

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**ROBBANÁSVESZÉLYES KÖRNYEZETBEN KIALAKULÓ
KIBOCSÁTÁSOK SZIMULÁCIÓS ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA**

PhD ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

KÉSZÍTETTE:

Tugyi Levente

okleveles gépészmérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE TÉMATERÜLET
ENERGETIKAI ÉS VEGYIPARI GÉPÉSZETI TÉMACSOPORT

DOKTORI ISKOLA VEZETŐJE

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella

akadémikus, a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár

TÉMACSOPORT VEZETŐJE

Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán

PhD, egyetemi tanár

TÉMAVEZETŐ

Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán

PhD, egyetemi tanár

TÁRS-TÉMAVEZETŐ

Prof. Dr. Szepesi L. Gábor

PhD, egyetemi tanár

**Miskolc
2025**

Tugyi Levente

ROBBANÁSVESZÉLYES KÖRNYEZETBEN KIALAKULÓ KIBOCSÁTÁSOK
SZIMULÁCIÓS ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

PhD értekezés tézisei

Miskolc, 2025

1. KUTATÁSI FELADAT

1.1. BEVEZETÉS

Számos iparágban találkozhatunk olyan tűz- vagy robbanásveszélyes anyagokkal, amelyek különféle veszélyeket jelenthetnek a munkavállalók, az ott tartózkodó személyek, a környezet és az infrastruktúra számára. Ezen veszélyes anyagok lehetnek gázok (pl. hidrogén, acetilén, ammónia), gőzök (pl. benzol, etanol), valamint porok (pl. fémporok, szerves porok) vagy ezek hibrid keverékei, amikor a gáz vagy gőz közeg és a por egyidejűleg van jelen.

A robbanásveszély kockázatának és kezelésének tudományos vizsgálata, valamint szabályozásának kezdete a bányászathoz – elsősorban a szénbányászathoz – kapcsolódik. A bányászat története során számos robbanással járó baleset történt, amelyek súlyos következményekkel jártak. Ezek a balesetek nagymértékben hozzájárultak ahhoz, hogy a robbanásveszélyekkel kapcsolatos kockázatokat a társadalom megértse és kezelje. A földalatti szénbányákban gyakran előforduló sújtólég magas koncentrációban tartalmaz metángázt, amely felhalmozódhat zárt terekben, ahol a szellőzés korlátozott, ezáltal a veszélyes közeg hígulása nem hatékony. Ezenkívül a finom szénpor levegővel keveredve szintén robbanásveszélyes elegyet alkothat. Amikor a metán levegővel keveredik, és gyújtóforrással érintkezik, robbanás következhet be. A metánrobbanások a bányászat egyik leggyakoribb és legveszélyesebb eseményei közé tartozik.

A robbanásveszélyes térségek – vagy általánosabban fogalmazva, zónák – azonosítása és kiterjedésük meghatározása (HAC) területén különböző jogszabályok, rendeletek, irányelvek és szabványok (pl. ágazati szabványok, NFPA, API, OSHA) állnak rendelkezésre. Ezek segítenek azonosítani a veszélyes anyagot az égés- és robbanástechnikai tulajdonságaik alapján [1], nevesítik az egyes technológiákban fennálló különböző kibocsátó forrásokat és előírásokat, valamint összefüggések alapján definiálják a robbanásveszélyes

térsegek típusát és kiterjedését, biztosítva a személyek biztonságát és a jogszabályi előírások betartását.

Az éghető és gyúlékony folyadékok, gázok, gőzök, ködök vagy aeroszolok esetén – amelyek robbanásveszélyes térsegeket képezhetnek – számos empirikus összefüggés áll rendelkezésre, amely kísérleti adatokon és megfigyeléseken alapul. Az összefüggések és modellek közé tartozik például a Bernoulli-egyenlet, amely a folyadékok és gázok áramlását írja le egy nyíláson keresztül. Ide sorolható a kritikus áramlás (choked flow – fojtott áramlás) is, amely a gázok és gőzök szivárgásakor léphet fel, a kritikus nyomásviszony alatti vagy fölötti állapotokban. A veszélyes anyagok kibocsátása esetén – különösen tárolótartályokból történő szivárgásnál – gyakran alkalmazzák a Henry-törvényt és az Antoine-egyenletet a párolgási sebesség és a kibocsátási tömegáram kiszámítására. Ezenkívül az egyes rendszeremlekből történő folyadékszivárgás, csöpögés (kistömegáramú kifolyás) vagy kiömlés – például peremes kötéseknel, szivattyúk tengelyátvezetéseinel (tömszelencék), mintavételi pontoknál vagy letöltő nyílásoknál –tölcsák vagy úgynevezett medencék kialakulásához vezethet. Ez utóbbi esetekben, nagyobb kiterjedésű folyadékfelszínek esetén, számos modell áll rendelkezésre a párolgási mértékek leírására. Ezek a megközelítések segítenek a kibocsátási tömegáramok meghatározásában, és pontos iránymutatást adnak arra vonatkozóan, hogy gázok, gőzök, folyadékok kibocsátása során – forráspont alatt vagy fölött – milyen módszerek alkalmazhatók. Cseppfolyósított gázok esetében egy- vagy kétfázisú áramlás is kialakulhat, az anyag fizikai-kémiai tulajdonságaitól függően. A fizikai-kémiai tulajdonságokon túlmenően a kibocsátási karakterisztika több áramlástanai tényezőtől is függ. Az egyik legfontosabb paraméter a kibocsátó forrás nyílásának mérete, emellett fontos tényező a kibocsátási együttható, valamint a berendezés nyomása és hőmérséklete is.

A kibocsátási modelleket az anyagok felszabadulása során lejátszódó terjedési folyamatokat reprezentáló alapvető analitikai és empirikus egyenletekből lehet felépíteni. Ezek lehetnek például a Benintendi-, Ewan- and Moodie-, Long-, McMillan- és Yellow Book-modellek, amelyek különböző aspektusokban alkalmazhatók, és részben vagy teljesen átültetésre kerültek a

robbanásveszélyes térségek meghatározásánál alkalmazott szabványokba, irányelvekbe. Számos esetben bizonytalanság állhat fenn, mivel egy adott modell felírásához rengeteg információra van szükséges, de ezek nem minden esetben állnak rendelkezésre.

1.2. CÉLKITŰZÉSEK

A kutatásom során a robbanásfeltételek rendszerét kívánom vizsgálni, különös tekintettel a robbanásveszélyes gázokat, gőzöket tartalmazó berendezésekből történő kibocsátási és szivárgási formákra, ezek terjedésére szimulációs szoftverek segítségével, valamint a robbanási kockázat fennállására és a robbanásveszélyes térségek (zónák) kiterjedésének pontosságára. Tekintettel arra, hogy ez nem csupán egyéni, hanem világméretű probléma, célom a robbanásveszélyes környezetben kialakuló kibocsátások szimulációs és kísérleti vizsgálata, kizárólag gázok és gőzök esetén. A szabályozási környezet jelenleg sokrétű, nem konzisztens, esetenként ellentmondásos, ezért fontosnak tartom e terület mélyebb vizsgálatát. Célom továbbá, hogy a mérnöki gyakorlatban alkalmazott összefüggéseket tudományosan megalapozott módon felülvizsgáljam, és szükség esetén olyan javaslatokat fogalmazzak meg, amelyek hozzájárulnak a biztonság növeléséhez, vagy indokolatlan túlméretezés elkerüléséhez.

Az értekezésem során először szakirodalmi áttekintést végzek, amelyben érintem a robbanásveszélyes környezet kialakulásának feltételrendszerét, a kialakuláshoz kapcsolódó robbanástechnikai tulajdonságokat, valamint a robbanásvédelemhez kapcsolódó jogszabályi és szabványi háttérrel. Összefoglalom a robbanásveszélyes környezetben előforduló kibocsátási formákat, amelyek lehetnek például egy- vagy kétfázisúak, ezen belül környezeti hőmérsékleten, forráspont-közei vagy forráspont feletti hőmérsékletű folyadékok, továbbá tócsa- és medencepárolgás. Az irodalmi szinopszis kiterjed a robbanásveszélyes környezet terjedési modelljeire, a CFD-alapú és egyéb szimulációs környezetekre is, továbbá taglalja a robbanásveszélyes térségek meghatározására alkalmazható, ismert összefüggéseket.

Ezt követően a kutatásom során az aceton párolgását kívánom vizsgálni, mivel ez az anyag a vegyiparban, de a szépségiparban is gyakran előfordul, és robbanási kockázatot jelenthet. A folyadék felszínre való párolgás mértékének a meghatározásra több összefüggés is rendelkezésre áll, és ezeket össze kívánom hasonlítani a hatályos szabványban található összefüggésekkel, valamint átlagos mérési eredményekkel. A cél a lehető legpontosabb összefüggés azonosítása az aceton és a hozzá hasonló folyadékok párolgása tekintetében, ezáltal a robbanási kockázat megfelelő kezelése.

Kutatásom korai szakaszában az ANSYS Fluent szoftver állt rendelkezésre, később pedig lehetőségem nyílt a FLACS-CFD környezet használatára is, így a vizsgálatokat mindkét szimulációs környezetben elvégeztem azok alkalmazhatósága szerint. Az értekezésemhez kapcsolódó kutatások során, a terjedés vizsgálatoknál hidrogén közeget is alkalmaztam, mivel a hidrogénipar az utóbbi években jelentős mértékben előtérbe került az energiaszférában, és az ipari gyakorlatban is széles körben elterjedt. A hidrogén mellett a metán kibocsátását is vizsgáltam, mivel a földgáz kitermelése, tárolása, szállítása és felhasználása Magyarországon, valamint más országokban is elterjedt. A témámhoz kapcsolódóan a metán teljes mértékben releváns vizsgálati közeg, ráadásul – előre láthatóan – még hosszú éveken át kivezethetetlen anyagként kezelhető. A két gázközeget együtt, keverékeik robbanásveszélyes zónájának meghatározását az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabvány módszertana szerint tekintem át, amelyhez kiegészítéseket is javaslok. Ezek a kiegészítések alapját képezhetik a szabványi környezet jövőbeli megújításának, mivel jelenleg nincs egységes analitikai módszer a robbanásveszélyes térségek pontos meghatározására, kutatásom egyik célja olyan megközelítés kidolgozása, amely lehetővé teszi a többkomponensű gázkeverékek szivárgásából adódó robbanásveszélyes zónák előrejelzését.

Amennyiben a disszertációmban leírt, minden egyes vizsgált területhez kapcsolódó újítás és javaslat megvalósul, ezek hozzájárulhatnak a mérnöki gyakorlatban alkalmazható szakértői környezet hatékonyabb kialakításához, a robbanásveszélyes térségek kiterjedésének pontosabb meghatározásához, ezáltal csökkentve a robbanási kockázatnak kitett területek nagyságát.

A kutatás során hivatkozott jogszabályok, hazai és nemzetközi szabványok adatgyűjtését 2025.07.03-ig bezárólag vizsgáltam. Az ezt követően bekövetkezett jogszabályi és szabványi változások nem képezik az értekezésem részét.

A kutatás témájához kapcsolódó további vizsgálati eljárások és módszerek tekintetében, amelyek relevánsak lehetnek, mint például a szilárd, éghető szalmas anyagok és porok okozta robbanási kockázat, porrobbanás feltételeinek az elemzését nem vizsgálom. Éghető folyadékokból eredő köd képződés, aeroszolk kialakulás lehetőségeit, mechanizmusainak folyamatai és viselkedését nem tárgyalja az értekezésem. A gáz-gőz-por diszperz rendszerek, azaz a hibrid keverékek, amikor egyszerre vannak jelen a különböző közegek okozta robbanásveszély kockázatának vizsgálatára nem terjed ki. A több komponensű rendszerek, oldószerkeverékek párolgási dinamikája, relatív illékonyaságuk komplexitása és a párolgás-áramlás kölcsönhatásának a visszahatását a párolgási sebességre (például a lokális hűlés, kondenzáció, felületi hőmérsékletváltozás) kutatási korlátok miatt nem vizsgálom. Cseppfolyósított és kétfázisú közegek kibocsátását, amelyek peremfeltételek szerinti szivárgását és terjedését írják le, a kísérleti és szimulációs vizsgálataim nem terjednek ki. A CFD szimulációk a gyakorlati alkalmazhatóságát vizsgáltam és nem elemeztem a turbulencia kölcsönhatásait, a turbulens örvénystruktúrákat, keveredési hatásokokat mert az általános terjedési modellek vizsgálatára terjed ki, stagnációs zónák vagy örvénylő áramlások nem része. A környezeti tényezők közül, mint például napsugárzás, páratartalom, csapadék okozta stabil/instabil légköri állapotok gázfelhők terjedésére, diszperziójára terjedelmi korlátok miatt nem része. A vizsgált robbanásveszélyes anyagok szivárgásából és terjedéséből eredő környezeti és egészségkárosító hatásait nem tér ki a kutatásom, továbbá a jogi vagy szervezeti vonatkozásban a nem teljes körűen rögzített követelményeket nem részletezem, azok pontatlanságait értekezésem nem ismerteti, valamint gazdasági és költségelemzésre terjed ki. Az említett releváns kutatások további vizsgálatainak lehetőségét az értekezésem végén található fejlesztési lehetőségek fejezetben teszek javaslatot.

2. TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

2.1. ÉGÉS ÉS ROBBANÁS – A ROBBANÁSVESZÉLYES KÖRNYEZET KIALAKULÁSÁNAK FELTÉTELRENDSZERE

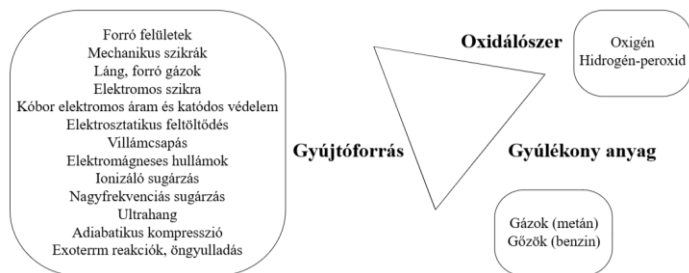
A robbanás egy hirtelen bekövetkező reakció, amelynek során fizikai és kémiai oxidációval vagy bomlással közösen végbemenő hőmérséklet- és/vagy nyomásváltozást történik [2]. Általában éghető gázok, gőzök vagy porok, valamint a levegőben megtalálható oxigén között megy végbe. Ahhoz, hogy gázok vagy gőzök esetében égés és robbanás bekövetkezzen, három feltételnek kell egyidejűleg és egy helyen teljesülnie, amit az 1-es ábra szemléltet.

Oxidálószer jelenléte: a robbanás létrejöttéhez oxidálószer (pl. oxigén) szükséges, amely részt vesz az égési vagy robbanási folyamatban. Ezen feltételen belül egy további tényező az oxigén határkoncentrációja, ahol égés vagy robbanás nem alakul ki. Ez az érték például etilén esetében 10% alatti, míg lignit esetében akár 8% is lehet.

Gyúlékony anyag: olyan tűz- vagy robbanásveszélyes anyag, amelynek koncentrációja az égési vagy robbanási tartományban van, és oxidálószerrel keveréket képez.

Gyújtóforrás: egy külső energiaforrás, amely elindítja a reakciót. Ez lehet szikra, magas hőmérséklet, ütés vagy súrlódás – összesen 13 különböző típus ismert [3].

A hazai [4], valamint a nemzetközi szakirodalom [3] is égési háromszögnek definiálja a feltételrendszert, mivel a reakció lángfronttal indul, amelyből ezt követően nyomáshullámok is kialakulnak. Egyes szakirodalmak robbanási háromszögnek is nevezik [5], amely kifejezést a mérnöki gyakorlatban is használják, mivel a robbanás is égési folyamat, csupán rendkívül gyors exoterm reakció. Az értekezés témáján túl ismert a porrobbanási ötszög is [6], amely az égési háromszöghöz képest a por-levegő keverék zártága, és a diszperzió kritikus tényezőivel egészül ki.



1. ábra: Az égési háromszög (szerző szerkesztése)

A robbanás alapját tehát gyakorlatilag az égés képezi, amely hasonló módon induló jelenség, azonban rendkívül felgyorsul, és terjedési sebessége másodpercenként akár több ezer métert is elérhet [7]. E folyamat sebesség szerint két nagyobb csoportra bontható: deflagráció és detonáció.

A lobbanáspont az a legalacsonyabb hőmérséklet, amelyen egy folyadék elpárolog és elegendő gőzt termel ahhoz, hogy meggyulladjon, ha egy gyújtóforrás jelen van. Ez a gyúlékonyság egyik fontos mutatója a tűzvédelem- és robbanásvédelmi jogszabályokban, szabványokban, valamint a veszélyes anyagok kezelése során gyakran használt paraméter.

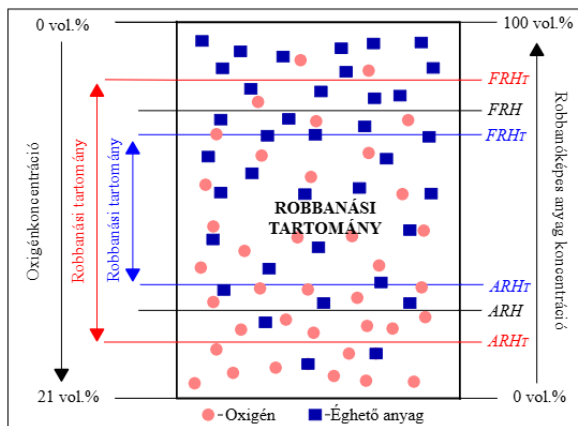
Fontos tisztázni, hogy kétféle lobbanáspontról beszélhetünk, noha általánosan csak a „lobbanáspont” kifejezést használják. Ezek a nyílttéri és a zárttéri lobbanáspontok.

Az úgynevezett robbanási tartományon belül a levegő és az éghető anyag keveréke robbanóképes környezetet képezhet, amely gyújtóforrás hatására robbanást idézhet elő. A szakirodalomban ezt a korábban levezetett égési-robbanási elmélet alapján az elmúlt évtizedekben egyre gyakrabban alsó és felső éghetőségi határként említik. Ugyanakkor a régebbi és az újonnan megjelenő szabványok között eltérések figyelhetők meg, és egyes szakirodalmak egymástól eltérően használják az „éghetőségi” vagy „robbanási” határ kifejezést. A szakirodalmi áttekintés és saját tapasztalataim alapján a robbanási határ kifejezést használok, mivel bizonyos berendezések – például gázégők vagy belső égésű motorok – esetében tűz- vagy robbanásveszélyes közeg jelen

van, és bár a kémiai reakció égésként indul, a berendezések kontrollált, műszaki kialakítása miatt az ipari környezetben ismert vagy elképzelt robbanás nem alakul ki. A robbanásvédelem szempontjából azonban éppen emiatt a robbanás elleni védelem a kulcsfontosságú, amely a robbanás fogalma nélkül nem értelmezhető.

Az ARH esetében az éghető anyag koncentrációja túl alacsony, míg az FRH esetében az oxidálószer koncentráció túl magas ahhoz, hogy robbanóképes környezet alakuljon ki. A 2. ábra jól szemlélteti a robbanási tartomány határait. Kivételt képeznek ez alól például az acetilén, etilén-oxid vagy hidrazin, amelyek oxigén jelenléte nélkül, 100%-os éghetőanyag-koncentráció mellett is robbanásveszélyes környezetet alkotnak. Ezért bizonyos elsődleges védelmi intézkedések (inertizálás) alkalmazása ezeknél nem nyújt védelmet.

Egyes tanulmányok [8, 9, 10] szoros összefüggést találtak arra vonatkozóan, hogy a hőmérséklet növekedése miként befolyásolja az ARH és az FRH értékét. A kísérletek során azt tapasztalták, hogy magasabb hőmérsékleten a gázok robbanási tartománya kiszélesedik, tehát az ARH értéke csökken, míg az FRH értéke nő.



2. ábra: Az ARH és FRH környezeti és magasabb hőmérsékletek esetén (szerző szerkesztése)

A folyadék expozíciójának veszélyei az olvadás- és forráspont közötti hőmérséklettartományban számos tényezőtől függenek, beleértve a folyadék kémiai tulajdonságait, gyúlékonyságát, valamint az adiabatikus állapotban fennálló hőmérsékletet, azaz a berendezésen belüli hőmérsékletet.

A relatív sűrűség – egy anyag sűrűségének viszonya egy referenciaanyag (levegő) sűrűségéhez – alapvető fontosságú a robbanásveszélyes zónák meghatározásában, mivel segít megérteni, hogyan viselkednek a különböző gázok és gőzök a levegőhöz képest.

A levegőnél könnyebb gázok/gőzök (relatív sűrűség < 1) általában felfelé terjednek, és a mennyezet alatt vagy más magasabban fekvő helyeken gyülemlenek fel. A [11] szakirodalom 13 olyan, ipari környezetben jellemzően előforduló anyagot tárgyal, amelyek könnyebbek a levegőnél – ezek közül 8 robbanásveszélyes: acetilén, ammónia, diborán, etilén, hidrogén, hidrogén-cianid, metán és szén-monoxid.

2.2. ROBBANÁSVESZÉLYES KÖRNYEZETBEN ELŐFORDULÓ KIBOCSÁTÁSI FORMÁK

A különböző kibocsátási formákhoz többféle matematikai összefüggés áll rendelkezésre, amelyek segítségével meghatározható a kibocsátás sebessége, a kibocsátott teljes mennyiség, illetve – véges állapotok esetén – a kibocsátás teljes időtartama is. A különböző matematikai modellek több nagyobb kibocsátási típusra oszthatók, és ezen belül a fázisok szerint is különbséget kell tenni: fennállhat egyfázisú vagy kétfázisú állapot is. Az éghető és gyúlékony folyadékok, gázok, gőzök, ködök vagy aeroszolok, amelyek robbanásveszélyes térségeket képezhetnek egy vegyipari rendszerelem esetében, a következők szerint definiálhatók kibocsátásként, szivárgásként [12-17]:

- éghető folyadék egyfázisú kibocsátása,
- éghető folyadék kétfázisú kibocsátása,
- éghető folyadék szivárgásából eredő tócsa párolgása,
- éghető folyadékot tartalmazó medence párolgása,

- gyúlékony gázok szivárgása,
- gyúlékony cseppfolyós gázok szivárgása,
- gyúlékony gőzök szivárgása.

A robbanásveszélyes térségek azonosítása és vizsgálata normál üzemi körülmények között történik. Ez alatt azt az állapotot értjük, amikor a technológiai berendezés a meghatározott üzemi paramétereken belül működik. Ebbe az állapotba tartozik az indítási és leállási szakasz, illetve az időszakos karbantartás folyamata is. Nem tekinthetők azonban normál üzemi állapotnak a rendkívüli események, például a haváriák.

Egy tartály vagy technológiai berendezés esetében számos kibocsátó forrás létezhet. Gyakran előfordul szivárgás tartályok vagy csövek tömítetlensége miatt, amikor kis mennyiségű gyúlékony anyag jut ki, vagy úgynevezett „flash discharge” következik be. Peremes csatlakozások, szelepek és illesztési pontok szintén jelentős kibocsátási helyek lehetnek. A kiszellőző nyílások és nyomáscsökkentő szelepek, melyeket bizonyos berendezések esetén a nyomás levezetésére vagy biztonsági okokból használnak, időnként szintén okozhatnak kibocsátást. Emellett töltési és ürítési műveletek során keletkező gőzök és gázok is potenciális kibocsátó forrásként jelentkezhetnek.

Az ilyen jellegű berendezések – mint potenciális kibocsátó források – belső tereiben ugyanúgy fennállhat a robbanásveszélyes légtér jelenléte. Ugyanakkor a körülmények gyakran kedvezőbbek, mivel sok esetben kizárt az oxigén jelenléte, és a veszélyes gáz vagy gőz koncentrációja a robbanási koncentráció felső határértéke fölé esik [18].

2.3. ROBBANÁSI KÖRNYEZET TERJEDÉSI MODELLJEI

A gázok és gőzök terjedésének, diszperziójának becslésére különféle analitikus modellek állnak rendelkezésre. Ezen terjedési modellek ugyan rendkívül hasznosak és például Ewan és Moodie modellje 1986-ban lett publikálva, tehát közel 40 éve ismert, de sokszor annyira bonyolult összefüggéseken alapszanak, hogy a gyakorlati alkalmazásuk kihívást jelenthet és a szabványok ezért nem,

vagy csak részben vették át őket. Tény, hogy kutatásom során vizsgált szakirodalmak alapján ezek a modellek matematikailag pontos leírást tudnak adni, de a valós helyzetek egyszerűsítése szinte mindig szükséges ahhoz, hogy ténylegesen használható eredményeket kapjunk.

Ewan és Moodie modellje a csövek sérüléséből adódó, illetve a technológiai berendezések légtelenítői rendszeréből származó nagynyomású éghető gázok kibocsátásainak a terjedését vizsgálja [19].

A legtöbb ilyen kibocsátás tartománya kritikus áramlás fölötti, turbulens, mivel a berendezéshez tartozó nyomás többszöröse a normál légköri nyomásnak. Fontos megjegyezni, hogy a modellben szereplő radiális diszperziós terminus a CPR 14E Revision history of the 'Yellow Book' modelljéből származik. A modell kidolgozásának a célja a kibocsátó forrástól induló, nagyobb léptékű szétszóródási modell megalkotása, amely a keveredési mintázat és a gyúlékonysági határértékek meghatározására irányul.

A Long-modell egy speciális gázdiszperziós modell [20], amelyet kritikus áramlás alatti körülmények modellezésére fejlesztettek ki, ahol a Reynolds-szám kisebb, mint 10^4 . Ez azt jelenti, hogy az áramlás még turbulens, de viszonylag alacsony intenzitású turbulenciával rendelkezik.

A Yellow Book [21] modell a kritikus áramlás feletti körülményekre készült, ahol a turbulens áramlás dominál. Ez a modell különösen hasznos nagy sebességű és nagy Reynolds-számú gázkibocsátások modellezésére, akár szuperszonikus jet sugár meghatározásához is. Gyakorlati alkalmazása elsősorban vegyipari üzemekben jellemző, ahol nagy nyomású éghető gázok kerülhetnek a légkörbe.

Renato Benintendi egy olyan hipotézist vizsgált [23], amely szerint gyakran feltételezik a lamináris áramlásra jellemző csökkentett impulzusmomentumot. Ez a megközelítés konzervatívnak tekinthető, mivel abból indul ki, hogy a levegő kevesebb mértékben keveredik az éghető gázzal, így a gyúlékony térfogat nagyobb kiterjedésű lehet. Ezért fejlesztette ki saját modelljét, amely lamináris rendszert feltételezve vizsgálja a levegő és az éghető gáz közötti sűrűség- és viszkozitáskülönbségek hatását. Benintedni gondolkodása nem

csupán a lamináris áramlásig terjedt, hanem azon túlmenően a lamináris-turbulens átmenet teljes megértéséig [23] valamint a turbulens áramlással való összehasonlításig. Az átmeneti tartományban gyakran feltételezik a lamináris hipotézist, amely konzervatívabb a lamináris-turbulens átmenet tartományának kiterjesztése és bizonytalansága miatt. Kutatása alapján megállapította, hogy a turbulens sugárral való összehasonlítás a lamináris áramlás esetében nagyobb méretet mutatott [22, 24], ezért célszerű e módszertani megközelítést alkalmazni a robbanásveszélyes térségek azonosítása és a gyúlékony gázok kockázatértékelése során.

2.4. GÁZOK, GŐZÖK TERJEDÉS VIZSGÁLATAIRA ALKALMAZHATÓ SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZET

A robbanásveszélyes gázok és gőzök légköri terjedése kulcsfontosságú tényező minden olyan iparágban és technológiában, ahol fennáll a robbanás kockázata. A megfelelő szimulációs modellek alkalmazása lehetővé teszi a lehetséges robbanásveszélyes térségek pontos meghatározását, figyelembe véve a geometriai kialakítást, az üzemi paramétereket, valamint az időjárási viszonyokat. Ezen bemenő adatok alapján lehetőség nyílik a biztonsági intézkedések optimalizálására, így a potenciális ipari balesetek megelőzésére.

A 20. század közepétől napjainkig számos olyan szimulációs szoftver áll rendelkezésre, amely kifejezetten arra szolgál, hogy modellezze és előre jelezze a veszélyes anyagok terjedését, vagy akár égését és robbanását különböző környezetekben. Ezek a szoftverek különféle matematikai modelleket alkalmaznak a valós folyamatok pontos szimulálására, mint például advektív-diffúziós egyenlet, Fick törvénye, a Gauss-, Gaussian Plume-, Heavy Gas diszperziós-, Pasquill-Gifford (P-G)-, Puff-modellek, illetve a Taylor-féle diszperziós egyenlet. Külön ki kell emelni a numerikus áramlástani szimulációs szoftvereket (CFD), amelyek számos terjedési modellt integráltak, és alapját képezik az áramlási jelenségek pontos és részletes szimulációjának. Ezek a modellek lehetnek a Navier-Stokes-, Reynolds-Averaged Navier-Stokes-, Euler-Lagrange egyenletek, a Large Eddy-, Direct Numerical-, Species Transport modellek. Dolgozatomban ezen egyenletek és modellek alkalmazhatóságát,

valamint a különböző szimulációs szoftverek gyakorlati lehetőségeit is részletesen vizsgáltam.

2.5. CFD SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZET

A numerikus áramlástani szimulációs szoftverek (CFD) differenciálegyenleteken alapulnak, elsősorban a Navier–Stokes-egyenleteken, amelyek leírják a folyadékok és gázok áramlásának fizikai törvényeit. Ezeket az egyenleteket általános formában nem lehet analitikusan megoldani, ezért a szimulációk numerikus módszereket alkalmaznak. Ehhez szükség van egy geometriai modellre, amelyet térhálóra kell osztani, hogy a véges térfogat módszer (FVM) alkalmazható legyen.

A megoldást iteratív algoritmusok – például Gauss–Seidel, SIMPLE, PISO – keresik. Ezek nem adják meg azonnal a végső választ, hanem fokozatosan közelítenek, ez azt jelenti, hogy az algoritmus iterációs lépésekben halad, amíg el nem éri a konvergenciát, azaz a két iteráció közötti eltérések, reziduálok már nagyon kicsik, és nem változik jelentősen a következő lépésben az eredmény.

A Fire Dynamics Simulator (FDS) a National Institute of Standards and Technology (NIST) által fejlesztett, CFD alapú szimulációs szoftver, amely eredetileg zárt és félig zárt terekben lezajló tűz- és füstterjedés modellezésére készült. Mivel azonban nyílt forráskódú, napjainkban egyre szélesebb körben alkalmazzák gázok, gőzök és folyadékok terjedésének vizsgálatára is [24, 25].

Az OpenFOAM egy nyílt forráskódú, CFD alapú szoftver, amely széles körben alkalmazható folyadékok, gázok, valamint többfázisú áramlások szimulációjára. A szoftver rugalmasságának köszönhetően különösen alkalmas robbanásveszélyes anyagok – például cseppfolyósított gázok (LNG, LPG), párolgó folyadékok és gyúlékony gázok/gőzök – térbeli és időbeli terjedésének modellezésére.

Az LNG-vel kapcsolatos biztonsági kockázatok vizsgálata kulcsfontosságú, beleértve a gáz/gőz terjedését és a robbanások lehetőségét az esetleges kibocsátásokból adódóan. Az egyes kutatások [26, 27, 28] különféle modellezési megközelítéseket mutatnak be, az OpenFOAM alkalmazásával

gáz/gőz terjedés számítási módszereitől kezdve a detonáció-deflagráció átmenetét (DDT) szimuláló sűrűség alapú megoldásokig, különös tekintettel a hidrogén-levegő és LNG-gőzök robbanásaira.

A Fluent és a CFX az ANSYS szoftverportfólió két kiemelkedő szimulációs szoftvere, amelyeket a mérnöki gyakorlatban széles körben alkalmaznak, különösen gázszivárgások és gyúlékony anyagok terjedésének numerikus modellezésére. Mindkét eszköz alkalmas a robbanásveszélyes térségek (zónák) kiterjedéseinek a modellezésére, és eredményeik összevethetők a vonatkozó szabványokkal, amelyeket széles körben vizsgáltak több különböző kutatásban.

A FLACS-CFD egy fejlett véges térfogat módszer szerinti numerikus szimulációs eszköz, amelyet kifejezetten robbanásveszélyes gázok és gőzök térbeli terjedésének és lehetséges gyulladásának modellezésére fejlesztettek. A szoftver képes figyelembe venni a geometriai akadályokat, szélviszonyokat, szivárgási forgatókönyveket és a gyúlékony anyagok koncentrációeloszlását, így pontosan meghatározhatók a robbanásveszélyes térségek (hazardous areas). A szimulációs eredmények a robbanásveszélyes térségek meghatározásának validálására és finomhangolására is alkalmasak, támogatva a biztonságtechnikai tervezést ipari környezetben.

2.6. EGYÉB SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZET

A nem CFD alapú szimulációs szoftverek általában empirikus vagy egyszerű fizikai modellekre épülnek, és gyorsan futtathatók, kevesebb számítási kapacitást igényelnek.

Az ALOHA – AREAL LOCATIONS OF HAZARDOUS ATMOSPHERE, szoftvert az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége és a Nemzeti Óceán- és Légkörkutató Hivatal fejlesztett ki 1982-ben. Elsődleges célja a veszélyes vegyi anyagok légköri kibocsátásának modellezése. Képes modellezni a BLEVE-t (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion), a VCE-t (Vapor Cloud Explosion), valamint a sugár- és medencetűzeket és egyéb eshetőségeket [29].

Az ALOHA egyik különleges tulajdonsága, hogy egy széleskörű kémiai adatbázist tartalmaz, amelyet a felhasználók igényeik szerint bővíthetnek. Az

időjárási adatokat manuálisan is megadhatja a felhasználó, vagy egy meteorológiai állomásról közvetlenül is fogadhatja. Felhasználóbarát grafikus felülete és kijelzője mellett a MARPLOT nevű térképező kiegészítőt is tartalmazza, amely lehetővé teszi a területen található létesítmények és a veszélyeztetett lakosság vizuális megjelenítését egyedi fedvények segítségével.

A szoftverben kétféle terjedési modell alkalmazható a vizsgált anyagra, a Gauss-modell a levegőnél könnyebb, illetve közel azonos moláris tömegű gázokra és a levegőnél nehezebb gázokra is. A modellek mögötti matematikai összefüggések és egyenletek szoftver használati útmutatójában olvashatók [30].

A kutatásom során párolgás kísérlettel vizsgáltam az ALOHA szoftver alkalmazásával.

2.7. ROBBANÁSVESZÉLYES TÉRSÉGEK MEGHATÁROZÁSA ANALITIKAI ÖSSZEFÜGGÉSEK ALKALMAZÁSSAL

Az utóbbi, közel 40 évben több olyan analitikai összefüggés született, amelyekkel meghatározhatók a robbanásveszélyes térségek, azaz a robbanásveszélyes zónák kiterjedése. Ezek az egyenletek különböző kibocsátások esetén és eltérő változók vonatkozásában alkalmazhatók, és ezeket számos kutatásban vizsgálták az eredményük pontosságának tekintetében CFD-vel valamint kísérleti vizsgálatokkal. Tommasini által kifejlesztett megközelítést [31], amely korábbi kutatásain is alapszik, a CEI 31-35 (2012) [32] szabvány alkalmazza.

A Tommasini, Ewan és Moodie összefüggéseit CFX szoftverrel vizsgálta metán közegre 0,1-0,25-1,00-1,25-2,50 mm átmérőjű, 30°C hőmérsékleten és 4 bar(g) nyomás értéken az MSZ EN 60079-10-1:2015 szabvánnyal vizsgálva, amelynél legalább 1,0 métert vettek alapul. Az eredmények Tommasini esetében 17,9% voltak nagyobbak, Ewan és Moodie modelljénél pedig 21,1% -kal volt nagyobb szimulációs eredményekhez képest [33]. A tanulmány ezeket az átlagos eltéréseket rögzítette, mert több közeggel valósult meg a vizsgálat, de ezen szakirodalmi áttekintés során csak ennyi kerül szemléltetésre. A szimulációs eredményeket korábbi kutatások eredményei szerint validálták.

Howard és munkatársai [133 (35)] az MSZ EN 60079-10-1:2009-es szabvány eredményeit – amely még részben robbanásveszélyes koncentráció alapszik, vizsgálta a PHOENICS CFD szoftver használhatóságával összehasonlítva. Ezen szabvány már említi a szimulációs szoftverekkel való értékelés lehetőségét. Nagy nyomású hidrogén, 0,1-0,2 mm-es lyukon való kiáramlásakor, eltérő szivárgási iránnyal és hígulási értékeket feltételezve többszörös különbségek adódtak a CFD eredményekhez képest, amelyre a szabvány említést is tesz.

Souza [162 (36)] egyenletével egy ammónia közeg 10 bar(g) nyomáson, 0,1-0,25-1,00-1,25-2,50 mm, 30°C hőmérsékletének szivárgása esetében vizsgálták a lehetséges zónák méretét. A vizsgálat 10 bar(g) túlnyomásra kiterjedt. Ewan és Moodie modelljéhez, de még Tommasini egyenletéhez képest is átlagosan 13,86%-os különbséget mutattak a validált CFX eredmények

.

3. VIZSGÁLATI MÓDSZEREK

3.1. FOLYADÉK PÁROLGÁSI KÍSÉRLETI ÉS SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA

Egy kiválasztott folyadékra, az acetonra vonatkoztatva vizsgáltam a párolgás jelenségét többféle légáramlási sebesség függvényében, azzal a céllal, hogy egy legjobban illeszkedő modellt találjak, amely segítségével pontosan meghatározható a párolgás mértéke.

A kutatás során a lehetséges robbanásveszélyes légkör elemzését vizsgáltam az aceton közegre ALOHA szimulációs szoftverrel és mérési sorozat átlagos eredményeivel hasonlítottam össze, amelyeknél a hiba mértékének tartománya 5-7%-nál kisebb. Egy kis mennyiségű acetont helyeztem egy üvegtégelybe és először légáramlás nélküli esetben tanulmányoztam a párolgást. Ezután a vizsgálatot 2-4-6 m/s légsebességgel megismételtem, mivel a különböző légáramlási sebességek növelik a párolgás mértékét. A mérési eredményeket többféle párolgási modellel összehasonlítottam és megállapítottam, hogy az elvégzett kísérletekhez melyik számítási modell áll a legközelebb.

Az ALOHA szoftverrel vizsgáltam az aceton párolgásának a mértékét, amely eredményeit összehasonlítottam a párolgás kísérleti értékeivel, illetve a robbanásveszély kockázatát és kiterjedését is elemeztem.

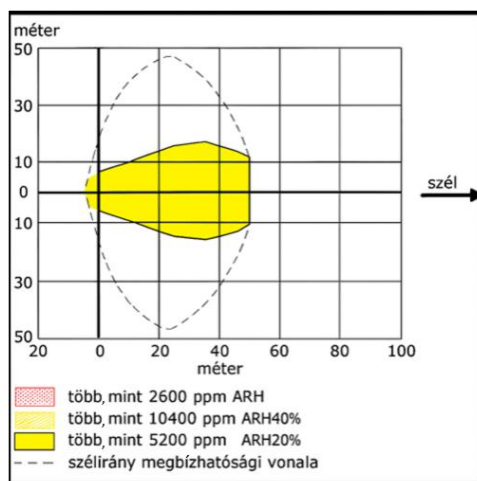
A vizsgált felület $0,00096 \text{ m}^2$ volt, amely nagyon kis felszínnek számít. A szimuláció nem működött a vizsgált üvegtégely felületével ezért a szoftverben 10-es szorzóval növeltem meg a folyadékfelszínt, így hasonlítva össze a kísérleti és a szimuláció eredményeit. Számos peremfeltételt lehet figyelembe venni, például a talaj típusa szilárd vagy porózus, a talaj és a folyadék közeg hőmérséklete, valamint a különböző időjárási faktorokat.

A 2 m/s légáramlásnál vizsgált szoftver általi érték 3,59 gramm/perc, amely a kísérleti mérési sorozat során alkalmazott felületre vonatkoztatva 5,9833 mg/s-nak felel meg.

Az ALOHA szoftverben az eredmények vizuális megjelenítéséhez sokkal nagyobb effektív felületre volt szükség. A vizsgált területre vonatkozóan

összegyűjtöttem a rendelkezésre álló időjárási adatokat egy esettanulmány modellezéséhez.

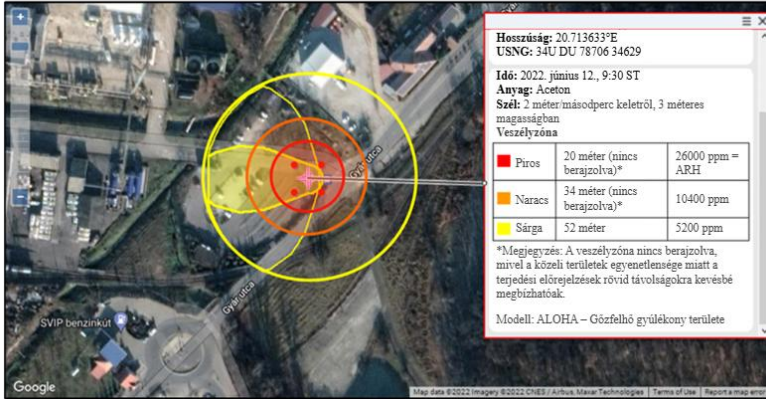
Az esettanulmány szimuláció során, amely például egy hengeres acéltartály szintellenőrzési hibája esetén képződhet, a kezdeti párolgás mértéke 77,2 kilogramm/perc a 290 m² felületről, amely az idő elteltével a felület arányában folyamatosan csökken. A vizsgált peremfeltételek szerint a párolgás mértékéből a nehézgázmodell alapján meghatároztam a gőz terjedését a szoftverrel, amelyet a 3. ábra mutat. A 3. ábrán látható az ARH 20%-os koncentráció (ppm) eloszlása a vízszintes és függőleges tengelyeken. A magasabb koncentrációeloszlásokat a szoftver ebben a függvényben még meg tudja jeleníteni, de közelebbi területek eloszlását nem tudja homogénként értelmezni, ezért nem tekinthető megbízhatónak.



3. ábra: Alsó robbanási határ 20%-os koncentráció eloszlása (szerző szerkesztése)

A 4. ábrán a kibocsátó forrást egy lokalizációra helyeztem, ahol a megadott peremfeltételekkel a megjelenítést még részben korlátozott, csak az ARH 20%-os érték látható, de az ARH 40% és ARH koncentrációk szerinti távolságokat is meg tudtam határozni. Az ARH 20% kiterjedése 52 méter, a ARH 40%

kiterjedése 34 méter. A szoftver egyszerre egyirányú légáramlást képes feltételezni, de a változó szélirány miatt a konzervatívizmust tartom szem előtt, ezért a veszélyes területek ábrázolását körre bővítettem.



4. ábra: A nagy kiterjedésű folyadékfelszín párolgásából származó ARH 20%, ARH 40% és ARH koncentrációk ábrázolása 2 m/s-os légáramlás esetén (szerző szerkesztése)

A párolgás mértékének vizsgálatához analitikus mérleget használtam. Ez a berendezés 0,2 másodperceként rögzítette az üvegtégelyben lévő acetontömegét, ezáltal kellő mennyiségű mért adatot kaptam az acetontömegének változásáról.

A párolgási mérték meghatározására különböző modellek állnak rendelkezésre, amelyeket ebben kutatásom során összehasonlítottam az elvégzett párolgási kísérletekkel:

$$W_{pár-1} = 3,6 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{M \cdot P_{gőz}}{T_{körny}} \right) \cdot u^{0,78} \cdot r_{foly}^{1,89}, \quad (3.1.)$$

$$W_{pár-2} = 0,3 \cdot u^{0,8} \cdot A_{foly}^{0,9} \cdot T^{-0,8} \cdot M \cdot p \cdot \left[\frac{(3,1 + p^{-0,33})^2}{T^{0,5} \cdot \left(\frac{1}{29} + \frac{1}{M} \right)^2} \right]^{-0,67}, \quad (3.2.)$$

$$W_{pár-3} = 1,4 \cdot \frac{0,284 \cdot M^{2/3} \cdot p}{R \cdot T} \cdot A_{foly}, \quad (3.3.)$$

$$W_{pár-4} = \frac{0,284 \cdot u^{0,78} \cdot M^{2/3} \cdot A_{foly} \cdot p}{R \cdot T}, \quad (3.4.)$$

$$W_{pár-5} = \frac{M \cdot 0,00438 \cdot u^{0,78} \cdot \left(\frac{18}{M}\right)^{1/3} \cdot A_{foly} \cdot p}{R \cdot T}, \quad (3.5.)$$

$$W_{pár-6} = \frac{18,3 \cdot 10^{-3} \cdot u^{0,78} \cdot M^{2/3} \cdot A_{foly} \cdot p}{R \cdot T}, \quad (3.6.)$$

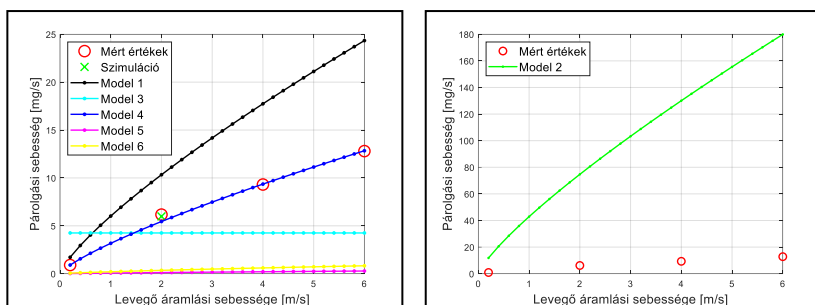
A modellek alkalmazásával kapott párolgási eredmények a 1. táblázatban találhatóak meg, a légáramlási értékkel együtt vizsgálva. A légáramlás nélküli vizsgálatban a Brown-mozgás [36] miatt elhanyagolható 0,2 m/s-os értéket feltételeztem.

	u=0,2 m/s	u=2 m/s	u=4 m/s	u=6 m/s
3.1. modell	$W_{pár-1}=1,714$ mg/s	$W_{pár-1}=10,332$ mg/s	$W_{pár-1}=17,741$ mg/s	$W_{pár-1}=24,341$ mg/s
3.2. modell	$W_{pár-2}$ = $11,838$ mg/s	$W_{pár-2}=74,696$ mg/s	$W_{pár-2}=130,053$ mg/s	$W_{pár-2}$ = $179,884$ mg/s
3.3. modell	$W_{pár-3}=4,254$ mg/s	$W_{pár-3}=4,254$ mg/s	$W_{pár-3}=4,254$ mg/s	$W_{pár-3}=4,254$ mg/s
3.4. modell	$W_{pár-4}=0,904$ mg/s	$W_{pár-4}=5,449$ mg/s	$W_{pár-4}=9,356$ mg/s	$W_{pár-4}=12,837$ mg/s
3.5. modell	$W_{pár-5}=0,037$ mg/s	$W_{pár-5}=0,221$ mg/s	$W_{pár-5}=0,381$ mg/s	$W_{pár-5}=0,523$ mg/s
3.6. modell	$W_{pár-6}=0,058$ mg/s	$W_{pár-6}=0,351$ mg/s	$W_{pár-6}=0,602$ mg/s	$W_{pár-6}=0,827$ mg/s

1. táblázat: A kísérlet során alkalmazott párolgási modellek eredményeinek összehasonlítása (szerző szerkesztése)

A kísérlet és modellek eredményeit összehasonlítottam és megállapítottam, hogy az aceton közeg esetében, a vizsgált párolgás esetén a (3.4.) modell áll a legközelebb a mért eredményeimhez. Százalékos eltérésük alacsony, kivéve a 2 m/s légáramlás esetén, ahol 12%-os eltérést tapasztaltam.

Az átlagos mérési sorozat 2 m/s végzett kísérleti során alkalmazott felületre vonatkoztatva a 6,171 mg/s és 5,449 mg/s értékek közé esik a szimulációs eredmény, ezáltal igazoltam, hogy a szoftver által használt összefüggések összhangban vannak a kísérlet során mért értékekkel. A kísérletek, szimulációk és a modellek eredményeit a 5. ábrán láthatóak, két külön grafikonon, mivel a (3.2.) modellel végzett vizsgálat eredményei többszörösen eltér a többi modell eredményeihez képest.



5. ábra: A mérések, szimulációs és a modellek eredményeinek összehasonlítása
(szerző szerkesztése)

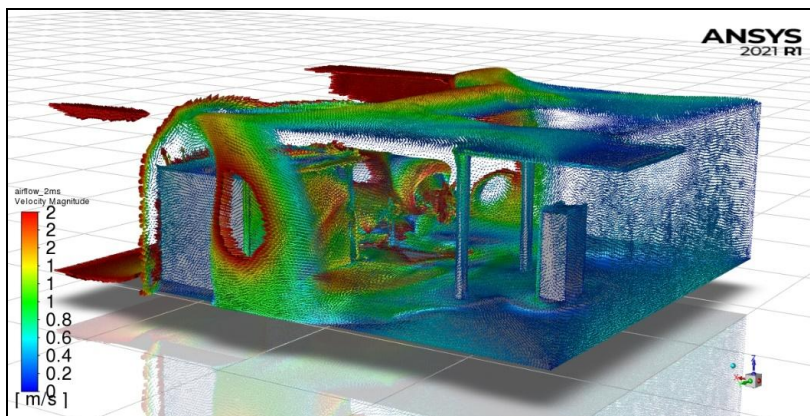
A mérésekből és a modellekből kapott eredmények alapján látható, hogy létezik olyan számítás, amely képes meghatározni a párolgás mértékét és a kísérleti eredményekkel megegyező eredményeket adja. Megfigyeltem, hogy a különböző légáramlási sebességek hogyan befolyásolják a párolgás mértékét, amely lehetővé teszi, hogy több veszélyes anyag kerüljön közvetlenül a légkörbe.

3.2. ANSYS FLUENT SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZETBEN VÉGZETT MODELLEZÉSEK

Az ANSYS Fluent szoftverrel a kutatásom során hidrogén, propán, illetve metán gázközegek terjedését vizsgáltam légáramlás nélküli és eltérő légáramlási viszonyok mellett. A felépített szimulációs modelleknek a célja, hogy megvizsgáljam a különböző légáramlások okozta hatásokat adott kibocsátás során, továbbá, hogy elemezzem a kibocsátás karakterisztikáját és a gázfelhő terjedési jellegét eltérő nyomások, különböző kiáramlási irányok függvényében.

A hidrogén, mint az egyik legismertebb robbanásveszélyes gáz terjedésének vizsgálatát az indokolta, hogy a megújuló energiaforrások a 21. század elején hatalmas teret hódítottak és a fosszilis energiahordozók helyett például hidrogén hajtású járművek használata egyre nagyobb teret nyer. A szimulációban a terjedést két különböző légáramlás mellett vizsgáltam meg 2 és 11 m/s légáramlás értékeken.

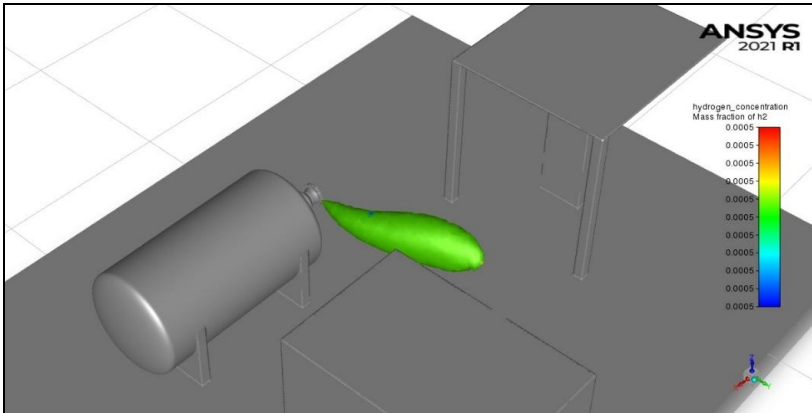
A 6. ábra a légáramlás eloszlását mutatja a vizsgált területen, amikor 2 m/s a sebességű légáramlás áll fenn. Az alacsony légáramlás során az akadályokkal (kompresszor, tartály és töltőoszlop) való ütközés után gyakorlatilag eltűnik, elenyészően marad fenn, amely akár azt is eredményezheti, hogy a szivárgó gáz lokálisan képes feldúsulni, mivel a légmozgás nem biztosít elegendő hígulást. Ezenkívül a légáramlás irányának és sebességének változása is jelentős hatással van a gázok terjedésére, különösen akkor, ha a szivárgás nem egyenletes, és a környezeti akadályokba ütközhet.



6. ábra: A 2 m/s sebességű légáramlás eloszlása a vizsgált környezetben (szerző szerkesztése)

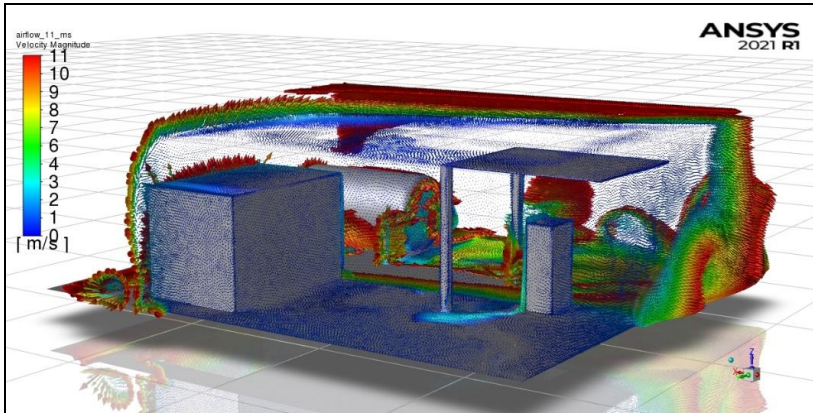
Mindkét szimulációban, amikor a légáramlások eltérőek voltak, a modelleket ARH 20%-os hidrogén (0,8 vol.%) és egy sokkal alacsonyabb (0,05 vol.%) koncentráció mellett vizsgáltam. Az vizsgálat során az alacsony légáramlás nincs hatással a hidrogén szivárgására, mivel kiáramlási sebességéből eredően

normál irányba fog tovább terjedni. A hidrogén gázfelhő sugarának iránya nem változik 0,05 térfogatszázalékos koncentrációnál sem, 2 m/s légáramlás esetében sem, amelyet a 7. ábra szemléltet. Ebből az következik, hogy a vizsgált légáramlási viszonyok között a hidrogén terjedését elsősorban a kiáramlási jellemzők határozzák meg, nem pedig a környezeti légmozgás.



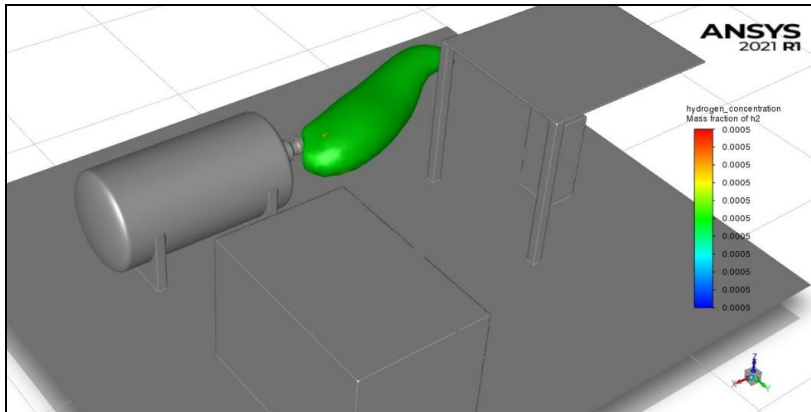
7. ábra: A 2 m/s sebességű légáramlás eloszlása a vizsgált környezetben (szerző szerkesztése)

A 2 m/s légáramláshoz képest több, mint ötszörös értékkel megfelelő légáramlás turbulens körülményeket teremt a területen lévő akadályok körül. Ezek a légáramlási eloszlások a 8. ábrán láthatók. Az ábrán megfigyelhető, hogy az akadályok mellett az üzemanyagkútoszlop és a tartály tengelyével egy vonalban maradó légáramlatok is vannak.



8. ábra: A 11 m/s sebességű légáramlás eloszlása a vizsgált környezetben
(szerző szerkesztése)

A 9. ábrát vizsgálva az alacsonyabb koncentráció esetében már egyértelmű, hogy ez a légáram elegendő volt a kibocsátás terjedésének befolyásolásához.



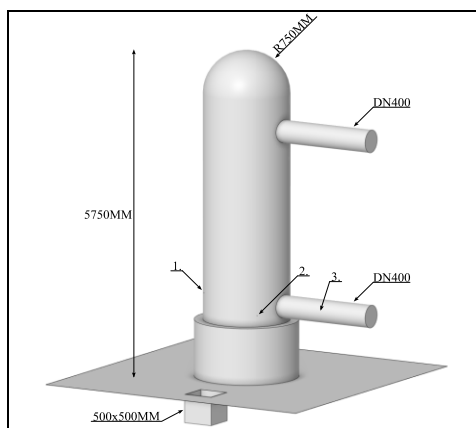
9. ábra: 0,05 vol.% hidrogén terjedése 11 m/s sebességű légáramlásnál (szerző szerkesztése)

A két különböző légáramlással végzett szimulációkban jelentős különbségek figyelhetem meg. Az alacsony légáramlás nem képes befolyásolni a kritikus áramlás feletti kibocsátásból származó hidrogén gáz terjedését, ellentétben a

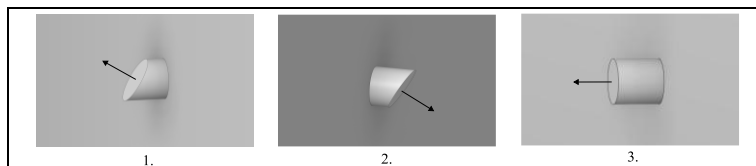
jóval magasabb légáramlással. Mindkét esetben a gázfelhő jelenléte már veszélyesnek tekinthető a kibocsátás közvetlen közelében. Ezeket a terjedési feltételek a szakirodalom és a szabványok szerint normál üzemi körülmények között lettek meghatározva.

Megvizsgáltam levegőnél nehezebb gáz, propán terjedését eltérő kiáramlási irányok és különböző légáramlások esetében. A disszertációmban részletesen ismertetem, hogy a légáramlásnak jelentős szerepe van a gázok terjedésében, de egy szivárgás során a kiáramlás iránya is fontos, amelyek vizsgálatára szimulációs modelleket készítettem.

A három azonos méretű, 5 mm átmérőjű kibocsátó forrást a 10. ábrán 1., 2. és 3. számokkal jelöltem, amelyek nagyobb nézetei a 11. ábrán láthatók.

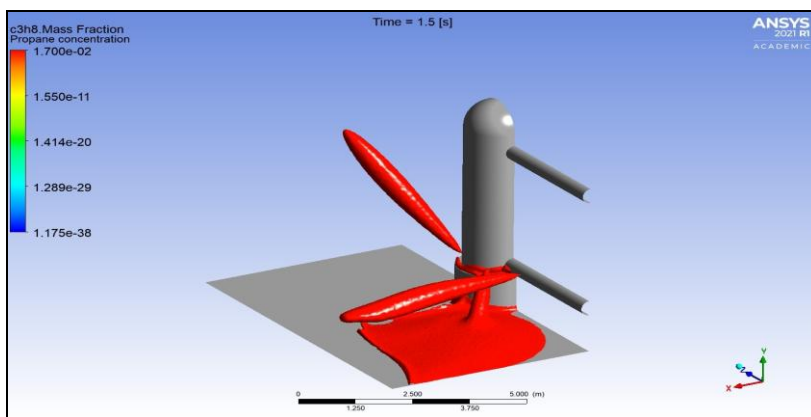


10. ábra: Propán-propilén kolonna geometriai modellje (szerző szerkesztése)



11. ábra: 1. felfelé irányuló kiáramlás, 2. lefelé irányuló kiáramlás, 3. normál irányú kiáramlás (szerző szerkesztése)

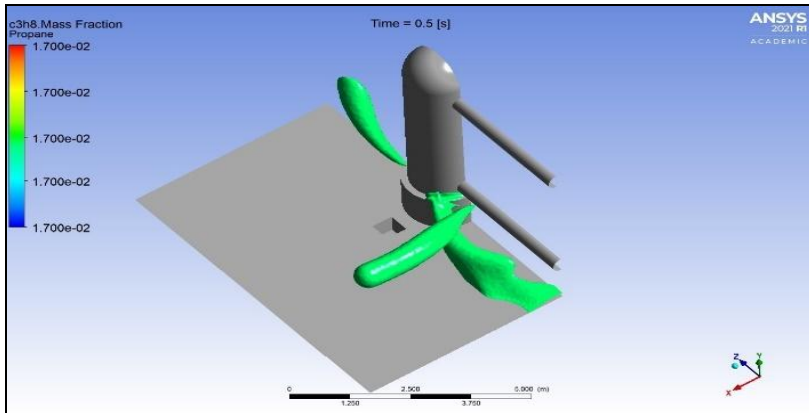
A legalacsonyabb értéken vizsgált légáramlás (2 m/s) a kezdeti időpillanathoz képest a nagy kiáramlási sebesség ellenére is hatással volt az alsó robbanási határkoncentrációjú (1,7 vol.%) gázközeg terjedésére (12. ábra). A gázterjedés irányának és koncentrációjának alakulása nemcsak a kiáramlástól és a légáramlás intenzitásától függ, hanem jelentős mértékben befolyásolja a gáz fizikai tulajdonsága, különösen a sűrűség, amely meghatározza, hogy a gáz miként képes kölcsönhatásba kerülni a környezeti akadályokkal várható terjedési irányra szerint, ezáltal befolyásolva a veszélyes koncentrációjú térségek kialakulását.



12. ábra: 1,7 vol.% propán terjedése 2 m/s sebességű légáramlásnál 0,1 másodpercnél (szerző szerkesztése)

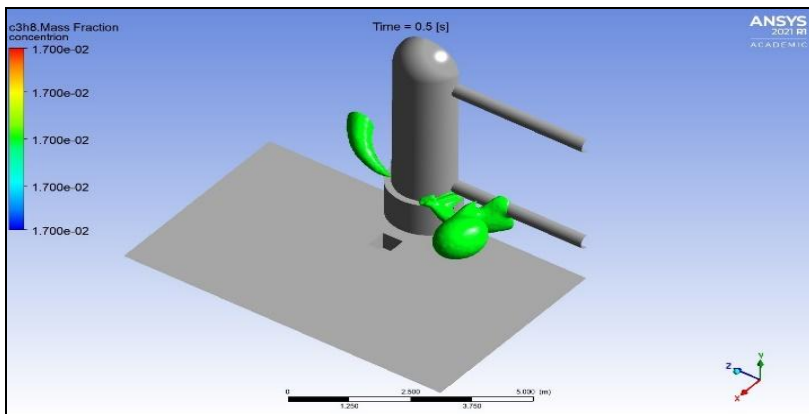
A 10 m/s-os légáramlás esetén a hatás gyakorlatilag már a 0,5 másodperces időpillanatban megjelenik a szimuláció során.

A 13. ábrán látható, hogy a gázfelhők torzulnak a 0,5 másodperces pillanatban is, a normál kiáramlás irány is határozottan „feltorlódik”, de ezáltal az alsó robbanási határ kisebb távolságon belül jelenik meg.



13. ábra: 1,7 vol.% propán terjedése 10 m/s sebességű légáramlásnál 0,5 másodpercnél (szerző szerkesztése)

A 20 m/s-os légáramlás mellett vizsgált terjedések esetén a gázfelhők terjedési iránya szinte azonnal megváltozik, ahogyan azt a 14. ábra is mutatja.



14. ábra: 1,7 vol.% propán terjedése 20 m/s sebességű légáramlásnál 0,5 másodpercnél (szerző szerkesztése)

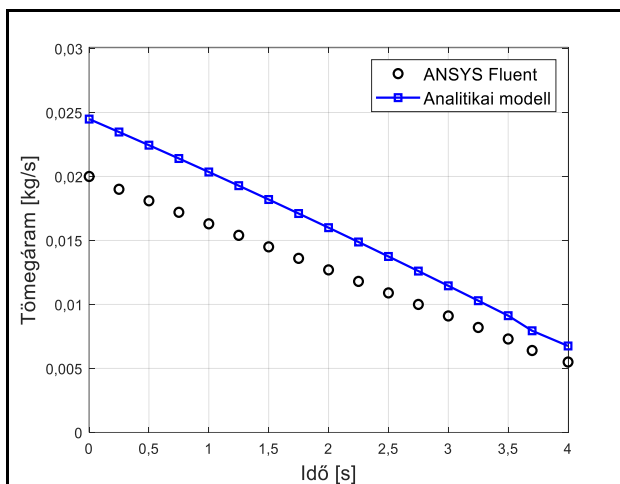
Nagyobb légáramlás esetén a közeg feltételezett terjedési iránya erősen módosult. A 10 és 20 m/s-os értékek ritkábban fordulnak elő ipari

környezetben, de nem zárhatók ki teljesen mértékben. Megállapítottam, hogy a nagy légáramlás csökkentheti a robbanásveszélyes koncentrációjú gáz térfogatának méretét, azonban a közeg pillanatnyi iránya, sebessége, valamint a szivárgás forrásának pontos helye a valóságban nehezen határozható meg.

Az alacsony és nagy nyomáson történő szivárgások esetében fontos kiinduló szempont a gáz vagy gőz közeg adiabatikus tágulási politropikus indexe, amelyből meghatározható a közeg kritikus nyomásának értéke. Amennyiben ezen érték alatt van a közeg nyomása, kritikus áramlás alatti tartomány érvényesül. Ellenkező esetben már kritikus áramlás fölötti állapotok és ahhoz kapcsolódó más analitikai modellek lesznek alkalmazandók.

A kritikus áramlás alatti és feletti gázfelhő terjedések eltérő karakterisztikával rendelkeznek, amely befolyásolja a robbanásveszélyes területek kiterjedését. A kritikus áramlás alatti esetben turbulens áramlási viszonyok nélkül, alacsony sebességgel rövid sugár alakul ki, amely koncentráltabban jelenik meg a kibocsátási forrás körül. A kritikus áramlás feletti esetben nagy sebességű, turbulens áramlási tulajdonságokkal rendelkező sugár keletkezik, amely a kibocsátó forrástól távolabbra is kiterjedhet.

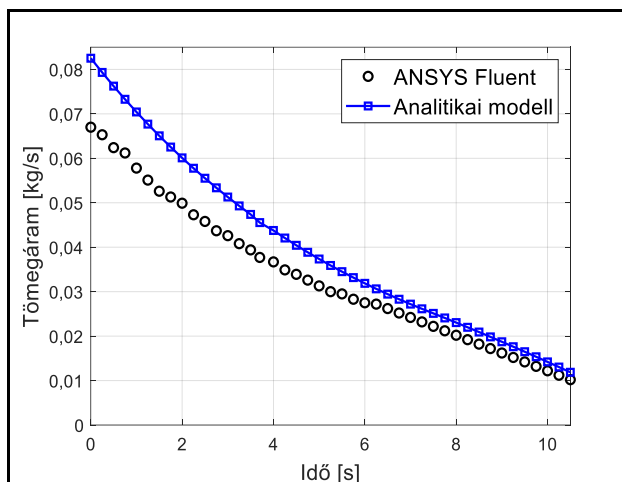
Az ANSYS Fluent-tel szimuláltam a kétféle kibocsátás terjedését egy metán közeggel töltött berendezésen, amelyen egy rést definiáltam. Az első esetben alacsony nyomásról, a gázkibocsátás mértéke az idő múlásával csökken, mivel a tartályban lévő nyomás is csökken 180 000 Pa-ról, a vizsgálat futtatási ideje alatt megközelítőleg 107 000 Pa-ra. A vizsgált időszak kezdete és vége között a gázkibocsátás mértékének időbeli lefutása a 15. ábrán látható.



15. ábra: A metán kritikus áramlás alatti kibocsátásának változása az időfüggvényében (szerző szerkesztése)

A metán ARH 20%-os értéke 0,88 vol.%. Kezdetben egy hosszabb sugár volt tapasztalható, majd az idő elteltével a csökkenő nyomás okán, lassulás történik és utána a gáz mennyisége szétterül, valamint a tágulás hatására a talajszint alatti területre is képes volt behatolni. Az ARH 40% - 1,76 vol.%-nál mindkét esetben valamivel vékonyabbak a gázfelhők. Az ARH-4,4 vol.% hossza és kiterjedése az idő múlásával növekszik.

A változók peremfeltételei a kritikus áramlás feletti vizsgálat során szinte azonosak a kritikus áramlás alatti esettel, kivéve, hogy a közeg belső nyomása magasabb, pontosan 600 000 Pa. A vizsgált szimulációs időtartam 10,5 másodperc volt, ami 18 nap futási időt igényelt. A vizsgált időszak kezdete és vége között a gázkibocsátás mértékének időbeli lefutása az 16. ábrán látható. A gázkibocsátás mértéke az idő múlásával csökken, mivel a tartályban lévő nyomás szintén csökken.



16. ábra: A metán kritikus áramlás feletti kibocsátásának változása az időfüggvényében (szerző szerkesztése)

A megalkotott szimulációs modelljeim használata rendre kisebb zónát eredményez, de meghatározása sokkal időigényesebb, mint az analitikai összefüggések, amelyek magasabb kibocsátási értékeket és nagyobb robbanásveszélyes térséget eredményeznek, ezáltal a biztonság irányába térnek el.

A vizsgálataim rámutatnak arra, hogy mind a kritikus áramlás alatti, mind a kritikus áramlás feletti kiáramlási jelleg esetében a levegőnél könnyebb gáz a várakozással ellentétben a talajszint alá is képes volt bejutni. Ez a jelenség kiemelt biztonságtechnikai jelentőséggel bír, mivel cáfolja azt az egyszerűsített feltételezést, hogy az ilyen gázok kizárólag felfelé terjednek.

Ennek figyelmen kívül hagyása a veszélyes területek alábecsléséhez vezethet, de ugyanakkor a szimulációs modellek alkalmazása még nagyobb jelentőséggel bírnak, mivel a rejtett veszélyek feltárása – például a talajszint alatti terek okozta veszély – egy valós ipari modellben azonosítható.

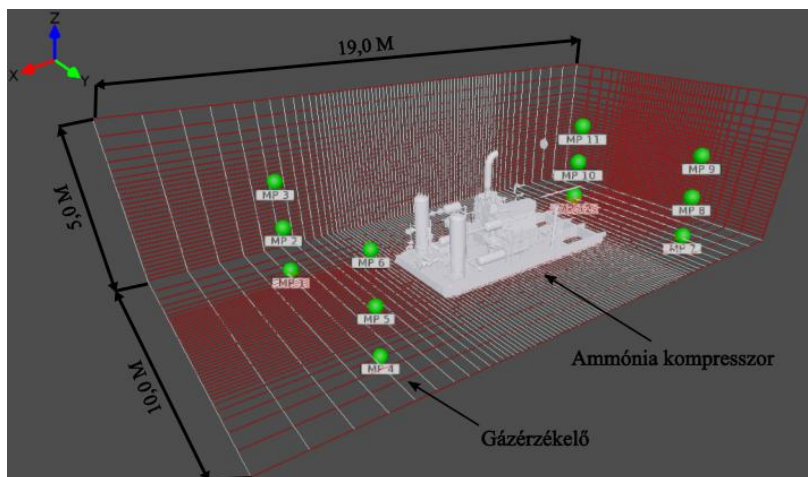
3.3. FLACS-CFD SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZETBEN VÉGZETT MODELLEZÉSEK

Legismertebb véges térfogat módszerén alapuló numerikus szimulációs szoftvereket (CFD), amelyek közül a kutatásom során még a FLACS-CFD szoftvert alkalmazhatóságát vizsgáltam. Mivel ez a szoftver alkalmas többkomponensű gázok szivárgása során a terjedések és a robbanásveszélyes térségek meghatározására, a vizsgálatom célja a szabványi számítások szerinti összefüggések kiterjesztése gázkeverékekre, továbbá a szimulációs modellek eredményeivel való összehasonlítása. Mivel több lehetséges módszertant megvizsgálva azt tapasztaltam, hogy a robbanásveszélyes térségek meghatározására konkrét analitikai eljárás nem áll rendelkezésre, így a többkomponensű gázok okozta robbanásveszélyes zónák előrejelzése is a céloom.

Numerikus áramlástani szimulációval ténylegesen optimalizálható a gázérzékelők elhelyezése, mivel ez a módszer lehetővé teszi a gázok vagy gőzök áramlásának pontos modellezését és elemzését különböző környezetekben. Ez különösen hasznos lehet abban az esetben, ha a cél az, hogy a gázérzékelők a lehető legnagyobb hatékonysággal érzékeljék a potenciálisan veszélyes közegek jelenlétét.

Ezen vizsgálat során egy hűtőrendszer helyiségbe elhelyezett ammónia kompresszornak geometriai modelljébe 12 db gázérzékelőt – monitor points – helyeztem el. Három különböző szivárgást vizsgáltam a szimulációval, 0,5 kg/s tömegárammal, 10 másodperces szivárgási időtartammal, 20 másodperces szimulációs futtatási idővel, de különböző kiáramlási irányok alapján. A szimulációban vizsgáltam a lehetséges gázérzékelők detektálási tulajdonságait az idő és a koncentráció függvényében, hogy mennyire hatékonyak ezek.

A helyiség, azaz a vizsgált technológiai és szimulációs környezet a 17. ábrán látható. Az ammónia hűtőközeg (R717) töltetet tartalmazó kompresszor a helyiség közepén található.



17. ábra: A vizsgált technológiai és szimulációs környezet geometriai modellje (szerző szerkesztése)

A gázérzékelők jelzési szintjét az MSZ EN 378-3:2016+A1:2021 szabvány 9.3.3. fejezete alapján, határoztam meg, amely az előriasztás esetében 0,05 vol.%, a fő riasztásnál 3,0 vol.%. A vonatkozó MSZ EN 378-as szabvány sorozat szerint az előriasztási szint elérésénél akusztikus és vizuális jelzés, és egyidejűleg mesterséges vészszellőzés indításának kell megvalósulnia. A fő riasztási szint elérésénél akusztikus és vizuális jelzés adása, az ammónia közeget tartalmazó berendezések automatikus leállítása, valamint a helyiség villamos szempontból gyűjtőforrásként számításba vehető berendezéseinek energiamentesítése, kivételt képeznek ez alól a IIA T1 (pl. Zóna-2) szerint létesített robbanásbiztos gyártmányok (pl. gázérzékelők, riasztó egységek, tartalékvilágítás, vészszellőzés és vészvilágítás).

A három szimuláció során tapasztalt eredmények alapján megállapítottam (szivárgás vizsgálata korlátozatlan +x terjedési irányban, szivárgás vizsgálata korlátozott +z terjedési irányban, szivárgás vizsgálata korlátozatlan +z terjedési irányban), hogy abban az esetben amikor a szivárgás akadálymentesen terjed, az elhelyezett gázérzékelők a koncentrációkat jól definiált trend szerint rögzítik a pozíciójukhoz képest. Viszont amikor a szivárgási pont lokális környezetében

akadállyal érintkezett, több irányban, több gázfelhőre vált szét, amelyek hatására az érzékelők nem egyformán és nem is ugyanolyan trendeket leíró koncentrációkat érzékeltek függetlenül a pozíciójuktól.

Igazoltam, hogy a szivárgás szimulációjával jól reprezentálható a gáz és gőz közegek terjedése.

A tervezési folyamat során a telepítendő érzékelők, azok reakciója és egy optimális elrendezettség meghatározható, amelyek informatívak, biztonságtechnikailag támogatják az ipari szereplőket.

Lefedettség szempontjából a vizsgált helyiségben 3 – 5 db gázérzékelővel egy esetleges szivárgást hamar lehetne érzékelni. Ezeket az érzékelőket mindenképpen javasolt a gáz relatív sűrűsége miatt fölfelé, a plafon irányába elhelyezni. Annak jelentősége, hogy gázérzékelőkkel való optimalizálási vizsgálat elvégzésére miért szükséges kiemelt hangsúlyt fektetni, ipari környezetben történt esetek adnak egyértelmű visszaigazolást. Előfordult olyan baleset, hogy gázérzékelő környezetében a légáramlás hatására befolyásolta működésének a hatékonyságát, amely odáig vezetett, hogy kialakult olyan térrészek, ahol a robbanásveszélyes gáz elérte az alsó robbanási határt és a nem megfelelő gyújtásforrások kezelése miatt az égés- és robbanás feltétel rendszere fennállt és robbanás következett be. A vizsgálati eredményeim alapján ezért is kulcsfontosságú nem csak az MSZ EN 378-3:2016+A1:2021 szabvány által meghatározott minimum egy vagy akár a TvMI 13.5:2025.02.01. 9.4.2. fejezetében megfogalmazott legalább kettő darab gázérzékelő alkalmazásán túl – kettős üzembiztonság, redundancián okán is túl – több gázkoncentráció érzékelő elhelyezése, mivel szimulációs eredményeimből azt a konzekvenciát tudom levonni, hogy rengetek szivárgási állapot megvalósulhat, amely során az értekezésemben említett kibocsátást befolyásoló tényezők, környezetben lévő akadályok, légmozgás, stb. befolyásolják a terjedést és szivárgás kezdeti szakaszában detektált érzékelés biztonságtechnikai szempontból elengedhetetlen. Ezen megközelítést véleményem szerint az MSZ EN 60079-29 szabványsorozatban kellene részletesebben rögzíteni, illetve az említett szabványsorozatban megfogalmazott megállapítások és követelményeket

gyakorlását a munka-, tűz- és robbanásvédelemhez kapcsolódó szervezeteknek lenne szükséges fokozottan betartani.

Gázkeverékek robbanásveszélyes térségei esetében nem áll rendelkezésre jelen állás szerint konkrét szabvány vagy módszertan a robbanásveszélyes térségek meghatározására. A több komponensű keverékek esetében a tiszta anyagokhoz képest eltérő kémiai, fizikai, égési -s robbanási tulajdonság állnak fenn. Az értekezésemben ezen változóknak a meghatározásai kerülnek bemutatásra, hogyan implementálhatók egy keverék robbanásveszélyes térségének meghatározásához alkalmazandó kiinduló egyenletekbe, melyek a következők:

- moláris tömeg,
- az adiabatikus tágulás politropikus indexe (a fajhő állandó nyomáson vett értékének a meghatározásához szükséges),
- fajhő,
- kritikus nyomás,
- gáz vagy gőz sűrűsége,
- alsó robbanási határ.

Az említett és az MSZ IEC 60079-10-1:2021 [37] szabvány szerinti összefüggések kiterjesztésével meghatározható a robbanásveszélyes térségek kiterjedése gázkeverékek esetében, amelyre a következő alfejezetben végzett hidrogén-metán keverék esetében számítások, majd szimulációk eredményeit mutatom be.

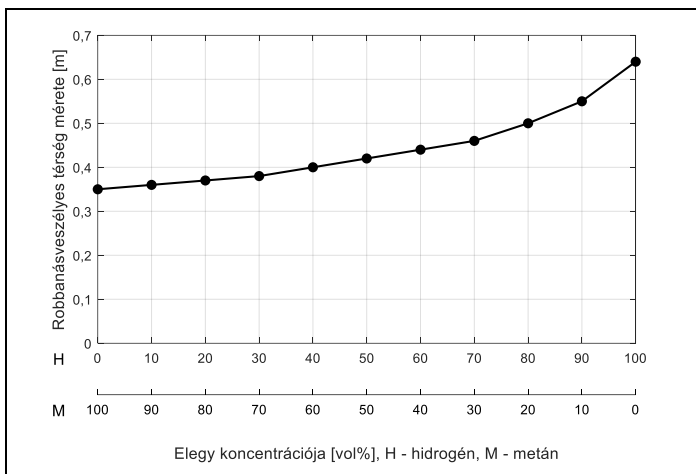
A hidrogén-metán közeg keverék esetében, különböző koncentráció függvényében, a változó értékeit a 2. táblázat tartalmazza.

Hidrogén [vol.%]	Metán [vol.%]	Kritikus nyomás [Pa]	Adiabatikus tágulás politropikus indexe [-]	Moláris tömeg [kg/kmol]	Gáz sűrűség [kg/m ³]	ARH [vol.%]	Fajhő [J/(kmol·K)]
0	100	185 904	1,30	16,04	0,63	4,40	2224,36
10	90	185 985	1,31	14,64	0,58	4,36	2429,38
20	80	186 083	1,31	13,24	0,52	4,31	2676,01
30	70	186 205	1,31	11,83	0,47	4,27	2978,36
40	60	186 359	1,31	10,43	0,41	4,23	3357,75
50	50	186 563	1,31	9,03	0,36	4,19	3847,90
60	40	186 843	1,32	7,63	0,30	4,15	4505,61
70	30	187 253	1,33	6,23	0,25	4,11	5434,51
80	20	187 909	1,34	4,82	0,19	4,07	6845,91
90	10	189 128	1,36	3,42	0,14	4,04	9247,59
100	0	192 188	1,41	2,02	0,08	4,00	14245,28

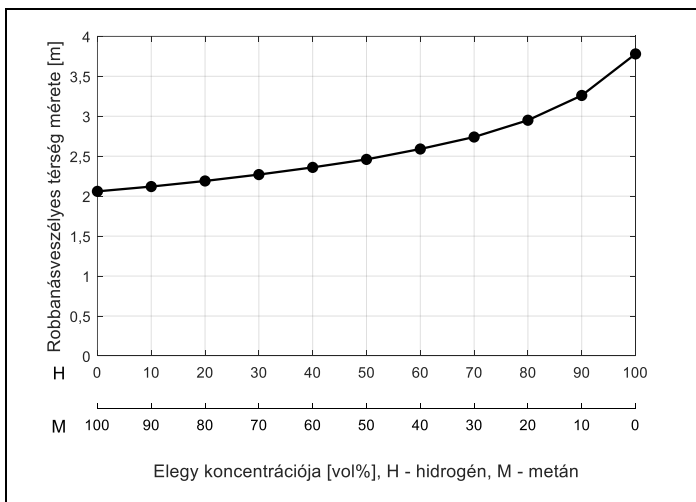
2. táblázat: A változók értékei különböző koncentrációjú hidrogén-metán keverékek esetében (szerző szerkesztése)

A vizsgálatokat három különböző állapotra végeztem el: kisméretű rés, alacsony nyomás (5 bar(g), hőmérséklete 25°C és a feltételezett résméret egy peremes csatlakozásnál például $1,375 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$), kis rés, nagy nyomás (160 bar(g), hőmérséklete 25°C és a feltételezett résméret egy peremes csatlakozásnál például $1,375 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$) és nagy rés, kis nyomás (5 bar(g), hőmérséklete 25°C és a feltételezett résméret egy peremes csatlakozásnál például $6221,139 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$).

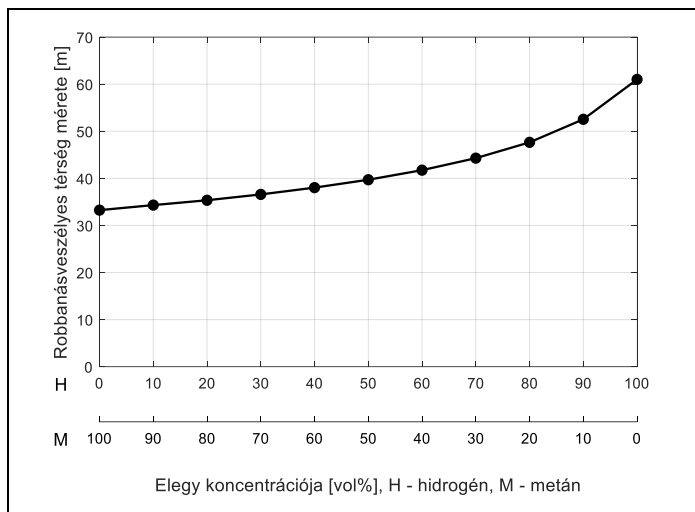
A 18., 19. és 20. ábrán láthatók a koncentráció és a zónakiterjedés függvényében az eredmények a vizsgált állapotok.



18. ábra: A robbanásveszélyes térség kiterjedése a koncentráció eloszlás függvényében (kis rés, alacsony nyomás) (szerző szerkesztése)



19. ábra: A robbanásveszélyes térség kiterjedése a koncentráció eloszlás függvényében (kis rés, nagy nyomás) (szerző szerkesztése)



20. ábra: A robbanásveszélyes térség kiterjedése a koncentráció eloszlás függvényében (nagy rés, alacsony nyomás) (szerző szerkesztése)

A FLACS-CFD szimulációval három szivárgásra vizsgálatára készítettem modellt, amelyek a nagy résméret, alacsony nyomások különböző koncentrációjú gázfelhő keverékek terjedését szimulálják. Vizsgálatom során három különböző koncentrációjú gázkeverék esetében modelleztem a robbanásveszélyes gázfelhő állapotát és hasonlítottam össze az új kiterjesztett analitikai modellek által kiszámolt eredményekkel. Mindegyik szimuláció során, a kiterjesztett összefüggések szerinti kisebb értékeket kaptam.

4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

- T1. Megállapítottam, hogy az aceton szabadfelszíni párolgására vonatkozó szakirodalmi és szabványi összefüggések jelentősen eltérő eredményeket adnak. Szimulációs és kísérleti vizsgálatokkal igazoltam, hogy a vizsgálatokkal a legjobb egyezőséget az Amerikai Környezetvédelmi Ügynökség (EPA) módszertana biztosítja, ezért a jelenlegi szabályozástól eltérően a mérnöki gyakorlatban javasolt a hivatkozott szabvány alábbi összefüggésének alkalmazását. [P1, P4]

$$W_{\text{pár}} = \frac{0,284 \cdot u^{0,78} \cdot M^{2/3} \cdot A_{\text{foly}} \cdot p}{R \cdot T}$$

- T2. ANSYS szimulációs környezetben vizsgáltam hidrogén és propán kibocsátások által kialakuló robbanásveszélyes terek kiterjedését különböző sebességű és irányú légáramlások esetén. Megállapítottam, hogy a légsebesség nagysága jelentős hatással van a kialakuló zóna alakjára és kiterjedésére, ugyanakkor a hatályos szabványi környezet ezt a hatást figyelmen kívül hagyja. [P3, P8]
- T3. A metán szabványi környezetben azonosított, résen keresztüli történő kiáramlás esetén igazoltam, hogy az eltérő kibocsátási karakterisztikának hatása van a gázfelhő kialakulására és terjedésére vonatkozóan. Kritikus nyomásviszony alatti és feletti kiáramlás vonatkozásában igazoltam, hogy a járószint alatti környezetekben a levegőnél kisebb relatív sűrűségű közeg esetén is kialakulhat robbanásveszélyes koncentráció. A szabványi megállapítások nem minden körülmények között biztosítanak kellő értékelési módszertant és ezáltal alul szabályozza a követelményeket, így azok felülvizsgálata szükséges. [P6, P7]
- T4. A FLACS-CFD szimulációval, amely véges térfogatú numerikus áramlástan szimulációs egyenleteken alapszik, megvizsgáltam egy lehetséges ammónia szivárgásából eredő kockázat kezelési intézkedéseket a gázkoncentráció érzékelő alkalmazásával. Igazoltam, hogy a zárt térben, akadályok esetében nem biztosítható a tökéletes védelem egy szivárgási

pont közvetlen közelébe elhelyezett gázkoncentráció érzékelővel, amely a szimulációs vizsgálataim egyértelműen rámutatnak. Megállapítottam, hogy az érzékelők elhelyezésének optimalizálása biztonságtechnikai szempontból kiemelt fontosságú és hatályos szabvány szerinti legalább egy gázérzékelő elhelyezése nem biztosíthatja a biztonságos üzemeltetési feltételeket, ezért a biztonság fokozása érdekében javaslatokat fogalmaztam gázérzékelők mennyiségi és minőségi elhelyezése kapcsán mert a szükséges műszaki és szervezési intézkedések alkalmazásánál fontos a minél gyorsabban történő beavatkozás. [P12]

- T5. Gázkeverékek lehetséges robbanásveszélyes térségeinek a módszertanát megvizsgálva megállapítottam, hogy gázkeverékekre vonatkozóan nem található konkrét eljárás a robbanásveszélyes zóna kiterjedésének a meghatározására. Az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabványban szereplő, tiszta anyagra vonatkozó összefüggéseket kiegészítve új számítási eljárást alkottam meg, amellyel pontosítható a gázkeverékek robbanásveszélyes térség méretének a meghatározása. [P15]

5. FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK

A továbbiakban szeretném folytatni a kutatásaimban elkezdett munkát a robbanásvédelem – robbanásveszélyes anyagok kibocsátása, szivárgása és terjedése témakörben. Az aceton párolgási kísérletnél alkalmazott modelleket több anyagra vonatkoztatva is vizsgálni, amelyek a vegyi- és egyéb ipari környezetben jelentős mértékben előfordulnak, különös tekintettel a folyadékelegyek illékonyasága kapcsán. Az eddig legjobban illeszkedő modellt felülvizsgálva, esetlegesen új változók bevezetésével, mérésekkel szeretném validálni.

A légáramlás hatását kívánom vizsgálni további közegek és geometriai, illetve környezeti feltételek szerint mivel ezen tématerületet nem kellő részletességgel kezeli a szabályozási környezet. Továbbá célom olyan CFD szimulációk elkészítése, amelyek során a robbanásveszélyes gázok, gőzök viselkedését vizsgálom légttechnikai rendszerek belső terében. A kutatás célja annak meghatározása, hogy milyen mértékű kockázat áll fenn adott körülmények között, illetve milyen légáramlási viszonyok esetén tekinthető elhanyagolhatónak a robbanásveszély kockázata. Emellett célom meghatározni azt a legnagyobb kibocsátási értéket is, amely mellett még nem áll fenn robbanásveszélyes állapot. A szimulációs kísérleti eredményekkel szeretném validálni. A zárt terekben kialakulható robbanásveszély térségek kockázatát is szeretném CFD szimulációkkal vizsgálni, különös tekintettel a légcsereszám, annak megnövelt vagy csökkentett értékei szerint. A vizsgálat során ki szeretnék térni arra, hogy egy darab elszívási pont vagy több elszívási pont kialakítása biztosítja a kedvezőbb üzemeltetési feltételeket és így hogyan optimalizálható egy helység biztonsága, illetve tehető hatékonyra a rendszer működése. Ez utóbbiak modelljeinek a felépítését már elkezdtük.

Az időjárás körülmények befolyásoló tényezői közül páratartalom és a csapadék okozta terjedési hatásainak korlátjait szeretném vizsgálni, arra való tekintettel, hogy a relatív sűrűség szerint levegőnél könnyebb gázok terjedését mennyire befolyásolja, illetve kritikus áramlás alatti és feletti kibocsátások során a gázok, gőzök terjedésre hogyan gyakorol hatást.

A gázkeverékek robbanásveszélyes térségeinek a módszertanát több közegre is szeretném elvégezni, vizsgálva a komponensek közti diszpergálás és fázis-szétválasztás állapotát. A kibocsátási együttható értékét különböző geometriájú résen esetében szeretném vizsgálni, továbbá az említett gázkeverékek alsó robbanási határ tulajdonságát a Vegyipari Gépészeti Intézet laborjában szeretném kísérleti úton is vizsgálni. Ezzel megalkotva a lehető legjobban közelítő módszertant az ilyen esetek robbanásveszélyes térségeinek a meghatározásához.

Az eddig elért és jövőbeli kutatások eredményeinek alkalmazhatósága implementálható a minden egyes olyan ipari területre, technológiákra, ahol a gázok, gőzök okozta robbanási kockázat fennállhat, kiváltképp azon hazai, illetve nemzetközi jogszabályi vagy szabványokat, amelyeknek van robbanásvédelmi vonatkozása. Az 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatból robbanás elleni védelem kapcsolatos részei és Tűzvédelmi Műszaki Irányelvek Robbanás elleni védelem irányelve nem teljes körűen rögzített követelményeket, változtatni szükséges. Továbbá régi magyar szabványokat a mai robbanásvédelem tudományterületével igazolt, nemzetközi szabványokat részben vagy teljes harmonizálásukkal szakmai oldalról megalapozottan lehetne átvenni a követelmény rendszert és ezzel fejleszteni a szabályozási rendszert. Oktatási fejlesztés is szükséges.

6. A KUTATÁSI TERÜLET TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA

- P1. Levente Tugyi, Dr. Zoltán Siménfalvi, Dr. Gábor L. Szepesi, „Experimental and theoretical investigation of acetone evaporation”, *MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE 11*: 5 pp. 132-144., 13 p. (2021), DOI: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2021.5.13>
- P2. Tugyi Levente, Dr. Siménfalvi Zoltán, Dr. Szepesi L. Gábor, „Robbanásveszélyes térségekben előforduló folyadék expozíció vizsgálata”, *XXIV. Tavaszi Szél Konferencia 2021 Tanulmánykötet II.*, 2021.05.28-30., Miskolci Egyetem, pp 233-238
- P3. Levente Tugyi, Zoltán Siménfalvi, Gábor L Szepesi, „The Application of CFD Software for Modelling the Dispersion of Hydrogen Gas at Renewable Energy Fueling Stations”, *LECTURE NOTES IN MECHANICAL ENGINEERING Vehicle and Automotive Engineering 4* pp. 483-490., 8 p. (2022), DOI: 10.1007/978-3-031-15211-5_40
- P4. Levente Tugyi, Zoltán Siménfalvi, Gábor L. Szepesi, „Explosive Atmosphere Analysis For Simulation Of Acetone Source Of Release Using Aloha Software”, *MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE 12*: 3 pp. 274-282. , 9 p. (2022) DOI: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2022.3.25>
- P5. Tugyi, Levente; Siménfalvi, Zoltán; Szepesi, L. Gábor, „Égés- és robbanásveszélyes anyagok várható szivárgásainak robbanásvédelmi szempontú megközelítése normál üzemi körülmények között atomerőműveknél”, *GÉP LXXIII*: 5 pp. 81-84. 4 p. (2022)
- P6. Tugyi, Levente, Siménfalvi, Zoltán, Szepesi, L. Gábor, „A metángáz szubszonikus és szonikus felszabadulásának és terjedésének CFD modellezése”, *Doktoranduszok Fóruma 2022*, Miskolci Egyetem (2023) pp. 90-99., 10 p.
- P7. Levente Tugyi, Zoltán Siménfalvi, Gábor L Szepesi, Csaba Kecskés, Zoltán Keres, Tamás Sári, „CFD modeling of subsonic and sonic methane gas release and dispersion”, *Pollack Periodica: an International Journal for Engineering and Information Sciences (2023)* DOI: <https://doi.org/10.1556/606.2023.00789>

A kutatási terület témájához kapcsolódó publikációk listája

- P8. Levente Tugyi, Gábor L Szepesi, Máté Petrik, Zoltán Siménfalvi, „Propane leakage and spread studies against airflows of different magnitudes”, *Vajdasági Magyar Mérnökök és Műszakiak Egyesülete, V3ME* (2023) pp. 26-29., 4 p.
- P9. Levente Tugyi, Zoltán Siménfalvi, Gábor L. Szepesi, Zoltán Keres, „Hazardous areas classification for in flammable liquid storage tanks”, *MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE 13:* 2 pp. 116-134. , 18 p. (2023) DOI: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2023.2.11>
- P10. Levente Tugyi, Zoltán Siménfalvi, Gábor L. Szepesi, Csaba Kecskés, „Hazardous area classification for wastewater treatment plants using by decree and standard”, *MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE 13:* 3 pp. 26-35., 10 p. (2023) DOI: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2023.3.3>
- P11. Siménfalvi, Z., Kállai, V., Mikáczó, V., Petrik, M., Pusztai, T., Pusztai-Spisák, B., Szamosi, Z., Tugyi, L., & Szepesi, L. G.: „Energetikai szektorban előforduló por közegek robbanási és gyulladási tulajdonságainak vizsgálata” [Investigation of the explosion and ignition properties of dust media occurring in energy sector]. *Scientia et Securitas*, 4(3), 219-228. (2024) <https://doi.org/10.1556/112.2023.00163>
- P12. Levente Tugyi, Gábor L Szepesi, Zoltán Siménfalvi, „Investigation of the operation of gas detectors in the ammonia compressor environment using FLACS-CFD simulation”, *Vajdasági Magyar Mérnökök és Műszakiak Egyesülete, V3ME* (2024) pp. 28-33, 6 p.
- P13. L. Tugyi, Z. Siménfalvi, and G. Szepesi, „Determination of Flash Points of Flammable Mixtures for Explosion Protection,” *Solid State Phenomena*, vol. 363, pp. 81–86, Jun. 2024, doi: 10.4028/p-tky3Si.
- P14. Tugyi, L., Siménfalvi, Z., & Szepesi, G. L. (2024). „Comparison of 2D and 3D Representations of Explosion Hazardous Areas”. *Chemical Engineering Transactions*, 111, 349-354. <https://doi.org/10.3303/CET24111059>
- P15. Tugyi, L., Siménfalvi, Z., & Szepesi, L. G. „Investigation of the explosive atmosphere extent of hydrogen and methane gas mixtures by calculation and FLACS CFD simulation”. *MULTIDISZCIPLINÁRIS TUDOMÁNYOK: A MISKOLCI EGYETEM KÖZLEMÉNYE 14:* 3, pp. 44–60, 16 p (2024). DOI: <http://doi.org/10.35925/j.multi.2024.3.5>

7. A TÉZISFÜZETBEN IDÉZETT SZAKIRODALMAK

- [1] Z. Siménfalvi *et al.*, “Energetikai szektorban előforduló por közegek robbanási és gyulladási tulajdonságainak vizsgálata,” *Scientia et Securitas*, vol. 4, no. 3, pp. 219–228, Jun. 2024, doi: 10.1556/112.2023.00163.
- [2] J. L. Santos, *Fire and Explosion Risk Analysis*. Risiko Technik Gruppe Office of Scientific and Technical Information, 2009.
- [3] K. Ramamurthi, „Ignition Sources, Fire, Explosion and Detonation”, 1st ed., vol. XVIII, 201. *Springer International Publishing*, 2023. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-20687-0>.
- [4] T. Kompolthy és L. Szalay, „Tűz- és robbanásvédelem”, *Műszaki Könyvkiadó*, Budapest, 1990.
- [5] A. McMillan, “1 - Introduction,” in *Electrical Installations in Hazardous Areas*, A. McMillan, Ed., Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998, pp. 1–21. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-075063768-8/50001-X>.
- [6] P. R. Amyotte, “Some myths and realities about dust explosions,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 92, no. 4, pp. 292–299, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2014.02.013>.
- [7] Dr. Bátor B., „Égés- és robbanáselmélet I.”, *Tankönyvkiadó*, Budapest, 1980.
- [8] S. Kondo, K. Takizawa, A. Takahashi, and K. Tokuhashi, “On the temperature dependence of flammability limits of gases,” *J Hazard Mater*, vol. 187, no. 1–3, pp. 585–590, 2011, doi: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.037.
- [9] L. I. Ji-bo, L. Dong, and C. Zhen-zhong, “The Research on Combustible Gas Lower Limit of Explosion Expanding in High Temperature,” *Procedia Eng*, vol. 11, pp. 216–225, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.650.
- [10] Z. Mendiburu, C. A. Joao, C. Christian R., and R. Justo J., “Flammability limits temperature dependence of pure compounds in air at atmospheric pressure,” *Energy*, vol. 118, pp. 414–424, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.12.036.

- [11] D. Peterson, “Evolution of an Hazmat Acronym.” Accessed: Jul. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.firehouse.com/rescue/article/10495996/evolution-of-an-hazmat-acronym>
- [12] J. He *et al.*, “Simulation and application of a detecting rapid response model for the leakage of flammable liquid storage tank,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 141, pp. 390–401, 2020, doi: 10.1016/j.psep.2020.04.053.
- [13] H. Tian *et al.*, “Safe performance analysis of flammable mixture working fluid leakage in Organic Rankine Cycle,” *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 1112–1118, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.636.
- [14] L. Li, J. Luo, G. Wu, X. Li, N. Ji, and L. Zhu, “Impact Assessment of Flammable Gas Dispersion and Fire Hazards from LNG Tank Leak,” *Math Probl Eng*, vol. 2021, p. 4769552, 2021, doi: 10.1155/2021/4769552.
- [15] A. Galeev, Y. Chistov, and S. Ponikarov, “Numerical analysis of flammable vapour cloud formation from gasoline pool,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 137, pp. 211–222, 2020, doi: 10.1016/j.psep.2020.02.031.
- [16] C. Octau *et al.*, “Liquid-solid two-phase jet in a turbulent cross flow: Experiments and simulations,” *Chemical Engineering Research and Design*, vol. 155, 2020, doi: 10.1016/j.cherd.2020.01.004.
- [17] H. Witlox *et al.*, “Two-phase jet releases and droplet dispersion: Scaled and large-scale experiments, droplet-size correlation development and model validation,” in *SYMPOSIUM SERIES NO. 155*, Institution of Chemical Engineers, 2009.
- [18] D. Crowl, “Minimize the Risks of Flammable Materials,” *Chem Eng Prog*, vol. 108, pp. 28–33, Apr. 2012.
- [19] B. C. R. Ewan and K. Moodie, “Structure and velocity measurements in underexpanded jets,” *Combustion Science and Technology*, vol. 45, no. 5–6, pp. 275–288, Mar. 1986, doi: 10.1080/00102208608923857.
- [20] F. P. Lees, *Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification*, 2nd ed., vol. 1. UK: Assessment and Control, 1996.

- [21] C.J.H. van den Bosch and N.J. Duijm, *Methods for the calculation of Physical Effects – due to releases of hazardous materials (liquids and gases)* –, *TNO-Yellow-Book-CPR-14E*, Third ed., Version 2., vol. Chapter 2. Publicatiereeks Gevaarlijke Stoffen 2, 2005.
- [22] R. Benintendi, “Laminar jet modelling for hazardous area classification,” *J Loss Prev Process Ind*, vol. 24, no. 2, pp. 123–130, Mar. 2011, doi: 10.1016/j.jlp.2010.11.005.
- [23] R. Benintendi, “Turbulent jet modelling for hazardous area classification,” *J Loss Prev Process Ind*, vol. 23, no. 3, pp. 373–378, May 2010, doi: 10.1016/j.jlp.2009.11.004.
- [24] Y. Mouilleau and A. Champassith, “CFD simulations of atmospheric gas dispersion using the Fire Dynamics Simulator (FDS),” *J Loss Prev Process Ind*, vol. 22, no. 3, pp. 316–323, May 2009, doi: 10.1016/j.jlp.2008.11.009.
- [25] M. Dadashzadeh, F. Khan, K. Hawboldt, and P. Amyotte, “An integrated approach for fire and explosion consequence modelling,” *Fire Saf J*, vol. 61, pp. 324–337, 2013, doi: 10.1016/j.firesaf.2013.09.015.
- [26] I. David Udechukwu, “Development of a Model for Computational Fluid Dynamics Simulation of Liquefied Natural Gas Vapour Dispersion,” 2015.
- [27] M. Macchi, “LNG/Fuel cascades and flammable cloud formation,” 2018.
- [28] R. K. Azadboni, “Numerical Modelling of Inhomogeneous Liquefied Natural Gas (LNG) Vapour Cloud Explosions.”
- [29] L. Tugyi, Z. Siménfalvi, and L. G. Szepesi, “Explosive atmosphere analysis for simulation of acetone source of release using ALOHA software,” *Multidiszciplináris Tudományok*, vol. 12, no. 3, pp. 274–282, 2022, doi: <https://doi.org/10.35925/j.multi.2022.3.25>.
- [30] R. Jones, D. Lehr, S.-B. D., and R. R. Micheal, *ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4: Technical Documentation*. . Seattle, WA: Emergency Response Division, NOAA.: NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 43., 2013.
- [31] R. Tommasini, “The classification of hazardous areas where explosive gas atmospheres may be present,” *Saf Sci*, vol. 58, pp. 53–58, 2013, doi: 10.1016/j.ssci.2013.03.010.

- [32] Guide CEI 31-35, „Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres – Guide for Classification of Hazardous Areas”, *Comitato Elettrotecnico Italiano*, Milánó, 2012-02
- [33] J. J. N. Alves *et al.*, “Overview and experimental verification of models to classify hazardous areas,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 122, pp. 102–117, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.psep.2018.11.021.
- [34] G. W. Howard, A. V Tchouvelev, Z. Cheng, and V. M. Agranat, “DEFINING HAZARDOUS ZONES-ELECTRICAL CLASSIFICATION DISTANCES,” Aug. 2019.
- [35] C. A. Nascimento, F. J. Queiroz, P. L. Barros, R. R. Freire, A. T. P. Neto, and J. J. N. Alves, “COMPUTATIONAL SIMULATION AND ANALYTICAL PREDICTION OF AMMONIA LEAKAGE FOR HAZARDOUS AREA CLASSIFICATION,” in *XL Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering*, Natal/RN, Brazil, Nov. 2019.
- [36] N. B. V. and T. Pöschel, “Kinetic Theory of Granular Gases,” 2004, *Oxford University Press, Oxford*.
- [37] MSZ EN IEC 60079-10-1:2021, „Robbanóképes közegek. 10-1. rész: Tércsbesorolás. Robbanóképes gázközegek (IEC 60079-10-1:2020) (IEC 60079-10-1:2020)”, *Magyar Szabványügyi Testület*, Budapest, 2021.