

SZAKDOLGOZAT

**OE-YBL
2025.**

Hallgató neve:
Hallgató törzskönyvi száma:

Bóta Szabolcs





ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Ybl Miklós Építéstudományi Kar
Építőmérnöki Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Bóta Szabolcs

Szakdolgozat száma: [REDACTED]

Törzskönyvi száma: [REDACTED]

Neptun kódja: [REDACTED]

Szak: Tűzvédelmi szakmérnök

Specializáció:

A dolgozat címe: R290 hűtőközeges hőszivattyúk biztonsági ellenőrzése

A dolgozat címe angolul: Safety check of the R290 refrigerant gas heat pumps

A feladat részletezése: A szakdolgozat célja az R290, vagyis propán fokozottan tűzveszélyes hűtőközeggel működő hőszivattyúk vizsgálata tűzvédelmi és iparbiztonsági szempontból, ellenőrizve a gyártók biztonsági előírásait. Bemutatásra kerül, hogy a hűtőközeg milyen fizikai tulajdonságokkal rendelkezik a hőszivattyú üzemeltetése közben, mely részén keletkezhet hiba és milyen mértékű károkat okozhat a meghibásodás.

Intézményi konzulens neve: Orsó Renátó

Külső konzulens neve: Loós Zoltán

Munkahelye: Budapest Főváros Kormányhivatala Tűzvédelmi és Iparbiztonsági Hatósági Főosztály

A kiadott téma elévülési határideje: 2029. 12. 31.

Beadási határidő: 2025. 05. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Óbudai Egyetem
Ybl Miklós Építéstudományi Kar
Építőmérnöki Intézet
1446 Budapest, Thököly út 74.
1442 Budapest, 70., Pf. 117.

Kiadva: Budapest, 2025. 03. 19.

P.H

[Signature]
Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom: 2025. 05. 15.

[Signature]
belső konzulens

[Signature]
külső konzulens

SZAKDOLGOZAT KONZULTÁCIÓS NAPLÓ

Hallgató neve: Bóta Szabolcs.....

Dolgozat száma:

Oktatási azonosítója:

Neptun azonosítója:

Szak, specializáció megnevezése:

Törzskönyvi száma:

Tűzvédelmi szakmérnök

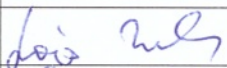
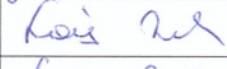
A dolgozat címe magyar nyelven: R290 hűtőközeges hőszivattyúk biztonsági ellenőrzése

A dolgozat címe angol nyelven: Safety check of the R290 refrigerant gas heat pumps

Belső (kari) konzulens neve: Orsó Renátó.....

Külső konzulens neve: Loós Zoltán

Külső konzulens munkahelye: Budapest Főváros Kormányhivatala Tűzvédelmi és Iparbiztonsági Hatósági Főosztály

ALK.	DÁTUM	KONZULTÁCIÓ TÉMÁJA, TARTALMA	KONZULENS ALÁÍRÁSA
1.	2025.03.18.	Tartalomjegyzék pontosítása	
2.	2025.04.24.	Szimulációs modell bővítése, kiinduló adatok javítása	
3.	2025.04.29.	Szakedolgozat tartalmi ellenőrzése	
4.	2025.05.07.	Szakedolgozat formai ellenőrzése <i>beadás előtti konzultáció</i>	

A Konzultációs naplót minimum négy alkalommal az egyes konzultációk alkalmával kell láttamoztatni bármelyik konzulenssel.

A részvételt a konzulens akkor igazolhatja, ha arra a hallgató felkészülten érkezik, azaz érdemi konzultáció történt.

A hallgató a Szakedolgozat/Diplomatervezési/Diplomamunka tantárgy(ak)* követelményét teljesítette.

Kelt: *Buda* *2025.05.09.*
..... (hely), (dátum)



belső (kari) konzulens

* A megfelelő aláhúzendő.

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott Bóta Szabolcs hallgató kijelentem, hogy a dolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült dolgozatban található eredményeket az Óbudai Egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Kelt: Hódmezővásárhely, 2025.05.12.



hallgató

R290 HŰTŐKÖZEGES HŐSZIVATTYÚK BIZTONSÁGI ELLENŐRZÉSE

Összefoglalás. A szakdolgozat célja az R290 (propán) hűtőközeggel működő hőszivattyús rendszerek tűzvédelmi kockázatainak bemutatása és mérnöki megközelítésű értékelése. Az R290 gyúlékony, A3 besorolású hűtőközeg, amely egyre gyakrabban jelenik meg hőszivattyúknál a környezetvédelmi szabályozások miatt. A dolgozatban részletesen bemutatásra kerültek a szivárgási forgatókönyvek, a kiáramlás következményei, a robbanási és hősugárzási zónák ALOHA szoftverrel végzett szimulációk alapján. Ezen túlmenően számszerűsítésre került a beltérben kiszabaduló hűtőközeg koncentrációjának zónabesorolása, valamint meghatározásra kerültek a lehetséges gyújtóforrások is. A dolgozat végén konkrét mérnöki javaslatok kerültek megfogalmazásra mind a beltéri, mind a kültéri telepítésre vonatkozóan, figyelembe véve a berendezés töltetméretét, elhelyezését és az épített környezet adottságait.

Kulcsszavak: tűzvédelem, iparbiztonság, szimuláció, hűtőközeg, hőszivattyú

SAFETY CHECK OF THE R290 REFRIGERANT GAS HEAT PUMPS

Abstract. The thesis aims to analyze and assess the fire safety risks of heat pump systems using R290 (propane) refrigerant from an engineering perspective. R290 is a flammable refrigerant (classified A3) increasingly used due to environmental regulations. The thesis presents leakage scenarios, release consequences, and explosion and thermal radiation zones based on simulations conducted with ALOHA software. It also includes zone classification calculations for indoor refrigerant accumulation and identifies potential ignition sources. Finally, engineering recommendations are provided for both indoor and outdoor installations, taking into account the refrigerant charge, placement, and the characteristics of the built environment.

Keywords: fire protection, industrial safety, simulation, refrigerant, heat pump

TARTALOMJEGYZÉK

1	Bevezetés	3
2	Szakirodalmi áttekintés	5
2.1	Kompresszoros hűtőkörfolyamat ismertetése	5
2.2	Hűtőközegek	7
2.2.1	Propán fizikai tulajdonságai és tűzvédelmi kockázatai	8
2.3	Hőszivattyúk fajtái hőleadás és hőforrás szerint.....	10
2.3.1	Levegő-levegő hőszivattyú	10
2.3.2	Levegő-víz hőszivattyú.....	12
2.3.3	Víz-víz hőszivattyú.....	13
2.4	Tipikus meghibásodási módok és szivárgási forgatókönyvek.....	14
2.4.1	Tipikus meghibásodások.....	14
2.4.2	Szivárgási forgatókönyvek.....	15
2.5	Nemzetközi szabályozások és műszaki irányelvek	15
2.5.1	EN 378 szabványsorozat.....	16
2.5.2	ISO 817 és ASHRAE 34 szabvány	17
2.5.3	F-gáz rendelet (EU 517/2014/EU) és Kigali módosítás	17
2.5.4	Yellow Book	17
3	A probléma megfogalmazása	19
4	Lehetséges kockázatok feltárása	20
4.1	Hőszivattyú működése közbeni üzemállapotok.....	20
4.2	Hűtőközeg szabadba jutásának szimulációja.....	22
4.2.1	Kiinduló adatok.....	23
4.2.2	Gázfázisú hűtőközeg kiáramlási sebessége	24

4.2.3	Gázfázisú hűtőközeg szivárgásának ábrázolása	25
4.2.4	Gázfázisú hűtőközeg robbanásának vizsgálata	27
4.2.5	Jet fire vizsgálata	29
4.2.6	Folyadékfázisú hűtőközeg szivárgásának ábrázolása	30
4.2.7	Folyadékfázisú hűtőközegszivárgás robbanása.....	33
4.3	Hűtőközeg beltérben való szivárgásának számítása.....	35
4.4	Lehetséges gyújtóforrások	39
5	Következtetések és mérnöki javaslatok.....	42
5.1	Kültéri elhelyezés	42
5.1.1	Épület melletti elhelyezés	43
5.1.2	Tetőn való elhelyezés	43
5.2	Beltéri elhelyezés	44
5.2.1	Lakossági alkalmazások	44
5.2.2	Ipari alkalmazások.....	44
6	Hivatkozások	46

1 BEVEZETÉS

A hőszivattyús rendszerek térhódítása az elmúlt években látványos ütemet vett, különösen az Európai Unió környezetvédelmi célkitűzéseinek, valamint a fosszilis energiaforrások visszaszorításának köszönhetően. E berendezések között egyre jelentősebb szerepet kapnak azok a típusok, amelyek természetes hűtőközeget, például propánt (R290) alkalmaznak. Bár kisebb mértékben már korábban is jelen voltak a piacon, 2024 májusától kezdődően váltak szélesebb körben elérhetővé és aktívan telepítetté az ilyen berendezések. A gyártók részéről egyértelmű a törekvés: az F-gáz szabályozás szigorodása miatt elkerülhetetlenné vált a magas GWP értékű fluorozott hűtőközegek leváltása, és ennek egyik leglogikusabb iránya a természetes, alacsony környezeti hatású közegek alkalmazása.

Az R290 alkalmazása azonban nem csak energetikai és környezetvédelmi kérdés. Gyúlékony és robbanásveszélyes tulajdonsága miatt az ilyen rendszerek tervezése, telepítése és üzemeltetése során a tűzvédelmi szempontok kiemelt figyelmet érdemelnek. A probléma aktualitását fokozza, hogy a készülékek forgalma és telepítési aránya gyorsan nő, miközben a hazai szabályozás még nem követte le a technológia elterjedését. Jelenleg nincs olyan konkrét, magyar jogszabály vagy hatósági állásfoglalás, amely részletesen meghatározná az R290-es hőszivattyúk beépítésének és üzemeltetésének tűzvédelmi feltételeit.

A probléma a saját munkámban is közvetlenül jelentkezik, mivel épületgépész tervezési feladatok során egyre gyakrabban merül fel ezen berendezések betervezése. Tervezőként, illetve a tűzvédelemmel együttműködő szakemberként a felelősség nemcsak a működés biztosítására, hanem a létesítmény biztonságára is kiterjed. Tapasztalataim alapján gyakori a bizonytalanság abban, hogyan lehet megfelelni a nemzetközi szabványoknak úgy, hogy közben a hazai jogi háttér hiányos vagy értelmezésre szorul.

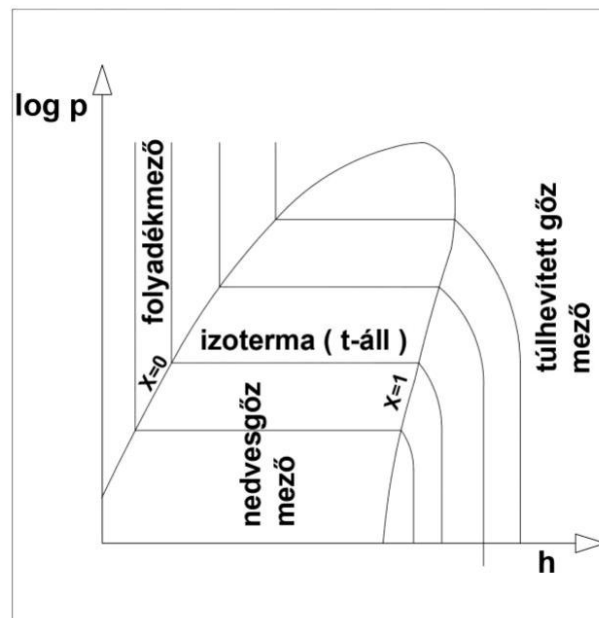
A dolgozat célja, hogy bemutassa az R290-es hűtőközeggel működő hőszivattyúk alkalmazásának tűzvédelmi kockázatait, és felhívja a figyelmet azokra a veszélyekre, amelyek szivárgás, gyulladás vagy robbanás során jelentkezhetnek. Emellett célom, hogy javaslatokat tegyek tűzvédelmi szakemberek számára arra vonatkozóan, milyen műszaki, szabályozási vagy szervezési megoldásokkal csökkenthető a kockázat tervezés és

üzemeltetés során. A szakmai célkitűzések közé tartozik az is, hogy a nemzetközi szabályozások és esettanulmányok alapján felvázoljam a lehetséges jó gyakorlatokat, amelyeket már a tervezés fázisában érdemes figyelembe venni.

2 SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

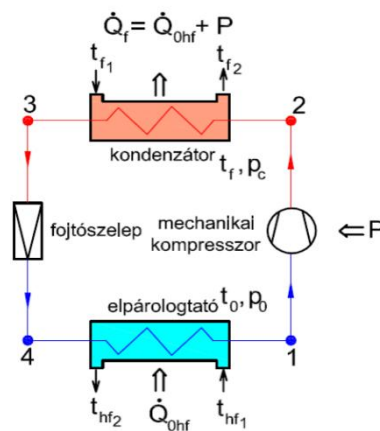
2.1 Kompresszoros hűtőkörfolyamat ismertetése

A hőszivattyúk működésének alapját képező kompresszoros hűtőkörfolyamat egy zárt termodinamikai rendszer, amelyben a hűtőközeg fázisállapot-változásokon keresztül szállít hőt az alacsonyabb hőmérsékletű térből a magasabb hőmérsékletű tér felé. A körfolyamat négy fő elemből áll: kompresszor, kondenzátor, expanziós szelep és elpárologtató. Ezek sorba kapcsolása és a köztük zajló hő- és nyomásváltozások határozzák meg a körfolyamat hatásfokát és működési sajátosságait. [JUHÁSZ ET AL, 2020]



1. ábra: Halmazállapotok ábrázolása log p-h diagramon. Forrás: JUHÁSZ ET AL [2020]

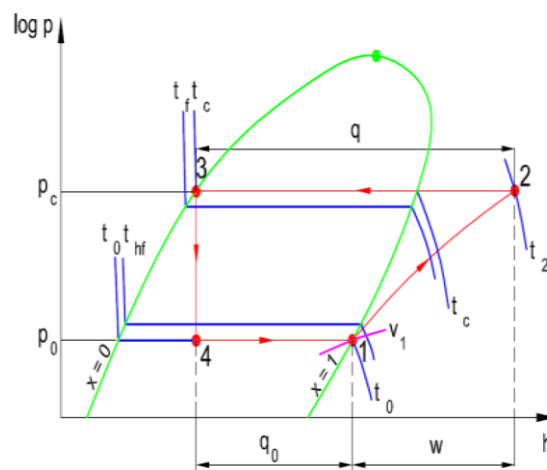
A folyamat az elpárologtatóban veszi kezdetét, ahol az alacsony nyomású, folyékony halmazállapotú hűtőközeg hőt vesz fel a környezetből (pl. külső levegőből), és ezáltal részben vagy teljesen gőzzé alakul. A keletkező gőzt a kompresszor beszívja és nagy nyomású, magas hőmérsékletű túlhevített gőzzé sűríti. Ezt a gőzt a kondenzátorba vezetik, ahol a környezeti közeg (pl. víz vagy levegő) segítségével leadja a hőt, miközben cseppfolyósodik. A kondenzátumban tárolt, még mindig magas nyomású folyadék ezután az expanziós szelepen keresztül hirtelen nyomáscsökkenésen megy keresztül, amely részleges elpárolgást és hőmérséklet-csökkenést eredményez. A folyamat ezzel bezárul, és a hűtőközeg ismét az elpárologtatóba kerül. [JUHÁSZ ET AL, 2020] [WEI ET AL, 2024]



2. ábra Hűtőkörfolyamat és alkatrészei Forrás: JUHÁSZ ET AL [2020]

A körfolyamat a $\log(p)$ - h (nyomás–entalpia) (3. ábra) diagramon jól nyomon követhető. Az egyes állapotváltozások a következők:

- 1–2: izentrópikus kompresszió,
- 2–3: izobáros hőleadás a kondenzátorban,
- 3–4: izoentalpiás expanzió,
- 4–1: izobáros elpárolgás. [JUHÁSZ ET AL, 2020]



3. ábra Hűtőkörfolyamat ábrázolása $\log p$ - h diagramon Forrás: JUHÁSZ ET AL [2020]

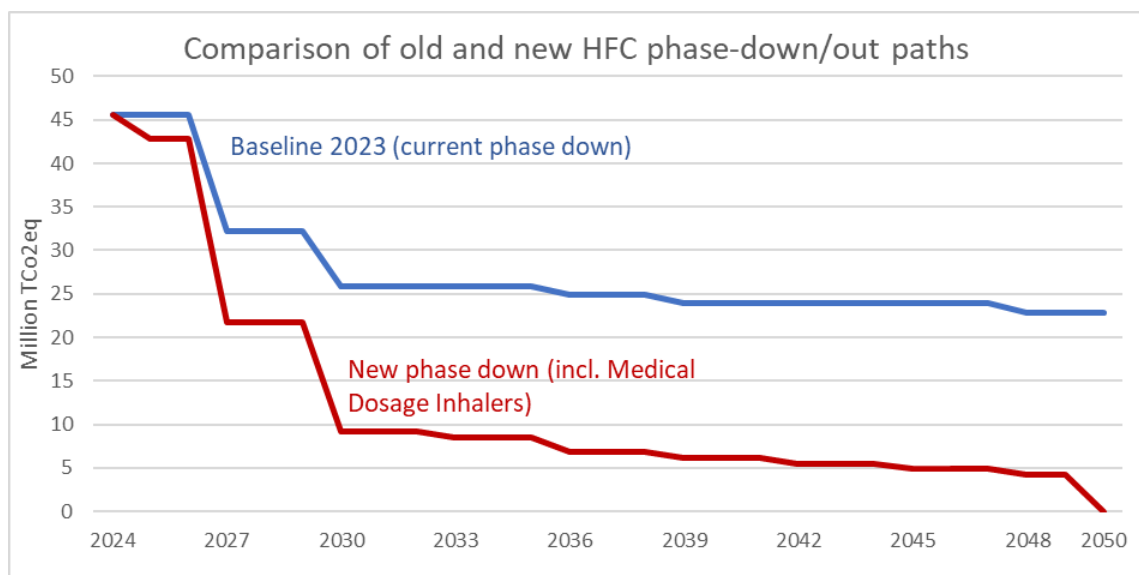
A különböző hűtőközegek eltérő fizikai jellemzőkkel rendelkeznek, amelyek befolyásolják a körfolyamat működését. Az R290 (propán) alacsony forráspontja (-42°C) és kedvező termodinamikai tulajdonságai miatt hatékony energiaátadást biztosít, így kiválóan alkalmazható kis és közepes teljesítményű hőszivattyús rendszerekben. Ugyanakkor erősen tűzveszélyes (A3 besorolású), ezért a rendszer tervezésénél fokozott

figyelmet igényel a zárt térben történő alkalmazás, valamint a megfelelő szellőztetés és szivárgásérzékelés biztosítása. [AREA, 2020]

A modern rendszerek egyre gyakrabban használnak elektronikus expansziós szelepeket, amelyek pontosabb szabályozást tesznek lehetővé, javítva ezzel a hőszivattyú szezonális hatásfokát (SCOP). Ezen túlmenően bizonyos rendszerekben ejektorok is alkalmazhatók a nyomáscsökkentés hatékonyságának fokozására, amellyel tovább javítható a hőszivattyú teljesítménye részterheléses üzemállapotokban is. [REN ET AL, 2021]

2.2 Hűtőközegek

A hőszivattyúk működéséhez elengedhetetlenül szükséges a megfelelő hűtőközeg kiválasztása, amelynek feladata a hő szállítása egyik hőcserélőtől a másikig. A hűtőközeg típusa alapvetően meghatározza a rendszer hatásfokát, környezeti hatásait, valamint a biztonságtechnikai követelményeket. A hűtőközegekkel szemben támasztott legfontosabb elvárások: kedvező termodinamikai tulajdonságok, alacsony környezeti terhelés (GWP és ODP), jó kémiai stabilitás, nem korrozív viselkedés, valamint alacsony éghetőség és toxicitás. [JUHÁSZ ET AL, 2020] [BÁLINT, 2024] [BITZER, 2023]



4. ábra HFC hűtőközegek kivonása évek szerint. Forrás: PANASONIC [2024]

A korábban széles körben használt, nagy GWP értékű fluorozott hűtőközegeket a nemzetközi szabályozások – elsősorban az EU F-gáz rendelet (517/2014/EU) és a Kigali módosítás – fokozatosan háttérbe szorítják. Ennek következtében egyre nagyobb

hangsúlyt kapnak az úgynevezett természetes hűtőközegek, mint a szén-dioxid (R744), ammónia (R717) vagy a szénhidrogének közé tartozó propán (R290). [BÁLINT, 2024]

Table 1: Timeline of the main bans under new F-Gas Regulation.

Category	Capacity / Charge	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Ban 5: Refrigeration Condensing Units	All	≥ 2500 GWP banned							≥ 150 GWP banned					
Ban 7: Chillers	≤ 12kW	No GWP limit				≥ 150 GWP banned					No F-Gases			
	> 12kW	No GWP limit				≥ 750 GWP banned								
Ban 8: Self-contained ACs & HPs	≤ 12kW	No GWP limit				≥ 150 GWP banned					No F-Gases			
	>12kW to ≤50kW	No GWP limit				≥ 150 GWP banned								
	All others	No GWP limit							≥ 150 GWP banned					
Ban 9: Split ACs & HPs	Single-split (A2A and A2W) <3kg	No GWP limit	≥ 750 GWP banned		Relevant bans below apply.									
	A2W splits ≤ 12kW	No GWP limit	≥ 750 GWP banned		≥ 150 GWP banned									No F-Gases
	A2A ≤ 12kW	No GWP limit							≥ 150 GWP banned					No F-Gases
	A2A and A2W > 12kW	No GWP limit							≥ 750 GWP banned				≥ 150 GWP	

5. ábra F-gáz rendelet szerint a hűtőközegek kivonása GWP szerint. Forrás: PANASONIC [2024]

A hűtőközegek biztonsági osztályozása az ISO 817 szabvány alapján történik, amely szerint azok gyúlékonysága (A vagy B) és éghetősége (1 – nem éghető, 2L – enyhén gyúlékony, 2 – gyúlékony, 3 – rendkívül gyúlékony) szerint kerülnek besorolásra. Az R290 a legmagasabb tűzveszélyességi osztályba (A3) tartozik: alacsony toxicitású, de könnyen gyulladó gáz. [BÁLINT, 2024] [CARAMASCHI ET AL, 2022]

2.2.1 Propán fizikai tulajdonságai és tűzvédelmi kockázatai

A propán (R290) egy tiszta szénhidrogén alapú hűtőközeg, amelyet már az 1990-es évektől alkalmaznak hűtési és hőszivattyús rendszerekben. Előnye, hogy természetes eredetű, nem tartalmaz fluort, ezért nincs ózonkárosító hatása ($ODP = 0$) és nagyon alacsony globális felmelegedési potenciállal ($GWP \approx 3$) rendelkezik. Emellett kiváló termodinamikai tulajdonságokkal bír, amelyek a hagyományos hűtőközegekével (pl. R22, R134a) legalábbis egyenértékűek, sőt bizonyos körülmények között hatékonyabb hőcserét tesznek lehetővé. [BÁLINT, 2024]

A propán főbb fizikai jellemzői:

- Molekulatömeg: 44,1 g/mol
- Forráspont: $-42,1\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Lobbanáspont: $-104\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Alsó égési/robbanási határérték (AÉH vagy LFL/LEL): kb. 2,1 tf% vagy 0,038 kg/m³
- Felső égési/robbanási határérték (FÉH vagy UFL/UEL): kb. 9,5 tf% vagy 0,17 kg/m³
- Levegőhöz viszonyított relatív sűrűség: $\sim 1,5$ (a talajszinten gyűlik össze) [YELLOW BOOK, 2005]

A szakirodalmi áttekintés során megállapítható, hogy az alsó égési határérték (LFL – Lower Flammability Limit) és az alsó robbanási határérték (LEL – Lower Explosive Limit) lényegében ugyanazt a fizikai jelenséget írja le, vagyis azt a legkisebb koncentrációt, amelynél az adott gáz a levegőben képes meggyulladni és továbbégni. A két megnevezés eltérése csupán a felhasználási területből adódik.

A szakdolgozatban következetesen az adott számítási és szimulációs környezethez igazítva használok a megfelelő kifejezést:

- Az MSZ EN 378 szabvány szerinti számításoknál az LFL megnevezést alkalmazom, amelynek mértékegysége kg/m³.
- Az ALOHA szoftveres szimulációk során az LEL kifejezés szerepel, amelyet a szoftver ppm (parts per million) egységben ad meg. 10 000 ppm egyenértékű 1 térfogatszázalékkal (tf%).

Az MSZ EN 378 szabvány alapján az R290 hűtőközeg alsó égési határértéke 0,038 kg/m³, amely megfelel az ISO 817 szabványban megadott 2,1 térfogatszázalékos értéknek, azaz 21 000 ppm-nek. [CARAMASCHI ET AL, 2022]

A propánnal működő rendszerek legnagyobb kihívása a tűz- és robbanásveszély. Mivel a gáz nehezebb a levegőnél, szivárgás esetén a padlószinten, aknában, zárt helyiségekben koncentrálódhat. A gyújtási energia alacsony, már egy szikra is elegendő a robbanáshoz. Az EN 378 szabvány meghatározza, hogy az ilyen rendszerek csak meghatározott térfogat/töltettség arány mellett alkalmazhatók beltérben, illetve előírja a szellőzés, szivárgásérzékelés és zónaosztályozás szükségességét. [AREA, 2020]

2.3 *Hőszivattyúk fajtái hőleadás és hőforrás szerint*

A hőszivattyús rendszerek osztályozása elsősorban a hőforrás és a hőleadás közege alapján történik. A leggyakoribb konfigurációk: levegő–levegő, levegő–víz, valamint víz–víz hőszivattyúk. Mindegyik típusnak megvannak a maga előnyei és korlátai, különösen, ha gyúlékony hűtőközeg – például az R290 – kerül alkalmazásra. A következő alfejezetek ezen alapváltozatokat mutatják be.

2.3.1 *Levegő–levegő hőszivattyú*

A levegő–levegő hőszivattyú a külső levegőből vonja el a hőt, majd beltéri egységeken keresztül közvetlenül a belső levegőnek adja át. Ezeket a rendszereket a hétköznapi nyelvben split klímaként ismerjük. Elterjedtségük, egyszerű telepíthetőségük és viszonylag alacsony beruházási költségük miatt ez a rendszer a leginkább hozzáférhető megoldás a lakosság számára is. [RABI, 2017]



6. ábra Levegő–levegő hőszivattyú beltéri magasoldalfali beltéri egysége. Forrás: DAIKIN [2025]

Az R290-nel töltött split rendszerek alkalmazása új kihívásokat vet fel, mivel ez a hűtőközeg A3 biztonsági osztályba tartozik, vagyis rendkívül gyúlékony. Mivel a kültéri egységben (7. ábra) lévő R290 gáz csővezetéken keresztül közvetlenül jut el a beltéri egységhez (8. ábra), a hűtőközeg – szivárgás esetén – a lakótérbe kerülhet, ezzel potenciális tűz- és robbanásveszélyt okozva. [WEI ET AL, 2024]

A nemzetközi szabályozás jelenlegi állása szerint az IEC 60335-2-40:2022 szabvány engedélyezi az R290 alkalmazását split típusú légkondicionálókban, de legfeljebb 988 grammos töltetömegig – szigorú biztonságtechnikai feltételek mellett, például megfelelő légáramlás és szivárgásészlelés megléte esetén. [WEI ET AL, 2024]



7. ábra Levegő-levegő hőszivattyú kültéri egység. Forrás: DAIKIN [2025]

Ide sorolhatóak a VRF/VRV (változó hűtőközeg-áramú) és multisplit rendszerek is, amelyek egy kültéri egységgel több (akár 10–16) beltéri egységet képesek kiszolgálni. Ezek rendszerszinten is szabályozzák az elpárolgási hőmérsékletet és a tömegáramot, így sokkal összetettebbek, mint a lakossági klímák. Jelenleg azonban ilyen rendszerek R290-es kivitelben nem ismertek, csak R32-t alkalmazó típusok érhetők el, mely szintén gyúlékony hűtőközegnek számít (A2L besorolás). [JUHÁSZ ET AL, 2020] [PIBLINGER, 2023]

Az R32 hűtőközeg tűzvédelmi szempontból kevésbé veszélyes, mint az R290, de a gyújtási határértékek és a tűzterjedési tulajdonságok miatt még így is szigorú biztonsági intézkedésekre van szükség, különösen nagyobb töltetmennyiség vagy beltéri alkalmazás esetén. Az MSZ EN 378-3 szabvány szerint például VRF rendszereknél kötelező lehet szivárgásérzékelő rendszert tervezni, ha a töltet, a helyiségméret és a rendszerkialakítás ezt indokolja. [PIBLINGER, 2023]

Összességében megállapítható, hogy az R290 megjelenése ebben a szegmensben lakossági szinten is egy új tűzvédelmi kockázati tényezőt jelent, amelyre a tűzvédelmi szakembereknek, valamint az épületgépész tervezőknek is megfelelő válaszokat kell adniuk már a tervezés szakaszában.

2.3.2 *Levegő-víz hőszivattyú*

A levegő-víz hőszivattyú olyan hőenergiát szállító berendezés, amely a környezeti levegőből vonja el a hőt (fűtési üzemben), majd azt egy hőcserélőn keresztül víznek adja át. Hűtési üzemben a folyamat megfordul, és a víz hőjét adja le a külső levegőnek. A hőátadás vízoldalon történik, így a rendszer képes padlófűtés, mennyezeti hűtés vagy fan-coil berendezések kiszolgálására is. [RABI, 2017]

Az utóbbi években a lakossági szektorban egyre több meglévő gázkazános rendszert váltanak le levegő-víz hőszivattyúval, a technológia kedvező energiafogyasztása és a megújuló energiaforrásként való elismerése miatt. Az ipari szegmensben is egyre nagyobb teret nyernek ezek a rendszerek, különösen ott, ahol jelentős költségmegtakarítás érhető el a földgázhoz képest. [RABI, 2017]

A lakossági gyakorlatban eddig főként split rendszerű levegő-víz hőszivattyúk terjedtek el. Ezek esetében a kültéri egységből kiindulva a hűtőközeg áramlik a beltéri egységhez, amely egy hőcserélőn keresztül adja át a hőt a vízoldali rendszernek. A split rendszerek előnye a könnyebb karbantartás és a rugalmasabb elhelyezés, azonban tűzvédelmi szempontból hátrányt jelent, hogy a hűtőközeg – így az R290 is – bejut a beltérbe, ami egy esetleges szivárgás esetén gyújtóforrással találkozva robbanásveszélyt okozhat. [RABI, 2017]

Ezért a split kialakítású levegő-víz hőszivattyúk alkalmazása R290 hűtőközeggel megszűnik vagy korlátozás alá esik, és a monoblokkos kialakítás válik általánossá. A monoblokkos hőszivattyúban az egész hűtőkör a kültéri egységben található, így az épületbe már csak fűtött vagy hűtött víz kerül be, nem pedig a tűzveszélyes hűtőközeg. Ez jelentős előrelépés a biztonságos telepíthetőség és üzemeltetés szempontjából. [BÁLINT, 2024]



8. ábra Ipari levegő-víz hőszivattyú. Forrás: SKADEC [2023]

A lakossági méretek mellett az ipari alkalmazásokban is megjelentek nagyméretű R290 töltettel rendelkező levegő-víz hőszivattyúk. Az általános töltetméretek néhány kilogramm és néhány tíz kilogramm között mozognak, de a szakmai források és gyártói adatok alapján található akár 67 kg R290 töltetet tartalmazó berendezés is. A dolgozatban bemutatandó szimulációkhoz ezt a 67 kg-os értéket veszem alapul, mivel ez jól szemlélteti az ipari méretű berendezések esetén felmerülő tűzvédelmi és iparbiztonsági kockázatokat. [SKADEC, 2023]

2.3.3 Víz-víz hőszivattyú

A víz-víz hőszivattyúk olyan rendszerek, amelyekben a hőforrás és a hőleadó közeg is víz. A hőszivattyú a hőt például talajvízből, kútból vagy más vízbázisból vonja el, és azt egy másik vízkörön keresztül adja át fűtési vagy hűtési célra. A kompresszoros hűtőkörfolyamat beltéri elhelyezésű, zárt gépészeti térben működik. [RABI, 2017]



9. ábra Víz-víz hőszivattyú. Forrás: SKADEC [2023]

Ezeket a berendezéseket elsősorban ipari vagy nagyobb intézményi alkalmazásokban használják, ahol a hőforrás stabil és nagy teljesítményigény áll

rendelkezésre. A vizsgált berendezések közül a legnagyobb R290 töltetűmeg, amit találtam, 2 kg volt. Ugyanakkor, ha több hőszivattyút telepítenek egy gépészeti helyiségbe – például 5–6 darabot – az összesített töltetűmeg megközelítheti a 10 kg propánt, amely már jelentős tűzvédelmi és iparbiztonsági kockázatot jelent. [SKADEC, 2023]

2.4 Tipikus meghibásodási módok és szivárgási forgatókönyvek

A hűtőközeggel működő rendszerek esetében a meghibásodások és a szivárgások a leggyakoribb biztonsági események közé tartoznak. Ezek különösen kritikusak akkor, ha a hűtőközeg gyúlékony (pl. R290), mivel ilyen esetben nemcsak a környezeti hatás, hanem a személyi sérülés, tűz- vagy robbanásveszély is reálisan fennáll. A rendszeres karbantartás, a megfelelő telepítés és a szabványos kialakítás jelentősen csökkentheti ezen események bekövetkezésének valószínűségét, de teljes mértékben nem zárhatók ki. [AREA, 2020]

2.4.1 Tipikus meghibásodások

A tipikus meghibásodások az alábbi fő csoportokba sorolhatók:

• Mechanikai meghibásodások

Ide tartozik a csatlakozások meglazulása, a rezgés miatti repedések, illetve a kompresszor vagy más gépészeti elemek fizikai sérülése. A split rendszerű kialakítások különösen érzékenyek, mivel a telepítés során hűtőközeg-vezetékek is érintettek, amelyekben nyomás alatti gáz vagy folyadék kering. Itt kiemelendő a forrasztási hibákból eredő szivárgás, amely különösen R290 esetén az éghető gáz kiszabadulásához vezethet. [BÁLINT, 2024] [JUHÁSZ ET AL, 2020]

• Anyagfáradás és korrózió

Hosszabb távon az anyagok elöregedése, hő- és nyomásváltozások hatására fellépő mikrorepedések, illetve korróziós hatások is szivárgásokhoz vezethetnek. Ez különösen igaz nedves, párás vagy korrozív környezetben működő kültéri egységekre. A védelem érdekében szükség van megfelelő burkolatra, UV-állóságra és bevonatok alkalmazására. [YELLOW BOOK, 2005] [JUHÁSZ ET AL, 2020]

• Szelep- és tömítésproblémák

Az expanziós szelep, a töltőszelepek, valamint a kompresszor tengelytömítései kiemelten érzékeny pontjai a rendszernek. Ezek meghibásodása akár kis mennyiségű, de folyamatos hűtőközeg-szivárgást eredményezhet, amely zárt térben felhalmozódva

elérheti az alsó égési határértéket ($LFL \approx 2,1 \text{ tf\%}$). [YELLOW BOOK, 2005] [JUHÁSZ ET AL, 2020]

2.4.2 Szivárgási forgatókönyvek

A különböző szivárgási eseményeket a kimenet típusa (gáz vagy folyadék), a nyílás mérete és a környezet (nyitott vagy zárt tér) határozza meg. Az ALOHA modell és a Yellow Book ajánlások szerint az alábbi forgatókönyvek jellemzőek gyúlékony hűtőközeg (pl. R290) esetén:

1. Kis lyukon történő, lassú szivárgás

- Általában gázfázisban szivárog a közeghőmérsékleten lévő R290.
- Zárt térben a gáz a padlónál gyűlik össze, idővel elérheti az éghető koncentrációtartományt.
- Begyulladás esetén: flash fire vagy jet fire.

2. Nagyobb repedés vagy törés → folyadékfázisú szivárgás

- A nyomás alatt lévő folyadék nyomáscsökkenés hatására hirtelen párolog (flashing), aeroszol/gőzfelhő keletkezik.
- Ha a párolgás nem teljes, akkor medenceszerű összegyűlés (rain-out) is kialakulhat, melynek lehetséges következménye tócsatűz.

3. Rendszerszintű meghibásodás (pl. kompresszor törése)

- Hirtelen, nagy mennyiségű hűtőközeg szabadul fel.
- Erőteljes túlnyomás és nagy hőmennyiség esetén akár robbanás is bekövetkezhet (pl. Vapor Cloud Explosion, VCE) [YELLOW BOOK, 2005] [LOÓS, 2022] [ALOHA, 2013] [ZHANG ET AL, 2015]

E forgatókönyvek bemutatása lehetőséget nyújt a megfelelő műszaki, szerkezeti és szabályozási védelmi intézkedések meghatározására, amelyeket a dolgozat későbbi fejezeteiben is részletesen elemezni szükséges.

2.5 Nemzetközi szabályozások és műszaki irányelvek

A hűtőközengként alkalmazott propán (R290) tűzvédelmi és iparbiztonsági szempontból kiemelten kockázatos anyagnak minősül, ezért felhasználására vonatkozóan több nemzetközi szabályozás és műszaki irányelv rögzíti az alkalmazhatóság határait, biztonsági feltételeit és a berendezések tervezésére vonatkozó követelményeket. E dokumentumok nemcsak a közvetlen műszaki jellemzőkre, hanem a biztonságos üzemeltetésre, telepítésre és karbantartásra is részletes útmutatást nyújtanak.

2.5.1 EN 378 szabványsorozat

Az MSZ EN 378 - „Hűtőberendezések és hőszivattyúk biztonsági és környezetvédelmi követelményei” szabvány az egyik legfontosabb európai szabvány, amely négy részen keresztül szabályozza a hűtő- és hőszivattyús rendszerek kialakítását és használatát. A szabvány különösen részletesen foglalkozik a gyúlékony hűtőközegek (pl. R290) kezelésével. [AREA, 2020]

A legfontosabb biztonságtechnikai előírásai:

- Meghatározza az engedélyezett töltetösszeg értékét, amely a hűtőközeg típusa, éghetőségi osztálya és a berendezés telepítési környezete (légtérfogata, felhasználás módja) alapján változik.
- Előírja a zónaosztályozást (pl. padlószint közeli tér robbanásveszélyes lehet),
- Rögzíti a szükséges szellőztetési és szivárgásérzékelési követelményeket,
- Megköveteli a gyújtóforrások távolságtartását és a villamos berendezések robbanásbiztos kivitelét a veszélyeztetett térben. [AREA, 2020] [PIBLINGER, 2023]

Az EN 327 szabvány az A1 (nem éghető) és A2L (enyhén gyúlékony) osztályú hűtőközegekre biztonsági zónákat határoz meg, a hűtőközeg töltetösszegének és a helyiség térfogatának arányát figyelembe véve. A szabvány négy kategóriát különít el:

- Kockázat nélküli terület: nincs szükség biztonsági intézkedésre.
- 1. zóna: biztonsági intézkedés nem szükséges, amennyiben a berendezés telepítési magassága legalább 1,8 méter.
- 2. zóna: legalább egy biztonsági intézkedés alkalmazása szükséges.
- 3. zóna: legalább két biztonsági intézkedés alkalmazása szükséges. [PIBLINGER, 2023]

A szabvány által megnevezett lehetséges biztonsági intézkedések az alábbiak:

- Természetes vagy gépi szellőzés a szivárgó hűtőközeg koncentrációjának csökkentésére,
- Biztonsági elzáró szerelvények alkalmazása a hűtőközegkör megszakítására szivárgás esetén,
- Riasztórendszer hűtőközeg-érzékelővel, amely korai figyelmeztetést ad a veszélyes koncentráció kialakulásakor. [PIBLINGER, 2023]

Ezek az előírások célja, hogy a hűtőközeg-szivárgásból eredő egészségügyi vagy robbanásveszélyes kockázatok már a tervezési szakaszban megfelelő módon csökkenthetők legyenek.

2.5.2 ISO 817 és ASHRAE 34 szabvány

Az ISO 817 és az ASHRAE 34 szabványok biztosítják a hűtőközegek globálisan egységes biztonságtechnikai osztályozását, amely alapján az R290 az A3 kategóriába esik: alacsony toxicitású, de nagy éghetőségű közeg.

Ez a besorolás szigorúbb követelményeket von maga után a berendezések anyaghasználata, a tömítések, a csatlakozások kialakítása, valamint a lehetséges gyújtóforrásoktól való védelmi távolság tekintetében is. [BÁLINT, 2024] [CARAMASCHI ET AL, 2022]

2.5.3 F-gáz rendelet (EU 517/2014/EU) és Kigali módosítás

Bár a fenti szabályozások elsődlegesen a biztonságtechnikai szempontokat tárgyalják, fontos megemlíteni a környezeti hatásokat szabályozó jogszabályokat is. Az EU 517/2014/EU rendelet (ún. F-gáz rendelet) célja, hogy a magas GWP-jű fluorozott hűtőközegek fokozatos kivonását elősegítse. A természetes hűtőközegek, így az R290, ennek következtében kiemelt szerepet kaptak a fenntarthatósági célkitűzések elérésében.

A Montreali Jegyzőkönyv Kigali módosítása szintén a fluortartalmú anyagok globális csökkentését célozza, és közvetve ösztönzi az A3 osztályú természetes hűtőközegek elterjedését – azonban ezek csak akkor alkalmazhatók, ha a műszaki biztonsági követelmények is teljesülnek. [BÁLINT, 2024]

2.5.4 Yellow Book

A holland PGS2 (Publication Series on Dangerous Substances) útmutató részletesen tárgyalja a gyúlékony gázok és folyadékok, így a propán szivárgásának fizikai következményeit, beleértve az éghető gázfelhő terjedését, a pool fire és BLEVE jelenségeket, valamint a robbanási nyomáshullámokat. A dokumentum gyakorlati szemlélettel mutatja be a biztonsági távolságok számítását és a valós szivárgási forgatókönyvekből következő veszélyeket. [YELLOW BOOK, 2005]

Összességében a nemzetközi szabályozások és műszaki irányelvek szigorúan szabályozzák az R290 típusú hűtőközeg alkalmazását. A szabványok nemcsak a berendezések tervezésére, hanem a telepítés, üzemeltetés, karbantartás, valamint az üzemzavarok kezelésének körülményeire is kiterjednek. Ezek betartása alapvető feltétele

a propán biztonságos és jogszerű felhasználásának, különösen zárt térben történő telepítés esetén.

3 A PROBLÉMA MEGFOGALMAZÁSA

A környezetvédelmi szempontból egyre szigorodó európai uniós szabályozások következtében a hőszivattyú gyártók egyre nagyobb arányban térnek át az alacsony GWP értékű, természetes eredetű hűtőközegek – így a propán (R290) – alkalmazására. Ennek hatására 2024-től kezdődően a lakossági és ipari alkalmazású levegő-víz hőszivattyúk egy része már ezzel a hűtőközeggel kerül forgalomba. A propán alkalmazásának ugyanakkor elkerülhetetlen következménye a tűzvédelmi kockázatok számottevő növekedése, tekintettel annak gyúlékony és robbanásveszélyes természetére.

A probléma különösen éles a tervezési fázisban, mivel jelenleg nincs egységes hazai szabályozás vagy irányelv, amely a propánt tartalmazó hőszivattyúk beltéri vagy kültéri telepítésére és üzemeltetésére vonatkozna. A tűzvédelmi szakemberek és épületgépész tervezők számára ezért kulcsfontosságú, hogy megfelelően felmérjék a berendezésekhez kapcsolódó veszélyforrásokat.

A szakdolgozat központi feladataként az R290 hűtőközeggel töltött hőszivattyúk tűzvédelmi kockázatainak feltárását tűztem ki célul. A dolgozat célja többek között:

- A kompresszoros hűtőkörfolyamat működésének és az R290 fizikai, valamint égési tulajdonságainak ismertetése;
- A szivárgási forgatókönyvek és meghibásodási módok modellezése;
- A lehetséges gyújtóforrások azonosítása;
- Számítási módszer bemutatása a beltéri elhelyezés kockázatainak értékelésére;
- Szabadba történő kiszabadulás szimulációja ALOHA szoftver segítségével;
- Végül javaslatok megfogalmazása arra, hogyan közelíthető meg a tűzvédelmi kockázatcsökkentés tervezői oldalról.

Ezeket keresztül a célom az, hogy átfogó képet nyújtsak a propánnal üzemelő hőszivattyúk tűzvédelmi vonatkozásairól, és hasznosítható szempontokat adjak a tervezési gyakorlat és a várható hazai szabályozás számára.

4 LEHETSÉGES KOCKÁZATOK FELTÁRÁSA

4.1 *Hőszivattyú működése közbeni üzemállapotok*

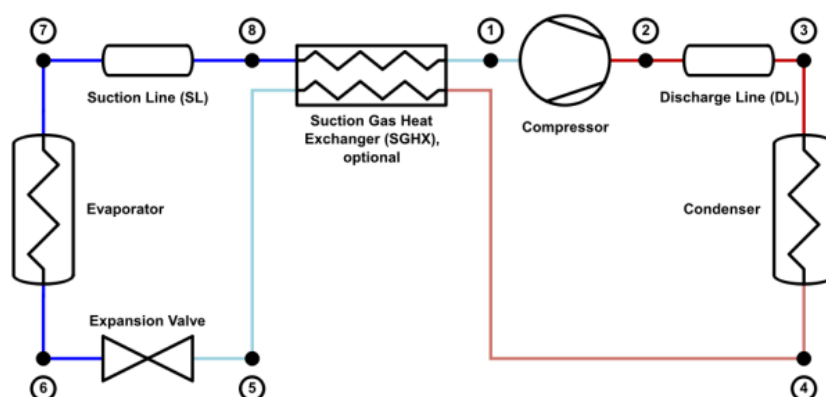
A hőszivattyús rendszerek üzemeltetése során különböző működési állapotokat kell figyelembe venni attól függően, hogy fűtési vagy hűtési üzemmódban működik-e a berendezés. A két üzemmód közötti alapvető különbség abban áll, hogy a kompresszoros hűtőkörfolyamat mely pontján történik a hő elvonása és melyik szakaszon a hő leadása.

Az üzemállapotokat alapvetően befolyásolja az is, hogy a hőszivattyú milyen rendszerhez csatlakozik, vagyis milyen célra használjuk a másodlagos (szekunder) körben előállított hőenergiát. Különbséget kell tenni a felületfűtési-hűtési rendszerek, a radiátoros vagy fan-coilos hőleadás, illetve a használati melegvíz (HMV) előállítás között.

Az R290 hűtőközeg egyik jelentős előnye, hogy magas előremenő hőmérsékletet is képes biztosítani – akár 65 °C körüli érték is elérhető elektromos rásegítés nélkül, miközben a rendszer hatásfoka nem szenved jelentős romlást. Ezért az R290 alkalmas olyan alkalmazásokban is, ahol HMV-ellátás vagy magasabb hőmérsékletű radiátoros fűtés az elvárás, szemben más hűtőközegekkel, amelyeknél kiegészítő fűtés szükséges lehet.

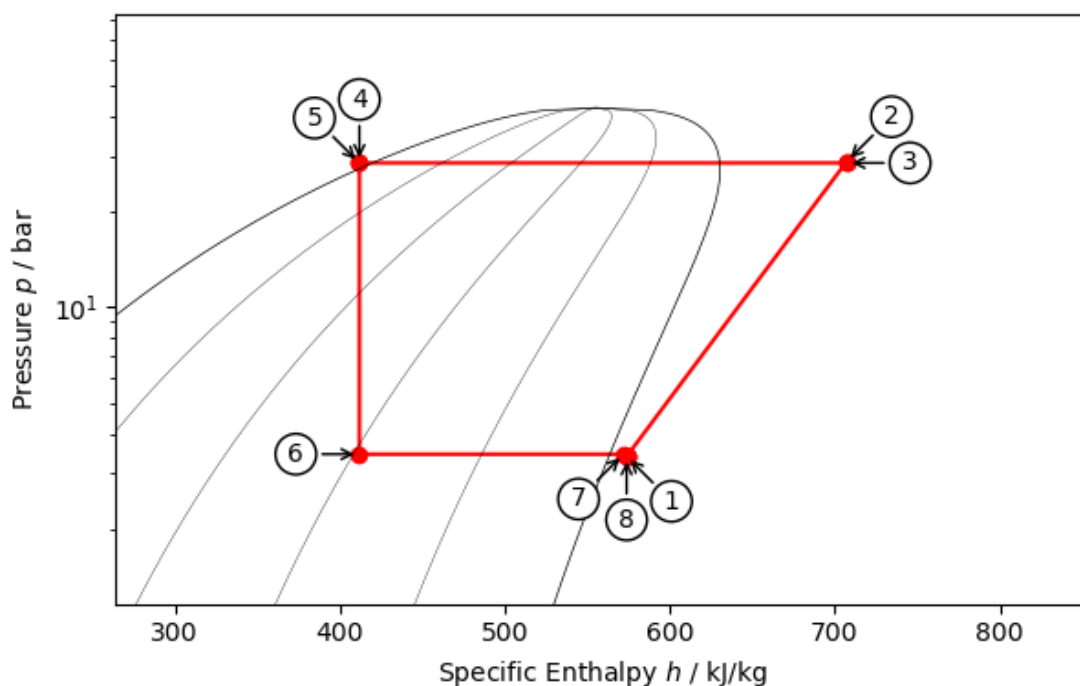
A további kockázatelemzési számítások elvégzéséhez szükséges a hőszivattyú rendszerében működés közben jelenlévő nyomás- és hőmérsékletértékek meghatározása. Mivel ezek az értékek közvetlenül befolyásolják a hűtőközeg szivárgása esetén fellépő fizikai hatásokat (pl. villanásos párolgás, gázképződés, gyúlékonyság), elengedhetetlen pontos becslésük a modell szempontjából.

A vizsgálathoz a CoolTools nevű termodinamikai szoftvert használtam, amely lehetőséget biztosít különböző hűtőközegek kompresszoros körfolyamatának $\log(p)$ -h diagram alapú szimulációjára. A modell elméleti jellegű, célja, hogy egy tipikus, R290 hűtőközeggel működő hőszivattyú esetén közelítő értékeket adjon a körfolyamat egyes pontjaira.



10. ábra Hűtőkör CoolTools szoftver szerint

A modell felépítése során kiindulási feltételként azt vettem figyelembe, hogy a rendszerrel előállított fűtővíz hőmérséklete $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ legyen. Mivel a vízoldali hőcserélők általában $5\text{--}10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletkülönbséggel működnek, a kondenzátor oldali hűtőközeg (R290) kondenzációs hőmérsékletét $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nak feltételeztem. Ez az érték biztosítja, hogy megfelelő hőátadás történjen a használati melegvíz (HMV) vagy magas hőfokú fűtési rendszer előállításához



11. ábra A körfolyamat ábrázolása logp-h diagramon

A $\log(p)$ – h diagram értelmezése során az egyes termodinamikai állapotpontokhoz rendelt nyomás-, hőmérséklet- és entalpiaértékeket az alábbi táblázat szemlélteti.

Pont	T [°C]	p [bar]	h [kJ/kg]
1	-4	3.396	573.85
2	100,83	28.766	707.21
3	100,5	28.493	707.21
4	73	28.493	411.86
5	73	28.493	411.86
6	-10	3.453	411.86
7	-5	3.453	571.95
8	-4	3.396	573.85

1. táblázat Hűtőközeg állapotpontjai és fizikai paraméterei

A táblázat alapján megállapítható, hogy a körfolyamat során a legnagyobb nyomás- és hőmérsékletérték a 2. pontban jelentkezik, ahol a hűtőközeg gázhalmazállapotban, túlhevített állapotban van jelen. A legnagyobb nyomású és hőmérsékletű folyadékfázisú állapot a 4. pontnál található. A további számításokhoz ezen két állapotponthoz tartozó paramétereket használok fel kiindulási adatként.

4.2 Hűtőközeg szabadba jutásának szimulációja

A jelen fejezet célja az R290 hűtőközeggel töltött hőszivattyú esetleges meghibásodása során bekövetkező kiszabadulási esemény szimulációja az ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) szoftver segítségével. A vizsgálat során a lehető legrosszabb forgatókönyvet veszem alapul, amely során a hűtőközeg teljes mennyisége – 67 kg – rövid időn belül a szabadba jut.

A szimuláció két különböző halmazállapotot vizsgál:

- az egyik esetben a hűtőközeg gázhalmazállapotban szivárog ki a rendszerből,
- a másik esetben folyadékfázisban történik a kiszabadulás, amelyből párolgás és tócsaképződés is bekövetkezhet.

A cél annak meghatározása, hogy ezekben a scenáriókban mekkora területen alakulhat ki robbanásveszélyes atmoszféra – vagyis olyan koncentrációjú propán-levegő

keverék, amely elérheti az alsó robbanási határérték (LEL) egészét vagy bizonyos hányadát.

4.2.1 Kiinduló adatok

A propán (R290) hűtőközeg fizikai jellemzőit, valamint a meteorológiai körülményeket a programba kézzel adtam meg. Az alábbiakban a felhasznált közegjellemzők és környezeti adatok kerülnek összefoglalásra.

Közegjellemzők (PROPANE – R290):

- Vegyület neve: Propán
- CAS szám: 74-98-6
- Moláris tömeg: 44,10 g/mol
- Forráspont (normál légköri nyomáson): $-42,2\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Gőznyomás (15 $^{\circ}\text{C}$ -on): $> 1\text{ atm}$
- Telítési koncentráció a levegőben: 1 000 000 ppm (100 térf.%)
- Egészségügyi határértékek (60 perces AEGL-értékek):
- AEGL-1: 5 500 ppm – enyhe, visszafordítható hatások
- AEGL-2: 17 000 ppm – súlyos, nem életveszélyes hatások
- AEGL-3: 33 000 ppm – potenciálisan halálos hatások
- IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health): 2 100 ppm

Robbanásveszélyességi határok:

- LEL (Lower Explosive Limit – alsó robbanási határ): 21 000 ppm
- UEL (Upper Explosive Limit – felső robbanási határ): 95 000 ppm

Meteorológiai (atmoszférikus) adatok:

- Szélsebesség: 1,5 m/s (2 méteres magasságban, északnyugati irányból)
- Terepfelszín jellege: városi vagy erdős (urban or forest)
- Felhőborítottság: 5 tized
- Léghőmérséklet: 15 $^{\circ}\text{C}$
- Stabilitási osztály: C (semleges légköri stabilitás)
- Páratartalom: 50%
- Inverziós réteg: nincs megadva (No Inversion Height)

Ezek az adatok képezik a szimulációs környezet alapját, és döntően befolyásolják a szabadba jutó hűtőközeg viselkedését, párolgási sebességét, valamint a robbanásveszélyes zónák terjedését. A kiválasztott paraméterek egy konzervatív, de reális tavaszi-őszi átlagos meteorológiai körülményeket tükröznek, melyek megfelelnek egy hazai, jellemző telepítési környezetnek. A szimulációk futtatása közben több atmoszférikus paraméter megváltoztatását is kipróbáltam, de érdemi különbség nem volt a kapott eredmények között.

4.2.2 Gázfázisú hűtőközeg kiáramlási sebessége

A kiáramlás sebességének meghatározása szempontjából a legkedvezőtlenebb forgatókönyvet vettem alapul, amely során a rendszerben lévő R290 hűtőközeg gázhalmazállapotban, nagy nyomáson hagyja el a vezetéket egy súlyos meghibásodás következtében. A szimuláció során feltételeztem, hogy a hűtőközeg egy 20 mm belső átmérőjű rézcsövön keresztül, a cső teljes keresztmetszetén át távozik a környezetbe.

A kiáramlás kiinduló feltételeit a korábban meghatározott 28 bar nyomás és 101 °C hőmérséklet értékek adják meg, amelyek a kompresszorból kilépő túlhevített gőz állapotnak felelnek meg.

Bár az ALOHA szoftver ebben a beállításban csak egyórás kiáramlási időtartamot engedélyezett, a szimuláció célja nem a teljes szabadba jutás leírása, hanem kizárólag a kiáramlás sebességének meghatározása volt. Ez alapján megállapítható, hogy a magas nyomás és nagy keresztmetszet miatt a teljes töltet rendkívül gyorsan elhagyja a rendszert.

- ALOHA szoftver beállításai és eredményei (gázfázisú szivárgás esetén):
- Éghető gáz szabadba jutása csőből (nem ég)
- Pipe Diameter (cső átmérő): 2 cm (20 mm)
- Pipe Length (cső hossza): 4 m
- Csővég állapota: az ép vég végtelen forrásként van beállítva (infinite source)
- Pipe Roughness (cső érdesség): sima (smooth)
- Hole Area (szivárgási nyílás területe): 3,14 cm² (teljes keresztmetszet)
- Pipe Pressure (csőnyomás): 2 800 000 Pa (28 bar)
- Pipe Temperature (csőhőmérséklet): 101 °C

- Release Duration: a szimuláció időtartamát az ALOHA 1 órában korlátozta
- Max Average Sustained Release Rate (átlagos kiáramlási sebesség):
- 61,7 kg/min
- Total Amount Released (összes kiszabaduló anyag): 3 700 kg
(ez a szoftver elméleti „infinite source” beállításából adódik, nem a tényleges töltetből)

A fenti eredmények alapján megállapítható, hogy egy teljes keresztmetszetű szivárgás esetén a kiáramlási sebesség 61,7 kg/min, ami azt jelenti, hogy a teljes 67 kg töltet közel egy perc alatt távozik a rendszerből. Ez a rendkívül gyors kiürülés komoly veszélyt jelent, mivel azonnal LFL feletti koncentrációt eredményezhet a környező légtérben, különösen zárt vagy rosszul szellőző helyszínen.

4.2.3 Gázfázisú hűtőközeg szivárgásának ábrázolása

A gázfázisú R290 szivárgás következményeinek ábrázolásához az ALOHA szoftver által készített veszélyzóna-térképet használtam fel. A kiinduló adatok között a korábban meghatározott 61,7 kg/perc kiáramlási sebességet állítottam be, amely a 20 mm belső átmérőjű rézcső teljes keresztmetszetén, 101 °C hőmérsékleten és 28 bar nyomáson távozó hűtőközeg esetét modellezi.

A szoftver „Heavy Gas” terjedési modellt alkalmazott, mivel a propán sűrűsége magasabb a környezeti levegőnél, így a szivárgó anyag jellemzően a talaj közelében terjed, fokozva ezzel a gyújtásveszélyt a padlószint közelében lévő gyújtóforrások esetén.

ALOHA szimulációs beállítások és eredmények:

- Közvetlen forrás: 61,7 kg/perc
- Forrás magassága: 0,2 méter
- Kiáramlás időtartama: 1,09 perc
- Összes kiszabaduló mennyiség: 67,3 kg
- Megjegyzés: A szoftver szerint a folyamat során villanásszerű párolgás („flash boiling”) és/vagy kétfázisú áramlás is kialakulhat.

Veszélyzónák (flammable threat zones):

- Piros zóna – 21000 ppm = LEL: 19 méter

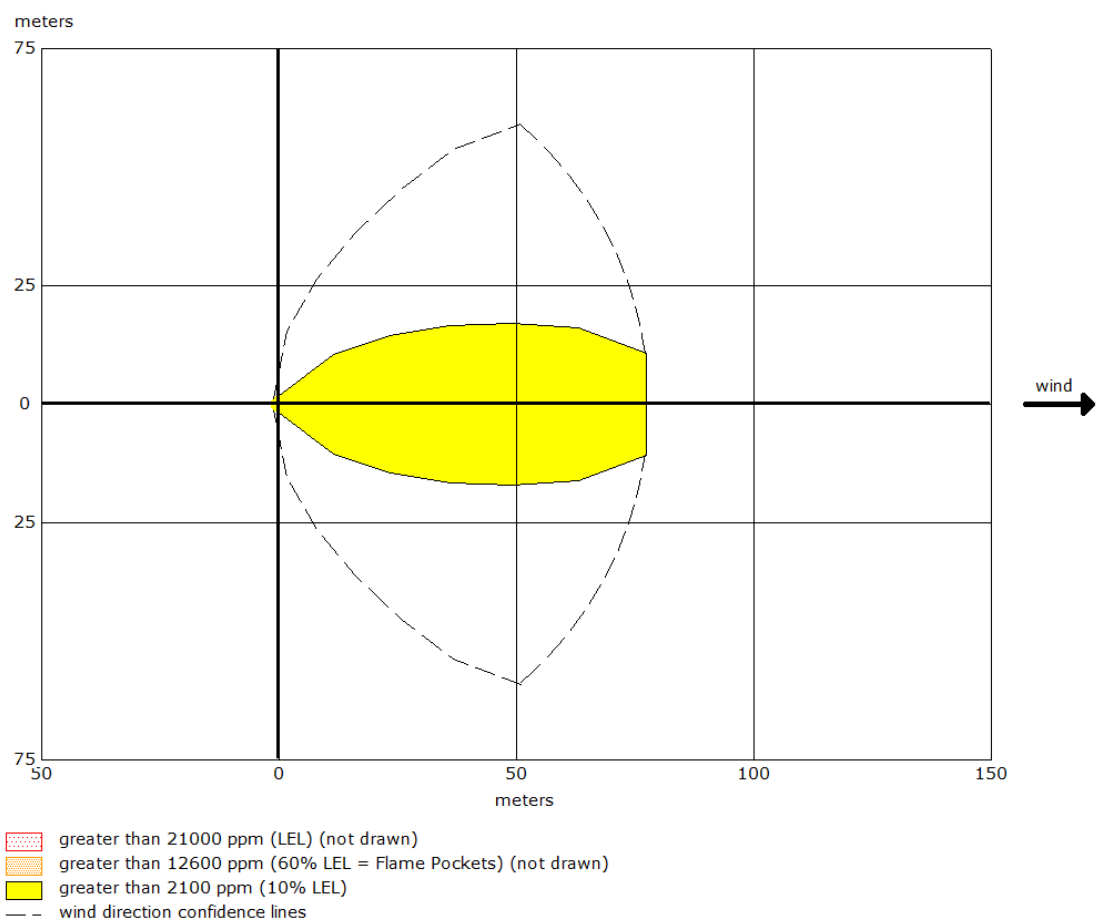
(az ALOHA nem rajzolta ki, mivel ilyen rövid távolságon a turbulencia hatása miatt a pontosság csökken)

- Narancssárga zóna – 12600 ppm = 60% LEL (lángfészkek): 23 méter (szintén nem ábrázolva a szoftver korlátozásai miatt)

- Sárga zóna – 2100 ppm = 10% LEL: 77 méter

(ez a zóna a szimulációs térképen jól lehatárolható, és egyértelműen értelmezhető)

Az ábra jól szemlélteti, hogy a sárga zóna – amely a gyújtás szempontjából még mindig veszélyes koncentrációjú propán-levegő keveréket jelöl – megközelítőleg 77 méter hosszan terjed a szélirány mentén. Az ábra alapján a keverék kiterjedése főként a szélirányban elnyúló, szimmetrikus eloszlású.



12. ábra Hűtőközeg terjedése gázfázisban

Ez azt jelenti, hogy a hűtőközeg akár közel 80 méteres távolságban is gyújtásveszélyes keveréket képezhet, ha a kiáramlás szabad téren, megfelelő meteorológiai körülmények között következik be.

4.2.4 Gázfázisú hűtőközeg robbanásának vizsgálata

A korábban bemutatott gázfázisú kiáramlás szimulációját követően a propán-levegő elegy robbanási következményeit is modelleztem az ALOHA szoftver segítségével. A robbanási vizsgálat célja annak meghatározása volt, hogy egy gyújtás esetén milyen túlnyomás-hullám (overpressure blast) alakulhat ki a környezetben, és mekkora távolságban várható épületszerkezetek károsodása vagy személyi sérülés.

A szimuláció során ugyanazt a kiáramlási módszert alkalmaztam, mint a 4.2.3 Gázfázisú hűtőközeg szivárgásának ábrázolása alfejezetben bemutatott modell esetében, vagyis egy 20 mm belső átmérőjű rézcső teljes keresztmetszetén, 101 °C hőmérsékleten és 28 bar abszolút nyomáson történő gázkiáramlást. A kiáramlás során a hűtőközeg teljes mennyisége, 67,3 kg, körülbelül 1 perc alatt hagyta el a rendszert, a korábban meghatározott 61,7 kg/perc kiáramlási sebességgel.

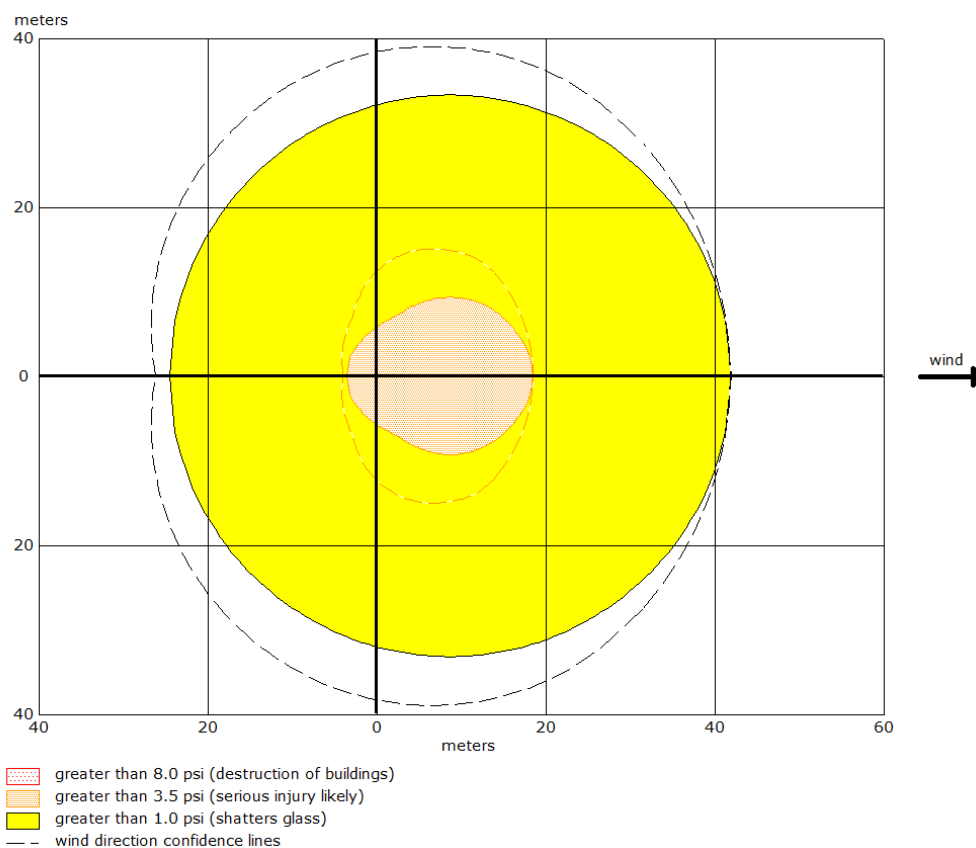
A robbanási szimuláció paramétereit között a szokásos „Heavy Gas” terjedési modellt használtam, a gyújtás típusát pedig „spark or flame” (szikra vagy nyílt láng általi gyújtás) lehetőségre állítottam be. Fontos megjegyezni, hogy a modellezés során „congested” (zsúfolt) környezeti viszonyokat választottam, mivel a gyakorlatban a robbanási energiát nagymértékben fokozza, ha az éghető elegy inhomogén szerkezetek (pl. épületek, berendezések) között gyullad meg. A szimulációt „uncongested” beállítással is lefuttattam, de ebben az esetben az ALOHA nem adott használható robbanási eredményt, mivel a gyúlékony felhő kiterjedése nem volt elegendő ahhoz, hogy jelentős túlnyomás alakuljon ki.

ALOHA szimulációs adatok (robbanás esetén):

- Közvetlen forrás: 61,7 kg/perc
- Forrás magassága: 0 m
- Kiáramlás időtartama: 1,09 perc
- Összes kiszabaduló tömeg: 67,3 kg
- Megjegyzés: kétfázisú áramlás (gáz + aeroszol) és villanásszerű párolgás lehetősége

Robbanási veszélyzónák (Overpressure Threat Zones):

- Piros zóna ($>8,0$ psi/ $55,2$ kPa): nem keletkezett (nincs épületrombolás)
- Narancssárga zóna ($>3,5$ psi/ $24,1$ kPa): 19 méter — súlyos sérülés várható
- Sárga zóna ($>1,0$ psi/ $6,9$ kPa): 42 méter — üvegfelületek betörése várható



13. ábra Gázfázisú hűtőközeg robbantása

Az ábra alapján megállapítható, hogy a robbanás legnagyobb hatótávolsága a sárga zóna határáig terjedt, amely 42 méteres távolságig okozhat üvegszerkezetek károsodását. Azonnali életveszélyes sérülés csak a forráshoz közeli, 19 méteres távolságon belül lenne várható.

A robbanási vizsgálat megerősíti, hogy egy ilyen mértékű és sebességű gázszivárgás esetén, különösen zsúfolt környezetben, komoly robbanási kockázat áll fenn, amely jelentős károkat okozhat a berendezések közvetlen közelében tartózkodókban.

4.2.5 *Jet fire vizsgálata*

A gázfázisú szivárgás következtében kialakuló jet fire jelenséget szintén az ALOHA szoftver segítségével modelleztem. A vizsgálat célja annak elemzése volt, hogy egy nagynyomású, éghető gáz szivárgása esetén, amennyiben a kiszivárgott gáz azonnal meggyullad, milyen mértékű hőszugárzási veszély léphet fel a környezetben.

A szimuláció során az előző gázfázisú szivárgási példához hasonló beállításokat használtam: a propán 20 mm belső átmérőjű csőből, 101 °C hőmérsékleten és 28 bar abszolút nyomáson hagyja el a rendszert. A kiáramlási szcenárióban a „flammable gas burning as it escapes from pipe” (égő gáz szivárgása csőből) lehetőséget választottam.

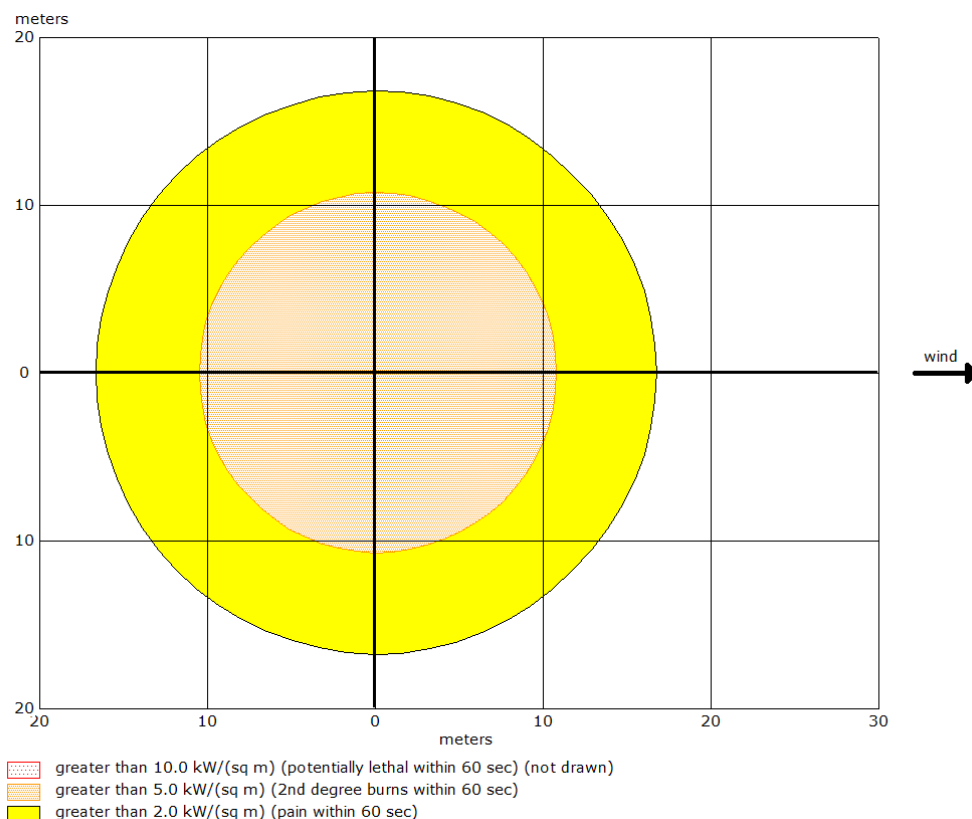
Fontos megjegyezni, hogy az ALOHA szoftver ebben az esetben is 1 órás égési időtartamot feltételez, így a szimuláció eredményei csak viszonyítási alapként értelmezhetők. A tényleges helyzetre vetítve a szivárgó és égő 67 kg propánmennyiség, a szimulációban számított 120 kg/perc égési sebesség mellett, körülbelül fél perc alatt elégne.

ALOHA szimulációs adatok (jet fire esetén):

- Cső átmérő: 2 cm (20 mm)
- Cső hossza: 4 m
- Csővég: végtelen forrásként modellezve
- Cső felülete: sima (smooth)
- Nyomás: 2 800 000 Pa (28 bar)
- Hőmérséklet: 101 °C
- Lánghossz: 3 méter
- Égés időtartama: ALOHA által 1 órára korlátozva
- Égési sebesség: 120 kg/perc
- Összes elégett tömeg: 3 700 kg (infinite source beállítás miatt)

Hőszugárzási veszélyzónák (Thermal Radiation Threat Zones):

- Piros zóna ($>10,0 \text{ kW/m}^2$): 10 méteren belül – 60 másodperc alatt potenciálisan halálos égési sérülések
- Narancssárga zóna ($>5,0 \text{ kW/m}^2$): 11 méter – másodfokú égési sérülések 60 másodperc alatt
- Sárga zóna ($>2,0 \text{ kW/m}^2$): 17 méter – fájdalomérzet 60 másodperc alatt



14. ábra Jetfire hőhatásának ábrázolása

Az ábra alapján jól látható, hogy a legsúlyosabb hatások (halálos hőszugárzás) a forrástól számított 10 méteres körzetben belül alakulhatnak ki, míg az enyhébb, de még mindig egészségkárosító hatások 17 méteres távolságig terjednek. A hőszugárzás szempontjából tehát a közvetlen környezetben tartózkodó személyek és szerkezetek fokozott veszélynek vannak kitéve, amennyiben az R290 töltetmennyiség nagyobb mennyiség mint a korábban meghatározott.

4.2.6 Folyadékfázisú hűtőközeg szivárgásának ábrázolása

A hűtőközeg folyadékfázisú kiszabadulását szintén az ALOHA szoftver segítségével szimuláltam. Mivel a program nem teszi lehetővé a csőből történő folyadékszivárgás közvetlen modellezését, ezért egy olyan forgatókönyvet állítottam be, amelyben a propán egy kis térfogatú, vízszintes hengeres tartályból távozik, egy csőszakasz teljes keresztmetszetű (20 mm-es átmérőjű) kifolyásán keresztül. A szimuláció során a korábban meghatározott 73 °C belső hőmérsékletet alkalmaztam, amely a rendszer üzemi kondenzációs hőmérsékletéhez igazodik.

A szoftver az anyag viselkedését kétfázisú áramlásként (gáz és aeroszol keveréke) értékelte, valamint villanásszerű párolgásra (flash boiling) is figyelmeztetett, ami a nyomás alatti folyadék gyors gázosodására utal a környezeti levegőre történő kibocsátás során.

ALOHA szimulációs beállítások és eredmények (folyadékfázis):

- Gyúlékony folyadék szivárgása vízszintes hengeres tartályból (nem ég)
- Tartály átmérője: 0,2 m
- Tartály hossza: 5,5 m
- Tartály térfogata: 173 liter
- Töltöttség: 98% (67 kg propán)
- Belső hőmérséklet: 73 °C
- Nyílás átmérője: 2 cm
- Nyílás helyzete: 10 cm-re a tartály aljától
- Kiáramlás időtartama: 1 perc
- Átlagos kiáramlási sebesség: 1,06 kg/s
- Összes kiszabaduló tömeg: 63,4 kg
- Megjegyzés: az anyag kétfázisban, gáz és aeroszol keverékeként távozott

Veszélyzónák (flammable threat zones):

- Piros zóna (21000 ppm = LEL): 19 m

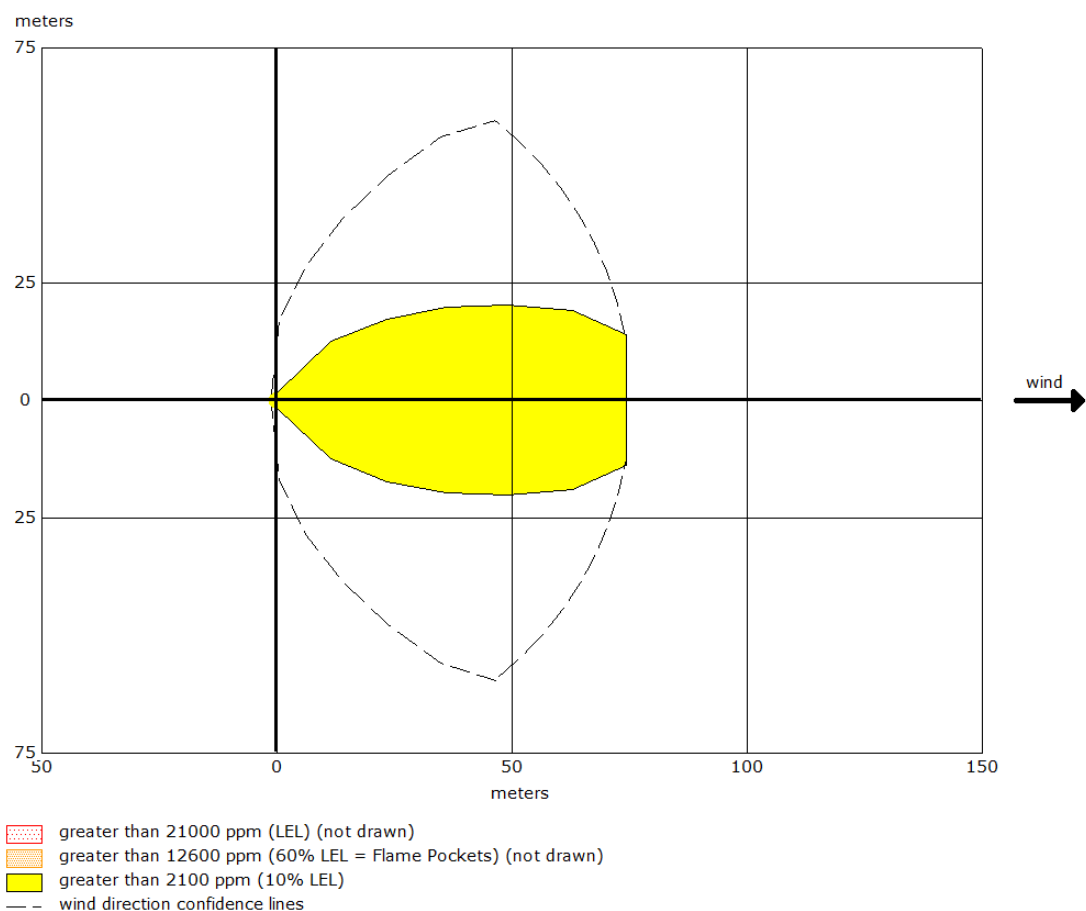
(nem ábrázolt – kis távolságon belüli turbulencia miatt az ALOHA nem jeleníti meg)

- Narancssárga zóna (12600 ppm = 60% LEL = Flame Pockets): 23 m

(szintén nem jelenik meg a térképen)

- Sárga zóna (2100 ppm = 10% LEL): 74 m

Az így kapott sárga zóna mérete és alakja igen hasonló a korábban modellezett gázfázisú szivárgás esetéhez, ahol 77 méteres kiterjedés volt jellemző. Ez azt mutatja, hogy a két különböző halmazállapot ellenére a szivárgás következményei terjedési szempontból gyakorlatilag egyenértékűek, különösen nyílt terepen, ahol a szél és hőmérséklet hatásai dominálják a diszperziót.



15. ábra Hűtőközeg terjedése folyadékfázisú kibocsátás esetén

A térképen látható, hogy a sárga zóna – amely még mindig a gyújtásra potenciálisan képes tartományba esik – kb. 74 méteres távolságig terjed a szélirány mentén. Ez alapján megállapítható, hogy a veszélyes koncentrációjú gázfelhő kiterjedése halmazállapottól függetlenül jelentős marad.

A továbbiakban a dolgozatban tócsatűz szimulációt nem készítettem el, mivel a folyadékfázisú hűtőközeg szivárgásának ALOHA szimulációja során a program jelezte, hogy az anyag kétfázisban, gáz és aeroszol keverékeként távozott. Ez azt jelenti, hogy a kiáramló propán teljes egészében a légtérbe került, így nem képződött számottevő folyadéktócsa a hőszivattyú alatt, amelyből klasszikus értelemben vett tócsatűz kialakulhatott volna.

4.2.7 *Folyadékfázisú hűtőközegszivárgás robbanása*

A folyadékfázisú R290 hűtőközeg szivárgásának robbanási következményeit az ALOHA szoftver segítségével modelleztem. A kiindulási állapot a 4.2.6 Folyadékfázisú hűtőközeg szivárgásának ábrázolása alfejezet szimulációja adta, amelyben 67 kg propán távozott a környezetbe 1 perc alatt. A robbanási szimuláció során a gáz-levegő keverék meggyulladását vizsgáltam.

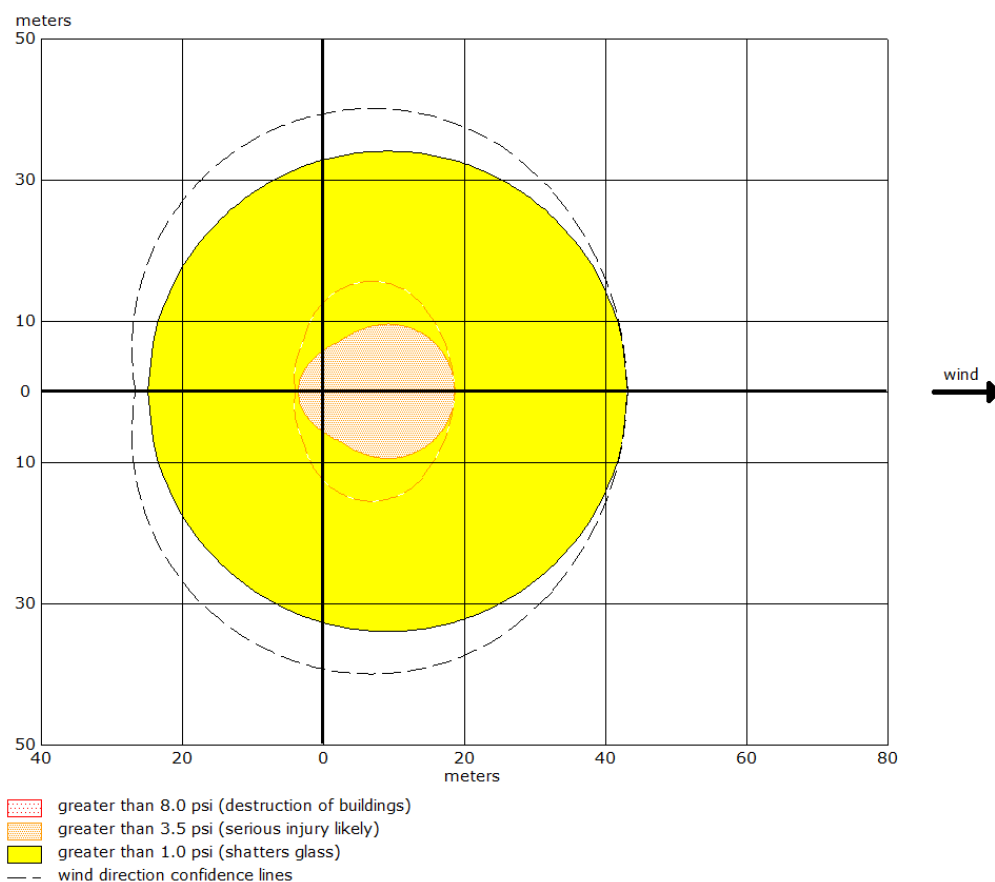
A modellezés során a propán villanásos párolgásából származó gázfelhőt „Heavy Gas” módban, „spark or flame” (szikra vagy láng általi gyújtás) típusú begyújtással szimuláltam. A környezeti viszonyok közötti hatékony terjedés figyelembevételére érdekében a „congested” (zsúfolt) környezetbeállítást alkalmaztam, mivel az ALOHA csak ebben az esetben szolgáltatott értékelhető robbanási eredményt. Az „uncongested” beállítás itt sem adott használható outputot.

ALOHA szimulációs adatok (folyadékfázisú szivárgás robbanás esetén):

- Meggyulladt anyag: folyadékból felszabadult propángáz
- Összes kiszabaduló mennyiség: 67 kg (1 perc alatt)
- Modellezett gyújtás: szikra vagy láng (spark or flame)
- Level of Congestion: congested
- Modellezési mód: Heavy Gas (sűrűbb a levegőnél)

Robbanási veszélyzónák (Overpressure Threat Zones):

- Piros zóna (>8,0 psi/55,2 kPa): nem keletkezett (nincs épületrombolás)
- Narancssárga zóna (>3,5 psi/24,1 kPa): 19 méter – súlyos sérülés valószínű
- Sárga zóna (>1,0 psi/6,9 kPa): 43 méter – üvegtörés valószínű



16. ábra Folyadékfázisú hűtőközeg robbanása

Összehasonlítva a gázfázisú robbanással:

- A narancssárga zóna (súlyos sérülés esélye) mindkét esetben 19 méterre terjedt ki, tehát az emberekre gyakorolt közvetlen veszély gyakorlatilag azonos.
- A sárga zóna (üvegszerkezetek károsodása) a gázfázisú esetben 42 méter, míg a folyadékfázisú esetben 43 méter volt. A különbség elhanyagolható, így a veszélyes terület kiterjedése szintén azonos nagyságrendű.
- Mindkét esetben nem lépte túl a 55,2 kPa határértéket, így épületromboló hatás nem várható.

A kapott eredményekből megállapítható, hogy függetlenül attól, hogy a propán gázfázisban vagy folyadékfázisból villanásos párolgással kerül a légkörbe, a robbanásveszélyes felhő kiterjedése és az abból eredő túlnyomási károk szinte azonos mértékűek.

Ez jól mutatja, hogy egy jelentős mennyiségű propán szivárgása és gyulladása bármely halmazállapotból komoly robbanási kockázatot jelent, amelyet a telepítési környezet kialakításakor és a biztonsági zónák kijelölésekor figyelembe kell venni.

4.3 Hűtőközeg beltérben való szivárgásának számítása

A következő részben egy olyan számítást mutatok be, amelynek célja annak vizsgálata, hogy egy zárt beltéri térben, teljes hűtőközeg-szivárgás esetén a hűtőközeg koncentrációja elérheti-e az alsó égési határértéket (AÉH, angolul LFL – Lower Flammability Limit). Az ilyen típusú elemzés alkalmazható levegő–levegő és víz–víz hőszivattyús rendszerek esetén is, mivel mindkét kialakításban előfordulhat, hogy a hűtőközeg – valamilyen meghibásodás következtében – a beltérbe kerül.

A bemutatott számítást elsősorban legalább 1,8 méteres magasságban telepített levegő–levegő hőszivattyú beltéri egységekre végeztem el. Ez a beépítési mód jellemző a split klímaként ismert berendezésekre, ahol a teljes hűtőkör részben a beltérben található, így egy esetleges szivárgás során a tűzveszélyes hűtőközeg közvetlenül a lakótérbe juthat.

A számítás alapját az MSZ EN 378-3 és az IEC 60335-2-40 szabványokban rögzített módszertan adja, amelyet korábban az R32 (A2L osztályú) hűtőközegre alkalmaztak. A nagyobb tűzveszélyt jelentő R290 (A3 osztály) esetén ez a számítási logika konzervatív, de irányadó alapként szolgálhat. E módszert gyártói biztonsági vizsgálatokban is alkalmazták az R32 alapú rendszerek tervezési fázisában.

Felhasznált jelölések:

- m – a berendezésben lévő hűtőközeg tömege [kg]
- LFL (AÉH) – az alsó égési határérték, R290 esetén: $0,038 \text{ kg/m}^3$
- h – a beltéri egység magassága [m], jelen esetben: 1,8 m
- A – a helyiség alapterülete [m^2]
- V – a helyiség beltéri egység alatti térfogata [m^3], ahol:

$$V = A \cdot h$$

Az alkalmazott szabványok – köztük az MSZ EN 378-3 és az IEC 60335-2-40 – a helyiségek tűzvédelmi szempontú besorolását a hűtőközeg-töltet tömege és a helyiség térfogata alapján végzik el. Ennek megfelelően négy kategóriát határoznak meg:

- kockázatmentes terület,

- 1. zóna,
- 2. zóna,
- 3. zóna,

attól függően, hogy mekkora a potenciális gyúlékony gázkoncentráció. A következőkben ezen zónák határértékeit ismertetem, majd egy 30 m² alapterületű helyiség mintaszámításán keresztül szemléltetem az értékek gyakorlati alkalmazását.

- Kockázatmentes terület felső határa:

$$m = 2.5 \cdot LFL_{\left\{\frac{5}{4}\right\}} \cdot h \cdot \sqrt{\{A\}}$$

- 1. zóna felső határa:

$$m = 0.25 \cdot LFL \cdot V$$

- 2. zóna felső határa:

$$m = 0.5 \cdot LFL \cdot V$$

A fenti képletek alapján megállapítható, hogy egy helyiség akkor sorolható a 3. zónába, ha a beltérben kialakuló hűtőközeg-koncentráció elérheti az alsó égési határérték (LFL) legalább 50%-át. A 2. zóna besorolás akkor lép érvénybe, ha a koncentráció az LFL legalább 25%-át elérheti.

Számítási példa 30m²-es helyiségre:

- Kockázatmentes terület felső határa:

$$m = 2.5 \cdot 0.038_{\left\{\frac{5}{4}\right\}} kg/m^3 \cdot 1.8m \cdot \sqrt{\{30m^2\}} \approx 0.414kg$$

- 1. zóna felső határa:

$$m = 0.25 \cdot 0.038kg/m^3 \cdot (30m^2 \cdot 1.8m) = 0.25 \cdot 0.038kg/m^3 \cdot 54m^3 \\ \approx 0.513kg$$

- 2. zóna felső határa

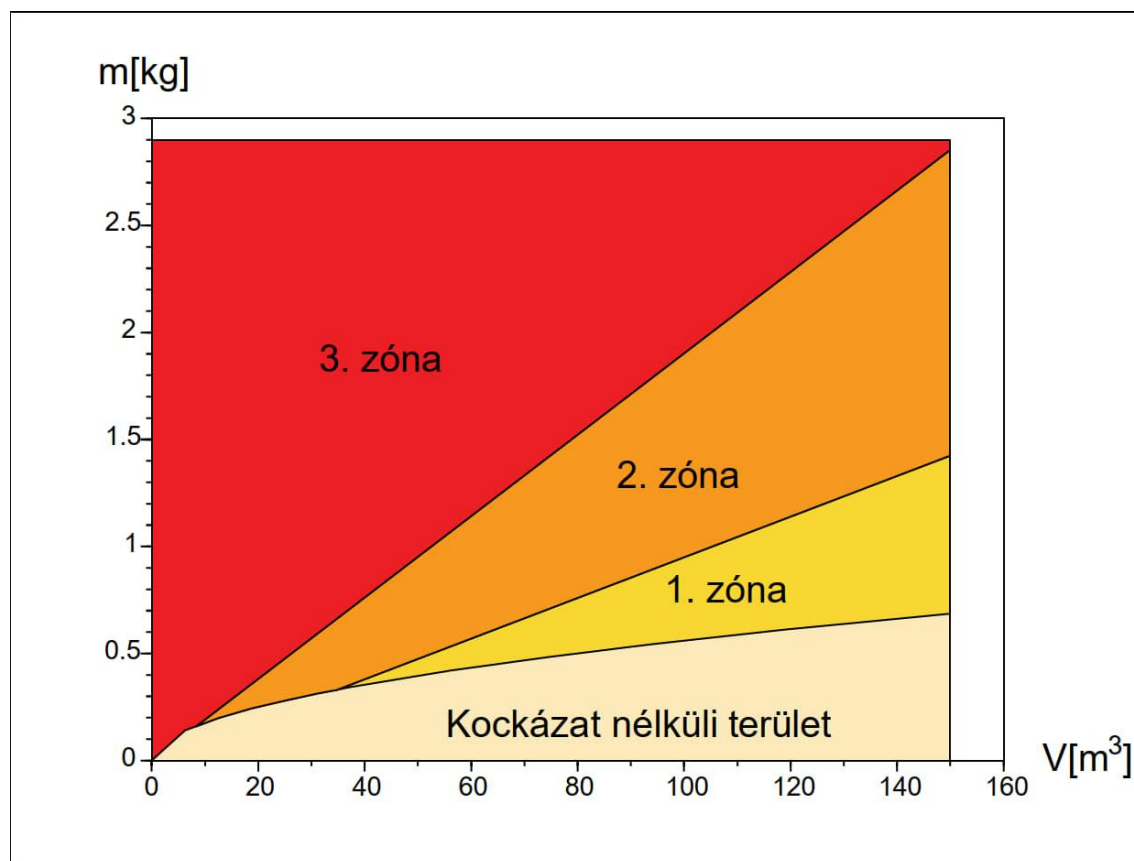
$$m = 0.5 \cdot \frac{0.038kg}{m^3} \cdot (30m^2 \cdot 1.8m) = 0.5 \cdot \frac{0.038kg}{m^3} \cdot 54m^3 \approx 1.026kg$$

Ez azt jelenti, hogy ha a hőszivattyúban lévő hűtőközeg töltete:

- 0,41 kg alatt van, a helyiség kockázatmentesnek minősül,
- 0,41–0,51 kg között van, az adott tér 1. zónába sorolható,
- 0,51–1,03 kg között, 2. zóna,
- 1,03 kg felett, a helyiség már 3. zónába tartozik, vagyis fennáll a gyulladási koncentráció elérésének reális esélye

Az R32-t használó rendszerekhez készült zónaosztályozási diagramok mintájára elkészítettem az R290 hűtőközegre vonatkozó zónabesorolási diagramot is, amely a helyiség térfogata és a berendezésben található hűtőközeg töltetmérete alapján teszi lehetővé a tűzvédelmi besorolás meghatározását.

A vízszintes tengelyen a helyiség térfogata [m^3] szerepel, míg a függőleges tengely az alkalmazott R290 hűtőközeg töltetméretét [kg] mutatja. A diagram értelmezése során egy adott pont a síkon megmutatja, hogy az adott térfogatú helyiségbe telepített hőszivattyú milyen töltetméret esetén sorolható a kockázatmentes terület, az 1. zóna, a 2. zóna vagy a 3. zóna kategóriájába.



17. ábra Kockázati zónák besorolása R290 töltet és helyiségméret alapján

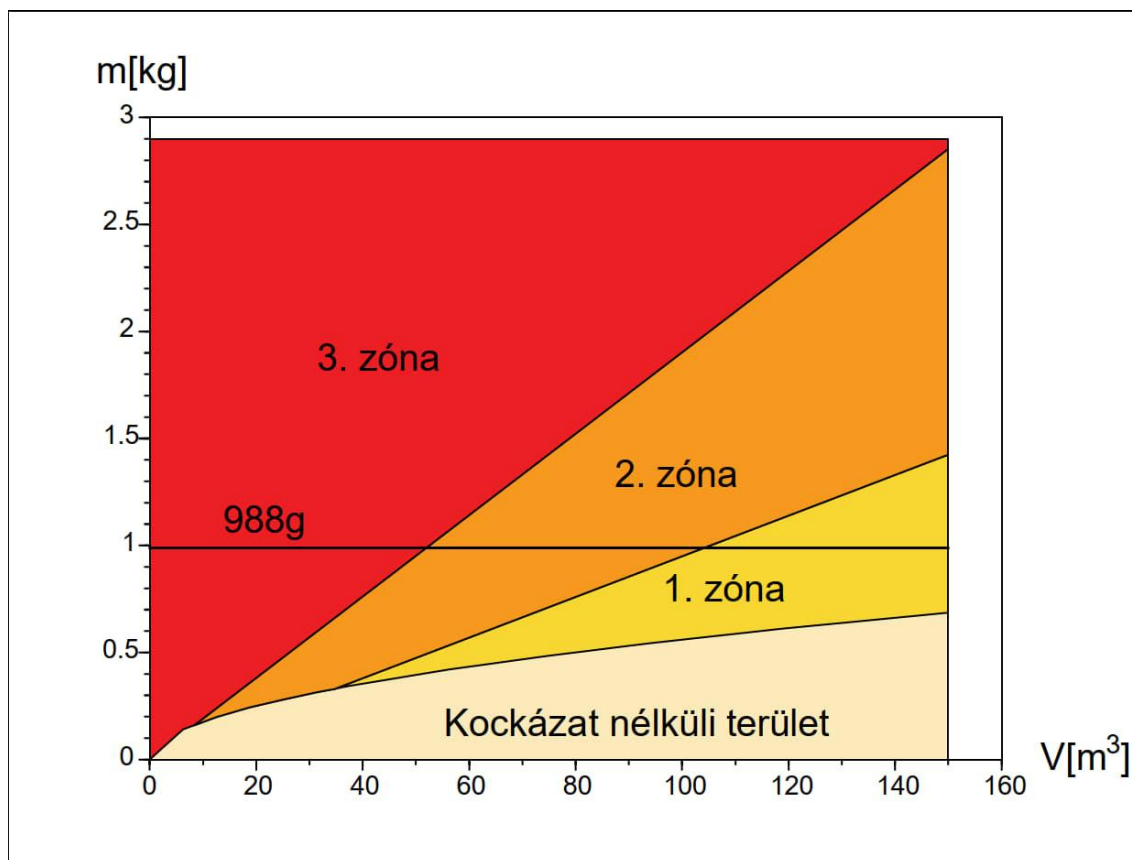
A diagramot a korábban ismertetett képletek alapján készítettem el, a függvényeket a Scilab matematikai szoftver segítségével definiáltam és ábrázoltam. A zónahatárokat meghatározó egyenleteket görbe formájában rajzoltattam fel, majd a keletkező tartományokat AutoCAD segítségével különböző színekkel és feliratokkal jelöltem. Az így elkészült grafikus ábra vizuálisan is jól szemlélteti a kritikus töltetértékek helyiségmérethez viszonyított kockázatát.

Az ábra alapján egyértelműen látható, hogy kis térfogatú helyiségekben már viszonylag kisméretű töltet is elég lehet ahhoz, hogy a koncentráció elérje vagy meghaladja az alsó égési határértéket. Ez kiemelten fontossá teszi a helyiségméret figyelembevételét a berendezés kiválasztásakor és a vonatkozó biztonsági intézkedések meghatározásakor.

Az elvégzett számítások alapján megfigyelhető, hogy a beltéri egység beépítési magasságának növelése kedvezően befolyásolhatja a zónabesorolást. Mivel a számítások során a helyiség térfogatát a belmagasság is befolyásolja, a magasabb telepítési pont egyúttal nagyobb mértékadó térfogatot eredményez. Ennek következtében – azonos töltettömeg mellett – alacsonyabb koncentráció alakul ki a térben, ami kedvezőbb zónabesorolást eredményezhet. Ez a szempont különösen fontos lehet olyan alkalmazásoknál, ahol a telepítési hely korlátozott, és az A3 osztályú hűtőközeg jelenléte miatt fokozott tűzvédelmi figyelmet igényel a rendszertervezés.

A zónaosztályozási diagramot kiegészítettem a jelenleg hatályos szabvány által maximálisan engedélyezett 988 gramm propán töltettömeg megjelenítésével is. Ez a határérték az IEC 60335-2-40:2022 szabvány előírásai alapján került rögzítésre, és meghatározza, hogy egy osztott rendszerű (split) levegő–levegő hőszivattyú beltéri egysége maximum mekkora mennyiségű R290-et tartalmazhat.

A frissített diagramon egy vízszintes vonal jelöli a 0,988 kg (azaz 988 g) töltettömeget. Az ábráról egyértelműen leolvasható, hogy ezzel a töltettel már viszonylag kis térfogatú helyiségek esetén is tűzvédelmi kockázat léphet fel.



18. ábra A 988 g töltetű R290 rendszer zónabesorolása különböző helyiségméretek mellett.

A tengelyek mentén leolvastva megállapítható, hogy kb. 28 m² alapterületű, 1,8 m belmagasságú helyiség esetén (azaz ~50,4 m³ térfogat mellett) a rendszer épphogy elhagyja a 2. zónát, és a helyiség a 3. zónába sorolódik. Ez jól szemlélteti, hogy a jelenlegi szabványi töltetkorlát csak megfelelő térfogatú helyiségbe telepítve biztosítja a tűzbiztonsági követelmények teljesülését.

4.4 Lehetséges gyújtóforrások

A propán, mint A3 besorolású hűtőközeg alkalmazása különös körtekintést igényel a tűzvédelmi kockázatok vonatkozásában. Az R290 egyik legmeghatározóbb veszélytényezője a könnyű gyulladóképesség, amelyet az alacsony gyulladási energiaigény és széles éghetőségi tartomány (LFL: 2,1 tf%, UFL: 9,5 tf%) tesz kockázatosá. Mindez azt jelenti, hogy viszonylag kis koncentrációban, viszonylag csekély energiájú gyújtóforrással is beindulhat az égési folyamat, ha a hűtőközeg szivárog és elegyedik a levegővel.

Az égés feltételeinek klasszikus modellje – az ún. tűz háromszöge – alapján egy gyulladás létrejöttéhez három komponens egyidejű jelenléte szükséges: éghető anyag

(R290), megfelelő oxidálószer (levegő, oxigén), valamint gyújtóforrás. Míg az első kettő a rendszer szivárgása esetén könnyen együtt lehet jelen, a gyújtóforrás megléte a legkönnyebben befolyásolható tényező a biztonságtechnikai tervezés során. [BÁLINT, 2024]

A lehetséges gyújtóforrásokat több nemzetközi szabvány is részletesen tárgyalja. A DIN EN 378-2:2018-04 és az IEC 60335-2-40 irányelvek kifejezetten előírják, hogy a hűtőberendezések telepítési környezetében az összes potenciális gyújtóforrást fel kell mérni és szükség esetén ki kell zárni. [BÁLINT, 2024]

A lehetséges gyújtóforrásokat az alábbi csoportosítás szerint érdemes áttekinteni:

Nyílt láng és lángképződés

Ide tartoznak az olyan közvetlen égési folyamatok, mint például az öngyújtók, gyertyák, forrasztópisztolyok, gázégők és egyéb kézi hegesztőeszközök lángjai. Az ilyen típusú gyújtóforrások már kis mennyiségű kiszivárgott propán esetén is képesek begyújtani az elegyet. [BÁLINT, 2024]

Villamos ív és szikraképződés

Villamos kapcsolók, relék, ON/OFF kapcsolók, hibás elektromos csatlakozások, statikus elektromosság és kóboráram egyaránt veszélyforrást jelentenek. A minimális gyújtási energia (MIE) propán esetén mindössze $\sim 0,25$ mJ, amely már statikus kisülés esetén is könnyen elérhető. Összehasonlításként megemlíthető, hogy a robbanás elleni védelemre vonatkozó tűzvédelmi irányelv alapján azokat a porokat, amelyek minimális gyújtási energiája 3 mJ alatti, már a rendkívül gyújtásérzékeny kategóriába sorolják. [BÁLINT, 2024]

Forró felületek

A forró felületek akkor jelenthetnek veszélyt, ha hőmérsékletük meghaladja a propán öngyulladás hőmérsékletét, amely 470°C . A DIN EN 378-2 szabvány értelmében a berendezésekben lévő maximális megengedett felületi hőmérséklet 370°C , amely a biztonsági tartalékot is figyelembe veszi. Forró felületek jellemzően hibásan működő motoroknál, túlmelegedett alkatrészeknél, csapágyhibák következtében, vagy külső hőforrások esetén jöhetnek létre [RESTÁS, 2014]

Mechanikai eredetű szikrák

Súrlódó felületek, csapágyhibák, forgórészek közötti kontaktus, vagy például fémfelületek súrlódása által létrejövő szikrák is gyújtóforrásként funkcionálhatnak. Az ilyen jelenségek gyakran a karbantartás, javítás során, nem megfelelő eszközhasználatból erednek [RESTÁS, 2014]

Elektromos eszközök, vezérlők, szenzorok

A berendezések saját vezérlő- és szabályozóelemei is képesek szikrát generálni. Az IEC 60079 szabványsorozat ajánlásokat ad a robbanásbiztos kivitelű villamos eszközökre, amelyek alkalmazásával csökkenthető a gyújtás kockázata. Ennek értelmében például a villanymotorokat DC-meghajtásúvá, a ventilátorokat műanyaglapátos kivitelűvé kell alakítani, továbbá szükséges szivárgásérzékelő és automatikus lekapcsoló funkció is. [WEI ET AL, 2024]

Villámcsapás

Bár kevésbé gyakori, de szabadtéren telepített rendszerek esetén a villámcsapás mint lehetséges gyújtóforrás is figyelembe veendő. A villám hatalmas energiája és magas hőmérséklete egy esetleges szivárgás esetén teljes gyulladást vagy robbanást idézhet elő.

Összefoglalásként megállapítható, hogy az R290 hűtőközeggel töltött rendszerek telepítése és üzemeltetése során fokozott figyelmet kell fordítani a potenciális gyújtóforrások kizárására. Ezt a szabályozási háttér mellett műszaki intézkedések, mint például robbanásbiztos kivitelű alkatrészek, hővédelmi eszközök, szellőztetés és aktív érzékelés, valamint a telepítési környezet megfelelő megválasztása biztosíthatja.

5 KÖVETKEZTETÉSEK ÉS MÉRNÖKI JAVASLATOK

5.1 Kültéri elhelyezés

A kültérben telepített hőszivattyús berendezések esetén a szimulációs vizsgálatok eredményei alapján eltérő kockázati megfontolások szükségesek a beltéri alkalmazásokhoz képest. A kültéri környezet kedvezőbb gázdiszperziót biztosít, így kisebb a tartósan robbanásveszélyes légkör kialakulásának valószínűsége. A szimulációk során alkalmazott 67 kg töltetű ipari méretű berendezéseket modellezték, míg a gyakorlatban ezekben az ipari hőszivattyúkban 5–10 kg propán töltet jellemző.

Ennek ellenére, amennyiben mégis nagy teljesítményű hőszivattyúk (pl. 1 MW hűtő/fűtő teljesítmény) telepítése szükséges, mérnöki szempontból javasolt több kisebb teljesítményű berendezés betervezése egyetlen nagy helyett. Ez egyrészt tűzvédelmi előnyöket jelent, másrészt gépészeti szempontból is előnyös, mivel egy gép kiesése esetén a rendszer képes marad a részleges ellátásra.

A szimulációk a legrosszabb forgatókönyvet modellezték, amely során teljes csőkeresztmetszetű kiáramlás történt. Valós körülmények között azonban ekkora mértékű szivárgás csak akkor alakulhat ki, ha a hűtőközeget szállító rézcső külső mechanikai sérülést szenved. Ennek elkerülésére megoldás a hőszivattyúk teljes körbekerítése, korlátozott hozzáféréssel. Így a valószínűbb kisebb szivárgások a szabadban gyorsan szétoszlanak, csökkentve a robbanásveszélyt. A szimulációkból az is látható volt, hogy robbanás esetén még ebben a legrosszabb esetben sem fog az épületben maradandó kárt tenni a kialakult lökéshullám, így a berendezések környezetében lévő épületszerkezetek kiválasztásánál nem szükséges figyelembe venni a robbanásveszélyt.

A kültéri elhelyezésű hőszivattyúk esetében javasolt olyan védőtávolságok meghatározása, amelyek a berendezésekben található hűtőközeg töltetűmérethez arányosan igazodnak. Ezeket a távolságokat célszerű lenne tűzvédelmi műszaki irányelvben rögzíteni, hogy egységes követelményrendszer álljon rendelkezésre a tervezők számára. Ezzel elkerülhető lenne, hogy a hőszivattyú-gyártók eltérő ajánlásai miatt a tervezési gyakorlatban bizonytalanság alakuljon ki.

Az ipari hőszivattyúk telepítési helye lehet tetőn vagy épület mellett, amelyet az épület adottságai és a telek elrendezése határoz meg.

5.1.1 *Épület melletti elhelyezés*

A robbanás szimulációk eredményei alapján megállapítható, hogy a zsúfolt környezet (congested) jelentősen fokozza a robbanási kockázatot. Ezért a hőszivattyúk környezetében kerülni kell a sűrű szerelvényelhelyezést, nagyméretű szerkezetek telepítését, és szabad légteret kell biztosítani a berendezések körül.

Fontos, hogy a hőszivattyút ne mélyedésbe telepítsék, mivel a propán – a levegőnél nehezebb gáz lévén – a talaj közelében gyűlhet össze, növelve a gyújtási kockázatot.

Amennyiben a telepítési hely miatt nem lehetséges az épülettől megfelelő távolság tartása, az alábbi kiegészítő védelmi intézkedések szükségesek:

- A hőszivattyú közvetlen közelében az épület homlokzati falazatát tűzfalként kell kialakítani, gátolva a homlokzati tűzterjedést.
- A hőszivattyú függőleges vetületében nyílászáró ne legyen a homlokzati falon.
- A hűtő- vagy fűtővizet szállító csővezetékek átvezetéseinél tűzgátló lezárás alkalmazása indokolt.

Ha több ipari hőszivattyút telepítenek egymás mellé, szükség lehet közöttük tűzálló védőfal kialakítására annak érdekében, hogy egy esetleges tűz vagy robbanás ne terjedhessen át a szomszédos berendezésekre.

5.1.2 *Tetőn való elhelyezés*

Amennyiben a hőszivattyúk tetőre kerülnek, az alábbi szempontokat szükséges figyelembe venni:

- A hőszivattyúk alatt elhelyezkedő tetőburkolat legyen tűzálló, hogy egy esetleges tűz ne terjedjen tovább az épület tetőszerkezetén keresztül.
- A telepítés során figyelembe kell venni a tetőn elhelyezett egyéb elektromos berendezéseket (pl. légkezelők, ventilátorok, napelemek), és biztosítani kell, hogy ne alakulhasson ki olyan helyzet, amely szikraképződéshez vagy hősugárzással történő gyújtáshoz vezethet.

A tetőn történő telepítés általában kedvezőbb, mivel nyílt térben könnyebb biztosítani a hűtőközeg gyors diszperzióját, ugyanakkor fokozott figyelmet kell fordítani a tető és a környező szerkezetek tűzvédelmi szempontú kialakítására.

5.2 *Beltéri elhelyezés*

A beltéri telepítés esetén a propánnal üzemelő hőszivattyús rendszerek fokozott tűzvédelmi kockázatot jelentenek, mivel a zárt térben kiszabaduló hűtőközeg felhalmozódhat és gyújtásra alkalmas koncentrációt érhet el. A MSZ EN 378 és IEC 60335-2-40 szabványok előírásai szerint lakossági alkalmazásokban a beltéri töltetmég legfeljebb 988 gramm lehet, míg az ipari szegmensben ennél magasabb értékek is előfordulhatnak. A korábban bemutatott, ábrával is szemléltetett biztonsági zónák szerinti helyiségbesorolás hasznos támpontot adhat a megfelelő tűzvédelmi és műszaki megoldások kiválasztásához.

5.2.1 *Lakossági alkalmazások*

Lakossági szinten jellemzően levegő-levegő rendszerű split hőszivattyúk (klímaberendezések) telepítése történik, amelyeknél a beltéri egységben vagy a csatlakozó hűtőközegvezetékekben fordulhat elő szivárgás. A számítások és az elkészített zónaábrák alapján megállapítható, hogy a beltéri egység telepítési magassága jelentős hatással van a szivárgás veszélyességére.

Magasabb telepítési pont – például magasoldalfali vagy mennyezeti beltéri egység – esetén a beltéri térfogat nagyobb része áll rendelkezésre a szivárgó gáz hígulására, így a robbanásveszélyes koncentráció kialakulásának esélye csökken. Ezzel szemben a parapetes beltéri egységek – amelyek a padló közelében helyezkednek el – fokozott kockázatot jelentenek, mivel a propán, mint a levegőnél nehezebb gáz, a padlószint közelében halmozódhat fel.

A mesterséges szellőztetés kialakítása lakossági szinten költséges és műszaki szempontból is nehezen indokolható lenne kis töltetmégű rendszerek esetén. Ezért itt a természetes szellőztetés biztosítása mellett, hűtőközeg-érzékelők telepítése javasolt, elsősorban padlószinten, nem pedig kizárólag a beltéri egység közvetlen közelében. Ennek oka, hogy a szivárgás nemcsak a beltéri egységből, hanem a csővezetékek bármely pontjáról is eredhet, így a gáz a padló közelében gyűlik össze először.

5.2.2 *Ipari alkalmazások*

Ipari környezetben – például gépházakban – a víz-víz rendszerű hőszivattyúk telepítése jellemző, amelyek szintén a padlóra kerülnek. Ezeknél a rendszereknél a hűtőközeg-töltet jelentősen meghaladhatja a lakossági értékeket, így nagyobb mennyiségű propán szabadulhat ki szivárgás esetén.

Az ilyen gépházakban indokolt lehet mesterséges szellőztetés kiépítése, különös tekintettel az alsó elszívás alkalmazására, amely közvetlenül a padló szintjén képes eltávolítani a leülepedő propánt, még azelőtt, hogy veszélyes koncentráció alakulna ki.

Emellett, ahol jelentős töltetösseggel rendelkező berendezések találhatók, javasolt a gépház tűzgátló épületszerkezetekkel (tűzgátló födém, tűzgátló fal) történő leválasztása az épület többi részéről. Ez az eljárás hasonló a 200 kW feletti teljesítményű kazánházakra előírt tűzvédelmi követelményekhez az OTSZ szerint. Ezzel a módszerrel minimalizálható egy esetleges tűz áterjedése az épület többi területére.

6 HIVATKOZÁSOK

AIR CONDITIONING AND REFRIGERATION EUROPEAN ASSOCIATION (AREA) [2019] Introduction to Refrigeration Standard EN 378, https://area-eur.be/sites/default/files/2019-07/AREA%20Introduction%20to%20EN%20378%20-%20for%20Publication_0.pdf, kulcsszavak: EN 378, flammable refrigerants, heat pumps, letöltés időpontja: 2025.03.30.

ALOHA [2013] Technical Documentation, National Oceanic and Atmospheric Administration, Seattle

BÁLINT B. [2024] Gyúlékony hűtőközeggel működő hőszivattyúk kültéri telepítésének feltételei, APPLiA Magyarország Egyesülés

BITZER [2023] Refrigerant Report – Quick Guide, BITZER Kühlmaschinenbau GmbH, Sindelfingen

CARAMASCHI M., MELJAC L., POPPI S., ØSTERGAARD K., KÆRN M., OMMEN T., ELMGAARD B. [2022] Low Flammability Limit of Mixtures of Natural Refrigerants: Standards vs Theory. In Proceedings of ECOS 2022 -The 35th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems 2022 ECOS.

CHEEKATAMARLA P., SHARMA V. [2024] Mitigation of safety and environmental challenges posed by refrigerants <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024006364?via%3Dihub> kereső: www.sciencedirect.com, kulcsszavak: A2L, A3, Flammable refrigerants, Leak, HVACR, letöltés időpontja: 2025.04.02.

DAIKIN [2025] Split Residential air to air solutions. Céges Katalógus. Daikin Europe N.V.

JUHÁSZ L., MAIYALEH T., VADÁSZ J., VASÁROS Z. [2020] Gyakorlati hűtéstéchnikai ismeretek, Nemzeti Klímavédelmi Hatóság, Budapest

LOÓS Z. [2022] A veszélyes anyagokkal kapcsolatos súlyos balesetek elleni védekezés hazai szabályozási rendszere, és az ehhez kapcsolódó kockázatelemzési mérnöki módszerek, Fővárosi Katasztrófavédelmi Igazgatóság, Budapest

PANASONIC [2024] Az új F-gáz rendelet - az alacsonyabb GWP értékű hűtőközegek felé való elmozdulás a Panasonic fűtési és hűtési megoldásaival, internet-közlemény, https://www.aircon.panasonic.eu/HU_hu/blog/the-new-f-gas-regulation-moving-towards-lower-gwp-refrigerants-with-panasonic-heating-and-cooling-solutions/ kereső: google.hu, kulcsszavak: F-gáz rendelet, GWP, letöltés ideje: 2025.04.16.

PIBLINGER T. [2023] MSZ EN 378 szabvány biztonságtechnikai előírása A2L hűtőközegek esetén, Magyar Mérnöki Kamara, Budapest, https://bpmkkepzések.hu/images/Piblinger_Tibor_BPMK_2023_04_26_A2L_el%C5%91ad%C3%A1s.pdf kereső: www.google.hu, kulcsszavak: EN 378, A2L, hűtőközeg, letöltés időpontja: 2025.03.30.

RABI ZS. [2017] Hűtő-, klíma- és hőszivattyú-berendezés-szerelő mestervizsgára felkészítő jegyzet, Magyar Kereskedelmi és Iparkamara, Budapest

REN J., BARTA R. B., LADD D., ZIVIANI D., GROLL E. A. [2021] Investigation of a Novel Ejector – Based R-290 Refrigeration Cycle Architecture https://www.researchgate.net/publication/352135248_Investigation_of_a_Novel_Ejector_-_Based_R-290_Refrigeration_Cycle_Architecture_Student_Member_ASHRAE_Student_Member_ASHRAE_Project_Sponsor kereső: <https://www.researchgate.net/>, kulcsszavak: R-290, Cycle architecture, letöltés időpontja: 2025.03.27.

RESTÁS Á. [2014] Égés és tűzoltás elmélet, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Katasztrófavédelmi Intézet, Budapest

SKADEC [2023] Product Overview. Céges Katalógus. SKADEC GmbH

WEI M., DING C., ROSENQUIST G., COUGHLIN K., CUBERO E., BURKE T., ABDELAZIZ O. [2024] Benefits and challenges in deployment of low global warming potential R290 refrigerant for room air conditioning equipment in California <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138824003333?via%3Dihub> kereső: www.sciencedirect.com, kulcsszavak: Low GWP refrigerants, A3 refrigerants, R290 refrigerant, Room air conditioning, Climate-friendly air conditioning, letöltés időpontja: 2025.04.01.

YELLOW BOOK [2005] CPR14E Methods for the calculation of physical effects,
Committee for the Prevention of Disasters, Hága

ZHANG Y., JIN W., JIA L. [2015] Analysis of Indoor Environment Safety with R32
Leaking From a Running Air Conditioner
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705815030180> kereső:
www.sciencedirect.com, kulcsszavak: R32, leak, diffusion, security, exhaust, letöltés
időpontja: 2025.04.02.