben, a gyors párolgás hőelvonással jár, ami helyi fagyási sérüléseket okozhat. Ezért a tervezésnél a fűvókák irányát mindig úgy kell beállítani, hogy azok ne a menekülési útvonalra vagy az emberi testre irányuljanak. [10]

A fluorozott oltóanyagok további problémája a környezeti tartósság. Bár a Novec 1230 globális felmelegedési potenciálja (GWP) a HFC-k tizede, mégis hosszú távú szennyezőként viselkedik, ha szabadba kerül. Az európai szabályozás (F-gáz rendelet, 517/2014/EU) fokozatosan korlátozza ezek használatát, így a jövőben az inert gázok és az új generációs, biológiailag lebomló oltóanyagok kerülhetnek előtérbe. [10]

Élettani szempontból a halogénezett anyagok legnagyobb kockázata a bomlástermékek belégzése. Túlmelegedéskor – például, ha a rendszer tűz közvetlen közelében old ki – a HFC-k hidrogén-fluoridra bomlanak, amely már ppm-szinten is maró hatású. A mérnöki tervezésnek ezért figyelembe kell vennie az égés hőmérsékletét, a tér szellőzését és a várható gázáramlást, hogy a bomlástermékek koncentrációja ne érje el a veszélyes szintet. [21], [27]

5.5. NOAEL és LOAEL – a biztonsági küszöbértékek

A NOAEL (No Observed Adverse Effect Level) és a LOAEL (Lowest Observed Adverse Effect Level) fogalmakat a kémiai oltóanyagok élettani hatásainak leírására használják. A két érték közötti különbség a biztonsági tartományt jelöli, amelyen belül az emberi szervezet még károsodás nélkül képes elviselni a gázexpozíciót. [21], [27]

A NFPA 2001 szabvány meghatározza az egyes oltóanyagokra vonatkozó NOAEL és LOAEL értékeket. Például:

- FM-200 (HFC-227ea): NOAEL $\approx$ 9%, LOAEL $\approx$ 10,5%.
- Novec 1230 (FK-5-1-12): NOAEL $\approx$ 10%, LOAEL $\approx$ 11%.
- FE-36 (HFC-236fa): NOAEL $\approx$ 10%, LOAEL $\approx$ 11,5%.

A tervezés során mindig a NOAEL alatti koncentrációt kell célozni, és a kioldás után a térben tartózkodó személyeknek a lehető legrövidebb időn belül el kell hagyniuk a helyiséget. A NFPA 2001 szerint az expozíció megengedett időtartama legfeljebb 5 perc, de ez csak rövid tartózkodásra és egészséges személyekre érvényes. [21]

A halogénezett oltóanyagok ugyan hatékonyan oltanak, de nagy koncentrációban kardiovaszkuláris zavarokat, aritmiát és eszméletvesztést is okozhatnak. Ezért a rendszerek kialakításánál kötelező az automatikus riasztás, a késleltetés, és a visszaléptetés csak a tér kiszellőztetése után megengedett. [12], [21]

5.6. Kémiai bomlástermékek és toxikológiai kockázatok

A gázzal oltó rendszerek egyik rejtett kockázata az oltóanyagok hő hatására történő bomlás. Amikor az oltógáz magas hőmérsékletű felülettel érintkezik (pl. 500–600 °C-os

lánggal), kémiai reakciók indulnak meg, amelyek során toxikus melléktermékek keletkezhetnek. Az FM-200 például hő hatására hidrogén-fluoridot és szén-tetrafluoridot termelhet, amelyek belélegezve irritálják a légutakat, és erős maró hatásúak. A Novec 1230 hasonló körülmények között szintén hidrogén-fluoridot képezhet, bár kisebb mennyiségben. Ezek az oltógázok már alacsony koncentrációban is nyálkahártya-irritációt, köhögést és légzési nehézséget okozhatnak. [21], [27]

Az inert gázok ezzel szemben kémiaailag semlegesek, így nem bomlanak és nem reagálnak a tűz hőjével. A kockázat tehát elsősorban a halogénezett anyagoknál jelentkezik, ezért ezek alkalmazásánál fokozott szellőztetési követelmény érvényesül, különösen zárt, alacsony légcseréjű helyiségekben. [12], [27]

5.7. CO₂ rendszerek – hatékonyság és veszélyesség

A szén-dioxid a legrégebbi gáznemű oltóanyag, amely már az 1950-es évektől elterjedt. Hatásmechanizmusa kettős: egyrészt kiszorítja az oxigént, másrészt a gyors expanzió során hőt von el az égéstérből. A CO₂-rendszerek kiemelkedően hatékonyak zárt, gépészeti terekben, például turbinaházakban, generátorállomásokban vagy hajómotorokban. Ugyanakkor a CO₂ magas koncentrációban az emberi életre rendkívül veszélyes. Már 9–10% koncentrációnál szédülés és légzési nehézség lép fel, 20% felett pedig néhány belégzés után eszméletvesztés következik be. [11], [28]

A CO₂ nem mérgező klasszikus értelemben, de magas koncentrációban igen súlyos élettani problémákat okoz. A belélegzett magas CO₂-tartalmú levegő a vér pH-értékét megváltoztatja (acidózis), a kiszorított oxigén szédüléshez, hányingerhez, eszméletvesztéshez és akár fulladáshoz is vezethet. Emiatt az ilyen rendszereket emberi jelenlét mellett tilos működtetni. [21]

A szabványok előírják, hogy CO₂-rendszer aktiválásakor hang- és fényjelzést kell adni, a térből minden személynek távoznia kell, és a belépés csak mért gázszint után engedélyezett. A rendszerekben biztonsági reteszek, mechanikus zárok, valamint késleltető szelepek segítik a véletlen kioldás megelőzését. [11], [20], [21]

5.8. Akusztikai és nyomáshatások

Az oltógázt használó rendszerek kioldásakor keletkező gázáramlás rendkívül nagy sebességű, gyakran meghaladja a 300 m/s-ot. A fűvókákon történő kiáramlás hangnyomása 120–140 dB között lehet, ami a hangspektrum közepén és magas tartományokban jelentős mechanikai rezgéseket okoz. [11]

Ez a hatás különösen veszélyes adatközpontokban, ahol a merevlemezek érzékenyek a rezgésre. Több dokumentált esetben (pl. ING Bank adatközpont, 2016) a gázkioldás idején több száz meghajtó egyszerre vált olvashatatlanná, mivel a hangnyomás a fej pozicionálást megzavarta. [13]

Az emberi szervezetre gyakorolt hatás sem elhanyagolható: 130 dB feletti hangnyomás rövid idő alatt maradandó halláskárosodást okozhat. A kiáramló gáz turbulenciája és a hőmérséklet-csökkenés (különösen az inert rendszereknél) a légáramlatokat is megváltoztatja, ami megnehezíti a tájékozódást a menekülés során. A modern rendszerek ezért akusztikailag optimalizált fűvókákat és nyomáscsökkentő szelepeket használnak. A tervezés során akusztikai számításokat is végeznek annak biztosítására, hogy a hangnyomás a 110–115 dB szintet ne haladja meg. [12], [21]

5.9. Menekülési idő és expozíció-kezelés

Az oltógázokkal védett helyiségek tervezésekor a menekülési idő meghatározása kulcsfontosságú. A rendszernek elegendő késleltetést kell biztosítania ahhoz, hogy a bent tartózkodók biztonságosan elhagyhassák a teret, ugyanakkor a tűz oltása se késlekedjen túl sokáig. A nemzetközi gyakorlat szerint a késleltetési idő 30-60 másodperc között mozog. Ez alatt az idő alatt hangjelzés, villogó fény és felirat figyelmezteti a bent tartózkodókat. Az oltógáz kiáramlását követően a tartózkodási időt a NOAEL-érték határozza meg: jellemzően 1–2 perc biztonságos. [21]

Az üzemeltetési eljárások része a visszaléptetési protokoll, amely kimondja, hogy a térbe csak a megfelelő szellőztetés és gázszintmérés után lehet belépni. Ehhez hordozható CO₂-, HFC- vagy O₂-mérő készülékeket használnak. A védett terekben légzőkészülékek és vészmaszkok elhelyezése kötelező, különösen ott, ahol karbantartás vagy emberi jelenlét előfordulhat az oltórendszer területén. [12], [15]

6. AZ EGYÉB OLTÓANYAGOK ÉLETTANI HATÁSAI ÉS KOCKÁZATAI

A beépített oltórendszerek működése során felszabaduló oltóanyagok – legyen szó vízről, habról, porról vagy gáznemű anyagokról – olyan zárt környezetben hatnak, amelyben az emberi szervezet közvetlenül reagál a fizikai és kémiai változásokra. Mivel az automatikus rendszerek gyakran még az evakuálás lezárulta előtt aktiválódnak, az emberi expozíció valós kockázattá válik. A tűzvédelmi tervezés egyik legnehezebb feladata éppen e kettősség kezelése: az oltásnak hatékonynak kell lennie, ugyanakkor a benttartózkodók élettani biztonságát is garantálnia kell. [6]

A szervezet három fő csatornán keresztül érzékeny az oltóanyagokra: a légzőrendszeren, a bőrön és a hallószerven keresztül. A légzőrendszeri expozíció – különösen gázzal vagy porral oltó rendszerek esetén – a legkritikusabb, mivel közvetlenül befolyásolja a vér oxigénszintjét. A bőrre kerülő vegyi anyagok, például a fluorozott oltóhabok, irritációt, hosszú távon pedig toxikológiai problémákat is okozhatnak. A hallószervert érő akusztikai terhelés – főként a gázkioldás során – szintén egészségkárosító hatású lehet, különösen kis térben, ahol a hangnyomás 120–130 dB fölé emelkedhet. [9]

A fizikai hatások (hőmérséklet, nyomás, zaj) és a kémiai hatások (oxigénhiány, toxikus bomlástermékek) együtt alakítják az oltórendszer humán kockázati profilját. A tervező feladata, hogy ezeket a hatásokat ne csak tűzvédelmi szempontból vegye figyelembe, hanem az élettani küszöbértékek szerint is optimalizálja. [20], [28]

6.1. A víz- és habalapú rendszerek élettani hatásai

A víz alapú tűzoltó rendszerek az emberi egészség szempontjából a legkevésbé veszélyesek, ugyanakkor nem mentesek a kockázatoktól. A leggyakoribb egészségügyi probléma az oltás közben keletkező gőz és aeroszol belélegzése, ami különösen magas hőmérsékleten hőártalmat okozhat. A vízköd rendszerek esetében a párás közeg oxigénhiányt nem, de hőstresszt válthat ki, mivel a relatív páratartalom 100 százalékhoz közelít, és a test hőleadása romlik. [2]

A habalapú rendszerek bonyolultabb képet mutatnak. Az AFFF (Aqueous Film Forming Foam) típusú oltóhabok perfluorozott vegyületeket tartalmaznak, amelyek környezetben és az emberi szervezetben is lassan bomlanak le. Ezek a vegyületek a májban és a vesében halmozódhatnak fel, hosszú távon potenciálisan endokrin zavarokat okozva. Bár a rövid távú expozíció általában nem veszélyes, a karbantartási és takarítási munkákat végző személyzet ismételt, alacsony dózisu érintkezése indokoltá teszi az egyéni védőeszközök használatát. [9]

Az oltóhab koncentrátumok egy része alkoholálló típus, amelyek izopropanol- és glikol-származékokat is tartalmaznak. Ezek gőzei zárt térben fejfájást, szédülést és irritációt okozhatnak. Az oltás után az ilyen terekbe való visszalépés előtt kötelező a légcsera biztosítása. A környezetvédelmi szempontból egyre inkább elterjedő fluormentes oltóhabok kevesebb toxikus összetevőt tartalmaznak, de az oltási hatékonyságuk még vizsgálat alatt áll. A jövő egyik nagy kihívása, hogy olyan biológiailag lebomló oltóhabokat fejlesszenek, amelyek sem az emberre, sem a környezetre nem jelentenek kockázatot, miközben megőrzik a perfluorozott vegyületek tűzoltási hatékonyságát. [1], [20], [25]

6.2. A porral oltó anyagok hatásai

A porral oltó berendezések nagy előnye, hogy gyorsan és hatékonyan megszakítják az égést, ugyanakkor a por belégzése és a látási viszonyokat rontó hatása miatt komoly ergonómiai és egészségügyi kockázatokat hordoznak. A leggyakoribb oltóporok – nátrium-hidrogén-karbonát, kálium-karbonát és monoammónium-foszfát – szemcséi mechanikusan irritálják a nyálkahártyát és a légutakat. A por koncentrációja a levegőben kioldás után néhány másodperc alatt elérheti az 5–10 mg/m³-t, ami már köhögést, könnyezést és légzési nehézséget okozhat. A szemcsék nagy része elektrosztatikusan feltöltődik, így hajlamos az elektronikai berendezésekre tapadni, ami nemcsak anyagi kárt, hanem utólagos tisztítási nehézségeket is okoz. A porral oltás után a levegő minősége lassan javul, és teljes légcsera nélkül akár órákig is magas maradhat a koncentráció.

Bár a porok többsége nem mérgező, a foszfáttartalmú típusok savas közegben ammónium-foszfátot szabadíthatnak fel, ami irritáló hatású gőzöket eredményez. A hosszú távú, ismételt expozíció – például karbantartás közben – ezért szigorúbb egyéni

védelmet igényel. Az Európai Unió REACH-rendelete több oltópor összetevőjét külön nyilvántartja, így a jövőben a biztonsági adatlapokban ezek toxikológiai profilját kötelező feltüntetni. [20], [25]

6.3. Zárt téri expozíciók, menekülési idő és akusztikai mellékhatások

A beépített oltórendszerek egyik legnagyobb kihívása, hogy működésük zárt térben zajlik, ahol a levegő összetétele, hőmérséklete és nyomása pillanatok alatt megváltozik. Az emberi szervezet számára ezek a gyors környezeti váltások különösen megterhelők. Az oltás sikeressége és a bent tartózkodók túlélése között közvetlen összefüggés van: a menekülési idő és a fiziológiai tűréshatár minden rendszer kulcsmutatója.

A menekülési idő az a periódus, amely a riasztás pillanatától a tér biztonságos elhagyásáig tart. A tűzvédelmi szabványok az oltógázt használó rendszerek esetében 30 másodperces késleltetést írnak elő a kioldás előtt, ez idő alatt az embereknek meg kell kezdeniük az evakuálást. A gyakorlatban azonban az emberi reakcióidő nem azonos a műszaki paraméterrel: stresszhelyzetben az észlelés, a döntés és a mozdulatlánc késik. A valós menekülési idő tehát nem a késleltetés hosszával, hanem az észlelési biztonsággal függ össze. Ha a jelzés nem egyértelmű, vagy a riasztás túl halk, a késlekedés akár megduplázhhatja a kitettséget. [11], [31]

A gázzal oltó rendszerek zárt terekben a hipoxiás expozíció veszélyét hordozzák. Az inert gázokkal oltott helyiségekben az oxigénrészarány általában 12–14 százalékra esik vissza, ami átmeneti zavartságot, egyensúlyvesztést és gyors kifáradást okoz. Ilyen környezetben a pánik természetes reakció, amely tovább növeli a légzésszámot és felgyorsítja az oxigénfogyasztást. A pánik pszichológiai és élettani hatása így közvetve rontja a túlélési esélyeket. A tűzvédelmi jelzések – a villogó fények, a hangriasztók és a vészkommunikációs üzenetek – ezért nemcsak technikai, hanem viselkedésformáló eszközök is. A szabványos szövegű, többnyelvű és rövid utasítások („Hagyja el a helyiséget!”, „Ne próbálja meg a rendszert megállítani!”) bizonyítottan hatékonyabbak, mint a hosszabb, összetett figyelmeztetések. [11],

A hipoxiás környezetben a szervezet kezdetben fokozza a légzést, de a levegő oxigénhiánya miatt ez nem vezet hatékony oxigenizációhoz. A szívfrekvencia emelkedik,

a vérnyomás nő, és néhány percen belül bekövetkezik a kognitív funkciók beszűkülése. A figyelem csökkenése, a térérzékelés torzulása és a koordináció gyengülése mind rontják a menekülés esélyét. A tűzvédelmi tervezés ezért nemcsak a koncentrációra, hanem a tartózkodási időre is korlátot szab. Az ISO 14520 előírásai szerint 5 perces expozíció az a határ, amely mellett még elméletileg biztosítható a biztonságos távozás. Ez azonban csak akkor tartható, ha a menekülési útvonal rövid és jól megvilágított, valamint nincs akadályozó tényező (pl. füst, hő vagy záródó ajtó). [11], [12]

A zajterhelés külön kérdéskör, amelyet sokáig alábecsültek. Az oltógázt használó rendszerek kioldásakor a nyomás alatti oltógáz rendkívül nagy sebességgel áramlik ki a fűvókákon, hangrobbanást idézve elő. A hangnyomásszint elérheti a 120–135 decibelt, ami a fájdalomküszöb fölött van, és már néhány másodperc alatt átmeneti halláskárosodást okozhat. Kisebb terekben ez a hatás erősebb, mert a hanghullámok visszaverődnek a falakról, és interferenciát hoznak létre. Az ilyen zaj nemcsak a hallást károsítja, hanem dezorientálja a bent tartózkodókat is: a hirtelen akusztikai impulzus térbeli tájékozódás-vesztést okoz, ami lassítja a menekülést. [13], [14]

A modern rendszerek már akusztikailag optimalizált fűvókákat használnak, amelyek a kiáramlás sebességét diffúzabbá teszik, így a hangnyomás jellemzően 110–115 dB alá szorítható. Ez még mindig erős zaj, de a rövid expozíció miatt tartós károsodást nem okoz. A veszély elsősorban a karbantartó személyzetet érinti, akik próbaüzem során, védőfelszerelés nélkül tartózkodhatnak a térben. A hallásvédők, a zárt ablakok és a csillapító burkolatok alkalmazása ezért kötelező védelmi elem lett a műszaki előírásokban. [13], [14]

Az akusztikai hatásokhoz kapcsolódik az úgynevezett mechanikai légnyomás-hatás, amely különösen nagy oltógáz mennyiség esetén hirtelen túlnyomást okozhat a térben. Ez ajtók kicsapódásához, ablakok repedéséhez vagy kisebb épületszerkezeti károkhoz vezethet. Az emberi szervezet számára ez a nyomásimpulzus hirtelen dobhártya-terhelést és mellkasi nyomásérzetet vált ki. Bár a károsodás ritka, a jelenség pszichésen rendkívül megterhelő, és menekülés közben bénító hatású lehet. [13], [14]

A zárt téri expozíció tehát nem egyetlen veszélyből áll: a hipoxia, a toxikus bomlástermékek, a hőterhelés, a zaj és a nyomásváltozás együttesen hat a szervezetre. E hatások összeadódása miatt az oltórendszerek tervezésénél a komplex humánfiziológiai modell az egyetlen megbízható megközelítés. Egyetlen paraméter önmagában nem mutatja meg a valós kockázatot. Az ideális tervezési szemlélet az, amely az érzékelési időt, a menekülési útvonal hosszát, az akusztikai impulzust és az oxigénkoncentráció változását együtt kezeli. [6], [21]

Az emberi tényező szempontjából a zárt térből való távozás nem kizárólag fizikai feladat. Az oltórendszer működése közben tapasztalt zaj, füst, fényvillanások és hirtelen hőmérséklet-változások mind pszichológiai stresszreakciót váltanak ki. A „fagyásos” reakció – amikor az egyén rövid időre mozdulatlanra dermed – gyakori és természetes válasz. A menekülési tréningek és a riasztási protokollok éppen ezt a viselkedést hivatottak csökkenteni. A jól megtervezett rendszer tehát nemcsak műszaki, hanem viselkedési értelemben is támogatja a túlélést: rövid, ismételt utasításokkal, erős kontrasztú fényjelzésekkel és monoton, de folyamatos hangriasztással, amely nem kelt pánikot, de fenntartja a cselekvési késztetést. [6]

A zárt téri expozíciók kérdése a beépített oltórendszerek biztonsági kultúrájának egyik központi eleme. A mérnöki gyakorlat ma már nem pusztán az oltóanyag típusát, hanem annak emberi kompatibilitását is vizsgálja. Az ideális rendszer nemcsak eloltja a tüzet, hanem a működése alatt is lehetőséget ad a biztonságos távozásra. Ez a szemlélet váltotta fel a korábbi, „gép központú” tervezést, és tette a tűzvédelmet valóban integrált humánbiztonsági tudománnyá. [11], [12]

7. ÖSSZEFOGLALÁS ÉS GYAKORLATI AJÁNLÁSOK

7.1. A kutatás főbb megállapításai

A dolgozat célja az volt, hogy feltárja a beépített oltóberendezésekben alkalmazott oltóanyagok egészségügyi kockázatait, és bemutassa, miként kapcsolódik össze a mérnöki biztonságtechnika és az emberi élettan. Az elemzés során nyilvánvalóvá vált, hogy a modern tűzvédelem nem kizárólag a tűz gyors elfojtását célozza, hanem azt is, hogy az oltás folyamata ne jelentsen újabb veszélyforrást az emberi szervezetre.

Az esettanulmányok, a szabályozási környezet és az élettani elemzések alapján megállapítható, hogy a biztonsági kudarok többnyire nem a technológia hiányosságaiból, hanem az emberi tényező és az eljárásrend közötti disszonanciából fakadnak. A *Nordlys* hajótűz és a *Nerpa* tengeralattjáró esete például azt mutatta meg, hogy a jól működő technológia is kockázatosá válhat, ha a kezelő bizonytalan, késlekedik, vagy nem ismeri a döntési protokollokat. A *Chemical Master* balesetében a karbantartási fegyelem hiánya, a budapesti kapcsolóhelyiségben pedig az előregedett tömítések idéztek elő olyan hibát, amelyet rendszeres felügyelettel meg lehetett volna előzni. [16], [17], [19]

A dolgozat megerősítette, hogy a beépített oltórendszerek hatékonysága három tényező egyensúlyán alapul: a technikai integritáson, az emberi kompetencián és a szervezeti fegyelmen. Amennyiben e három közül bármelyik gyengül, a rendszer egésze elveszíti megbízhatóságát.

A szabályozási környezet elemzése rávilágított, hogy a nemzetközi és hazai normák egyre inkább a humánbiztonsági szempontokat helyezik előtérbe. Az ISO 14520 és az NFPA 2001 nem csupán technikai paramétereket rögzít, hanem fiziológiai határértékeket is, az oxigénszinttől a hipoxia időtartamáig. Az OTSZ és az MSZ EN 15004 előírásai kötelezővé tették a késleltetést, a kézi megszakítót, valamint a tértömörségi vizsgálatot – ezek mind olyan elemek, amelyek az emberi élet védelmét szolgálják. [11], [12], [20], [21],

Az oltóanyagok típusonkénti vizsgálata azt mutatta, hogy az egyes rendszerek kockázati profilja eltér, de mindegyik hordoz valamilyen élettani hatást. Az inert gázok

hipoxiát okoznak, a halogénezett anyagok bomlástermékei toxikusak lehetnek, a poros rendszerek légúti irritációt váltanak ki, míg az oltóhabos rendszerek vegyi stabilitása hosszú távon környezeti problémát jelent. A tűzvédelmi tervezés ezért csak akkor lehet hiteles, ha a mérnök az adott tér emberi igénybevételét ismeri és a legérzékenyebb csoportokra méretez. [7], [9]

A beépített oltóberendezések nem csupán technológiai, hanem társadalmi felelősséget is hordoznak. Egyetlen téves kioldás vagy alulméretezett késleltetés nemcsak anyagi kárt, hanem maradandó egészségkárosodást is okozhat. E felelősség tudatosítása a jövő biztonságtechnikai oktatásának kulcsfeladata. [11], [12]

7.1.1. Összehasonlító értékelés

1. táblázat [12],[20]

Oltóanyag típusa	Előnyök	Korlátok/ egészségügyi kockázatok	Tipikus alkalmazási terület
Víz	Olcsó Környezetbarát Nagy hűtőhatás	Elektromos zárlat, Vízkar, Csúszásveszély	Irodák Raktárak Közüintézmények
Oltóhab	Hatékony éghető folyadékokra Visszagyulladás megelőzi	PFAS-kockázat, Bőrirritációk Szemkárosodás Bomlástermék toxikus gázokat szabadíthat fel	Olajtárolók Vegyipar Hangárok
Por	Gyors reakció Széles tűzosztály	Légúti irritáció, Szem és bőrirritáció Emésztőrendszeri zavarok	Ipari üzemek Járművek Elektromos berendezések
Oltógáz (Inert gázok pl. IG- 541,55,100)	Gyors oltás Bomlástermék mentes	Hipoxia és abból adódó	Szervertermek Múzeumok Achívumok

	Nem reagálnak az égéssel Fizikai elven működnek	mozgáskoordinációs romlás Szédülés Hányinger	Könyvtárak Energielosztó helyiségek
Oltógáz (Kémiai tiszta oltóanyagok pl. FM-200, Novec 1230)	Alacsonyabb koncentrációban is hatékonyak Kis helyigény Kémiai elven működnek	Bomlástermékek: bőr irritáció és maró hatás Toxikológiai: légúti, szem és nyálkahártya irritáció, köhögés	Adatközpontok Vegyipari helyiségek Speciális technológiai helyiségek
Beépített nagykonyhai oltóberendezés	Gyors és automata Célzott oltás Figyelemfelkeltő hang és fény riasztás	Hormonzavarok Májkárosodás Immunrendszer gyengülés PFAS-kockázat	Ipari konyhák, Éttermek

7.2. A biztonságtechnikai szemlélet átalakulása

A tűzvédelem fejlődése az elmúlt évtizedekben szemléletváltáson ment keresztül. A korábbi, „technológia-központú” megközelítést felváltotta az integrált humánbiztonsági szemlélet, amely a technikai és élettani tényezőket egyenrangúan kezeli. Az új irányt három fő tendencia jellemzi. [4]

Az első a rendszerintegrált gondolkodás: az érzékelő, a vezérlés, az energiaellátás, a térzárás, az emberi visszajelzés és a karbantartás egyetlen biztonsági lánc részei. Egyik elem hibája a teljes lánc gyengüléséhez vezethet. A modern szabványok – például az MSZ EN 12094 – már nem engedik, hogy a vezérlőlogika kizárólag szoftveres úton működjön; redundáns, fizikailag elkülönített csatornákra van szükség. [26]

A második az emberi nézőpont térnyerése. A kezelői döntések, a riasztások értelmezése, a stressz alatti viselkedés mind tervezési paraméterekké váltak. Az oltógázt használó rendszerek vezérlőpaneljein például a színkódok, a gombelrendezés és a visszajelző LED-ek nem esztétikai, hanem pszichológiai szempontok alapján készülnek.

A tűzvédelmi képzések is a rövid, cselekvésorientált formátumok felé mozdultak el: ahelyett, hogy hosszú elméleti előadásokon ismertetnék a szabályokat, valós idejű szimulációkban gyakoroltatják a menekülést és a döntéshozatalt. [11]

A harmadik pont pedig a kockázatalapú szabályozás megjelenése. A korábbi, merev előírásokat fokozatosan felváltják a célértékeket meghatározó szabványok. Az új logika nem azt mondja meg, hogyan kell elérni a biztonságot, hanem azt, hogy milyen szintet kell bizonyíthatóan garantálni. A mérnök így nagyobb teret kap az innovációra, de ezzel együtt nagyobb felelősséget is. [12], [20]

7.3. Javaslatok a tervezési gyakorlat fejlesztésére

A kutatás alapján a legnagyobb fejlődési potenciál a tervezési fázis pontosításában rejlik. A beépített oltórendszerek tervezése ma még gyakran technológiai specifikációkra, nem pedig használati mintákra épül. Ennek átalakításához több kulcsfontosságú lépés szükséges.

Először is, minden új rendszer esetében indokolt lenne egy humán-expozíciós szimuláció elvégzése, amely a várható oxigénszint-csökkenést, a zajterhelést és a menekülési időt együttesen vizsgálja. Ez lehet számítógépes modell vagy egyszerű fizikai próba, de mindenképp konkrét adatokat kell szolgáltatnia az emberi biztonságra vonatkozóan.

Másodszor, véleményem szerint szükséges lenne a helyiségtömörségi vizsgálatok automatizálása. A fan door test jelenlegi, manuális rendszere hajlamos a feledésre, különösen több száz helyiségből álló épületekben. Egy szenzorhálózatra épülő, digitálisan felügyelt rendszer képes lehetne előre jelezni a tömörségi állapot romlását, és karbantartási feladatként naplózni a szükséges beavatkozásokat. Ez még csak egy igen kezdetleges/elméleti dolog, mivel nagy költségekkel járna és bonyolult rendszereket kéne kiépíteni, de találni már cikkeket róla, hogy ha nem is teljes mértékben, de részleges monitorozással már próbálkoznak. [29]

Harmadrészt, a riasztási protokollok emberközelibbé tétele. A jelenlegi szöveges figyelmeztetések gyakran túlságosan technikaiak. A rövid, imperatív mondatok – például „Hagyja el a helyiséget most!” vagy „Ne próbálja meg leállítani a rendszert!” –

bizonyítottan hatékonyabbak a pánikhelyzetekben. Ehhez kapcsolódóan a riasztások hangjait és fényjelzéseit is érdemes lenne egységesíteni.

Negyedikként kiemelendő a karbantartási ciklusok digitalizálása. Egy egységes digitális napló – amely automatikusan figyelmeztet a közelgő határidőkre, és beilleszkedik a létesítményfelügyeleti rendszerbe – jelentősen csökkenti az emberi felelősségből eredő kockázatokat. Erre a fajta rendszerre van már példa a világunkban, ilyen magyar fejlesztés is a fiREG, amely egy felhő alapú platform, mely a tűzvédelmi berendezések karbantartásának, ellenőrzésének és üzemeltetési dokumentációjának papírmegosztására hoztak létre. Működése igen egyszerű, a rendszer részeit QR-kódos matricákkal felmatricázzák erre az adatokat feltöltve utána már egyszerűen le lehet kérni minden szükséges információt digitális formában. [30]

Végül, a tervezés során célszerű a multidiszciplináris együttműködés erősítése. Egy komplex rendszer biztonságát nemcsak tűzvédelmi mérnökök, hanem ergonómusok, pszichológusok és egészségügyi szakértők közösen tudják optimalizálni. Ez a szemlélet már megjelent a nemzetközi szabványfejlesztésben, de a hazai gyakorlatban még gyerekcipőben jár. [20], [26]

7.4. Ajánlások az üzemeltetés és karbantartás fejlesztésére

A működő rendszerek biztonságának kulcsa nem a telepítés, hanem a folyamatos felügyelet. Az esettanulmányok azt mutatták, hogy a legtöbb hiba az üzemeltetés éve alatt, nem a beépítéskor következik be. A rendszerkarbantartásnak ezért nem lehet pusztán adminisztratív rutin, hanem a szervezeti kultúra része kell, hogy legyen.

Az egyik leghatékonyabb eszköz a megelőző karbantartás automatizálása. A modern BMS rendszerek képesek nemcsak az energetikai adatok, hanem a tűzvédelmi komponensek állapotának követésére is. Egy intelligens rendszer valós időben érzékeli a szenzorhibákat, a szivárgásokat, a túlnyomást vagy a hibás kommunikációt, és riasztást küld még a hiba bekövetkezése előtt. [32]

A másik fontos fejlesztési irány a visszacsatolás és tanulás rendszerré alakítása. Minden téves vagy valós kioldást, minden riasztást vagy meghibásodást dokumentálni kell, és az adatokból statisztikai elemzés készülhet. Így a karbantartás nemcsak

hibajavítás, hanem tudásgyűjtés is lesz. A visszacsatolt tapasztalatokból a tervezők és a gyártók egyaránt profitálhatnak.

A humán oldalról az állandó képzés a legfontosabb. Az üzemeltető személyzet rotációja, a fluktuáció és az alvállalkozói rendszer miatt a tudás könnyen elveszik. Ennek ellensúlyozására rövid, moduláris oktatási programokat kell bevezetni, amelyek a mindennapi gyakorlat részeként ismételhetők. Az egyszerűség és az ismétlés itt fontosabb, mint a mélység: a cél, hogy a kezelő az alapvető döntéseket automatikusan, gondolkodás nélkül végrehajtsa.

A karbantartás minőségét hosszú távon az átláthatóság garantálja. A jól dokumentált, auditálható folyamatok nemcsak biztonságot teremtenek, hanem jogi védelmet is nyújtanak a szervezeteknek. Egy jól működő, naprakész dokumentáció nemcsak hatósági megfelelés, hanem az üzemeltető szakmai hitelességének mércéje. [20]

7.5. A jövő kutatási és fejlesztési irányai

A beépített oltóberendezések kutatása ma új területek felé nyit. Az egyik ilyen a bioalapú oltóanyagok fejlesztése, amelyek nem tartalmaznak halogénezett vegyületeket, és bomlástermékeik sem mérgezők. Az ilyen anyagok nemcsak környezet barátabbak, hanem élettani szempontból is biztonságosabbak lehetnek, különösen kiszolgáltatott környezetben, például kórházakban vagy adatközpontokban. [10]

A másik kutatási irány az akusztikai hatások mérséklése. A „silent discharge” rendszerek fejlesztése nem csupán komfortkérdés: az emberi hallásvédelem és a berendezések működési biztonsága egyaránt profitál belőle. A zajcsillapított fűvókák és nyomáskiegyenlítő rendszerek finomhangolása még további kísérleti igazolást igényel, de a trend egyértelmű: a jövő oltórendszerei nemcsak csendesebbek, hanem emberbarátabbak is lesznek. [13]

A harmadik irány a valós idejű élettani monitoring integrálása. A modern szenzortechnológia lehetővé teszi, hogy a rendszer a hőmérséklet, a CO₂- és O₂-szint mellett akár a bent tartózkodók mozgását és vitalitását is érzékelje. Egy ilyen rendszer képes lehet megkülönböztetni, ha valaki mozdulatlanul marad, és a kioldás helyett előbb

figyelmeztetést küldeni. Ez a megoldás a mesterséges intelligencia és a tűzvédelem metszéspontját képviseli. [33]

A jövő oltórendszerei tehát nemcsak technikai, hanem etikai kérdésekre is választ adnak majd: miként lehet a tűzoltást úgy megvalósítani, hogy az a lehető legkisebb mértékben veszélyeztesse az emberi életet. Ez a mérnöki felelősség magasabb szintje, ahol a biztonság már nem reakció, hanem beépített tulajdonság. [12], [21]

8. ÖSSZEGZÉS

A beépített oltóberendezésekben alkalmazott oltóanyagok élettani és egészségügyi hatásainak vizsgálata nem pusztán tudományos, hanem társadalmi jelentőségű kérdés. A modern tűzvédelem célja ma már nem csupán a lángok elfojtása, hanem a komplex emberi biztonság garantálása: a túlélés, az egészségmegőrzés és a környezeti fenntarthatóság egyensúlya. A dolgozat rámutatott, hogy a tűzoltás technikai hatékonysága önmagában nem elegendő; az oltási folyamat minden szakaszát az emberi tényezőkkel összhangban kell megtervezni.

Az elemzett esettanulmányok, szabványok és élettani adatok azt bizonyítják, hogy a technológia és az ember elválaszthatatlan egységet alkot a biztonságtechnikában. A *Nerpa* tengeralattjáró balesetében a műszaki rendszer hibátlanul működött, de az emberi tényező hiánya tragédiát okozott. Az ING Bank adatközpontjában az oltógáz kioldás akusztikai mellékhatása az emberre nem volt halálos, de a berendezésekre végzetes. A *Chemical Master* és a budapesti irodaház példái pedig arra tanítanak, hogy a karbantartás, az oktatás és a felelősségvállalás hiánya még a legjobb technológiát is hatástalanná teszi.

A beépített oltórendszer tehát nem önálló gép, hanem rendszerszintű ember–technológia kapcsolat. Megbízhatósága csak akkor tartható fenn, ha a tervezés, a kivitelezés és az üzemeltetés egységes gondolkodásmódban valósul meg. A jövő biztonságtechnikája ezen az elven alapul: a tűzvédelmi mérnök nem csupán számításokat végez, hanem az emberi reakciók, érzékelések és határértékek modellezésével együtt tervez.

A dolgozat tapasztalatai szerint a legnagyobb fejlődési lehetőség a tudásmegosztásban és a fegyelmezett adatkezelésben rejlik. Az automatikus karbantartási rendszerek, a digitális auditnyilvántartások és a mesterséges intelligencián alapuló felügyeleti platformok lehetővé teszik, hogy a tűzvédelem ne csak reagáljon, hanem előre jelezzen. Az oltórendszerek jövője így nem az ember helyettesítésében, hanem az ember támogatásában keresendő.

A tűzvédelmi mérnökség és az egészségvédelem összefonódása új szintre emeli a biztonság fogalmát. A hatékony oltás, a szabványos megfelelés és az emberi egészség

védelme nem egymást kizáró célok, hanem egymást feltételező alapelvek. A beépített oltóberendezésekben használt oltóanyagok egészségügyi hatásainak feltárása ezért nem csupán tudományos feladat, hanem erkölcsi kötelesség is: a technológiát az ember szolgálatába állítani, nem fordítva.

A jövő tűzvédelmi szakembereinek – mérnököknek, üzemeltetőknek, döntéshozóknak – legfőbb feladata az lesz, hogy e szemléletet fenntartsák. A rendszeres oktatás, a kutatás és a szabályozás együttműködése képes csak olyan környezetet teremteni, ahol a beépített oltórendszerek valóban az ember biztonságát szolgálják. Ez a dolgozat ehhez kívánt hozzájárulni: egy olyan tudatosabb, felelősebb és humánusabb tűzvédelmi gondolkodás kialakításához, amely a 21. század kihívásai között is megőrzi alapvető célját – életet menteni.

9. SUMMARY

The study of the physiological and health effects of extinguishing agents used in built-in fire suppression systems is not merely a scientific issue, but also a matter of societal significance. Modern fire protection is no longer solely focused on extinguishing flames; it aims to ensure comprehensive human safety, balancing survival, health preservation, and environmental sustainability. The thesis has shown that technical efficiency alone is insufficient; every stage of the extinguishing process must be designed in harmony with human factors.

The analyzed case studies, standards, and physiological data demonstrate that technology and humans form an inseparable unit in fire safety engineering. In the Nerpa submarine accident, the technical system functioned flawlessly, yet the absence of human consideration led to tragedy. In the ING Bank data center, the acoustic side effects of gas discharge were not fatal to humans but were catastrophic for equipment. The Chemical Master and Budapest office examples highlight that poor maintenance, inadequate training, and lack of accountability can render even the best technology ineffective.

Thus, a built-in fire suppression system is not an independent machine but a system-level human–technology interaction. Its reliability can only be maintained if design, installation, and operation are executed within an unified framework. The future of fire safety relies on this principle: fire protection engineers must plan not only calculations but also human reactions, sensory responses, and threshold limits.

According to the thesis, the greatest potential for advancement lies in knowledge sharing and disciplined data management. Automated maintenance systems, digital audit records, and AI-based monitoring platforms enable fire protection to not only react but also predict potential risks. The future of suppression systems is therefore not in replacing humans but in supporting them.

The integration of fire engineering and health protection elevates the concept of safety to a new level. Efficient extinguishing, regulatory compliance, and protection of human health are not mutually exclusive goals but interdependent principles. Studying the health

impacts of agents used in built-in systems is therefore not merely a scientific task but also a moral duty: technology must serve humans, not the other way around.

The foremost responsibility of future fire protection professionals—engineers, operators, and decision-makers—will be to uphold this mindset. Only through continuous training, research, and regulatory cooperation can environments be created where built-in fire suppression systems truly safeguard human life. This thesis aims to contribute to the development of a more conscious, responsible, and human-centered approach to fire protection that preserves its fundamental goal of saving lives, even amidst the challenges of the 21st century.

10. RÖVIDÍTÉSEK JEGYZÉKE

AFFF – *Aqueous Film Forming Foam* (vizes filmképző oltóhab)

FK-5-1-12 – *Fluor Keton alapú tiszta oltóanyag*

HFC-227ea – *Halogénezett szénhidrogén, tiszta oltóanyag (piaci név: FM-200)*

IG-541 – *Inergen (inert oltógáz-keverék; jellemzően 52% N₂, 40% Ar, 8% CO₂, de gyártói eltérések előfordulnak)*

LOAEL – *Lowest Observed Adverse Effect Level* (legalacsonyabb észlelt káros hatás szintje)

NOAEL – *No Observed Adverse Effect Level* (megfigyelt káros hatás nélküli szint)

OTSZ – *Országos Tűzvédelmi Szabályzat* (54/2014. (XII. 5.) BM rendelet)

NFPA- *National Fire Protection Association*

TvMI- *Tűzvédelmi Műszaki Irányelv*

SDS – *Safety Data Sheet* (biztonsági adatlap; toxikológiai információkat tartalmaz)

PFAS- *Per- and PolyFluoroAlkyl Substances* (*Per- és polyfluoralkil-származékok*)

PFAS-kockázat- *A fluorozott habokban lévő, lebomlásra gyakorlatilag képtelen vegyületek egészségre és környezetre gyakorolt, felhalmozódó és mérgező hatásait jelenti.*

BMS- *Building Management System*

11.IRODALOMJEGYZÉK

- [1] TvMI 6.6- *Beépített tűzoltó berendezések tervezése, telepítése*
- [2] B. Drysdale, *Bevezetés a tűz dinamikájába*, 3. kiadás, Wiley-Blackwell, 2011.
- [3] B. Karlsson és J. G. Quintiere, *Zárt téri tűzterjedés dinamikája*, CRC Press, 2000.
- [4] A. Szabó, *Tűzvédelmi rendszerek tervezése és üzemeltetése*, Mérnöki Kiadó, Budapest, 2019.
- [5] BM Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság (OKF), *Beépített tűzvédelmi rendszerek meghibásodásai Magyarországon (2017–2022)*, Budapest, 2023.
- [6] D. A. Purser, „A tűz és füst toxikológiai hatásai,” *Fire Safety Journal*, vol. 60, o. 37–49, 2013.
- [7] J. Purser és D. Purser, „A hipoxiás környezet élettani hatásai tűzoltási körülmények között,” *Safety Science*, vol. 108, o. 1–12, 2018.
- [8] Az Európai Parlament és a Tanács 517/2014/EU rendelete – *A fluorozott üvegházhatású gázokról (F-gáz rendelet)*.
- [9] NFPA, *Az oltóanyagok egészségügyi és környezeti hatásai*, Műszaki adatlap, Quincy, MA, USA, 2019.
- [10] Johnson Controls, *FM-200 és Novec 1230 oltóanyagok biztonsági és környezeti értékelése*, Fehér könyv, 2020.
- [11] MSZ EN 15004:2019 – *Gázzal oltó rendszerek. Tervezési, kivitelezési és karbantartási követelmények*.
- [12] ISO 14520:2016 – *Gázzal oltó rendszerek – Fizikai tulajdonságok és rendszertervezés*.
- [13] European Data Centre Association (EUDCA), *Acoustic Discharge Effects in Gas-Based Fire Suppression Systems – ING Brussels Incident Report*, Műszaki jelentés No. 17/04, 2017.

- [14] National Institute of Standards and Technology (NIST), *Akusztikai és nyomáshatások gázzal oltó rendszerek kioldásakor*, Fire Research Division Report FRD-18-054, 2018.
- [15] 25/2000. (IX. 30.) EüM–SzCsM együttes rendelet – *A munkahelyek kémiai biztonságáról*.
- [16] Accident Investigation Board Norway (AIBN), *MS Nordlys – Gépháztűz vizsgálati jelentés, Ålesund, 2011. szeptember 15.*, Jelentés No. 2012/09, 2012.
- [17] Interfax / RIA Novosti, *A K-152 Nerpa tengeralattjáró balesetének vizsgálati eredményei*, Orosz Tengerészeti Biztonsági Hivatal, Moszkva, 2009.
- [18] U.S. Air Force Safety Center, *Static Electricity and CO₂ System Explosion – Bitburg Air base Incident Analysis*, TM 5-698, 1955.
- [19] International Maritime Organization (IMO), *Casualty Investigation Report – Fire on board MT Chemical Master, Indian Ocean, June 2020*, Körlevél MSC/Circ.1635, 2020.
- [20] 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet – *Országos Tűzvédelmi Szabályzat (OTSZ)*
- [21] NFPA 2001:2022 – *Tiszta oltóanyagú rendszerek szabványa (Standard on Clean Agent Fire Extinguishing Systems)*.
- [22] Honeywell Fire Solutions, *A tiszta oltóanyagok kioldásának akusztikai hatásai – Laboratóriumi értékelés, Műszaki jelentés, 2021*.
- [23] 1996. évi XXXI. törvény a tűz elleni védekezésről, a műszaki mentésről és a tűzoltóságról.
- [24] 1993. évi XCIII. törvény a munkavédelemről.
- [25] 9/2008. (II. 22.) ÖTM rendelet – *A tűzvédelmi berendezések karbantartásáról és felülvizsgálatáról*.
- [26] MSZ EN 12094:2021 – *Oltórendszerek vezérlési és indítási berendezéseinek funkcionális követelményei*.
- [27] UL Fire Research, *Halogénezett oltóanyagok bomlástermékei és toxikus mellékhatásai*, UL-FSR-2020-07, 2020.

[28] NFPA 12 – Standard on Carbon Dioxide Extinguishing Systems, National Fire Protection Association, Quincy, MA, current edition.

[29] MDPI- Integrating IoT Technology for Fire Risk Monitoring and Assessment in Residential Building Design

[30] Fireg.hu

Elérhető: <https://fireg.hu/gyakori-kerdesek> Letöltés dátuma: 2025.12.07.

[31] NFPA 17: Standard for Dry Chemical Extinguishing Systems, 2018 Edition

[32] UL Fire Research, “Automated Monitoring of Fire Suppression Systems,” UL-FSR-2020-10, 2020.

[33] European Fire Safety Network (EFSN), “Next Generation Fire Suppression – AI and Real-Time Human Monitoring,” 2021.

12.ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: <https://insights.globalspec.com/article/14177/is-water-mist-fire-suppression-the-successor-to-traditional-sprinklers>
2. ábra: <https://tuzor.hu/szakteruleteink/habbal-oltok-habelarasztas/habbal-oltok-habanyagok>
3. ábra: <https://www.dunamentivk.hu/Ansul-R-102-nagykonyhai-oltorendszer-4>
4. ábra: <https://gcaptain.com/cruise-ship-nordlys-explosion/>
5. ábra: https://hu.wikipedia.org/wiki/K%E2%80%9393152_Nyerpa
6. ábra: https://msiu.gov.mt/wp-content/uploads/2023/01/PDF-Accidents_and_Incidents_2021-MT_Chemical_Master_Final_Safety_Investigation_Report.pdf