

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR
VEGYIPARI GÉPÉSZETI INTÉZETI TANSZÉK



ROBBANÁSVESZÉLYES KÖRNYEZETBEN KIALAKULÓ
KIBOCSÁTÁSOK SZIMULÁCIÓS ÉS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

PHD ÉRTEKEZÉS

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

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK	I
TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS	III
JELÖLÉSJEGYZÉK, INDEXEK	IV
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS.....	7
1.1. Robbanásveszélyes térségek kockázatának jelentősége	7
1.2. Célkitűzések.....	9
2. SZAKIRODALMI, JOGSZABÁLYI, HAZAI ÉS NEMZETKÖZI SZABVÁNYOK ÁTTEKINTÉSE.....	12
2.1. Égés és robbanás – A robbanásveszélyes környezet kialakulásának feltételrendszere	12
2.2. Robbanás típusai	13
2.3. Robbanásveszélyes környezet kialakulásához kapcsolódó robbanástecnikai tulajdonságok	13
2.3.1. Lobbanáspont.....	13
2.3.2. Alsó- és felső robbanási határ	13
2.3.3. Folyadék expozíció	15
2.3.4. Relatív sűrűség.....	16
2.4. Robbanásvédelemhez kapcsolódó jogszabályi és szabványi háttér áttekintése	17
2.4.1. Vonatkozó jogszabályok.....	17
2.4.1.1. 3/2003. (III. 11.) FMM-ESzCsM együttes rendelet	17
2.4.1.2. 35/2016. (IX. 27.) NGM rendelet	17
2.4.1.3. 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet	17
2.4.2. Szabványok és irányelvek.....	18
2.4.3. Robbanásveszélyes zónák típusai, ábrázolásuk szimbólumai, kockázati megközelítésük	20
2.4.3.1. Robbanásveszélyes zónák típusai	20
2.4.3.2. Robbanásveszélyes zónák ábrázolásainak szimbólumai	21
2.4.3.3. Robbanásveszélyes zónák kockázati megközelítései.....	21
2.4.3.4. Robbanási kockázat csökkentésének lehetőségei	22
2.5. Robbanásveszélyes környezetben előforduló kibocsátási formák.....	23
2.5.1. Éghető folyadék egyfázisú kibocsátása	24
2.5.2. Éghető folyadék kétfázisú kibocsátása	25
2.5.2.1. Környezeti hőmérsékleten történő kibocsátás	25
2.5.2.2. Forrásponthoz közeli vagy fölötti hőmérsékleten történő kibocsátás	26
2.5.2.3. Tócsa és medence párolgás.....	29
2.5.3. Éghető gázok és gőzök kibocsátása	32
2.6. Robbanási környezet terjedési modelljei	34
2.7. Gázok, gőzök terjedés vizsgálatára alkalmazható szimulációs környezet	36
2.7.1. CFD alapú szimulációs környezet.....	37
2.7.1.1. DNV PHAST CFD – Kameleon FireEx (KFX)	38
2.7.1.2. Fire Dynamics Simulator (FDS)	39
2.7.1.3. OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation)	41
2.7.1.4. ANSYS CFD - Fluent és CFX.....	42
2.7.1.5. FLACS-CFD (FLAme ACceleration Simulator)	44
2.7.1.6. További CFD alapú szimulációs környezetek	46
2.7.2. Egyéb szimulációs környezet.....	46
2.7.2.1. ALOHA - Areal Locations of Hazardous Atmospheres	46
2.7.2.2. BREEZE – Breeze Incident Analyst	47
2.7.2.3. DNV Phast – Process Hazard Analysis Software Tool	47
2.7.2.4. SuperChems™ for DIERS (Design Institute for Emergency Relief Systems)	48
2.7.2.5. SLAB View	49
2.7.3. Robbanásveszélyes térségek meghatározása analitikai összefüggések alkalmazásával	49

3. KUTATÁSI EREDMÉNYEK	53
3.1. Folyadék párolgás kísérleti és szimulációs vizsgálata	53
3.1.1. Az aceton párolgás szimulációs vizsgálata	53
3.1.2. A kísérleti környezet felépítése	55
3.1.2.1. Párolgás mértéke légáramlás nélkül	55
3.1.2.2. Párolgás mértéke 2 m/s légáramlásnál	56
3.1.2.3. Párolgás mértéke 4 m/s légáramlásnál	57
3.1.2.4. Párolgás mértéke 6 m/s légáramlásnál	57
3.1.2.5. Párolgási modellek vizsgálata	57
3.1.3. Eredmények kiértékelése	58
3.2. ANSYS Fluent szimulációs környezetben végzett modellezések	59
3.2.1. Hidrogén szivárgás vizsgálata korlátozott terjedési iránnyal	60
3.2.1.1. A 2 m/s sebességű légáramlás hatása a hidrogén terjedésére	60
3.2.1.2. A 11 m/s sebességű légáramlás hatása a hidrogén terjedésére	62
3.2.1.3. Propán kibocsátás vizsgálata eltérő kiáramlási irányok és különböző légáramlások függvényében	64
3.2.1.4. A 2 m/s sebességű légáramlás hatása a propán terjedésére	65
3.2.1.5. A 10 m/s sebességű légáramlás hatása a propán terjedésére	66
3.2.1.6. A 20 m/s sebességű légáramlás hatása a propán terjedésére	67
3.2.2. Metán kibocsátás vizsgálata alacsony és nagynyomáson	68
3.2.2.1. Kritikus áramlás alatti kibocsátású gázfelhő terjedésének a vizsgálata	68
3.2.2.2. Kritikus áramlás feletti kibocsátási gázfelhő terjedésének a vizsgálata	70
3.2.2.3. Magas hőmérsékletű metán kibocsátásának vizsgálata	72
3.2.3. Eredmények kiértékelése	72
3.3. FLACS-CFD szimulációs környezetben végzett modellezések	73
3.3.1. Gázkoncentráció érzékelők elhelyezésének és detektálásának optimalizálási vizsgálata	74
3.3.1.1. A vizsgált technológiai és szimulációs környezet	74
3.3.1.2. Szivárgás vizsgálata korlátozatlan +X terjedési irányban	75
3.3.1.3. Szivárgás vizsgálata korlátozott +Z terjedési irányban	77
3.3.1.4. Szivárgás vizsgálata korlátozatlan +Z terjedési irányban	78
3.3.2. Vizsgálatok kiértékelése	78
3.3.3. Gázkeverékek robbanásveszélyes térségeinek meghatározása	80
3.3.3.1. Kezdeti összefüggések	81
3.3.3.2. Az anyagtulajdonságoktól függő változók	81
3.3.3.3. Új analitikai modellek kiterjesztése	82
3.3.3.4. Hidrogén-metán eltérő koncentrációjú keverékek robbanásveszélyes térségei	83
3.3.3.5. Szimulációs eredmények vizsgálata	86
3.3.3.6. Gázkeverékek robbanásveszélyes térségeit leíró egyszerűsített egyenlet	88
3.3.4. Eredmények kiértékelése	90
4. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	91
5. ÖSSZEFOGLALÁS	92
6. SUMMARY	93
7. FEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK	94
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	95
A KUTATÁSI TERÜLET TÉMÁJÁHOZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK LISTÁJA	96
IRODALOMJEGYZÉK	98

TÉMAVEZETŐI AJÁNLÁS

Tugyi Levente tanulmányait BSc szinten mechatronikai mérnökként kezdte meg, azonban már ekkor is erős érdeklődést mutatott a vegyipari rendszerek és biztonságtechnika iránt. Ezt az érdeklődést követve MSc képzésre a vegyipari gépészeti specializációt választotta. Mind a tanulmányai során, mind a gyakorlati munkavégzésében egyre szorosabban kötődött a robbanásvédelemhez, különösen a robbanásveszélyes térségek azonosításához, illetve a szivárgások, gázterjedési formák viselkedésének vizsgálatához. Ezáltal számára nem is volt kérdés, hogy ezt a tudását szeretné tovább mélyíteni doktori képzés keretén belül.

Szakmai érdeklődése és kérdésfelvetései egyaránt azt mutatták, hogy valódi elkötelezettséggel fordul a terület felé. Nagy öröm volt számunkra, hogy egy, a gyakorlatban is tapasztalt, ugyanakkor elméleti alapokon is felkészült hallgatóval dolgozhattunk együtt ezen az aktuális és iparilag is releváns témán. Kutatási fókusza a különböző szivárgási jelenségek és azokból eredő robbanásveszélyes térségek kialakulásának mechanizmusa, amely mind ipari, mind tudományos szempontból kiemelt jelentőséggel bír. Kutatásának során a robbanásvédelmi témakör kidolgozásához szükséges elméleti alapokat dolgozta fel. Részletesen vizsgálta a robbanásveszélyes térségek kialakulásának elméleti hátterét, a robbanásveszélyes környezet kialakulásának feltétel rendszerét, valamint a veszélyes anyagok szivárgásának és terjedésének dinamikáját, több CFD és egyéb szimulációs szoftverekkel végzett vizsgálatokat.

Kiemelkedő, tájékozódási futóként és atlétaként megszerzett kitartása, céltudatossága és maximalizmusa a kutatói munkájában is folyamatosan érezhető volt – feladatmegoldásait következetesség és alaposság jellemezte. Lelkesedése, kérdésfelvetései és analitikus látásmódja alapján meggyőződésünk, hogy doktori tanulmányai során értékes hozzájárulást fog nyújtani a vegyipari biztonságtechnika, a robbanásvédelem területéhez.

Publikációs tevékenysége megfelelő, MTMT adatbázis alapján jelenleg 18 publikációval rendelkezik, amelyek közül 15 kötődik a dolgozat témájához. Ezek közül négy Scopus által referált, idegen nyelvű, lektorált Q3 és Q4-es közlemények. PhD fokozatszerzése esetén az Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet egy nagyon lényeges területén (biztonságtechnika, robbanásvédelem) folytatná tudományos és oktatói tevékenységét.

Miskolc, 2025.06.30.

Prof. Dr. Siménfalvi Zoltán
egyetemi tanár, témavezető

Prof. Dr. Szepesi L. Gábor
egyetemi tanár, társ-témavezető

JELÖLÉSJEGYZÉK, INDEXEK

MEGNEVEZÉSEK

Rövidítés	Megnevezés
API	American Petroleum Institute
CFD	Computational Fluid Dynamic
DAE	Differential Algebraic Equations
DDT	Deflegration To Detonation Transition
FDS	Fire Dynamics Simulator
FVM	Finite Volume Method
HAC	Hazardous Area Classification
HEM	Homogeneous Equilibrium Model
LNG	Liquefied Natural Gas
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MEP	Model Evaluation Protocol
MSZ	Magyar nemzeti szabvány
MSZ EN-, IEC-, ISO, ISO/IEC	nemzetközi szabványt bevezető magyar nemzeti szabvány.
NFPA	National Fire Protection Association
OSHA	Occupational Safety and Health Administration

GÖRÖG BETŰK

Jel	Megnevezés	Mértékegység
α_{talaj}	Talaj termikus diffúzió	m ² /s
γ	Adiabatikus expanzió kitevő	-
γ_{exp}	Térfogatnövekedési arány	-
δ	Párolgáshő	J/mol
ν	Kinematikai viszkozitás	-
$\rho_{f-g, kev}$	Folyadék-gáz/gőz keverék sűrűsége	kg/m ³
ρ_{foly}	Folyadék sűrűsége	kg/m ³
ρ_g	Gáz/gőz sűrűsége	kg/m ³

LATIN BETŰK

Jel	Megnevezés	Mértékegység
$\Delta H_{pár}$	Párolgáshő	J/mol
a	Kohéziós erőkből eredő nyomáskorrekció mértéke	Pa·m ⁶ /mol ²
A, B, C	Antoine állandók	-
A_{foly}	Folyadékfelszínének területe	m ²
ARH	Alsó Robbanási Határ	vol. %
ARH_T	Hőmérséklet függő alsó robbanási határ	vol. %
b	Gázrészecskék saját fajlagos térfogatának a négyszerese	m ³ /mol
C_d	Kibocsátási együttható	-
$C_{össz}$	Összehúzóási tényező	-

c_p	Fajhő állandó nyomáson	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
c_v	Fajhő állandó térfogaton	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
$C_{sűr}$	Súrlódási tényező	-
d	átmérő	m
D	Diffúziós képesség	-
$D_{foly, fel}$	Folyadékfelszín átmérője	m
FRH	Felső Robbanási Határ	$\text{vol.}\%$
FRH_T	Hőmérséklet függő felső robbanási határ	$\text{vol.}\%$
g	Gravitációs gyorsulás	m/s^2
h	magasság	m
h_{foly}	Folyadékoszlop magassága a szivárgás felett	m
$h_{mély}$	Tócsa/medence mélysége	m
k	Tömegátadási tényező	m/s
k_{talaj}	Talaj hővezetőképessége	$\text{W/m}\cdot\text{K}$
M	Moláris tömeg	kg/kmol
M_{foly}	Folyadék moláris tömege	kg/kmol
M_{lev}	Levegő moláris tömege	kg/kmol
n	Anyagmennyiség	mol
P	Robbanásveszélyes térség kialakulásának valószínűsége	-
p	Nyomás	Pa
P_{atm}	Atmoszférikus nyomás	Pa
P_{bel}	Rendszeren belüli közeg nyomás	Pa
P_g	Folyadék gőznyomása adott hőmérsékleten	Pa
$P_{g, atm}$	Folyadék gőznyomása környezeti hőmérsékleten	Pa
P_{krit}	Kritikus nyomás	Pa
Q_g	Éghető gáz/gőz térfogatárama	m^3/s
r	sugár	m
$r_{foly, fel}$	Folyadékfelszín sugara	m
Re	Reynolds-szám	-
R	Univerzális gázállandó	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$
S	Rés keresztmetszete	m^2
Sc	Schmidt-szám	-
t	Robbanásveszélyes környezet időtartama (2.4.3.3. fej.)	óra
t	Idő (2.5.2.3, 3.1.2. fej.)	s
T_{bel}	Rendszer belüli közeg hőmérséklete	K
T_{foly}	Folyadék hőmérséklete	K
T_g	Gáz/gőz hőmérséklete	K
$T_{körny}$	Környezeti hőmérséklet	K
T_{lp}	Lobbanásponti hőmérséklet (zárt vagy nyílttéri)	K
T_{Pg}	Folyadék gőznyomásához tartozó hőmérséklet	K
T_{talaj}	Talaj hőmérséklete	K
$u_{lég}$	Légáramlás sebessége	m/s
v	Folyadék áramlási sebesség	m/s
V	Térfogat	m^3
V_{foly}	Vizsgált folyadék térfogat mennyisége	m^3
W_{foly}	Folyadék tömegárama	kg/s

$W_{pár}$	Párolgás mértéke a folyadékfelszínről	kg/s
W_g	Gáz/gőz tömegárama	kg/s
$W_{g, forr}$	Gáz/gőz forráspont feletti tömegárama	kg/s
$W_{g, össz}$	Gáz/gőz összesített tömegárama	kg/s
W_{kev}	Gáz/gőz-folyadék keverék tömegárama	kg/s
$X_{g, el}$	Azonnal elillandó gőz/gáz százalékos értéke	%
$X_{g, lp}$	Lobbanáspontig elillandó gőz/gáz százalékos értéke	%
X_{kit}	Robbanásveszélyes térség kiterjedése	m
$X_{pár}$	Folyadékból elpárolgó gőz százalékos értéke	%
y	Kompensek	-
Z	Összenyomhatósági tényező	-
Z_{forr}	Összenyomhatósági tényező folyadék forráspontján	-

INDEXEK

Jel	Megnevezés
<i>atm</i>	atmoszférikus
<i>bel</i>	belső
<i>c</i>	konstans
<i>exp</i>	expanzió
<i>fel</i>	felszín
<i>fg</i>	folyadék-gáz/gőz
<i>foly</i>	folyadék
<i>g</i>	gáz/gőz
<i>i</i>	adott komponens
<i>kev</i>	keverék
<i>kiö</i>	kiömlés
<i>kit</i>	kiterjedés
<i>lev</i>	levegő
<i>lp</i>	lobbanáspont
<i>mt</i>	módosított telített
<i>össz</i>	összesített (2.5.2.2. fej.)
<i>össz</i>	összehúzódnás (2.5.1. fej.)
<i>ph</i>	párolgáshő
<i>rés</i>	rés méretének átmérője/sugara
<i>súr</i>	súrlódás
<i>T</i>	hőmérséklet
<i>talaj</i>	talajfelszínen elterülő folyadék
<i>V</i>	térfogat
<i>vtm</i>	vizsgált térfogat mennyiség

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉS

1.1. ROBBANÁSVESZÉLYES TÉRSÉGEK KOCKÁZATÁNAK JELENTŐSÉGE

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.

Az első feljegyzett sújtólég okozta bányarobbanás (bár nem ez volt a legelső bányában történt, robbanással járó baleset) 1514-ben, a belgiumi Barbeau de Wez bányában következett be [1]. A bányában felgyülemlett metán (sújtólég) a bányáslámpából származó nyílt láng hatására berobbant. A robbanás húsz fő halálához vezetett, és jelentős számú további sérüléssel járt. A bányászathoz köthető, az akkori korszak műszaki megközelítései szerint az első robbanásbiztos gyártmány, amelyet William Reid Clanny 1811-12 kezdett el megtervezni és elkészíteni, de csak 1813-ban alkotta meg és mutatta be új találmányát, a Clanny-lámpát [2]. Ezzel párhuzamosan, az 1812-ben bekövetkezett fellingi bányaszerencsétlenséget követően, 1813-ban létrejött egy bizottság, amelyet Sir Humphry Davy vezetett. A bizottság továbbfejlesztette a Clanny-lámpát, és 1815-ben bemutatta az úgynevezett Davy-biztonsági lámpát [2], amelynek műszaki kialakításának védelmi konstrukcióját egészen a modern elektromos lámpák megjelenéséig alkalmazták.

A bányászatban szerzett tapasztalatok és a biztonsági intézkedések kidolgozása nagy hatással volt az alábbi iparágakra is, ahol a robbanási kockázat fennáll:

- Olaj- és gázipar: kitermelő kutak, földalatti tározóegységek, ahol a kitermelés, finomítás, tárolás és szállítás során bekövetkező szivárgás a különböző szénhidrogénekkel (pl. metán, etán, propán, bután), valamint gázolaj vagy benzin levegővel keveredve robbanásveszélyes környezetet tud képezni.
- Agrár- és élelmiszeripar: porok (pl. cukor, liszt, keményítő), növényvédő szerek, műtrágyák (pl. ammónium-nitrát), alkoholtartalmú folyadékok (pl. etanol) lehetnek jelen a feldolgozás, gyártás, csomagolás és tárolás során.

- Autó- és fémipar: a feldolgozás, csiszolás és vágás során keletkező fémporok (pl. alumínium, magnézium, titán) képesek lehetnek a levegővel keveredve robbanásveszélyes porfelhőt képezni. A gázok és gőzök kockázata is fennáll az üzemanyagok (pl. benzin és hidrogén), valamint az oldószertartalmú mosó- és hűtőfolyadékok (pl. R1234yf vagy másnéven 2,3,3,3-Tetrafluoropropén) esetében.
- Faipar: kezelni szükséges a vágás, csiszolás és feldolgozás során keletkező porrobbanás veszélyét, de számolni kell gyúlékony folyadékok jelenlétével is, például gyanták és lakkok esetén.
- Textilipar: a textilporok (pl. finom pamutpor, gyapjú és szintetikus szálak), festékek és oldószergőzők felhalmozódása jelenthet kockázatot.
- Gyógyszeripar: a finom por alakú hatóanyagok keletkezése és kezelése, valamint a technológiai berendezések tisztítása során jelenlévő oldószerek (pl. etanol, izopropanol, aceton, metanol, n-hexán), továbbá a tablettázás, kapszulázás és csomagolás során is fennállhat a robbanásveszélyes közeg jelenléte.
- Vegyipar, petrokémiai üzemek: a szintézis, polimerizáció és oldószergyártás során számos, gáz vagy gőz okozta robbanásveszélyes anyagot alkalmaznak a különböző technológiai egységekben.

A robbanóanyagok többségében dinitrált, trinitrált anyagok, amelyek gyártása során is megjelenik a robbanásvédelem szerepe. Ezt védelmi intézkedésekkel szükséges kezelni, így ezen gyártási technológiák esetében is relevanciája van a különböző robbanásveszélyes gázok, gőzök vagy porok okozta keverékeknek [3]. Meg kell jegyezni, hogy a két terület jogszabályi háttérét felül kell vizsgálni [4, 5] mivel egyes pontok esetében nehéz eldönteni, hova tartoznak, és úgynevezett szürke zónák alakulhatnak ki [6].

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 [7], nevesítik az egyes technológiákban fennálló különböző kibocsátó forrásokat és előírásokat, valamint összefüggések alapján definiálják a robbanásveszélyes térségek típusát és kiterjedését, biztosítva a személyek biztonságát és a jogszabályi előírások betartását.

A robbanásveszélyes környezetben működő technológiák robbanásvédelmével és robbanásmegelőzésével az MSZ EN 1127-1:2019 szabvány foglalkozik. Tekintettel a robbanás kialakulásának alapfeltételeire, meg kell érteni annak elméleti háttérét, és ismerni szükséges az égés- és robbanástechnikai tulajdonságok kiemelten fontos jellemzőit, mint például a lobbanáspontot, az alsó és felső robbanási határt, a forráspontot, valamint a relatív sűrűséget. Ezek határozzák meg a technológiai környezet robbanásveszélyes térségeinek (zónáinak) kialakulását, vagyis a berendezésből kijutó robbanóképes anyag környezetben való megjelenésének folyamatát.

Az éghető és gyúlékony folyadékok, gázok, gőzök, ködök vagy aeroszolok esetén – amelyek robbanásveszélyes térségeket 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 rendszerelemekből 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 áramlástani 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 szükség, de ezek nem minden esetben állnak rendelkezésre. Ezáltal az ilyen bizonytalanságból eredő paramétereket úgy kell megválasztani, hogy a kibocsátás mértéke maximalizálva legyen, tehát a biztonság irányába való eltérés a helyes metodika.

1.2. CÉLKITŰZÉSEK

A Seveso-baleset 1976-ban nemcsak Olaszországot, hanem egész Európát szembesítette az ipari tevékenységek súlyos kockázataival. Ez az eset fordulópontot jelentett az iparbiztonság történetében, mivel világossá vált, hogy a nagy ipari üzemek működtetése során nem lehet csupán a gazdasági szempontokat figyelembe venni. Ezáltal a robbanásvédelem területén is komoly változások történtek. A hangsúly egyre inkább a megelőzésre került: a technológiai fejlesztések, a védelmi és monitoring rendszerek, valamint a robbanásveszélyes zónák pontos meghatározása mind hozzájárultak a baleseti kockázatok csökkentéséhez. A szabályozás egyre részletesebbé vált, a hatóságok szerepe erősödött, és a vállalatok is felismerték, hogy a biztonság hosszú távon nem költség, hanem befektetés.

A Miskolci Egyetem Vegyipari Gépek Intézeti Tanszéke Magyarországon egyedülálló módon képviseli a vegyipari technológiák, üzemek és berendezések tekintetében a biztonságtechnika széles fogalomkörét. A tanszék – saját és ipari partnereinek tapasztalatai alapján – megállapította, hogy a robbanásvédelemhez kapcsolódó szabályozási környezet számos anomáliával rendelkezik. Ezen igényekre reagálva, és a jövőbeli balesetek megelőzése érdekében 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-közeleli 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 energiaszektornál 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 – előreláthatóan – 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 robbanásvédelem területén a lehetséges kisebb méretű zónák kevesebb kockázatot és alacsonyabb költséget jelentenek a gyártmányok kiválasztása, felülvizsgálata, valamint a terület elektrosztatikus feltöltődés és kisülés elleni védelme vagy villámvédelmi megoldások szempontjából is.

Az értekezésemben az IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) hivatkozási rendszert alkalmazom a szakirodalmi források jelölésére és az irodalomjegyzékben való megjelenítésükre.

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 szálak anyagok és porok okozta robbanási kockázat, porrobbanás feltételeinek az elemzését nem vizsgálom. Éghető folyadékokból eredő köd képződés, aeroszolok 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 illékonyságuk 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 hatásfokokat 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. SZAKIRODALMI, JOGSZABÁLYI, HAZAI ÉS NEMZETKÖZI SZABVÁNYOK ÁTTEKINTÉSE

2.1. ÉGÉS ÉS ROBBANÁS – A ROBBANÁSVESZÉLYES KÖRNYEZET KIALAKULÁSÁNAK FELTÉTELREN SZERE

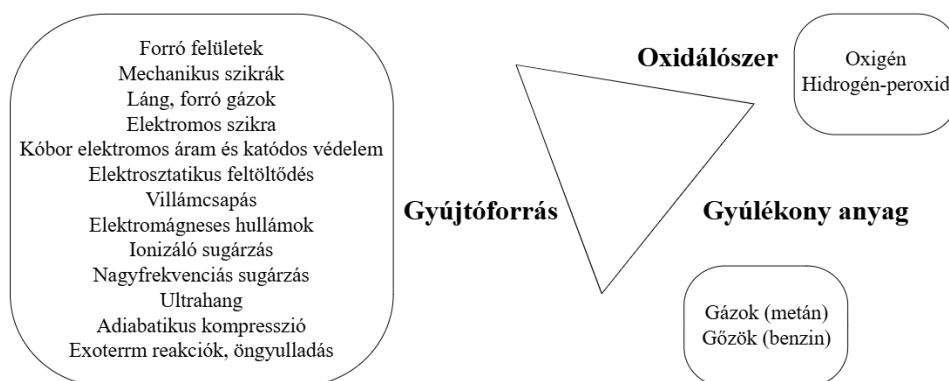
A robbanás egy hirtelen bekövetkező reakció, amelynek során fizikai és kémiai oxidációval vagy bomlással közösen végbemenő hőmérséklet- és/vagy nyomásváltozást történik [8]. Általában éghető gázok, gőzök vagy porok, valamint a levegőben megtalálható oxigén között megy végbe. Ahhoz, hogy gázok vagy gőzök esetében égés és robbanás bekövetkezzen, három feltételnek kell egyidejűleg és egy helyen teljesülnie, amit a 2.1-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 [9].

A hazai [10], valamint a nemzetközi szakirodalom [9] is *égési háromszögnek* definiálja a feltételrendszert, mivel a reakció lángfronttal indul, amelyből ezt követően nyomáshullámok is kialakulnak. Egyes szakirodalmak robbanási háromszögnek is nevezik [11], 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 [12], amely az égési háromszöghöz képest a por-levegő keverék zárttsága, és a diszperzió kritikus tényezőivel egészül ki.



2.1. ábra: Az égési háromszög (szerző szerkesztése)

2.2. ROBBANÁS TÍPUSAI

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 [13]. E folyamat sebesség szerint két nagyobb csoportra bontható: deflagráció és detonáció.

A deflagráció egy olyan égési/robbanási folyamat, amelyben a lángfront sebessége kisebb, mint a hangsebesség az adott közegben (ez légköri viszonyok között általában 340 m/s) [14]. A lángfront sebessége jellemzően néhány cm/s-tól több m/s-ig terjedhet. Ez a folyamat hő- és tömegátvitel útján terjed, ahol a reakciózóna melegíti a még nem reagáló anyagot, amely így eléri a gyulladási hőmérsékletét, és meggyullad. A nyomásnövekedés viszonylag alacsony, mivel a reakció lassan terjed. Ilyen lehet például a gyertya égése, ahol a lángfront lassan terjed az éghető anyagon, vagy a fa égése, amely szintén deflagráció, mivel a hő lassan jut át a szilárd anyagban, és a lángfront sebessége alacsony.

A detonáció során a lángfront sebessége meghaladja a hangsebességet az adott közegben [14]. Ez az égési/robbanási folyamat egy lökéshullám kíséretében terjed. A lángfront sebessége gyakran eléri vagy meghaladja az 1500 m/s értéket. A TvMI 13.5:2025.02.01. [15] szabályozás szintjén is rögzíti, hogy detonáció esetén a lángfront terjedési sebessége nagyobb, mint 340 m/s. A detonáció rendkívül gyors folyamat, mivel a reakció intenzív, így a felszabaduló energia igen gyorsan terjed, és nagyobb károkat okozhat, mint a deflagráció.

2.3. ROBBANÁSVESZÉLYES KÖRNYEZET KIALAKULÁSÁHOZ KAPCSOLÓDÓ ROBBANÁSTECHNIKAI TULAJDONSÁGOK

2.3.1. LOBBANÁSPONT

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.

A jelenlegi irodalom alapján a keverékek lobbanáspontja viszonylag kevés bemeneti paraméter (például Antoine-állandó, gőz-folyadék egyensúly) felhasználásával nagyságrendi közelítést adhat. Ez különösen fontos, mivel ha egy keverék lobbanáspontja kívül esik a szabályozás vagy szabvány által meghatározott tartományon, akkor nem szükséges robbanásbiztos tervezés, telepítés és üzemeltetés. Kutatásomban vizsgáltam Astbury és munkatársai modelljének alkalmazhatóságát [16].

2.3.2. ALSÓ- ÉS FELSŐ ROBBANÁSI HATÁR

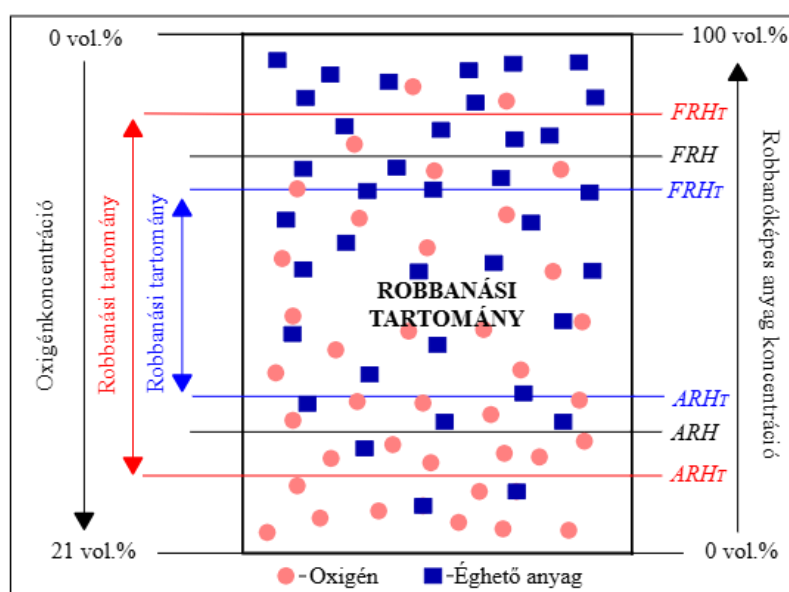
Az úgynevezett robbanási tartományon belül a levegő és az éghető anyag keveréke robbanóképes környezetet képezhet, amely gyújtóforrás hatására robbanást idézhet elő. A szakirodalmakban ezt a korábban levezetett égési-robbanási elmélet alapján az elmúlt évtizedekben egyre gyakrabban alsó és felső éghetőségi 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 használom, 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. Továbbá a robbanásveszélyes zónák kiterjedésének meghatározásánál ez az egyik legfontosabb paraméter az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabvány D melléklete [17] szerint, de más, specifikus szabványokban (pl. szórófülkékre vagy szárítókra vonatkozóan) is kiemelt szerepe van.

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 2.2 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 [18, 19, 20] 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. Ezzel szemben, ha a közeg hőmérséklete alacsonyabb a kiindulási hőmérsékletnél, akkor a határértékek növekedhetnek, ami kedvezőbb biztonsági feltételeket eredményez. Gőzkibocsátás során, amikor expandál is, a közeg hőmérséklete 0°C alá is süllyedhet, amely kedvezőbb feltételeket biztosíthat, sőt kondenzáció is bekövetkezhet.

A hőmérséklet hatásának becslésére különböző matematikai modelleket is kidolgoztak, amelyeket egymással összehasonlítottak, illetve részben módosítottak is. Az MSZ EN 1539:2016 [21] szabvány is tartalmaz egy ARH-meghatározásra szolgáló összefüggést, amely hasonló White [22] kidolgozott modelljéhez, de annál egyszerűbb. A 2.2. ábrán a piros és kék vonal szemlélteti a hőmérsékletváltozás hatásának lényegét, hogyan befolyásolja a robbanási tartomány változását.



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

A CEI 31-35 (2012-02) [23] egy visszavont olasz nemzeti szabvány, amely az értekezésben szereplő kutatások, a tématerületre vonatkozó jó mérnöki gyakorlatot tartalmazó szakirodalmak egyes részeit is átvette. Ezen olasz nemzeti szabvány (2012-02) verziója a maga 243 oldalával a legnagyobb terjedelmű a szabvány verziói között, elődje a (2011-03) verzió, amely az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabvány irodalomjegyzékében is megtalálható, kisebb terjedelmű. Ennek okán is fontosnak tartom ezen szabályozásban lévő megközelítések ismeretét, mivel további verziói kizárólag pár oldalas kiegészítéseket tartalmaznak és (2012-02) verziójú szabvány a tématerület meghatározó alapjaként szolgált. A szabványban szerepel a keverékek alsó robbanási határának számítási lehetősége a Le Chatelier-törvény [24] alapján, amely más, jó közelítést adó modellek alapjául is szolgált, például E. K. Addai és munkatársai tanulmányában [25]. Ezenkívül az MSZ EN ISO 10156:2017 szabvány [26] segítségével is meghatározhatók az alsó és a felső robbanási határok. Ennek egyik tudományos alapját Schröder V. és munkatársainak vizsgálatai adják [27, 28].

A gáz- vagy gőzkeverék ARH_{mix} értéke meghatározható az egyes komponensek ARH_i értékeinek és moláris arányának ismeretében. Az általánosan használt megközelítés a fent említett Le Chatelier-törvény alkalmazása:

$$ARH_{kev} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{ARH_i}}. \quad (2.1.)$$

Fontos figyelembe venni, hogy ez a megközelítés az egyszerű Le Chatelier-törvény alapján készült, amely ezen tudományterületen mérőldkönek számít. A pontosabb meghatározáshoz azonban kísérleti adatokra, szabvány szerinti vizsgálatokra vagy fejlettebb modellalkalmazásokra lehet szükség (utóbbi megközelítés jelenleg konzervatívnak tekinthető). Viszont olyan keverékek esetében, ahol az egyes komponensek között jelentős kölcsönhatások lépnek fel, mindenképpen indokolt a kísérleti, mérési adatokkal történő alátámasztás. A kutatásom során alkalmazott szimulációs szoftver a FLACS-CFD [5], ezenkívül a Breeze Incident Analyst [29] és a DDB [30] szoftverek is rendelkezésre állnak, amelyek nemcsak homogén komponensek, hanem keverékek alsó és felső robbanási határértékeinek meghatározására is alkalmasak.

2.3.3. FOLYADÉK EXPOZÍCIÓ

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.

Az adiabatikus folyamatok során a rendszer nem cserél hőt a környezetével, ami azt jelenti, hogy a folyamatban bekövetkező összes energiaváltozás a belső energiák átalakításával történik. Az adiabatikus állapot fenntartása érdekében a rendszer izolált, így nincs hőátadás a környezettel. Amikor ez az állapot megszűnik, a rendszer hőmérséklete megváltozhat. Ha a hőmérséklete emelkedik, a folyadék molekulái több energiához jutnak, mozgási energiájuk növekszik, ami fokozza a párolgás sebességét. Magasabb hőmérsékleten tehát a párolgás intenzívebb, a gőznyomás nő, és a folyamat gyorsabbá válik [31]. Fontos megjegyezni, hogy hiába történik a kiáramlás magas hőmérsékleten, a közeg egyidejűleg expanzió is átesik, így az áramlási viszonyok és a fajhő függvényében bizonyos mértékű hűlés is végbemegy. Ezen expozíció során folyadékok és cseppfolyós gázok esetén egy- és kétfázisú szivárgási állapotok vannak jelen. Ezek részletes kifejtésére a 2.5.1. és 2.5.2. fejezetekben kerül sor.

Az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 [17] szabvány nem ad konkrét útmutatást arra vonatkozóan, hogy a folyadék párolgásának mértékét százalékosan mekkora értékre lehet felvenni. A térségbesorolás készítőjére bízta, hogy a technológiában használt anyag tulajdonságai és az üzemi paraméterek szerint, hogyan választja meg ezt az értékét. Logikusan a folyadék közeg olvadás- és forráspontja közötti hőmérséklettartományhoz viszonyított százalékos értéket érdemes fölvenni, amelyet a kutatásaim során vizsgáltam. Ez egy kiemelten fontos paraméter, mivel a folyadék önmagában nem robbanásveszélyes, hanem annak gőze jelent kockázatot. Ezért elengedhetetlen ismerni, hogy mekkora mennyiségű gőz képes képződni, amely potenciálisan veszélyes lehet. A folyadékokból történő gőzképződés során például víz esetében megközelítőleg 1600-szoros térfogatnövekedés figyelhető meg atmoszférikus nyomáson. A reális gázok térfogatnövekedésének egyik jó megközelítése a Van der Waals-egyenlet átrendezéséből származtatható:

$$\left(p_g + a \frac{n^2}{V_g^2}\right) \cdot (V_g - n \cdot b) - n \cdot R \cdot T_g = 0. \quad (2.2.)$$

Ez az összefüggés nagyon hasonló az ideális gázállapot-egyenlethez, azonban a Van der Waals-állandókkal [32] jobban leírható a reális gázok állapota. A megoldása numerikus módszerekkel, például a Newton–Raphson-eljárással történhet. A 2.2. egyenlet esetében célszerű egységnyi dimenzióval számolni, például 1 literrel, 1 gallonnal vagy 1 pinttel az angolszász (imperiál) mértékegységrendszer szerint. Így a képződő gőzmennyiség hányadosát véve meghatározható a térfogatnövekedési arány. Fontos megjegyezni, hogy adott gyúlékony közeg esetén a mennyiséget az anyag sűrűségével is meg kell szorozni.

$$\gamma_{exp} = \frac{V}{V_{foly}}. \quad (2.3.)$$

A cseppfolyósított gázok esetében Burke [33] a térfogatnövekedési arányt vizsgálta, Houghton és Bennett [34] pedig egyes cseppfolyósított, robbanásveszélyes gázok esetében összefoglalták a gázfázissá való átalakulás során fellépő veszélyeket.

2.3.4. RELATÍV SŰRŰSÉG

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 [35] 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.

Amennyiben a gáz vagy a gőz nehezebb a levegőnél (relatív sűrűség > 1), akkor lefelé terjed, és az alacsonyabban fekvő területeken – például aknában vagy mélyedésekben – gyűlik össze. Ilyenek például a propán és a bután gázok.

2.4. ROBBANÁSVÉDELEMHEZ KAPCSOLÓDÓ JOGSZABÁLYI ÉS SZABVÁNYI HÁTTÉR ÁTTEKINTÉSE

A robbanásvédelem célja a haváriák elkerülése és megelőzése, amelyet alaposan és részletesen kidolgozott jogszabályi előírásokkal kívánnak elérni. Magyarország 2004. május 1-je óta tagja az Európai Uniónak, így a jogszabályi harmonizáció következtében az Európai Unión belül az elvárt minimális robbanásvédelmi követelmények minden tagállamban azonosak. Természetesen a tagállamok saját szabványaik és rendeleteik révén szigorúbb követelményeket is meghatározhatnak. A jogharmonizációt az 2212/1998. (IX. 30.) Korm. határozat 6. pontja már előírta, miszerint 2001. december 31-ig elő kell készíteni a programot [36]. Ezt követően megkezdődött a különböző területekhez kapcsolódó jogszabályok és rendeletek átültetése, jogharmonizációja.

2.4.1. VONATKOZÓ JOGSZABÁLYOK

2.4.1.1. 3/2003. (III. 11.) FMM-ESzCsM EGYÜTTES RENDELET

A munkavédelemről szóló 1993. évi XCIII. törvény rögzíti, hogy a munkáltató felelős az egészséget nem veszélyeztető és biztonságos munkavégzés követelményeinek megvalósításáért [37]. A törvényi felhatalmazás alapján került kiadásra a potenciálisan robbanásveszélyes környezetben levő munkahelyek minimális munkavédelmi követelményeiről szóló 3/2003. (III. 11.) FMM-ESzCsM együttes rendelet [38]. Ez a rendelet a robbanásveszélyes légkör kockázatának kitett munkavállalók biztonságának és egészségvédelmének javítására vonatkozó minimumkövetelményeket tartalmazza, összhangban az Európai Parlament és a Tanács 1999/92/EK (ATEX-137 és ATEX-153) irányelvével. Az irányelvhez tartozik egy nem kötelező érvényű útmutató is [39].

2.4.1.2. 35/2016. (IX. 27.) NGM RENDELET

Mindazokon a területeken, ahol robbanóképes légtér kialakulhat, a készülékeket és a védelmi rendszereket a 2014/34/EU irányelv (ATEX-114) hazai átültetését jelentő jogszabály szerint kell alkalmazni. Ez a potenciálisan robbanásveszélyes környezetben történő alkalmazásra szánt berendezések és védelmi rendszerek vizsgálatáról és tanúsításáról szóló 35/2016. (IX. 27.) NGM rendelet [40] amely meghatározza a forgalomba hozatal és a célirányos kiválasztás feltételeit. A 35/2016. (IX. 27.) NGM rendelet előtt a 8/2002. (II. 16.) GM rendelet [41] volt érvényben, amely a korábbi 1994/9/EK (ATEX 95) irányelvvel állt összhangban. A 2014/34/EU irányelv ezt váltotta fel, korszerűsítve a szabályozást. Mindkét irányelv, valamint jogszabály egyaránt nevesíti a villamos és nem villamos gyártmányokat, mint potenciális gyújtóforrásokat.

2.4.1.3. 54/2014. (XII. 5.) BM RENDELET

A tűz elleni védekezésről, a műszaki mentésről és a tűzoltóságról szóló 1996. évi XXXI. törvény [42] a gazdálkodó tevékenységet folytató magánszemélyeknek, jogi személyeknek, valamint jogi személyiséggel nem rendelkező szervezeteknek gondoskodniuk kell a jogszabályokban meghatározott tűzvédelmi követelmények betartásáról. Ez a kötelezettség a létesítmények, építmények, technológiai rendszerek megvalósításával, üzemeltetésével és fejlesztésével összhangban értendő, továbbá ki kell terjednie a tevékenységükkel kapcsolatos veszélyhelyzetek megelőzésének és elhárításának feltételeire is. E törvény értelmében az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról szóló 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet [43] rögzíti épületek és építmények – így a potenciálisan robbanásveszélyes épített munkakörnyezetek – létesítési és használati tűzvédelmi követelményeit, valamint az elérendő biztonsági szintet. E követelmények szerepe az elmúlt évek módosításai során fokozatosan erősödött.

A rendelet IV. fejezetének 9. §-a alapján az anyagok három fő tűzveszélyességi osztályba sorolják, fizikai-kémiai tulajdonságaik és technológiai felhasználásuk szerint. Ezek a következők: „Fokozottan tűz- vagy robbanásveszélyes”, „Mérsékeltén tűzveszélyes” és „Nem tűzveszélyes”. A „Fokozottan tűz- vagy robbanásveszélyes” kategóriába tartozó anyagok esetében már a robbanás kockázata normál üzemi körülmény között fennállhat, ezért ezek kiemelt figyelmet igényelnek robbanásvédelmi szempontból.

2.4.2. SZABVÁNYOK ÉS IRÁNYELVEK

A robbanásveszélyes térség típusának és kiterjedésének meghatározásához hazai rendeletek és szabványok nyújtanak útmutatást. Ennek megfelelően minden egyes ipari területnek és alkalmazásnak lehetnek saját, specifikus szabványai és előírásai, ezért az adott iparágra és alkalmazásra vonatkozó konkrét követelmények esetében a megfelelő szabványokat kell figyelembe venni. A 3/2003. (III. 11.) FMM-ESzCsM együttes rendelet, valamint a robbanásveszélyes térségek azonosításának helyes módszertana szerint a robbanásveszélyes térségeket szükséges azonosítani és azokat zónákba sorolni. Tehát a „térségek besorolása” a helyes szakkifejezés, amelyet a hatályos szabványok is alkalmaznak.

Különbség van a robbanásveszélyes térségek és a potenciálisan robbanásveszélyes térségek között. Utóbbi egy olyan terület vagy térséget jelent, amely vizsgálat tárgyát képezi, és ahol a robbanási kockázat elméleti lehetősége fennáll, de még nem feltétlenül indokolja védelmi intézkedések bevezetését. Ezzel szemben a robbanásveszélyes térség már ténylegesen besorolt terület, ahol a robbanási kockázat valós, vagy rendszeresen előfordul, ezért kockázati besorolást kap, azaz zónába sorolják.

A technológiához illeszkedő jogszabály kiválasztása alapvetően fontos a megfelelő térségbesorolás elvégzéséhez. A 2.1., 2.2. és 2.3. táblázatokban hazai viszonylatokban alkalmazható rendeleteket, jogszabályokat, gyakran használt szabványokat és tűzvédelmi irányelvet tüntetnek fel. A mérnöki gyakorlatban legismertebb és leggyakrabban alkalmazott szabvány, különböző technológia egységek esetében, az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 [17], melyet vizsgállok, és tézisekként mutatom be az abban szereplő, nem teljes körűtekintéssel megfogalmazott megközelítéseket és összefüggéseket. A nemzeti szabványosításról szóló 1995. évi XXVIII. törvény alapján a nemzeti szabvány alkalmazása önkéntes [44]. Ugyanakkor fontos kiemelni, hogy a munkavédelemről szóló 1993. évi XCIII. törvény értelmében munkavédelemre vonatkozó szabálynak minősül az a nemzeti szabvány, amely teljes egészében magyar nyelven és munkavédelmi tartalommal készült, a szabványosításról szóló törvény figyelembevételével.

Azonosító	Témakör
3/2020. (I.13.) ITM rendelet	„a csatlakozóvezetékekre, a felhasználói berendezésekre, a telephelyi vezetékekre, az olajfogyasztó technológiai rendszerekre és a gáztárolókra vonatkozó műszaki biztonsági előírásokról és a műszaki-biztonsági szempontból jelentős munkakörök betöltéséhez szükséges szakmai képzésről és gyakorlatról, valamint az ilyen munkakörben foglalkoztatottak időszakos továbbképzésével kapcsolatos szabályokról szóló 16/2018. (IX. 11.) ITM rendelet módosításáról”
3/2009. (II.4.) ÖM rendelet	„a megújuló energiaforrásokat - biogázt, bioetanolt, biodízelt - hasznosító létesítmények tűzvédelmének műszaki követelményeiről”
17/2022. (I. 28.) SZTFH rendelet	„a fogyasztóknál elhelyezett cseppfolyós propán-butángáz tartályok biztonsági követelményeiről és a Cseppfolyós Propán-butángáz Tartályok Biztonsági Szabályzatáról”

2.1. táblázat: Robbanásveszélyes térségek meghatározására használatos jelentősebb rendeletek (szerző szerkesztése)

Hivatkozási szám	Cím
MSZ EN IEC 60079-10-1: 2021	Robbanóképes közegek. 10-1: rész: Térségbesorolás. Robbanóképes gázközegek
MSZ EN IEC 62485-2: 2018	Akkumulátorok és akkumulátortelepek biztonsági előírásai. 2. rész: Helyhez kötött akkumulátorok
MSZ EN 62485 3:2015	Akkumulátorok és akkumulátortelepek biztonsági előírásai. 3. rész: Vontatási akkumulátorok
MSZ 15633-1:1992	Éghető folyadékok és olvadékok tároló- és kiszolgálólétesítményeinek, -berendezéseinek tűzvédelmi előírásai. Általános követelmények
MSZ 15633-2:1992	Éghető folyadékok és olvadékok tároló- és kiszolgálólétesítményeinek, -berendezéseinek tűzvédelmi előírásai. Tárolási módok és eszközök
MSZ 15633-3:1992	Éghető folyadékok és olvadékok tároló- és kiszolgálólétesítményeinek, -berendezéseinek tűzvédelmi előírásai. Lefejtő- és töltőállomások
MSZ 15633-4:1992	Éghető folyadékok és olvadékok tároló- és kiszolgálólétesítményeinek, -berendezéseinek tűzvédelmi előírásai.
MSZ 9910-2:1993	Föld feletti, álló, hengeres acéltartályok éghető folyadékok és olvadékok tárolására. Szerelvényezési, biztonságtechnikai és környezetvédelmi előírások
MSZ 9909-3:1998 (visszavont)	Fekvő, hengeres acéltartályok éghető folyadékok és olvadékok tárolására. Szerelvények, tartozékok, elhelyezés és telepítés
MSZ 6292:2009	Gázpalackok szállítása, tárolása és kezelése
MSZ 9943:2009	Üzemanyagtöltő állomás előírásai
MSZ EN 1539:2016	Száritók és kemencék, amelyekben éghető anyagok szabadulnak fel. Biztonsági követelmények
MSZ EN 16985:2019	Szórófülkék szerves bevonóanyagokhoz. Biztonsági követelmények

2.2. táblázat: Robbanásveszélyes térségek meghatározására használatos jelentősebb harmonizált és nemzeti szabványok (szerző szerkesztése)

Azonosító	Témakör
TvMI 13.5:2025.02.01.	Robbanás elleni védelem

2.3. táblázat: Robbanásveszélyes térségek meghatározására használatos Tűzvédelmi műszaki irányelv (szerző szerkesztése)

A hazai és uniós szabványokon kívül léteznek további ágazati szabványok is, amelyek a robbanásveszélyes térségek osztályozására és meghatározására szolgálnak. Ezek közé tartozik az NFPA szabályozási környezet, amely tűz- és robbanásvédelem, valamint egyéb kockázatok csökkentése terén nyújt iránymutatást számos szabvány formájában. Ezeket a szabványokat folyamatosan aktualizálják, illetve újak is jelennek meg. A robbanásvédelem szempontjából különösen fontos az NFPA 497:2024 [45] szabvány, amely alapul szolgál a követelmények meghatározásához. Hasonlóan az 54/2014. (XII. 5.) BM rendelethez, az NFPA 497:2024 szabvány is különböző osztályokba sorolja a gyúlékony folyadékokat a lobbanáspontjuk és/vagy a forráspontjuk függvényében. A szabvány tűzveszélyes folyadékok tárolására és technológiai felhasználására egyaránt alkalmazható.

Az NFPA 497:2024 szabvány előírja, hogy az I. osztályba tartozó folyadékok gőzei környezeti hőmérsékleten robbanásveszélyes közeget képezhetnek. A II. osztályba sorolt folyadékok gőzei ugyanakkor várhatóan nem hoznak létre robbanásveszélyes közeget környezeti hőmérsékleten, kivéve, ha lobbanáspontjuk felett kezelik vagy tárolják őket. A szabvány hangsúlyozza továbbá, hogy a gőzök nem terjedhetnek messzire, mivel a környezeti levegővel érintkezve lehűlnek és kondenzálódnak. Ennek megfelelően az ilyen anyagokat robbanásvédelmi szempontból akkor kell figyelembe venni, ha kezelési vagy tárolási hőmérsékletük meghaladja a lobbanáspontjukat. A további osztályok esetében a

folyadékok gőzei környezeti hőmérsékleten nem képeznek gyúlékony keveréket a levegővel, hacsak nem melegítik őket lobbanáspontjuk fölé.

Az Egyesült Királyságban a Health and Safety Executive szervezet foglalkozik a robbanás megelőzéssel. Ennek keretében, robbanásveszélyes technológiák esetén, alkalmazható a HSG140 – Safe Use and Handling of Flammable Liquids című útmutatás [46], amely a gyúlékony folyadékok osztályozását tartalmazza. Az útmutató négy kategóriát határoz meg a lobbanáspont alapján, azonban nem tesz különbséget a nyílt- vagy zárttéri lobbanáspont között. A kategóriák a következők: 1. kategória, 2. kategória, 3. kategória és éghető folyadék.

Az útmutató szerint az 1. és 2. kategóriába tartozó gyúlékony folyadékok kezelése esetén fennáll a tűz- és robbanásveszély, ezért védelmi intézkedések alkalmazása szükséges. A 3. kategóriába tartozó gyúlékony folyadékoknál, amelyeket normál környezeti feltételek mellett vagy olyan üzemi körülmények között használnak, ahol a hőmérséklet nem éri el a lobbanáspontot, nem feltétlenül szükséges az összes védelmi intézkedés alkalmazása, amelyet az útmutató előír (például, hogy ne érje el a veszélyes hőmérsékletet, alkalmazzanak úgynevezett „hidegvágást”, ami nem jár jelentős hőképzéssel). Az „éghető folyadék” kategória nem tartalmaz konkrét részletezést, csupán azt írja elő, hogy meg kell akadályozni a 60°C fölé való melegedést. Amennyiben ez nem biztosítható, robbanásvédelmi intézkedések szükségesek.

2.4.3. ROBBANÁSVESZÉLYES ZÓNÁK TÍPUSAI, ÁBRÁZOLÁSUK SZIMBÓLUMAI, KOCKÁZATI MEGKÖZELÍTÉSÜK

2.4.3.1. ROBBANÁSVESZÉLYES ZÓNÁK TÍPUSAI

A robbanásveszélyes zónáknak két nagy csoportja és ezen belül három-három típusa van, attól függően, hogy milyen gyakran és mennyi ideig van jelen a robbanásveszélyes környezet.

Gázok és gőzök esetén:

Zóna-0: Folyamatos vagy hosszú ideig fennálló robbanásveszélyes gázok, gőzök és ködök jelenléte, ahol levegővel alkotott keverékük robbanásveszélyes környezetet képez.

Zóna-1: Várhatóan, időnként előforduló robbanásveszélyes gázok, gőzök és ködök normál működés közben, ahol levegővel alkotott keverékük robbanásveszélyes környezetet képez.

Zóna-2: Ritkán és rövid ideig előforduló robbanásveszélyes gázok, gőzök és ködök normál működés közben, ahol levegővel alkotott keverékük robbanásveszélyes környezetet képez.

Porok esetén:

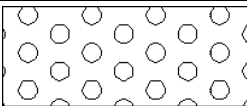
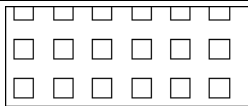
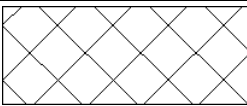
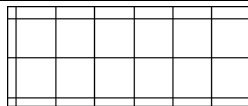
Zóna-20: Folyamatos vagy hosszú ideig fennálló robbanásveszélyes porok és szálal anyagok jelenléte, ahol levegővel alkotott keverékük robbanásveszélyes környezetet képez.

Zóna-21: Várhatóan, időnként előforduló robbanásveszélyes porok és szálal anyagok normál működés közben, ahol levegővel alkotott keverékük robbanásveszélyes környezetet képez.

Zóna-22: Ritkán és rövid ideig előforduló robbanásveszélyes porok és szálal anyagok normál működés közben, ahol levegővel alkotott keverékük robbanásveszélyes környezetet képez.

2.4.3.2. ROBBANÁSVESZÉLYES ZÓNÁK ÁBRÁZOLÁSAINAK SZIMBÓLUMAI

A robbanásveszélyes zónák ábrázolása jellemzően az adott terület alaprajzán történik, különböző színek és jelölések alkalmazásával, megkülönböztetve a zónákat. Az MSZ EN EIC 60079-10-2:2021 és MSZ EN 60079-10-2:2015 szabványok [47] a 2.4. táblázatban bemutatott zónák szimbólumait javasolja, amelyeket szinte minden esetben egységesen alkalmaznak az ipari gyakorlatban.

	MSZ EN 60079-10-1:2021 – Gázok, gőzök	MSZ EN 60079-10-2:2015 – Porok
Zóna-0/20		
Zóna-1/21		
Zóna-2/22		

2.4. táblázat: Zónák javasolt, preferált szimbólumai (szerző szerkesztése)

Lehetőség van 2D (kétdimenziós) és 3D (háromdimenziós) ábrázolási módok alkalmazására a robbanásveszélyes zónák megjelenítésére. A 2D ábrázolás egy jól bevált, széles körben elfogadott módszer, ezzel szemben a 3D ábrázolás egy újabb, modern megközelítést képvisel. A kettő közötti különbség az, hogy mennyire részletes és mennyire térbeli információt adnak a robbanásveszélyes területekről. Mindkét típusnak megvannak a saját előnyei és alkalmazási területei. A 2D ábrázolás síkrajzok, tervrajzok és térképek formájában jeleníti meg a veszélyes térségeket. Jellemzően a vízszintes és függőleges dimenziókban határozza meg a robbanásveszélyes zónák elhelyezkedését, határait és az ezekhez kapcsolódó kiegészítő információkat [48]. A 3D ábrázolás a térbeli modellezés révén részletesebben mutatja be a robbanásveszélyes területek topográfiáját, lehetővé téve azok magassági dimenzióban történő megjelenítését is [49, 50]. A 3D ábrázolás részletgazdagsága lehetővé teszi a valósághűbb ábrázolást, és segíti a területen lévő objektumok és felszerelések térbeli kapcsolatainak megértését. A szabályozási területen és szabványokban javasolt jelöléstechnika azonban nem alkalmazható a 3D ábrázolási során, mivel ott a színek szerinti megkülönböztetés lehetséges a robbanásveszélyes térségek, zónák megjelenítésére, továbbá amennyiben a 3D ábrázolással készülnek el a zónák rajzi, véleményem szerint szükséges figyelni a nagyon eltérő színek használatára mivel szintévesztés okán problémákat okozhat. Javasolom ezen ábrázolási technika során a színek és hozzájuk kapcsolódó zónák egyértelmű definiálást a dokumentációkban. A 2D ábrázolási technikát jelenleg kielégítőnek vélem a tervezők, üzemeltetők és más műszaki szakemberek számára mert könnyen elkészíthető, de úgy gondolom, hogy a 3D ábrázolás a robbanásvédelem területén várhatóan teret fog nyerni magának a szoftverek fejlődésével mivel informatív, könnyen érthető.

2.4.3.3. ROBBANÁSVESZÉLYES ZÓNÁK KOCKÁZATI MEGKÖZELÍTÉSEI

A kockázat alapú megközelítés a robbanásveszélyes zónák meghatározásában azt jelenti, hogy a zónák besorolása az adott területre jellemző veszélyek, a veszélyes anyagok tulajdonságai, a folyamatok és a környezeti tényezők alapján történik. A megközelítés folyamata – vagyis a zónához kapcsolódó valószínűségi alapon történő besorolás – először a The Institute of Petroleum, A Risk-Based Approach To Hazardous Area Classification [51] útmutatóban jelent meg 1998-ban. Ez részletesen ismerteti,

milyen valószínűségeket érdemes figyelembe venni a robbanásveszélyes zónák időtartamára, az egyes gyújtóforrások kockázatára, valamint az ott tartózkodó személyek jelenlétére vonatkozóan – mindezt matematikai megközelítéssel alátámasztva. Jie Geng [52] doktori kutatásaiban szintén vizsgálta a valószínűségi megközelítés lehetőségeit különböző technológiák esetében, többféle kockázátértékelési módszertan alapján, azok robbanásveszélyes környezetekre való alkalmazhatóságát. Az értekezésemben szerepelő 2.5. táblázat – amely részben a CEI 31-35 (2012) olasz szabványban [23] is megtalálható – éves szinten határozza meg a zónák lehetséges fennállásának időtartamát a valószínűségek alapján.

	Robbanásveszélyes környezet valószínűsége 1 év alatt	Időtartam éves színtje [óra]
Zóna-0/20	$P > 10^{-1}$	$t > 1000$
Zóna-1/21	$10^{-1} > P > 10^{-3}$	$10 < t < 1000$
Zóna-2/22	$10^{-3} > P > 10^{-5}$	$0,1 < t < 10$

2.5. táblázat: A robbanásveszélyes légkörök valószínűsége és időtartama [52]

Általánosságban a robbanásvédelemmel foglalkozó szakemberek ezen időtartamokat szokták említeni, kiegészítve a definíciót számokkal. A Zóna-2 alsó időtartamhatárát – 0,1 óra – ugyanakkor nem igazán célszerű említeni, hiszen egy robbanás bekövetkezéséhez már egy pillanatnyi állapot is elegendő lehet. Jogszába vagy szabvány ezeket az időtartamokat ilyen konkrét számokkal nem határozza meg – kivételt képez ez alól a CEI 31-35 (2012) szabvány [23], ahol ez megjelenik. Elődjei között a CEI EN 60079-10 (CEI 31-30, 1996) [53] még nem tartalmazza ezeket az adatokat, de a CEI 31-35 (1999) [54] kiadás már tartalmazza, mivel a fejezet elején már említett 1998-as A Risk-Based Approach To Hazardous Area Classification volt az, amely először rendelte hozzá a zónákhoz a 10–1000 órás időtartamokat, valószínűségi értékekkel összevetve. McMillan könyve [11] amely az olasz és IEC szabványok kidolgozásának alapjául is szolgált, sem tartalmaz konkrét időadatokat a zónákhoz, csupán annyit említ, hogy a gáz-, gőz- és ködkibocsátással kapcsolatban elért statisztikai biztonsági szint elemzésére tett tipikus kísérlet az 1971-es Institution of Electrical Engineers konferencián W.A. Hicks és K.J. Brown által készített tanulmány volt, amely a gyulladás kockázatát 10^{-5} és 10^{-14} között határozta meg. Érdekességgé megjegyzendő, hogy ha a 10^{-1} valószínűséggel szorozzuk az év teljes óramennyiségét (8760 óra), akkor csak 876 óra jön ki, nem pedig 1000 óra.

2.4.3.4. ROBBANÁSI KOCKÁZAT CSÖKKENTÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

A robbanási kockázat csökkentése érdekében különböző védelmi intézkedéseket lehet alkalmazni, amelyeket az elsődleges védelmi intézkedéseket jelentik. Ezek az intézkedések különböző szinteken és módokon járulnak hozzá a robbanás megelőzéséhez – a cél nem maga a robbanás megakadályozása, hanem annak feltételeinek kialakulása elleni védelem. Az elsődleges védelmi intézkedések lényege tehát az, hogy eleve ne jöjjön létre robbanásveszélyes állapot.

Ehhez a legfontosabb, hogy az éghető anyagok – legyenek azok gázok, gőzök vagy ködök – ne tudjanak szivárogni a technológiai rendszerből, megfelelő tömítettségüknek köszönhetően. Ha mégis történik szivárgás, akkor se alakulhasson ki robbanásveszélyes koncentráció. Ezt többféleképpen lehet elérni: például a veszélyes anyagok csökkentésével vagy teljes kizárásával, inertgázok alkalmazásával az oxigénkoncentráció csökkentése érdekében, illetve hatékony szellőztető rendszerek telepítésével, amelyek segítik a veszélyes gázok és gőzök hígulását. Az ipari szektorban a hatékony szellőzést általában 10-szeres vagy akár 25-szörös légcsere jellemzi óránként, a technológia jellegétől függően.

Jespen T [55] megfogalmazása szerint, ha egy helyiségben biztosított a 12 légcseré/óra, az már elegendő lehet ahhoz, hogy az adott területet Zóna-2-be sorolják be – természetesen a kibocsátó források számától függően. Nagyobb épületek egyes részei ilyen esetekben akár nem is minősülnek robbanásveszélyesnek. Ennél magasabb légcseré arány esetén pedig még inkább valószínű, hogy nem alakul ki robbanásveszélyes környezet.

2.5. 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 [56-61]:

- 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 [62].

2.5.1. ÉGHETŐ FOLYADÉK EGYFÁZISÚ KIBOCSÁTÁSA

Az éghető folyadék egyfázisú kibocsátása egy technológiai berendezés belső teréből olyan jelenség, amely során az éghető folyadék egyetlen fázisban, folyékony formában áramlik ki a berendezésből. Tehát, ha a berendezésben lévő éghető folyadék szivárgás vagy valamilyen nyitott útvonal révén kijut a környezetbe, az egyetlen fázisban, azaz folyékony állapotban történik, és nem történik fázisváltozás (például gőzzé alakulás). A folyamat matematikai modellezése a folyadékok dinamikájának és a nyomásviszonyoknak a figyelembevételével történik, egyéb befolyásoló paraméterek függvényében. A jelentősebb matematikai modelleket a 2.6. táblázat foglalja össze. Minden egyes összefüggés végeredménye tömegáram dimenziót jelent, mivel az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabvány [17] szerint a folyadékok, gázok és gőzök kibocsátásánál ez az egyik kulcsparaméter a zónák meghatározása során. Emellett a különféle szimulációs szoftverek esetében is ez a bemeneti adat szükséges. Az ilyen jellegű szivárgások viszonylag egyszerűbben modellezhetők és megjósolhatók, mivel csak egyetlen fázis van jelen. Ugyanakkor fontos, hogy a kiszivárgott folyadék felszínéről – a közeg fizikai-kémiai tulajdonságaitól és a környezeti feltételektől függően – párolgás is elindulhat. Ez utóbbit a 2.5.2.1. fejezet tárgyalja, ahol a kétfázisú kibocsátás alacsonyabb hőmérsékletkörülményeit vizsgálom. Tehát egy hűtött közeg, amely folyadék fázisként kerül ki a környezetbe, képes a lobbanáspontja fölé melegedni, és ezáltal robbanóképes légteret képezni. Az ilyen terjedési folyamatok matematikai és numerikus szimulációs modellezése már jóval összetettebb feladat.

Az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabvány azt feltételezi, hogy csöpögésből nem alakul ki robbanásveszélyes környezet, mivel alapvetően túl kis résméreteket feltételez. Ezzel szemben kiömlés esetén már kialakulhat robbanásveszélyes zóna, amelyet külön tócsa/medence párolgás egyenletével kell számolni [63, 64].

Szakirodalmi forrás	Összefüggés
Bernoulli-egyenlet [65]	$P_{bel} + \frac{1}{2} \cdot \rho_{foly} \cdot v^2 + \rho_{foly} \cdot g \cdot h = konstans \quad (2.4.)$
	$v = \sqrt{\frac{2(P_{bel} - P_{atm})}{\rho_{foly}}} \quad (2.5.)$
	$W_{foly} = v \cdot S \cdot C_d \quad (2.6.)$
Buckingham (Orifice plate) [66]	$W_{foly} = C_d \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{foly} \cdot (P_{bel} - P_{atm})} \quad (2.7.)$
Kukkonen [67]	$W_{foly} = \rho_{foly} \cdot C_d \cdot S \cdot \sqrt{2 \left(\frac{P_{bel} - P_{atm}}{\rho_{foly}} \right) + g \cdot h_{foly}} \quad (2.8.)$

2.6. táblázat: Alkalmazható matematikai modellek egyfázisú folyadék kibocsátás számítására (szerző szerkesztése)

A különböző modellekben sok helyen szerepel a kibocsátási együttható, amely fontos paraméter a folyadékok áramlásának leírásában, különösen akkor, ha az áramlás szűkített keresztmetszeten – például résen, szelepen vagy fűvókán – keresztül történik. Ez a dimenzió nélküli szám azt írja le, hogy a valós áramlás milyen mértékben tér el az ideálistól. Értékét kísérleti úton határozzák meg, mivel az áramlási viselkedést számos tényező befolyásolja, például az áramlási sebesség, a nyomáskülönbség, a folyadék tulajdonságai és a geometriai tényezők. A kibocsátási együttható értéke általában 0,6 és 1,0 közé esik.

Ha C_d értéke 1, az azt jelzi, hogy az áramlás közel ideális, míg a kisebb értékek nagyobb veszteségekre utalnak, amelyre az alábbiak lehetnek [68]:

- éles szélű nyílásoknál $C_d = 0,62$,
- egyenes nyílásoknál $C_d = 0,82$,
- lekerekített nyílásoknál $C_d = 0,97$.

A CPR 14E Revision history of the ‘Yellow Book’ szakirodalomban [69] a kibocsátási együttható gyakorlatilag két tényezőtől függ: a sűrűdástől ($C_{sűr}$) és az összehúzódtól ($C_{össz}$):

$$C_d = C_{sűr} \cdot C_{össz}. \quad (2.9.)$$

Ez az úgynevezett összehúzódtól abból adódik, hogy a folyadék közeg tehetetlensége miatt, a sugárirányú gyorsulás következtében, kisebb lesz, mint a rés mérete, ahonnan a kibocsátás történik. Az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabvány előírása szerint kiszellőzők esetén a kibocsátási együtthatónak legalább 0,95-0,99 értékűnek kell lennie, míg szabálytalan rések esetében ez az érték 0,5-0,75.

A Bernoulli-egyenlet és Buckingham-féle tömegáramlási egyenlet gyakorlatilag szinte ugyanaz, viszont előbbi ki kell egészíteni a nyílás keresztmetszetére és a kibocsátási együtthatóra vonatkozó tagokkal, hogy alkalmazható legyen folyadékszivárgások számítására. A Buckingham-féle összefüggést mind az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabvány, mind az McMillan [70] is alkalmazza. A Kukkonen-modell olyan esetekben használható, amikor egy adott folyadékszint alatt következik be szivárgás, például egy tartályban. Ez az összefüggés időfüggetlen, mivel a legnagyobb szivárgási értéket veszi figyelembe – ez a legkritikusabb szivárgási állapot, amelyre a méretezésnek és a tervezésnek irányulnia kell.

2.5.2. ÉGHETŐ FOLYADÉK KÉTFÁZISÚ KIBOCSÁTÁSA

Az éghető folyadék kétfázisú kibocsátása egy technológiai berendezés belső teréből olyan jelenség, amely során az éghető folyadék gőz (vagy gáz) és folyadék fázisban egyaránt jelen van a kiáramlás során. Ez a jelenség gyakran fordul elő olyan körülmények között, amikor a folyadék hirtelen nyomáscsökkenésnek van kitéve, ami miatt a folyadék egy része gőzzé alakul [71].

2.5.2.1. KÖRNYEZETI HŐMÉRSÉKLETEN TÖRTÉNŐ KIBOCSÁTÁS

Adiabatikus állapotok megszűnésével, külső környezetbe történő kibocsátás során az éghető folyadék kémiai-fizikai tulajdonságai, valamint a technológiai üzemi paraméterei függvényében alacsony hőmérsékleten is képes gőz-folyadék fázist alkotni. Magasabb, forrásponthoz közeli vagy azt meghaladó hőmérsékleten ez a jelenség még intenzívebb, de bizonyos mértékű párolgás már alacsonyabb hőmérsékleten is jellemző. Az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabvány [17] a térségbesorolást végző szakemberre bízta, hogy mekkora párolgási aránnyal számol százalékosan. A tölcsár és medencék kialakulását és az abból származó párolgást a 2.5.2.3. fejezetben ismertetem.

Lehetséges megoldás a gőz tenziója, más néven gőznyomás vagy párolgási nyomás, amelyet a folyadék gőzének molekulái fejtenek ki egyensúlyi állapotban a folyadékfelszín felett. Ez a nyomás a hőmérséklet függvényében változik. Az alapvető összefüggéseket a 2.7. táblázat tartalmazza a tenzió hőmérséklet szerinti meghatározásához. A 2.3.3. fejezetre visszautalva, célszerű a párolgás mértékét az olvadás- és forráspont közti tartományban vizsgálni, ahol az olvadáspont 0%-ot jelent, de felett a hőmérséklettől függően akár 5%, 10% vagy 30% is lehet. Ez az érték arányban állhat a gőznyomás és a telítési nyomás hányadosával, azonban a tényleges robbanásveszély általában a lobbanáspont fölötti

tartományban válik jelentőssé. Nyilvánvaló, hogy minél illékonyabb egy anyag, alacsonyabb hőmérsékleten annál közelebb lehet a telítési nyomáshoz [72].

Szakirodalmi forrás	Összefüggés
Antoine-egyenlet [73]	$\log_{10} P_g = A - \frac{B}{T_{foly} + C} \quad (2.10.)$
Clausius-Clapeyron egyenlet [74]	$\ln P_g = -\frac{\Delta H_{pár}}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_{foly}}\right) + C_c \quad (2.11.)$
CEI 31-35 (2012) [23]	$P_g = P_{atm} \cdot e^{\frac{c_{ph} \cdot M \cdot (T_{forr} - c_2)^2}{R \cdot Z_b \cdot T_{forr}^2} \left(\frac{1}{(T_{forr} - c_2)} - \frac{1}{(T_{foly} - c_2)} \right)} \quad (2.12.)$ $Z_{forr} = 0,97$ összenyomhatósági tényező folyadék forráspontján. $c_2 = -18 + 0,19 \cdot T_{forr} \quad (2.13.)$

2.7. táblázat: Alkalmazható összefüggések a folyadék tenziójának meghatározására (szerző szerkesztése)

Az Antoine- és a linearizált Clausius-Clapeyron-egyenletek egyszerűbb összefüggések, azonban alkalmazásukhoz ismerni kell az A , B és C tagokat, azaz az Antoine-állandókat, továbbá a párolgáshő és a C_c integrációs konstans értékét, amelyek a folyadék tulajdonságaitól függenek. Ráadásul az Antoine-állandók különböző hőmérsékleti viszonyoknál eltérőek lehetnek, tehát nem tekinthetők teljesen állandónak.

A CEI 31-35 (2012) szabványban [23] szerepeltetett egyenlet komplexebb, de a folyadék közeg tulajdonságai szerint elég a párolgáshő (látens hő), a moláris tömeg, a forráspont, valamint a vizsgált folyadék közeg hőmérsékletének ismerete a gőznyomás meghatározásához. A CEI 31-35 (2012) szabvány is ezt alkalmazza, valamint a keverékek tenzióját sztöchiometriai aránnyal számolja. A párolgás százalékos mértéke pedig közelítőleg meghatározható a telítési nyomás és az atmoszférikus nyomás arányával az alábbi képlet segítségével.

$$X_{pár} = \frac{P_g}{P_{atm}} \cdot 100. \quad (2.14.)$$

Éghető gáz vagy gőz tömegárama:

$$W_g = W_{foly} \cdot X_{pár}. \quad (2.15.)$$

Fontos kiemelni, hogy ez egy közelítő, becsült érték, amelyet McMillan is megfogalmaz, és táblázatos formában közli az arányokat. Ugyanakkor megjegyzi, hogy a tenzióhoz való viszonyítás csupán hozzávetőlegesen helyes, mivel a forráspont alatt ez a légköri nyomás töredéke, így a valósághoz képest ez sokkal alacsonyabb érték lenne. Ez a megközelítés tehát nem ad egzakt eredményt, de a biztonság javára eső, azaz konzervatív irányban torzított becslést jelent.

2.5.2.2. FORRÁSPONTHOZ KÖZELI VAGY FÖLÖTTI HŐMÉRSÉKLETEN TÖRTÉNŐ KIBOCSÁTÁS

Abban az esetben, amikor a gyúlékony folyadék hőmérséklete már eléri vagy meghaladja a forráspontját, és ilyen állapotban jut ki a külső környezetbe, feltételezhető, hogy a kijutó mennyiség közel 100%-ban gőz- vagy gázfázisba alakul át – különösen, ha cseppfolyósított gázzal van szó. Kutatásom során háromféle megközelítést azonosítottam, amelyekkel a gőzzé/gázzá való fázisátalakulás matematikai modell segítségével leírható – ezek a konzervatív becsléstől a várhatóan pontosabb összefüggésekig terjednek. A következő bekezdésekben ezeket ismertetem részletesen.

Térfogatnövekedési arány

A 2.3.3. fejezetben említett térfogatnövekedési arány meghatározásához a szakirodalomi adatok, vagy a 2.2. és 2.3. egyenletek szolgálnak kiindulópontként – feltéve, hogy a gyúlékony közegünk forráspont fölött van, és azt feltételezzük, hogy a kibocsátás során a teljes mennyiség gőz- vagy gázfázissá alakul. Amennyiben szakirodalmi adatot alkalmazunk, szükséges tisztában lenni azzal, hogy a megadott térfogatnövekedési arány milyen alapmennyiségre vonatkozik. Egy liter mennyiség esetén az alábbi összefüggés alkalmazható:

$$Q_g = \frac{W_{foly} \cdot \gamma_{exp}}{\rho_{foly}}. \quad (2.16.)$$

Például benzol esetében, ha a technológiai berendezés belső terében 85°C a hőmérséklet – tehát a folyadék 80 °C-os forráspontja fölött van –, és 0,192 kg/s kibocsátást veszünk alapul a 2.7. egyenlet szerint, a benzol 326,5-szeres térfogatnövekedési aránnyal rendelkezik, akkor az éghető gőzközeg térfogatárama 0,071 m³/s eredményre adódik. Ez a megközelítés kizárólag forráspont fölött alkalmazható.

Tenzio

Amennyiben a gyúlékony folyadék tenziója szerint határozzuk meg az elpárolgást a 2.14. és a 2.15. egyenletek alapján, pontosabb értéket kaphatunk, ha forráspont vagy már az alatti tartományban vagyunk. Forráspont fölötti tartományban a helyzet egyszerűbb, mivel – ismételten a gyúlékony benzol példáját alapul véve – a 0,192 kg/s kibocsátás során, ugyanezen érték marad az elpárolgott gőzmennyiség, mivel 1-gyel szükséges beszorozni. A 2.16. képletet részben átalakítva – amely az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 [17] szabványban is szerepel, az alábbi összefüggés adódik:

$$Q_g = \frac{W_g}{\rho_g}. \quad (2.17.)$$

Ebben az esetben a térfogatáram 0,059 m³/s lesz, amely 0,012 kisebb, mint a térfogatnövekedési arány esetében.

McMillan megközelítés

Amennyiben a gyúlékony folyadék a technológiában jellemző hőmérsékleten kerülne ki a külső környezetbe, szivárgás során normál környezeti körülmények között gőzként vagy gázként viselkedne. Ugyanakkor a berendezés belső terében olyan nyomás uralkodik, amely mellett a közeg folyadékfázisban marad. Ilyen körülmények között kibocsátás során a gyúlékony folyadék egy része elpárolog a felszabaduláskor, viszont párolgáshoz szükséges energia annyira lecsökkenti a maradék hőmérsékletét, hogy a további párolgás csak akkor következik be, ha a környezetből további hő jut a rendszerbe. McMillan [70] megközelítése szerint először is ki kell számítani azt a folyadékmennyiséget, amely a kibocsátás helyén gőzként vagy gázként azonnal elillan.

A fázisok részaránya a gyúlékony folyadék hőkapacitásán alapul, amely a gőzölési folyamat során felhasználható, mielőtt a hőmérséklet a forráspontig csökkenne. Ehhez kapcsolódik a párolgáshő – más néven látens hő –, amely a gőzöléshez szükséges hőt határozza meg, valamint a folyadék forráspontja és tényleges hőmérséklete közötti különbségen, amely szintén a rendelkezésre álló hőmennyiséget határozza meg. Meg kell jegyezni, hogy utóbbi azért fontos, mert hiába csökken

legalább forráspontig vagy az alá a hőmérséklet, további párolgás ugyanúgy feltételezhető a közegből. Első lépésként tehát meg kell határozni, hogy a kibocsátáskor mekkora a közvetlenül elillanó gőz-folyadék arányát:

$$X_{g,el} = \frac{T_{foly} - T_{forr}}{\delta} \cdot c_p. \quad (2.18.)$$

McMillan az említett folytatólagos elpárolgásra a Buckingham-egyenlet kibővített alkalmazását javasolja, a gőz-folyadék keverék sűrűségét és a folyadék telítési gőznyomását - korrekciós tényezővel:

$$W_{kev} = C_d \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_{f-g,kev} \cdot (P_{bel} - P_{g,mt})}, \quad (2.19.)$$

$$W_{g,forr} = W_{kev} \cdot X_{g,el}, \quad (2.20.)$$

$$P_{g,mt} = 0,55 \cdot P_g, \quad (2.21.)$$

$$\rho_{f-g,kev} = \frac{1}{\left(\frac{X_{g,el}}{\rho_g} + \frac{(1-X_{g,el})}{\rho_{foly}} \right)}. \quad (2.22.)$$

A könyvében foglaltak szerint McMillan így számolja ki, hogy a forráspont felett a gyúlékony folyadékból vagy cseppfolyósított gázból mekkora mennyiségű gőz/gáz képes keletkezni, illetve mekkora része marad folyadék fázisban. Ez utóbbira szerinte a talajra jutást követően további párolgással kell számolni – a következő fejezet ezen lehetőségeket tárgyalja majd részletesebben –, ugyanakkor maga a folyadék a forráspont alatti hőmérsékleten is párolog. Robbanásvédelem szempontjából ennek alsó veszélyességi határa a gyúlékony folyadék lobbanáspontjáig tart. Emiatt indokolt lehet a megközelítés kiegészítése a forráspont és lobbanáspont közötti tartományra is:

$$X_{g,lp} = \frac{T_{forr} - T_{lp}}{\delta} \cdot c_p. \quad (2.23.)$$

Mivel a gőz-folyadék keveréknek egy része a 2.19. és 2.20. összefüggések szerint már elillant, viszont a maradék tömegáram lobbanáspontjának értékéig még kezelendő, ezáltal a kettő különbségének a mértékével szükséges tovább számolni.

$$W_g = (W_{kev} - W_{g,forr}) \cdot X_{g,lp}. \quad (2.24.)$$

A feltételezhetően elpárolgott gőz mennyisége tehát az azonnali és a későbbi, folytatólagos párolgás összegéből adódik.

$$W_{g,össz} = (W_{g,forr} + W_g). \quad (2.25.)$$

A Q_g értékét a 2.17. egyenlet alapján ismét meghatározható. Amennyiben az előző két megközelítésnél alkalmazott peremfeltételekkel számolunk, akkor az azonnal elillanó gőzmennyiség értéke 2,19%, ami 0,0042 kg/s tömegáramot jelent gőzformájában. A fennmaradó, még párologható folyékony fázisú benzol tömegárama 0,1878 kg/s, amelyből 39,88% robbanásveszélyes gőz képes képződni – jelen esetben ez 0,074 kg/s. Ez összesen 0,078 kg/s gőztömegáramot jelent, amelynek gőztérfogatóaráma 0,024 m³/s. Ez az érték jelentősen alacsonyabb, mint az előző két esetben kapott eredmények (0,059 és 0,071 m³/s).

A három lehetőség összevetéséből jól látható, hogy a térfogatnövekedési arányon alapuló módszer, illetve a gőznyomás számításán alapuló megközelítés – akár forráspont fölött, akár alatta alkalmazva – konzervatív számításnak tekinthető. A McMillan-féle megközelítés kiegészítve szolgáltatja a legjobb becslést, bár több bemeneti paramétert és komplexebb összefüggéseket kíván. Mindazonáltal fennállhat egy olyan üzemi paramétert tartalmazó technológia, ahol a három módszer közel egyforma eredményt hoz, de ez jellemzően csak nagyon magas hőmérsékleten működő rendszerek esetében igaz. Fontos megemlíteni, hogy McMillan könyvében több helyen hibás számítások vagy hibás visszahivatkozások is előfordulnak. Ezekből arra lehet következtetni, hogy a számértékek vagy képletek rosszul kerülhettek át a kéziratából a kiadványába, mivel hosszú számítások és bonyolult összefüggések esetében könnyen előfordulhatnak aritmetikai hibák vagy a régebbi szakirodalmakban, ahol képletek generációkon át öröklődnek, az apró hibák sokáig fennmaradhatnak. Ezenkívül a szerkesztési ellenőrzésnek a hiányosságai, hogy a tudományos könyv vagy cikk esetében is nem mindig esik át minden képlet független, részletesen lektoráláson, de így is McMillan tudományos megközelítései hiánypótlónak tekintendők a robbanásvédelem tématerületén.

2.5.2.3. TÓCSA ÉS MEDENCE PÁROLGÁS

A tócsa párolgás az a folyamat, amely során egy vékony rétegben, tócsa vagy pocsolya formájában elhelyezkedő folyadékfelszín elpárolog. Ennek mértéke a folyadék molekuláinak hőmérsékletétől, illékonyaságától, viszkozitásától, valamint a környezeti tényezőktől – például szélsébségtől, hőmérséklettől, páratartalomtól – függ. Emellett a talajfelszín hőmérséklete és nedvesítő képessége is jelentős hatással bír: utóbbi, vagyis a folyadék és a felszín közötti kölcsönhatás, nagymértékben befolyásolhatja a párolgás folyamatát [75].

A nedvesítő képességet a kontaktszöggel jellemezhetjük [75]. Ha a kontaktszög kicsi, a folyadék jobban terjed szét a felszínen, ilyen a hidrofíl felület, ami nagyobb párolgási felületet eredményez. A felszín minősége szempontjából különbséget kell tenni porózus és nem porózus felületek között, mivel ezek eltérő módon hatnak a folyadékokra, így befolyásolják párolgásukat [75, 76]. A kavicsok esetében a köztük lévő nagy hézagok, valamint az egyes kavicsok porózus felszíne elősegíti a gyúlékony folyadék gyors elvezetését. Ez csökkenti a felszínen maradó mennyiséget, így a párolgási sebesség is alacsonyabb lesz. Például a homok szemcséi közötti kis rések és a kapilláris hatás (folyamatosan mozgás) miatt a homok gyorsan felszívja a gyúlékony folyadékot. A felszívott folyadék a homokszemcsék közötti résekben marad, ami csökkentheti a közvetlen párolgási felületet, de a kapilláris hatás révén a folyadék folyamatosan utánpótlódik a felszínre, ahol el tud párologni. Ezzel szemben a beton – mint sima, jellemzően nem porózus felület – nem szívja fel a folyadékot, ezért a gyúlékony folyadék hajlamosabb tócsa formájában maradni rajta. Éppen ezért a különféle kármentő rendszereket is gyakran betonból készítik.

A medence párolgás hasonló a tócsa párolgáshoz, de nagyobb térfogatú folyadéktömeggel jár, amely mélyebb és nagyobb felületet is jelent, mint egy tócsa vagy pocsolya. Jó példa erre egy közlekedési baleset következtében kiömlő benzin, amely gyorsan elpárolog, és nagy felületet képezve jelentősen fokozza a tűz- és robbanásveszélyt. Ilyen esetekben a folyadék részben benedvesítheti a talaj felszínét is. Más esetekben, például egy hulladékkezelő medence esetében, a nedvesedés nem releváns tényező, sőt a medence felszíne az időjárási viszonyoktól függetlenül általában állandó hőmérsékletű. A tócsa- és medencepárolgás során alkalmazható releváns matematikai összefüggéseket a 2.8. táblázat tartalmazza.

Szakirodalmi forrás	Összefüggés
MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 [17]	$W_{pár} = \frac{18,3 \cdot 10^{-3} \cdot u_{lég}^{0,78} \cdot A_{foly} \cdot P_g \cdot M^{0,667}}{R \cdot T_{foly}} \quad (2.26.)$
Joaquim Casal [77]	$Q_{foly,hő} = \frac{k_{talaj} \cdot (T_{talaj} - T_{foly})}{\sqrt{\pi \cdot \alpha_{talaj} \cdot t_{kiö}}} \quad (2.27.)$
	$W_{pár} = \frac{Q_{foly,hő} \cdot A_{foly}}{c_{ph}} \quad (2.28.)$
	Alkalmazható, ha folyadék forrásponti hőmérséklete, alacsonyabb a környezeti hőmérsékletnél.
Opschoor [78]	$W_{pár} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot u_{lég}^{0,78} \cdot r_{foly}^{-0,11} \cdot \frac{M \cdot P_{atm}}{R \cdot T_{körny}} \cdot \ln \left(1 + \frac{P_g}{P_{atm} - P_g} \right) \cdot A_{foly} \quad (2.29.)$
	$W_{pár} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot u_{lég}^{0,78} \cdot r_{foly}^{-0,11} \cdot \frac{M \cdot P_{atm}}{R \cdot T_{körny}} \cdot (P_g - P_{g,atm}) \cdot A_{foly} \quad (2.30)$
	A 2.29. egyenlet alkalmazható, ha folyadék forrásponti hőmérséklete, magasabb a környezeti hőmérsékletnél. A 2.30. egyenlet esetében akkor alkalmazható a $P_g < 2 \cdot 10^4$ Pa.
	$W_{pár} = \frac{k \cdot P_g \cdot M}{R \cdot 10^3 \cdot T_{foly}} \quad (2.31.)$
	$k = 0,0048 \cdot u_{lég}^{0,78} \cdot D^{-0,11} \cdot Sc^{-0,67}$ tömegátadási együttható. $Sc = \frac{\nu}{D}$ Schmidt-szám. $D = 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\frac{M_{lev}}{M_{foly}}}$ diffúziós képesség. Vizes oldatok esetében javasolt az alkalmazása.
MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 [17]	$Q_g = \frac{6,15 \cdot 10^{-8} \cdot P_g}{M^{0,333}} \quad (2.32.)$
	Ha legalább 1,0 m ² a folyadék felszín és 0,25 m/s a légáramlás mértéke.
EPA modell [79]	$W_{pár} = \frac{0,284 \cdot u_{lég}^{0,78} \cdot M^{0,667} \cdot P_g \cdot A_{foly}}{R \cdot T_{foly}} \quad (2.33.)$
McMillan [70]	$W_{pár} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot P_{g,atm} \cdot \frac{M}{R_e^{0,2}} \cdot A_{foly} \quad (2.34.)$
Mackay és Matsugu [80]	$W_{pár} = 4,786 \cdot 10^{-3} \cdot u_{lég}^{0,78} \cdot 2 \cdot r_{foly}^{-0,11} \cdot Sc^{-0,67} \cdot \frac{M \cdot P_{atm}}{R \cdot T_{körny}} \cdot A_{foly} \quad (2.35.)$

2.8. táblázat: Alkalmazható összefüggések a folyadékfelszín párolgásának a meghatározására (szerző szerkesztése)

Robbanási kockázat szempontjából a CEI 31-35 (2012) [23] és MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabványok szerint is csöpögésből, ami rövid ideig áll fenn, nem tud olyan mértékű folyadékfelszín kialakulni, amely robbanásveszélyes környezetet hozna létre. Ezzel szemben a hosszabb ideig tartó kiömlés, szivárgás már hordozhat ilyen kockázatot.

Amennyiben kiömlés vagy szivárgás során nem ismert a gyúlékony folyadékfelszín mérete, a 2.36. egyenlettel meghatározható, amely figyelembe veszi a folyadék szivárgás tömegáramát, a lehetséges kiáramlás teljes időtartamát és a talaj porozítására vonatkozó mélységi jellemzőket. Ez az egyenlet a CEI 31-35 (2012) szabványban található meg.

$$A_{foly} = \frac{W_{foly} \cdot t_{kiö}}{h_{mély}}. \quad (2.36.)$$

A CEI 31-35 (2012) szabvány egy alternatív lehetőséget is kínál az ismeretlen felszín meghatározására: a folyadékkibocsátást a szabványban javasolt párolgási képlettel lehet számítani, amely részben megegyezik az Opschoor által megalkotott 2.29. összefüggéssel. A kettő hányadosa, megszorozva egy úgynevezett medence kiterjedési tényezővel, szintén megadja a folyadékfelszín lehetséges kiterjedését. A medence kiterjedési tényező a folyadékkibocsátás és -párolgás arányától függ. Fontos megjegyezni, hogy a CEI 31-35 (2012) szabványban megnevezett általános képlet eltérően veszi figyelembe a légáramlást, valamint a szabványban szereplő ismertető részben és a példa számításban alkalmazott képletek nem teljesen egyeznek meg. Ráadásul a GD mellékletének az SE02 példájának levezetése részben hibás mert a benzín folyadékfelszínének párolgására $1,63 \cdot 10^{-3}$ kg/s értékkel számol, amely valójában az alkalmazott párolgási modell szerint $1,1 \cdot 10^{-3}$ kg/s. Így a feltételezett folyadékfelszín mérete, az abból adódó robbanásveszélyes térség kiterjedés is a szabványi módszertan szerint nagyobb lenne.

Az alábbi egyenletet McMillan [70] javasolja, abban az esetben, ha nem ismert a folyadékfelszín.

$$A_{foly} = 5,65 \cdot 10^2 \cdot S \cdot \sqrt{\rho_{foly} \cdot (P_{bel} - P_{atm})} \cdot R_e^{0,2} \cdot P_{g,atm} \cdot M. \quad (2.37.)$$

Továbbá az ő kutatásai alapján a légmozgás Reynolds-száma alapján, diagramról is leolvasható a feltételezett folyadékfelszín értéke. Példáiban mindkét megközelítést leírja, bár nem minden esetben alkalmazza precízen a matematikai modelleket, de megfigyelhető, hogy nagy értékek adódnak egy esetleg szivárgás okozta folyadékfelszín kiterjedésére.

Egy lehetséges folyadékfelszín viszont végtelenségig nem képes terjedni, mivel a szivárgás forrásának van egy adott, véges űrtartama. Emellett, ha a párolgás sebessége megegyezik a felszabadulás sebességével, akkor a folyadékfelszín elérte a maximális kiterjedését [77]. A már említett porózus tulajdonságok is befolyásolják a folyadékfelszín méretét, annak felületi vastagságát. Mohsen és munkatársai [76], valamint a CEI 31-35 (2012) szabvány is két kategóriát különböztet meg: porózus és nem porózus anyagokat, amelyekhez különböző felületi vastagságokat rendelnek. Ezenkívül fontos megemlíteni, hogy egy teljesen sima, érdesség nélküli felület a gyakorlatban ritkán fordul elő, ezért a felületi egyenetlenségek – mint természetes geometriai korlátok – szintén megállíthatják a folyadék terjedését.

A 2.29., 2.30., valamint Mackay és Matsugu matematikai modelljeinek tagjai nagymértékben megegyeznek, ugyanakkor bizonyos tagok tekintetében eltérések mutatkoznak. A különböző tagok közti eltéréseket Thinauld és munkatársai [80] összefoglalták és elemezték. Az általuk vizsgálat modellek – amelyek közel azonosok Mackay és Matsugu modelljéhez – a Schmidt-számmal bezárólag tömegátadási együtthatóra vonatkoznak. Ez az együttható függ a szélesebségtől, valamint az anyag molekuláris diffúziós képességétől a levegőben. Az ezt követő tagok a folyadékfelszínről a környezeti levegőbe történő tömegátadás hajtóerejére vonatkoznak, amely a folyadék gőznyomásnak köszönhető. A 2.29. egyenletben szereplő további tag – amelyben a természetes logaritmus szerepel – egyes folyadékok erős illékonyosságát képviseli. Ez utóbbi kifejezés azonban elhanyagolhatóvá válik, ha a gőznyomás alacsony [80].

Thinauld és munkatársai kutatásaik során arra a következtésre jutottak, hogy a Mackay és Matsugu matematikai modell jól alkalmazható a gyúlékony folyadékok felszínéről történő párolgás mértékének a meghatározására. Ugyanakkor a folyadékfelszín sugarának értékét jobb közelítéssel is lehet számolni, amely 5–200 méteres tartomány esetén érdekes módon konzervatívabb, viszont 0,3–5 méteres tartománynál a számítási és kísérleti eredményeket összehasonlítva pontosabb érték adódott. Amennyiben nem kör alakú, hanem például téglalap formájú felszínről van szó, akkor a felszínszámítás tényezői módosulnak.

A légsebesség értékét pedig közvetlenül a folyadékfelszínen mérték, ezáltal nem volt szükség a képletben ennek a paraméternek a kitevőként való szerepeltetésére.

Ugyanakkor ez előbb említett, felülvizsgált összefüggésből is hiányzik a talaj vagy akár a napsugárzás által okozott melegedés hatása, amely tovább fokozhatná a párolgás mértékét. Ezeket a tényezőket azonban nehéz beilleszteni a modellbe, mivel pontos értékeik nem ismertek, csak közelítő becslések rendelkeznek hozzájuk.

Úgy gondolom, hogy bár ezek a modellek sok hasznos információt adnak a párolgási folyamatokról, a valóságban ennél sokkal összetettebb helyzettel találkozhatunk. A talaj típusa, az apró egyenetlenségek, a hőmérséklet-ingadozás vagy akár a napsugárzás is befolyásolják a folyadék terjedését és párolgását. Ezeket azonban nagyon nehéz pontosan mérni vagy számításba venni, ezért a modellek inkább közelítést adnak, mintsem teljesen pontos előrejelzést. Véleményem szerint a gyakorlatban mindig érdemes biztonsági tartalékokkal dolgozni, és ahol lehet, a számításokat kísérleti eredményekkel is alátámasztani. Így lehet a leghitelesebben felmérni a tényleges kockázatokat.

2.5.3. ÉGHETŐ GÁZOK ÉS GŐZÖK KIBOCSÁTÁSA

Az éghető gázok és gőzök kiáramlása egy bonyolult fizikai és kémiai folyamat, amely több tényezőtől függ. Ezek közé tartoznak a technológiai és üzemeltetési jellemzők, valamint a külső környezeti feltételek is. Éppen ezért a robbanásveszélyes anyagok kiáramlásának tekintetében különösen fontos a robbanásvédelem optimalizálása.

Az alkalmazható és jellemző matematikai modellek, amelyekkel a kibocsátás mértéke meghatározható – akár kritikus alatti (szubszonikus), akár kritikus feletti (szonikus) áramlásról van szó – valójában nem egyetlen személyhez köthető, hanem a folyadék- és gázdinamika fejlődésének eredménye, amelyhez számos tudós és mérnök munkája járult hozzá. Az alapvető összefüggéseket a 2.9. táblázat foglalja össze; ezek alapját az ideális gáz törvénye, a Bernoulli-egyenlet, valamint a Navier–Stokes-egyenletek képezik. Az áramlás fizikájának részletes megértése a 19. században kezdett kialakulni, majd a 20. században, különösen a rakétahajtóművek fejlesztésének időszakában, jelentős finomításokon ment keresztül [81].

A következőkben részletesebben bemutatom azokat a modelleket és összefüggéseket, amelyek segítségével a kiáramlás jellege és veszélyessége megbízhatóbban becsülhető.

Szakirodalmi forrás	Összefüggés
MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 [17]	$\gamma = \frac{M \cdot C_p}{M \cdot C_p - R} \quad (2.38.)$
	$P_{krit} = P_{atm} \cdot \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}, \quad (2.39.)$ Gázok jellemző kritikus nyomás értéke megközelítőleg 1,89 bar [68].
	$W_g = C_d \cdot S \cdot P_{bel} \cdot \sqrt{\frac{M}{Z \cdot R \cdot T_g} \cdot \frac{2 \cdot \gamma}{\gamma - 1} \cdot \left[1 - \left(\frac{P_{atm}}{P_{bel}}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}\right] \cdot \left(\frac{P_{atm}}{P_{bel}}\right)^{\frac{1}{\gamma}}}} \quad (2.40.)$ Alkalmazható, amennyiben a rendszer belső nyomása kisebb, mint a vonatkozó kritikus nyomás értéke.
	$W_g = C_d \cdot S \cdot P_{bel} \cdot \sqrt{\frac{\gamma \cdot M}{R \cdot T_g} \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad (2.41.)$ Alkalmazható, amennyiben a rendszer belső nyomása nagyobb, mint a vonatkozó kritikus nyomás értéke.
CPR 14E Revision history of the 'Yellow Book' [69]	$W_g = S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \int_{P_{atm}}^{P_{bel}} \rho(P) \cdot dP}{4 \cdot f_F \cdot \frac{l_{cső}}{d_{cső}}}} \quad (2.42.)$
	$\rho = C \cdot \left(\frac{P}{Z}\right)^{\frac{1}{\gamma}}$ sűrűség, $Z = 1$, $C = \text{konstans}$. $\gamma = 1 + Z \cdot \frac{R}{C_v \cdot M}$ tökéletes gáz viselkedése esetén. $\int_{P_{atm}}^{P_{bel}} \rho(P) \cdot dP = P_0 \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{\gamma}{\gamma+1}\right) \cdot \left(\left(\frac{P_{bel}}{P_{atm}}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} - 1\right)$.
Dong Yuhu és munkatársai [82]	$W_g = \sqrt{\frac{2 \cdot M}{Z \cdot R} \cdot \frac{\gamma}{\gamma - 1} \cdot \frac{T_{bel} - T_{körny}}{\left(\frac{T_{körny}}{P_{atm}}\right)^2 - \left(\frac{T_{körny}}{P_{bel}}\right)^2}} \quad (2.43.)$

2.9. táblázat: Alkalmazható összefüggések a gázok és gőzök kibocsátásainak a meghatározására (szerző szerkesztése)

A 2.38.-2.41. egyenletek McMillan és a CPR 14E Revision history of the 'Yellow Book' szakirodalmakban, továbbá a CEI 31-35 (2012) [23] és az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabványokban elfogadott és alkalmazható összefüggéseket mutatnak be gázok és gőzök okozta kibocsátások meghatározására. A nyílásokon keresztül történő gázkibocsátás modelljei nemcsak gázokra alkalmazhatók, hanem olyan, gőzszakaszból kiáramló tiszta gőzökre is, amelyek nem kondenzálódnak le. Ez azt jelenti, hogy a gőz nyomása nem haladhatja meg az adott hőmérséklethez tartozó telítési nyomást.

A CPR 14E Revision history of the 'Yellow Book'-ban szereplő 2.42.összefüggésben nem szerepel a kibocsátási együttható, mivel a csövön keresztüli tömegáramot a kilépő nyílás feletti nyomásesés szabályozza. A tömegmegmaradás törvénye megköveteli, hogy a csövön átáramló tömegáram megegyezzen a résen vagy a kilépő nyíláson átáramló tömegárammal.

Dong Yuhu és munkatársai kutatásai olyan egyenletet ismertetnek, amely kifejezetten csővezetékek esetében alkalmazható – különösen akkor, ha a vezeték elég hosszú, és a csővezetéken belüli, illetve kívüli nyomás nagymértékben változik. Ekkor a gázkibocsátás sebessége a kilépési pontnál megközelíti a kritikus áramlás feletti sebességet. Fontos azonban, hogy ez az összefüggés főként nagyobb törések esetén érvényesíthető, amikor a résméret és a tömegáram is számottevő.

A feltüntetett egyenletekből az a következtetés vonható le, hogy a kritikus áramlás alatti és feletti modellek kicsiny részméretek esetén a gázkibocsátás mértékének meghatározására használhatók. Amennyiben a részméret megközelíti a csővezeték átmérőjét, a 2.43. egyenlet alkalmazandó. Az előző esetekben a kibocsátási folyamat kvázi állandósultnak tekinthető, ezért ezek az összefüggések be is épültek a robbanásveszélyes térségek meghatározásával foglalkozó szakirodalmakba és szabványokba. Ez lehetővé teszi, hogy szinte minden egyes technológiai típusra és berendezésre alkalmazhatók legyenek. Ezzel szemben az utóbbiaknak inkább biztonsági szelepek, kiszellőzők, illetve ehhez hasonló kialakítású kibocsátó források esetén relevánsak.

Fontos ebben a fejezetben kitérni a ködök okozta robbanási kockázatokra is. Az éghető ködök – amelyek lehetnek például szénhidrogénekből, oldószerekből, olajból vagy más gyúlékony anyagokból képződő kis méretű cseppek – komoly biztonsági kockázatot jelenthetnek, még akkor is, ha a közeg hőmérséklete a lobbanáspont alatt marad. Ezeknek a veszélyes cseppeknek az átmérője 1-100 μm közé esik. A robbanásveszélyt ugyanakkor nemcsak a méretük határozza meg, hanem olyan jellemzők is, mint a sűrűség, a felületi feszültség és a viszkozitás. A potenciális veszély abból adódik, hogy a cseppek megnövelik a felület-térfogat arányt, így a párolgás sebessége jelentősen megnő, ami könnyen gyúlékony gőzök és oxigén keverékéhez vezethet. Általában a nagyobb nyomás és a kisebb részméretek hozzájárulnak a kibocsátó sugár porlasztásának mértékéhez, ezáltal robbanásveszélyt eredményeznek. Számos szakirodalom foglalkozik a kialakulások kockázatával [83], valamint matematikai modellezéssel és szimulációs szoftverek alkalmazásával is igyekeznek megbecsülni a kibocsátási jellemzőket [84]. Ugyanakkor jelenleg nincs olyan szabvány, amely ezeket az összefüggéseket konkrétan rögzítené – jellemzően tapasztalatokon alapuló megközelítések érhetők el [85].

2.6. ROBBANÁSI KÖRNYEZET TERJEDÉSI MODELLJEI

A gázok és gőzök terjedésének, diszperziójának becslésére különféle analitikus modellek állnak rendelkezésre. A 2.5. fejezetben ismertetett szivárgási és kibocsátási feltételek alapján lehetőség nyílik a gázok, gőzök terjedésének előrejelzésére. A szakirodalomban számos analitikus modell áll rendelkezésre, azonban ezek mindegyike bizonyos korlátokkal és specifikus alkalmazási területekkel bír. A 2.10. táblázat összefoglalja a legjellemzőbb kétdimenziós (2D) modelleket, amelyek kisebb tartományokban – például technológiai berendezéseknél – lokálisan alkalmazhatók. A háromdimenziós modelleket, a szimulációs szoftverek segítségével végzett terjedésmodellezés lehetőségeit a 2.7. fejezet ismerteti.

A 2.10. táblázatban ismertetett 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.

Szakiroda- mi forrás	Összefüggés
Ewan és Moodie [86]	$Y_m^{ARH} = \left[1 - \exp \left(\frac{-1}{k_1 \cdot \left(\frac{\rho_{ga}}{\rho_{eq}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{x^* + x_b + x_{vo}}{r_{eq}} \right) - k_2} \right) \right] \cdot \exp \left(-23 + 41 \cdot \rho'_{ga} \cdot \left(\frac{r_{rés}}{x^* + x_b + x_{vo}} \right)^2 \right) \quad (2.44.)$
	$k_1 = 0,104$ Ewan és Moodie modell egyik konstansa. $k_2 = 0,7$ Ewan és Moodie modell egyik konstansa. $x_b = 0,77 \cdot 10^{-3} \cdot d_e \cdot 0,068 \cdot (d_{rés} \cdot 10^{-3})^{1,35} \cdot \left(\frac{P_{bel}}{P_{atm}} \right)$ sugár hossza. $x_{vo} = \left(\frac{k_2}{k_1} \right) \cdot \left(\frac{\rho_{ga}}{\rho_{eq}} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot r_{eq} - x_b$ virtuális origótól mért távolság. x^* = réstől mért virtuális origó távolsága
Long [87]	$Y_m^{ARH} = k_1 \cdot \left(\frac{d_{rés}}{x' + x_{vo}} \right) \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_{ga}} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left(-k_2 \cdot \left(\frac{r_{rés}}{x' + x_{vo}} \right)^2 \right) \quad (2.45.)$
	$k_1 = 6$ Long modell egyik konstansa. $k_2 = 5$ Long modell egyik konstansa. $x_{vo} = k_2 \cdot d_e \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_{ga}} \right)^{\frac{1}{2}}$ virtuális origótól mért távolság.
CPR 14E Revision history of the 'Yellow Book' [69]	$Y_m^{ARH} = \frac{\left(\frac{50,5 + 48,2 \cdot \rho'_{ga} - 9,95 \cdot \rho'_{ga}{}^2 + 23 + 41 \cdot \rho'_{ga}}{23 + 41 \cdot \rho'_{ga}} \right)}{k_1 \cdot \left(\frac{x' + x_{vo}}{d_{eq}} \right) \cdot \left(\frac{\rho'_{ga}}{\rho'_{eq}} \right)^{\frac{1}{2}} + 1 - \rho'_{ga}} \cdot \rho'_{eq} \cdot \exp \left(-23 + 41 \cdot \rho'_{ga} \cdot \left(\frac{r_{rés}}{x' + x_{vo}} \right)^2 \right) \quad (2.46.)$
	$k_1 = 0,32$ konstans. $\rho'_{eq} = \rho'_{eq} \cdot \left(\frac{P_{atm}}{P_e} \right)$ a gáz/gőz egyenértékű normalizált sűrűsége a levegőhöz viszonyítva kilépési körülmények között. $d_{eq} = d_{rés} \cdot \left(\frac{\rho'_e}{\rho'_{eq}} \right)^2$ a rés átmérője. $x_{vo} = \frac{\left(\frac{50,5 + 48,2 \cdot \rho'_{ga} - 9,95 \cdot \rho'_{ga}{}^2 + 23 + 41 \cdot \rho'_{ga}}{23 + 41 \cdot \rho'_{ga}} \right) \cdot (\rho'_{eq})^{-1} + \rho'_{ga}}{\left(\frac{0,32}{d_{eq}} \right) \cdot \left(\frac{\rho'_{ga}}{\rho'_{eq}} \right)^{\frac{1}{2}}}$ virtuális origótól mért távolság.
Benintendi [88]	$Y_m^{ARH} = \frac{\varepsilon}{(1 + 8 \cdot \varepsilon \cdot \chi) \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot \xi^2}{8 \cdot \chi} \right)^{2 \cdot \varepsilon \cdot Sc} - 1} \quad (2.47.)$
	$\varepsilon = \frac{\rho_{ga}}{\rho_{air}}$ A gáz és a levegő fajlagos tömegének aránya. $\chi = \frac{x' + x_{vo}}{R_e \cdot r_{rés}}$ Dimenziótlan axiális koordináta. $\xi = \frac{r}{r_e}$ Dimenziótlan radiális koordináta. $Sc = \frac{\mu_e}{\rho_e \cdot D_{g-air}}$ Schmidt-szám. $x_{vo} = 0,125 \cdot R_e \cdot r_{rés}$ virtuális origótól mért távolság. Levegőnél könnyebb gázok esetében javasolt az alkalmazása.
	$Y_m^{ARH} = 0,375 \cdot R_e \cdot \frac{r_{rés}}{x' + x_{vo}} \cdot \left(\frac{1}{1 + \eta^2} \right) \quad (2.48.)$
	$R_e = \frac{d_e \cdot v_e \cdot \rho_e}{\mu}$ Reynolds szám. $M_e = \rho_e \cdot v_e^2 \cdot \pi \cdot r_e^2$ Kezdeti gáz impulzusáram. $\eta = \sqrt{\frac{3 \cdot \rho_e \cdot M_e}{64 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{\mu} \cdot \frac{r_{rés}}{x' + x_{vo}}}$ hasonlósági koordinátaváltozó. $x_{vo} = 0,375 \cdot R_e \cdot r_{rés}$ virtuális origótól mért távolság. Levegőnél nehezebb gázok esetében javasolt az alkalmazása.

2.10. táblázat: Alkalmazható modellek a gázok és gőzök kétdimenziós terjedésére (szerző szerkesztése)

Ewan és Moodie modellje a csövek sérüléséből adódó, illetve a technológiai berendezések légtelenítői rendszeréből származó nagynyomású éghető gázok kibocsátásainak a terjedését vizsgálja [86]. 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 [87], 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 [69] 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 [88], 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. Benintendi gondolkodása nem csupán a lamináris áramlásig terjedt, hanem azon túlmenően a lamináris-turbulens átmenet teljes megértéséig [89] 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 [88, 89], ezért célszerű e módszertani megközelítést alkalmazni a robbanásveszélyes térségek azonosítása és a gyúlékony gázok kockázatértékelése során.

2.7. GÁZOK, GŐZÖK TERJEDÉS VIZSGÁLATÁRA 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.

A Magyar Katasztrófavédelmi Hatóság jelenleg 16 olyan szimulációs szoftvert fogad el [90], amelyek alkalmazhatóak kockázatelemzésre, veszélyazonosítására, valamint légszennyező, toxikus, illetve tűz- vagy robbanásveszélyes anyagok terjedésének vizsgálatára. Az elfogadott szoftverek közé tartoznak például az ALOHA, Breeze, DEGADIS, DNV Phast, HGSYSTEM, SuperChems és SLAB View. A következő alfejezetekben részletesen bemutatom az ezek mellett használt további programokat is, mint például az ANSYS Fluent és CFX, FLACS-CFD, FDS, KFX, továbbá OpenFOAM. Kitérek a konkrét alkalmazhatóságuk elméleti és gyakorlati hátterére, továbbá globális és/vagy lokális dimenziókban való értelmezhetőségükre, valamint kutatások, vizsgálatok és esettanulmányokban történt felhasználásukra.

2.7.1. CFD ALAPÚ 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 numerikus áramlástani szimulációk során az első lépés a vizsgált tér geometriai modelljének létrehozása, annak térbeli hálózása, azaz a „mesh/grid” generálása. A hálózás célja a vizsgált tartomány kisebb, diszkrét elemekre történő felosztása, amelyekben belül a differenciálegyenletek numerikus megoldása történik. A leggyakoribb hálótípusok közé tartozik a strukturált háló, amely szabályos, rácsszerű cellákból áll, gyors számítást tesz lehetővé, azonban nehezen alkalmazható összetett és bonyolult geometriák esetén. A nemstrukturált hálók – például tetraéder elemek – jól illeszkednek bonyolult felületekhez, viszont több számítási kapacitást igényelnek. A hexaéderes hálók pontosabb eredményeket biztosíthatnak áramlási szempontból, különösen lamináris vagy réteges áramlások esetén, de összetett geometriák esetén a létrehozásuk bonyolultabb. Ezenkívül léteznek még az úgynevezett poliéderes hálók, amelyben az elemek általában 6–14 oldallal rendelkeznek. Ezek a hálók rugalmasan alkalmazkodnak a komplex formákhoz, miközben akár kevesebb elemből is képesek lefedni ugyanazt a térfogatot, mint egy hasonló tetraéderes háló. Minden egyes típusnál a hálók minőségének egyik kulcsfontosságú mérőszáma a „skewness”, amely az elemek átlagos és kardinális geometriai torzulását jellemzi, és amelynek alacsony értéke elengedhetetlen a numerikus stabilitás és a CFD szimulációk pontosságának biztosításához.

A geometria és a háló elkészítése után az egyik legfontosabb lépés a peremfeltételek (boundary conditions) pontos megadása, mivel ezek határozzák meg, hogyan viselkedik az áramlás a szimulált térben. Az áramlások jellegét tekintve két fő típus különböztethető meg: lamináris és turbulens áramlás. Míg lamináris áramlás esetén a részecskék rendezett, párhuzamos rétegekben mozognak, addig a turbulens áramlás kaotikus, örvényekkel és ingadozásokkal teli jelenség, amely a gyakorlatban sokkal gyakoribb, különösen nagyobb sebességű kibocsátások alkalmával. A turbulencia pontos modellezése kiemelten fontos, és többféle módszer áll rendelkezésre, attól függően, milyen részletességre van szükség, illetve mennyi számítási kapacitás áll rendelkezésre:

- **RANS (Reynolds-Averaged Navier–Stokes)** modell: A legelterjedtebb megközelítés, amely az áramlás időben átlagolt viselkedését vizsgálja.
- **k – ϵ modell**: Egy két-egyenletes RANS alapú modell, amely a turbulens kinetikus energiát (k) és annak disszipációját (ϵ) számolja.
- **k – ω SST (Shear Stress Transport) modell**: Szintén kétegyenletes modell, amely jól működik falak közelében is, így kiváló választás komplex geometriai helyzetekben. A k – ϵ és k – ω előnyeit ötvözi.
- **LES (Large Eddy Simulation)**: A nagy örvények (*eddy*) mozgását közvetlenül szimulálja, a kisebb örvényeket nem számítja ki egyenként, hanem ezek hatását modellezi egy egyszerűsített matematikai leírással. Pontosabb, mint RANS, de számításigényesebb. Gyakran használják robbanás, gázterjedés vagy égés modellezésére.
- **DNS (Direct Numerical Simulation)**: A teljes áramlási tartomány minden örvényét és skáláját közvetlenül számolja, rendkívül pontos, de rendkívül számításigényes, így csak kis méretű rendszerekhez alkalmazható kutatási céllal.
- **SAS (Scale-Adaptive Simulation)**: Egy hibrid modell, amely képes automatikusan váltani RANS és LES között, a lokális áramlási viszonyoktól függően, így rugalmas megoldást kínál komplex rendszerekhez.

Az anyagjellemzők szempontjából a legtöbb CFD szimuláció az ideális gáz törvényen alapul [91]. Ez az egyszerűsített megközelítés sok esetben elegendő, azonban szénhidrogének esetében részletesebb állapotegyenletek szükségesek. Ilyen például a Peng–Robinson egyenlet [92], amely alkalmas a fázisegyensúly és sűrűség pontosabb meghatározására, különösen vegyipari és energetikai alkalmazásokban.

A szimulációs eredmények értékelése során alapvető fontosságú megkülönböztetni a stationer (időfüggetlen) és a tranziens (időfüggő) állapotokat – utóbbinál az idő függvényében változik az áramlási tér, például indulási fázis, robbanás, hirtelen kiáramlás esetén

2.7.1.1. DNV PHAST CFD – KAMELEON FIREX (KFX)

A DNV Phast szoftvercsaládba a már említett numerikus áramlástani szimulációs modul is integrálódhat a Kameleon FireEX (KFX) szoftverrel. A KFX-et azóta továbbfejlesztették, hogy alkalmas legyen szivárgások terjedésének, valamint tűz- és robbanási hatások modellezésére is.

Bærland értekezésének [93] témája az LPG és klórgáz légköri terjedésének modellezése KFX szoftverrel. A munka a szoftverben implementált differenciálegyenleteken alapszik, különös tekintettel

a k - ε turbulencia modell hiányosságait vizsgálta légmozgással és a felhajtóerő által befolyásolt KFX szoftverrel. A munka a szoftverben implementált differenciálegyenleteken alapszik. Különös tekintettel a k - ε turbulencia modell hiányosságait vizsgálta légmozgással és a felhajtóerő által befolyásolt diffúzió kezelésében. A vizsgálat megállapította a lehetséges korrekciós tagok kiegészítését a k és ε transzportegyenleteihez.

Egy gázfeldolgozó üzem esetleges tűzhatásait és a földgáz különféle terjedési forgatókönyveit KFX szimulációs szoftverrel vizsgálták [94]. Az eredmények azt mutatták, hogy szivárgás hatására gázfelhő képződik, amelynek jelentős része elérheti az alsó robbanási/égési határt, a szél iránya pedig nagymértékben befolyásolja a gázfelhő terjedési irányát, az ARH határa akár 30 méterre is kiterjedhet. A szoftver többkomponensű gázok esetén beépített összefüggés szerint határozza meg az ARH értékét. A vizsgálat során TNO Yellow Book módszertanát is alkalmazták a szivárgás mértékének és a gázterjedés alapján kialakuló, ARH által határolt robbanásveszélyes zóna kiterjedésének a meghatározására. A TNO Yellow Book releváns összefüggéseit a 2.7.3. fejezetben ismertetem.

Egy tanulmányban olaj- és gázfeldolgozó technológiáknál potenciálisan előforduló csőtörést vizsgáltak KFX - Risk and Barrier Management szoftverrel [95], majd különböző érzékenységi vizsgálatokat végeztek a kibocsátás és a lehetséges gyújtóforrások okozta kockázatokra. A kutatás összehasonlította a különböző szivárgási forgatókönyvek eredményeit a sztöchiometrikus és gyúlékony gázfelhők mérete szerint. A tanulmány a KFX szoftver korlátaira is rámutatott, beleértve a vizsgált modul relatív kis méretét és a szimulált paraméterek korlátozott kombinációját.

Gupta és Wong kutatása [96] során sugár tűz hősugárzását vizsgálták PHAST és KFX szoftverekkel. Megállapították, hogy a kizárólag PHAST-tal végzett hőhatás vizsgálat alábecsülheti egy ilyen kibocsátással járó kockázatot a KFX-hez képest, mivel a PHAST keskenyebb következményszónákat és alacsonyabb sugárzási szinteket eredményezhet.

Nubli és munkatársai [97, 98] több különböző kutatást végeztek tartályhajók LNG véletlen kibocsátásának és a gáz terjedésének következményeinek az elemzésére. A KFX szoftver gázterjedési modelljének hitelességét egy korábbi, nagyméretű brit gázkibocsátási kísérlettel való összehasonlítással validálták [98], ahol a gázkoncentrációban mért eltérés mindössze 3,92% volt és meg is említik, hogy a CFD modellek rengeteget fejlődtek.

A PHAST CFD 9.0 fejlesztésében hidrogén és ammónia szivárgásának szimulációjára lehet alkalmazni, amelyekre validált és ellenőrzött eredmények állnak rendelkezésre [99].

2.7.1.2. FIRE DYNAMICS SIMULATOR (FDS)

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 [100, 101].

Salamonowicz és munkatársai részletesen vizsgálták a CFD szoftverek alkalmazhatóságát robbanásveszélyes térségek meghatározásához [102]. Az FDS a Navier–Stokes-egyenletek LES formáját oldja meg alacsony sebességű áramlásokra, míg az ANSYS Fluent a RANS modellt használja. A fő eltérés a turbulencia modellezésében van: az FDS részletesebb LES-t, az ANSYS időátlagolt RANS-t alkalmaz. Kutatás során a levegőnél nehezebb, de gyakori propángáz – cseppfolyós közegként szimbolizálva – a padló felé áramlott és terjedt. Az ANSYS egyoldalúbb terjedést, az FDS

egyenletesebb eloszlást mutatott. Időbeli terjedésben is különbségek voltak: az FDS esetében gyorsabban terjedt a padlón. Hidrogén esetén – amely levegőnél könnyebb – a kibocsátás forrásának közelében koncentrált, majd a mennyezet felé terjedt. A két szoftverrel készített szimulációk során kezdetben hasonló magasságú, de eltérő szélességű eloszlást mutatott. Később az FDS magasabb koncentrációt szimulált a mennyezet közelében. Vizsgálták egy akkumulátorból kilépő hidrogén robbanásveszélyes zónáját, amely sokkal kisebb volt, mint a korábban feltételezett 0,5 m-es sugár és mennyezetig terjedő terület, mivel a kibocsátó forrása felett, megközelítőleg 0,2 m magasságban volt kimutatható.

Brzezinska kutatása [103] alapját az ipari savas ólomakkumulátorok töltése során keletkező hidrogéngáz kibocsátása és az ebből adódó robbanásveszély képezte, különösen nem megfelelő szellőzésű zárt terekben. A vizsgálathoz valós méretű hidrogénkibocsátási kísérleteket is végzett egy zárt térben. Az FDS segítségével megerősítette, hogy a szellőzés hiánya robbanásveszélyes légkör kialakulásához vezethet az egész helyiségben, de ehhez legalább 142 percre van szükség. Az eredmények azt mutatták, hogy a megfelelő szellőztető rendszerek kulcsfontosságúak a hidrogén eltávolításához, és a természetes szellőztetés, a mennyezeten elhelyezett elszívással bizonyul a leghatékonyabbnak, de a mechanikus szellőztető rendszerek is képesek voltak a hidrogénkoncentrációt a biztonságos szint alatt tartani.

Brzezinska további kutatása [104] során folytatta a hidrogénfelszabadulás szimulációs és kísérleti vizsgálatát. Az FDS-szimulációk során konzervatív túlbecslést tapasztalt, különösen a mennyezet alatt. Ez arra utal, hogy az FDS alapértelmezett turbulenciamodelle a véletlenszerű kibocsátások esetén biztonságosabb, de túlbecsült eredményeket adhat.

Gerbec és munkatársai [105] a Koperi kikötőben vizsgálták a cseppfolyósított földgáz (LNG) terjedésének modellezését, amelyben Phast nem CFD szoftverét, valamint az FDS és az ANSYS Fluent szoftverek diszperziós modelljeinek eredményeit vetették össze egy metán kibocsátó forrás, mint cseppfolyósított gáz esetén, amely adiabatikus állapotok megszűnésével azonnal fázisátalakuláson megy keresztül. Az összehasonlításban a kutatók megállapították, hogy a tényleges párolgási sebesség bizonytalanságai befolyásolják a modellek által adott eredményeket, különösen az alsó robbanási/égési határérték, illetve annak felének a koncentrációjának tekintetében.

Egy másik tanulmány [106] kifejezetten az FDS 6.5.3 verziójának validálására fókuszált az LNG diszperziójának modellezésében. Ennek keretében az FDS szimulációit számos valós terepi kísérlettel (Maplin Sands, Burro, Coyote, Falcon) és szélcsatorna kísérlettel (CHRC, BA-Hamburg, BA-TNO) vetették össze, figyelembe véve az akadályok jelenlétét is. A validálás során a maximális görbe és pontszerű koncentrációkat, valamint statisztikai teljesítménymutatókat használtak az értékeléshez. A jelentés végkövetkeztetése szerint az FDS alkalmas a sűrű gázok diszperziójának modellezésére.

Krauze [107] FDS szimulációt és a több robbanásveszélyes térségek meghatározására vonatkozó szabványt vagy irányelv által meghatározott robbanásveszélyes térségek kiterjedésének összehasonlítását végezte egy földgázkibocsátás során, ahol az analitikai számítások gömb és kúp alakú zónákat határoztak meg. Viszont a CFD szimulációval kapott alakzat hengerhez hasonlított, amely közel áll a valóságban potenciálisan kialakuló ilyen jellegű kibocsátások jellemző karakterisztikájához, de elmondható, hogy a szabvány által meghatározott terület biztonságosan lefedte a szimulációban azonosított veszélyes zónát.

Az FDS szoftver hatékonyan alkalmazható gyúlékony gázok – például metán – zárt terekben történő terjedésének és keveredésének modellezésére is, különösen egy új, csökkentett rendű Method of Moments (MoM) modellel [108]. Ezt a MoM modellt validálták és összehasonlították egy analitikus *filling-box* modellel, kimutatva, hogy a MoM jelentősen gyorsabb számítást tesz lehetővé, miközben jobban reprezentálja a gáz eloszlását, mint a *filling-box* modell. Mindez alkalmassá teszi a modellt toxicitási, tűz- vagy robbanásveszélyes szivárgások vizsgálatára, és kiterjeszthető többkomponensű gázok forrásainak vizsgálatára is.

Az előzőekben említett tanulmányok eredményei összességében arra utalnak, hogy akár levegőnél könnyebb, nehezebb, akár cseppfolyós gázok kibocsátása esetén az FDS szimulációk által jelzett robbanásveszélyes zónák mérete kisebb, mint a korábban általánosan alkalmazott vagy feltételezett területek.

2.7.1.3. OPENFOAM (OPEN FIELD OPERATION AND MANIPULATION)

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 [109, 110, 111] 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.

Reza K. A. [111] a hidrogén-levegő keverék terjedéshez kapcsolódó kutatásában különböző koncentrációkat vizsgált kísérleti esetekkel. Célja meghatározni, hogy milyen koncentrációk mellett és milyen körülmények között következhet be robbanás vagy detonáció. Megállapította, hogy a koncentrációgradiensek jelentősen felerősíthetik a lánggyorsulást és növelhetik a DDT bekövetkezésének valószínűségét.

Fiates és munkatársai [112, 113] az OpenFOAM szolver részét úgy módosították, hogy eltávolították vagy kikapcsolták a kémiai reakciókra vonatkozó részeket, így a szoftver a robbanásveszélyes gáz terjedését modellezi. A szimulációk során figyelembe vették a gravitációs felhajtóerőt, és többféle turbulenciamodelt (például $k-\epsilon$ és SST $k-\omega$) is kipróbáltak. Eredményeiket ANSYS-CFX és FLACS-CFD szoftverekkel végzett számításokkal hasonlították össze. Validálás során [113] az OpenFOAM által számított terjedési eredmények jó egyezést mutattak a 2–12 kg/s sebességtartományú nem saját kísérleti adatokkal. Kiemelték, hogy a turbulenciamodel megválasztása nem befolyásolta jelentősen az eredményeket. Ezenkívül szimulálták az ANSYS-CFX környezetben is, ahol a számított robbanásveszélyes metánfelhő térfogat 10%-on belüli különbséget mutatott a kísérleti eredményhez képest. További validálást is végeztek egy másik kísérletre: LNG-medence vizsgálati eredményeit OpenFOAM és FLACS-CFD szimulációs eredményekkel vetették össze [112], ahol előbbi szoftverrel jó egyezést találtak a távolabbi mérőpontokon, de a medencéhez közelebb kissé alulbecsült értékeket tapasztaltak a koncentráció tekintetében, mert a FLACS-CFD eredményeivel csak 40%-os túréren belül egyeztek az eredmények.

A Maplin Sands kísérletekben különböző mennyiségű LNG-t bocsátottak ki a tengerre (például 12,6 m³, 10,2 m³, vagy 18,3 m³) meghatározott percenkénti kiáramlási sebességgel. Az OpenFOAM szimulációk eredményei a kísérletek mérési adataival összehasonlítva, változó vagy éppen átlagos, még 250 méteres távolságban is jó egyezést mutatnak 5 vol.%-os koncentráción vizsgálva azon a területen, ahol alacsony volt a szélesebség [114].

A robbanásveszélyes térségek meghatározására alkalmazható CEI 31-35 (2012) szabvány [23] és az OpenFOAM alkalmazásával a kármentőből való LNG párolgását és terjedésének az eredményeit vizsgálta Cassano és munkatársai [115]. A szabvány egy egyszerűsített egyenletet tartalmaz a párolgás sebességének becslésére, és szimulációval való elemzés során megállapították, hogy a legnagyobb eltérés a párolgás első másodperceiben volt tapasztalható – például 0,1 másodpercnél 73%-os eltérést azonosítottak. A 60. másodperc után a párolgási sebességre vonatkozó százalékos hibák csökkentek, és 45% és 8% közötti tartományban mozogtak. A tanulmány azt a következtetést vonja le, hogy CFD szoftver alkalmazásával, más hasonló szoftverekhez hasonlóan, részletesebb és pontosabb információt kapunk a robbanásveszélyes zónák meghatározásához, továbbá a kockázatelemzéshez is. A lokális kiterjedésre megvalósított, validált szimulációk, üzemegységek tekintetében, amelyek 0-62,4, illetve 80 méteres kiterjedést jelentenek, kiváló egyezéseket mutatnak a szoftver ilyen tartományú alkalmazhatóságára, akár nagyobb mértékű szivárgások esetén [116, 117].

2.7.1.4. ANSYS CFD - FLUENT ÉS CFX

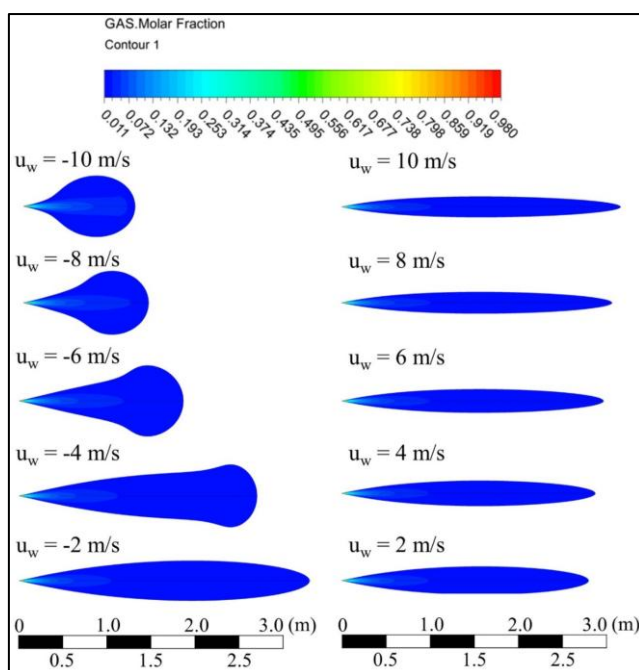
A Fluent és a CFX az ANSYS szoftverportfólió két kiemelkedő szimulációs szoftvere, amelyeket a mérnöki gyakorlatban széles körben alkalmaznak, különösen gázszivárgások és gyúlékony anyagok terjedésének numerikus modellezésére. Mindkét eszköz alkalmas a robbanásveszélyes térségek (zónák) kiterjedéseinek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

Souza és munkatársai [118] több összefüggésre hivatkozva – kiemelve a 2.49. egyenletet – vizsgálták a robbanásveszélyes térségek kiterjedésének becslését CFX szimulációs környezettel, és eredményeiket kísérletekkel validálták, például nitrogén gáz kiáramlásának mérésével. A kutatás során a már említett 2.51. McMillan-egyenlet alkalmazásával átlagosan 117%-kal nagyobb robbanásveszélyes kiterjedések jöttek ki a metán közeg esetében, ami arra utal, hogy az egyenlet túlzottan konzervatív becslést ad. Továbbá azt is láthatjuk, hogy a 2.53. egyenlet, amely Tommasinihez kötődik [119], nem veszi figyelembe a hőmérséklet hatását, holott Souza és munkatársainak a tanulmánya kimutatta, hogy ez befolyásolja a robbanásveszélyes térség kiterjedését. A szerzők által javasolt új korreláció, ahol egy konstans bevezetésével – amelynek javasolt értéke 0,11 – gyorsan és pontosabban becsülhető a veszélyes térség kiterjedése, szemben a meglévő analitikus modellekkel. Ennek ipari alkalmazása alacsonyabb telepítési költségeket eredményezhet a biztonság csökkenése nélkül.

$$X_{kit} = 0,11 \cdot \frac{d_{rés}}{ARH} \sqrt{\frac{P_{bel}}{T_{bel} \cdot M}} \quad (2.49.)$$

A szél sebessége és iránya szintén hatással van a robbanásveszélyes gáz- és gőzkezegek terjedésére. Barros és munkatársai [120] metán, hidrogén és propán kiáramlását vizsgálták a szélesebség 0–10 m/s tartományban való változtatásával, valamint az áramlási irány módosításával, CFX szimulációs környezetben. Az így kapott eredményeket összehasonlították az MSZ EN 60079-10-1:2016 szerinti

számításokkal, amelynek metán közegre vizsgált eredményei a 2.3. ábrán láthatók. A kutatás hitelességét egy tanulmányban végzett kísérlettel validálták [121], amely a hidrogén terjedését vizsgálta. A főbb megállapítások között szerepel, hogy a szél sebessége és iránya jelentősen befolyásolja a robbanásveszélyes közeg kiterjedését és a térfogatot. Ez a hatás nem mindig monoton, különösen az ellentétes irányú szél esetén. Kimutatták, hogy ellentétes irányú szél a kiáramlási pont közelében koncentrálhatja a gázt, amely bizonyos esetekben növelheti a kiterjedést és a térfogatot bizonyos esetekben. Eredményeik azt is megmutatták, hogy jelentős különbségek lehetnek a CFD szimulációk és a szabvány által előre jelzett eredmények között, akár kedvező és kedvezőtlen irányban, részben azért, mert a szabvány nem veszi teljes mértékben figyelembe a szélirány hatását.



2.3. ábra: Metán gáz terjedésének vizsgálata különböző nagyságú és irányú légáramlásnál [120]

Khoi és munkatársai [122] LPG-szivárgás és -terjedés szimulációját vizsgálták gyári környezetben, Fluent szimulációval a k-ε turbulencia modellt alkalmazva. Elemezték a légáramlás hatását az LPG terjedésére, és azt találták, hogy nagyobb szélesebbég alacsonyabb koncentrációkhoz vezetett a szivárgás közvetlen közelében, de szélesebb területen eredményezett diszperziót. A szimulációk azt mutatták, hogy az átlagos LPG-koncentráció minden esetben az alsó robbanási/égési határ alatt maradt a vizsgált paraméterek – 1, 2 és 3 mm résátmérő, valamint 1, 3, 5 és 10 m/s szélesebbég – mellett. Ez azt sugallja, hogy a CFD szimuláció hatékony eszköz lehet az LPG szivárgásának előrejelzésére nyílt ipari területeken.

A szél sebességének és irányának hatására Nascimento és munkatársai [123] a 2.50. matematikai modellt fejlesztették ki, a 2.57. Ewan és Moddie egyenlete, valamint lineáris regresszió összekapcsolásával.

$$X_{kit} = k_{reg} \cdot \left(\frac{0,3545 + 0,002 \cdot u_{lég}^2 - 0,0015 \cdot u_{lég}}{0,3545} \right) \cdot \frac{P_{bel}^{0,43} \cdot d_{rés}}{T_{bel}^{0,48} \cdot M^{0,47} \cdot ARH} \quad (2.50.)$$

A k_{reg} , regressziós tényező értékét ANOVA statisztikai elemzés alapján 1,9881-ben határozták meg. A CFX szoftver segítségével, ellenőrzésével egy megbízható és gyors módszert dolgoztak ki a

gázkibocsátásokból eredő robbanásveszélyes zónák méretének meghatározására, amely kiemelten figyelembe veszi a szél hatását, ellentétben sok más megközelítéssel, amelyek a 2.7.3 fejezetben láthatók.

A két tanulmány [124, 125] összehasonlította a helyiségek robbanásveszélyes zónáit a már visszavont MSZ EN 60079-10-1:2009 szabvány szerinti meghatározásával, amely részben megegyezik az érvényes MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabvány háttérkoncentrációra vonatkozó számításaival. A szabványban lévő robbanóképes közeg elméleti térfogat paramétere a szellőzés hatékonyságát jellemzi, nem ad reális becslést az 50%-os ARH átlagkoncentrációjú gázfelhő térfogatára, mert a validált CFX modellek szerint a szabvány által számított robbanóképes közeg elméleti térfogat három nagyságrenddel is nagyobb lehet a tényleges robbanóképes közeg térfogatnál, főként nagyobb helyiségekben. Ez azt jelenti, hogy a szabvány módszere konzervatív, ami indokolatlanul magas zónabesoroláshoz vezet. Ezzel szemben a szimulációs szoftver pontosabb becslést nyújt a tényleges robbanásveszélyes zóna méretére.

Duong és munkatársai [126] a szellőzőrendszer hatékonyságának értékelésére egy feltételezett baleset során elpárolgó benzol koncentrációjának hígulása alapján, Fluent szimulációs környezetben. A kutatás során különböző szellőzési ráták mellett (1000, 2000, 3000, 4000 m³/óra) elemezték a helyiség adottságait, valamint azt is, hogy a szellőzés csak egy nyíláson (pl. ajtón), vagy több nyíláson (ajtó + ablak) keresztül történik-e. Az átlagos benzol koncentráció mindkét állapot esetén megfelelt a 0,001 vol.%-on rögzített maximum biztonsági határértéknek a magasabb szellőzési rátáknál. A 3000 m³/óra és 4000 m³/óra értékek bizonyultak a leghatékonyabbnak a szennyezőanyag eltávolítására, de fontos kiemelni, hogy a szimulációk még az átlagos koncentráció határérték alatt is kimutatták, hogy bizonyos helyeken a helyiségben magasabb, mint 0,001 vol.% koncentrációk is előfordulhatnak, különösen az alacsonyabb szellőzési értékeknél vagy a szivárgási pont környezetében.

Ezért a szellőzőrendszerek tervezésekor elengedhetetlen mérlegelni és CFD szimulációkkal optimalni, hogy egy ponton történő elszívás/befúvás megfelelő lehet-e a robbanásveszélyes közeg kialakulásának a megakadályozására, vagy több ponton létesített elszívás/befúvás elrendezéssel jobb koncentráció eloszlás érhető el, illetve magasabb szellőzési értéknél nem biztos, hogy egy ponton történő emelt elszívás/befúvás megelőzi egy lehetséges robbanásveszélyes állapot kialakulását.

2.7.1.5. FLACS-CFD (FLAME ACCELERATION SIMULATOR)

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 forrásokon keletkező koncentrációeloszlást 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.

Dasgotra és munkatársai [127] a FLACS-CFD használatának képességét vizsgálták nagyméretű gyúlékony gázfelhő diszperziójának előrejelzésére. A kutatások során kiemelték, hogy a valós kísérletek ilyen nagyméretű tartományokban lévő szivárgások esetén nagyon nehezen megvalósíthatók, viszont Hansen [128] korábbi kutatásánál nagyméretű LNG terjedési kísérleteket végzett a FLACS-CFD-vel és jó egyezést ért el a mért és szimulált vizsgálatok közt, ezáltal a

szoftverben alkalmazott numerikus egyenletek hitelesek. Dasgotra és munkatársai a tanulmányukban a benzin gázfelhő pontos terjedését a legrosszabb forgatókönyvek esetén vizsgálták és a modellezés során egy tényleges létesítmény geometriai elemeit (épületek, vezérlőhelyiség, csővezetékek) rekonstruálták szivárgási pontokkal, valamint szélsőséges körülményeket szimuláltak. Következtetésük, hogy a FLACS-CFD használata segíthet a legrosszabb eshetőségek esetén kialakuló robbanásveszélyes koncentráció előrejelzésére, a kvalitatív és kvantitatív kockázatértékelési tanulmányok elkészítéséhez.

A különböző CFD alapú szoftverek összehasonlítása, mint például az ANSYS Fluent, KFX és FLACS-CFD mindig érdekesek. Egy kutatás [129] a magas nyomású gyúlékony gázszivárgások szimulációjára, a komplex tengeri platformokra terjed ki és megállapítja, hogy az empirikus modellek gyakran túlértékelik a kockázatot zsúfolt terekben mert a CFD szoftverek pontosabb eredményeket adnak, de nagyobb a számítási igényük. Az ANSYS Fluent számításigényesebb, de pontosabb eredményeket adhat, különösen akadályok közelében, ezzel szemben a FLACS-CFD és KFX egyszerűsített megközelítéseken alapulva gyorsabbak, de az egyszerűsített szivárgási modellezésük miatt eltérően reprezentálhatják a robbanásveszélyes gázok, gőzök által érintett területeket. Így a gyorsabb szoftverek konzervatívabb eredményeket, nagyobb gyúlékony térfogat mennyiségeket képesek adni.

Lokális tartományok esetében, ahol földgáz okozta diszperzió és robbanási kockázata fennáll, Handogo és munkatársai [130] vizsgálták a lehetséges robbanásveszélyes állapotokat. Mivel a földgázszivárgások komoly veszélyt jelentenek gyúlékonyságuk és robbanásveszélyességük miatt a kutatás célja a diszperzió és robbanást befolyásoló külső paraméterek meghatározása, mint például egy szellőzőnyílás mérete, a légáramlás iránya, a gyújtóforrás pont helye, a nappali/éjszakai viszonyok és az akadályok jelenléte. Az akadályok jelenléte koncentrálja a terjedési mintázatot és eltérő gázfelhők alakulnak ki. Az éjszakai körülmények, ahol alacsonyabb szélsősebesség, stabilabb légkör áll fenn eltérőek a nappali viszonyokhoz képest, mert a magasabb szélsősebesség, kevésbé stabil légköri állapotok kicsivel jobb hatással vannak gázkoncentrációk hígulására.

Kim J. H. és Lee M. [131] kutatásának tanulmányi háttérét az adta, hogy Dél-Koreában növekszik az érdeklődés a kockázatszámítási módszerek iránt, az éghető gázokat felhasználó üzemekre vonatkozó, a nemzetközi szabványokon alapuló robbanásveszélyes területek osztályozására bevezetett KGS CODE GC101 nemzeti szabványuk okán. A saját nemzeti szabványuk az EN IEC 60079-10-1:2020 alapján készült el. A kutatók két módszert hasonlítottak össze valódi gázszivárgási kísérletekkel: CFD-FLACS szoftvert és a koreai Gázbiztonsági Társaság által kifejlesztett KGS HAC (veszélyes területek osztályozása) szoftveren alapuló numerikus számításokat, amelyek a KGS GC101 szabványra épülnek. Céljuk az volt, hogy feltárják a különbségeket a szivárgásból eredő gáz koncentrációjának eloszlása vagy a veszélyes távolság meghatározása terén a két módszer között. Az összehasonlítás érdekében azonos szivárgási átmérőt, nyomást és hőmérsékletet stb. alkalmaztak a tömegáram számításához. A vizsgálat során alkalmazott anyag propán volt és a tömegáram mennyiségek $1,57 \cdot 10^{-4}$ kg/s, $3,13 \cdot 10^{-4}$ kg/s, $4,70 \cdot 10^{-4}$ kg/s és $6,17 \cdot 10^{-4}$ kg/s voltak, amelyek releváns értékek egy karimás csatlakozás okozta másodrendű kibocsátó forrás esetén. Az eredmények összehasonlítása enyhe eltéréseket mutatott a FLACS-CFD és a KGS HAC között, az előbbi javára, amelynél kisebb robbanásveszélyes távolságok jöttek ki, de a valódi szivárgási kísérletek eredményei különböztek, magasabb értékeket detektáltak. A valós kísérletekben a diszperziós távolság 1,8 és 2,7 m között mozgott, és nem sikerült állandó

tendenciát azonosítani a növekvő áramlási sebesség függvényében. Ez a váratlan eredmény valószínűleg olyan tényezőknek köszönhető, mint a nagyon kis légáramlatok (mikrolégáramlatok) hatása, amelyek befolyásolják a gáz áramlását, annak nagyon könnyű sűrűsége miatt, vagy a magasabb áramlási sebességnél felfelé irányuló diffúzió. Ezenkívül a gáz áramlásmérő és a szivárgási nyílás közötti csövezésben bekövetkezett impulzusesés (momentum drop) is fontos tényező volt. Amikor ezt az impulzusesést modellezték a FLACS-CFD szimulációban a veszélyes távolság jelentősen növekedett, mintegy 1,95 m-re, ami közelebb állt a valós kísérletek eredményeihez. Ezzel szemben a KGS HAC számítások jelenleg nem tudják figyelembe venni az ilyen impulzuseséseket.

A szakirodalmi áttekintés során megvizsgált és meghivatkozott források közül az előbb említett kutatásban voltak találhatóak olyan eredmények, amelyek a szimulációs, szabványi számítással ellentétesek, tehát a valóságban nagyobb robbanásveszélyes térségek alakulhatnak ki, mint egy előzetes elemzés által.

2.7.1.6. TOVÁBBI CFD ALAPÚ SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZETEK

További szimulációs szoftverek is rendelkezésre állnak, amelyek áttekintését Kang és munkatársai [132] foglalták össze, kitérve arra hogyan nyújtanak lehetőséget a robbanásveszély értékelésére, kiemelve erősségeit, korlátait és jövőbeli lehetőségeit a pontosság növelésére. Ezek közül az előző fejezetben ismertetett FLACS-CFD, PHOENICS CFD [133], EXSIM [134], AutoReaGas [135] és COBRA [136] szoftverek, illetve a COMSOL Multiphysics [137] szoftverrel is végeztek már vizsgálatok, amelyekről mind található külön kutatás a robbanásveszélyes anyagok terjedésére, ezáltal a robbanási kockázat vizsgálatára. Ezenkívül meg kell említeni, hogy végeselem szimulációval is lehet vizsgálni csavarerő során fellépő összenyomó feszültség állapotot, amely igazolni tudja a szivárgásmentességet [138].

2.7.2. EGYÉB SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZET

Magyarországon a hatóság oldaláról elfogadott és legnépszerűbb veszélyelemzésre alkalmazható szoftvereken kívül még számos más szoftver áll rendelkezésre, amelyekkel a valószínűsíthető balesetek előfordulása és azok várható hatásai előre jelezhetők, illetve mérgező és robbanásveszélyes veszélyességi területek becsülhetők meg lokális és globális kiterjedésben. Ezek a szoftverek lehetnek például a(z) ARCHIE, CHARM, CANARY, ExSys-AWZ, HAZDIG, MAXCRED, RIZEX-2, SCIA, TRACE és WHAZAN, amelyeket Tauseef S. [139], illetve Tuśnio N. munkatársaikkal [140] együtt a kutatásuk során összegyűjtöttek, ismertetve a szoftverek tulajdonságait és az azokhoz kapcsolódó felhasználási területeket.

Ezek a szimulációs szoftverek általában empirikus vagy egyszerű fizikai modellekre épülnek, és gyorsan futtathatók, kevesebb számítási kapacitást igényelnek.

2.7.2.1. ALOHA - AREAL LOCATIONS OF HAZARDOUS ATMOSPHERES

A 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 medencetüzeket és egyéb eshetőségeket [141]. 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 [142].

Egy n-butanol tartály lyukadásából, folyadékfelszínből való gőz képződés lehetséges terjedését vizsgálták ALOHA 5.0, illetve DNV Phast 6.6. szoftverrel, amely során az ALOHA nagyon kevés bemeneti adatot igényelt, ezért feltételezései néha eltérnek a gyakorlati forgatókönyvektől, a Phast szoftverhez képest, de még így is megfelelő tűrésen belül van a másik szoftver eredményeihez képest [143]. Másik kutatás során, egy kőolaj finomító csővezetékének lehetséges szkenárióit vizsgálták az ALOHA szoftverrel, amely során a finomító két útvonalán is 20-40 méteres kiterjedésben veszélyességi övezeteket tudtak azonosítani, míg harmadik útvonalon valószínűleg már nem jelent veszélyt az emberekre [144]. Alkalmazták az ALOHA 5.4.7 legutolsó kiadását, egy olyan esettanulmányhoz, ahol egy LPG-tartálykocsi balesetének utólagos kivizsgálását folytatták le [145]. Az elemzés során a baleset környezetében lévő biztonsági kamerák felvételeit különböző időpontból, a kialakult robbanásveszélyes légkör robbanását követő elemek, repeszek és az épületek károsodását vizsgálták az ALOHA szoftverrel és a TNO multi-energia módszerrel, amelyek eredményeit utólagosan validálták balesettel, mivel valóban ezeket a következményeket jósolta volna meg az ALOHA szoftver és a TNO multi-energia módszer is. A disszertációm 3. fejezetében mutatom be a kutatásom egyik pontját, ahol párolgás kísérlettel vizsgáltam az ALOHA szoftverrel.

2.7.2.2. BREEZE – BREEZE INCIDENT ANALYST

Az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége, valamint az amerikai hadsereg és parti őrség által 1987-ben kifejlesztett szoftver, amely magában foglalja a mérgező és robbanásveszélyes gázok terjedési modelljeit, a hősugárzási tűzszimulációkat, robbanási modelleket, a hozzájuk tartozó matematikai modellekkel [146]. A BREEZE egyik fő jellemzője a 3D Analyst, amely lehetővé teszi az eredmények vizualizálását, továbbá támogatja az exportálást Google Earth-be, hasonlóképpen, mint az ALOHA szoftver. Mindazonáltal táblázatos formában, két dimenzióban is megjeleníthetők benne a szimulációs eredmények. Mivel nem numerikus áramlástani modellekkel dolgozik a szoftver, gyorsan futtatható. A vegyi anyagok kibocsátásának vizsgálatára beépített kémiai adatbázissal is rendelkezik, amely képes keverék terjedésének a modellezésére is.

Kocsis Zoltán és munkatársai [147] a szoftver segítségével vizsgálták egy vízmentes ammónia által a hűtőházakban jelentett összes lehetséges veszélyt. A terjedési modellezéssel megjósolták az 51-141 méteres tartományban lévő veszélyeztetett zónákat és a vízmentes ammóniát érintő balesetek valószínű következményeit, amelyek bemenő adatokat szolgáltathatnak biztonságtechnikai intézkedésekhez.

2.7.2.3. DNV PHAST – PROCESS HAZARD ANALYSIS SOFTWARE TOOL

A DNV Phast egy ipari szintű veszélyelemző és következménymodellező szoftver, amelyet főként veszélyes anyagok szivárgásának és terjedésének, medence párolgás, tűz- és robbanás hatásainak értékelésére használható. Wiltox és munkatársai [148] tanulmányukban összegyűjtötte a szoftverben beépített és alkalmazott modelleket, azokat ellenőrizték, amely kiterjedt a validálásukra is. A szoftver

alkalmazhatósága szerinti különböző területekre vonatkozó részletes műszaki és tudományos leírások a gyártó honlapján [149] könnyen elérhetők mindenki számára.

A szoftver alapvetően a nem numerikus áramlástani modellekre épül, de követve a piaci igényeket a 8.6 verziójában belekerült a numerikus áramlástani (CFD) szimulációs lehetősége a medence tűz modellezés esetében. Ez tovább bővült a sugártűzzel – jet fire – a 8.7 verzióban, majd 2023-ban a 9.0, jelenleg is legutolsó verziójában a más CFD szoftverek tekintetében jól ismert terjedési modullal is. Alap esetben a verziók nem rendelkeznek a CFD modulokkal, ezt külön kiegészítésként lehet kérni a licenszhez. Széles körű kémiai adatbázissal rendelkezik, amely képes kezelni a keverékek kémiai és fizikai tulajdonságait és azt implementálni különböző szkenáriókban. Az eredmények vizuális megjelenítése a szoftver 8.2 verziója óta már három dimenzióban is lehetséges, nem csak két dimenzióban.

Mivel a szoftver alkalmazható a technológiai berendezés szintű, kis mértékű kibocsátások és azok terjedésének a vizsgálatára, kutatásokat végeztek robbanásveszélyes térségek meghatározására vonatkozó szabványi háttér összehasonlítására. Kumar Bhana A. és munkatársai [150] a desztinációjukban alkalmazható szabványt a DNV Phast 8.71 verziójával hasonlítottak össze egy technológiai egység robbanásveszélyes térségeit. Megállapították, hogy a szimulációs környezettel pontosabban meg lehet becsülni a robbanásveszélyes zónák kiterjedését a szabványhoz képest. Zohdirad H. és munkatársai [151] szintén konkrét esetet vizsgáltak, amely alapján azt a következtetést vonták le, hogy a kumulatív kibocsátási források figyelembevételével és jellemző szélirány valószínűsége alapján nagyon pontos zónahatárokat tudtak megállapítani.

A szoftver a lokális környezeten túl, megfelelő módszertannal rendelkezik globális folyamat- és iparbiztonsági elemzésekre [152]. Kritikus pont a gáz- és gőzkoncentráció érzékelők megfelelő elhelyezése egy technológiai területen, mivel számos külső tényező befolyásolja a helyes működésüket és mindazonáltal amikor már esetleges érzékelés valósul meg, amely elér egy jelzési szintet, fontos az optimálás és elvárt időben történő biztonságtechnikai intézkedés. Meysami H. és munkatársai [153] ezen lehetséges legrosszabb esetre történő gázkoncentráció érzékelő telepítésre alkalmazták a szoftvert. Esfancian H. és munkatársai [154] tanulmányukban egy benzintartálynak a különböző szkenárióit vizsgálták, mint például a kis és közepes szivárgás, az állandó kibocsátási sebesség és a teljes törést modellezték Phast szoftverrel, majd a sugárzás vagy a nyomáshullám intenzitása szerint meghatározták az egyes biztonságos távolságokat.

2.7.2.4. SUPERCHEMS™ FOR DIERS (DESIGN INSTITUTE FOR EMERGENCY RELIEF SYSTEMS)

A SuperChems™ for DIERS szoftvert az ioMosaic Corporation fejlesztette ki, amelyet az American Institute of Chemical Engineers (AIChE) DIERS csoportja választott a vészhelyzeti nyomáscsökkentő és fáklyarendszerek tervezésének szabványos eszközévé.

Felépítését tekintve hasonul az ALOHA és BREEZE szoftverekhez, amelyek szintén az Amerikai Egyesült Államokhoz köthető fejlesztések. Lehetővé teszi a komplex kémiai reakciók dinamikus szimulációját, figyelembe véve a többkomponensű rendszerek sajátosságait. Képes pontosan meghatározni a fázisegyensúlyi állapotokat, amelyek kritikusak a nyomáscsökkentő rendszerek tervezésében.

A szoftver jól alkalmazható az égés- és robbanástechnikai tulajdonságok vizsgálatához, amely elengedhetetlen a tervezés és diagramok elkészítéséhez [155, 156], de vizuális megjelenítésre nem képes.

2.7.2.5. SLAB VIEW

A SLAB View egy olyan terjedés szimulációs szoftver, amelyet kifejezetten a levegőnél sűrűbb gázok kibocsátásának vizsgálatára fejlesztettek ki. A modellt az Amerikai Környezetvédelmi Ügynökség (EPA) támogatásával hozták létre. A szoftverben alkalmazott háttér egyenletek a hozzá tartozó kézikönyvben találhatók meg [157]. Mint az ALOHA, BREEZE, SuperChems szoftverekhez hasonlóan felhasználóbarát, grafikus interfésszel ellátott változata informatív két- és háromdimenziós ábrák megjelenítésére.

Luo Q. és munkatársai [158] kitermelő kutak esetleges kitörési balesetével járó gázfelhő eloszlást és különböző távolságaiban megjelenő koncentrációit vizsgálták, amely kapcsán arra a következtetésre jutottak, hogy az SLAB View könnyen és gyorsan képes szimulálni, de nem veszi figyelembe az összetett terepi viszonyok diffúzióra gyakorolt hatását, ezért további kutatást és ellenőrzést igényelne, hogy alkalmas-e az irányítatlan lefúvatások diffúziójának szimulálására bonyolult hegyvidéki terepviszonyok között is. Mérgező gázok vészhelyzeti körülmények közötti gyors szimulációs megoldására Wen-meí Gai és munkatársai [159] megfelelőnek vélik az SLAB View szoftvert, de legpontosabb meghatározások tekintetében a CFD alapú szimulációs szoftverek jelentik a legjobb megoldást. Az SLAB View lehetőséget biztosít arra, hogy mint nyílt forráskódú szoftver, az alap egyenleteket kibővítve további algoritmusok készíthetők. Yue Li és munkatársai [160] úgy fejlesztették tovább a szoftvert (SLABi néven), hogy figyelembe képes venni a légmozgás vektorainak időbeli változását, továbbá egy szivárgás során képes négy különböző típusra - sűrített gázkibocsátás, gázfázisú kibocsátás, folyadékfázisú kibocsátás, kétfázisú kibocsátás - már automatikusan számolni, ezzel csökkentve az egységes kibocsátási sebességbecslési eljárások hiányából eredő hibákat és bizonytalanságokat. Látható, hogy ez a szoftver alapján véve csak globális kiterjedésre használható.

2.7.3. ROBBANÁSVESZÉLYES TÉRSÉGEK MEGHATÁROZÁSA ANALITIKAI ÖSSZEFÜGGÉSEK ALKALMAZÁSÁVAL

Az utóbbi, közel 40 évben több olyan analitikai összefüggés született, amelyekkel meghatározhatók a robbanásveszélyes térségek, azaz a robbanásveszélyes zónák kiterjedése. A 2.11. táblázat foglalja össze a jellemzőket. A táblázatban található 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 [119], amely korábbi kutatásain is alapszik, a CEI 31-35 (2012) [23] szabvány alkalmazza.

Szakirodalmi forrás	Összefüggés
McMillan [70]	$X_{kit} = 2,1 \cdot 10^3 \left[\frac{W_g}{ARH^2 \cdot M^{1,5} \cdot T_{bel}^{0,5}} \right]^{0,5} \quad (2.51.)$
	A kritikus áramlás alatti kibocsátások esetén alkalmazandó.
	$X_{kit} = 10,8 \cdot \left[W_g \cdot \frac{T_{bel}}{ARH \cdot M} \right]^{0,55} \quad (2.52.)$
	A kritikus áramlás fölötti kibocsátások esetén alkalmazandó.
Tommasini [119]	$X_{kit} = 5,2 \cdot \sqrt{P_{bel} \cdot S} \cdot \frac{K_z}{ARH} \cdot M^{-0,4} \quad (2.53.)$
	CEI 31-35 (2012) szabvány által elfogadott és alkalmazott egyenlet. $K_z = \frac{k_1 \cdot C}{e^{M \cdot ARH}}$ szorzó tényező C = távolban felvett gázkoncentráció értéke. k_1 = hidrogén esetében 13, többi gáz esetében 82.
Souza és munkatársai [118]	$X_{kit} = k \cdot \frac{d_{rés}}{ARH} \sqrt{\frac{P_{bel}}{T_{bel} \cdot W_g}} \quad (2.54.)$
	$k = 0,11$ konstans.
CPR 14E Revision history of the 'Yellow Book' [71]	$X_{kit} = \frac{\left(\frac{50,5 + 48,2 \cdot \rho'_{ga} - 9,95 \cdot \rho'_{ga}{}^2 + 23 + 41 \cdot \rho'_{ga}}{50,5 + 48,2 \cdot \rho'_{ga} - 9,95 \cdot \rho'_{ga}{}^2} \right) - (1 - \rho'_{ga}) \cdot Y_m^{ARH}}{k \cdot \left(\frac{Y_m^{ARH}}{d_{eq}} \right) \cdot \left(\frac{\rho'_{ga}}{(\rho'_{eq})^{\frac{1}{2}}} \right)} - x_{vo} \quad (2.55.)$
	$k = 0,32$ konstans. $x_{vo} = \frac{\left(\frac{50,5 + 48,2 \cdot \rho'_{ga} - 9,95 \cdot \rho'_{ga}{}^2 + 23 + 41 \cdot \rho'_{ga}}{23 + 41 \cdot \rho'_{ga}} \right) \cdot (\rho'_{eq})^{-1} + \rho'_{ga}}{\left(\frac{0,32}{d_{eq}} \right) \cdot \left(\frac{\rho'_{ga}}{(\rho'_{eq})^{\frac{1}{2}}} \right)} - \text{virtuális origótól mért távolság.}$
Long [87]	$X_{kit} = k \cdot \left(\frac{d_{eq}}{Y_m^{ARH}} \right) \cdot \left(\frac{\rho_e}{\rho_{ga}} \right)^{\frac{1}{2}} - x_{vo} \quad (2.56.)$
	$k = 6$ Long modell egyik konstansa. $x_{vo} = k_1 \cdot d_e \left(\frac{\rho_e}{\rho_{ga}} \right)^{\frac{1}{2}}$ virtuális origótól mért távolság. Kritikus áramlás alatti kibocsátások esetén javasolt az alkalmazása.
Ewan és Moodie [86]	$X_{kit} = \frac{k_1 \cdot \ln(1 - Y_m^{ARH}) - 1}{\ln(1 - Y_m^{ARH}) \cdot \left(\frac{k_2}{r_{eq}} \right) \cdot \left(\frac{\rho_{ga}}{\rho_{eq}} \right)^{\frac{1}{2}}} - x_{vo} \quad (2.57.)$
	$k_1 = 0,7$ Ewan és Moodie modell egyik konstansa. $k_2 = 0,104$ Ewan és Moodie modell egyik konstansa. $x_{vo} = \left(\frac{k_2}{k_1} \right) \cdot \left(\frac{\rho_{ga}}{\rho_{eq}} \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot r_{eq} - x_b$ virtuális origótól mért távolság. $x_b = 0,77 \cdot 10^{-3} \cdot d_e \cdot 0,068 \cdot (d_e \cdot 10^{-3})^{1,35} \cdot \left(\frac{P_{bel}}{P_{atm}} \right)$ sugár hossza. Kritikus áramlás feletti kibocsátások esetén javasolt az alkalmazása.

2.11. táblázat: Analitikai összefüggések robbanásveszélyes térségek kiterjedésére (szerző szerkesztése)

Az aktuálisan érvényes MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 [17] szabvány, amely tartalom tekintetében közel megegyezik az 2016-os verzióval, csak még egy biztonsági tényezőt alkalmaz a robbanásveszélyes térségek meghatározásának módszertanában, egy diagram segítségével az X-tengelyről a kiszámolt kibocsátási karakterisztika három különböző egyenesre vetítve az Y-tengely metszésén megadja a robbanásveszélyes térség kiterjedését. A három különböző egyenes, a kibocsátások különböző jellegét jelentik, amelyeket CFD szimulációkkal határoztak meg. Valamint a szabvány korábbi verziója és 2.11. táblázatban szereplő összefüggések biztonsági tényezőt is tartalmazhatnak, amely részben kikerültek már.

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 [161]. 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] az MSZ EN 60079-10-1:2009-es szabvány eredményeit – amely még részben robbanásveszélyes koncentráción 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

A két tanulmány eredményeinek a kivonata a 2.12. táblázat összegzi.

Tommasini				Ewan és Moodie				Howard és munkatársai		
Összefüggés [m]	MSZ EN 60079-10-1:2016 [m]	CFD[m]	Átlagos különbség [%]	Összefüggés [m]	MSZ EN 60079-10-1:2016 [m]	CFD [m]	Átlagos különbség [%]	MSZ EN 60079-10-1:2009 [m ³]	CFD [m ³]	Átlagos különbség [x]
0,019	1,0	0,018	5,6	0,023	1,0	0,018	27,8	1,81	0,034	53,2
0,048	1,0	0,045	6,7	0,057	1,0	0,045	26,7	1,42	0,103	12,78
0,193	1,0	0,179	7,8	0,227	1,0	0,179	26,8	5,64	0,42	13,42
0,242	1,0	0,223	8,5	0,254	1,0	0,223	13,9	1,42	0,23	6,17
0,483	1,0	0,447	8,1	0,567	1,0	0,447	26,8	5,64	0,52	10,84

2.12. táblázat: A robbanásveszélyes térségek és CFD eredmények összehasonlítása – 1 (szerző szerkesztése)

Souza [162] 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 méretet, amely eredményeit a 2.10. táblázat szemlélteti. 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. Meg kell jegyezni, hogy az alacsony nyomások esetében kisebbek az eredmények közt a százalékos eltérések, amely a 2.10. táblázatban szerepel.

Gant és munkatársai [163] szintén CFX szoftverrel metán szivárgására végeztek kutatásokat, ahol 5-2,5-0,5 bar(g) nyomás értékek esetén 5 mm² résen keresztül történő kiáramlásokat vizsgáltak. A tanulmányukban propán, bután terjedését is elemezték, különböző légáramlás intenzitás szerint.

Propán kibocsátás, különböző változók kombinatorikája szerint, HEM-DEA [164] algoritmusok alapján, amelyek szkenáriói a nagy résméret, eltérő nyomás, eltérő közeg hőmérséklet terjed ki, nagy méretű robbanásveszélyes térségeket vizsgáltak, amelyeket még az MSZ EN 60079-10-1:2016 szabvány megengedett, de az extrapolálás már a 2021-es verziótól kezdődően nem lehetséges.

Előbb meghivatkozott kutatások eredményeit a 2.13. táblázat tartalmazza.

Souza				Gant és munkatársai			HEM – DEA		
Összefüggés [m]	MSZ EN 60079-10-1:2016 [m]	CFD[m]	Átlagos különbség [%]	MSZ EN 60079-10-1:2009 [m ³]	CFD [m ³]	Átlagos különbség [x]	Algoritmus [m]	MSZ EN 60079-10-1:2016 [m]	Átlagos különbség [%]
0,009	1,0	0,007	28,6	12,3	0,094	130,9	8,51	13,08	53,7
0,022	1,0	0,018	22,2				10,54	17,74	68,3
0,087	1,0	0,073	19,2	7,22	0,043	167,9	19,25	36,83	91,3
0,108	1,0	0,093	16,1				21,20	44,23	108,6
0,216	1,0	0,184	17,4	2,98	0,015	198,7	22,62	52,29	131,2

2.13. táblázat: A robbanásveszélyes térségek és CFD eredmények összehasonlítása – 2 (szerző szerkesztése)

A bemutatott kutatások eredményeiből jól látszik, hogy bár a szabványos módszerek egyszerűen alkalmazhatók, sok esetben jelentős eltérést mutatnak a CFD-szimulációkhoz képest. Tommasini [119] és Ewan–Moodie [86] modelljei például rendre nagyobb robbanásveszélyes térséget eredményeznek, mint amit a számítógépes elemzések mutattak, míg Howard és munkatársai vizsgálatai azt szemléltették, hogy bizonyos körülmények között akár többszörös különbség is kialakulhat a kétféle megközelítés között. Ez részben annak köszönhető, hogy az MSZ EN 60079-10-1 szabvány és más szabványok is egyébként egy biztonsági tartalékot használnak a módszertani eljárásukban, így inkább konzervatív irányba tereli az értékelést.

Fontos azonban látni azt, hogy nincs „minden helyzetre érvényes” modell: a közeg típusa, a nyomás, a hőmérséklet és a kiáramlás jellemzői mind erősen befolyásolják az eredményeket. Emiatt a gyakorlatban a szabványos számítások mellett a CFD-alapú vizsgálatok nagy segítséget nyújtanak, mert részletesebb képet adnak a veszélyes zónák alakulásáról. A kettő együtt alkalmazva adhatja a legmegbízhatóbb alapot a biztonsági intézkedések megtervezéséhez, mivel a kapott értékelésekből vonható le egyértelmű következtetés.

3. KUTATÁSI EREDMÉNYEK

3.1. FOLYADÉK PÁROLGÁS KÍSÉRLETI ÉS SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA

Ebben az alfejezetben 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. Ezen eredmények a P1, P4 publikációkban jelentek meg. 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.

3.1.1. AZ ACETON PÁROLGÁS SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA

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.

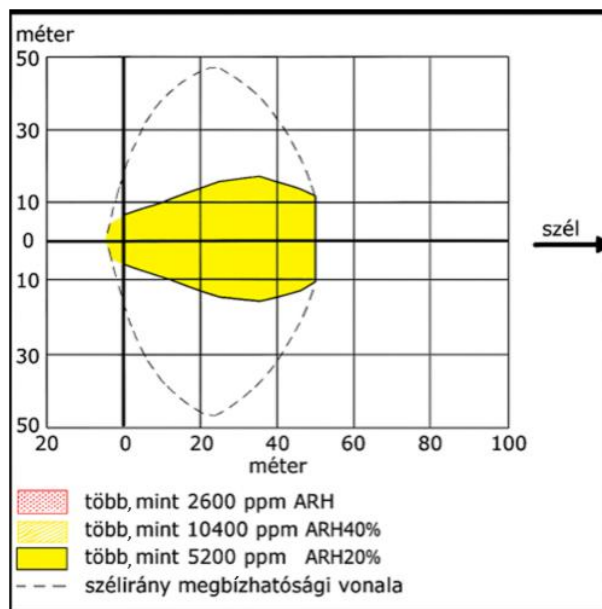
Az ALOHA szoftverben az eredmények vizuális megjelenítéséhez sokkal nagyobb effektív felületre volt szükség. A vizsgált területre vonatkozóan összegyűjtöttem a rendelkezésre álló időjárási adatokat egy esettanulmány modellezéséhez. A 3.1. táblázat foglalja össze az esettanulmány peremfeltételeit, amelyek a modell létrehozásához szükségesek voltak. A területen az átlagos légáramlás 2-8 m/s. A szimulációban a legalacsonyabb, leggyakrabban előforduló értéket vettem figyelembe.

Talaj érdessége	Nyílt terep	Felhőzet	Nincs
Talaj hőmérséklete	35°C	Folyadékfelszín hőmérséklete	20°C
Légáramlás	2 m/s	Folyadékfelszín	290 m ²

3.1. táblázat: A nagy folyadékfelszínű aceton esettanulmány szimulációjának peremfeltételei (szerző szerkesztése)

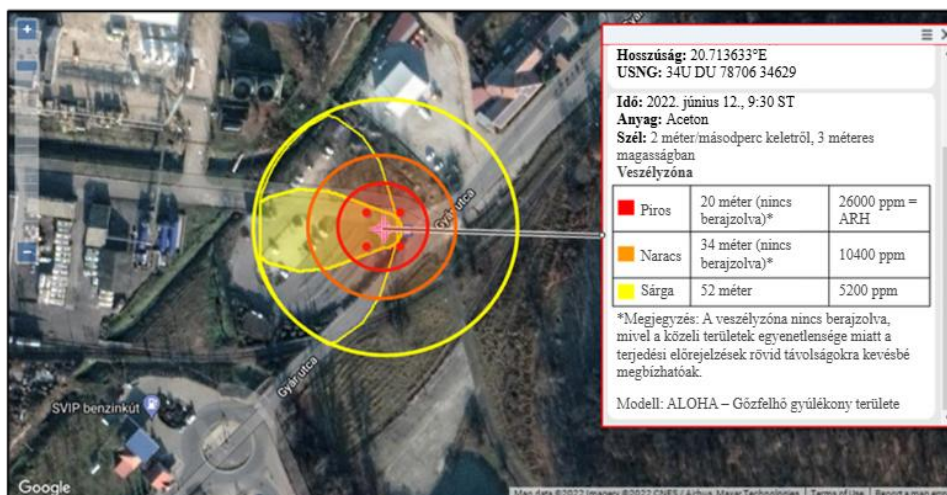
Az esettanulmány szimuláció során, amely például egy hengeres acéltartály szintellenőrzési hibája esetén képződhet, a kezdeti párolgás mértéke 77,2 kilogramm/perc a 290 m² felületről, amely az idő elteltével a felület arányában folyamatosan csökken. A vizsgált peremfeltételek szerint a párolgás

mértékéből a nehézgázmodell alapján meghatároztam a gőz terjedését a szoftverrel, amelyet a 3.1. ábra mutat. A 3.1. 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.



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

A 3.2. 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 konzervativizmust tartom szem előtt, ezért a veszélyes területek ábrázolását körre bővítettem.



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

Az alsó robbanási határon belül, ha valamilyen formában effektív gyújtóforrás van jelen, nagy a valószínűsége annak, hogy robbanás következik be, de a robbanási kockázat értékelésekor műszaki és szervezési intézkedésekkel, például gázkoncentráció érzékelő jelzési szintjéhez tartozó akusztikai és fényjelzéssel figyelmeztetni lehet a területen tartózkodókat a kezdeti potenciális veszélyről.

3.1.2. A KÍSÉRLETI KÖRNYEZET FELÉPÍTÉSE

A párolgás mértékének vizsgálatához analitikus mérleget használtam. Ez a berendezés 0,2 másodperceként rögzítette az üvegtégelyben lévő aceton tömegét, ezáltal kellő mennyiségű mért adatot kaptam az aceton mennyiségének változásáról. Amikor 22-25°C hőmérsékletű légáramlással végeztem a méréseket, a mérleg nagyon érzékeny volt, a mérési adatok, azaz a folyadék tömeg értékei a légsebesség miatt folyamatosan ingadoztak. A kísérleti környezetet a 3.3. ábra szemlélteti, részletezve a különböző egységeket, amelyek a Miskolci Egyetem Vegyipari Gépészeti Intézeti Tanszékének a műhelyében találhatók. Mivel nem lehetett látni egyértelműen, hogy mikor párolgott el az aceton, folyamatosan szemrevételezéssel kellett ellenőrizni a folyadék mennyiségét.



3.3. ábra: Kísérlet felépítése

1- analitikus mérleg, 2-üvegtégely, 3-légcsatorna (szerző szerkesztése)

A folyadék felület és a környezeti hőmérséklet mind a négy mérésnél (légáramlás nélkül, 2 m/s, 4 m/s, 6 m/s) azonos volt, de a kezdeti tömeg értékek nem mindig voltak megegyezők, de ez nem befolyásolta a kiértékelés során a párolgás mértékét.

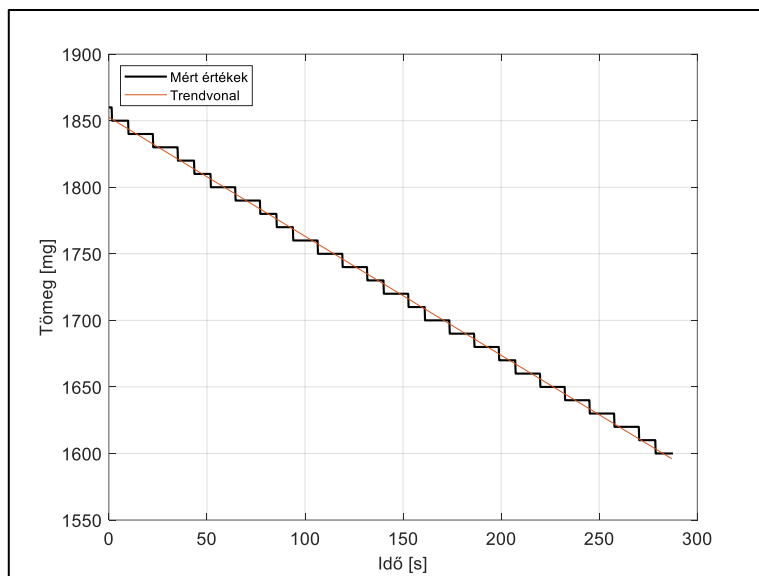
3.1.2.1. PÁROLGÁS MÉRTÉKE LÉGÁRAMLÁS NÉLKÜL

A mérés során alkalmazott folyadék felületet (A_{foly}), környezeti hőmérsékletet ($T_{körny}$), az aceton tömegét a mérés kezdetén (m_{kezd}) és végén ($m_{vég}$), illetve a vizsgált párolgási időt (t_{vizsg}) a 3.2. táblázat foglalja össze.

A_{foly} [m ²]	$T_{körny}$ [°C]	m_{kezd} [mg]	$m_{vég}$ [mg]	t_{vizsg} [s]
0,00096	33	1860	1600	287,6

3.2. táblázat: Párolgási kísérlet adatai légáramlás nélküli esetben (szerző szerkesztése)

A tömegváltozás, amelyből a folyadékfelszín párolgásának a mértéke meghatározható a 3.4. ábrán látható.



3.4. ábra: Tömegváltozás mértéke légáramlás nélküli kísérletnél (szerző szerkesztése)

A vizsgált időintervallumban a folyadék felületéről elpárolgott mennyiség az idő függvényében átlagosan $W_{\text{pár}} = 0,904 \text{ mg/s}$ volt.

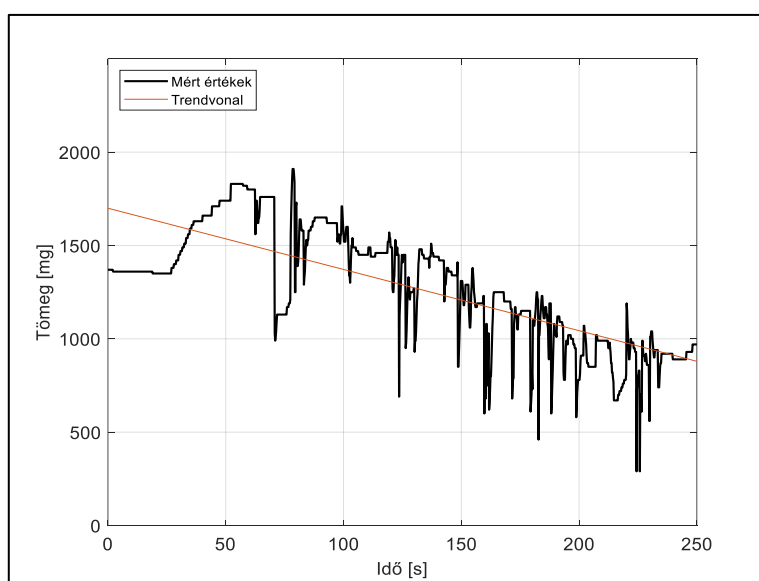
3.1.2.2. PÁROLGÁS MÉRTÉKE 2 M/S LÉGÁRAMLÁSNÁL

Abban az esetben, ha a párolgás változását már a légáramlással együtt vizsgáltam, a folyadék teljesen elpárolgott. A mérés kezdeti értékeit a 3.3. táblázat tartalmazza, amely során kisebb mennyiséget vizsgáltam, mint a légáramlás nélküli esetben. Az aceton tömegváltozását pedig a 3.5. ábra mutatja.

$A_{\text{foly}} [\text{m}^2]$	$T_{\text{körny}} [^{\circ}\text{C}]$	$m_{\text{kezd}} [\text{mg}]$	$m_{\text{vég}} [\text{mg}]$	$t_{\text{vizsg}} [\text{s}]$
0,00096	33	1370	900	222

3.3. táblázat: Párolgási kísérlet adatai 2 m/s légáramlási esetről (szerző szerkesztése)

A kísérletek azt is mutatják, hogy a párolgás mértéke változik. A párolgás a sebesség növekedésével gyorsult. Ez esetben kevesebb idő is elég volt ahhoz, hogy a folyadék teljesen elpárolgjon.



3.5. ábra: Tömegváltozás mértéke 2m/s légáramlási kísérletnél (szerző szerkesztése)

A 3.5. ábrán látható, hogy a légáramlás való kísérlet során a mérleg magas, szórt értékeket érzékelt, de a ráillesztett trendvonal jól szemlélteti, hogy a tömeg csökkent. Az idő függvényében a párolgás mértéke átlagosan, amely a légáramlás megjelenésével nőtt, $W_{pár} = 6,171$ mg/s volt.

3.1.2.3. PÁROLGÁS MÉRTÉKE 4 M/S LÉGÁRAMLÁSNÁL

A légáramlás növelésével a párolgás mértéke nőtt és megállapítottam, hogy a légáramlás növekedése arányos a párolgás mértékének növekedésével. A mérés kezdeti értékeit a 3.4. táblázat tartalmazza.

A_{foly} [m ²]	$T_{körny}$ [°C]	m_{kezd} [mg]	$m_{vég}$ [mg]	t_{vizsg} [s]
0,00096	33	2080	0	223,4

3.4. táblázat: Párolgási kísérlet adatai 4 m/s légáramlási esetről (szerző szerkesztése)

A vizsgált időszak alatt a folyadék felületéről 4 m/s-os légáramlás mellett az idő függvényében a párolgás mértéke átlagosan $W_{pár} = 9,311$ mg/s.

3.1.2.4. PÁROLGÁS MÉRTÉKE 6 M/S LÉGÁRAMLÁSNÁL

A még nagyobb légáramlás hatására az aceton még gyorsabban elpárolgott, tehát gyorsabban képződhet gyúlékony gőzfelhő, de ugyanakkor a magas légáramlás okán intenzív a hígulás (3.5. táblázat).

A_{foly} [m ²]	$T_{körny}$ [°C]	m_{kezd} [mg]	$m_{vég}$ [mg]	t_{vizsg} [s]
0,00096	33	2160	0	167,8

3.5. táblázat: Párolgási kísérlet adatai 6 m/s légáramlási esetről (szerző szerkesztése)

A párolgás mértéke az idő függvényében átlagosan $W_{pár} = 12,8$ mg/s a 6 m/s-os légáramlásnál. Igazoltam, hogy a három olyan kísérlet esetében, ahol egy adott légáramlás érintette a folyadék felületét, a párolgás mértéke megnőtt.

3.1.2.5. PÁROLGÁSI MODELLEK VIZSGÁLATA

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

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

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

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

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

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

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

Az (3.1.) és (3.2) modelleket Lars Olander [165] svéd kutató által kifejlesztett összefüggések. A (3.3) és (3.4.) modellek, utóbbiban légáramlás változója is szerepel, az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynökségének (EPA) kutatói a mérgező folyadékok mérsékelt kibocsátásaira alkották meg, amelyből

gyúlékonyak és veszélyes területet alakulhatnak ki. A festék száradási ideje és abból eredő veszélyes terület kialakulásának [166] a meghatározására a (3.5.) modell alkalmazása javasolt. A (3.6.) modell az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabványban [17] szereplő folyadék felszínek párolgási értékeinek meghatározására vonatkozó modell.

A modellek alkalmazásával kapott párolgási eredmények a 3.6 táblázatban találhatóak meg, a légáramlási értékkel együtt vizsgálva. A légáramlás nélküli vizsgálatban a Brown-mozgás [167] 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	$W_{\text{pár-1}}=1,714 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-1}}=10,332 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-1}}=17,741 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-1}}=24,341 \text{ mg/s}$
3.2. modell	$W_{\text{pár-2}}=11,838 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-2}}=74,696 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-2}}=130,053 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-2}}=179,884 \text{ mg/s}$
3.3. modell	$W_{\text{pár-3}}=4,254 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-3}}=4,254 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-3}}=4,254 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-3}}=4,254 \text{ mg/s}$
3.4. modell	$W_{\text{pár-4}}=0,904 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-4}}=5,449 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-4}}=9,356 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-4}}=12,837 \text{ mg/s}$
3.5. modell	$W_{\text{pár-5}}=0,037 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-5}}=0,221 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-5}}=0,381 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-5}}=0,523 \text{ mg/s}$
3.6. modell	$W_{\text{pár-6}}=0,058 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-6}}=0,351 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-6}}=0,602 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-6}}=0,827 \text{ mg/s}$

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

Látható, hogy a (3.3.) modell esetében, ahol nincs légáramlás az összefüggésben, minden eredmény azonos. Ezt a modellt teljesen zárt térben ajánlott használni, ahol a légáramlás szinte nulla, de ezen peremfeltételeket nehéz teljesíteni, mert az ablak vagy ajtó kinyitása és becsukása, vagy bármilyen jellegű mozgás is már légáramlást tud okozni.

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, amelyet a 3.7. táblázat foglal össze.

	u=0,2 m/s	u=2 m/s	u=4 m/s	u=6 m/s
Kísérlet	$W_{\text{pár}}=0,904 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár}}=6,171 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár}}=9,311 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár}}=12,8 \text{ mg/s}$
3.4. modell	$W_{\text{pár-4}}=0,904 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-4}}=5,449 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-4}}=9,356 \text{ mg/s}$	$W_{\text{pár-4}}=12,837 \text{ mg/s}$

3.7. táblázat: A mérések és a (3.4.) modell eredményei (szerző szerkesztése)

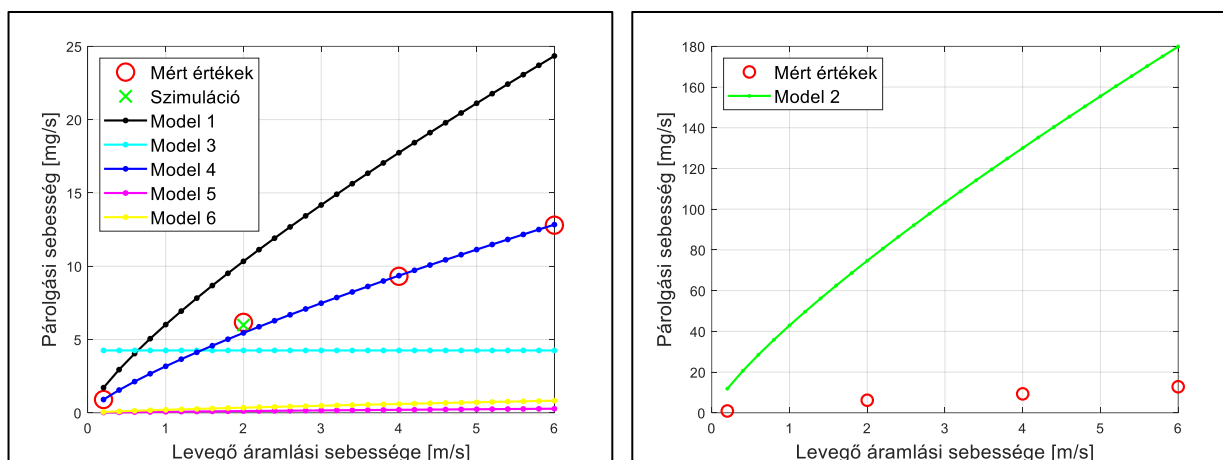
A modell eredményei nagyon közel állnak a méréshez, százalékos eltérésük alacsony, kivéve a 2 m/s légáramlás esetén, ahol 12%-os eltérést tapasztaltam.

3.1.3. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

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 3.6. ábrán láthatóak, két külön grafikonon, mivel a (3.2.) modellel végzett vizsgálat eredményei többszörösen eltér a többi modell eredményeihez képest.

A szimulációs és kísérleti eredmények összevetésével igazoltam, hogy a szoftver az aceton párolgásának tekintetében elvárásoknak megfelelő, helyesen működik, de meg kell jegyezni, hogy az átöblítési térfogat a kísérlet során sokkal kisebb és homogénebb, mint szimuláció vagy egy nyílt téri, nagyobb felszínű vizsgálat során, ahol diffúzió hatása jobban érvényesül.

Megállapítottam, hogy a szoftver valóban alkalmas veszélyes helyzetek vizsgálatára, de a robbanásveszélyes térség pontos azonosítására nem használható, mivel kizárólag globális szinten alkalmazható megfelelően.



3.6. 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. Az aceton és a hasonló kémiai és fizikai tulajdonságokkal rendelkező anyagok esetében a (3.4.) modell jó becslést adhat a folyadékfelszínről való párolgási érték meghatározására.

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 fejezet első részében bemutatom a P3 cikkben publikált hidrogén kibocsátás során a szoftverrel végzett lehetséges robbanásveszélyes légkörök és gázkoncentrációk kialakulásának, terjedésének és eloszlásának vizsgálatát. Másik robbanásveszélyes anyagra, a P8 publikációmban a propánra végeztem vizsgálatokat, ahol három kiáramlási irányban végeztem vizsgálatokat, mivel egy szivárgás során nem lehet pontosan előre tudni, hogy milyen szögben történik a kibocsátás.

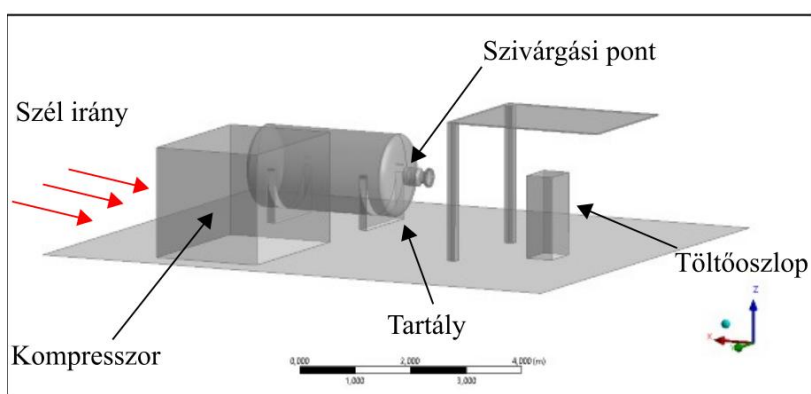
A fejezet második felében kis és nagy nyomáson megvalósuló metán kiszabadulást vizsgállok, amely során a gázfelhő terjedésének jellege kritikus áramlás alatti, illetve kritikus áramlás fölötti volt. A kétféle kiáramlás különböző áramlási jellemzőkkel rendelkezik, amelyek hatással vannak a robbanásveszélyes térség kiterjedésére, mivel a kritikus áramlás alatti kibocsátás esetén alacsony sebességű, turbulens áramlás nélküli rövid gázfelhő sugarak alakulnak ki, koncentráltabban jelenik meg a szivárgási pont közvetlen közelében. A kritikus áramlás fölötti esetben nagy sebességű, turbulens áramlású gázfelhő sugár keletkezik, amely a szivárgás helyétől távolabbra érhet el. Mindkét esetet az általam készített P6 és P7 publikációban található szimulációs modellekkel vizsgáltam és

állapítottam meg kiáramlás tulajdonságaira vonatkozó következtetéseket, amelyeknek fontos szerepe van a biztonságtechnikai, robbanásvédelem területén.

Mindegyik részben az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 [17] szabvány alkalmazásával hasonlítom össze a kapott eredményeket.

3.2.1. HIDROGÉN SZIVÁRGÁS VIZSGÁLATA KORLÁTOZOTT TERJEDÉSI IRÁNNYAL

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 vizsgálatom során egy kitalált hidrogén töltőállomás modelljét alkottam meg, amely a 3.7. ábrán látható.



3.7. ábra: A hidrogén töltőállomás geometriai modellje (szerző szerkesztése)

A hidrogén töltőállomások lehetséges veszélyeire, kockázatuk vizsgálatára FLACS-CFD szoftver segítségével 2009-ben tanulmány készült a gázfelhő és annak égésének vizsgálatára [168], valamint, 2016-ban néhány japán kutató [169] a hidrogén üzemanyag-töltő állomások tartályainak tűzbekerülését vizsgálta ANSYS Fluent szoftverben.

A vizsgálatom során a gáz kibocsátás értékét a 2.43. egyenlet segítségével határoztam meg. A vizsgálat során alacsony nyomást feltételeztem a tartályban. A szimulációban a terjedést két különböző légáramlás mellett vizsgáltam meg. Az alábbi 3.8. táblázat a szimulációs modell főbb paramétereit foglalja össze.

Légáramlás [m/s]	Nyomás [Pa]	Hőmérséklet [°C]	Tömegáram [kg/s]
2	250 000	25	0,0078
11	250 000	25	0,0078

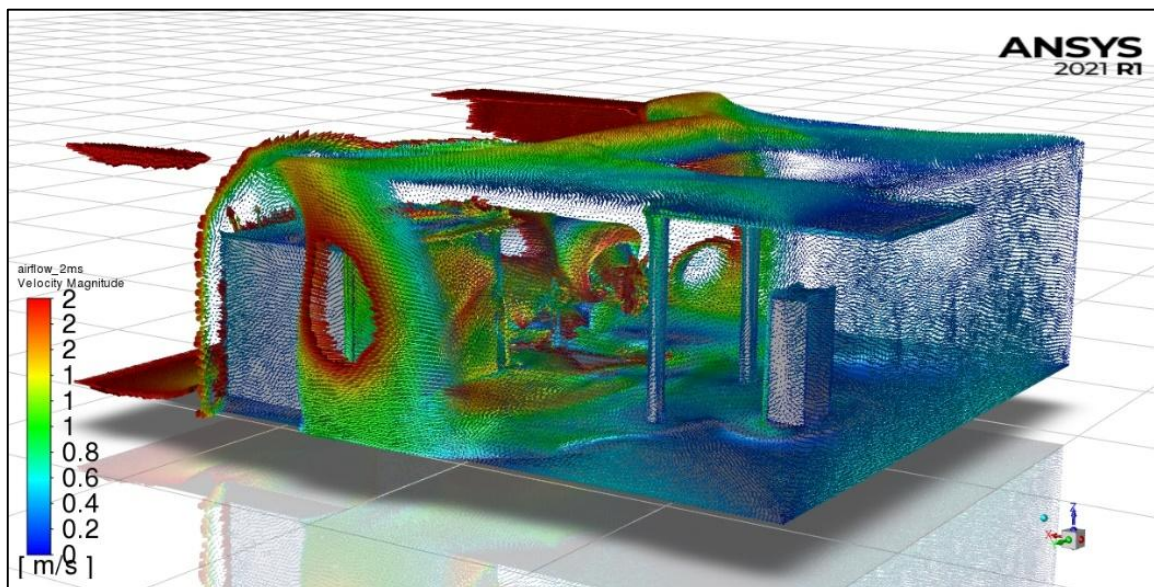
3.8. táblázat: A szimulációs modell főbb paramétereit (szerző szerkesztése)

Az ANSYS Fluent szoftverrel készített szimulációkból generált képek a program angol nyelvezet okán idegennyelvű feliratok és szövegeket tartalmaznak.

3.2.1.1. A 2 M/S SEBESSÉGŰ LÉGÁRAMLÁS HATÁSA A HIDROGÉN TERJEDÉSÉRE

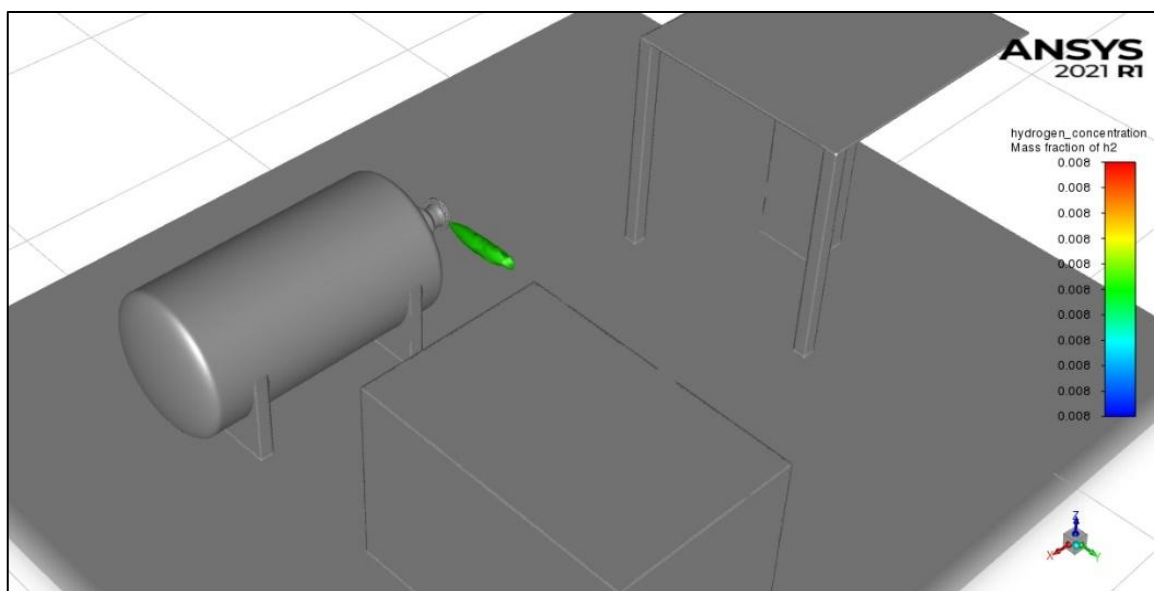
A 3.8. ábra a légáramlás eloszlását mutatja a vizsgált területen. Az alacsony légáramlás során az akadályokkal (kompresszor, tartály és töltőoszlop) való ütközés után gyakorlatilag eltűnik, elenyészően marad fenn, amely akár azt is eredményezheti, hogy a szivárgó gáz lokálisan képes feldúsulni, mivel 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.



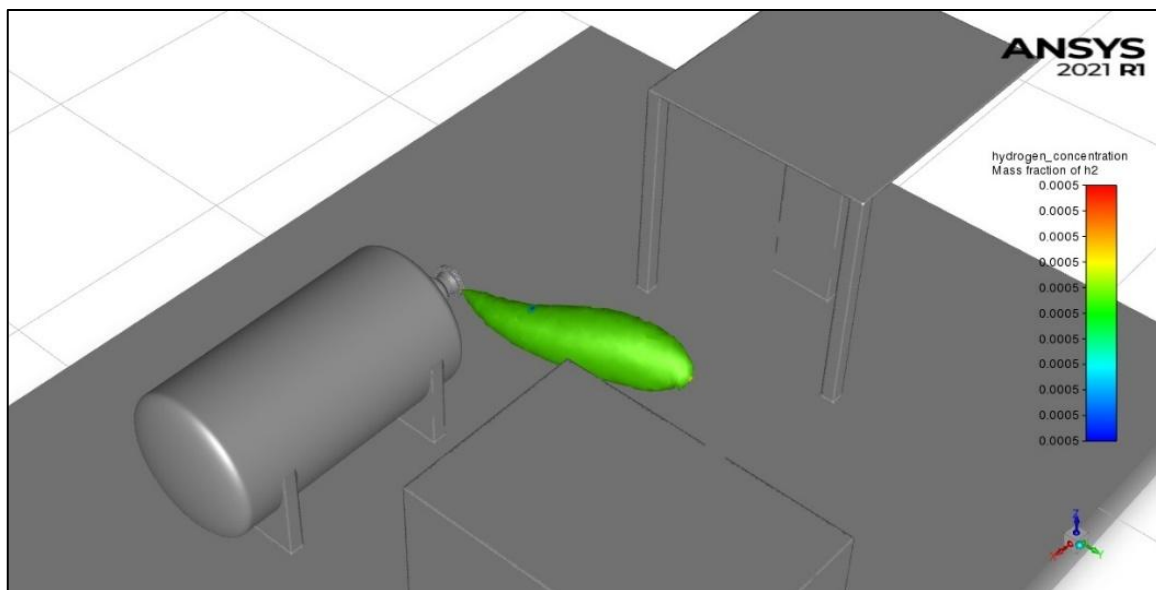
3.8. ábra: A 2 m/s sebességű légáramlás eloszlása a vizsgált környezetben (szerző szerkesztése)

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, amelyet a 3.9. ábra szemléltet.



3.9. ábra: 0,8 vol.% (ARH 20%) hidrogén terjedése 2 m/s sebességű légáramlásnál (szerző szerkesztése)

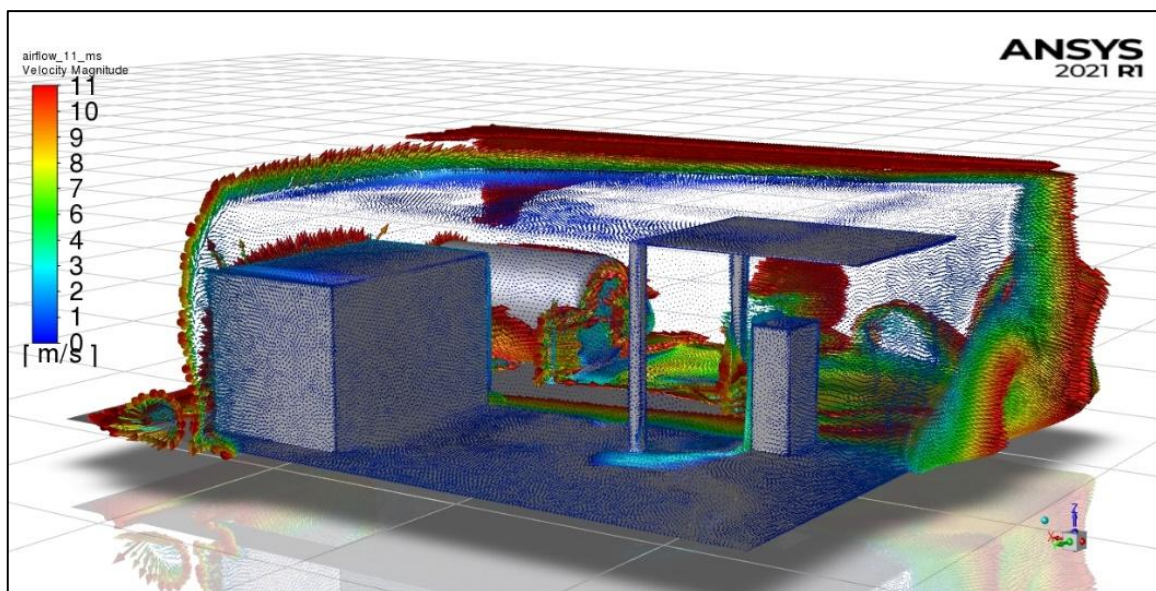
Az 3.10. ábra azt mutatja, hogy a hidrogén gázfelhő sugarának iránya nem változik 0,05 térfogatszázalékos koncentrációnál sem. Ebből az következik, hogy a vizsgált légáramlási viszonyok között a hidrogén terjedését elsősorban a kiáramlási jellemzők határozzák meg, nem pedig a környezeti légmozgás.



3.10. ábra: 0,05 vol.% hidrogén terjedése 2 m/s sebességű légáramlásnál (szerző szerkesztése)

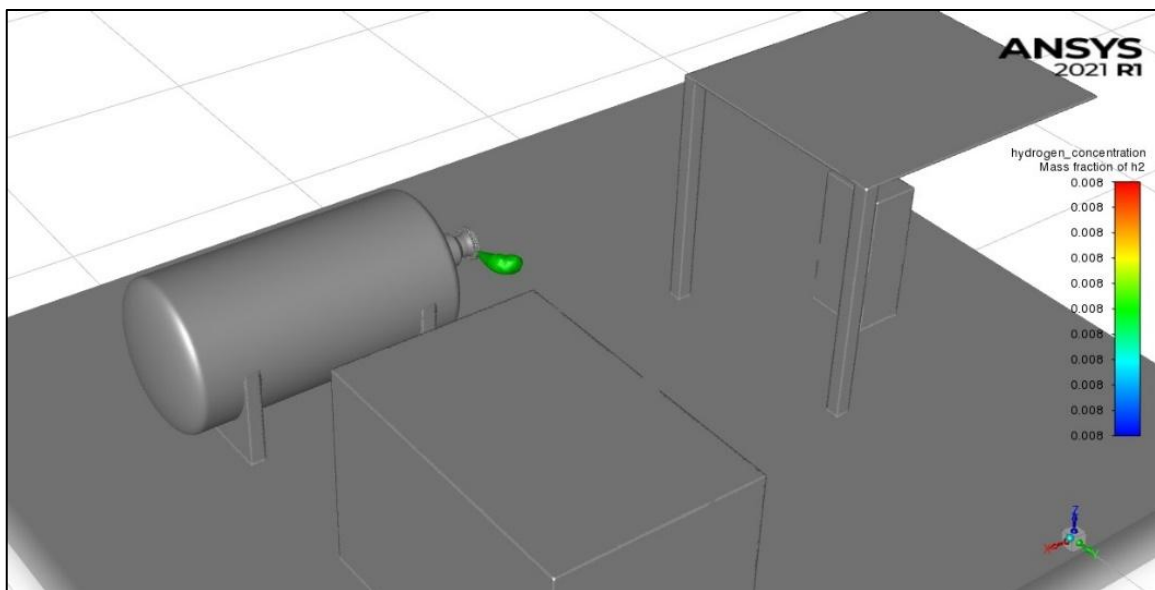
3.2.1.2. A 11 M/S SEBESSÉGŰ LÉGÁRAMLÁS HATÁSA A HIDROGÉN TERJEDÉSÉRE

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 3.11. ábrán láthatók. Az ábrán megfigyelhető, hogy az akadályok mellett az üzemanyagkútszlop és a tartály tengelyével egy vonalban maradó légáramlatok is vannak.



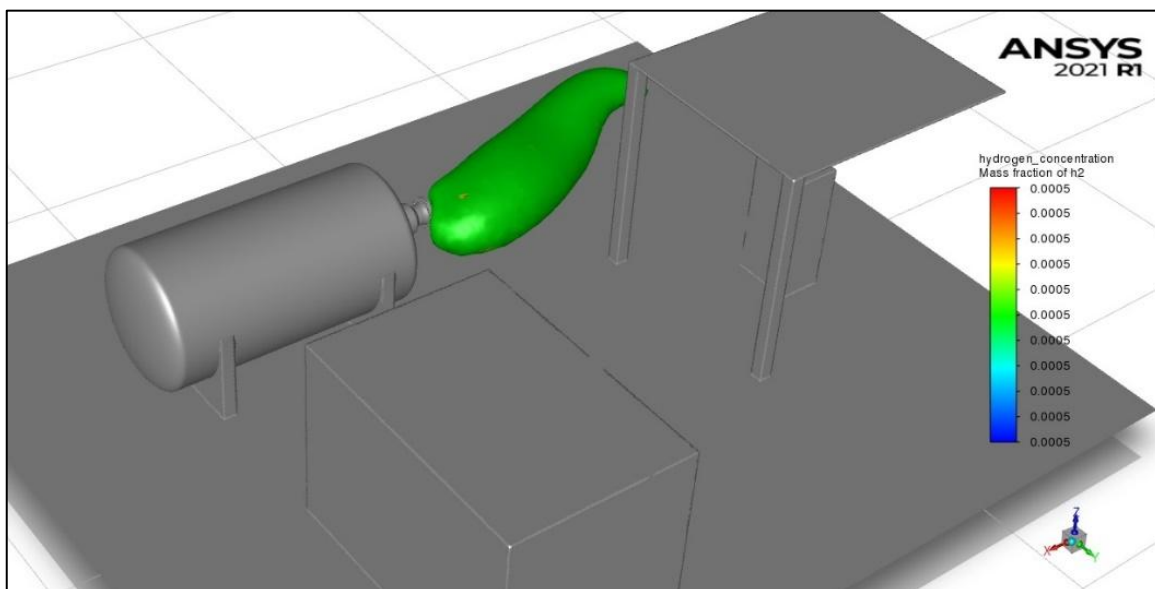
3.11. ábra: A 11 m/s sebességű légáramlás eloszlása a vizsgált környezetben (szerző szerkesztése)

Ezen peremfeltételek mellett a 3.12. ábrán látható, hogy a 0,8 térfogatszázalékos (ARH 20%) hidrogén gázfelhő sugár már tangenciálisan helyezkedik el a kibocsátó forráshoz képest. A nagyobb légsebesség hatására a gázfelhő terjedése irányítottabbá képes válni, és a szivárgási pont környezetében kialakuló légáramlás eloszlása jelentősen befolyásolja tudja a koncentrációeloszlást.



3.12. ábra: 0,8 vol.% (ARH 20%) hidrogén terjedése 11 m/s sebességű légáramlásnál (szerző szerkesztése)

A 3.13. ábrát vizsgálva az alacsonyabb koncentráció esetében már egyértelmű, hogy ez a légáram elég volt a kibocsátás terjedésének befolyásolásához.



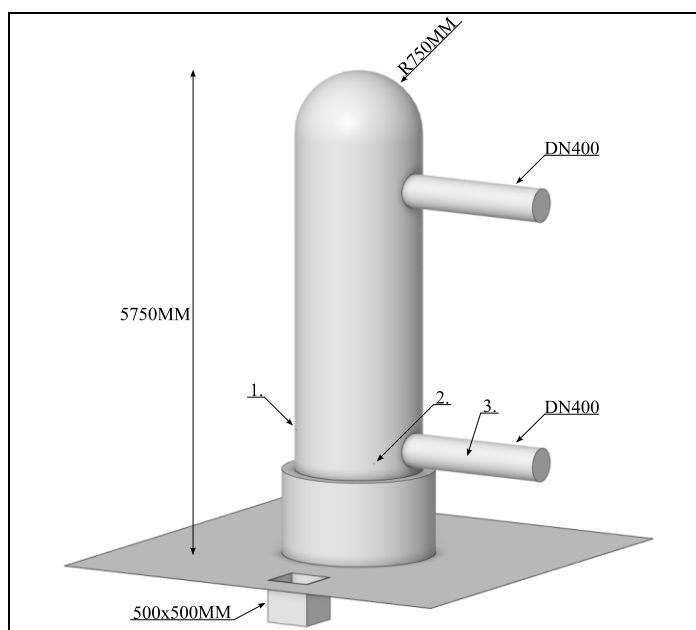
3.13. ábra: 0,05 vol.% hidrogén terjedése 11 m/s sebességű légáramlásnál (szerző szerkesztése)

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. Megfelelő felügyelet és rendszeres karbantartás mellett kevés az esélye annak, hogy a hidrogén üzemanyag-töltő állomás körül robbanásveszélyes térség alakuljon ki, ha a légáramlás iránya megegyezik ezen irányokkal.

3.2.1.3. PROPÁN KIBOCSÁTÁS VIZSGÁLATA ELTÉRŐ KIÁRAMLÁSI IRÁNYOK ÉS KÜLÖNBÖZŐ LÉGÁRAMLÁSOK FÜGGVÉNYÉBEN

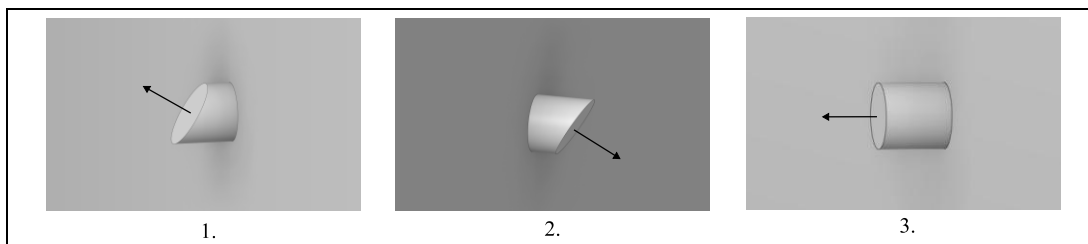
Megvizsgáltam levegőnél nehezebb gáz, propán terjedését eltérő kiáramlási irányok és különböző légáramlások esetében. Mivel ahogy már disszertációm szakirodalmi áttekintésében (2.7.1. fejezet) és a kutatási eredmények bemutatásánál is írtam, a légáramlásnak jelentős szerepe van a gázok terjedésében, de egy szivárgás során a kiáramlás iránya is fontos, amelyek vizsgálatára szimulációs modelleket készítettem.

A 3.14. ábrán látható geometriai modellben a propán gázfázisa jelen lehet a propán-propilén szétválasztó kolonna alsó harmadában.



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

A három azonos méretű, 5 mm átmérőjű kibocsátó forrást a 3.14. ábrán 1., 2. és 3. számokkal jelöltem, amelyek nagyobb nézetei a 3.15. ábrán láthatók.



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

A szimulációval végzett vizsgálatom célja az volt, hogy ezeket a terjedési lehetőségeket külön-külön is elemezzem, valamint összehasonlítsam őket az alsó robbanási határkoncentráció, valamint a diffúzió okozta kúpos eloszlás esetén a különböző légáramlások függvényében. A 3.9. táblázat a szimulációs modell peremfeltételit tartalmazza.

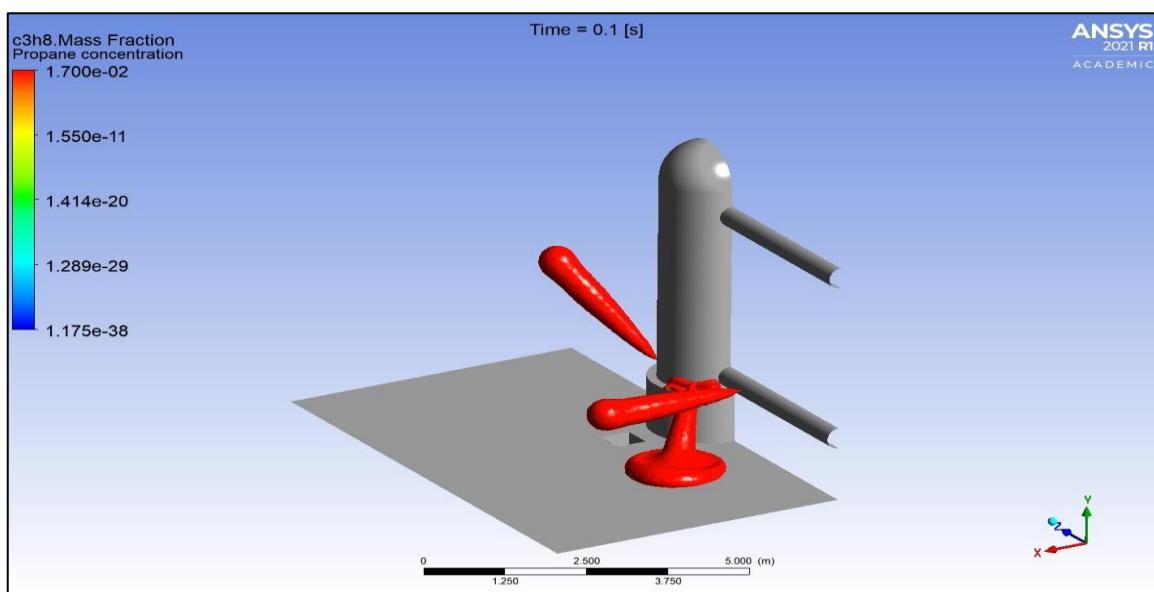
Peremfeltételek			
Háló	Polyhedral		
Szimuláció időbeli lefutása	Tranziens		
Turbulencia modell	SST $k - \omega$		
Gáztörvény	Ideális gáz		
Közeg hőmérséklete	25°C		
Közeg nyomása	1 000 000 Pa		
Környezeti hőmérséklet	30°C		
Légáramlás	2 m/s	10 m/s	20 m/s

3.9. táblázat: Propán terjedés szimuláció vizsgálat peremfeltételei (szerző szerkesztése)

A közeg belső nyomása 1 000 000 Pa (10 bar), amely a 2.43. egyenlet alapján 0,205 kg/s tömegáramot jelent.

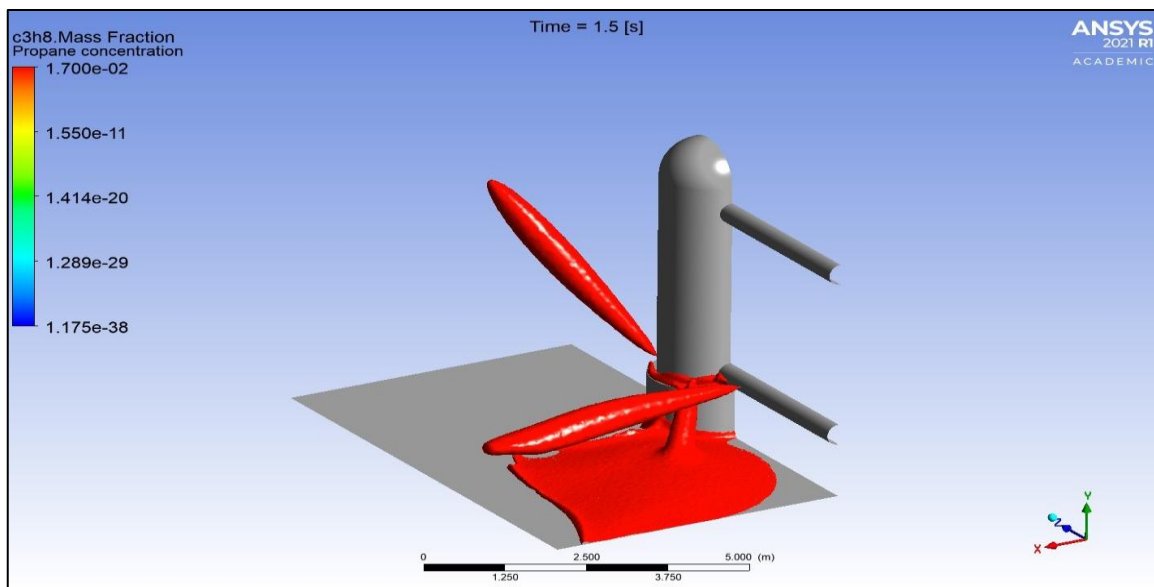
3.2.1.4. A 2 M/S SEBESSÉGŰ LÉGÁRAMLÁS HATÁSA A PROPÁN TERJEDÉSÉRE

A legalacsonyabb értéken vizsgált légáramlás a kezdeti időpillanathoz képest a nagy kiáramlási sebesség ellenére is hatással volt az alsó robbanási határkoncentrációjú (1,7 vol.%) gázközeg terjedésére, amelyeket a 3.16. és 3.17. ábra mutat be. A lefelé irányuló gázközeg esetében a talajszinten látható a terjedés. A normál irányú kibocsátó forrásnál a gáz iránya az idő előrehaladtával fokozatosan lefelé kezd el mozdulni, mivel a propán relatív sűrűsége kisebb, mint a levegőé.



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

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.

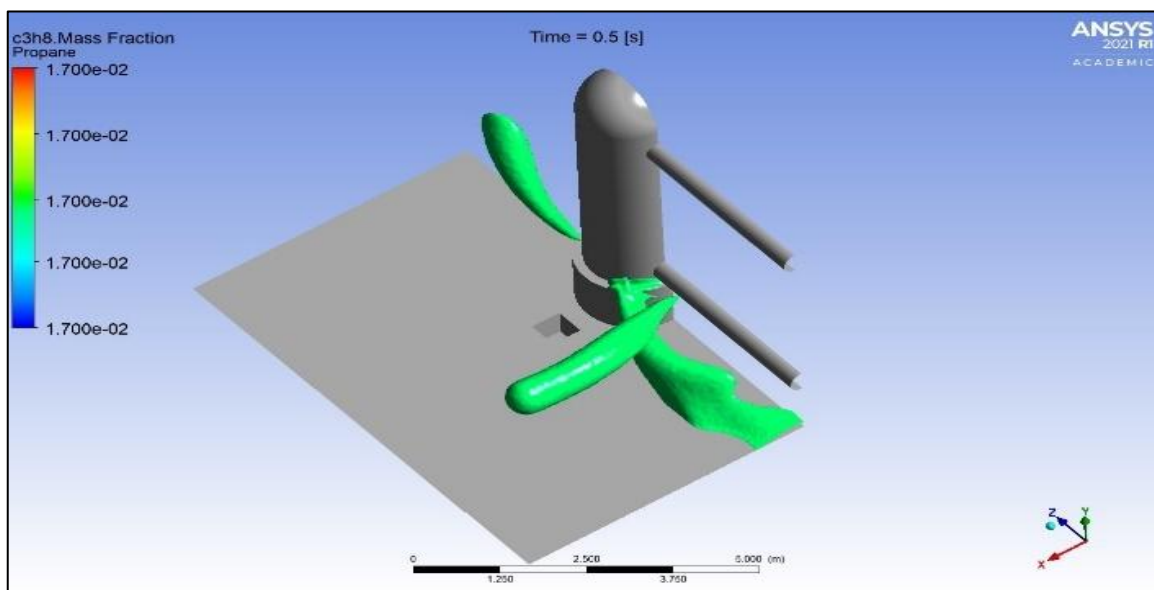


3.17. ábra: 1,7 vol.% propán terjedése 2 m/s-os légáramlásnál 1,5 másodpercnél (szerző szerkesztése)

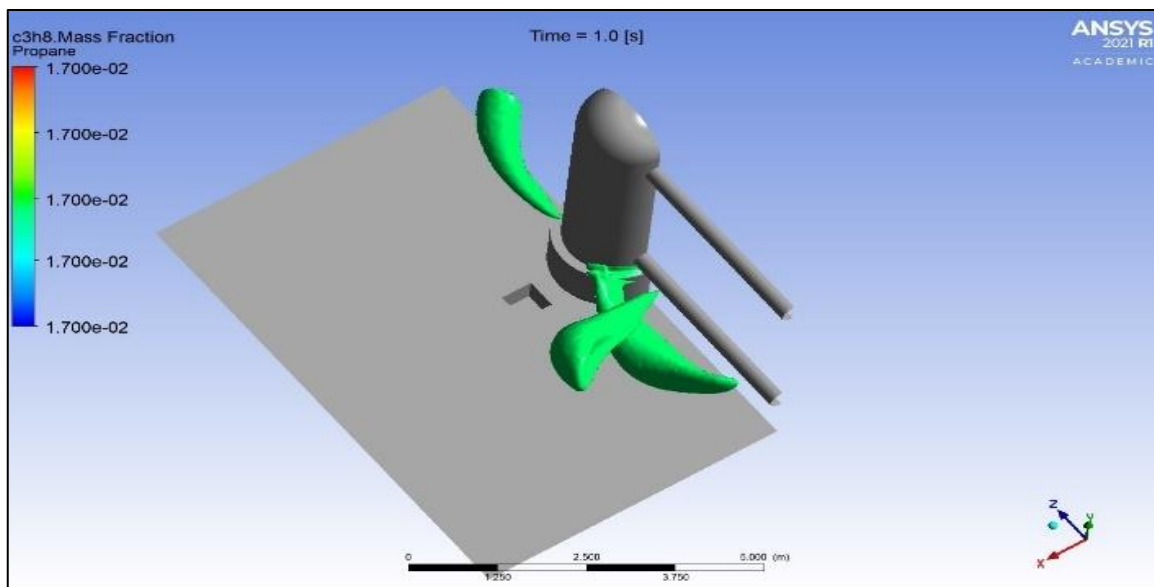
Az előbbi ábrákon megfigyelhető, hogy a lefelé áramló gázközeg a talajszinten terjed és amikor találkozik az ellentétes irányú légáramlással „feltorlódik”. A normál irányú kibocsátó forrásnál a gázközeg folyamatosan vékonyodik, a légáramlás okozta diffúzió miatt. Felfelé irányuló kiáramlás esetén a 2 m/s sebességű légáramlás elenyészően befolyásolja a gázközeg eredeti kiáramlási irányát, kis mértékben felfelé, a berendezés irányába mozdítja el.

3.2.1.5. A 10 M/S SEBESSÉGŰ LÉGÁRAMLÁS HATÁSA A PROPÁN TERJEDÉSÉRE

A 10 m/s-os légáramlás esetén a hatás gyakorlatilag már a 0,5 másodperces időpillanatban megjelenik a szimuláció során. A 3.18. és a 3.19. ábrákon látható, hogy a gázfelhők torzulnak a 0,5 és az 1,0 másodperces pillanatokban is, a normál kiáramlás pedig határozottan „feltorlódik”, de ezáltal az alsó robbanási határ kisebb távolságon belül jelenik meg.



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

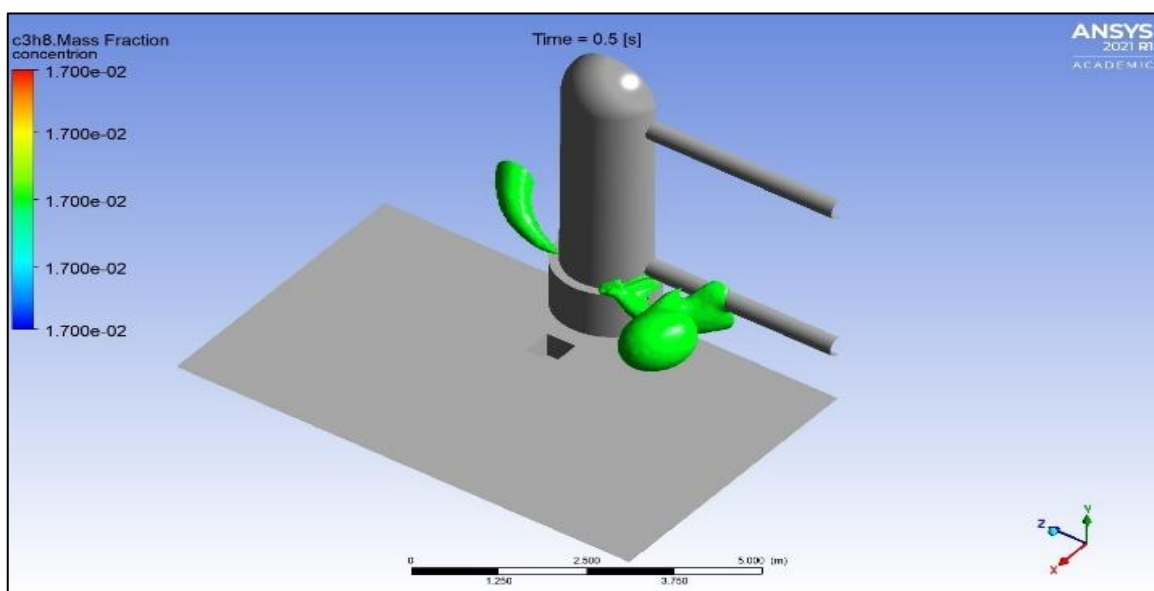


3.19. ábra: 1,7 vol.% propán terjedése 10 m/s-os légáramlásnál 1,0 másodpercnél (szerző szerkesztése)

A 2 m/s légáramlással összehasonlítva a terjedési irány változása sokkal jelentősebb. Ilyen típusú légáramlás Magyarországon az évnek több, mint a harmadában előfordul [170], különösen teljesen nyitott, akadálymentes területeken.

3.2.1.6. A 20 M/S SEBESSÉGŰ LÉGÁRAMLÁS HATÁSA A PROPÁN TERJEDÉSÉRE

A 20 m/s-os légáramlás mellett vizsgált terjedések esetén a gázfelhők terjedési iránya szinte azonnal megváltozik, ahogyan azt a 3.20. ábra is mutatja.



3.20. ábra: 1,7 vol.% propán terjedése 20 m/s-os légáramlásnál 0,5 másodpercnél

A szimulációk során használt geometriai modell már egy csökkentett térfogatú, de így is a nagy méreteket jelent, amelyek jelentősen lelassították a szimulációk lefutását, több napot is igénybe véve. A különböző légáramlások hatásának vizsgálatával kimutattam, hogy kis mértékben már 2 m/s sebességű szél is befolyásolhatja a gázközeg terjedését és hígulását. 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.

3.2.2. METÁN KIBOCSÁTÁS VIZSGÁLTA ALACSONY ÉS NAGYNYOMÁSON

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 gázok és gőzök esetében a kritikus nyomás értéke 1,89 bar körül van.

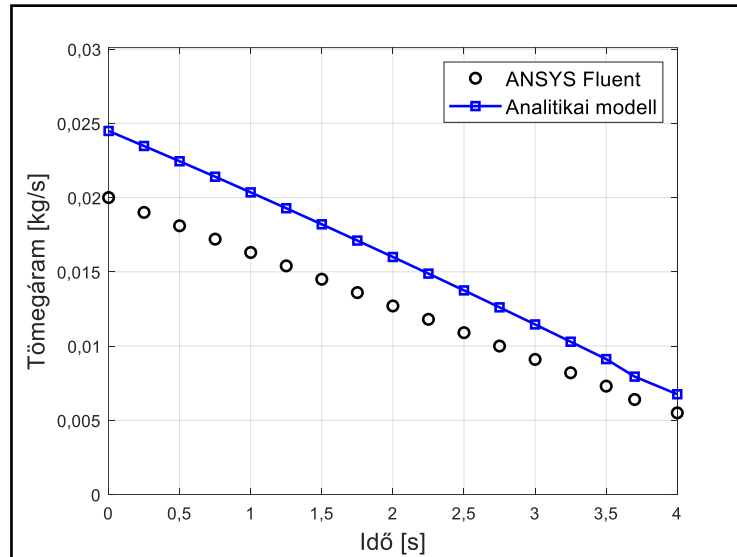
A kritikus áramlás alatti és feletti gázfelhő terjedések eltérő karakterisztikával rendelkeznek, amely befolyásolja a robbanásveszélyes területek kiterjedését. A kritikus áramlás alatti esetben turbulens áramlási viszonyok nélkül, alacsony sebességgel rövid sugár alakul ki, amely koncentráltabban jelenik 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. Egy arányosított technológiai terület 3D modelljét készítettem el, amely ipari környezetben a valóságban is előfordulhat. Az eredményeim bemutatják a lassabb és koncentráltabb kiáramlást, illetve a magasabb nyomásról induló, nagy sebességű, de kevésbé koncentrált áramlás terjedését is. Mindkét esetben a szimuláció lefutási ideje tranziens állapotú. A szimulációkat $k-\omega$ Shear Stress Transport (SST) örvénymodell és poliéder háló alkalmazásával készítettem el. A gáztörvények tekintetében a szénhidrogénekre jellemzően a Peng-Robinson állapotegyenlet alkalmazható és ezáltal ezt használtam, továbbá légáramlásmentes volt a vizsgált környezet.

3.2.2.1. KRITIKUS ÁRAMLÁS ALATTI KIBOCSÁTÁSÚ GÁZFELHŐ TERJEDÉSÉNEK A VIZSGÁLATA

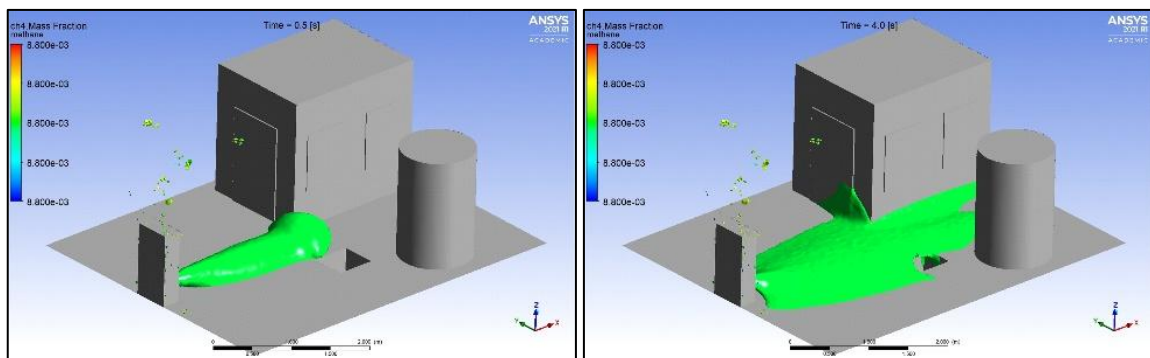
A 2.42. egyenletet szerint a metán tömegkibocsátási mértéke $W_g = 0,024 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, ahol a változók az alábbi értékeket veszik fel: $C_d = 1,0$, $S = 0,000078 \text{ m}^2$, $p = 180\,000 \text{ Pa}$, $z = 1,0$, $T = 298,15 \text{ K}$. A vizsgált szimulációs időtartam 4 másodperc volt, ami 7,5 nap futási időt igényelt. A vizsgált időszak kezdete és vége között a gázkibocsátás mértékének időbeli lefutása a 3.21. ábrán látható. 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 tartályban lévő nyomás fokozatos csökkenése következtében a kiáramlási sebesség és ezzel együtt a tömegáram is fokozatosan mérséklődik, ami nemcsak a kibocsátott gáz mennyiségét befolyásolja, hanem a gázfelhő terjedési dinamikáját is mert gáz egyre kevésbé képes lendületesen terjedni, így a koncentrációváltozás időbeli lefutása jól tükrözi a fizikai háttér folyamatokat, amelyek a szivárgás során zajlanak.

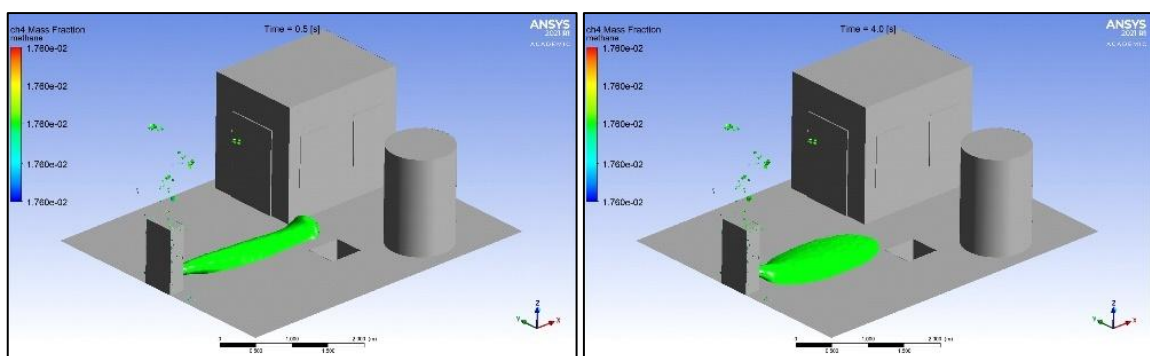


3.21. ábra: A metán kritikus áramlás alatti kibocsátásának változása az időfüggvényében (szerző szerkesztése)

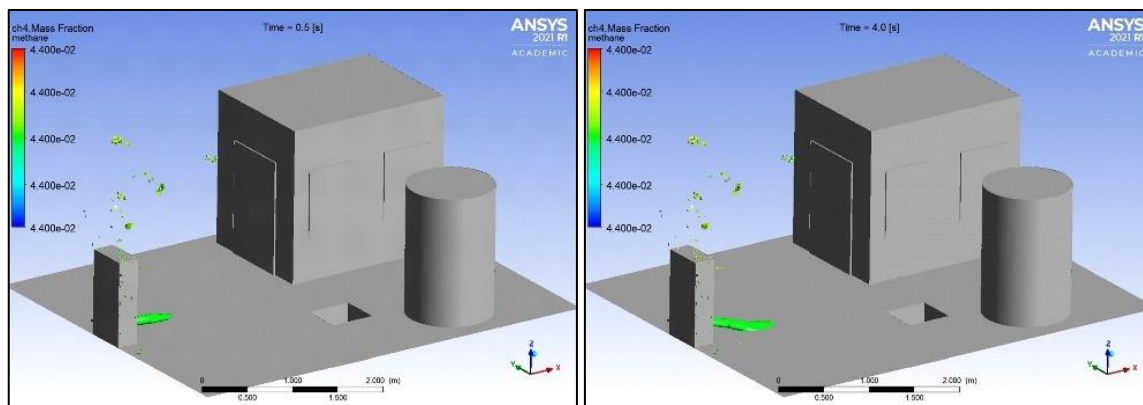
A szimuláció során a metángáz terjedési állapotai a metánnal töltött berendezés előtt, valamint az épület és a másik két berendezés között a 3.22-24. ábrán láthatók 0,5 és 4,0 s időpillanatokban. A vizsgált alsó robbanási határérték (ARH) koncentrációi 20%, 40% és 100% értékeken (4,4 vol.%) voltak.



3.22. ábra: Metán gázfelhő terjedése kritikus áramlás alatti tartományban 0,5 s (balra), 4,0 s (jobbra) ARH 20%-os koncentráción (szerző szerkesztése)



3.23. ábra: Metán gázfelhő terjedése kritikus áramlás alatti tartományban 0,5 s (balra), 4,0 s (jobbra) ARH 40%-os koncentráción (szerző szerkesztése)

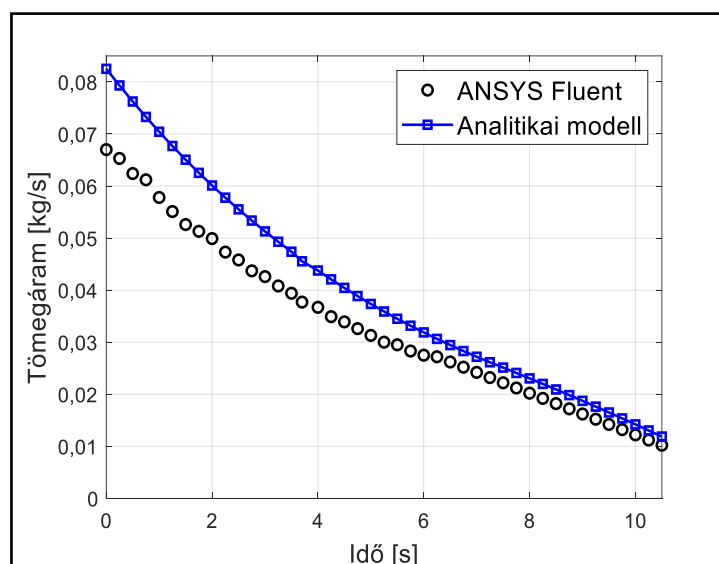


3.24. ábra: Metán gázfelhő terjedése kritikus áramlás alatti tartományban 0,5 s (balra), 4,0 s (jobbra) ARH 100%-os koncentráción (szerző szerkesztése)

A metán ARH 20%-os értéke 0,88 vol.%. Kezdetben egy hosszabb sugár látható, 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 behatolhat. 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.

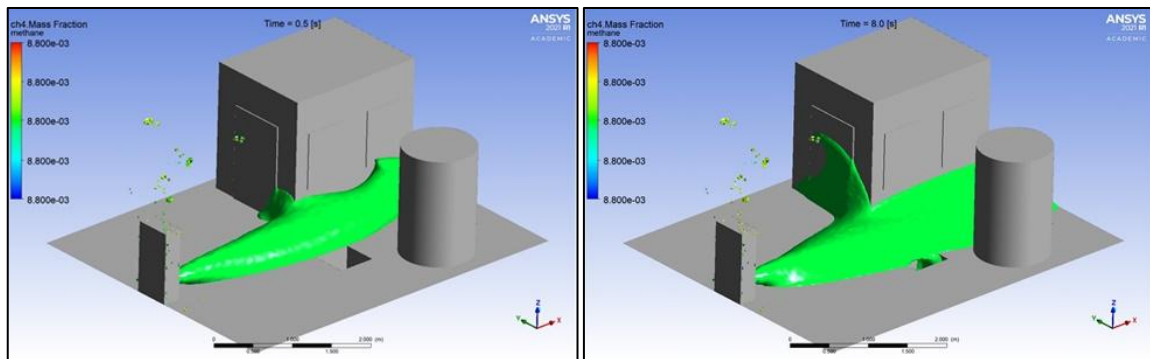
3.2.2.2. KRITIKUS ÁRAMLÁS FELETTI KIBOCSÁTÁSI GÁZFELHŐ TERJEDÉSÉNEK A VIZSGÁLATA

A változók peremfeltételei a kritikus áramlás feletti vizsgálat során szinte azonosak a kritikus áramlás alatti esettel, kivéve, hogy a közeg belső nyomása magasabb, pontosan $p = 600\,000\text{ Pa}$. A metán tömegkibocsátási mértéke a 2.43. egyenlet alapján $W_g = 0,08\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$. 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 3.25. ábrán látható. A gázkibocsátás mértéke az idő múlásával csökken, mivel a tartályban lévő nyomás szintén csökken.

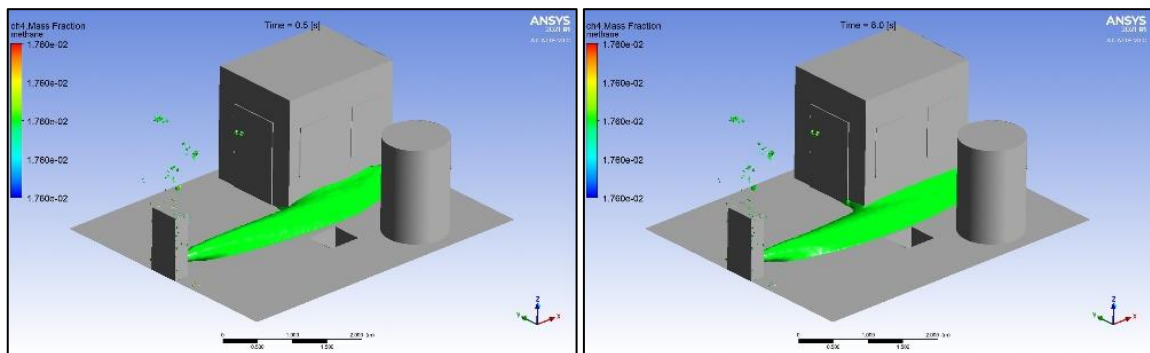


3.25. ábra: A metán kritikus áramlás feletti kibocsátásának változása az idő függvényében (szerző szerkesztése)

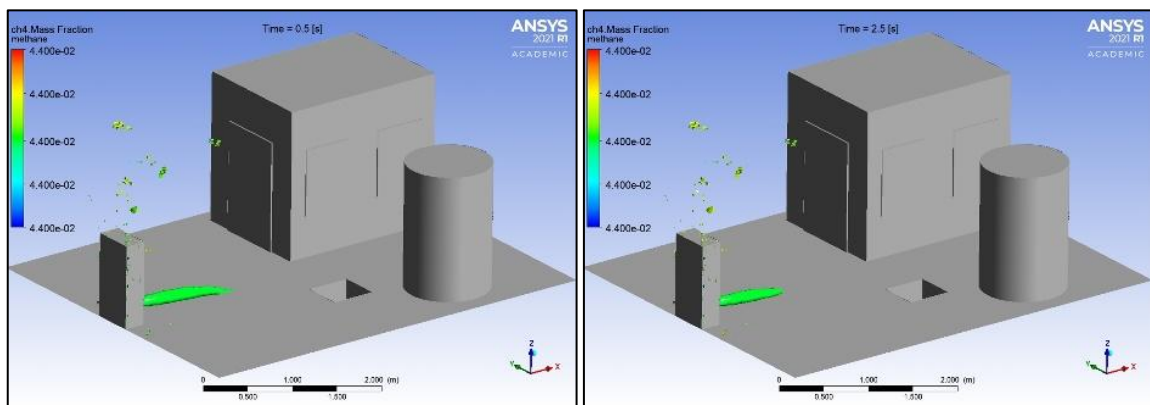
A szimuláció során a metángáz terjedési karakterisztikája a vizsgált szimulációs környezetben a 3.26-28. ábrán 0,5 és 8,0 s időpillanatban, a kritikus áramlás alatti koncentrációval megegyező értékek mellett láthatók.



3.26. ábra: Metán gázfelhő terjedése kritikus áramlás feletti tartományban 0,5 s (balra), 8,0 s (jobbra) ARH 20%-os koncentráción (szerző szerkesztése)

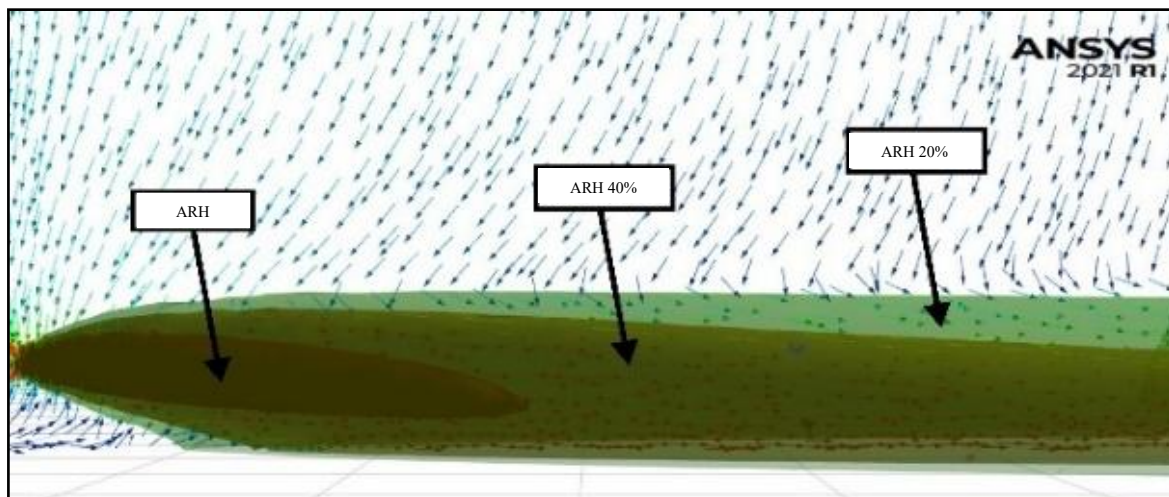


3.27. ábra: Metán gázfelhő terjedése kritikus áramlás feletti tartományban 0,5 s (balra), 8,0 s (jobbra) ARH 40%-os koncentráción (szerző szerkesztése)



3.28. ábra: Metán gázfelhő terjedése kritikus áramlás feletti tartományban 0,5 s (balra), 8,0 s (jobbra) ARH 100%-os koncentráción (szerző szerkesztése)

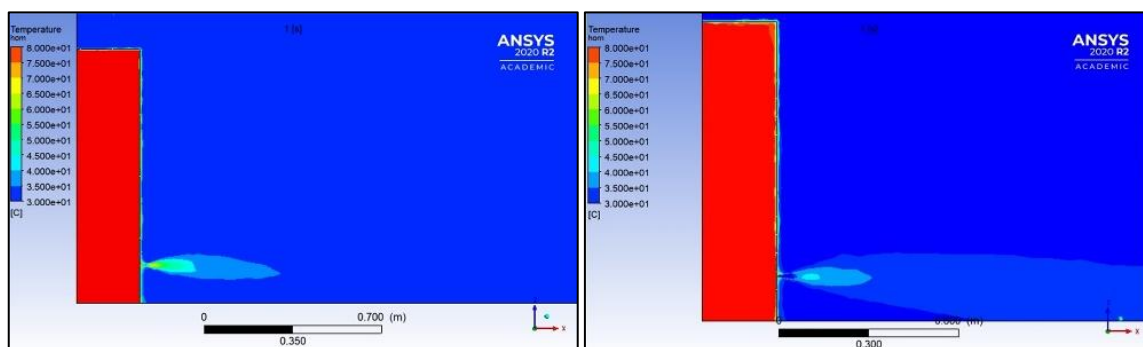
Az ARH 20%-os - 0,88 vol.% esetén ugyanazok a hatások érvényesülnek, vagyis a metán a tágulás hatására behatolhat a talajszint alatti területre. Az ARH - 4,4 vol.%-nál a szonikus esetben a térfogata és távolsága csökkent. A nagy sebesség hatására friss levegő örvényben áramlik. Ez az úgy nevezett örvénydiffúzió, amely során a magas kiáramlási sebesség miatt nagy mértékű friss levegő áramlik a térfogat felületére, ami hígítja a közeg koncentrációját [171] (3.29. ábra).



3.29. ábra: A friss levegő örvényességének okozta hígulásának hatása a metán gázfelhő terjedésére (szerző szerkesztése)

3.2.2.3. MAGAS HŐMÉRSÉKLETŰ METÁN KIBOCSÁTÁSÁNAK VIZSGÁLATA

A terjedés mellett vizsgáltam a kiáramló közeg hőmérséklet-változását is, mivel az alsó robbanási határ függ a közeg hőmérsékletétől, amelyet a 2.3.2. fejezetben taglaltam. A 3.30. ábrán látható a szimulációm eredményeiből, hogy a 80°C-os metán közeg 1 másodperc alatt nagyon gyorsan lehűl, mindkét vizsgált kiáramlási típus esetében.



3.30. ábra: A 80°C-os metán expanziója okozta hőmérsékletváltozás a kritikus áramlás alatti (balra) és fölötti kiáramlások esetén (jobb) (szerző szerkesztése)

3.2.3. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

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. Az alsó robbanási határ 20%-ánál mindkét kibocsátás esetében a levegőnél könnyebb gáz a talajszintek mélyebb területeire is képes volt eljutni. Az alsó robbanási határ 40%-ánál hosszú vagy lapos térfogatok figyelhetők meg. Az alsó robbanási határ esetében érdekes jelenséget figyeltem meg mindkét vizsgált kiáramlási típus eredményeinek az összehasonlításánál. A kritikus áramlás alatt a gáztérfogat az idővel nő, kritikus áramlás feletti esetben pedig csökken. A külső térben a közeg hőmérséklete nagyon gyorsan csökkent és a robbanási kockázat hőmérséklettel való korrelációjának a veszélye véleményem szerint nem jelent befolyásoló tényezőt, bár nagyon magas hőmérsékleten már

jelentős lehet. 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

A 2. fejezetben, a szakirodalmi áttekintésnél bemutatam a 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 célom.

A fejezetben legelőször szimulációval vizsgálom a gázkoncentráció érzékelők elhelyezésének optimalizálását. Az elhelyezésükre vonatkozó követelmények túl általánosan vannak megfogalmazva, melyek szerint a lehetséges szivárgás forrásának közelében kell ezeket elhelyezni, és függenek a gázközeg relatív sűrűségétől, továbbá fontos szempont még a lehetséges légáramlatok (ajtók, ablakok) közelsége, amelyek befolyásolják a hatékony működésüket. A P12 publikációban egy ammónia gáztöltetű kompresszoros hűtőberendezést vizsgáltam a helyiségben kialakuló szivárgások FLACS-CFD szimulációjával végzett kísérletek alapján optimalizálható a gázérzékelők elhelyezésének a fontossága. Ezen érzékelők lehetséges detektálási tulajdonságai az idő és a koncentráció függvényei.

A fejezet második részében a már korábban említett, de még további vonatkozásban szükséges MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 [17] szabványi eljáráshoz tartozó összefüggéseket vizsgálom. Ezen összefüggések általánosan alkalmazhatók gázok és gőzök lehetséges robbanásveszélyes térségeinek a meghatározására a legtöbb közeg esetében. Továbbá a fejezet bizonyos részeiben a gázkeverék egyedi tulajdonságainak a figyelembevételével új összefüggéseket alkotok meg, amelyek használhatók kettő vagy többkomponensű gázoknál.

A vizsgálatot hidrogén-metán eltérő koncentrációjú keverékekre készítettem el, amelyeket a FLACS-CFD szimulációs környezetben is modelleztem, kis és nagy nyomású, illetve kis és nagy méretű réseken történő szivárgással a fejezet harmadik részében, a P15 publikációban leírt eredmények alapján. Ezek összehasonlításával állapítom meg az általam készített, kiterjesztett módszertan pontosságát és biztonságos alkalmazását az ipari környezetekben.

Az FLACS-CFD szoftverrel készített szimulációkból generált képek a program angol nyelvezet okán idegennyelvű feliratok és szövegeket tartalmaznak.

3.3.1. GÁZKONCENTRÁCIÓ ÉRZÉKELŐK ELHELYEZÉSÉNEK ÉS DETEKTÁLÁSÁNAK OPTIMALIZÁLÁSI VIZSGÁLATA

Az MSZ EN 60079-29-2:2015 szabvány 8. fejezete a gázérzékelők elhelyezésére ad javaslatot, amely múltbeli tapasztalataikra épülő, általánosan elfogadott empirikus szabályok alkalmazását definiálja. Ezen alapelveinek egyike a magassági tényező, amely szerint az érzékelők elhelyezése a gáz sűrűségétől függ. Például a levegőnél nehezebb gázok, mint a propán esetében az érzékelőket alacsonyabban, a talajszint közelében szükséges elhelyezni. Ellenkező esetben, amikor könnyebb a levegőnél a gáz, legyen az metán vagy ammónia, az érzékelőket magasabban, a helyiség mennyezetének közelében javasolt létesíteni. Ezenkívül kerülni kell a gázérzékelők elhelyezését közvetlen légáramlatban, például ablakok vagy ajtók közelében, mivel ez befolyásolhatja a gázérzékelés hatékonyságát. Helyszíni kísérletekkel és vizsgálatokkal meghatározható a lehetséges létesítés helye, amelyekkel a gázok viselkedését pontosan szimulálják és leírják (füstcső tesztek). Továbbá a szabvány javasolja a gázterjedés szimulációját is, amelyet én is vizsgáltam és ebben az alfejezetekben be is mutatok.

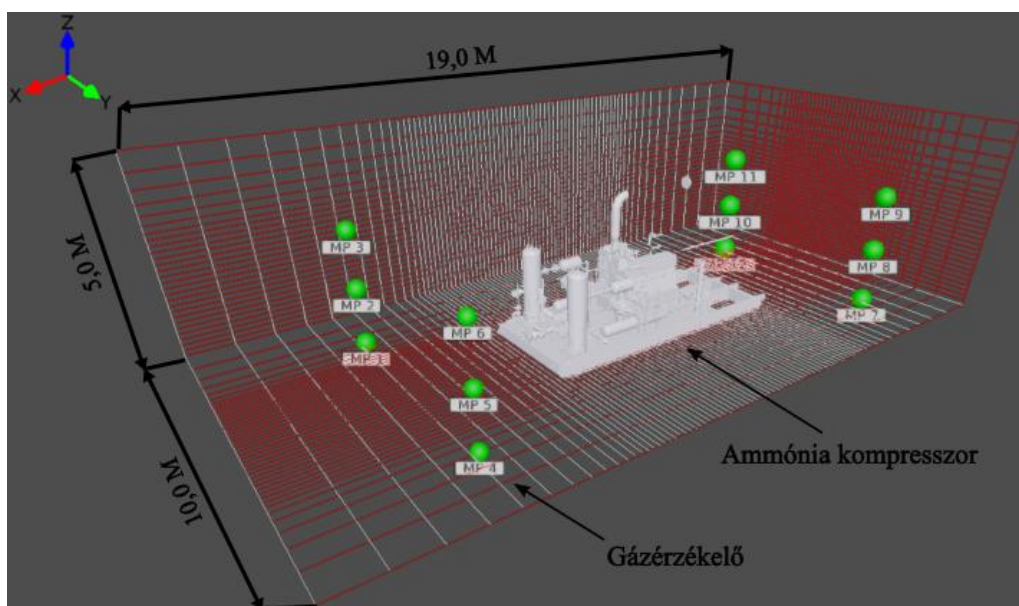
3.3.1.1. A VIZSGÁLT TECHNOLÓGIAI ÉS SZIMULÁCIÓS KÖRNYEZET

Numerikus áramlástan 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 3.31. ábrán látható. Az ammónia hűtőközeg (R717) töltetet tartalmazó kompresszor a helyiség közepén található. Az ilyen típusú berendezések általánosan jellemző üzemi tulajdonságai a 20-50 bar(g) nyomás és -10 – 40°C hőmérséklet. A berendezéseken a felülvizsgálati és karbantartási műveletek hiánya miatt repedések, tömítetlenségek jelenhetnek meg, amelyek szivárgáshoz vezetnek. A vizsgálatom során egy olyan mértékű rés alakul ki, amelyből 0,5 kg/s tömegárammal áramlik ki a robbanásveszélyes közeg.

Az elhelyezett gázérzékelők mennyisége 12 db. Összesen négy területen, egymástól egyenlő távolságra került elhelyezésre 3-3 db gázérzékelő. Vertikális irányban a köztük lévő távolság 1,5 – 1,5 méter. A kompresszor fölé közvetlenül szándékosan nem helyeztem gázérzékelőt, mivel a szimuláció során az attól oldalirányban fölfelé és lefelé elhelyezkedő érzékelők jelzési idejének vizsgálata a cél, különböző szivárgási irányokkal.



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

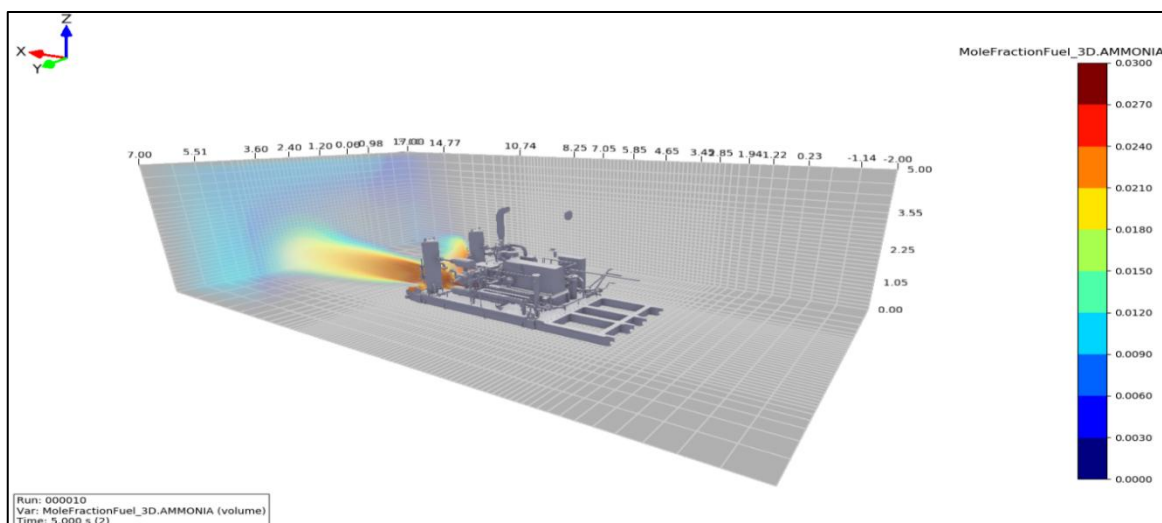
A helyiségen belül légáramlás nem feltételezett, mivel így a szivárgás peremfeltételeit az időjárási körülmények nem befolyásolják. A gázérzékelők létesítésének az ismertett egyik javaslata, hogy ablakok, ajtók közelében, ahol légáramlás fennállhat, nem célszerű ezeket elhelyezni, mert ezáltal romlik a hatékonyságuk.

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 gyújtóforrásként 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).

Mind a három szimulációnál az elindulástól követően 1 másodperccel kezdődött meg az ammónia szivárgás és a szimulációk 5. másodpercéről készítettem felvételeket a gázközeg terjedéséről. Ezen felvételek a 3.32 ábrán, 3.33. ábrán és a 3.34. ábrákon láthatók, amelyeknél már az említett MSZ EN 378-3:2016+A1:2021 szabvány alapján az ammónia közegnek a fő riasztási szint szerinti (3,0 vol%) és az alatti koncentrációi láthatók.

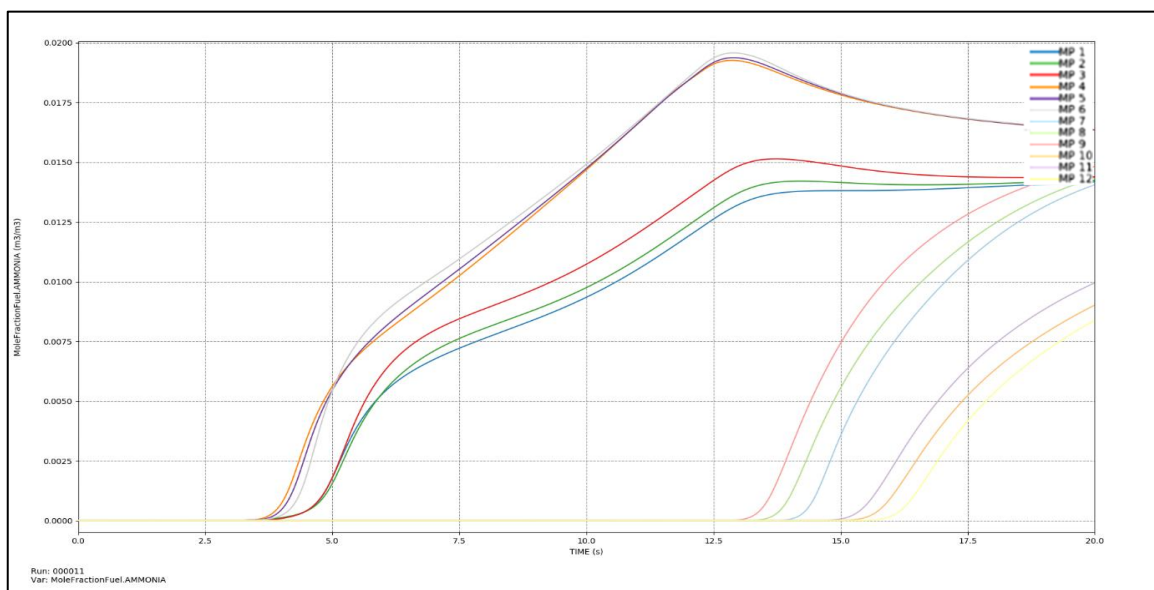
3.3.1.2. SZIVÁRGÁS VIZSGÁLATA KORLÁTOZATLAN +X TERJEDÉSI IRÁNYBAN

Amikor +X terjedési iránnyal vizsgáltam a szivárgást, azaz az ammónia közeg terjedését, a 3.32. ábrán látható gázfelhő sugár először a fallal ütközött, amely hatására a robbanásveszélyes gáz oldal irányban is elkezdett terjedni a helyiségben. Ezenkívül a szivárgás során a gáztérfogat szélénél folyamatosan csökkent a koncentráció mértéke, tehát hígult.



3.32. ábra: Ammónia terjedése +X irányban, korlátozatlanul (szerző szerkesztése)

Az elhelyezett gázérzékelők detektálási tulajdonságait, a koncentráció és idő függvényében a 3.33 ábra mutatja be. Az egy csoportban elhelyezett gázérzékelők, pozíciójuk szerint közel felfutás szerint érzékelték az ammóniát. Leghamarabb az MP4-5-6 érzékelők detektáltak, megközelítőleg a szivárgás kezdete után 2,75 másodpercnél már érzékelték. Legutoljára az MP10-11-12 gázérzékelők detektálták a veszélyes közeg jelenlétét, amely 14 másodperc elteltével valósult meg. Az összes gázérzékelő esetében a vonatkozó szabvány szerint az előriasztási szint az érzékelés pillanatában azonnal teljesült, tehát a megfelelő biztonsági intézkedések szerint ilyenkor figyelmeztető jelzések és vészelszívás lép működésbe. Megfigyelhető, hogy ezen beállított szimulációs peremfeltételek mellett, a terjedéshez legközelebb eső gázérzékelők sem érték el a fő riasztási szintet, ezáltal további biztonságtechnikai intézkedésekre nincs szükség. Mi több, ha az első riasztási szint szerint vészelszívás is üzembe lépne, a 3.33. ábrán látható legnagyobb koncentráció értékek is várhatóan alacsonyabbak lennének.

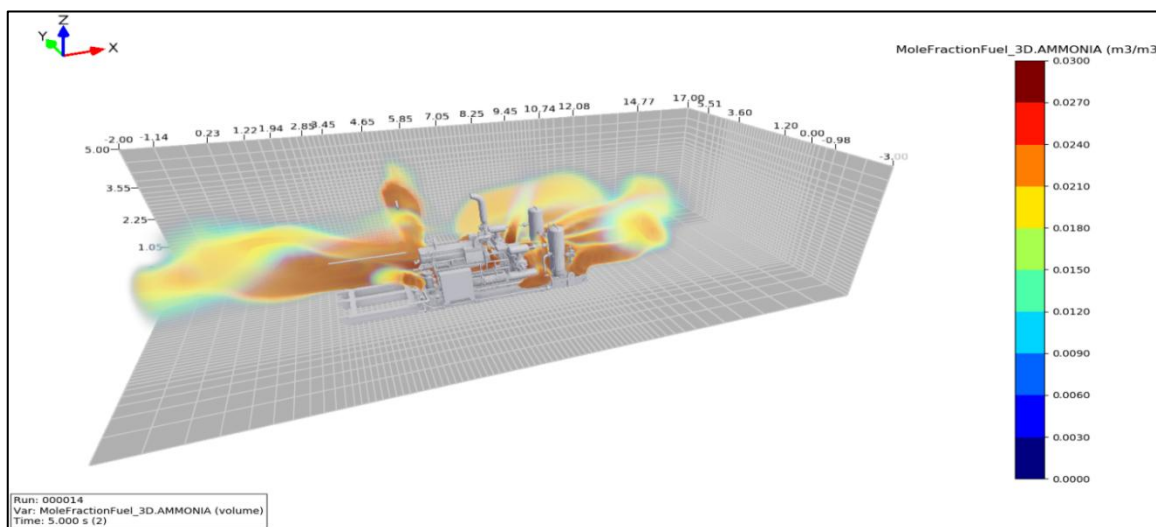


3.33. ábra: A gázérzékelés a koncentráció és az idő függvényében (+X irány, korlátozatlanul) (szerző szerkesztése)

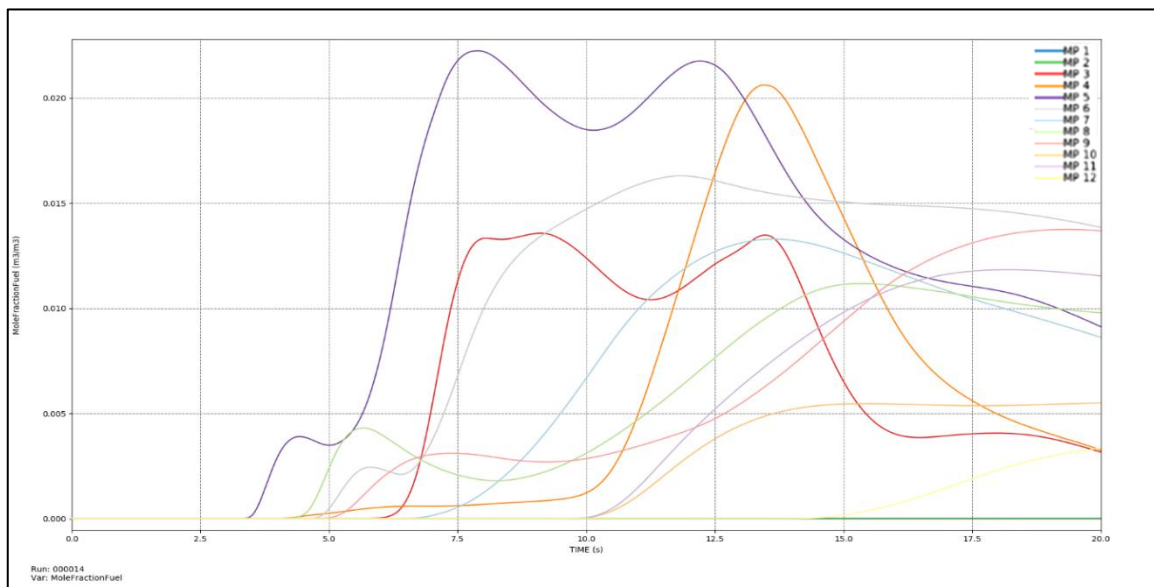
3.3.1.3. SZIVÁRGÁS VIZSGÁLATA KORLÁTOZOTT +Z TERJEDÉSI IRÁNYBAN

A szivárgás nem minden szimulációs modell esetében fog korlátozatlanul, tehát akadálymentesen terjedni, fennállhat az a lehetőség, hogy a szivárgási pont közelében akadályba ütközik, amely hatására véletlenszerűen folytatja a mozgását. Gyakorlatilag az ilyen jellegű ütközések és az ütközésből adódó terjedések meghatározhatatlanok, mivel annyira sok lehetőség adódna, ezáltal véletlenszerű terjedési irányok alakulhatnak ki.

A 3.34. ábrán látható, hogy az ütközés hatására két oldal irányban több gázsugár is kialakult, amelyek oldalsó és fölfelé irányba is terjednek. Ezenkívül az akadállyal való találkozás után, még további akadályokkal való ütközések történtek meg a gázsugaraknál. A 3.35. ábra érzékelést mutatja be.



3.34. ábra: Ammónia terjedése +Z irányban, korlátozottan (szerző szerkesztése)



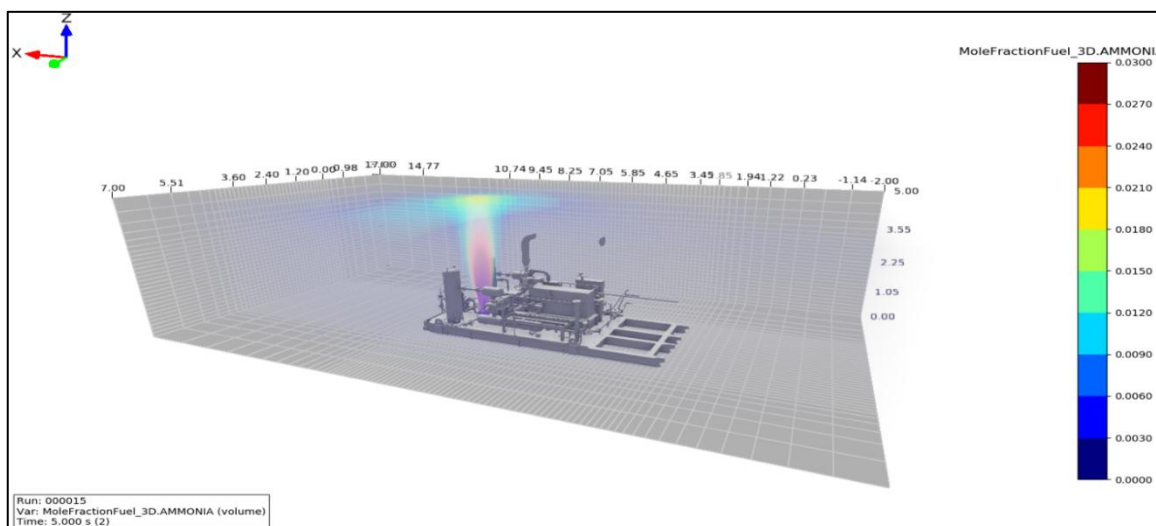
3.35. ábra: A gázérzékelés a koncentráció és az idő függvényében (+Z irány, korlátozottan) (szerző szerkesztése)

A gázérzékelők rögzített koncentráció adatai hasonlóan a terjedéshez teljesen véletlenszerűek. Az egyértelműen megállapítható, hogy a szimuláció időtartama alatt szinte mindegyik érzékelő tudta detektálni az ammónia közeget, viszont az MP4-hez viszonylag későn jutott el az 0,05 vol.%, valamint

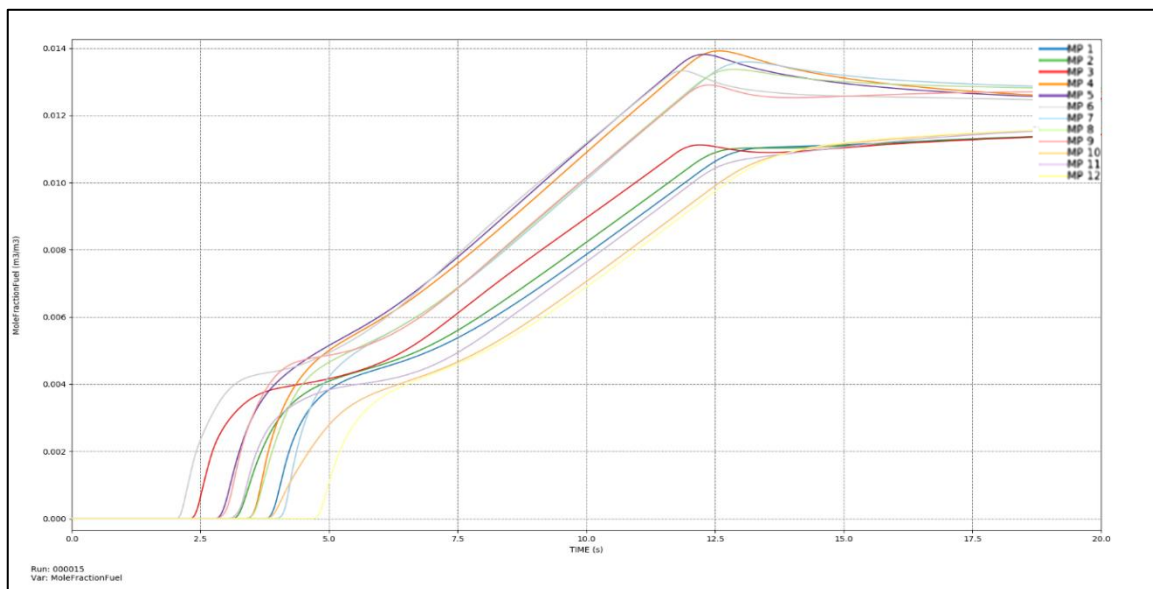
az MP2 el sem érte miközben az MP5-nél 2,0% fölé ment. A 2,0% fölötti értéket meglepő módon az MP4 gázérzékelő még eléri.

3.3.1.4. SZIVÁRGÁS VIZSGÁLATA KORLÁTOZATLAN +Z TERJEDÉSI IRÁNYBAN

Abban az esetben, amikor nem találkozott akadállyal a közeg, az ammónia gáz a mennyezettel ütközve szinte egész felső térfogatban egyenletesen terjedt el. Ahogy a 3.36. ábrán látható, a szivárgási pont nem középen van, ezáltal a hozzá közelebb eső gázérzékelők (MP3 és MP6) hamarabb detektálták az ammóniát, mint az MP12, amelyet a 3.37. ábra szemléltet.



3.36. ábra: Ammónia terjedése +Z irányban, korlátozatlanul (szerző szerkesztése)



3.37. ábra: A gázérzékelés a koncentráció és az idő függvényében (+Z irány, korlátozatlanul) (szerző szerkesztése)

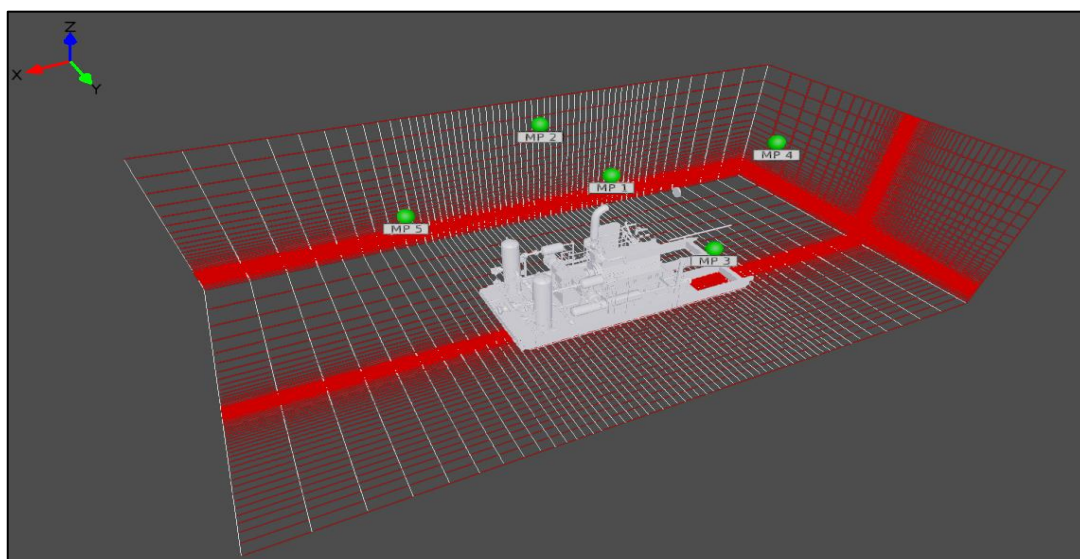
3.3.2. VIZSGÁLATOK KIÉRTÉKELÉSE

A három szimuláció során tapasztalt eredmények alapján megállapítottam, 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 érzékelték 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 elrendezettséggé meghatározható, amelyek informatívak, biztonságtechnikailag támogatják az ipari szereplőket.

Lefedettségi 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 érkekezésben 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. Egy darabot a készülék fölé, továbbiakat a helyiség két, illetve négy irányába javasolt létesíteni, amelyek a 3.38. ábrán láthatók. Az egyik legfontosabb dolog, hogy a gázérzékelőket nem szabad letakarni vagy olyan pozícióba helyezni, ahol több más objektum korlátozza az érzékelés hatékonyságát.



3.38. ábra: Lehetséges lefedettség gázérzékelőkkel (szerző szerkesztése)

3.3.3. GÁZKEVERÉKEK ROBBANÁSVESZÉLYES TÉRSÉGEINEK MEGHATÁROZÁSA

A gyakorlat szerint és a biztonság irányába való konzervatív lehetőséget mérlegelve, azon veszélyesebb gáz- vagy gőzközeg fizikai és kémiai, valamint égés- és robbanástechnikai tulajdonságaival szükséges számolni, amelyek a befolyásolják a robbanásveszélyes zóna kiterjedését. Habár a nagyobb zónát eredményezik, de mérlegelni szükséges, hogy Ex-karakterisztika szempontjából, például IIA gázalcsoporthoz és T1 hőmérsékleti osztályai közül mi lesz a mértékadó a keverék esetében.

Az IIGEM/SR/25 Edition 2 with amendments 2013 Hydrogen Supplement 1 tartalmazza [172] a hidrogén és a hidrogén/natúr gáz keverékek kezelésére vonatkozó veszélyes területek osztályozásának bizonyos követelményeit, de nem kellő részletességgel.

Az API RP 505:2018 szabvány [173] D.5.3 fejezete említi a keverékek okozta robbanásveszély kockázatát, hogy a zónák kiterjedésének a sugarait ilyen esetekben gyakran meglehetősen nehéz meghatározni. Két oka van ennek, az egyik, hogy a kibocsátás során a szénhidrogén-keverék szóródásának mértékét néha nehéz megismerni. Másik ok, hogy a robbanásveszélyes térségek meghatározására vonatkozó műszaki adatok, anyagtulajdonságok többsége csak a tiszta komponensekkel foglalkozik, a keverékekkel nem. Viszont ezeket a vizsgálatom során ismertetni fogom, hogy többfajta módszerrel, más vegyiparhoz, iparbiztonsághoz kapcsolódó tervezési területen is alkalmazható legyen. A szabvány egyébként javasolja, hogy az első probléma bizonyos mértékig kezelhető a kereskedelembe kapható terjedési modellezésre alkalmas szoftverek segítségével, mert ezeknél megbecsülhető a gázkeverékek alsó (ARH) és felső robbanási határértéke is (FRH) – robbanási tartomány. Viszont ez nem minden szoftver segítségével lehetséges vagy ahhoz speciális készségek és ismeretek szükségesek szoftverozás területén, hogy ezzel kiegészítsük a szoftverek alapvető, kiinduló egyenleteit. Ahogy említettem én a vizsgálatom során a FLACS-CFD szoftvert használtam, amely az ANSYS Fluenthez képest felhasználóbarátabb felülettel rendelkezik.

A CEI 31-35 (2012) [23] már részben ad ajánlást konkrét keverékek robbanásveszélyes térségek kiterjedésének a számítására. Tartalmazza a gázkeverékek esetében a moláris tömeg és az alsó robbanási határ számításának a lehetőségét Le Chatelier törvényei szerint, amely az alsó robbanási határ lehetséges, további jó közelítő modelljeinek az alapjául szolgált [24]. Ezenkívül az MSZ EN ISO 10156:2018 szabvány segítségével is meghatározhatók az alsó- és a felső robbanási határértékek [25], amelynek egyik tudományos alapja Schröder V és munkatársainak vizsgálatai. A szabványban szereplő számítási módszer eltér az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 [17] szabványétól, viszont összefüggéseiben a korábban említett két paraméter meghatározásával, alkalmazható keverékekre is, amelyet Molino és munkatársai [174] kutatásaik során használtak is.

Az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabvány esetében alkalmazandó összefüggések viszont olyan változókat tartalmaznak, amelyeket keverékekre is ki lehet számolni matematikai úton vagy folyamatszimulációs szoftverek alkalmazásával meghatározhatók (Unisim Design, ChemCAD).

A vizsgálatom során ezen változóknak a meghatározásai kerülnek bemutatásra, hogyan implementálhatók egy keverék robbanásveszélyes térségének meghatározásához alkalmazandó kiinduló egyenletekbe.

3.3.3.1. KEZDETI ÖSSZEFÜGGÉSEK

Egy technológia esetében, hogy meghatározzuk a robbanásveszélyes térségek kiterjedését, ismernünk kell a közeg halmazállapotát, fázisait. A 2.5. fejezetben ismertetett egyenleteket kell alkalmazni folyadék- és gáz/gőzkibocsátás esetében. A vizsgálatom kizárólag a gáz/gőz jellegű kibocsátásokra terjed ki, amelyek esetén a 2.40. és 2.41. összefüggések szerint ismerni szükséges a technológiai berendezés normál üzemi körülmények között fennálló maximális nyomás (p), hőmérséklet (T) értékeit, továbbá a közeg kritikus nyomás értékét, hogy melyik kiáramlás jellegére vonatkozó egyenletet szükséges használni.

Ezt követően, a gáz/gőz sűrűségét (ρ_g) és az alsó robbanási határ (ARH) értékét fölhasználva, mindkét paraméter moláris frakció függő - meghatározható a kibocsátási karakterisztika értéke. Az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabvány [17] D.1. ábráját felhasználva, meghatározhatók a robbanásveszélyes térségek kiterjedése:

$$Q_c = \frac{w_g}{\rho_g \cdot ARH}. \quad (3.7.)$$

A 2.40. és 2.41. egyenletekből, valamint az előző bekezdésekben már említett moláris frakció függő változók 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.

3.3.3.2. AZ ANYAGTULAJDONSÁGOKTÓL FÜGGŐ VÁLTOZÓK

Az alfejezetben ismertetett összefüggések, amelyek egy lehetséges gázkeveréknek a tulajdonságaira vonatkoznak, gyakorlatilag ezek az alapvető fizikai-kémiai törvényekre épülnek. A vegyészet-vegyipari technológiák tervezése, áramlástan egyenleteknél során állandó jelleggel alkalmazzák őket. A folyamatszimulációs szoftverek is ezen, hasonló elven felépülő összefüggések felhasználásával számolják ki egy adott szimulációs modell eredményeit.

Keverék moláris tömege

A keverék moláris tömegének meghatározásához ismernünk kell a keverék összetételét, azaz az egyes komponensek moláris arányát és moláris tömegét. A keverék moláris tömege az egyes komponensek moláris tömegének és moláris arányának súlyozott átlaga. Az általános képlet a keverék moláris tömegének meghatározására a következő [175]:

$$M_{kev} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot M_i. \quad (3.8.)$$

Keverék adiabatikus tágulás politropikus indexe

Az adiabatikus tágulás során a politropikus index meghatározása összetett folyamat lehet, különösen egy keverék esetében. Egy gázkeverék politropikus indexének meghatározásához az egyes komponensek moláris arányát és a fajhőkapacitásait is figyelembe kell venni [176]:

$$\gamma_{kev} = \frac{M_{kev} \cdot C_{p_{kev}}}{M_{kev} \cdot C_{p_{kev}} - R}. \quad (3.9.)$$

Az így meghatározható érték egy megfelelő közelítésű becslés, mivel a pontos érték meghatározása függ az egyes komponensek hőtani tulajdonságaitól és a keverék hőmérsékleti viszonyaitól is.

Keverék fajhője

A gázkeverék fajhőjének meghatározása az egyes komponensek moláris frakciójának és fajhőjének súlyozott átlaga alapján történik. A fajhő lehet nyomáson állandó (C_p) vagy térfogaton állandó (C_v). A keverék állandó nyomáson vett fajhőjének meghatározásához az egyes komponensek moláris frakcióját és azok fajhő értékeit kell ismerni [176]:

$$C_{p_{kev}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{C_{p_i}}}. \quad (3.10.)$$

Keverék kritikus nyomása

A keverék kritikus nyomásának a meghatározásához már ismerni szükséges a keverék adiabatikus tágulás politropikus indexét:

$$p_{krit_{kev}} = p_a \cdot \left(\frac{\gamma_{kev} + 1}{2} \right)^{\frac{\gamma_{kev}}{\gamma_{kev} - 1}}. \quad (3.11.)$$

Keverék sűrűsége

A keverék gáz/gőz sűrűségének a meghatározásához már ismerni szükséges a keverék moláris tömegét:

$$\rho_{g_{kev}} = \frac{p_a \cdot M_{kev}}{R \cdot T_a}. \quad (3.12.)$$

Keverék alsó robbanási határa

A gázkeverékek, gázkeverékek alsó robbanási határát a 2.3.2. fejezetben részletezi az értekezésem.

3.3.3.3. ÚJ ANALITIKAI MODELLEK KITERJESZTÉSE

A 2.40., 2.41. és 3.7. összefüggésekbe a kiegészítő egyenleteket, ha implementálva, az alábbi összefüggéseket kapom gázkeverékekre vonatkozóan:

$$W_{g_{kev}} = C_d \cdot S \cdot p \cdot \sqrt{\frac{M_{kev}}{Z \cdot R \cdot T} \cdot \frac{2 \cdot \gamma_{kev}}{\gamma_{kev} - 1} \cdot \left(1 - \left(\frac{p_a}{p} \right)^{\frac{(\gamma_{kev} - 1)}{\gamma_{kev}}} \right) \cdot \left(\frac{p_a}{p} \right)^{\frac{1}{\gamma_{kev}}}}. \quad (3.13.)$$

$$W_{g_{kev}} = C_d \cdot S \cdot p \cdot \sqrt{\gamma_{kev} \cdot \frac{M_{kev}}{Z \cdot R \cdot T} \cdot \left(\frac{2}{\gamma_{kev} + 1} \right)^{\frac{(\gamma_{kev} + 1)}{\gamma_{kev} - 1}}}. \quad (3.14.)$$

A 3.13. egyenlet a kritikus áramlás alatti, a 3.14. pedig a kritikus áramlás feletti állapotokra alkalmazható, illetve a kibocsátási karakterisztika a keverékek esetében az alábbi összefüggéssel határozható meg.

$$Q_{c_{kev}} = \frac{W_{g_{kev}}}{\rho_{g_{kev}} \cdot ARH_{kev}}. \quad (3.15.)$$

Az MSZ IEC 60079-10-1:2021 [17] 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.

3.3.3.4. HIDROGÉN-METÁN ELTÉRŐ KONCENTRÁCIÓJÚ KEVERÉKEK ROBBANÁSVESZÉLYES TÉRSÉGEI

A vizsgált hidrogén-metán közeg keverék esetében, különböző koncentráció függvényében, a változó értékeit a 3.10. 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

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

Látható, hogy a tiszta hidrogén és metán értékeinél, valamint a különböző koncentráció eloszlások esetében, a kiszámolt értékek a két szélső értékhez képest kvázi egyenletesen csökkenő vagy növekedő, tendenciát írnak le. A fajhő értékeit a Perry's Handbook 2-es fejezetében lévő Hyperbolic Functions [177] közelítéssel határoztam meg 25°C-on, amely hőmérséklet, de nem nyomás függő. Három esetben a UniSim Design szoftverrel is ellenőriztem a fajhő értékeit, amely már a nyomást is alapul veszi. Ennek eredményeit a 3.11. táblázat tartalmazza.

Hidrogén [vol.%]	Metán [vol.%]	Perry	5 bar(g)	160 bar(g)
10	90	2429,38	2422,54	3400,79
50	50	3847,90	3600,98	4118,79
90	10	9247,59	8560,06	8910,03

3.11. táblázat: Perry's Handbook és UniSim Design összehasonlítása a fajhő eredményekkel (10-90 vol.%, 50-50 vol.%, 90-10 vol.% hidrogén-metán) (szerző szerkesztése)

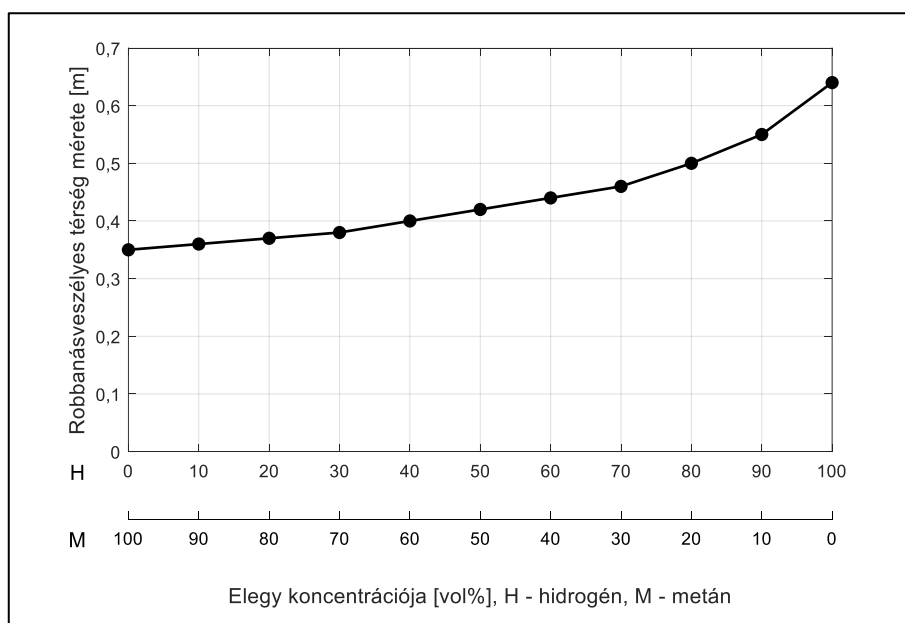
A szoftver segítségével a vizsgált koncentráció eloszlásoknál 5 bar(g) nyomás esetében mindenhol, 160 bar(g) esetében a 90-10 vol.%-os hidrogén-metán koncentráció esetében volt alacsonyabb a keverék fajhő értéke. A zónák kiterjedésének meghatározásánál fontos a fajhő értéke, de két szélső érték, 2429,38 J/(kmol·K) és 9247,59 J/(kmol·K) esetében, ugyanazon feltételek mellett 0,12 méter volt a lehetséges zónák kiterjedésének a különbsége, a kisebb fajhő javára. Ez nem jelentős eltérés, ahhoz képest, hogy a két érték közti eltérés több, mint háromszoros, viszont érdemes lehet a biztonság irányba eltérni és egy számolt zóna kiterjedést, 0,1 m vagy több tizeddel megnövelni.

Robbanásveszélyes térség mérete - kisméretű rés, alacsony nyomás

Abban az esetben, ha közeg nyomása 5 bar(g), hőmérséklete 25°C és a feltételezett résméret egy peremes csatlakozásnál például $1,375 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$, a 3.12. táblázatban láthatók a tömegáram, a kibocsátási karakterisztika, valamint a robbanásveszélyes térségek kiterjedése különböző koncentrációjú keverékek esetében. A vizsgálatom során a „Jet” görbét alkalmaztam, mivel szimulációm ehhez áll a legközelebb, vizsgálva egy esetleges biztonsági lefúvatószelep lehetséges robbanásveszélyes térségét. A 3.39. ábrán láthatók a koncentráció és a zónakiterjedés függvényében az eredmények.

Hidrogén [vol.%]	Metán [vol.%]	W_{gkev} [kg/s]	Q_{ckeV} [m³/s]	Robbanásveszélyes térség kiterjedése [m]
0	100	8,62E-04	3,09E-02	0,35
10	90	8,24E-04	3,27E-02	0,36
20	80	7,83E-04	3,47E-02	0,37
30	70	7,41E-04	3,71E-02	0,38
40	60	6,96E-04	3,99E-02	0,40
50	50	6,48E-04	4,33E-02	0,42
60	40	5,97E-04	4,77E-02	0,44
70	30	5,40E-04	5,33E-02	0,46
80	20	4,77E-04	6,13E-02	0,50
90	10	4,04E-04	7,39E-02	0,55
100	0	3,14E-04	9,83E-02	0,64

3.12. táblázat: Kis rés, alacsony nyomás, robbanásveszélyes térség kiterjedése különböző koncentráció eloszlások esetén (szerző szerkesztése)



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

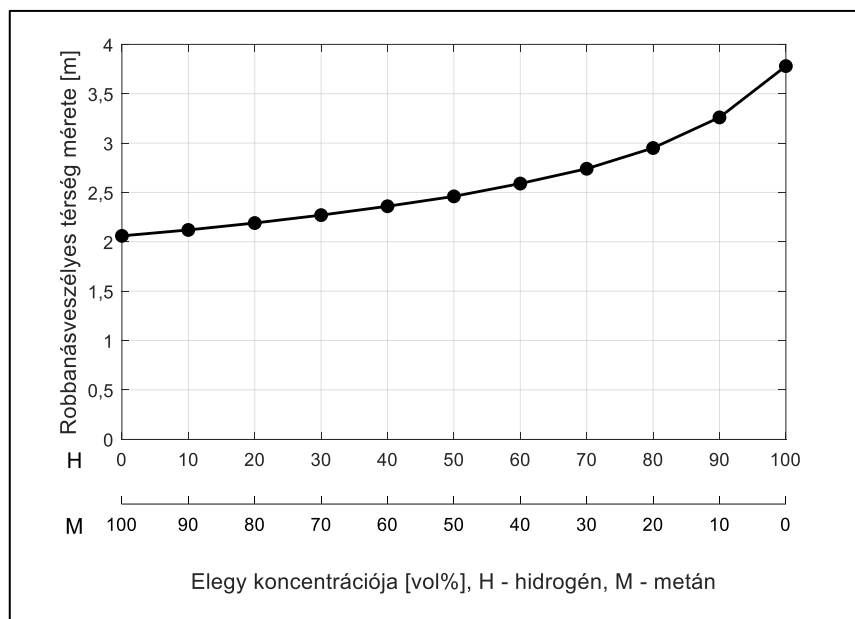
Megfigyeltem, hogy a hidrogén koncentrációjának a növelésével, a zónák kiterjedései exponenciálisan változnak 60 vol. %-os koncentrációtól kezdődően.

Robbanásveszélyes térség mérete - kis rés, nagy nyomás

Abban az esetben, ha a közeg nyomása 160 bar(g), hőmérséklete 25°C és a feltételezett résméret egy peremes csatlakozásnál például $1,375 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$, a 3.13. táblázatban láthatók a tömegáram, a kibocsátási karakterisztika, valamint a robbanásveszélyes térségek kiterjedése különböző koncentrációjú keverékek esetében. A 3.40. ábrán láthatók a koncentráció és a zónakiterjedés függvényében az eredmények.

Hidrogén [vol.%]	Metán [vol.%]	W_g [kg/s]	Q_c [m ³ /s]	Robbanásveszélyes térség kiterjedése [m]
0	100	2,56E-02	9,17E-01	2,06
10	90	2,45E-02	9,70E-01	2,12
20	80	2,33E-02	1,03E+00	2,19
30	70	2,20E-02	1,10E+00	2,27
40	60	2,07E-02	1,19E+00	2,36
50	50	1,93E-02	1,29E+00	2,46
60	40	1,77E-02	1,42E+00	2,59
70	30	1,60E-02	1,58E+00	2,74
80	20	1,42E-02	1,82E+00	2,95
90	10	1,20E-02	2,19E+00	3,26
100	0	9,33E-03	2,92E+00	3,78

3.13. táblázat: Kis rés, nagy nyomás, robbanásveszélyes térség kiterjedése különböző koncentráció eloszlás esetén
(szerző szerkesztése)



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

Ugyanazt állapítottam meg, mint alacsonyabb nyomás esetében, hogy az említett 60 vol.%-os hidrogén koncentrációt követően exponenciálisan növekszik a zóna kiterjedése.

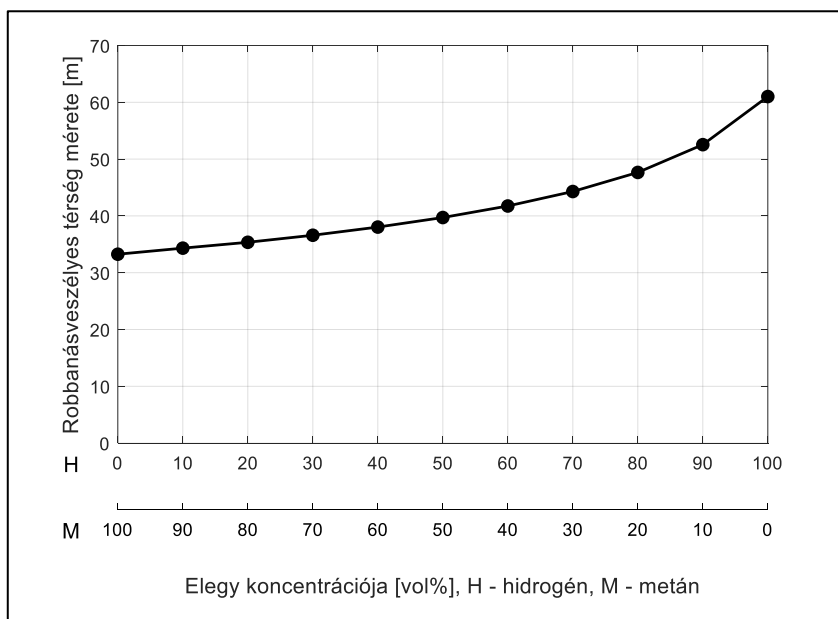
Robbanásveszélyes térség mérete - nagy rés, kis nyomás

Abban az esetben, ha közeg nyomása 5 bar(g), hőmérséklete 25°C és a feltételezett résméret egy peremes csatlakozásnál például $6221,139 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, mint egy túlnyomás elleni védelmet ellátó biztonsági lefúvató esetében a 3.14. táblázatban láthatók a tömegáram, a kibocsátási karakterisztika, valamint a

robbanásveszélyes térségek kiterjedése különböző koncentrációjú keverékek esetében. A 3.41. ábrán láthatók a koncentráció és a zónakiterjedés függvényében az eredmények. Az eredményeket extrapoláltam a vizsgálat érdekében, amelyet a szabvány már viszont nem enged, de kutatásom a nagyobb tartományokra is kiterjed.

Hidrogén [vol.%]	Metán [vol.%]	W_g [kg/s]	Q_c [m ³ /s]	Robbanásveszélyes térség kiterjedése [m]
0	100	5,15	184,39	33,25
10	90	4,92	195,02	34,32
20	80	4,68	207,20	35,35
30	70	4,43	221,40	36,59
40	60	4,16	238,26	38,03
50	50	3,87	258,78	39,71
60	40	3,56	284,59	41,74
70	30	3,23	318,54	44,29
80	20	2,85	366,29	47,65
90	10	2,41	441,19	52,54
100	0	1,88	586,82	61,01

3.14. táblázat: Nagy rész, kis nyomás, robbanásveszélyes térség kiterjedése különböző koncentráció eloszlás esetén (szerző szerkesztése)



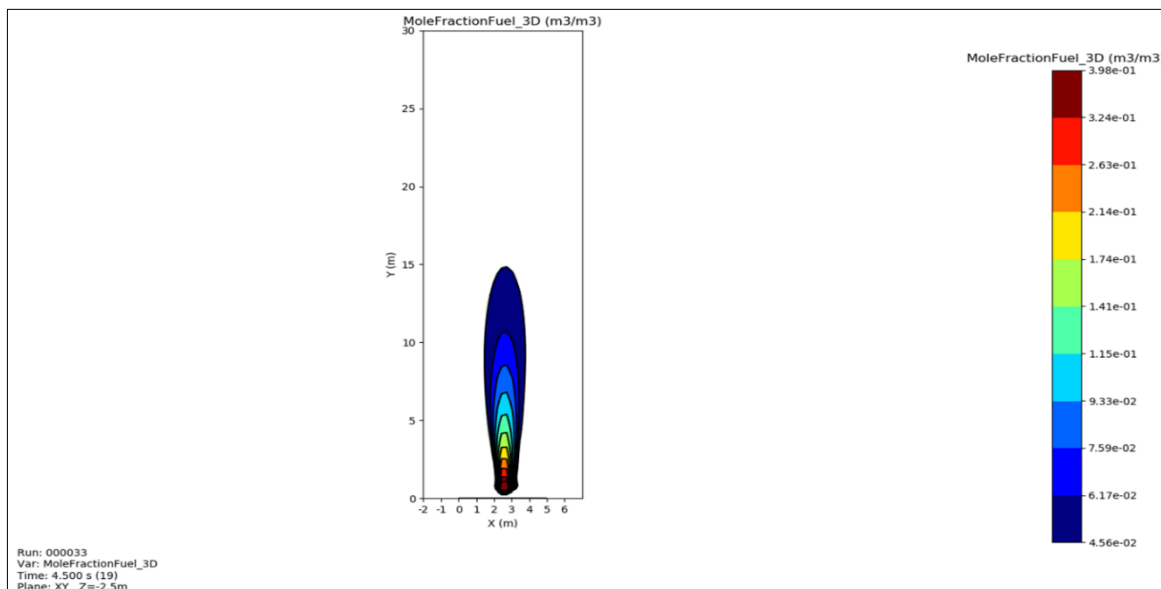
3.41. ábra: A robbanásveszélyes térség kiterjedése a koncentráció eloszlás függvényében (nagy rész, alacsony nyomás) (szerző szerkesztése)

Hasonlót figyeltem és állapítottam meg, mint az előző két esetben, a 60 vol.%-os hidrogén koncentrációtól exponenciálisan növekszik a zónák kiterjedése.

3.3.3.5. SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK VIZSGÁLATA

A FLACS-CFD szimulációval három szivárgásra vizsgálatára készítettem modellt, amelyek a nagy részméret, 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. Amennyiben a hidrogén-metán aránya 50-50%, akkor a szimulációval a

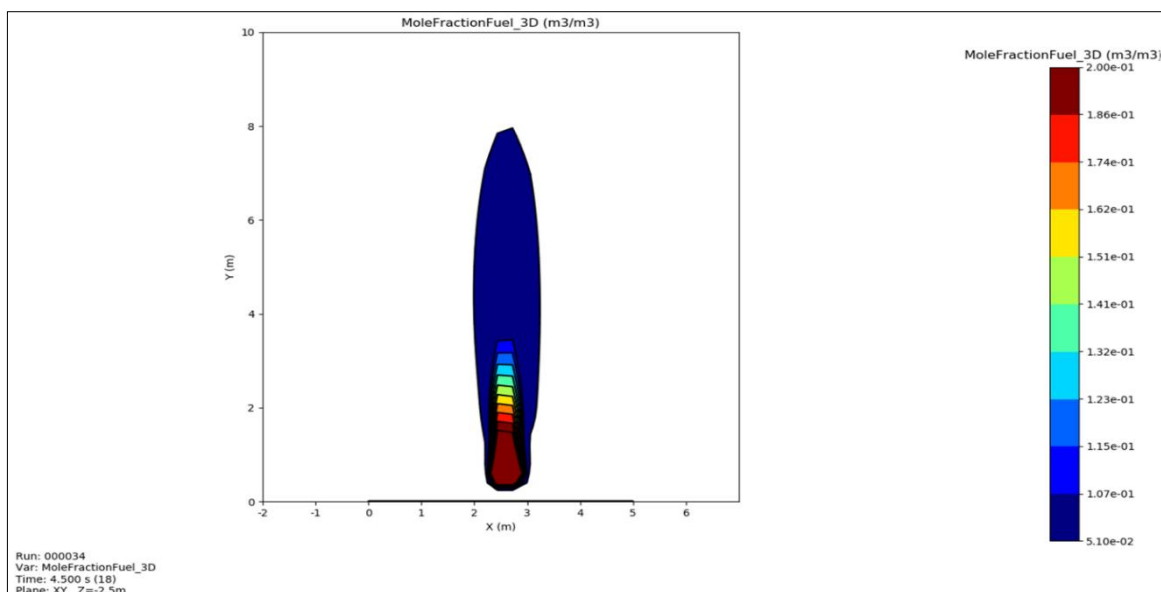
robbanásveszélyes térség kiterjedése megközelítőleg 15 méter, amelyet a 3.42. ábra szemléltet. Mindegyik szimuláció 10 másodpercig volt futtatva és 4,5 másodperc időponttól volt tapasztalható a legnagyobb zóna kiterjedés. A szimulációs modellekbe légáramlás nem került peremfeltételként meghatározásra, mivel az hatással van a robbanásveszélyes zóna terjedésére, amelyet a szabvány szerinti és kiterjesztett összefüggések sem kezelnek.



3.42. ábra: A FLACS-CFD szimulációval modellezett robbanásveszélyes térség kiterjedése az 50-50 vol.% koncentráció eloszlású hidrogén-metán esetében (nagy rés, kis nyomás) (szerző szerkesztése)

Ezzel a modellel végzett szimuláció, a megállapított 15 méteres eredmény, sokkal kisebb, mint a kiterjesztett összefüggéssel számolt 39,71 méter.

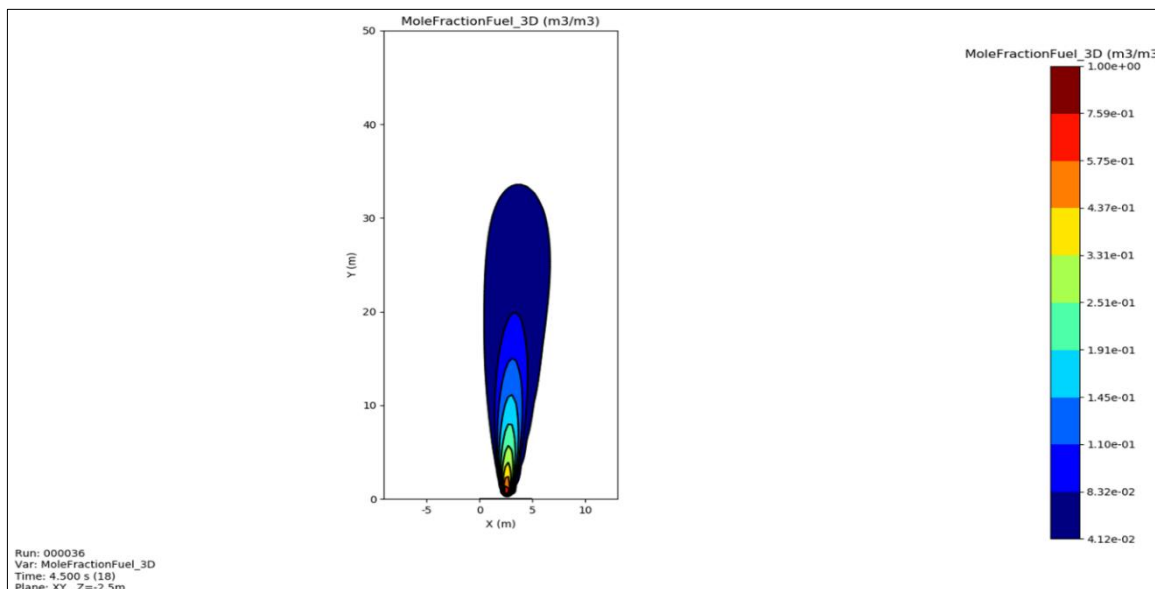
Abban az esetben, ha a hidrogén-metán keverék aránya 10-90 vol.%, akkor a szimulációval a robbanásveszélyes térség kiterjedése megközelítőleg 8 méter, amely a 3.43. ábrán látható.



3.43. ábra: A FLACS-CFD szimulációval modellezett robbanásveszélyes térség kiterjedése a 10-90 vol.% koncentráció eloszlású hidrogén-metán esetében (nagy rés, kis nyomás) (szerző szerkesztése)

Ilyen arányú keveréknél a szimulációval 8 méteres zónakiterjedés került megállapításra, amely ismételten sokkal kisebb, mint a számolt 34,32 méter.

Amikor hidrogén nagymértékben jelen van a keverékben, tehát 90-10% az arány a metánhoz képest, akkor a szimulációval a robbanásveszélyes térség kiterjedése nagyságrendileg 35 méter, amely a 3.44. ábrán látható.



3.44. ábra: A FLACS-CFD szimulációval modellezett robbanásveszélyes térség kiterjedése a 90-10 vol.% koncentráció eloszlású hidrogén-metán esetben (nagy rés, kis nyomás) (szerző szerkesztése)

Ezen keveréknél a szimulációval 35 méteres zónakiterjedés állapítottam meg, amely szignifikánsan eltér a számolt 54,52 méterhez képest, de itt a legkisebb az eltérés, csupán 19 méter.

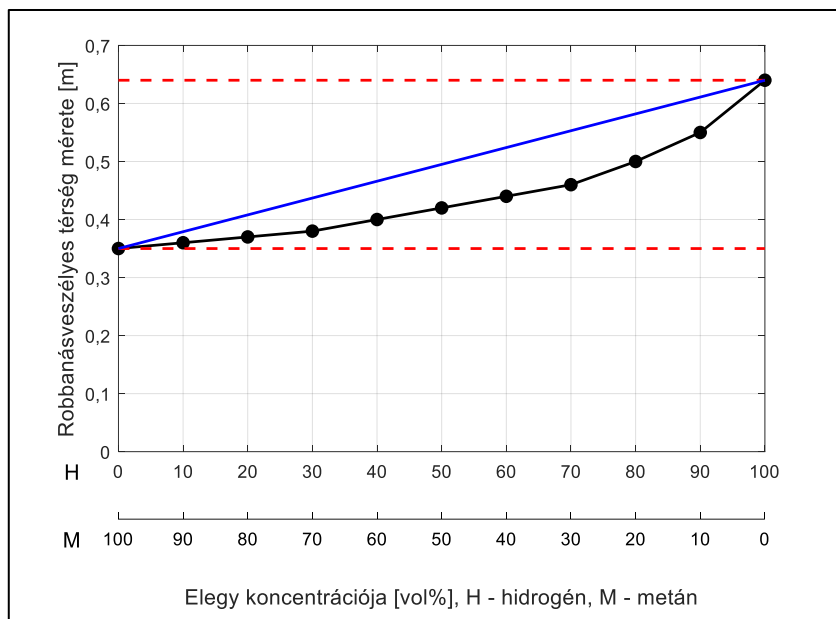
3.3.3.6. GÁZKEVERÉKEK ROBBANÁSVESZÉLYES TÉRSÉGEIT LEÍRÓ EGYSZERŰSÍTETT EGYENLET

Az ismertett új analitikai modellek kiterjesztése szerint jól becsülhető egy gázkeverék lehetséges robbanásveszélyes térségeinek kiterjedése, viszont a hosszú és részletes számítások esetében könnyen előfordulhat a hibázás lehetősége.

A 3.16. egyenlet alkalmazásával könnyebben meghatározható egy adott keverékek okozta robbanásveszélyes térség nagysága. Az egyenlet lényege, hogy a gázkeverékekben található komponensek közül a legkisebb ($X_{kit,1}$) és legnagyobb ($X_{kit,2}$) kiterjedést okozó közegek értékét alapul véve, valamint a legnagyobb robbanásveszélyes térségét kiterjedést okozó anyag koncentrációját (C_2), linearizálásával kerül meghatározásra a keverék kiterjedése:

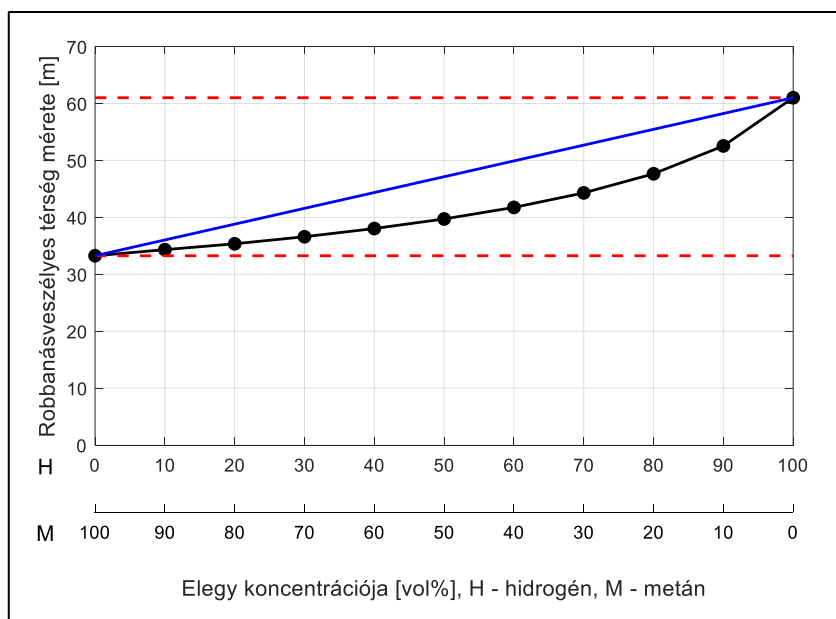
$$X_{kit,kev} = X_{kit,1} + (X_{kit,2} - X_{kit,1}) \cdot C_2. \quad (3.16.)$$

A 3.45. és 3.46. ábrákon látható, hogy ha amennyiben az egyenlet alkalmazásával kerül meghatározásra a robbanásveszélyes térség kiterjedése, a bemutatott új analitikai modellek és szimulációk eredményeivel összehasonlítva is még egy kedvező és biztonságos állapotok adódnak, amely nem igényel hosszú és részletes számításokat.



3.45. ábra: Kis rész, alacsony nyomás, robbanásveszélyes térség kiterjedésének linearizálása (szerző szerkesztése)

A kisebb robbanásveszélyes térségek kiterjedése esetében 10-90 vol.% hidrogén-metán koncentráció esetén 0,38 méter a robbanásveszélyes térség kiterjedése, amely 5,27 %-kal nagyobb, de ugyan akkor egy kizárólag hidrogénre való méretezés esetén, amely 0,61 méter, sokkal kisebb.



3.46. ábra: Nagy rész, kis nyomás, robbanásveszélyes térség kiterjedésének linearizálása (szerző szerkesztése)

A 3.46. ábráról látható, hogy például 50-50 vol.% hidrogén-metán koncentrációkon 47,13 méteres robbanásveszélyes térséget jelent, amely 18,69 %-kal nagyobb, mint az új analitikai modell kiterjesztésével végzett számítás, de 100 vol.% hidrogén esetében (61,01 m) jelentősebb kisebb. A az összes állapotr elvégezve a számítást 4-20 %-os különbségeket tapasztaltam, amely a linearizált vonal és görbe szerint távolságokkal függ össze, a koncentráció függvényében. Mindegyik esetben az alacsony metán koncentráció esetén volt kisebb a különbség és a 60 vagy 70 vol.% hidrogén koncentráció esetén volt a különbség a legnagyobb, mivel a magasabb hidrogén koncentráció azon

tartományi szakaszban már kritikusabb, mint a metán, de már a tiszta hidrogénhez közelít, így csökken a különbség.

A kutatásom során ezen egyszerűsített egyenlet további vizsgálatot igényel, mivel a gázkeverékek komponensei közti diszpergálás és fázis-szétválasztás lehetőségét még részletesebben tanulmányozni szükséges, hogy milyen időtávlat, illetve távolság szerint állhatnak fenn esetlegesen az inhomogén állapotok. Viszont az továbbra is igazolt, hogy gázkeverékek szimuláció kapcsán a FLACS-CFD, a DNV Phast és BREEZE szoftverek képesek kezelni a kémiai és fizikai tulajdonságaik szerinti állapotokat, homogén rendszerként kezelve azokat.

3.3.4. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

Az általam megalkotott összefüggések kiterjesztésével és a vizsgált keverékek számítási eredményeiből látható, hogy a két 100%-os koncentráció közötti robbanásveszélyes zónák lehetséges mérete a koncentrációk nagyságát változtatva arányos. A FLACS-CFD-vel végzett szimulációk eredményei kisebb zónát adnak, amely jelenségre a saját és más kutatások is megerősítenek. A számolt és szimulált eredmények összehasonlításának a kiértékelését a 3.15. táblázat tartalmazza. Az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabványt [17] felülvizsgálva a bemutatott összefüggések javasolt felhasználási lehetőségei, hogy a gázkeverékek robbanásveszélyes térségeinek a meghatározását nem csak véges térfogatú szimulációs szoftverekkel valósítható meg, hanem a bemutatott, részletezett módszertan alapján, analitikai módon is meghatározható. Az általam kidolgozott analitikai összefüggések nemcsak hidrogén-metán esetében, hanem tetszőleges gázkeverék esetében is használhatók. A szimulációs eredményekkel összehasonlítva, nem szükséges a konzervatív megközelítést alkalmazni és a legveszélyesebb robbanásveszélyes gázra vagy gőzre méretezni a robbanásveszélyes térségeket, ezáltal pontosabb eredmények érhetők el a zónák kiterjedésében, ami üzemeltetés, létesítés szempontból alacsonyabb költségeket eredményez.

Hidrogén-metán keverék koncentrációja [vol.%]	Új analitikai modellek kiterjesztése [m]	FLACS-CFD [m]	Átlagos különbség [x%]
50-50	39,71	15	2,65
10-90	34,32	8	4,29
90-10	54,52	35	1,56

3.15. táblázat: A hidrogén-metán keverék új analitikai és FLACS-CFD szimulációval vizsgált eredmények összehasonlítása (szerző szerkesztése)

A hiba lehetősége alacsonynak tekinthető, mivel az analitikai számítás még mindig konzervatívnak minősül.

4. TÉZISEK – 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]

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

- 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 áramlástani 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 a 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. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatásom során elsőként szakirodalmi áttekintést végeztem, amelynek keretében részletesen feldolgoztam a robbanásveszélyes környezet kialakulásának feltételrendszerét, a kapcsolódó robbanásveszélyes környezet kialakulásához kötődő tulajdonságokat, valamint a robbanásvédelemhez kapcsolódó jogszabályi és szabványi háttérrel. Összegyűjtöttem és rendszereztem a különféle kibocsátási formákat – ideértve egy- és kétfázisú szivárgásokat, illetve a különböző hőmérsékleti viszonyok melletti párolgásokat is –, valamint áttekintettem a robbanásveszélyes gázok, gőzök terjedési modelljeit, különös tekintettel a CFD-alapú szimulációs lehetőségekre.

Ezt követően az acetone szabadfelszíni párolgásának vizsgálatával foglalkoztam, mivel ez az anyag a vegyipar mellett más iparágakban, például a szépségiparban is gyakori, és robbanásveszély szempontjából kiemelt kockázatot jelent. Összehasonlítottam a szakirodalomban és a szabványi környezetben megtalálható összefüggéseket ALOHA szoftverrel végzett szimulációim és saját kísérleteim eredményeivel, és ezek alapján javaslatot tettem egy pontosabban alkalmazható összefüggés használatára a robbanásvédelem szabályozásában hatályos szabvány esetében.

Kutatásom későbbi szakaszában különféle szivárgási eseteket modelleztem ANSYS Fluent és FLACS-CFD szoftver környezetekben. Hidrogén és metán közegek esetén vizsgáltam a különböző légsebességű és -irányú áramlások hatását a kialakuló robbanásveszélyes térségek kiterjedésére. Megállapítottam, hogy a jelenlegi szabványi háttér ezekre a hatásokra nem fordít kellő figyelmet, így szükség lehet azok újraértékelésére. Mivel bebizonyítottam, hogy még a levegőnél kisebb sűrűségű gázok is képesek járószint alatt esetlegesen veszélyes koncentrációjú közeget képezni bizonyos peremfeltételek mellett.

A FLACS-CFD szoftver környezetét felhasználva egy ammónia szivárgásból eredő lehetséges kockázatkezelési forgatókönyvet dolgoztam ki, amelynek során gázérzékelők elhelyezésének optimalizálásával foglalkoztam. Eredményeim alapján az érzékelők pontos pozicionálása kulcsfontosságú a gyors és hatékony műszaki beavatkozások szempontjából.

Végezetül a gázkeverékek robbanásveszélyes térségeinek meghatározásával kapcsolatban végeztem módszertani vizsgálatokat. Az MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 szabvány tiszta anyagokra vonatkozó megközelítését kiegészítettem egy új módszertannal, amely lehetővé teszi a gázkeverékekből képződő robbanásveszélyes térségek pontos meghatározását.

A kutatásom során végig arra törekedtem, hogy olyan eredményeket és javaslatokat dolgozzak ki, amelyek gyakorlati hasznát jelenthetnek a mérnöki munkában, különösen a vegyipari biztonságtechnika és robbanásvédelem területén.

6. SUMMARY

As part of my research, I initially conducted a comprehensive literature review, in which I systematically examined the conditions required for the formation of explosive atmospheres, the relevant explosion characteristics, and the applicable legislative and regulatory framework governing explosion protection. I compiled and categorized the various forms of hazardous substance releases, including single- and two-phase leaks, as well as evaporation at ambient, near-boiling, and above-boiling temperatures. Furthermore, I reviewed the dispersion models of flammable gases and vapors, with particular emphasis on CFD-based simulation methodologies.

Subsequently, I focused on investigation of the free-surface evaporation of acetone, substance is frequently used in both the chemical and cosmetics industries and it presents a significant explosion hazard. I compared the correlations found in the literature and standard environment with the results of my simulations performed using the ALOHA software and my own experimental data. Based on this comparison, I proposed an alternative correlation that offering greater accuracy and reliability, which I recommend for consideration in the context of regulatory explosion protection practices.

In the following phase of my research, I modeled various leakage scenarios using ANSYS Fluent and FLACS-CFD simulation environments. I analyzed the impact of different air velocities and flow directions on the extent and shape of flammable gas clouds resulting from hydrogen and methane releases. I found that current standards do not adequately consider the influence of airflow on hazardous area extent. Additionally, I demonstrated that, under certain boundary conditions, even gases with a lower relative density than air can accumulate below floor level in hazardous concentrations, indicating the need for a reevaluate of existing standard assumptions.

Utilizing the FLACS-CFD software, I developed a risk mitigation scenario related to a potential ammonia release. This involve optimizing gas detector placement. My findings highlighted that the proper positioning of gas sensors is crucial for ensuring timely and effective technical and organizational interventions.

Finally, I conducted a methodological analysis concerning the classification of hazardous areas resulting from gas mixtures. I extended the methodology presented in the MSZ EN IEC 60079-10-1:2021 standard, which is limited to pure substances by developing a novel calculation approach that enables a more accurate determination of the extent of hazardous areas in cases involving gas mixtures.

Throughout my research, my objective was to generate results and recommendations that contribute to practical improvements in engineering applications, particularly in the fields of chemical process safety and explosion protection.

7. 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 illékonyága 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 légtechnikai 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 csökkentet 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 optimálható 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.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönettel tartozom témavezetőimnek, Prof. Dr. Siménfalvi Zoltánnak és Prof. Dr. Szepesi L. Gábornak, akik kitartóan támogattak, fáradtságot nem ismerve a munkám során, akikhez bármikor fordulhattam szakmai kérdésekben. Nélkülük nem juthattam volna el idáig. Továbbá szeretném hálámat kifejezni Kecskés Csabának és Kerekes Zoltánnak, akik az ipari gyakorlat területén megszerzett tudásukat átadták, ötleteikkel, tanácsaikkal elláttak.

Szeretnék köszönetet mondani az Energetikai és Vegyipari Gépezeti Intézet összes munkatársának a doktori képzésem alatt és az értekezésem elkészítése közben nyújtott támogatásukért. Köszönöm Dr. Bolló Betti és Fodor Bélának a szimulációs kérdésekben nyújtott támogatást. Külön köszönettel tartozom Dr. Petrik Máténak és Pusztai Tamásnak, akik segítettek a munkámat és egyes vizsgálataimat, de különösképpen Dr. Kállai Viktóriának köszönöm a támogatását, aki segített a kutatás közben felmerülő holtponatokon való átlendülésben.

Végül, de nem utolsó sorban szeretném megköszönni a családom és barátaim támogatását, segítségüket, odaadásukat és türelmüket, amely végig kísért az egész dolgozat készítése során.

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>
- 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-tyky3Si.
- 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 atmospheres 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>

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] J. Jumeau, "History of explosion proof equipment," *Ultimheat University*, p. 5, 2014.
- [2] W. Ian, "A contemporary account of the disaster has survived in a pamphlet of 'The Liverpool Religious Tract Society', entitled, ' Narrative of a Dreadful Occurrence at Felling Colliery (Nr. Durham) 25th May 1812.,'" Picks Publishing. Accessed: Jul. 05, 2024. [Online]. Available: <http://www.mineaccidents.com.au/uploads/felling-colliery-explosion-1812.pdf>
- [3] D. Khomeriki, S. Khomeriki, R. Mikhelson, N. Chikhradze, and A. Khvadagiani, "Production of Industrial Explosive Substances on the Basis of the Powders and Solid Rocket Fuel Released from the Utilization of the Expired Ammunition," *Procedia Earth and Planetary Science*, vol. 15, pp. 738–741, 2015, doi: 10.1016/j.proeps.2015.08.117.
- [4] N. Daruka, B. Elek, and M. Leitner, "Assessment of the explosion protection risk of gunpowder as a raw material for manufacturing technology in greenfield plants," in *Zborník prednášok: z 33. medzinárodnej konferencie Trhacia Technika, Banská Bystrica, Slovakia: Slovenská spoločnosť pre trhacie a vŕtacie práce*, Banská Bystrica, Slovakia, 2024, pp. 53–64.
- [5] L. Tugyi, Z. Siménfalvi, and L. G. Szepesi, "Investigation of the explosive atmospheres extent of hydrogen and methane gas mixtures by calculation and FLACS-CFD simulation," *Multidiszciplináris Tudományok*, vol. 14, no. 3, pp. 44–60, Nov. 2024, doi: 10.35925/j.multi.2024.3.5.
- [6] N. Daruka, "A robbanásvédelem aktuális kérdései és megvalósításának lehetőségei a robbanóanyag gyártás érintett területein," Szakdolgozat, *Miskolci Egyetem*, Miskolc, 2023.
- [7] 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.
- [8] J. L. Santos, *Fire and Explosion Risk Analysis*. Risiko Technik Gruppe Office of Scientific and Technical Information, 2009.
- [9] 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>.
- [10] T. Kompolthy és L. Szalay, „Tűz- és robbanásvédelem”, *Műszaki Könyvkiadó*, Budapest, 1990.
- [11] 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>.
- [12] 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>.
- [13] Dr. Bátor B., „Égés- és robbanáselmélet I.”, *Tankönyvkiadó*, Budapest, 1980.

-
- [14] R. G. Gann, „Principles of fire behavior and combustion”, Fifth edition. Burlington, MA: *Jones & Bartlett Learning*, 2024.
- [15] TvMI 13.5:2025.02.01., „Tűzvédelmi Műszaki Irányelv (TvMI 13.5:2025.02.01.)”, *BM OKF*, Budapest, 2025.
- [16] 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: .org/10.4028/p-tky3Si.
- [17] MSZ EN IEC 60079-10-1:2021, „Robbanóképes közegek. 10-1. rész: Téréségbesorolás. Robbanóképes gázközegek (IEC 60079-10-1:2020) (IEC 60079-10-1:2020)”, *Magyar Szabványügyi Testület*, Budapest, 2021.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] MSZ EN 1539:2016, „Szárítók és kemencék, amelyekben éghető anyagok szabadulnak fel. Biztonsági követelmények”, *Magyar Szabványügyi Testület*, Budapest, 2016.
- [22] A. G. White, “XCVI.—Limits for the propagation of flame in inflammable gas–air mixtures. Part III. The effects of temperature on the limits,” *J. Chem. Soc., Trans.*, vol. 127, no. 0, pp. 672–684, 1925, doi: 10.1039/CT9252700672.
- [23] Guide CEI 31-35, „Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres – Guide for Classification of Hazardous Areas”, *Comitato Elettrotecnico Italiano*, Milánó, 2012-02
- [24] A. Bozek and V. Rowe, “Flammable Mixture Analysis for Hazardous Area Classification,” *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 1827–1835, Jun. 2010, doi: 10.1109/TIA.2010.2059591.
- [25] E. K. Addai, D. Gabel, and U. Krause, “Models to estimate the lower explosion limits of dusts, gases and hybrid mixtures,” *Chem Eng Trans*, vol. 48, pp. 313–318, 2016, doi: 10.3303/CET1648053.
- [26] MSZ EN ISO 10156:2018, „Gázpalackok. Gázok és gázkeverékek. A tűzveszélyesség és az oxidálóképesség meghatározása a palackszelep-csatlakozások kiválasztásához (ISO 10156:2017)”, *Magyar Szabványügyi Testület*, Budapest, 2018.
- [27] V. Schröder and M. Molnarne, “Flammability of gas mixtures: Part 1: Fire potential,” *J Hazard Mater*, vol. 121, no. 1, pp. 37–44, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.01.032>.
- [28] M. Molnarne, P. Mizsey, and V. Schröder, “Flammability of gas mixtures: Part 2: Influence of inert gases,” *J Hazard Mater*, vol. 121, no. 1, pp. 45–49, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.01.033>.

- [29] S. M. Tauseef, T. Abbasi, R. Suganya, and S. A. Abbasi, "A critical assessment of available software for forecasting the impact of accidents in chemical process industry," *International Journal of Engineering, Science and Mathematics*, vol. 6, no. 7, 2017, [Online]. Available: <http://www.ijesm.co.in>,
- [30] H. Madani, C. Coquelet, and D. Richon, "Vapor-liquid equilibrium data concerning refrigerant systems example (R116 + R143a)," *Energy Procedia*, vol. 18, pp. 21–34, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.05.014.
- [31] T. Poós and E. Varju, "Review for convection based evaporation of open liquid surface and equations of evaporation rate," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 157, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2024.107755.
- [32] R. C. Reid, J. M. Prausnitz, and B. E. Poling, *The properties of gases and liquids*. United States: McGraw Hill Book Co., New York, NY, 1987. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/biblio/6504847>
- [33] R. A. Burke, „Applied Chemistry and Physics.” *CRC Press*, 2020. doi: 10.1201/9780429455605.
- [34] R. Houghton and W. Bennett, „Emergency Characterization of Unknown Materials.” *CRC Press*, 2020. doi: 10.4324/9781003037668.
- [35] 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>
- [36] J. Petrétei, "A magyar jogharmonizáció az Európai Unió csatlakozás előtt és után," 2004, *Romániai Magyarok Jogtudományi Közlöny*.
- [37] 1993. évi XCIII. törvény a munkavédelemről.
- [38] 3/2003. (III. 11.) FMM-ESzCsM együttes rendelet a potenciálisan robbanásveszélyes környezetben levő munkahelyek minimális munkavédelmi követelményeiről.
- [39] S. A. and I. European Commission: Directorate-General for Employment, *Non-binding guide to good practice for implementing the European Parliament and Council Directive 1999/92/EC on minimum requirements for improving the safety and health protection of workers potentially at risk from explosive atmospheres*. Publications Office, 2005.
- [40] 35/2016. (IX. 27.) NGM rendelet a potenciálisan robbanásveszélyes környezetben történő alkalmazásra szánt berendezések és védelmi rendszerek vizsgálatáról és tanúsításáról.
- [41] 8/2002. (II. 16.) GM rendelet a potenciálisan robbanásveszélyes környezetben történő alkalmazásra szánt berendezések, védelmi rendszerek vizsgálatáról és tanúsításáról.
- [42] 1996. évi XXXI. törvény a tűz elleni védekezésről, a műszaki mentésről és a tűzoltóságról.
- [43] 54/2014. (XII. 5.) BM rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról.
- [44] 1995. évi XXVIII. törvény a nemzeti szabványosításról. [45] MA. National Fire Protection Association Quincy, "NFPA 497, Recommended Practice for the Classification of Flammable Liquids, Gases, or Vapors and of Hazardous (Classified) Locations for Electrical Installations in Chemical Process Areas," 2024
- [46] U. L. Health and Safety Executive, "Health and safety guidance (HSG) 140, Second Edition, Safe use and handling of flammable liquids," 2015.

- [47] MSZ EN 60079-10-2:2015, „Robbanóképes közegek. 10-2: rész: Térségek osztályozása. Gyúlékony poros közegek (IEC 60079-10-2:2009)”, *Magyar Szabványügyi Testület*, Budapest, 2015.
- [48] L. Tugyi, Z. Siménfalvi, G. Szepesi, and C. Kecskés, “Hazardous area classification for wastewater treatment plants using by decree and standard,” *Multidiszciplináris Tudományok*, vol. 13, pp. 26–35, Jun. 2023, doi: 10.35925/j.multi.2023.3.3.
- [49] V. Shrivastava, G. Mohan, N. Feinstein, U. K. Neeraj Bhatia, and O. Bechtel, “An innovative approach to hazardous area classification — Three dimensional (3D) modeling of hazardous areas,” in *2016 Petroleum and Chemical Industry Technical Conference (PCIC)*, Philadelphia, PA, USA, 2016.
- [50] L. Tugyi, Z. Siménfalvi, and G. L. Szepesi, “Comparison of 2D and 3D Representations of Explosion Hazardous Areas,” *Chem Eng Trans*, vol. 111, pp. 349–354, Oct. 2024.
- [51] J. Glynn, “Risk based approach to hazardous area classification,” *1999 International Conference on (Conf. Publ. No. 469) Explosion Safety in Hazardous Areas*, 1999, pp. 17–23, doi: 10.1049/cp:19991060.
- [52] J. Geng, “Innovation Driven by Human and Organizational Factors (HOF) in Risk Assessment Methodologies and Standards: ATEX (Explosive Atmosphere) Risk Assessment Application,” Italy, Torino, 2016. doi: <https://dx.doi.org/10.6092/polito/porto/2642505>.
- [53] Guide CEI 31-35, „Guide for application of the Norm CEI EN 60079-10 (CEI 31-30)”, *Comitato Elettrotecnico Italiano*, Milánó, 1996-10
- [54] Guide CEI 31-35, „Electrical Apparatus for Explosive Gas Atmospheres – Guide for Classification of Hazardous Areas”, *Comitato Elettrotecnico Italiano*, Milánó, 1999-01
- [55] T. Jespen, „ATEX—Explosive Atmospheres”, 1st ed. *Springer International Publishing*, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-31367-2.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 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.
- [59] 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.
- [60] 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.
- [61] 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.

- [62] D. Crowl, "Minimize the Risks of Flammable Materials," *Chem Eng Prog*, vol. 108, pp. 28–33, Apr. 2012.
- [63] T. Abbasi, V. Kumar, S. M. Tauseef, and S. A. Abbasi, "Spread rate of flammable liquids over flat and inclined porous surfaces," *J Chem Health Saf*, vol. 25, no. 5, pp. 19–27, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.jchas.2018.02.004.
- [64] A. Bozek, "Application of IEC 60079-10-1 Edition 2.0 for Hazardous Area Classification," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Mar. 2018, pp. 1881–1889. doi: 10.1109/TIA.2017.2785258.
- [65] G. K. Mikhailov, "Daniel Bernoulli, Hydrodynamica (1738)," *Landmark Writings in Western Mathematics 1640-1940*, pp. 131–142, Jan. 2005, doi: 10.1016/B978-044450871-3/50090-5.
- [66] E. Buckingham, "Notes on the orifice meter: the expansion factor for gases," *Bureau of Standards Journal of Research*, vol. 9, pp. 61–79, 1932.
- [67] J. Kukkonen, *Modelling source terms for the atmospheric dispersion of hazardous substances, Commentationes Physico-Mathematicae 115, Dissertationes No. 34*. Helsinki: The Finnish Society of Sciences and Letters, 1990.
- [68] B. Willi, *Műszaki áramlástan*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1983.
- [69] 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.
- [70] A. McMillan, "4 - Calculation of release rates and the extents of hazardous areas," *Electrical Installations in Hazardous Areas*, pp. 87–124, Jan. 1998, doi: 10.1016/B978-075063768-8/50004-5.
- [71] Ir. C. J. H. van den Bosch, R. A. P. M. Weterings, N. J. Duijm, E. A. Bakkum, and W. P. M. Mercx, „Methods for the calculatuon of physical effects - Yellow Book CPR14”, Third edit. den Hauge, *The Netherlands: National Institute of Public Healt and Envrioemnt (RIVM)*, 1997.
- [72] Z. Yang *et al.*, "The overpressure and temperature characteristics of high volatile liquid fuel explosions in extreme environments: Effects of low initial ambient temperatures and pressures," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 185, pp. 1–8, May 2024, doi: 10.1016/J.PSEP.2024.02.059.
- [73] E. Araujo-Lopez, J. S. Lopez-Echeverry, and S. Reif-Acherman, "The Antoine equation of state: Rediscovering the potential of an almost forgotten expression for calculating volumetric properties of pure compounds," *Chem Eng Sci*, vol. 177, pp. 89–109, Feb. 2018, doi: 10.1016/J.CES.2017.10.051.
- [74] H. W. Xiang, "Vapor Pressures," *The Corresponding-States Principle and its Practice*, pp. 149–178, Jan. 2005, doi: 10.1016/B978-044452062-3/50006-3.
- [75] T. Abbasi, V. Kumar, S. M. Tauseef, and S. A. Abbasi, "Spread rate of flammable liquids over flat and inclined porous surfaces," *J Chem Health Saf*, vol. 25, no. 5, pp. 19–27, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.jchas.2018.02.004.
- [76] M. Hosseini, A. Rodriguez, and W. A. Ducker, "Super-enhanced evaporation of droplets from porous coatings," *J Colloid Interface Sci*, vol. 633, pp. 132–141, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.JCIS.2022.11.065.

- [77] J. Casal, "Source Term," *Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants*, pp. 25–74, Jan. 2018, doi: 10.1016/B978-0-444-63883-0.00002-2.
- [78] G. Opschoor, "Evaporation, Methods for the Calculation of Physical Effects," 1978, *Yellow book*.
- [79] L. Tugyi, Z. Siménfalvi, and L. G. Szepesi, "Experimental and theoretical investigation of acetone evaporation," *Multidiszciplináris tudományok*, vol. 11, no. 5, pp. 132–144, 2021, doi: 10.35925/j.multi.2021.5.13.
- [80] T. Pénelon, V. Debuy, B. Truchot, C. Wagner, L. Donnat, and J. F. Lechaudel, "Pool evaporation: Experimental tests at medium-scale with gasoline," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 65, May 2020, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104072.
- [81] P. G. Sutton and O. Biblarz, *Rocket Propulsion Elements—An Introduction to the Engineering of Rockets*, Ninth., no. 465. Wiley, 2017.
- [82] D. Yuhu, G. Huilin, Z. Jing'en, and F. Yaorong, "Mathematical modeling of gas release through holes in pipelines," *Chemical Engineering Journal*, vol. 92, no. 1–3, pp. 237–241, Apr. 2003, doi: 10.1016/S1385-8947(02)00259-0.
- [83] S. Gant *et al.*, "Area classification of flammable mists: summary of joint-industry project findings," in *SYMPOSIUM SERIES NO. 161*, Institution of Chemical Engineers 2016.
- [84] A. P. Giles, P. J. Kay, K. Mouzakis, P. J. Bowen, and A. P. Crayford, "On flammability hazards from pressurised high-flashpoint liquid releases," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 46, pp. 185–194, 2017, doi: 10.1016/j.jlp.2017.01.024.
- [85] S. El-Zahlanieh *et al.*, "Mist Can Explode, but Still No Standard! Proposal of a Combustible Sprays Test Method," *Chem Eng Trans*, vol. 90, pp. 79–84, 2022, doi: 10.3303/CET2290014.
- [86] 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.
- [87] F. P. Lees, *Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification*, 2nd ed., vol. 1. UK: Assessment and Control, 1996.
- [88] 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.
- [89] 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.
- [90] Magyar Katasztrófavédelmi Hatóság, „Magyar Katasztrófavédelmi Hatóság által elfogadott szoftverek”, <https://www.katasztrofavedelem.hu/application/uploads/documents/2023-02/81070.pdf>, BM OKF, 2023
- [91] L. Tugyi, G. Szepesi L., M. Petrik, and Z. Siménfalvi, "Propane leakage and spread studies against airflows of different magnitudes," in *13th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources and Efficiency (EXPRES 2023)*, 2023, pp. 26–29.
- [92] L. Tugyi, Z. Siménfalvi, G. L. Szepesi, C. Kecskés, Z. Kerekes, and T. Sári, "CFD modeling of subsonic and sonic methane gas release and dispersion," *Pollack Periodica*, vol. 18, no. 3, pp. 99–105, Sep. 2023, doi: 10.1556/606.2023.00789.

- [93] T. Baerland, “Master of Science in Product Design and Manufacturing Release and Spreading of Dense Gases Turbulence modeling with Kameleon FireEx,” 2011.
- [94] J. S. Bjørge, “Scenario based analysis of fire escalation in a gas process plant,” 2013.
- [95] S. Govindarajan, “Quantitative Risk Assessment of the Performance of Barriers Controlling Fire and Explosion Risk,” Master thesis, Trondheim, 2019.
- [96] S. Gupta and W. Wong, “Fire Consequence Modelling-A comparison of the results from PHAST and KFX,” in *SYMPOSIUM SERIES NO 162*, Institution of Chemical Engineers, 2017, p. 27.
- [97] H. Nubli, A. Fajri, A. R. Prabowo, Khaeroman, and J. M. Sohn, “CFD implementation to mitigate the LNG leakage consequences: A review of explosion accident calculation on LNG-fueled ships,” in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2022, pp. 343–350. doi: 10.1016/j.prostr.2022.05.040.
- [98] H. Nubli, J. M. Sohn, and D. Jung, “Consequence Analysis of Accidental LNG Release on the Collided Structure of 500 cbm LNG Bunkering Ship,” *J Mar Sci Eng*, vol. 10, no. 10, Oct. 2022, doi: 10.3390/jmse10101378.
- [99] T. Secillano, Y. Xu, D. A. Boedo, and M. Harper, “Validation and verification of Phast CFD: a comparative analysis with Phast, KFX and tests,” Mar. 2024. Accessed: Apr. 21, 2025. [Online]. Available: https://mysoftware.dnv.com/download/public/phast/technical_documentation/11_cfd_validation/Phast%20CFD%20validation%20and%20verification.pdf
- [100] 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.
- [101] 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.
- [102] Z. Salamonowicz, A. Krauze, M. Majder-Lopatka, A. Dmochowska, A. Piechota-Polanczyk, and A. Polanczyk, “Numerical reconstruction of hazardous zones after the release of flammable gases during industrial processes,” *Processes*, vol. 9, no. 2, pp. 1–17, Feb. 2021, doi: 10.3390/pr9020307.
- [103] D. Brzezinska, “Hydrogen explosion hazards limitation in battery rooms with different ventilation systems,” in *International Conference on Hydrogen Safety*, Adelaide, Australia: International Association for Hydrogen Safety (HySafe), Sep. 2019.
- [104] D. Brzezińska, “Hydrogen dispersion and ventilation effects in enclosures under different release conditions,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 13, Jul. 2021, doi: 10.3390/en14134029.
- [105] M. Gerbec, P. Vidmar, G. Pio, and E. Salzano, “A comparison of dispersion models for the LNG dispersion at port of Koper, Slovenia,” *Saf Sci*, vol. 144, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.ssci.2021.105467.
- [106] A. Luketa and B. Romero, “Model Evaluation Report for LNG Dispersion on Fire Dynamics Simulator Version 6.5.3,” USA, Albuquerque, Oct. 2018. doi: 10.2172/1761343.
- [107] A. Krauze, “The application of CFD software in the explosive hazardous area classification,” in *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, Dec. 2018. doi: 10.1051/mateconf/201824700053.

-
- [108] S. Bilyaz and O. A. Ezekoye, "Modeling the dispersion and mixing of light gases in enclosed spaces using the Method of Moments," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 80, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jlp.2022.104877.
- [109] I. David Udechukwu, "Development of a Model for Computational Fluid Dynamics Simulation of Liquefied Natural Gas Vapour Dispersion," 2015.
- [110] M. Macchi, "LNG/Fuel cascades and flammable cloud formation," 2018.
- [111] R. K. Azadboni, "Numerical Modelling of Inhomogeneous Liquefied Natural Gas (LNG) Vapour Cloud Explosions."
- [112] J. Fiates, R. R. C. Santos, F. F. Neto, A. Z. Francesconi, V. Simoes, and S. S. V. Vianna, "An alternative CFD tool for gas dispersion modelling of heavy gas," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 44, pp. 583–593, 2016, doi: 10.1016/j.jlp.2016.08.002.
- [113] J. Fiates and S. S. V. Vianna, "Numerical modelling of gas dispersion using OpenFOAM," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 104, pp. 277–293, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.psep.2016.09.011.
- [114] F. Nazarpour, J. Wen, S. Dembele, and I. D. Udechukwu, "LNG vapour cloud dispersion modelling and simulations with OpenFOAM," *Chem Eng Trans*, vol. 48, pp. 967–972, 2016, doi: 10.3303/CET1648162.
- [115] K. Cassano, A. Pierro, R. Perini, and P. Farinelli, "LNG Release in Storage Area: Multiphase Modelling and CFD Simulation for Consequences Analysis in Risk Assessment," *Chem Eng Trans*, vol. 91, pp. 175–180, 2022, doi: 10.3303/CET2291030.
- [116] C. R. Bauwens and S. B. Dorofeev, "CFD modeling and consequence analysis of an accidental hydrogen release in a large scale facility," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 35, pp. 20447–20454, Dec. 2014, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2014.04.142.
- [117] C. Dixon, "Gas dispersion with OpenFOAM," 2012. [Online]. Available: www.sec.gov.
- [118] A. O. Souza *et al.*, "A new correlation for hazardous area classification based on experiments and CFD predictions," *Process Safety Progress*, vol. 38, no. 1, pp. 21–26, Mar. 2019, doi: 10.1002/prs.11974.
- [119] 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.
- [120] P. L. Barros, A. M. Luiz, C. A. Nascimento, A. T. P. Neto, and J. J. N. Alves, "On the non-monotonic wind influence on flammable gas cloud from CFD simulations for hazardous area classification," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 68, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jlp.2020.104278.
- [121] E. Papanikolaou, D. Baraldi, M. Kuznetsov, and A. Venetsanos, "Evaluation of notional nozzle approaches for CFD simulations of free-shear under-expanded hydrogen jets," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 23, pp. 18563–18574, Dec. 2012, doi: 10.1016/j.ijhydene.2012.09.135.
- [122] K. N. M. Le, Y. H. P. Duong, T. M. Le, N. T. Dang, D. T. Le, and V. T. Tran, "Simulation of the LPG Leakage and Dispersion Process to the Factory Environment using Computational Fluid Dynamics (CFD)," *Chem Eng Trans*, vol. 106, pp. 499–504, 2023, doi: 10.3303/CET23106084.

-
- [123] C. A. Nascimento, A. M. Luiz, P. L. Barros, A. T. P. Neto, and J. J. N. Alves, "A CFD-based empirical model for hazardous area extent prediction including wind effects," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 71, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.jlp.2021.104497.
- [124] M. J. Ivings *et al.*, "Health and Safety Executive Area classification for secondary releases from low pressure natural gas systems," Harpur Hill, Buxton, SK17 9JN, 2008.
- [125] D. M. Webber, M. J. Ivings, and R. C. Santon, "Ventilation theory and dispersion modelling applied to hazardous area classification," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 24, no. 5, pp. 612–621, Sep. 2011, doi: 10.1016/j.jlp.2011.04.002.
- [126] Y. H. P. Duong *et al.*, "Simulation of Benzene Leakage and Dispersion in the Laboratory via Computational Fluid Dynamics," *Chem Eng Trans*, vol. 106, pp. 505–510, 2023, doi: 10.3303/CET23106085.
- [127] A. Dasgotra, G. V. V. Varun Teja, A. Sharma, and K. B. Mishra, "CFD modeling of large-scale flammable cloud dispersion using FLACS," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 56, pp. 531–536, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.jlp.2018.01.001.
- [128] O. R. Hansen, F. Gavelli, M. Ichard, and S. G. Davis, "Validation of FLACS against experimental data sets from the model evaluation database for LNG vapor dispersion," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 23, no. 6, pp. 857–877, Nov. 2010, doi: 10.1016/j.jlp.2010.08.005.
- [129] F. Pappalardo *et al.*, "Comparison of CFD numerical approaches for the simulation of accidental gas release in energy applications," in *Proceedings of the 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference*, P. Baraldi, F. Di Maio, and E. Zio, Eds., Italy, Venice: Research Publishing, Singapore, pp. 4067–4074. doi: 10.3850/978-981-14-8593-0.
- [130] Juwari *et al.*, "Simulation of Natural Gas Dispersion and Explosion in Vented Enclosure using 3D CFD FLACS Software," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Apr. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/778/1/012144.
- [131] J. H. Kim and M. K. Lee, "A comparison on detected concentrations of lpg leakage distribution through actual gas release, cfd (Flacs) and calculation of hazardous areas," *Applied Chemistry for Engineering*, vol. 32, no. 1, pp. 102–109, Feb. 2021, doi: 10.14478/ace.2020.1085.
- [132] K. Y. Kang, X. Wang, J. Wang, W. Shi, Y. Sun, and M. Chen, "A Critical Review of a Computational Fluid Dynamics (CFD)-Based Explosion Numerical Analysis of Offshore Facilities," Nov. 01, 2022, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s11831-022-09756-1.
- [133] G. W. Howard, A. V Tchouvelev, Z. Cheng, and V. M. Agranat, "DEFINING HAZARDOUS ZONES-ELECTRICAL CLASSIFICATION DISTANCES," Aug. 2019.
- [134] B. H. Hjertager, J. Osenbroch, and T. Solberg, "Computational Fluid Dynamics (CFD) Modelling of Gas Dispersion in Offshore Modules Computational Fluid Dynamics (CFD) Modelling of Gas Dispersion in Offshore Modules 1," 2002. [Online]. Available: <http://hugin.aue.auc.dk>
- [135] B. Angers, A. Hourri, P. Bénard, P. Tessier, and Perrin, "SIMULATIONS OF HYDROGEN RELEASES FROM A STORAGE TANKS: DISPERSION AND CONSEQUENCES OF IGNITION," Sep. 2019.

- [136] E. Alp and C. S. Matthias, "COBRA. A heavy gas/liquid spill and dispersion modelling system Important phases of spill of a heavy gas producing substance," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 4, no. 3, pp. 139–150, Apr. 1991, doi: 10.1016/0950-4230(91)80029-T.
- [137] A. Hallgarth, A. Zayer, A. Gatward, and J. Davies, "Large Scale Outdoor Flammable & Toxic Gas Dispersion Modelling in Industrial Environments," in *Proceedings of the COMSOL Conference*, Italy, Milan, 2009.
- [138] B. Kulcsár, M. Petrik, és B. Pusztai-Spisák, "Szád-horony karima szivárgásának vizsgálata végeselem analízissel," in *XXXI. Nemzetközi Gépészeti Konferencia*, Románia, Kolozsvár: Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság Gépészeti Szakosztály, 2023, pp. 329–334.
- [139] S. M. Tauseef, T. Abbasi, R. Suganya, and S. A. Abbasi, "A critical assessment of available software for forecasting the impact of accidents in chemical process industry," *International Journal of Engineering, Science and Mathematics*, vol. 6, no. 7, 2017, [Online]. Available: <http://www.ijesm.co.in>,
- [140] N. TUŚNIO, P. Wolny, and D. Siuta, "Computer Programmes for Determining the Probability and Consequences of Major Accidents," *Zeszyty Naukowe SGSP*, vol. 74, pp. 69–89, Jul. 2020, doi: 10.5604/01.3001.0014.3022.
- [141] 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>.
- [142] 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.
- [143] R. Bhattacharya and V. Ganesh Kumar, "Consequence analysis for simulation of hazardous chemicals release using ALOHA software," *Int J Chemtech Res*, vol. 8, no. 4, pp. 2038–2046, 2015.
- [144] A. J. Da Silva Rodrigues *et al.*, "Risk reliability analysis, resulting from explosions in petrochemical industries: A case study using Aloha software," *Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI*, no. June, 2017, doi: 10.23919/CISTI.2017.7975733.
- [145] S. Lyu, S. Zhang, X. Huang, S. Peng, and J. Li, "Investigation and modeling of the LPG tank truck accident in Wenling, China," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 157, pp. 493–508, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.psep.2021.10.022.
- [146] Trinity Consultants, "BREEZE INCIDENT ANALYST," <https://resources.trinityconsultants.com/tciwebsiteresources/docs/default-source/breeze/software/accidental-hazardous-release/breeze-incident-analyst-product-brochure.pdf>.
- [147] K. Zoltán, D. József, K. Gyula, and K. Enikő, "Industrial Safety Analysis of Accidents Involving Ammonia, with Special Regard to Cold-Storage Facilities," *AARMS - Academic and Applied Research in Military and Public Management Science*, vol. 14, no. 3, pp. 273–284, 2015, doi: doi:10.32565/aarms.2015.3.2.
- [148] H. W. M. Witlox, M. Fernandez, M. Harper, A. Oke, J. Stene, and Y. Xu, "Verification and validation of Phast consequence models for accidental releases of toxic or flammable chemicals to the atmosphere," *J Loss Prev Process Ind*, vol. 55, pp. 457–470, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.jlp.2018.07.014.

-
- [149] “Phast, Safeti, KFX and EXSIM Technical Documentation,” <https://mysoftware.dnv.com/knowledge-centre/phast-and-safeti/tech-doc/>.
- [150] A. Kumar Bhana, R. Mathew, K. Upadhyay, and M. Patidar, “Research Paper on Comparison on Extent of Zone 2 Hazardous Area specified in IS 5572 using Dispersion Modelling software DNV Phast 8.71,” *International Journal of Creative Research Thoughts*, vol. 10, no. 11, pp. 274–304, Nov. 2022.
- [151] H. Zohdirad, T. Ebadi, and S. Givehchi, “Optimization of the calculation of hazardous zones boundaries for classification of hazardous area using risk-based approach,” *Journal of Health and Safety at Work*, vol. 6, no. 1, 2016.
- [152] S. E. Gant, A. Kelsey, K. McNally, H. W. M. Witlox, and M. Bilio, “Methodology for global sensitivity analysis of consequence models,” *J Loss Prev Process Ind*, vol. 26, no. 4, pp. 792–802, Jul. 2013, doi: 10.1016/j.jlp.2013.02.009.
- [153] H. Meysami, T. Ebadi, H. Zohdirad, and M. Minepur, “Worst-case identification of gas dispersion for gas detector mapping using dispersion modeling,” *J Loss Prev Process Ind*, vol. 26, no. 6, pp. 1407–1414, 2013, doi: 10.1016/j.jlp.2013.08.019.
- [154] H. Esfandian, M. Goodarzian Urimi, and A. Shokoohi Rad, “Risk assessment of gasoline storage unit of national iranian oil product distribution company using PHAST software,” *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, vol. 34, no. 4, pp. 763–768, Apr. 2021, doi: 10.5829/ije.2021.34.04a.02.
- [155] G. Melhem, E. Kumpinsky, J. Tran, and R. J. Willey, “An analysis of α -epichlorohydrin-water runaways,” *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 172, pp. 496–500, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.PSEP.2023.02.052.
- [156] M. Vidal, W. Wong, W. J. Rogers, and M. S. Mannan, “Evaluation of lower flammability limits of fuel-air-diluent mixtures using calculated adiabatic flame temperatures,” in *Journal of Hazardous Materials*, Mar. 2006, pp. 21–27. doi: 10.1016/j.jhazmat.2005.07.080.
- [157] D. L. Ermak, *User’s manual for SLAB: an atmospheric dispersion model for denser-than-air releases*. Livermore, California: U.S. Department of Energy. The Government retains certain rights therein., 1990.
- [158] Q. Luo, Y. Zhao, K. Liao, F. Xiang, and D. Zhou, “Use of SLAB View for simulation of natural gas diffusion in blowouts of sour gas well,” *Chem. Eng. Oil Gas.*, vol. 44, no. 3, pp. 129–132, 2015.
- [159] W. mei Gai, Y. Du, and Y. feng Deng, “Regional evacuation modeling for toxic-cloud releases and its application in strategy assessment of evacuation warning,” *Saf Sci*, vol. 109, pp. 256–269, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2018.06.007.
- [160] Y. Li *et al.*, “An improved model for heavy gas dispersion using time-varying wind data: Mathematical basis, physical assumptions, and case studies,” *J Loss Prev Process Ind*, vol. 36, pp. 20–29, 2015, doi: 10.1016/j.jlp.2015.05.010.
- [161] 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.
- [162] 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.

- [163] Gant SE, Ivings MJ, Jones A, and Santon R, “HAZARDOUS AREA CLASSIFICATION OF LOW PRESSURE NATURAL GAS SYSTEMS USING CFD PREDICTIONS,” in *SYMPOSIUM SERIES NO. 151*, Institution of Chemical Engineers, 2006.
- [164] D. A. Anjos *et al.*, “A Systematic Algorithm to Compute Hazardous Area Extent for Two-Phase Releases Based on an Improved Low-Dimensional (Simple) Dispersion Model,” *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 41, no. 6, pp. 1587–1608, Jun. 2024, doi: 10.1007/s11814-024-00093-6.
- [165] L. Olander, *Equations and formulas for air and air contaminants. A literature review*. Solna, Sweden: Arbets Miljö Institute, National Institute of Occupational Health, 1994.
- [166] “Preferred and Alternative Methods for Estimating Air Emission from Paint and Ink Manufacturing Facilities,” 2000, *Eastern Research Group*.
- [167] N. B. V. and T. Pöschel, “Kinetic Theory of Granular Gases,” 2004, *Oxford University Press, Oxford*.
- [168] P. Middha and O. R. Hansen, “Using computational fluid dynamics as a tool for hydrogen safety studies,” *J Loss Prev Process Ind*, vol. 22, no. 3, pp. 295–302, 2009, doi: 10.1016/j.jlp.2008.10.006.
- [169] J. Sakamoto, J. Nakayama, T. Nakarai, N. Kasai, T. Shibutani, and A. Miyake, “Effect of gasoline pool fire on liquid hydrogen storage tank in hybrid hydrogen-gasoline fueling station,” *Int J Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 3, pp. 2096–2104, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.039.
- [170] “Magyarország szél viszonyai,” https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/szel/.
- [171] A. Bozek, “Application of IEC 60079-10-1 Edition 2.0 for Hazardous Area Classification,” *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 54, no. 2, pp. 1881–1889, 2018, doi: 10.1109/TIA.2017.2785258.
- [172] Institution of Gas Engineers and Managers, “IGEM/SR/25,” 2022
- [173] W. D. American Petroleum Institute, “API RP 505, Recommended Practice for Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Zone 0, Zone 1, and Zone 2, 2nd Edition,” 2018
- [174] A. Molino *et al.*, “Classification procedure of the explosion risk areas in presence of hydrogen-rich syngas: Biomass gasifier and molten carbonate fuel cell integrated plant,” *Fuel*, vol. 99, pp. 245–253, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.fuel.2012.04.040.
- [175] B. Nesbitt, Ed., “2 - Properties of fluids,” in *Handbook of Valves and Actuators*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, pp. 43–79. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-185617494-7/50031-6>.
- [176] A. Y. Çengel, A. M. Boles, and M. Kanoğlu, *Thermodynamics: An engineering approach*, 10th ed. New York, NY: McGraw Hill, 2024.
- [177] D. W. Green and M. Z. Southard, “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook, 9th Edition,” 9th edition., New York, N.Y: McGraw-Hill Education, 2019, ch. Section 2, Table 2-75.