

Mellékletek

1. Iratmelléklet

- 1.1. Jogosultságot igazoló okirat
- 1.2. Meghatalmazás
- 1.3. Tulajdoni lap
- 1.4. Oldószermérlegek
- 1.5. Nyilatkozat a szürkevíz előkezelést követő minőségéről
- 1.6. A hűtőtornyok szürkevízzel történő ellátása során várható páraképződés hatásainak vizsgálata**
- 1.7. Zajmérési jegyzőkönyv
- 1.8. Elvi hulladékbefogadói nyilatkozatok
- 1.9. Csapadékvíz befogadói nyilatkozat
- 1.10. Vízforgalmi ábra
- 1.11. Hulladék üzemi gyűjtőhelyek üzemeltetési szabályzata
- 1.12. Hulladék tároló terület üzemeltetési szabályzata
- 1.13. Havária terv
- 1.14. Az eljárási illeték utalására vonatkozó igazolás
- 1.15. Hulladékgazdálkodási engedélykérelemhez kapcsolódó nyilatkozatok
- 1.16. Biztosítási kötvény és bankgarancia igazolás
- 1.17. Környezetvédelmi megbízottra vonatkozó dokumentumok
- 1.18. Köztartozásmentes adózói adatbázisban való regisztráció igazolása
- 1.19. Biztonsági adatlapok
- 1.20. Szennyvízkibocsátáshoz kapcsolódó kockázateértékelés
- 1.21. Közmű rendelkezésre állási nyilatkozat
- 1.22. A szennyvíztisztító technológia blokkdiagramja
- 1.23. Alapállapot jelentés
- 1.24. Imissziós koncentrációk a védendőkhöz vonatkozásában az üzemelés alatt

2. Térképi melléklet

- 2.1. Átnézeti helyszínrajz (Google Earth)
- 2.2. Részletes helyszínrajz
- 2.3. Közműhelyszínrajz
- 2.4. A kármentő, illetve a felszín alatti víz és a földtani közeg szennyeződését megakadályozó rétegrendek elhelyezkedése
- 2.5. A tervezett épületek alaprajzai
- 2.6. A kivitelezés levegőtisztaság-védelmi hatásterületei
- 2.7. Az üzemelés levegőtisztaság-védelmi hatásterületei
- 2.8. Kibocsátó források és monitoring pontok térképi megjelenítése
- 2.9. Hulladék gyűjtőhelyek elhelyezkedése
- 2.10. Zajvédelmi számítások térképi megjelenítése
- 2.11. A létesítmény hatásterületeinek térképi megjelenítése
- 2.12. A kivitelezés zajvédelmi hatásterülete
- 2.13. Az üzemelés zajvédelmi hatásterülete

SZAKÉRTŐI TANULMÁNY

Terv megnevezése:

HUNGARY SUNWODA AUTOMOTIVE ENERGY TECHNOLOGY Kft.

Hűtőtornyokból elpárolgó víz hatásának vizsgálata

Készítette:

S&G Solution Kft
3508 Miskolc, Haladás utca 5.
www.sg-solution.hu
info@sg-solution.hu

Szűcs Renáta
ügyvezető



Fodor Béla
3529 Miskolc, Derkovits Gyula utca 48. 2/4.



Készült: Miskolc, 2025.06.20.

A tanulmány teljes tartalma szerzői jogvédelem alatt áll. Bármely részének másolása, terjesztése vagy bármilyen módon történő felhasználása kizárólag a szerző előzetes engedélyével lehetséges a hatályos magyar szerzői jogi törvény (1999. évi LXXVI. törvény) alapján.

Tartalom

Bevezetés	4
Kiinduló alapadatok	4
Környezeti jellemzők	7
Vízpára „felhőképződés” alapjai	8
Lokális pontkibocsátás hatása.....	12
Szél hatása	12
Telítési jellemzők összesítse	13
Elpárolgási modellek és szimuláció.....	15
Szimulációs környezet részletes bemutatása.....	15
A nedves hűtőtornyok elpárolgási folyamatai	16
Párolgási modellek szimulációja	16
ANSYS Fluent multiphase modellek	16
Species Transport modell az ANSYS Fluent szimulációban	17
Nedves hőcserélőből távozó vízpára összehasonlítása tavak párolgásával	18
Meteorológiai háttér és évszakos viszonyok Magyarországon	18
Éves vízpára-kibocsátás és párolgás	19
Környező természetes tavak jellemzői	21
Bujtosi-tavak	21
Sóstói-tó	21
Szelkő-tó.....	22
Keleti V-2 víztározó	22
Szakirodalmi hatásvizsgálat eredménye	22
Hatásterület fizikai igazolása:.....	22
Szélhatás szerepe:	22
Évszakonként jellemző mikroklimatikus hatások.....	22
Relatív páratartalom hígulása és diszperzió	24
Numerikus modelljellemzők	27
Geometria és számítási tartomány	28
Eredmények értékelése	31
Ábramagyarázat – Vizsgált koordináta-síkok	32
Sebességeloszlás $\alpha = 160^\circ$	34
Nyomáseloszlás $\alpha = 160^\circ$	36
Hőmérsékleteloszlás $\alpha = 160^\circ$	37
Relatív páratartalom $\alpha = 160^\circ$	38
Relatív páratartalom és sebességeloszlás $\alpha = 160^\circ$	39
Sebességeloszlás $\alpha = 90^\circ$	40
Nyomáseloszlás $\alpha = 90^\circ$	41
Hőmérsékleteloszlás $\alpha = 90^\circ$	42

Relatív páratartalom $\alpha = 90^\circ$	43
Relatív páratartalom és sebességeloszlás $\alpha = 90^\circ$	45
Összefoglalás.....	47

Bevezetés

A hűtőtornyok jelentős vízmennyiség elpárologtatásával és meleg, páradús levegő kibocsátásával közvetlen hatást gyakorolhatnak környezetük mikroklímájára. A hatások főként a következőkben jelentkeznek:

- **Hőmérséklet-emelkedés:** A párolgás során felszabaduló látens hő képes enyhe, de lokális léghőmérséklet-emelkedést okozni.
- **Relatív páratartalom növekedése:** A vízgőz dúsítja a levegőt, elősegítheti a ködképződést, télen a dér vagy zúzmara kialakulását.
- **Kondenzáció és csapadék:** A felszálló pára lehűlés során kondenzálódhat, ködöt vagy mikrocsepkeket is eredményezhet.
- **Lefagyás és csúszásveszély:** Télen a torony körüli felületeken jégréteg képződhet.

A mikroklimatikus hatások mértéke függ az elpárologtatott vízmennyiségtől, a légköri feltételektől, a ventilátor által szállított levegő mennyiségétől, valamint a környezet topográfiájától.

A jelen tanulmány célja a HUNGARY SUNWODA AUTOMOTIVE ENERGY TECHNOLOGY Kft. tervezett fejlesztési területén elhelyezésre kerülő kültéri, szabadon álló Baltimore AirCoil (BAC) típusú hűtőtornyok aerodinamikai és paradiffúziós jellegzetességeinek részletes numerikus vizsgálata. Kiemelt figyelmet fordítunk a légáramlás által kialakított szélterhelésre, valamint a hűtőtornyon keresztül kilépő vízpára mennyiségének és térbeli eloszlásának megbízható modellezésére. A numerikus szimuláció felépítése során törekedtünk arra, hogy a lehető leggyorsabban, ugyanakkor nagy pontossággal határozzuk meg a párafázis viselkedését, különös tekintettel a környezetbe jutó vízmennyiség időbeli és térbeli dinamikájára.

A vizsgálat során összesen 14 külön-külön definiált pontforrásból indítottuk ki a vízpára-kibocsátást, melyeket a környező épületek által keltett turbulenciahatások is befolyásolnak. A telephely határain áthaladó vízgőz- és vízpáradisziperzió követése azért alapvető fontosságú, mert ez közvetlenül befolyásolja a környezeti nedvességszint alakulását és a helyszín mikroklímáját.

A modell egyik legnagyobb kihívását az jelenti, hogy a hűtőtorny környezetének lefedettsége több ezer négyzetméteres területet ölel fel. Ez a nagy kiterjedésű számítási tartomány a numerikus konvergencia szempontjából nehezíti a feladatot, különösen az elpárologtató modellek esetében, amelyek lassú, fokozatosan javuló közelítésekkel szolgálnak. A pontos eredmények elérése érdekében gondos összehangolásra került sor az eltérő méretek és skálák kezelése miatt.

A szimuláció bemeneti adataiként a hőcserélő gyártói specifikációit használtuk, amelyek részletesen tartalmazzák a BAC torony jellemző hő- és tömegátadási paramétereit. A meteorológiai körülményeket a megrendelő által rendelkezésünkre bocsátott, 2021-es adatokkal frissített surface_MET2222004_AERMET_2021-2021.xls állomány biztosította, amely az aktualizált felszíni hőmérséklet- és páratartalom-értékeken túl a szélerősség és irány adatait is tartalmazza.

Ebben a munkában kizárólag a környezeti terhelésre koncentráltunk; ezért nem foglalkoztunk a hűtőtorny belső légáramlási viszonyainak részletes elemzésével. Ezek a belső folyamatok ugyanis egy sokkal komplexebb, többfázisú és proaktív áramlástan megközelítést igényelnének, amely meghaladja jelen tanulmány kereteit. Ehelyett a külső környezetbe jutó párafázis viselkedésére és hatótávolságára fókuszáltunk, olyan módszereket alkalmazva, amelyek a gyakorlatban is használható előrejelzéseket tesznek lehetővé.

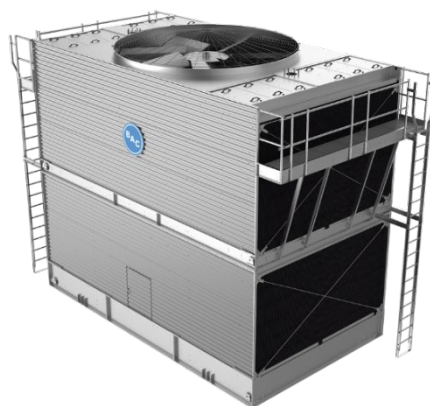
Kiinduló alapadatok

A tanulmány keretében vizsgált, közel egy négyzetkilométer alapterületű területet különböző épített szerkezetek és épületek tagolják. Ezen épületek hosszanti tengelye egyértelműen észak–déli irányban fut, és egymáshoz viszonyítva párhuzamos elrendezésben helyezkednek el szabályos vonalban dél és észak tengely mentén. Az egyes épületek közvetlen környezetében különösen a nyugati oldalon található a legközelebbi telekhatár, amely csupán néhány méterre húzódik az

épülettömbök peremétől, így a telekhatár és az épületek falai közötti távolság minimális. Ezzel szemben az épületek másik, keleti irányú oldalán – közvetlen közelükben – helyezkednek el azok a hűtőtornyok, amelyek a jelen vizsgálat fő tárgyát képezik, és melyek működésének környezeti hatásait kívánjuk tanulmányozni. A keleti telekhatár a hőcserélők szempontjából távol található.

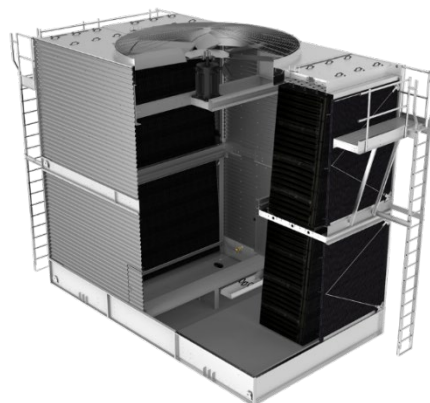
Két azonos típusú azonban különböző üzemi jellemzőkkel működő BAC hűtőtornyok kibocsátási adatait vesszük figyelembe. Az 1. táblázat egy kisebb kibocsátású a 2. táblázat a nagyobb kibocsátású üzemi jellemzőket foglalja össze. Mindkét esetben a berendezést vizsgálat szempontjából fontos jellemzőit foglaltuk össze. A nedves hőcserélő működéséből adódóan a kondenzáció során konvekcióval a levegőbe jutó vízpára okozza a vizsgált tárgyat képező terhelést.

XES3E1222-07MAH	
Mennyiség	2 db
Max. elpárolgatás	1,246 liter/s
Légáram	57,3 m ³ /s
Ventilátor fordulatszám	1500 RPM
Belépő nedves hőmérséklet	25 °C
Belépő száraz hőmérséklet	36 °C
Max. áramlási sebesség	98,1 liter/sec
Belépő oldali közeghőmérséklet	39 °C
Kilép oldali közeghőmérséklet	31 °C
Üzem mód	Nedves
Összes elpárolgás	2,492 liter/s



1. táblázat: XES3E 1222-07M/AH típusú hűtőtorny¹

S3E1222-14QV	
Mennyiség	12 db
Max. elpárolgatás	2,264 liter/s
Légáram	107,8 m ³ /s
Ventilátor fordulatszám	1500 RPM
Belépő nedves hőmérséklet	25 °C
Belépő száraz hőmérséklet	36 °C
Max. áramlási sebesség	257,12 liter/sec
Belépő oldali közeghőmérséklet	37,2 °C
Kilép oldali közeghőmérséklet	31,8 °C
Üzem mód	Nedves
Összes elpárolgás	27,168 liter/s



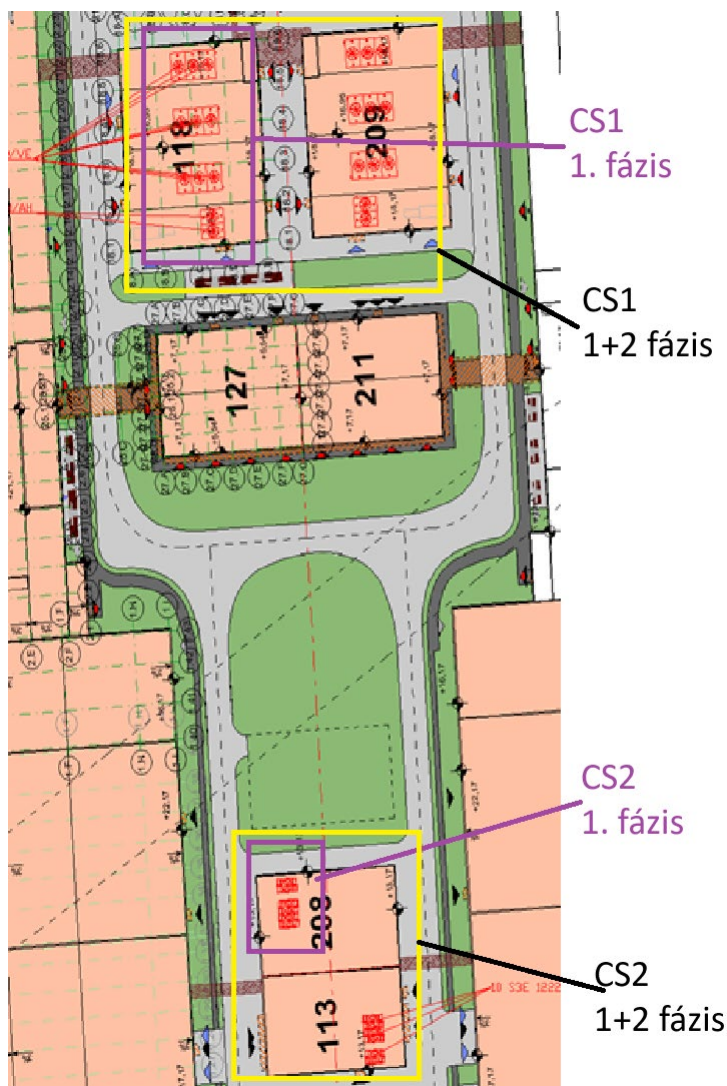
2. táblázat: S3E1222-14QV típusú hűtőtorny¹

Összes nedvesség kibocsátás maximális értékével (100%), valamint a gyártói adatszolgáltatás alapján a téli időszakban a tényleges kibocsátás a maximális értékhez igazodva ~60% -al számoltunk (gyártói adatszolgáltatás alapján).

A kibocsátási pontforrásokat 2 csoportra oszjuk, ezek CS1 és CS2 jelöléssel láttuk el, mivel térben egymástól nagyobb távolságra helyezkednek el (14. ábra). A CS1 csoport 9db S3E1222-14QV és 2db XES3E1222-07MAH, a CS2 csoport pedig 3db S3E1222-14QV hűtőtornyból állt

¹ Forrás: BAC Technical Datasheet <https://baltimoreaircoil.com/products/cooling-towers/series-3000-cooling-tower> 2025.06.19

fázisonként. A csoportokat 1-1 kibocsátási pontként vettük figyelembe. A II. ütem megvalósítása esetén a kibocsátott mennyiségeket duplán kell figyelembe venni, de a II. ütemnél kialakított kibocsátási pontok az I. ütem kibocsátási pontjaitól térben távolabb helyezkednek el, mindazonáltal a csoportbontás megegyezik az I. ütemével.



1. ábra: Hűtőtornyok elhelyezkedése

Éves üzemidő ²	312 nap
---------------------------	---------

I. ütem		100%	CS1 100%	CS2 100%	Össz 60%	CS1 60%	CS2 60%
Elpárolgás összesen	[liter/s]	29,66	22,87	6,79	17,80	13,72	4,08
Napi vízmennyiség	[m ³ /nap]	2563	1976	587	1538	1185	352
Éves vízpára	[m ³ /év]	799539	616448	183091	479723	369869	109854
Éves vízpára	[liter/hr]	106776	82325	24451	64066	49395	14671

3. táblázat: I. ütem vízpára kibocsátási adatok

² Beruházói adatszolgáltatás alapján

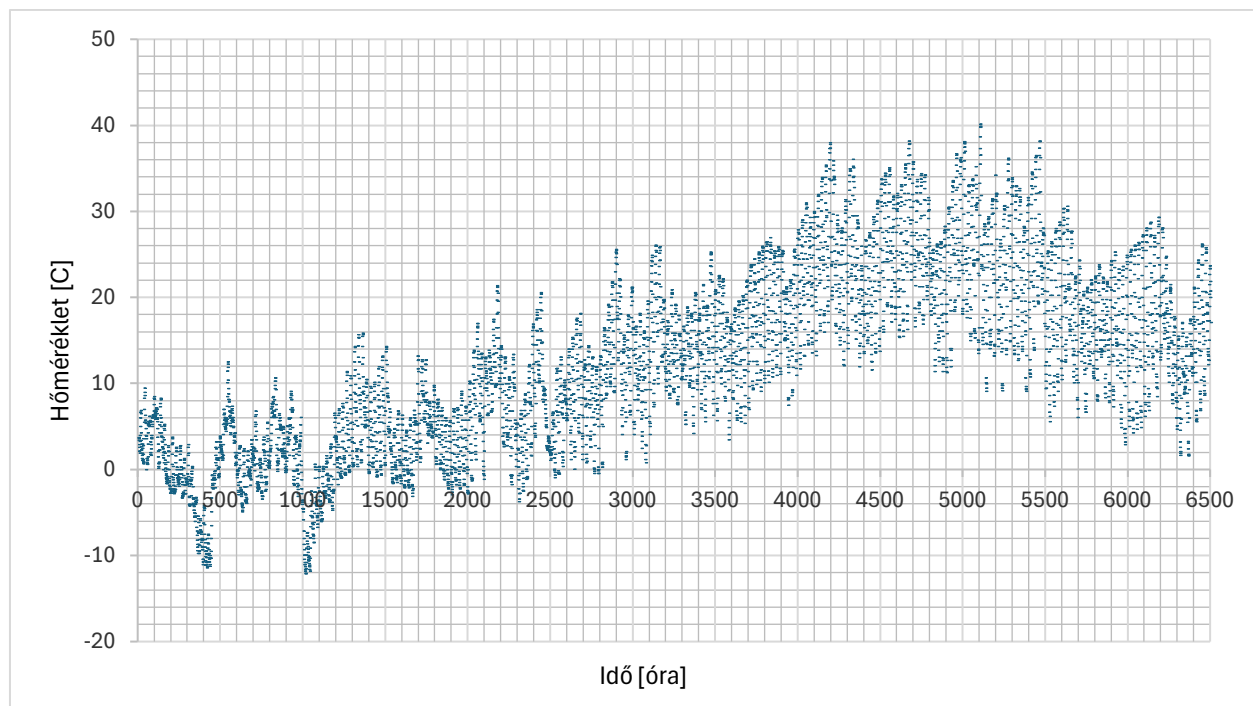
I. + II. ütem		100%	CS1 _{100%}	CS2 _{100%}	Össz _{60%}	CS1 _{60%}	CS2 _{60%}
Elpárolgás összesen [liter/s]		59,32	45,74	13,58	35,59	27,44	8,15
Napi vízmennyiség [m ³ /nap]		5125	3952	1174	3075	2371	704
Éves vízpára [m ³ /év]		1599077	1232896	366181	959446	739738	219709
Éves vízpára [liter/hr]		213552	164650	48902	128131	98790	29341

4. táblázat: I. és II. ütem együttes kibocsátott mennyiség

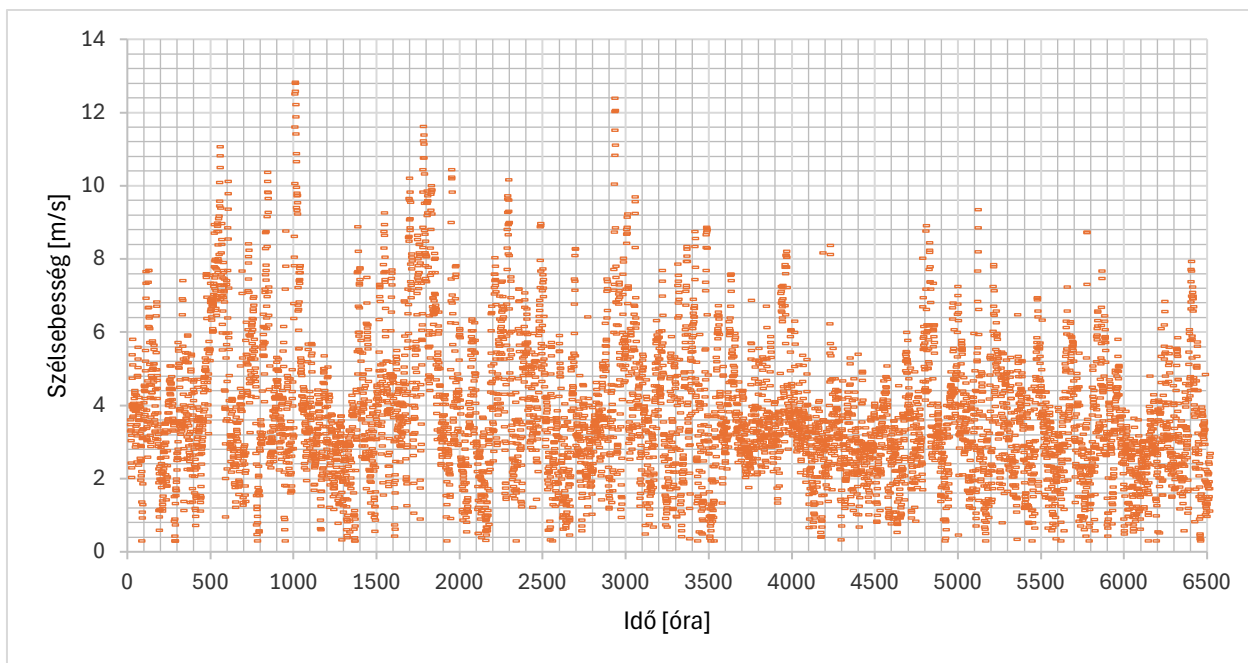
A szimuláció a gyártói adatszolgáltatás alapján a maximális nedvesség kibocsátásra került elvégzésre, azaz az elméleti legnagyobb mértékű vízkibocsátást figyelembe véve.

Környezeti jellemzők

A rendelkezésre álló meteorológiai adatok a 2021. év során mért, az adott vizsgálati szempontrendszerhez leginkább illeszkedő jellemzőket tartalmazzák: a szél irányát és sebességét, a légköri páratartalom százalékos értékét, valamint a külső hőmérséklet folyamatos, óránkénti méréseit. Ezek az adatok a surface_MET2222004_AERMET_2021-2021.xls nevű Excel formátumú adatállományban található meg, mely az egész évre kiterjedő, minden egyes órára vonatkozó meteorológiai paramétereket gyűjti össze, így lehetővé téve a légköri viszonyok precíz időbeli bontású elemzését a kutatás során. (2. ábra és 3. ábra)



2. ábra: Területi hőmérséklet adatok 2021 január 1. - 2021. december 31. között



3. ábra: Területi szélesebesség adatok 10 méter megasságban 2021 január 1. - 2021. december 31. között

A meteorológiai adatbázisból a legfontosabb adatokat a 5. táblázat foglaltuk össze, melyben feltüntetésre került a szimulációs vizsgálat során használt bemeneti feltételek.

	Szélsebesség [m/s]	Szélirány [°]	Hőmérséklet [°C]	Relatív páratartalom (RH) [%]
Átlagérték	3,7	160,0	10,7	69
Maximum érték	12,8	360,0	40,2	100
Minimum érték	0,3	0,1	-12,2	12
Vizsgálat során felhasznált érték	4,0	160	30	69

5. táblázat: Meteorológiai adatok átlagértékei

Az alkalmazott üzemi paraméterek megválasztásakor két, egymás kölcsönhatását jelentősen befolyásoló környezeti tényező került kiemelésre:

- **Szélsebesség:** Az óránkénti 4 m/s középhőmérsékletű szélsebesség a hűtőtornyok környezetében egyidejűleg növeli a harmatcseppek turbulens elszállítását és a vízgőz diffúziós terjedését nagyobb távolságra, ugyanakkor a kondenzációs esélyét is mérsékli. A közepes szélsebesség vonatkozásában a kondenzálódott cseppek nagyobb távolságokat tudnak megtenni, így a szennyezőanyagok diszperziója is fokozott [1] [2]
- **Külső hőmérséklet:** A nyári, 30 °C-os környezet fokozott párolgást eredményez, mivel a telítési gőznyomás exponenciálisan nő a hőmérséklettel [3], így a vízgőz nagyobb mennyiségű tartalékkal rendelkezik, mint hidegebb körülmények között. A nagyobb páratartalmi kapacitás késlelteti a lokális kondenzációt, miközben a gőzkibocsátás mértéke jelentősen emelkedik [4].

Összességében olyan átlagos paramétereket választottunk, amelyek az év jelentős részében a legvalószínűbb üzemállapotot modellezik.

Vízpára „felhőképződés” alapjai

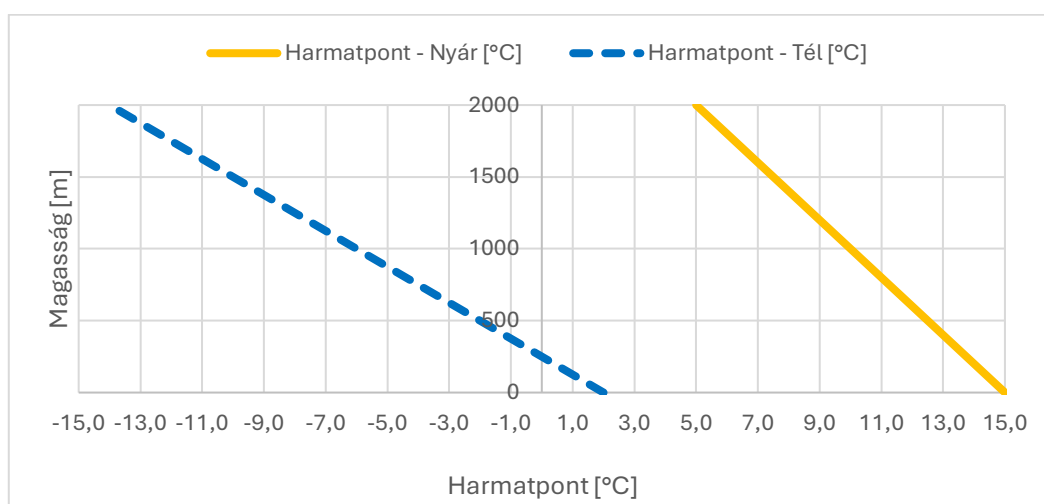
A vízfelületéről történő elpárolgás feltétele, hogy a víz felszíni hőmérséklete meghaladja a felette lévő levegőét, továbbá a levegő relatív páratartalma nem éri el a telítettséget, azaz még képes további vízgőzt felvenni, és elegendő légmozgás legyen jelen a telített határréteg eltávolításához.

E folyamat a víz–levegő fázishatáron keresztül létrejövő hő- és tömegátadási jelenségeken alapul, melyek egyik legrégebbi matematikai leírása a Dalton-egyenleten alapuló aerodinamika módszer. Ebben a megközelítésben a párolgás sebessége arányos a vízfelszín telítési gőznyomása (e_s) és a levegő tényleges gőznyomása (e_{act}) közötti különbséggel, valamint a konvektív tényezőkkel, mint a szélesebbesség (u) és a hőmérséklet, az alábbi alakban:

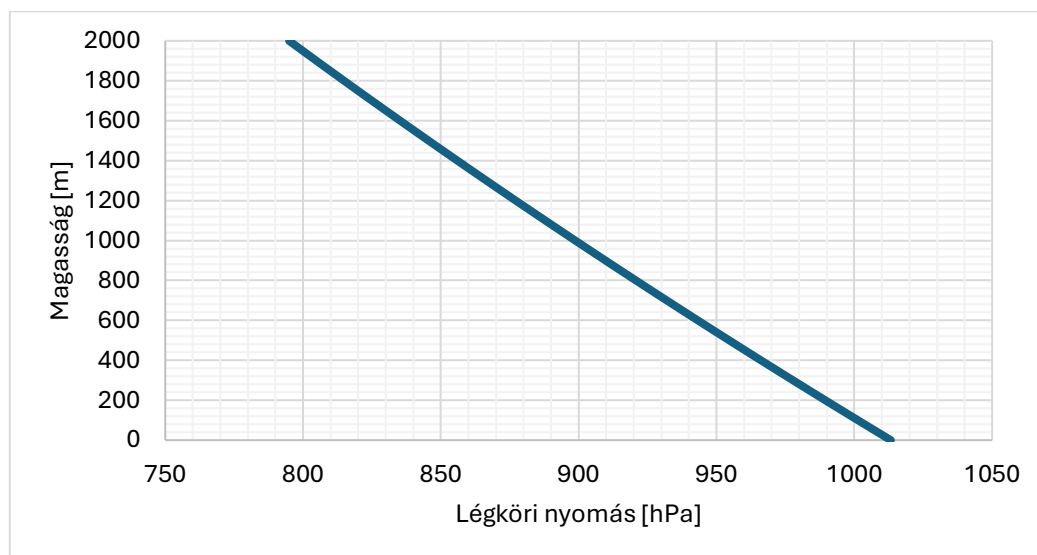
$$E = C_m \cdot u \cdot (e_{sat} - e_{act}) \quad [kg/(m^2 \cdot s)]$$

ahol E [$g/(m^2 \cdot s)$] a párolgási tömegáram, C_m [$kg/(Pa \cdot m^2 \cdot s)$] a tömegátadási együttható. Ez az összefüggés a vízgőzmomentumot adja meg a víz–levegő felületen, lehetővé téve a párolgás mennyiségének becslését a légkörbe juttatott tömeg révén [5] [6].

Miután a vízgőz elhagyja a tó felszínét, konvekció révén emelkedik tovább, különösen, ha hőmérséklete meghaladja a környező levegőét. Emelkedés közben az adiabatikus hűlés hatására csökken a gőz hőmérséklete a magasság növekedésével, mígnem eléri a telítettségi pontot. Ekkor a gőz kondenzálódni kezd, hiszen a levegő már nem képes további vízgőzt felvenni. A telítettségi állapot függ a nyomástól és a hőmérséklettől, amelyek változása meghatározza azt a magasságot, ahol a kondenzáció megindulhat. [7]



4. ábra: Harmatpont alakulása a magasság függvényében³



5. ábra: Légköri nyomás alakulása a magasság függvényében

³ Forrás: ICAO standard légköri modell 2025.06.18.

A relatív páratartalom a **hőmérséklet és harmatpont** ismeretében közelíthető a Magnus formulával.

$$RH = 100 \cdot \frac{e_{act}}{e_{sat}}$$

ahol:

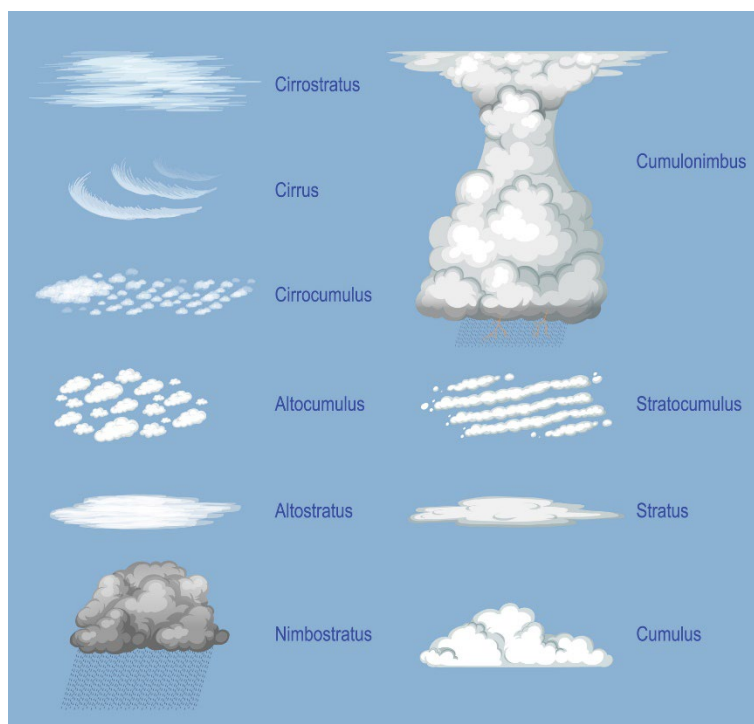
- e_{sat} : **maximálisan lehetséges** vízgőznyomás adott hőmérsékleten (telítési állapot) [Pa]
- e_{act} : **valóságban jelenlévő** vízgőz nyomása [Pa]

A harmatpont elérésekor a levegő nem képes több vízgőzt megtartani, ekkor a vízgőz kondenzálódik, apró vízcseppekké alakul, amelyek kolloid szuszpenziót alkotnak a levegőben, ez a felhőképződés fizikai lényege.

A felhőképződéshez úgynevezett "kondenzációs magvak" szükségesek. A kondenzációhoz a vízmolekuláknak valamilyen szilárd vagy aeroszol részecskéhez kell kapcsolódniuk. A nedves levegő is meg tud fagyni, és a fagyott vízrészecskék (jégkristályok) lehetnek kondenzációs vagy pontosabban fagyponthoz magvak, azonban a jégkristály-képződéshez is szükség van „magvakra”, melyeken megindul a szublimáció (vígőz → jég). A jégképződés „magvai” lehetnek por, pollen, sókristályok vagy más aeroszol részecskék esetleg szál által odaszállított jégkristályok. Ezek nélkül a kondenzáció szuperszaturált állapotban késleltetett lehet.

A vízpára túlhűlt állapotban is fennmaradhat (pl. -10 °C-ig cseppként), de ha jégmag jelen van, akkor a vízgőz közvetlenül jéggé alakulhat (szublimáció), és ez újabb jégkristályokat eredményez.[8], [9]

A légkör stabilitása, nedvességtartalma és hőmérsékleti profilja mind befolyásolja, ha az alsó rétegek instabilak, könnyebben kialakulnak gomoly (cumulus) típusú felhők, stabil rétegek esetén inkább rétegfelhő (stratus) képződik, amely elnyúlik vízszintesen.



6. ábra: Felhőfajták⁴

A relatív páratartalom (RH) a lokális (pl. tengerpart, sivatag, erdő), az időjárásfüggő (pl. frontok, ciklonok), éghajlatfüggő (trópus vs. sarkvidék), és napszaktól is függ.

⁴ Forrás: Felhőfajták, 2025.06.18. <https://foldjaro.hu/felho-kisokos/#&gid=1&pid=2>



Összegezve elmondható, hogy egy nedves (WET) párolgás során felhő akkor keletkezik, amikor a víz felszínéről elpárolgó vízgőzt tartalmazó levegő felemelkedik, lehűl, és eléri a telítettségi állapotot – vagyis a harmatpontot –, ekkor a vízgőz kondenzálódik a levegőben lebegő kondenzációs magvakra, és felhőképződés indul meg. A folyamat kulcs-eleme „kondenzációs magvak” jelenléte a párolgás, a levegő lehülése és a relatív páratartalom 100% elérése.

Az alábbi táblázatban látható, hogy különböző relatív páratartalom (RH) értékek esetén mekkora vízgőz tömeg szükséges még 1 m^3 levegőhöz ahhoz, hogy a telítettségi állapot ($\text{RH} = 100\%$) bekövetkezzen, és a felhőképződés megindulhasson 0°C és 30°C környezetben: **RH = 69% esetén 0°C esetén és 30°C esetén $9,418 \text{ g/m}^3$ vízgőz szükséges.**

RH kez- deti [%]	$e_{\text{sat.}30^\circ\text{C}}$	$e_{\text{act.}30^\circ\text{C}}$	$\Delta e_{30^\circ\text{C}}$	Szükséges vízgőz tö- meg 30°C		Száras levegő parciális nyomása 30°C [Pa]
	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[g/m ³]	[kg/m ³]	
10%	4237	423,7	3813,0	27,25	0,0273	100901
20%	4237	847,3	3389,3	24,23	0,0242	100478
30%	4237	1271,0	2965,7	21,20	0,0212	100054
40%	4237	1694,7	2542,0	18,17	0,0182	99630
50%	4237	2118,3	2118,3	15,14	0,0151	99207
60%	4237	2542,0	1694,7	12,11	0,0121	98783
69%	4237	2919,1	1317,6	9,42	0,0094	98406
70%	4237	2965,7	1271,0	9,08	0,0091	98359
80%	4237	3389,3	847,3	6,06	0,0061	97936
90%	4237	3813,0	423,7	3,03	0,0030	97512

6. táblázat: a csapadékképződéshez szükséges vízgőz tömege 1 m^3 -re számítva 30°C -on

RH kez- deti [%]	$e_{\text{sat.}0^\circ\text{C}}$	$e_{\text{act.}0^\circ\text{C}}$	$\Delta e_{0^\circ\text{C}}$	Szükséges vízgőz tömeg 0°C		Száras levegő parci- ális nyomása 0°C [Pa]
	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[g/m ³]	[kg/m ³]	
10%	611	61,1	549,8	4,36	0,0044	101264
20%	611	122,2	488,8	3,88	0,0039	101203
30%	611	183,3	427,7	3,39	0,0034	101142
40%	611	244,4	366,6	2,91	0,0029	101081
50%	611	305,5	305,5	2,42	0,0024	101020
60%	611	366,6	244,4	1,94	0,0019	100958
69%	611	420,9	190,0	1,51	0,0015	100904
70%	611	427,7	183,3	1,45	0,0015	100897
80%	611	488,8	122,2	0,97	0,0010	100836
90%	611	549,8	61,1	0,48	0,0005	100775

7. táblázat: a csapadékképződéshez szükséges vízgőz tömege 1 m^3 -re számítva 0°C -on

ahol:

- Δe : a hiányzó gőznyomás [Pa]
- V: levegő térfogata (1 m^3)

Lokális pontkibocsátás hatása

A párakicsapódás elvei alapján jól látható, hogy egy igen komplex és sok bizonytalan paraméter alapján lehet becsülni azt, hogy esetleges vízkibocsátás történjen a környezetben.



Minél alacsonyabb az RH, annál **több vízgőz szükséges** a telítettséghez, és **kevesebb levegő térfogatot lehet telíteni** vele.

A vizsgálat során figyelembe vett maximális térfogatáram $Q_{\max(100\%)} = 29,66$ liter/s illetve télen $Q_{\text{tél}(60\%)} = 17,80$ liter/s

$$\text{Telíthető térfogat [m}^3/\text{s]} = \frac{\text{vízpára tömege [kg/s]}}{\text{szükséges vízpára [kg/m}^3\text{]}}$$

A páratartalom növekedésével a levegő már "majdnem telített" tehát kevesebb vízgőz hiányzik belőle! Tehát: 1 köbméter levegőhöz kevesebb vízpárát kell hozzáadni. Ahogy nő az RH, a levegő egyre "telítettebb", így egyre kevesebb vízgőz kell ahhoz, hogy elérje a telítettségi határt (RH = 100%).

Ezért ugyanakkora vízpárával több köbméter levegőt tudunk telíteni.

Egy WET modell (pl. ANSYS Fluent vagy más CFD szimuláció) alapján, ha felhőképződést vagy kondenzációt jelentősen függ a páratartalom alakulásától.

1. Ha $RH < 100\%$:

- Nem történik kondenzáció.
- Ha nagyon alacsony (pl. $RH < 60\%$), akkor kicsi az esély, hogy még a kibocsátott vízpára is elég legyen ahhoz, hogy elérjük a telítettséget.
- Kérdés, hogy a bejuttatott vízgőz fedezi-e a szükséges tömeget.

2. Ha $RH \approx 100\%$ vagy meghaladja:

Feltételezhető a kondenzáció, ha:

- van **kondenzációs mag**,
- és van **hőmérsékleti gradiens** → lehűlés.

Ha az RH nem éri el a 100%-ot sehol, akkor hiába juttatunk be vízgőzt, nem lesz kicsapódás → nem keletkezik felhő vagy köd.

Szél hatása

Az egyetlen pontforrásból kilépő vízgőz körüli légáramlások alapvetően befolyásolja a terjedés és kondenzáció folyamatát. A kibocsátott gőz kezdeti koncentrációja a szél hatására gyors, turbulens keveredésen megy keresztül. A kifújt páramennyiség a lokális szélsébségnek megfelelő mértékben hígul, így a kilépési pont közvetlen közelében a vízgőz sűrűsége meredeken csökken [1][10]. A klasszikus Gauss-plume modellekben is a szélsébség az egyik legfontosabb paraméter, hiszen a diszperziós koefficiensek – melyek a függőleges és vízszintes eloszlást leírják – közvetlenül arányosak vele [11]. Ez a mechanizmus azért lényeges, mert a telítettség ($RH \approx 100\%$) eléréséhez szükséges $e_{\text{act}}/e_{\text{sat}}$ hányados a hígulás miatt gyakran jócskán a kritikus érték alatt marad, megakadályozva a kondenzációs magvakon való vízcsepp kicsődést akár akkor is, ha a kibocsátott vízmennyiség önmagában elegendő lenne.

Emellett a szélsébség növekedése a konvekció intenzitását is fokozza .A vertikális transzport révén a kibocsátási pont feletti levegőrétegek között gyorsabb a csere, ami tovább mérsékli a lokális relatív páratartalmat [12] [3].

Ha a szél hatására a helyi e_{act} folyamatosan hígul, az RH jelentősen csökken, és a felhőképződés kezdeti fázisa – a cseppmagképződés – csak ritkán valósul meg a kibocsátási pont térségében. Így a megnövekedett szélsébség egyidejűleg erősíti a gőz diszperzióját és csökkenti a lokális telítettséget, ami a pontszerű felhő- vagy füstképződés esélyét jelentősen lecsökkenti.

Telítési jellemzők összesítése

Amennyiben átlagosan talaj felett 10m magasságban 4 m/s szélsébség az uralkodó, a szél által szállított levegő 4 m³/s, és amennyiben a hőcserélő tornyok a 3. táblázatban részletezett kibocsátási adatit vesszük figyelembe akkora telítési jellemzők a 8. táblázatnak és 9. táblázatnak megfelelően alakulnak.

Szükséges vízgőz- többség	Telíthető levegő térfogati áramlása					
	100%	CS1 _{100%}	CS2 _{100%}	Össz _{60%}	CS1 _{60%}	CS2 _{60%}
[kg/m ³]	[m ³ /s]					
0,02725	1088	839	249	653	503	150
0,02423	1224	944	280	735	566	168
0,02120	1399	1079	320	840	647	192
0,01817	1632	1259	374	979	755	224
0,01514	1959	1510	449	1175	906	269
0,01211	2449	1888	561	1469	1133	336
0,00942	3149	2428	721	1890	1457	433
0,00908	3265	2517	748	1959	1510	449
0,00606	4897	3776	1121	2938	2265	673
0,00303	9794	7551	2243	5877	4531	1346

8. táblázat: Telítési jellemzők 30°C-on az RH függvényében

Telítési arány a szél-áramláshoz viszonyítva					
100%	CS1 _{100%}	CS2 _{100%}	Össz _{60%}	CS1 _{60%}	CS2 _{60%}
[-]					
272	210	62	163	126	37
306	236	70	184	142	42
350	270	80	210	162	48
408	315	93	245	189	56
490	378	112	294	227	67
612	472	140	367	283	84
787	607	180	472	364	108
816	629	187	490	378	112
1224	944	280	735	566	168
2449	1888	561	1469	1133	336

Szükséges vízgőz- többség	Telíthető levegő térfogat					
	100%	CS1 _{100%}	CS2 _{100%}	Össz _{60%}	CS1 _{60%}	CS2 _{60%}
[kg/m ³]	[m ³ /s]					
0,00436	6800	5243	1557	4080	3146	934
0,00388	7650	5898	1752	4590	3539	1051
0,00339	8743	6741	2002	5246	4044	1201
0,00291	10200	7864	2336	6120	4718	1401
0,00242	12240	9437	2803	7344	5662	1682
0,00194	15300	11796	3504	9180	7078	2102
0,00151	19678	15172	4506	11807	9103	2704
0,00145	20400	15728	4671	12240	9437	2803
0,00097	30599	23592	7007	18360	14155	4204
0,00048	61199	47185	14014	36719	28311	8409

9. táblázat: Telítési jellemzők 0°C-on az RH függvényében

Telítési arány a szél-áramláshoz viszonyítva					
100%	CS1 _{100%}	CS2 _{100%}	Össz _{60%}	CS1 _{60%}	CS2 _{60%}
[-]					
1700	1311	389	1020	786	234
1912	1475	438	1147	885	263
2186	1685	501	1311	1011	300
2550	1966	584	1530	1180	350
3060	2359	701	1836	1416	420
3825	2949	876	2295	1769	526
4920	3793	1127	2952	2276	676
5100	3932	1168	3060	2359	701
7650	5898	1752	4590	3539	1051
15300	11796	3504	9180	7078	2102

„Telíthető levegő térfogat”: azt mutatja meg, hogy az adott RH mellett másodpercenként mennyi levegőt lehetne telíteni a kibocsátott vízpárával.

„Szél által szállított levegő”: 4 m/s sebességgel 1 m² keresztmetszeten 4 m³ levegő áramlik át másodpercenként.

„Telítési arány a szélhez képest”: megmutatja, hányszor több levegőt tudnánk telíteni a bejuttatott vízgőzzel, mint amennyit a szél ténylegesen hoz (az érték >> 1), tehát a kibocsátás lokálisan bőven elegendő a telítettséghez, még jelentős hígulás mellett is.

Ha a környezeti feltételek (RH, hőmérséklet, kondenzációs magvak) adottak, akkor nagy valószínűséggel kialakulhat kicsapódás/felhő a kibocsátás környezetében – még áramló levegő mellett is.

Fontos azonban megjegyezni, hogy a ventilátorok által szállított levegő ebben a fejezetben még nem szerepelnek.

Elpárolgási modellek és szimuláció

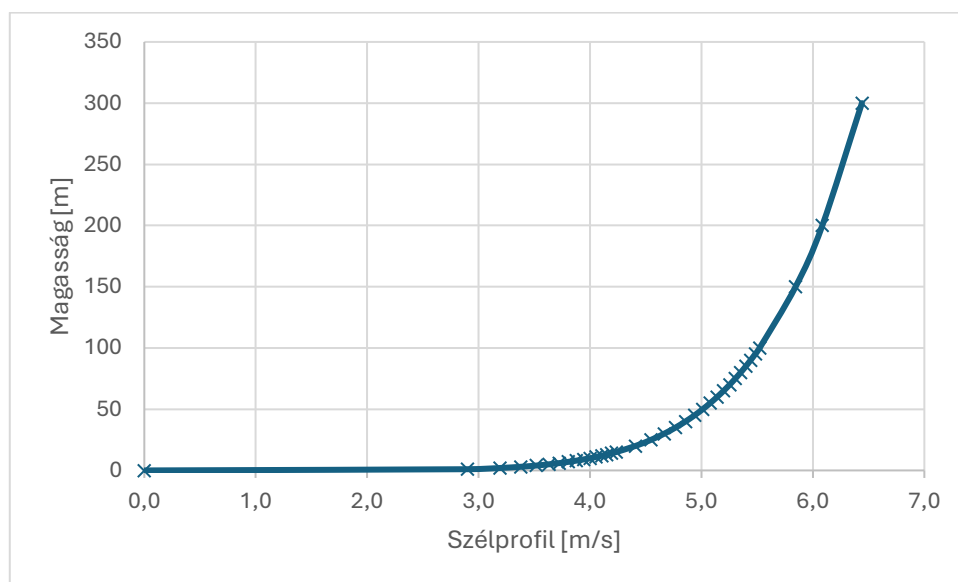
Szimulációs környezet részletes bemutatása

A vizsgált szimuláció során a bemeneti áramlási profil egy UDF (User Defined Function) segítségével lett megadva, amely logaritmikus szélprofilot definiál a 10 méter magasságban az átlagos 4 [m/s] szél figyelembevételéhez.

```
#define U_REF 4.0
#define Z_REF 10.0
#define ALPHA 0.14

u(z) = U_REF * pow((z / Z_REF), ALPHA);
```

Ez a profil jól modellezi a nyílt terepre jellemző szélviszonyokat (pl. mezőgazdasági vagy ipari területek fölött). Fontos azonban megjegyezni, hogy a megfelelő működéshez elegendő távolságra van szükség a bemeneti perem és a vizsgált tartomány között. A 400 méteres peremfeltétel a 10 méteres referencia-magassághoz viszonyítva elfogadható. Alternatívaként alkalmazható lenne log-profile boundary condition közvetlen beállítása is. Az alkalmazott profil a 7. ábra szemlélteti.



7. ábra: Peremfeltétel - szélprofil a magasság függvényében

A nedves hűtőtornyok elpárolgási folyamatai

A nedves hűtőtornyok az ipari létesítmények egyik legfontosabb hőelvezető eszközei, amelyek működése során a víz párologtatásával történik a hőelvonás. A hűtőtornyokból távozó meleg víz egy részét levegővel érintkeztetve visszahűtik, miközben a víz egy része elpárolog. Ez a folyamat nemcsak a hőátadás, hanem a tömegátadás szempontjából is jelentős. A kilépő vízgőz mennyiségének és térbeli eloszlásának meghatározása kulcsfontosságú környezeti és mérnöki szempontból is. A hűtőtornyokból távozó pára meteorológiai hatásokat is kiválthat, mint például kondenzációs felhőképződést vagy lokális csapadékot, ezért a szimulációk során a vízpára diffúzióját és konvekcióját is vizsgálni kell.

Párolgási modellek szimulációja

A CFD (Computational Fluid Dynamics) alapú párolgási modellek leggyakrabban két nagy csoportba rendezhetők. Az explicit (forráskifejezéssel definiált) modellekben a fázisátmenetet egy térfogategységre vagy felületre vonatkozó forrásként kezelik, ahol a párolgás mértékét a helyi hő- és tömegátadási együtthatók, valamint a hőmérséklet- és páratartalom-gradiensek alapján számítják ki [13] [14]. Ezekben a megközelítésekben a számított párolgási sebesség explicit módon kerül be a folyadék- és gázfázis tömegmegmaradási egyenletébe, ami egyszerűbb beállítást és gyorsabb konvergenciát tesz lehetővé, ám korlátozott részletességgel bír a fázisok közötti interakciók pontos leképezésében.

Ezzel szemben az összetettebb többfázisú modellek (pl. Euler–Euler vagy Euler–Lagrange keretrendszerű DPM-megközelítés) a különböző fázisokat – folyadék, gőz, adott esetben szilárd szennyező — külön mezőként kezelik, és követik azok kölcsönhatását, valamint felületén zajló tömeg- és hőátadást is [15] [16]. A folyadékcseppek párolgása ilyenkor nem pusztán forrásként jelenik meg, hanem maguk a cseppek viselkedése (lépték-, felületszabályozott elpárolgás, felületi hőmérséklet-változás) is modellezhető, ami jóval részletesebb térbeli és időbeli felbontást biztosít.

A Species Transport modell különösen alkalmas a vízgőz koncentrációjának vizsgálatára: a vízmolekulák diffúziója és konvekciós transzportja elkülönített komponensként jelenik meg a tömeg-, impulzus- és energiamegmaradási egyenletek között, lehetővé téve a térben és időben változó párolgási folyamatok precíz követését [14] [16]. Ezzel a módszerrel a gőzkoncentráció lokális eloszlása és időbeli alakulása közvetlenül lekérdezhető, ami a hűtőtornyok vagy más ipari párologtató rendszerek hatékonyságának, valamint környezeti diffúziós viselkedésének alaposabb megértését szolgálja.

A CFD-alapú megközelítések ezzel messze túlszárnyalják a klasszikus, analógia-alapú mérnöki módszereket (például a Merkel-módszert [17] vagy a Lewis–Whitman analógiát [18]), hiszen azok lineáris, ellenáramú vagy izoterm feltételezései helyett háromdimenziós, nemállandó áramlási és termodinamikai viszonyokat is képesek kezelni. Így a CFD lehetőséget ad a valós környezeti és üzemeltetési szélsőértékek, átmeneti fázisok és turbulens keveredési jelenségek modellezésére is, amely a pontosabb, megbízhatóbb előrejelzések alapja.

ANSYS Fluent multiphase modellek

Az ANSYS Fluent három fő multiphase modellel támogatja az elpárolgási és víz-levegő kölcsönhatások vizsgálatát:

- **VOF (Volume of Fluid):** Ezt a modellt akkor használjuk, ha a két fázis közti határ jól definiált, például nyílt vízfelületnél. Nagy előnye a pontos fázis-határkövetés, viszont nagyon számításigényes és hosszú szimulációs idővel jár, különösen finom háló és nagy számú időlépés esetén.
- **Mixture modell:** Ez egy kompromisszumos megoldás, ahol a másodlagos fázis feltételezett sebességgel mozog a főfázishoz képest. Alkalmas kisebb koncentrációban jelenlévő vízgőz követésére, gyorsabb konvergenciát biztosít, mint a VOF.

- **Eulerian modell:** Teljesen elkülöníti a fázisokat, mindegyikhez saját momentum- és energiaegyenleteket rendel. Nagyobb számítási költséggel jár, mint a Mixture modell, de pontosabb lehet erősen kölcsönható fázisoknál.

Species Transport modell az ANSYS Fluent szimulációban

Species Transport modell lehetővé teszi több komponens keverékének szimulációját egyazon fázisban. A Mixture modell esetén az alapáramlás egy közös sebességmező mentén történik, de minden komponens külön tömegarányval és diffúzióval rendelkezik. A modell használható szabadon párolgó vízgőz-levegő rendszerekhez is, ahol a vízgőz bevezetése történhet forrásként vagy határfeltételként. A párolgási sebesség függhet a hőmérséklettől, relatív páratartalomtól és más helyi jellemzőktől. Az ANSYS Fluent lehetőséget biztosít UDF (User Defined Function) alkalmazására a tömegátadási források precízebb leírásához is. Az eredmények között a vízgőz koncentrációtérképe, tömegarányai és eloszlása is posztprocesszálható.

A szimuláció során az ANSYS Fluent Species Transport modelljét alkalmazzuk a vízpára levegőbe történő keveredésének modellezésére. Ez a modell lehetővé teszi több komponensből álló gázkeverékek diffúziós és konvektív keveredésének vizsgálatát, miközben figyelembe veszi az egyes fajok koncentrációját és áramlási viselkedését.

A vizsgálatban a levegő és vízgőz keverékét szimuláltuk, ahol:

- Primary phase: levegő (Air)
- Secondary phase: vízgőz (Water-vapor)

A modell figyelembe veszi:

- molekuláris diffúzió
- turbulens diffúzió
- gőznyomás-koncentráció gradiens hatását
- hőmérséklet- és nyomásfüggő viselkedést

A Species Transport modell további előnye, hogy:

- nem igényel fázisváltási modell implementálását,
- rugalmasan paraméterezhető az egyes fajokra külön,
- képes párhuzamos számításra, ami gyorsítja a konvergenciát.

A vízpára kibocsátása a megfelelő bemeneti peremfeltételeken keresztül történik (mass-flow inlet), míg a környezeti áramlás sebességét és turbulenciáját a szélerősség és magassági profil szerint állítottuk be (velocity-inlet). Az elpárolgott vízpára keveredése a koncentráció eloszlásán és a vízgőz tömegarányán keresztül követhető nyomon.

A szimuláció eredményeként részletes képet kaptunk arról, hogy a kibocsátott vízpára milyen módon terjed és milyen mértékben hígul a környező levegőben — ezt a későbbi fejezetekben eloszlásjellemzőkkel és áramvonalas ábrákkal is illusztráljuk.

A Species Transport modell segítségével várhatóan pontos képet kapunk a vízgőz térbeli eloszlásáról és a hűtőtoronyból kilépő pára diszperziójáról. A szimuláció során nyomon követhető:

- a vízgőz koncentráció időbeli és térbeli változása,
- a pára által okozott hőmérséklet-emelkedés a környezetben,
- a relatív páratartalom alakulása,
- a turbulens szállítás hatása a vízgőzre.

Az eredmények posztprocesszálása során páratartalom-görbék, tömegfluxus-számítások és koncentrációprofilok készíthetők. Ezek alapján környezeti hatáselemzés végezhető (pl. kondenzációs csapadék előrejelzés).

Összeségében elmondható, hogy a Species Transport Mixture modell kiválóan alkalmas a nedves hűtőtornyok párolgási folyamatait leíró háromdimenziós CFD-szimulációhoz, mivel egyetlen folyadék–gáz fázison belül kezel több komponens diffúzió- és transzportjellemzőit. Ezzel a megközelítéssel pontosan leképezhető a gőzkoncentráció térbeli eloszlása anélkül, hogy olyan finom hálóra és apró időlépésekre lenne szükség, mint a VOF-alapú szabadfelület-modelleknél [16] [19]. Számos tanulmány igazolja, hogy ez a modell jól megbirkózik a kondenzáció és párolgás komplex együttthatóival, és alkalmazzák természetes huzatú nedves hűtőtornyok szimulációjára is [20].

A szélprofil helyes beállítása kulcsfontosságú a valósághű eredmények eléréséhez, hiszen a külső légmozgás nagymértékben befolyásolja a kilépő pára pályáját, hígulását és ülepedését. A természetes szélirány és vertikális sebességprofil meghatározása nélkül a számított párolgási és kondenzációs viszonyok jelentősen eltérhetnek a valós környezettől, ami a felhőképződés lokális esélyét és a látható párafelhő hosszát is módosítja [21] [22].

A modell jól alkalmazható környezeti hatásvizsgálatokra (pl. pára becslése), ipari rendszerek optimalizálására (pl. tornyok elrendezésének) és meteorológiai kölcsönhatások előzetes felmérésére is. Ezekben a vizsgálatokban a modell lehetővé teszi a páraeloszlás, a lokális relatív páratartalom és a hőmérsékletfüggő tömegáramok részletes feltérképezését [23] [24].

Ugyanakkor a nedves hőcserélőkből származó pára hosszú távú terjedésének és klimatológiai hatásainak pontos előrejelzéséhez további nagyfelbontású, hosszú időtávra kiterjedő modellezésre van szükség, amely integrálja a szezonális szél- és hőmérséklet-adatokat, valamint a turbulens kölcsönhatásokat [25]. Ezzel a jelen tanulmányban nem foglalkoztunk.

Nedves hőcserélőből távozó vízpára összehasonlítása tavak párolgásával

A hűtőtornyok által maximális kibocsátási adatait hasonlítjuk össze Nyíregyháza és Debrecen környékén található tavak párolgási adataival, különböző évszakokra és időjárási körülményekre vonatkozóan. Az összehasonlítás alapja, hogy mekkora vízfelszínű tó párolgási vesztesége felel meg a fent említett vízpára kibocsátásnak, különböző környezeti feltételek mellett.

A modellfelállítás során a vizsgálat egyik legfontosabb bemeneti értéke a kibocsátott vízpára tömegárama volt, amelynek nagysága 29,66 kg/s. Ez a paraméter alapozta meg a pontszerű párolgási forrás intenzitását, és közvetlenül befolyásolta a gőzkoncentráció eloszlását a környező légterekben.

A környezeti hőmérsékletet egységesen 30 °C-ra állítottuk be, mivel ezen a hőmérsékleten a telítési gőznyomás értéke már jelentősen megemelkedik, ami a párolgási folyamat dinamikáját és a kondenzáció késleltetését egyaránt módosítja. Ez az érték lehetővé tette, hogy a vizsgált rendszer „nyári” üzemállapotra vonatkozó eredményeket kapjunk.

A belépő szélesebséget 10 m magasságban 4 m/s-ra kalibráltuk, így a légáramlatok diszperziós és hígulási folyamatait az évi átlagnak megfelelő módon leképezhattük.

Végül a ventilátorok által generált légáramlás összesített tömegáramát 1 549,02 kg/s-ban adtuk meg. Melyet a hűtőtornyok üzemi adatai alapján számítottunk ki. Ez a nagy légmennyiség gyakorlatilag a hűtőtornyokon keresztül mozgó levegőt reprezentálta, és nélkülözhetetlen volt ahhoz, hogy a modellezett rendszer hő- és tömegátadási folyamatai hitelesen illeszkedjenek az ipari méretű üzemelés valós körülményeihez.

Meteorológiai háttér és évszakos viszonyok Magyarországon

A párolgás intenzitása nagymértékben függ a meteorológiai viszonyoktól. Magyarországon, különösen az Alföld térségében (Nyíregyháza–Debrecen környéke), a kontinentális éghajlati jelleg

meghatározza az évszakos párolgási viszonyokat. Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) és a Debreceni Egyetem éghajlati adatbázisai alapján az 10. táblázatban összefoglalt jellemző értékek adhatók meg. [26]

Időszak	Átlaghőmérséklet (°C)	Relatív páratartalom (%)	Átlagos szélesség (m/s)	Napi párolgás (mm/nap)
Tél (jan–feb)	-1 – +2	80–90	1,5–2,0	0,3–0,6
Tavaszi (márc–ápr)	8 – 15	60–75	2,0–3,0	1,2–3,5
Nyár (jún–aug)	24 – 30	40–60	2,5–4,0	4,5–7,5
Ősz (szept–nov)	10 – 16	70–85	1,5–2,5	1,0–2,5

10. táblázat: OMSZ éghajlati adatok

A legmagasabb párolgási veszteségek a nyári hónapokban jelentkeznek, különösen tartós hőhullámok idején, amikor a levegő hőmérséklete elérheti a 35–38°C-ot is, miközben a relatív páratartalom 30% alá csökken.

A regionális meteorológiai adatokat a következő állomások biztosítják:

- OMSZ Nyíregyháza automata állomás
- OMSZ Debrecen repülőtéri állomás
- Debreceni Egyetem Meteorológiai Állomása (Agrártudományi Kar)

A kapott értékek biztosítják a párolgási modellek évszakos kalibrálását. A következő fejezetekben e viszonyok alapján történik az összehasonlítás.

Éves vízpára-kibocsátás és párolgás

A 3. táblázatban és a 4. táblázatban összesítve láthatóak a kibocsátási adatok. Részletezve hogy amennyiben a nedves hőcserélőből távozó vízpára mennyisége napi szinten $2\,563\text{ m}^3$ (maximális kibocsátás, 30°C-on) éves szinten, akkor az

$$\text{Éves vízpára} = 2563\text{ m}^3/\text{nap} \cdot 312 \approx 799\,656\text{ m}^3/\text{év}.$$

Ez az érték egy kisebb tó teljes éves párolgási veszteségét jelentheti. Például, ha a teljes év átlagos párolgása 3,0 mm/nap, akkor a

$$\text{Szükséges tófelszín} = \frac{799\,656}{3 \cdot 10^{-3} \cdot 312} \approx 730\,172\text{ m}^2 = 73\text{ ha}$$

Tehát évi szinten azonos párolgási veszteséghez mintegy **73 hektár vízfelszín** szükséges, ha az év átlagos napi párolgása 3 mm/nap körül alakul.

Az éves vízmennyiség alapján kiszámítható, mekkora vízfelületen történne meg ugyanekkora párolgás az év különböző időszakaiban. A 11. táblázatban és a 12. táblázatban összehasonlítottuk a különböző kibocsátási értékekhez tartozó vízfelületeket. A táblázatban kiemelésre kerültek a további számításoknál használt paraméterek.

I. ütem		100%	CS1 _{100%}	CS2 _{100%}	Össz _{60%}	CS1 _{60%}	CS2 _{60%}
Elpárolgás összesen	[liter/s]	29,66	22,87	6,79	17,80	13,72	4,08
Éves vízpára	[m ³ /év]	799539	616448	183091	479723	369869	109854
Viszonyítási vízfelszín ⁵	[m ²]	730172	562966	167206	438103	337780	100324
	[ha]	73,0	56,3	16,7	43,8	33,8	10,0

11. táblázat: Vízfelszín viszonyítási alap az éves kibocsátáshoz (I. ütem)

I. + II. ütem		100%	CS1 _{100%}	CS2 _{100%}	Össz _{60%}	CS1 _{60%}	CS2 _{60%}
Elpárolgás összesen	[liter/s]	59,32	45,74	13,58	35,59	27,44	8,15
Éves vízpára	[m ³ /év]	1599077	1232896	366181	959446	739738	219709
Viszonyítási vízfelszín ⁵	[m ²]	1460345	1125933	334412	876207	675560	200647
	[ha]	146,0	112,6	33,4	87,6	67,6	20,1

12. táblázat: Vízfelszín viszonyítási alap az éves kibocsátáshoz (II. ütem)

A tavak nyílt vízfelületén lezajló párolgási folyamatot a Penman-modell [27], [28] alapján szám-szerűsíthetjük, amely a radiációs és aerodinamikai komponenseket egyesítve veszi figyelembe a napsugárzásból származó nettó hőenergiát, a levegő hőmérsékletét, relatív páratartalmát vala-mint a szélesebbeségét. A modell két összetevője – az energiaegyenletből származó termikus és az aerodinamikai hajtóerő – lehetővé teszi a párolgási sebesség pontos meghatározását még el-térő meteorológiai viszonyok mellett is.

Magyarországon az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) 2023–2024-es mérései alapján a ta-vak napi átlagos párolgási értéke jellemzően 3 mm/nap körüli, ami elfogadható adat különösen összehasonlító vizsgálatokhoz, ahol a relatív eltérések a legfontosabbak [26], így a Penman mo-dell használatától eltekintettünk, és a továbbiakban a OM SZ térképes adataiból származó átlag-okat használjuk fel.

Évszakokra bontva a 13. táblázat és 8. ábra összehasonlítja és szemlélteti milyen vízfelszín párol-gását jelneti.

Évszak	Átlagos napi párolgás [mm/nap]
Tél	0,45
Tavas	2,35
Nyár	6,00
Ősz	1,75

13. táblázat: Párolgási mennyiségek évszakokra bontva[26]

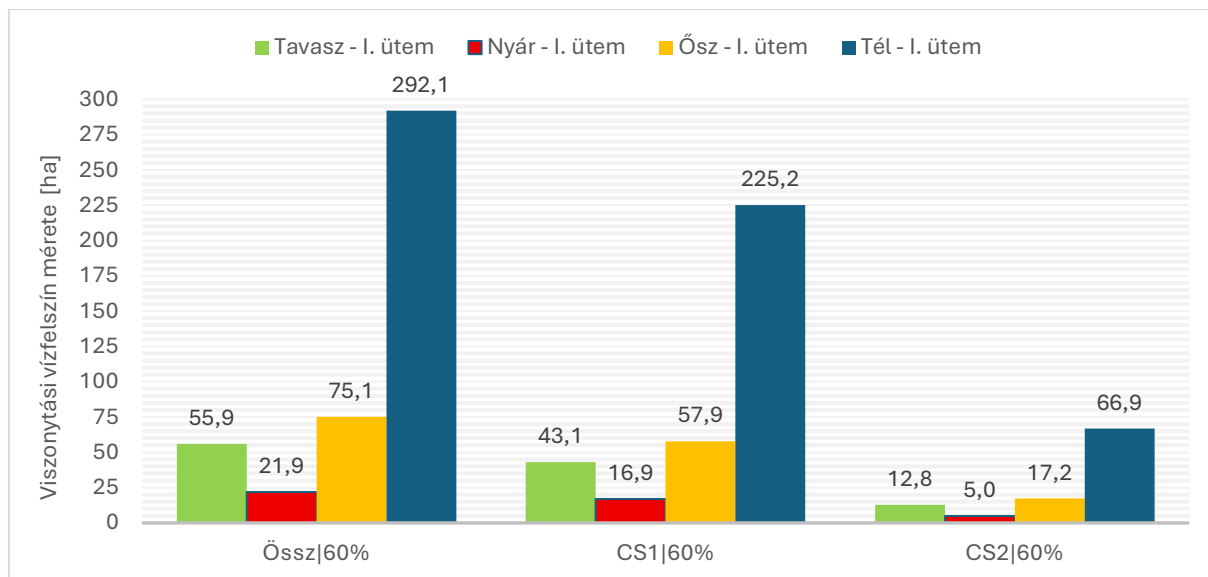
Évszakokra bontva a 13. táblázatban összefoglat adatok alapján az I. és II ütemre a számított vízfelszín viszonyításához az alábbi referencia értékek használhatók. (14. táblázat)

Viszonyítási vízfelszín mérete		100%	CS1 _{100%}	CS2 _{100%}	Össz _{60%}	CS1 _{60%}	CS2 _{60%}
Éves vízpára – I. ütem	[liter/hr]	106776	82325	24451	64066	49395	14671
Éves vízpára – II. ütem	[liter/hr]	213552	164650	48902	128131	98790	29341
Tavas - I. ütem	[m ²]	932135	718680	213454	559281	431208	128073
	[ha]	93,2	71,9	21,3	55,9	43,1	12,8
Tavas - I. + II. ütem	[m ²]	1864270	1437361	426909	1118562	862416	256145
	[ha]	186,4	143,7	42,7	111,9	86,2	25,6
Nyár - I. ütem	[m ²]	365086	281483	83603	219052	168890	50162
	[ha]	36,5	28,1	8,4	21,9	16,9	5,0
Nyár - I. + II. ütem	[m ²]	730172	562966	167206	438103	337780	100324
	[ha]	73,0	56,3	16,7	43,8	33,8	10,0
Ősz - I. ütem	[m ²]	1251724	965085	286639	751034	579051	171983
	[ha]	125,2	96,5	28,7	75,1	57,9	17,2
Ősz - I. + II. ütem	[m ²]	2503448	1930170	573278	1502069	1158102	343967
	[ha]	250,3	193,0	57,3	150,2	115,8	34,4

⁵ Szükséges vízfelszín az éves vízmennyiség elpárologtatásához

Viszonyítási vízfelszín mérete		100%	CS1 _{100%}	CS2 _{100%}	Össz _{60%}	CS1 _{60%}	CS2 _{60%}
Tél - I. ütem	[m ²]	4867815	3753109	1114707	2920689	2251865	668824
	[ha]	486,8	375,3	111,5	292,1	225,2	66,9
Tél - I. + II. ütem	[m ²]	9735631	7506217	2229414	5841379	4503730	1337648
	[ha]	973,6	750,6	222,9	584,1	450,4	133,8

14. táblázat: Vízfelszín méretek a



8. ábra: Vízfelszín mérete évszakonként és kibocsátási csomópontonként (I. ütem)

A 8. ábra szemléltetett 2. ábraszámítás rávilágít, hogy a vízgőz-kibocsátásának hatása leginkább a téli időszakban lehet számottevő.

Környező természetes tavak jellemzői

Az összehasonlítás alapja, hogy mekkora vízfelszínű tó párolgási vesztesége felel meg a fent említett vízpára-kibocsátásnak, különböző környezeti feltételek mellett. Azon tavak melyek városi klímakörnyezetben helyezkednek el, meteorológiai szempontból jól összehasonlíthatók egy kontrollált vízpára kibocsátási szimulációval. Az összehasonlítás során ezek a tavak referenciaként szolgálhatnak a párolgási egyenérték kiszámításához.

Bujtosi-tavak

A Bujtosi-tavak egy mesterséges tavakból álló vízfelületrendszer, amely Nyíregyháza belvárosához közel helyezkedik el. A tavak teljes vízfelszíne kb. **5,2 hektár**, átlagos mélysége pedig **1,5–2,0 méter**. A terület városi elhelyezkedése miatt fokozott párolgási hatás figyelhető meg a nyári hónapokban. A tavak partvonala szabályozott, de sekély zónákat is tartalmaz, amelyek hozzájárulnak a nagyobb párolgási arányhoz. A tavak vízforgalma erősen függ a csapadék mennyiségétől és a csatornarendszer áteresztőképességétől.

Sóstói-tó

A Sóstói-tó természetes és mesterséges források által táplált vízfelület Nyíregyháza északi részén. A tó teljes felülete kb. **9,6 hektár**, mélysége átlagosan **1,8–2,5 méter** között változik. A tó egyaránt szolgál rekreációs, ökológiai és városi hőszabályozási célokat. A nyári hónapokban a víz hőmérséklet gyakran meghaladja a 25°C-ot, amely megnöveli a párolgási veszteséget. A tó lefolyás nélküli, ezért vízszintje főként a beszívargás és párolgás egyensúlyától függ.

Szelkó-tó

A Szelkó-tó a Nyíregyháza külterületén, Császárszállás térségében található természetes eredetű, részben szabályozott vízfelület, amely mintegy **193 hektáros** (1,93 km²) területével a térség egyik legnagyobb állóvize. A tó a **Rétközi tóvidék** része, vízháztartása döntően a csapadékból, valamint környező talajvíz- és belvízelvezető csatornákból táplálkozik. Átlagos vízmélysége mérsékelt (1–2,5 méter), ami nyáron gyors felmelegedést, és ezzel párhuzamosan **intenzív párolgást** eredményez. A tó a **nagy, összefüggő nyílt vízfelszín** miatt különösen érzékeny a légköri viszonyokra – elsősorban a szélesebbesre és a hőmérsékletre.

Keleti V-2 víztározó

A Keleti V-2 víztározó egy **mesterséges, nagy kiterjedésű víztározó** a Keleti-főcsatorna mentén, Hajdú-Bihar vármegyében. A víztározó elsődleges funkciója a **vízgazdálkodási kiegyenlítés**, öntözési célú vízvizsztatartás, valamint **belvízvédelmi tartalék** biztosítása. Területe megközelítőleg **550–580 hektár**, így kiterjedése révén közel esik a tanulmányban kiszámított, a nedves hőcserélő által kibocsátott vízpárával ekvivalens elpárologtatási felülethez. Átlagos vízmélysége 2–3 méter, a tározóban uralkodó **alacsony átfolyási sebesség és nagy felszín** miatt a párolgási veszteség kifejezetten jelentős – nyáron napi 6–8 mm is lehet. A tározó nyílt vízfelszínét erősen befolyásolják a **Kelet-magyarországi alföldi klimatikus tényezők**, így a magas nyári hőmérséklet, intenzív napsugárzás és időszakosan mérsékelt légmozgás.

Szakirodalmi hatásvizsgálat eredménye

Több nagyobb kibocsátású torony szakirodalmát áttekintettük mely alapján a hőmérséklet-emelkedés mértéke a tornyok közvetlen közelében maradnak, például a csehországi Temelín Atomerőmű esetén a CT-PLUME modell szerint a hűtőtornyok környezetében, mért hőmérséklet-emelkedés $\Delta T \approx 0,2\text{--}0,4\text{ °C}$ volt 200–400 m távolságban. [29], [30]

Hatásterület fizikai igazolása:

A mikroklimatikus számítások során egy 100 m sugarú félgömb modellje alkalmazható, mely jól közelíti a konvektív meleg és páradús levegő térbeli eloszlását. Ez a méret van a szakirodalmi adatok alapján [29], [30], egyszerűsíti a számítást, miközben reálisan leképezi a helyi hatásokat.

Szélhatás szerepe:

- Szélcsend: A pára vertikálisan emelkedik, és nagyobb valószínűséggel csapódik le a torony környezetében, ami fokozott jégképződéshez és ködhöz vezethet.
- Gyenge szél (0,5–2 m/s): A mikroklimatikus hatás kis területen oldalirányban elnyúlik (~150–300 m), de nem keveredik el gyorsan.
- Erős szél (>3 m/s): A páraoszlop gyorsan széteszik, a hőhatás gyakorlatilag elhanyagolhatóvá válik, és a kondenzációs víz sem csapódik le lokálisan. Ez jelentősen csökkenti a lefagyás és köd esélyét.

Évszakonként jellemző mikroklimatikus hatások

Hőmérséklet emelkedés a párolgás során felszabaduló párolgáshőből számíthatjuk, tehát az összes hőmennyiség mely az pontforrás körüli térrészbe jut.

$$Q_{\text{látens}} = \dot{m}_{\text{víz}} \cdot L_v$$

$L_{v,\text{tél}}$	kJ/kg	2259	Víz párolgáshője télen (0 °C):
$L_{v,\text{nyár}}$	kJ/kg	2445	Víz párolgáshője nyáron (25 °C)
c_p	kJ/(kg K)	1,005	A száraz levegő fajhője

\dot{m}_{viz}	kg/s	17,796	Víztömegáram
$\dot{m}_{\text{levegő}}$	kg/s	1014	Levegőtömegáram

15. táblázat: Párolgáshő számításához használt adatok

Amennyiben feltételezzük, hogy a pontforrásból kiáramló meleg levegő egyenletesen terjed szét egy félgömb alakú felületen, amely sugara R , akkor a légáramlás térfogatárama [m^3/s] a pontforrástól távol, a félgömb felszínénél

$$Q_0 = A_{\text{félgömb}} \cdot v$$

Jelen esetben a pontforrás kibocsátási adatai adóttek ezért annak értékét a kezdeti üzemi jellemzők alapján használjuk fel a vizsgált maximális térfogatáramhoz⁶.

		Tél	Nyár
Q_{latens}	[kW]	40201,16	43511,22
	[J]	144,72	156,64
Q_0	[m^3/s]	859,8	793,6

16. táblázat: A Q_{latens} látens hőmennyiség valamint Q_0 kezdeti térfogatáram évszakonként.

A hőmérséklet-emelkedést a párolgási hő és a környezeti levegő tömegáramának és fajhőjének az arányából számoljuk

$$\Delta T = \frac{Q_{\text{latens}}}{\dot{m}_{\text{levegő}}(r) \cdot c_p}$$

Azaz, minél nagyobb a levegő tömegárama, annál kisebb lesz a hőmérséklet-emelkedés.

De mivel $\dot{m}_{\text{levegő}}$ az induló tömegáram (közvetlenül a pontforrásnál) adott ezért a légsebesség a távolság függvényében csökken, vagy a térfogatáram nő a levegő hígulása miatt! Egyszerűsítésként feltételezhetjük, hogy a levegő áramlása nem nő a távolsággal, de a hő terjed egyre nagyobb felületen, így a hő koncentrációja csökken. Ez esetben a **hőáramlás sűrűsége** a félgömb felületén az alábbi:

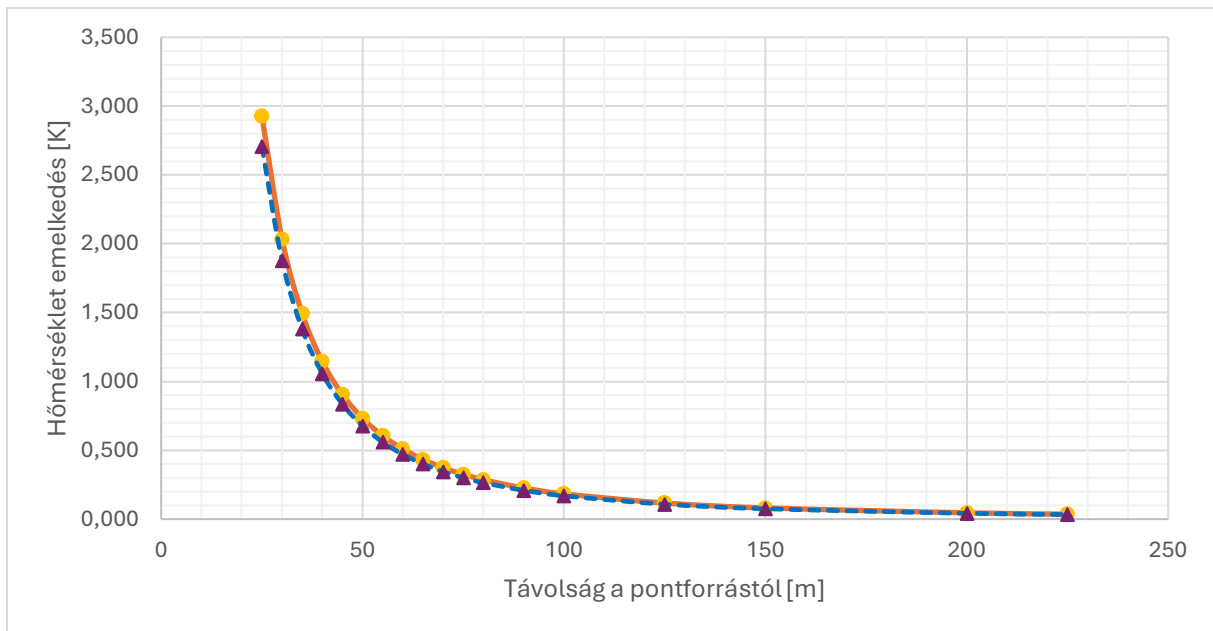
$$q'' = \frac{Q_{\text{latens}}}{A_{\text{félgömb}}}$$

Tehát mennyiben a levegő egyenletesen áramlik ki a pontforrásból akkor, a tömegáram „terjedése” a felülettel arányos mértékű. Amennyiben a levegő az eredeti tömegárammal áramlik, akkor felületi erányok segítségével a R sugárhoz tartozó félgömb felületén meghatározhatjuk a várható hőmérséklet emelkedést ().

R [m]	$A_{\text{félgömb}}$ [m^2]	$q''_{\text{tél}}$ [W/m^2]	$\Delta T(R)_{\text{tél}}$ [K]	$q''_{\text{nyár}}$ [W/m^2]	$\Delta T(R)_{\text{nyár}}$ [K]
25	3927	0,03685	2,706	0,03989	2,929
75	35343	0,00409	0,301	0,00443	0,325
100	62832	0,00230	0,169	0,00249	0,183
125	98175	0,00147	0,108	0,00160	0,117
150	141372	0,00102	0,075	0,00111	0,081
200	251327	0,00058	0,042	0,00062	0,046
225	318086	0,00045	0,033	0,00049	0,036

17. táblázat: hőmérséklet emelkedés a távolság függvényében

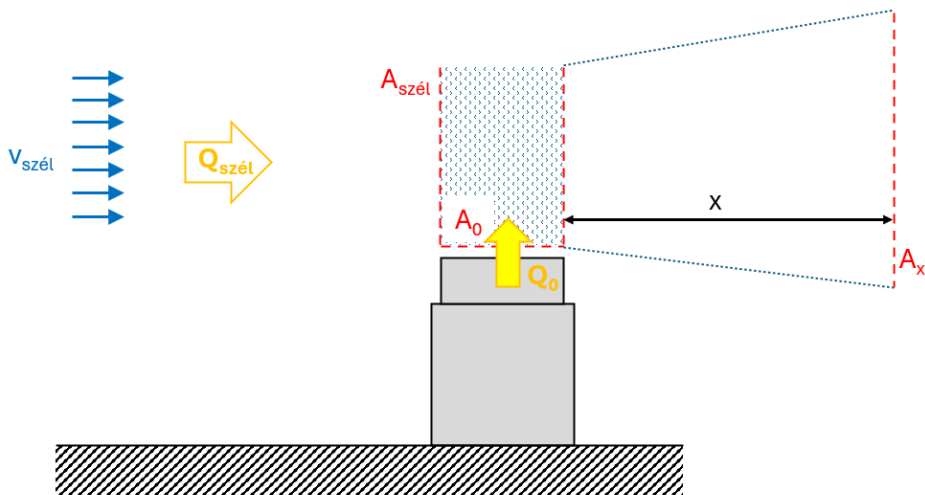
⁶ 60% kibocsátásmaximum gyártói nyilatkozat alapján



9. ábra: párolgáshő okozta környezeti hőmérsékletváltozás becslése

Relatív páratartalom hígulása és diszperzió

Amikor egy nedves hűtőtorony „pontszerű” (jellemzően kis felületen kilépő) kibocsátása során vízgőz és levegő keveréke távozik a környezetbe, a vízgőz terjedése és hígulása a turbulens légköri diszperzió révén történik. A vízgőz nem egy koncentrált nyálkában halad, hanem keveredik, szóródik, és fokozatosan hígul a környező szárazabb levegővel. A terjedési modell vázlatát a 10. ábra szemlélteti.



10. ábra: Térfogatáramlási és keveredési modell

A függőleges vízgőz–levegő áramlat hígulását az Morton féle bekeverési (entrainment⁷) modell írja le [31] A vízszintes szélárammal való második fokozatú keveredés pedig egyszerű tömegarányos képlettel történik, ami biztosítja az anyagmegmaradást és a fizikai konzisztenciát. Morton, Taylor & Turner volt az első, akik elméletben is megalapozták a turbulens kúphígulás modellt. Azaz, hogy egy függőlegesen emelkedő áramlat (pl. forró gáz, vízgőz-levegő keverék) hogyan keveredik a

⁷ **Entrainment:** az a jelenség, amikor egy mozgó fluidum (például egy felfelé áramló gőzcsóva) az útjába kerülő környezeti levegőből anyagot (levegőt, párat, port stb.) sodor magával, és ezzel növeli saját térfogatáramát, miközben hígul a benne lévő szennyező vagy vízgőz koncentrációja.

környezeti levegővel, és hogy a hígulás leginkább a bekeveredés sebességével arányos, így a hígulási faktor kis távolságon jól közelíthető a

$$r(x) = \frac{r_0}{1 + \alpha \cdot x}$$

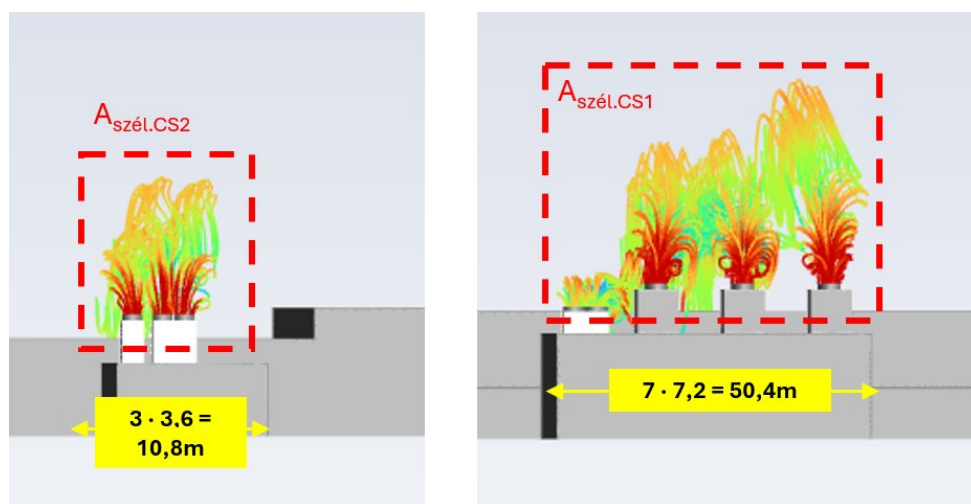
formával.

Az U.S. Environmental Protection Agency [32] és American Society of Heating ajánlásai a vízszintes szél által okozott hígulásnál a keresztmetszet meghatározására az ASHRAE Handbook – Fundamentals [33] és az EPA AERMOD Model Formulation [32] ajánlásait követtük, miszerint a releváns keresztmetszet a kibocsátási csóva szélességének és a keveredési magasságnak a szorzata a vizsgált pontban. A keveredési keresztmetszet az a tér, amelyben a kibocsátott anyag és a beáramló levegő (szél) ténylegesen kölcsönhatásba lép, tehát ahol a két áramlat jelentősen átfedi egymást. Külső szellőzésnél, amennyiben a szél erősebb, általában a szél keresztmetszete az irányadó.

$$A_{\text{szél}} = \text{"csóva szélesség"} \cdot \text{"keveredési magasság"}$$

Amennyiben nem ismert, akkor a helyi környezeti vagy épületgeometriai jellemzők által meghatározott szelvény (pl. szélcsatorna, utca, vagy egyszerűen a becsült „hatótér”). Ha a szél hat egy zónára, akkor az adott ponton érvényes csóva átmérője és a releváns szélmagasság szorzata a keresztmetszet.

Esetünkben két zóna különíthető el melyeket CS1 és CS2 hűtőtorny csoportoknak definiáltunk. A keresztmetszetek a numerikus szimuláció eredményei alapján láthatóak a 11. ábra.



11. ábra: A szél hatáskeresztmetszetének mérete a numerikus szimuláció alapján.

Az alkalmazott keresztmetszetek a 11. ábra alapján a hőcserélők méretéből kiindulva és 1:1 oldalarnyokat figyelembe véve az alábbi szél hatáskeresztmetszetek vehetők figyelembe.

$$A_{\text{szél.CS1}} = 2540,16 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{szél.CS2}} = 116,64 \text{ m}^2$$

A hígulás mértéke azonban jelentős mértékben nő a felület méretének növekedésével tehát a növekedés kedvezően hat a kondenzáció elkerülése szempontjából. Emiatt úgy döntöttünk hogy a becslésből adódó hibákat elkerüljünk a hatáskeresztmetszet méretét a hűtőtornyok kilépő keresztmetszetével vettük figyelembe a számítások során. Így a ventilátorok $\approx 3,6$ m átmérőjű kilépő keresztmetszetét vettük figyelembe. Ezzel jelentősen rosszabb keveredést írtunk elő.

$$A_{\text{szél.CS1.SZ}} = 201,6 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{szél.CS2.SZ}} = 57,6 \text{ m}^2$$

A kisebb keresztmestezetek tehát a kondenzációra hajlamosabb állapotot eredményeznek, feltételeztük a számításaink során azt hogyha ezekkel a paraméterekkel megfelelő állapotok alakulnak ki akkor a hasáterület becslését könnyebben előírhatjuk megfelelő biztonsággal.

A hígulás a korábban részletezett az áramlás keresztirányú kiterjedésének növekedésével összefüggő Morton féle bekeverési összefüggéssel írunk le:

$$RH(x) = \frac{RH_0}{1 + \alpha \cdot x}$$

ahol:

- RH_0 - kezdeti relatív páratartalom,
- x - távolság a kibocsátási ponttól [m],
- α - hígulási együttható [m^{-1}], értéke tipikusan 0,1–0,4 körüli ipari környezetben.

Ez az egyszerűsített hígulási modell jól közelíti a valós folyamatokat ott, ahol a vízgőz nem alkot cseppeket, hanem gázfázisban marad, és diffúz módon keveredik a levegővel. [34][35]

Alkalmazás és érvényesség

- A modell nem veszi figyelembe a visszakondenzációt, tehát elsősorban száraz vagy enyhén telített környezetben érvényes.
- A α értéke függ a szélesebségtől, a kibocsátási geometriától, és a hőmérsékleti stabilitási rétegektől.

A 19. táblázatban két hőmérséklet esetén a keveredési majd hígulás (diszperzió) esetén érvényes hígulás mértékét számítottuk. Figyelmbe vettük, hogy nincs eső, nincs számottevő hőmérsékletváltozás. A környezeti jellemzőket és becsült diszperz jellemzőket a 19. táblázatban foglaltuk össze, ahol az x a távolság a kibocsátási ponttól, az α pedig az un. empirikus szétterülési tényező (pl. 0,1...0,2). [32], [33]

Az Morton, Taylor & Turner által végzett laboratóriumi és elméleti vizsgálatok alapján az entrainment konstans

$$\alpha \approx 0,12 - 0,12$$

Tipikus értékek:

- 0,10 – 0,15 a legtöbb légköri, vízgőz vagy levegő pluma esetén
- 0,12 az általánosan elfogadott középérték

Későbbi kutatások, gyakorlati modellek (lásd: Turner 1973, Briggs 1975):

- Tiszta, szabad légkörben: $\alpha=0,12$
- Füst, nagy sűrűségkülönbség: kissé alacsonyabb (pl. 0,10)
- Nagy turbulenciájú környezet: akár 0,14–0,15

A vizsgálataink során a szétterülési tényezőt $\alpha = 0,1$ értékre vettük fel.

$T_{\text{külső}}$	30	0	°C	Vizsgált hőmérsékletek
$RH_{\text{külső}}$	60%		[%]	Külső levegő relatív páratartalma
$\rho_{\text{levegő}}$	1,2	1,3	kg/m ³	Levegő sűrűsége
p_{sat}	4237	611	Pa	Gőznyomás
ρ_{sat}	0,0303	0,0048	kg/m ³	Gőz sűrűsége
$r_{RH, \text{külső}}$	0,0182	0,0029	kg _{víz} /kg _{levegő}	Környezeti víztartalom
$M_{\text{vígőz}}$	0,018015		kg/mol	Vízgőz moláris tömege
R	8,314		J/(molK)	Gázállandó
$R_{\text{vígőz}}$	461,5		J/(kgK)	Anyagjellemző

T _{külső}	30	0	°C	Vizsgált hőmérsékletek
r _{telítési}	2,94%	0,48%	[%]	Telítési abszolút nedvességtartalom
v _{szél}	1,0		m/s	Szél sebessége
p _{környezeti}	101325		Pa	Légköri nyomás
α	0,1		-	Empirikus szétterülési tényező
x	35,0		m	Távolság

18. táblázat: Relatív páratartalom számításánál használt adatok.

A modell egyszerűsített módon a 10. ábra alapján alkalmaztuk, ahol a kibocsátás során a közeg egy vízszintes irányú környezeti levegővel találkozik melynek hatáskeresztmetszetét a keleti irányú vetületével határoltuk be. Tehát a CS1 hűtőtornyok hosszanti méretének hétszeresére (7 · 7,2m) illetve a különálló CS2 tornyok esetén a rövidebb oldal háromszorosával (3· 3,6m). A magasságát pedig 6 m-ben limitáltuk.

	Össz 60%		CS1 60%		CS2 60%		
m _{viz}	17,8		13,7		4,1		kg/s
m _{levegő}	1014		781,1		232,8		kg/s
r ₀	0,01725		0,01726		0,01720		kg _{viz} /kg _{levegő}
	0,0207	0,0224	0,0207	0,0224	0,0206	0,0224	kg _{viz} /m ³ _{levegő}
T _{külső}	30	0	30	0	30	0	°C
D ₀	13,1		11,6		6,1		m
A ₀	134,7		105,8		28,9		m ²
Q ₀	859,8	793,6	662,3	611,4	197,4	182,2	m ³ /s
A _{szél}	134,7		105,8		28,9		m ²
Q _{szél}	134,7		105,8		28,9		m ³ /s
Q _{total}	994,4	928,3	768,1	717,2	226,3	211,1	m ³ /s
r _{külső} · Q _{szél}	2,4	0,4	1,9	0,3	0,5	0,1	kg/s
r _{total}	0,0204	0,0196	0,0204	0,0196	0,0203	0,0197	kg _{viz} /m ³ _{levegő}
r _x	0,0045	0,0044	0,0045	0,0043	0,0045	0,0044	kg _{viz} /m ³ _{levegő}
RH _x	60%	90%	60%	90%	60%	90%	

19. táblázat: Kibocsátott páratartalom és gázdisszipáció

Ahol m_{viz} - vízgőz tömegáram; m_{levegő}- levegő tömegáram; r₀ - levegő nedvességtartalma; T_{külső} - külső hőmérséklet; D₀ - kezdeti kilépési átmérő; A₀ - Kibocsátási keresztmetszet; Q₀ - térfogatáram becslése (kilépésnél); A_{szél} – hatáskeresztmetszet; Q_{szél} - szél által szállított levegő; Q_{total} - összes szállított közeg; r_{total} - keveredés utáni víztartalom; r_x - (EPA/ASHRAE) hígulás; RH_x - várható páratartalom x távolságban

Numerikus modelljellemzők

A szimuláció kidolgozásához az ANSYS Fluent 2025R1 legfrissebb kiadását választottuk, amely a transiens (időben változó) viselkedés leképezésére optimalizált 3D-s modellezési keretrendszerrel kínál. A modellben a vizsgált tér teljes tartományára kiterjedő, finoman diszkrétizált hálót alkalmaztunk, hogy a hirtelen változások – például a párafelhők gyors kialakulása és szétszóródása – numerikus stabilitása és fizikai pontossága is biztosított legyen.

A folyamatok megoldásához nyomás-alapú coupled solver került beállításra, amely egyszerre, iteratív módon integrálja az impulzus-, tömeg- és energiamegmaradási egyenleteket. Ennek

köszönhetően a nyomás- és sebességmezők közötti kölcsönhatás – különösen nagy gradiensek esetén – konzisztensebb és gyorsabban konvergáló eredményt ad, mint az elkülönített (segregated) eljárások.

A turbulens áramlások modellezésére a realizable k- ω SST (Shear Stress Transport) turbulencia-modellt választottuk, kiegészítve standard wall-function falfüggvényekkel. Ez a kombináció jól ötvözi a k- ϵ modellek nagy rendszerszintű érvényességét a k- ω modellek falmenti pontosságával, így biztosítva, hogy a határréteg viselkedése – különösen a nedves hűtőtornyoknál kritikus párolgási felületek mentén – hitelesen jelenjen meg. A falfüggvények alkalmazása lehetővé teszi a numerikus háló relatív egyszerűsítését a falak mentén, anélkül hogy a belső turbulencia-források és elnyelődés fizikai lehetőségei csökkennének.

A gravitációs erőter bevezetése elengedhetetlen volt a természetes konvekciók és egyéb konvektív jelenségek modellezéséhez: a z irányba mutató, $9,81 \text{ m/s}^2$ -es gyorsulást a geometria globál koordináta rendszerének megfelelően negatív előjellel vettük fel, így a nehézségi erő hatása – például a meleg, kevésbé sűrű pára felfelé áramlása – valóságghűen jelenik meg. Ezzel a beállítással a párafelhők vertikális kiterjedése, ütközése a külső légáramlattal, valamint ülepedési és hígulási folyamatai egyaránt szimulálhatók.

Mindezen numerikus és fizikai paraméterek együttese garantálja, hogy a szimuláció – a magasabb számítási költségek ellenére – a valós körülményekhez legközelebb álló eredményeket produkálja, és megalapozza a nedves hűtőtornyok párolgási jelenségeinek mélyreható elemzését és optimalizációját.

Geometria és számítási tartomány

A számítási tartomány kialakításakor az alábbi geometriai és hálózási paraméterek biztosítják a hűtőtornyok környezetében zajló áramlás jellegzetességeinek pontos leképezését, miközben a számítási erőforrások optimális kihasználását is figyelembe vettük:

- **Geometriai kiterjedés:** A tartomány szélessége (x) -400 m -től $+400 \text{ m}$ -ig, míg a hossza (y) -800 m -től $+800 \text{ m}$ -ig terjed, így a berendezés előtt és mögött elegendő hely áll rendelkezésre a belépő szélprofil kialakulásához és a kilépő áramlás disszipációjához [36]. A függőleges (z) kiterjedés 0 m -től 280 m -ig terjed ami természetes konvekció modellezésére alkalmas lehet. Ilyen méretezés megfelel az ipari ajánlásoknak, amelyek szerint a berendezés karakterisztikus méretének 5–10-szerese szükséges az elő- és 15–20-szorosa a hátoldali tartományhoz [37]
- **Háló típusa és finomítás:** A cellastruktúra poliéderez–hexaéderez vegyes háló, amely a belépési zóna és a falak mentén fokozott finomítást kap. A poliéderez elemek rugalmassá teszik a komplex geometriák leképezését, míg a hexaéderez cellák javítják a numerikus stabilitást és a konvergenciát [38]
- **Inflációs rétegek:** A talajfelület és a nyílások környezetében valamint a falak mentén 5–7 inflation layer került alkalmazásra, ezzel biztosítva a határréteg pontos felbontását anélkül, hogy a teljes háló túlzottan megrágnál [36]. Az inflációs rétegek elemszámkorlátok miatt nem minden épületfelületen lett kialakítva.
- **Cellaszám és hálófüggetlenségi vizsgálat:** Összesen körülbelül 31,7 millió cellával dolgoztunk, ami egyensúlyt teremt a részletesség és a számítási idő között. A hálófüggetlenségi vizsgálat elhagyását a számítási kapacitás korlátai indokolták: az összehasonlító tesztek szerint a lokális hibák – leginkább a kibocsátási felületek mentén – a pont közvetlen környezetében jelentkeznek, de a toronytól távolodva ezek hatása gyorsan eltűnik, így az összesített eredmények pontossága nem sérül jelentősen [39].

Ezek a beállítások biztosítják, hogy a hűtőtornyok körüli háromdimenziós, tranziens áramlási és párolgási jelenségek modellezése a legfontosabb fizikai mechanizmusokat maradéktalanul megragadja, miközben a rendelkezésre álló számítási kapacitást hatékonyan használja fel.

Az alábbiakban a numerikus modell főbb beállításait foglaltuk össze, a megfelelő irodalmi hivatkozásokkal:

Peremfeltételek

- **Velocity Inlet (szél):** beáramló sebesség 4 m/s, 5 % turbulencia-intenzitás, 0,01 m hidraulikus átmérő megadásával.
- **Mass-Flow Inlet (vízgőz):** összesen 29,66 l/s H₂O-tömegáram, 100 % vízgőz komponensként; a vele együtt beáramló levegő tömegáramai 2·63,03 kg/s és 12·118,58 kg/s értékekkel lettek definiálva.
- **Pressure Outlet:** 0 Pa túlnyomás és 1 % backflow.
- **Wall:** standard, no-slip, adiabatikus falfeltétel.
- **Mass-Flow Outlet:** a kilépő levegő mért tömegáramait – 2·63,03 kg/s és 12·118,58 kg/s – külön outletként kezeltük

Solver és diszkretizáció

- **Solver:** nyomás-alapú, coupled algoritmus a sebesség- és nyomásmezők konzisztens integrálására.
- **Diszkrét séma:** másodrendű upwind minden transzportegyenletre a numerikus diffúzió minimalizálásához
- **Relaxációs tényezők:** nyomásra 0,3; koncentrációra 0,8; energiára 1,0

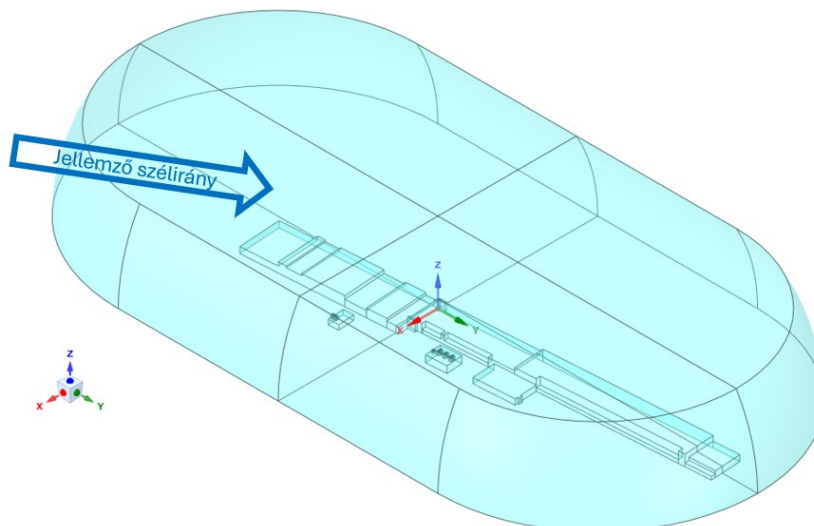
Konvergencia

- **Kritérium:** 10^{-4} reziduum [39].

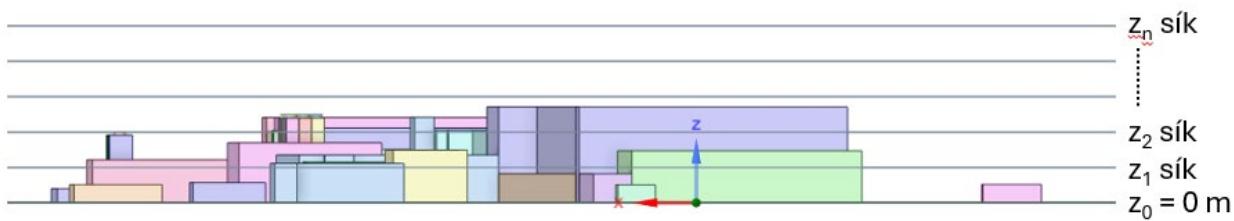
Az egyes hűtőtorony egységeket külön inlet- és outlet-feltételekkel modelleztük, így a vízgőz-levegő keverék környezeti terhelését és a visszakeveredést egyaránt figyelembe vettük. A toronyból kilépő közeg a környezet számára belépő mennyiségként jelenik meg, és a hőcserélőn történő áramlás következtében csökkenő lokális relatív páratartalom nehezíti a telítődés kialakulását.

A vizsgálathoz x-y-z irányoknak megfelelő síkokat használunk a különbözős számított jellemzők meghatározására. A z irányú földfelszínnel párhuzamos síkokat a 13. ábra szemlélteti. A 14. ábra a telekhatárt és a vizsgált szélirányt mutatja, kiemelve a hűtőtoronyok pozícióját. A hűtőtoronyokat a S3E1222-14QV esetén 0-11 és XES3E1222-07MAH esetén 0-1 sorszámmal láttuk el.

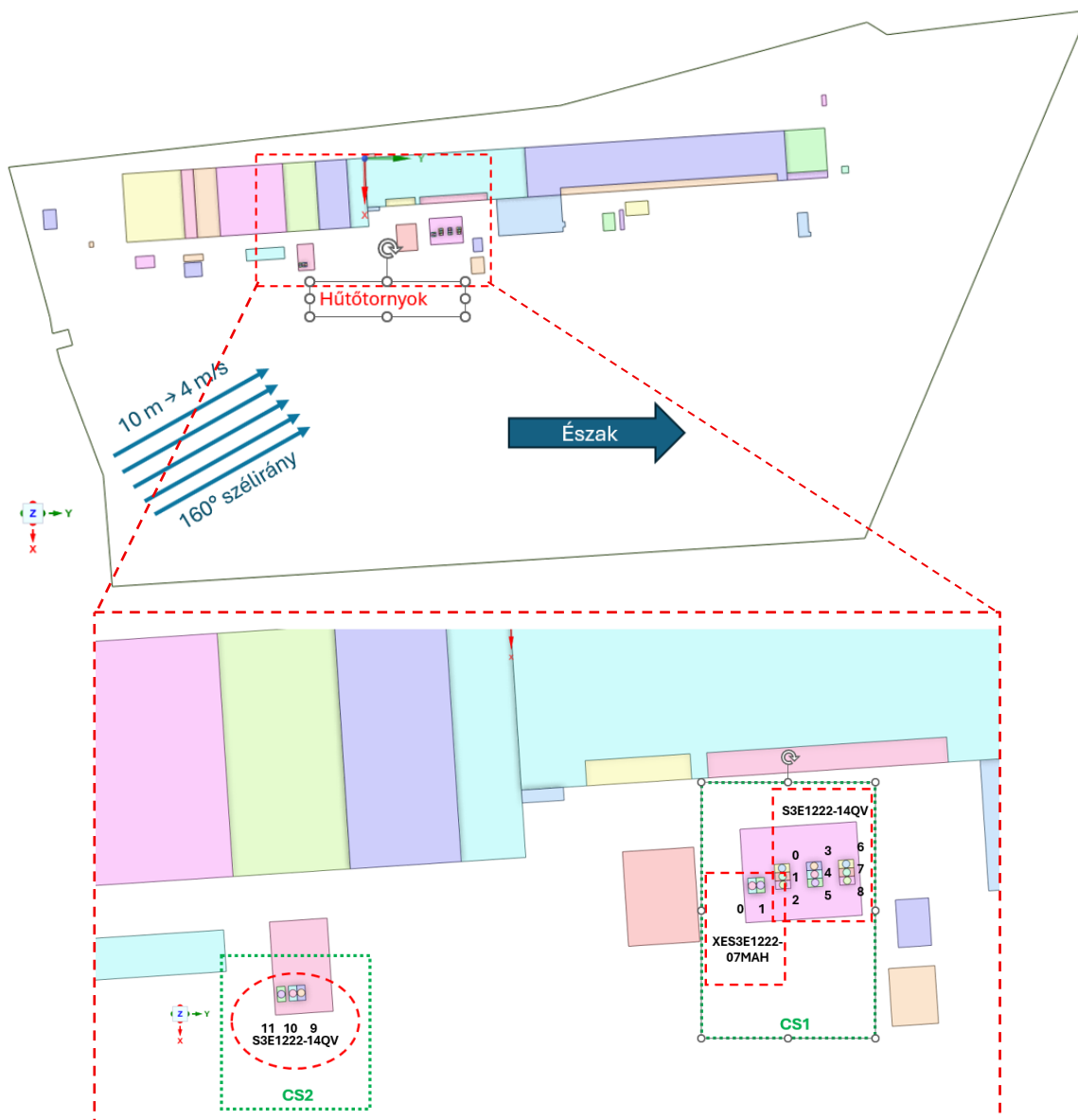
A teljes vizsgálati tartomány a 12. ábra szemlélteti. A tartomány alkalmas a teljes perem tetszőleges szélesség vagy profil előírására.



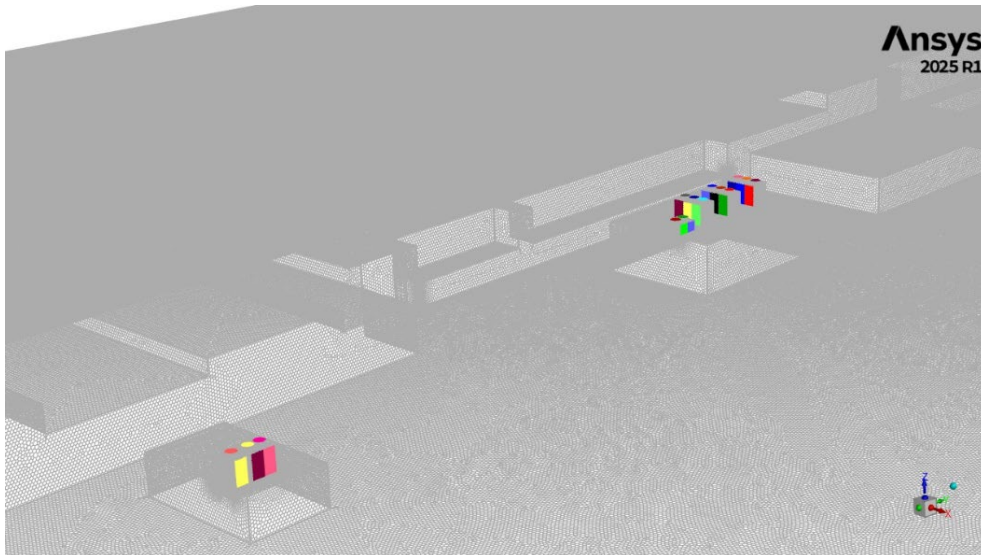
12. ábra: A vizsgálati domain kialakítása



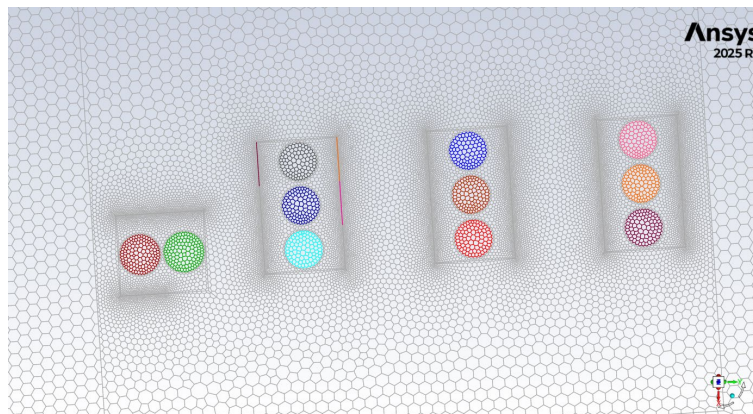
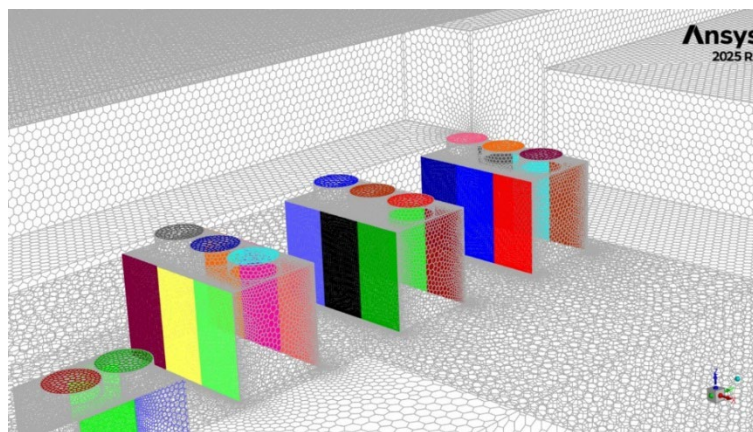
13. ábra: Épületkomplexum észak → dél irányú nézete és vizsglati síkok



14. ábra: Épületkomplexum felülnézete telekhatárral



15. ábra: Szemléltető ábra a cellafelosztásról (távlati kép)



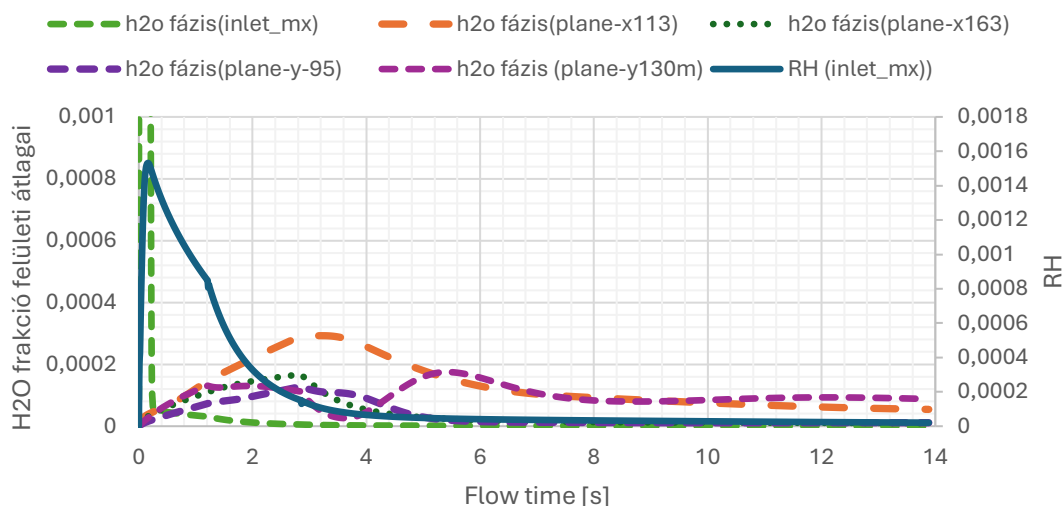
16. ábra: Szemléltető ábra a cellafelosztásról (hűtőtornyok)

A 15. ábra és 16. ábra a kialakított tartományi felosztást szemlélteti. A felosztásból jól látható, hogy a kibocsátási pontokban törekedtünk a lehető legkisebb cellák alkalmazására.

Eredmények értékelése

A numerikus szimuláció eredményeként a számítási tartomány egészére kiterjedően meghatározásra kerültek az áramlási tér minden releváns fizikai és származtatott mennyiségének értékei. A modellben alkalmazott egyenletek és peremfeltételek alapján részletes térbeli eloszlások álltak elő többek között a nyomás-, sebesség- és hőmérsékletmezőkre, valamint a komplexebb, számított paraméterekre is – ilyen például a relatív páratartalom (RH) és a levegőben megjelenő vízgőz

(H₂O) fajfrakciójának eloszlása, amit leginkább a vizsgálat lefutásának monitorozására használtunk.



17. ábra: Folyamatjelző a szimulációs változók értékének alakulásáról

A 17. ábra folyamatjellemzőket szemléltet, ami a számítási folyamat jellegét ábrázolja, amiről elmondható, hogy az eredmények a kezdeti kiinduló adatokból egy állandósult állapotba kerültek és így kiértékelésre alkalmas. (Többnyire a vizsgálat kezdeti szakasza nem alkalmas következtések levonására vagy eredmények kiértékelésére.)

Az eredmények értelmezése céljából több, metszeti sík mentén történt a vizsgált változók kiértékelése. Ezeket a síkokat a geometriai koordináta-rendszer szerint állítottuk be: a Z-tengely a magassági viszonyokat, az Y-tengely az északi irányt, míg az X-tengely a keleti irányt reprezentálja. A síkokat úgy helyeztük el, hogy a Z–Y–X irányú normálvektorral rendelkező felületeken vizsgálhasuk a vízgőz-koncentráció és egyéb változók térbeli kiterjedését és dinamikus viselkedését.

Az egyes vizsgálati síkok mentén különös figyelmet fordítottunk a hőmérséklet- és páratartalom-eloszlások alakulására, mivel ezek közvetlenül befolyásolják a kondenzáció és párolgás lokális feltételeit, valamint a kilépő pára környezeti hatásait. Az így nyert eredmények lehetővé teszik a fizikai folyamatok részletes feltárását, és alapot adnak a szimulációk validálásához vagy továbbfejlesztéséhez.

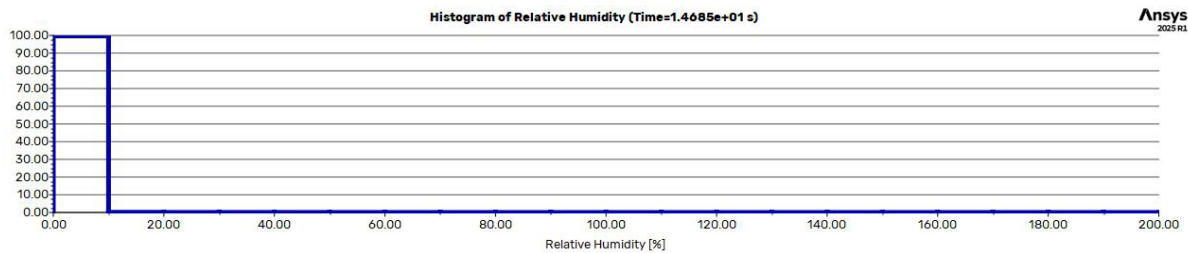
Ábramagyarázat – Vizsgált koordináta-síkok

A számítási tartomány térbeli kiértékelését három fő metszeti sík mentén végeztük, amelyek a geometriai koordináta-rendszerhez igazodva az alábbiak szerint kerültek definiálásra:

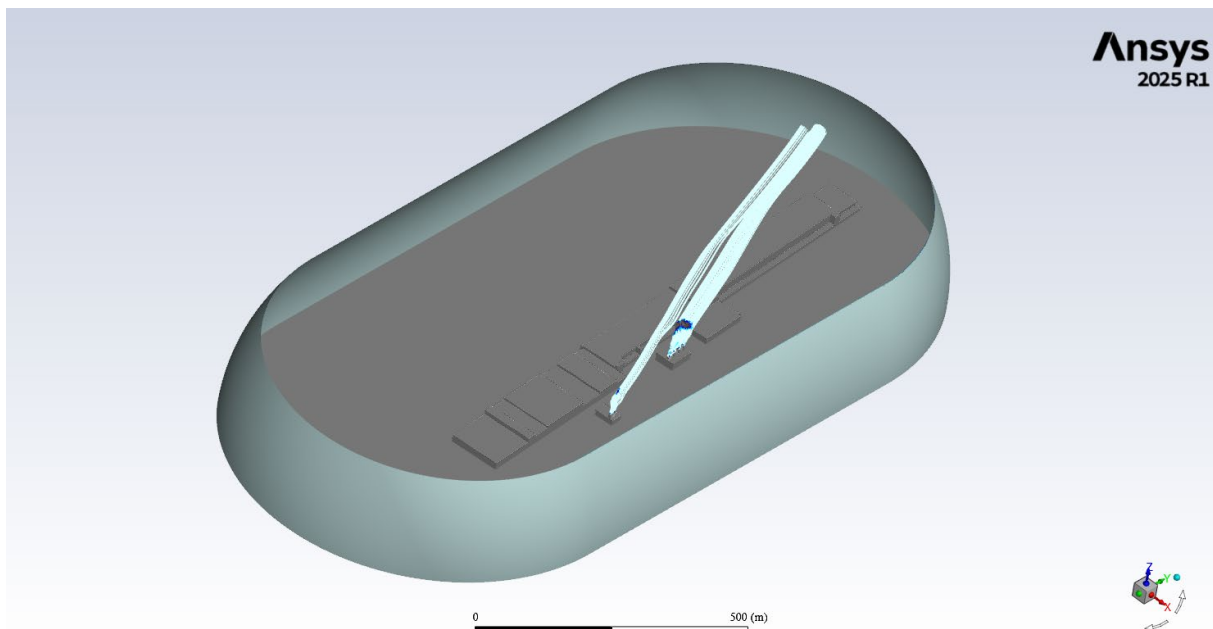
- **X–Y sík (Z = konstans):** ez a **vízszintes sík** a talajszint közelében fekvő eloszlásokat mutatja be. A kibocsátási pont körüli vízszintes terjedési mintázatot szemlélteti, és segít feltérképezni az oldalirányú hígulást, valamint a szél által elszállított közeget.
- **Z–X sík (Y = konstans):** ez a metszet a **függőleges-északi irányú** viszonyokat ábrázolja. Kiválóan alkalmas a vízgőz függőleges terjedésének és az északi irányban történő mozgásjellemzők vizsgálatára.
- **Z–Y sík (X = konstans):** ebben az esetben a **függőleges-keleti síkban** történik az áramlás és koncentrációváltozások megfigyelése. Az Y síkokhoz hasonlóan ezen keresztül követhető a keleti irányú terjedés, valamint a vertikális hő- és tömegtranszport.
- **Nyomvonalak:** A nyomvonalak olyan számított görbék, amelyek az áramlásban mozgó részecskék pillanatnyi sebességmező mentén történő elmozdulását ábrázolják az idő függvényében. Ezeket az útvonalakat jellemzően egy előre definiált kiindulási felületre vagy térfogatelemre bocsátott, tömegnélküli részecskék követésével határozzuk meg. A

nyomvonalak tehát **az adott időpillanatban uralkodó sebességmező mentén** haladnak, és vizuálisan jól szemléltetik az áramlás irányát és jellegét. Fontos megjegyezni, hogy a nyomvonalak **nem képesek teljes mértékben visszaadni az áramlás keveredési jellemzőit**, mivel nem mutatják meg azokat a környező részecskéket vagy molekulákat, amelyek keresztezik vagy diffúzió révén belépnek a nyomvonalak által kijelölt zónába. A valódi keveredési folyamat – különösen turbulens vagy diffúzív viszonyok mellett – jóval összetettebb, és csak további modellezéssel (pl. fajkoncentráció vagy paszszív skalár mezők elemzésével) írható le részletesen [40]

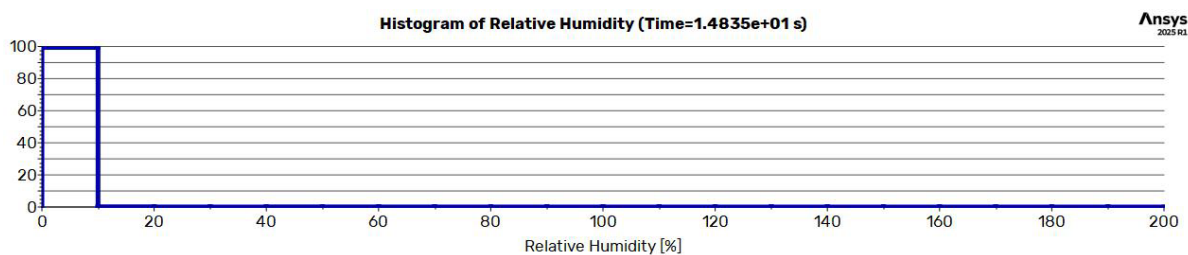
A számított értékek közül megvizsgáltuk a teljes tartomány (domain) határain kialakuló relatív páratartalom (RH) eloszlását és a felületen lévő elemi cellákhoz tartozó hisztogramot. A szimulációból származó adatok alapján a hisztogram jól szemlélteti, hogy a nincs a távoli terekben esőcsepp képződésre alkalmas gőz. Az eloszlást a 19. ábra - 21. ábra szemlélteti.



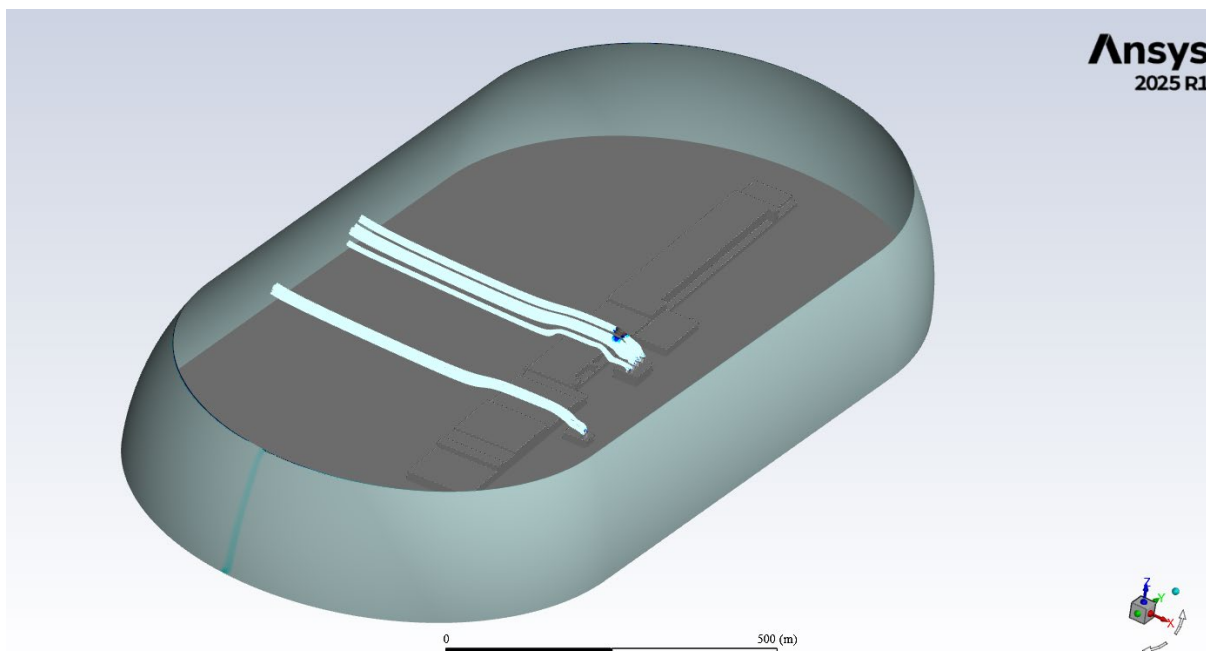
18. ábra: A tartomány peremeit elhagyó közeg relatív páratartalmának hisztogramja $\alpha = 160^\circ$



19. ábra: A tartomány peremeit elhagyó közeg relatív páratartalmának eloszlása $\alpha = 160^\circ$

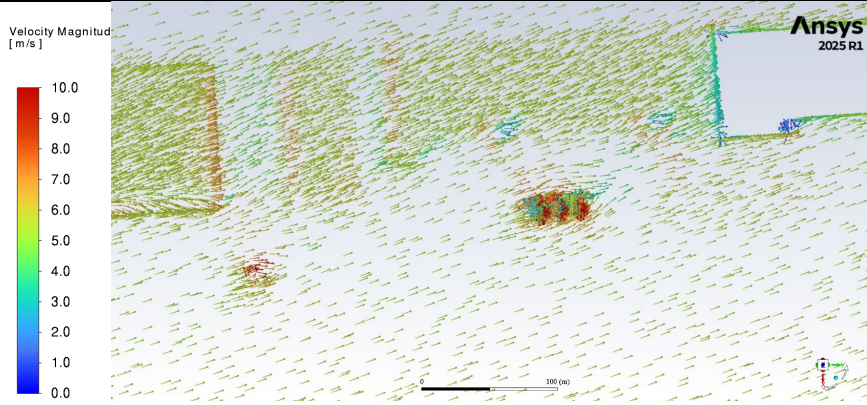
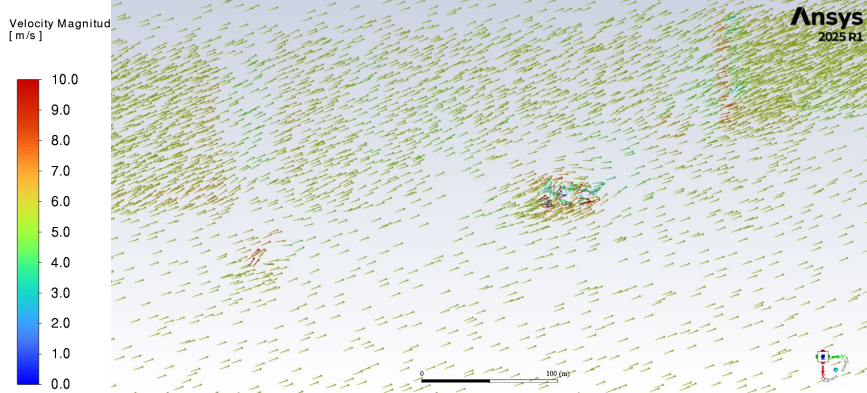


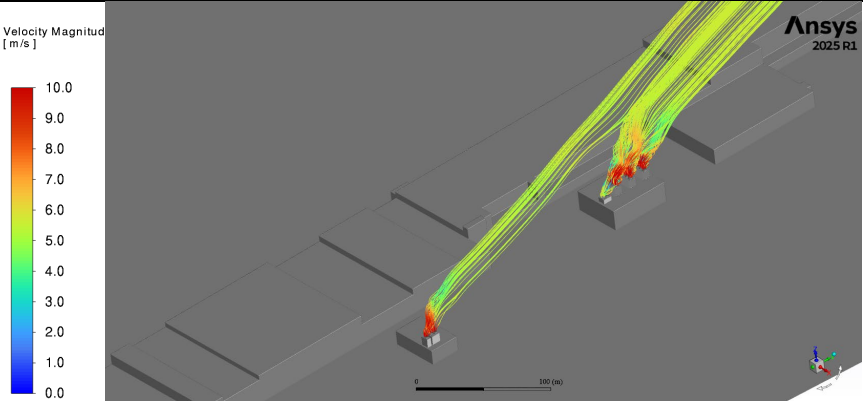
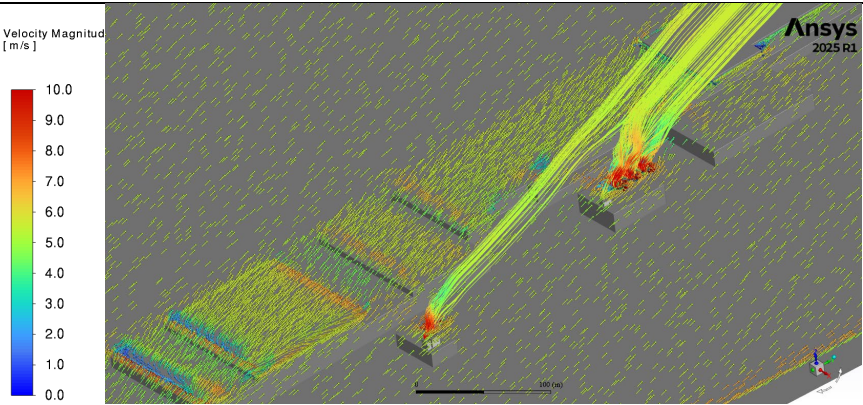
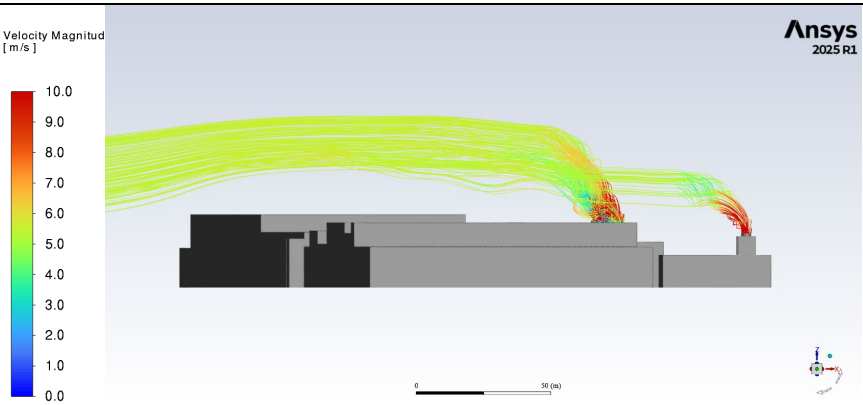
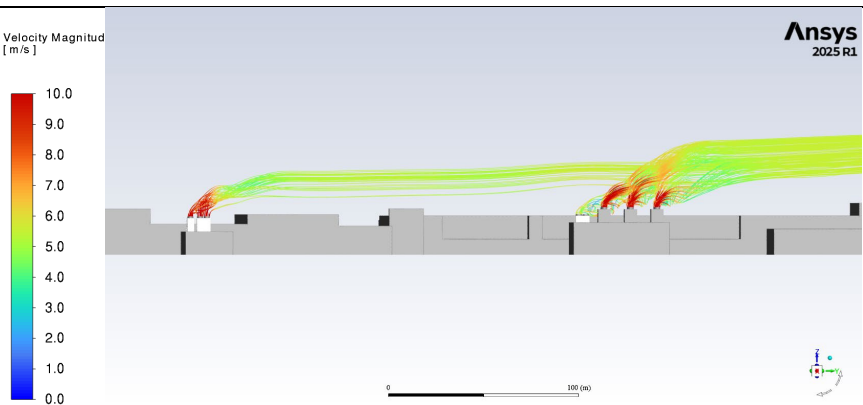
20. ábra: A tartomány peremeit elhagyó közeg relatív páratartalmának hisztogramja $\alpha = 90^\circ$



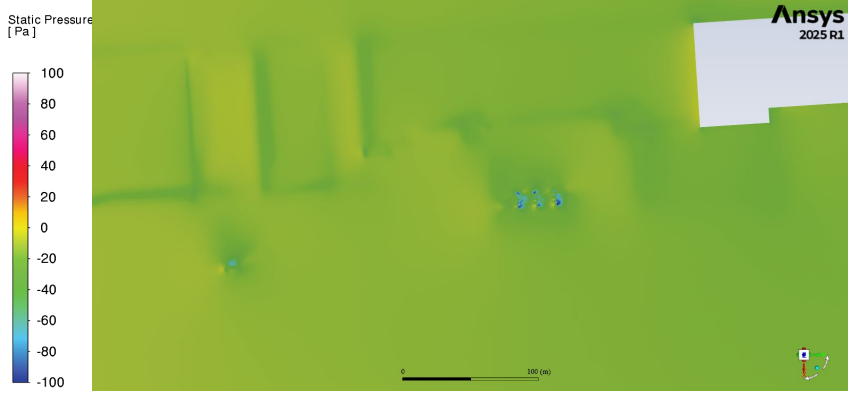
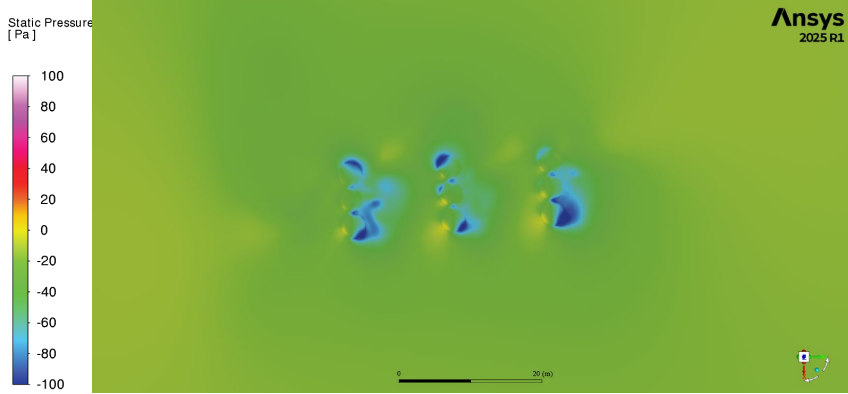
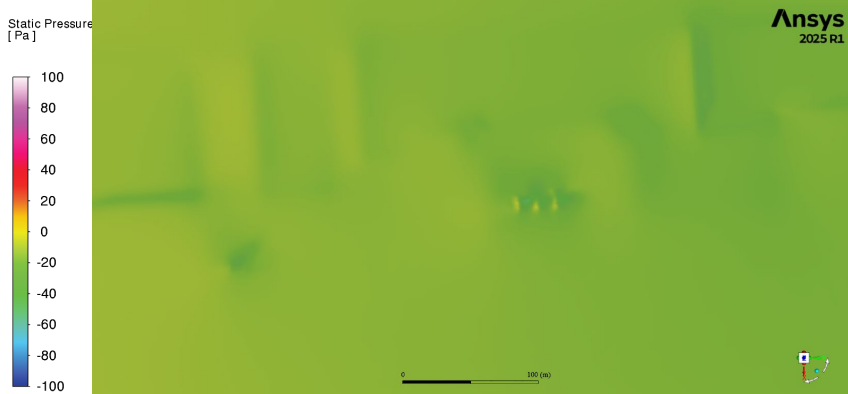
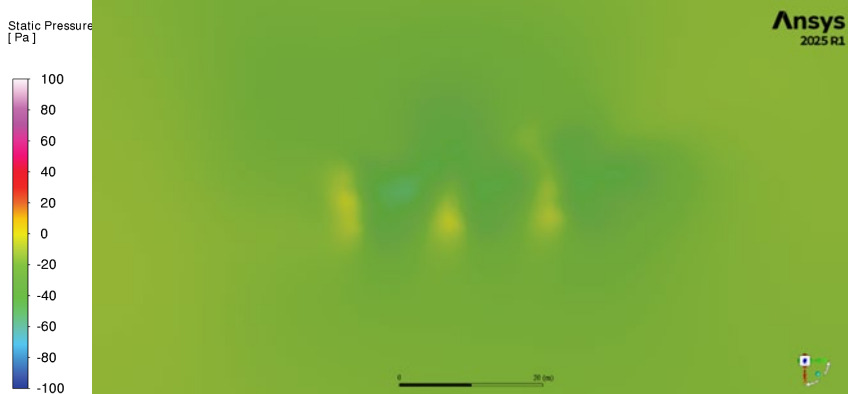
21. ábra: A tartomány peremeit elhagyó közeg relatív páratartalmának eloszlása $\alpha = 90^\circ$

Sebességeloszlás $\alpha = 160^\circ$

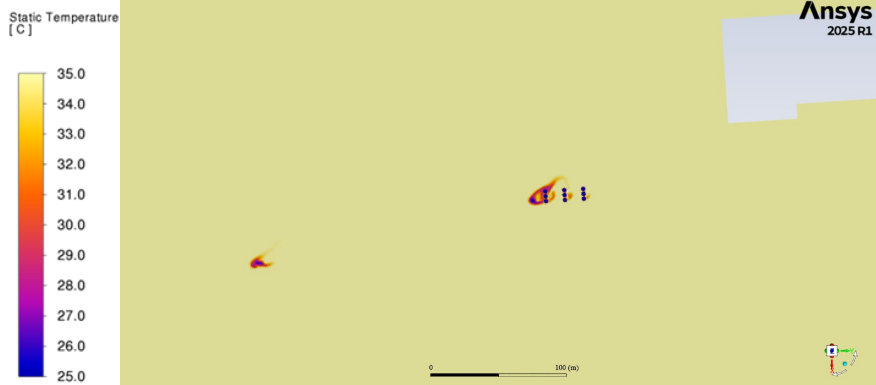
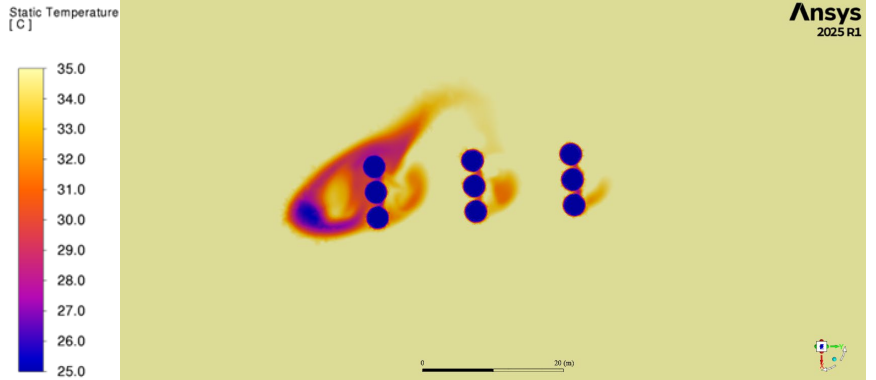
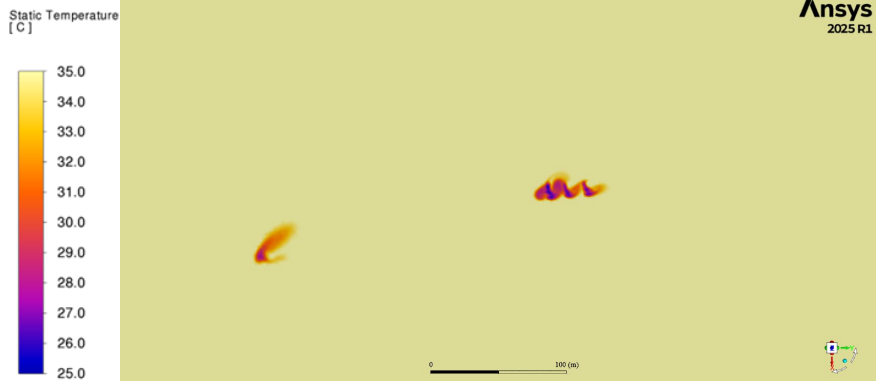
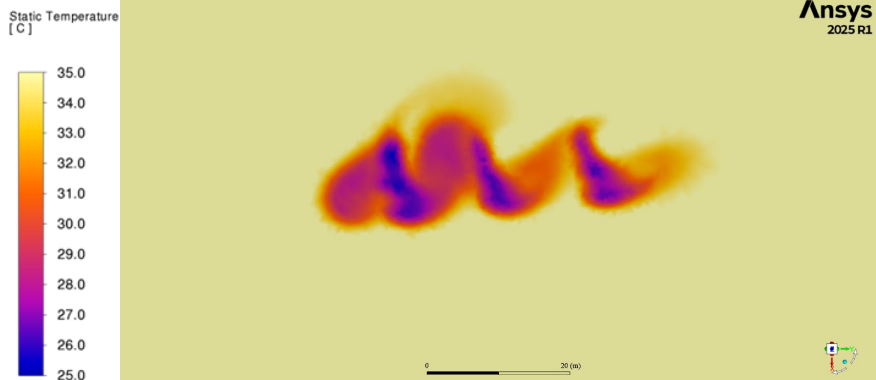
Eloszlás		Megjegyzés
		<p>Sík: $z = 25$ m</p> <p>A két hűtőtorony csoport környezetében kialakuló sebességmező</p>
		<p>Sík: $z = 30$ m</p> <p>A két hűtőtorony csoport környezetében kialakuló sebességmező</p>

Eloszlás	Megjegyzés
 <p>Velocity Magnitud [m/s]</p> <p>10.0 9.0 8.0 7.0 6.0 5.0 4.0 3.0 2.0 1.0 0.0</p> <p>0 100 (m)</p> <p>ANSYS 2025 R1</p>	<p>Izometrikus térbeli nézet</p> <p>A két hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala.</p>
 <p>Velocity Magnitud [m/s]</p> <p>10.0 9.0 8.0 7.0 6.0 5.0 4.0 3.0 2.0 1.0 0.0</p> <p>0 100 (m)</p> <p>ANSYS 2025 R1</p>	<p>Izometrikus térbeli nézet és z = 25 m</p> <p>A két hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala és a környezetében kialakuló sebességmező.</p>
 <p>Velocity Magnitud [m/s]</p> <p>10.0 9.0 8.0 7.0 6.0 5.0 4.0 3.0 2.0 1.0 0.0</p> <p>0 50 (m)</p> <p>ANSYS 2025 R1</p>	<p>Déli nézet</p> <p>A két hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala és a környezetében kialakuló sebességmező.</p>
 <p>Velocity Magnitud [m/s]</p> <p>10.0 9.0 8.0 7.0 6.0 5.0 4.0 3.0 2.0 1.0 0.0</p> <p>0 100 (m)</p> <p>ANSYS 2025 R1</p>	<p>Keleti nézet</p> <p>A két hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala és a környezetében kialakuló sebességmező.</p>

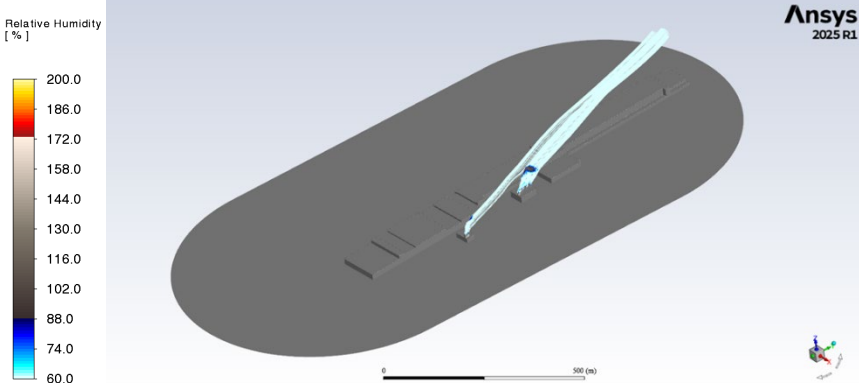
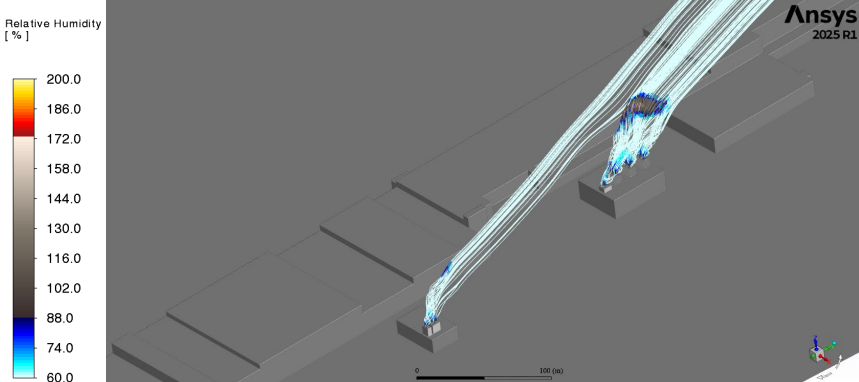
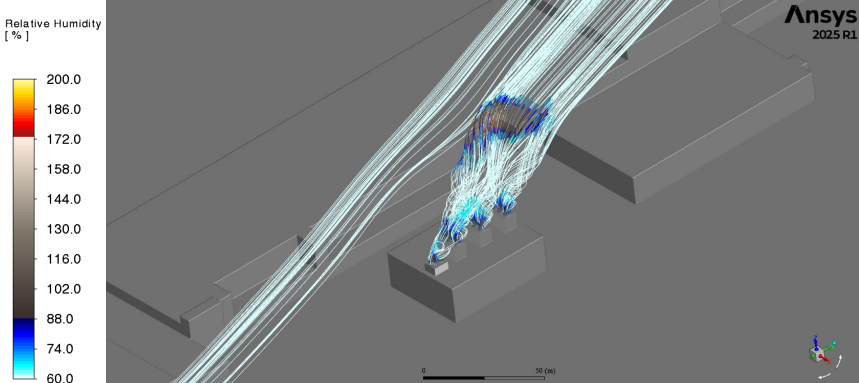
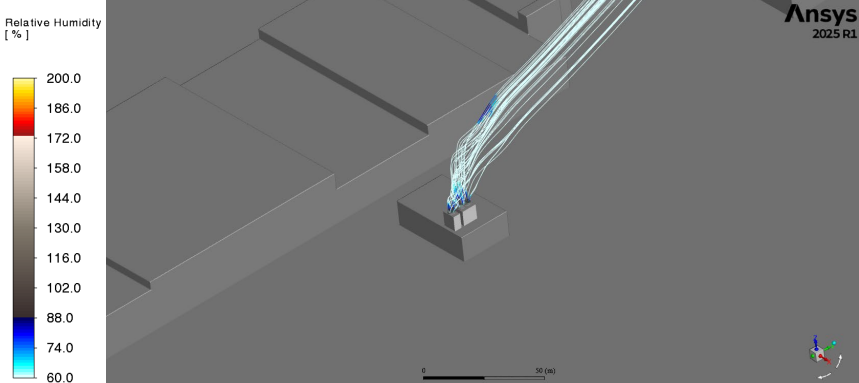
Nyomáseloszlás $\alpha = 160^\circ$

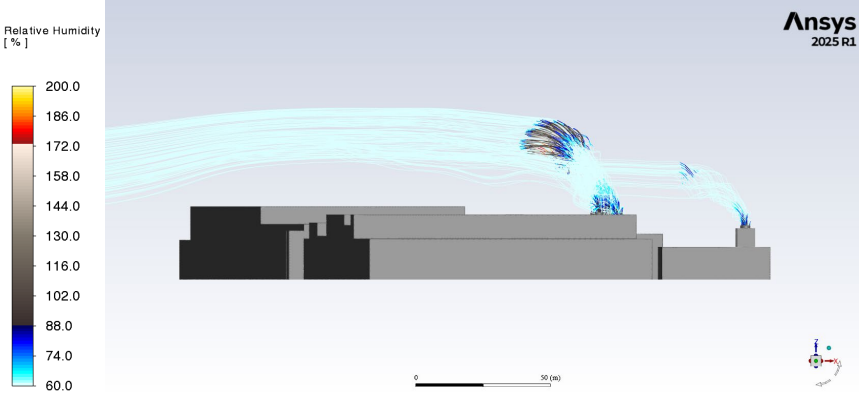
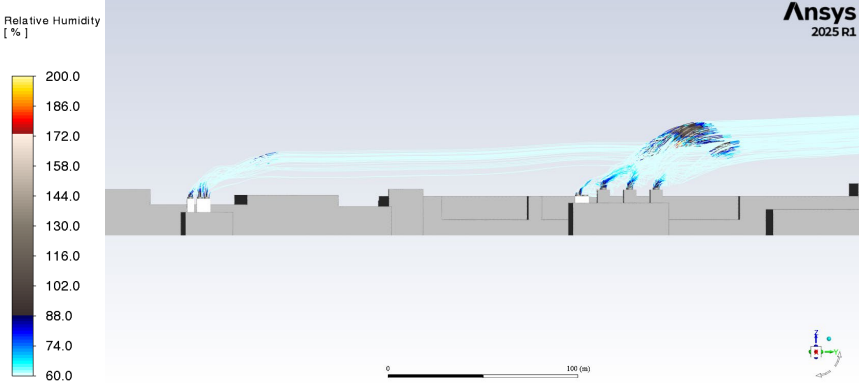
Eloszlás	Megjegyzés
	<p>Sík: z = 25 m</p> <p>A két hűtőtorony csoport környezetében kialakuló nyomáseloszlás</p>
	<p>Sík: z = 25 m</p> <p>Az 11db-os hűtőtorony csoport környezetében kialakuló nyomáseloszlás</p>
	<p>Sík: z = 30 m</p> <p>A két hűtőtorony csoport környezetében kialakuló nyomáseloszlás</p>
	<p>Sík: z = 30 m</p> <p>Az 11db-os hűtőtorony csoport környezetében kialakuló nyomáseloszlás</p>

Hőmérsékleteloszlás $\alpha = 160^\circ$

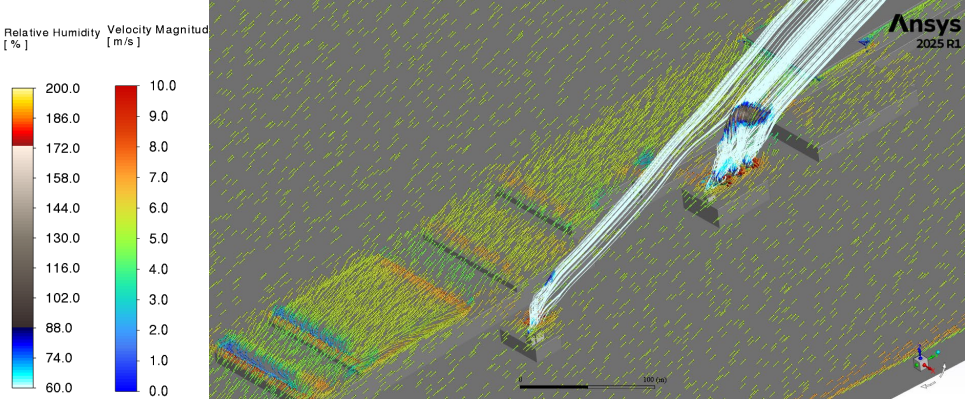
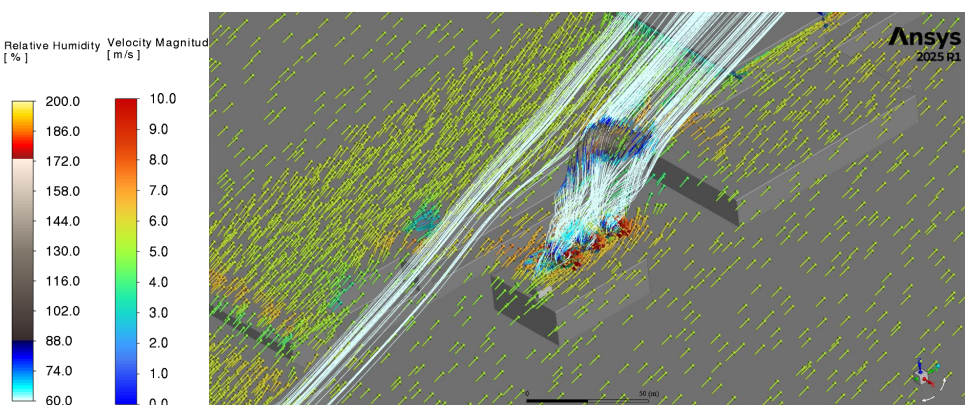
Eloszlás	Megjegyzés
	<p>Sík: z = 25 m</p> <p>A két hűtőtorony csoport környezetében kialakuló hőmérsékleteloszlás</p>
	<p>Sík: z = 25 m</p> <p>Az 11 db-os hűtőtorony csoport környezetében kialakuló hőmérsékleteloszlás</p>
	<p>Sík: z = 30 m</p> <p>A két hűtőtorony csoport környezetében kialakuló hőmérsékleteloszlás</p>
	<p>Sík: z = 30 m</p> <p>Az 11 db-os hűtőtorony csoport környezetében kialakuló hőmérsékleteloszlás</p>

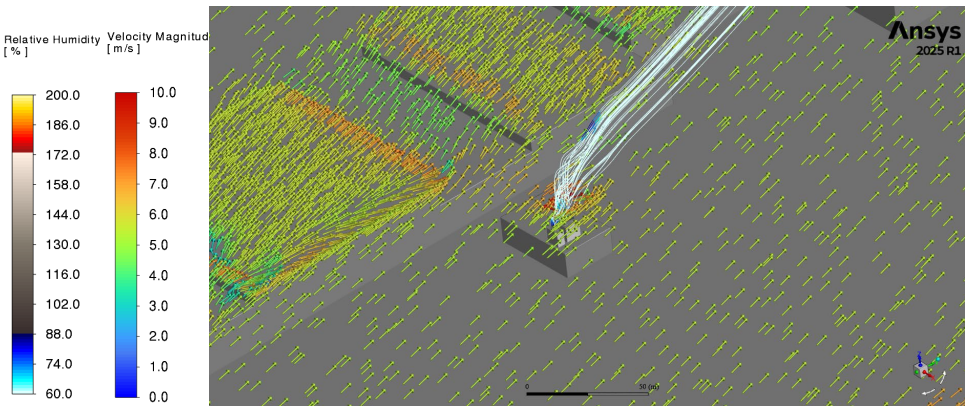
Relatív páratartalom $\alpha = 160^\circ$

Eloszlás	Megjegyzés
	<p>Izometrikus térbeli nézet</p> <p>A két hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala, melyen a relatív páratartalom változása látható</p>
	<p>Izometrikus térbeli nézet (közeli)</p> <p>A két hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala, melyen a relatív páratartalom változása látható</p>
	<p>Izometrikus térbeli nézet (közeli)</p> <p>A 11db-os hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala, melyen a relatív páratartalom változása látható</p>
	<p>Izometrikus térbeli nézet (közeli)</p> <p>A 3db-os hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala, melyen a relatív páratartalom változása látható</p>

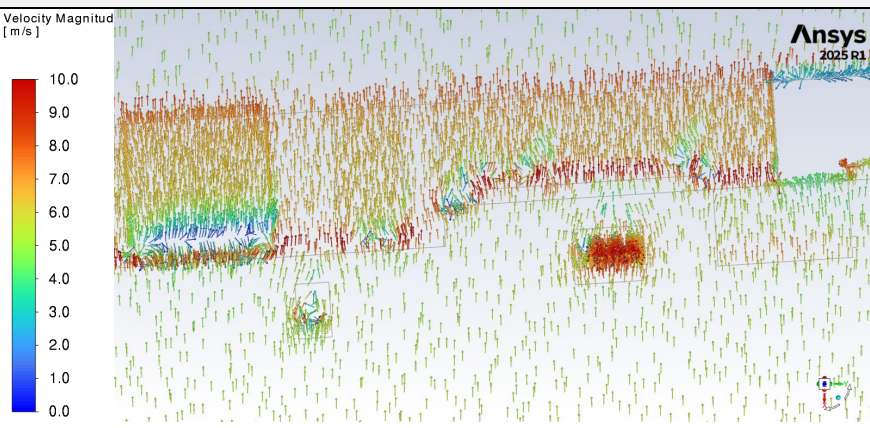
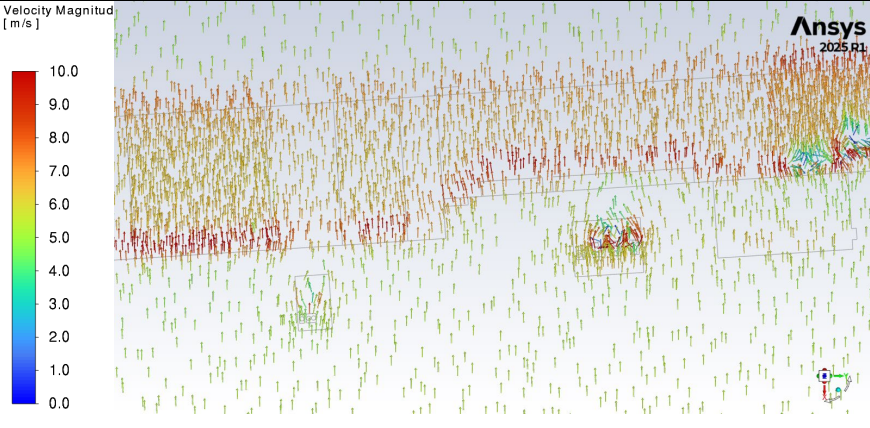
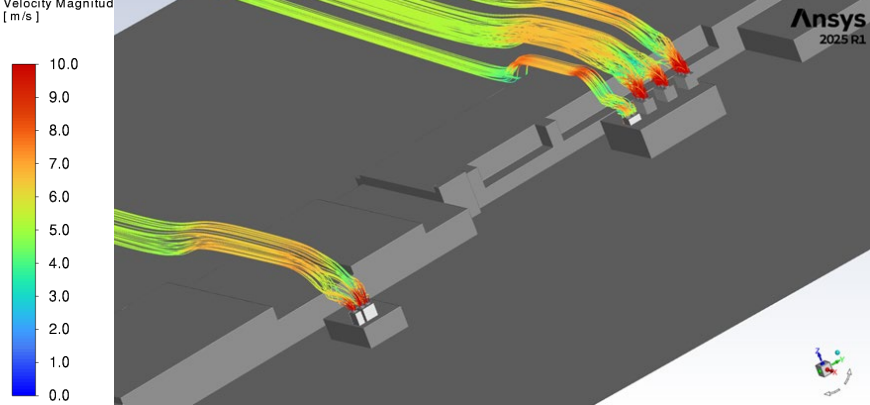
Eloszlás		Megjegyzés
		<p>Déli nézet</p> <p>A két hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala melyen jól látható a relatív páratartalom változása.</p>
		<p>Keleti nézet</p> <p>A két hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala melyen jól látható a relatív páratartalom változása</p>

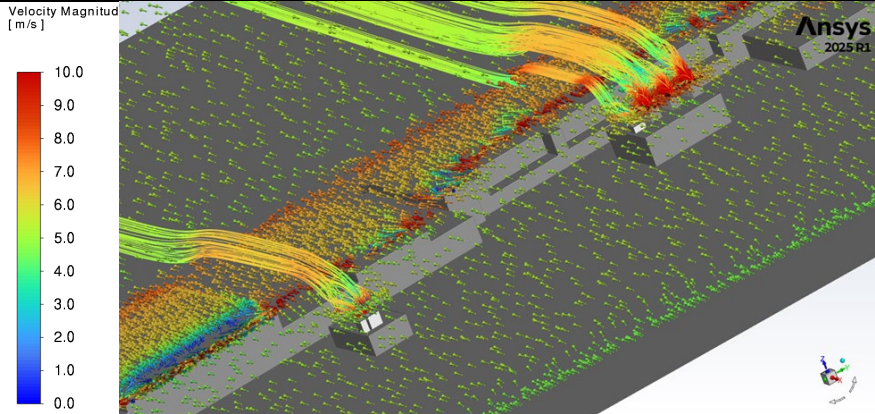
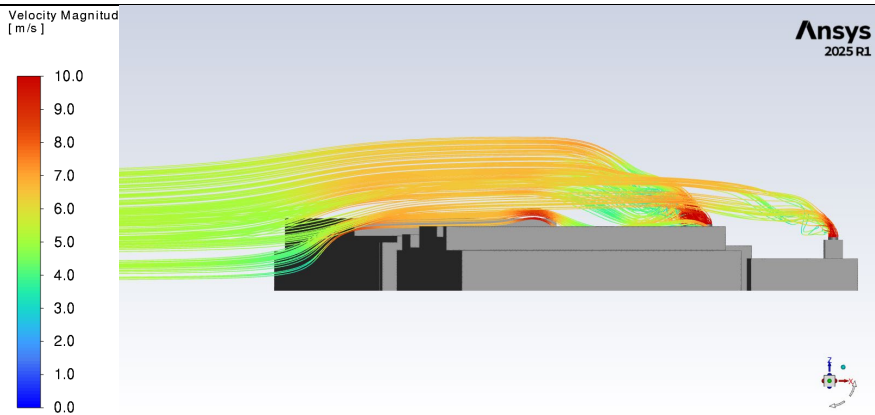
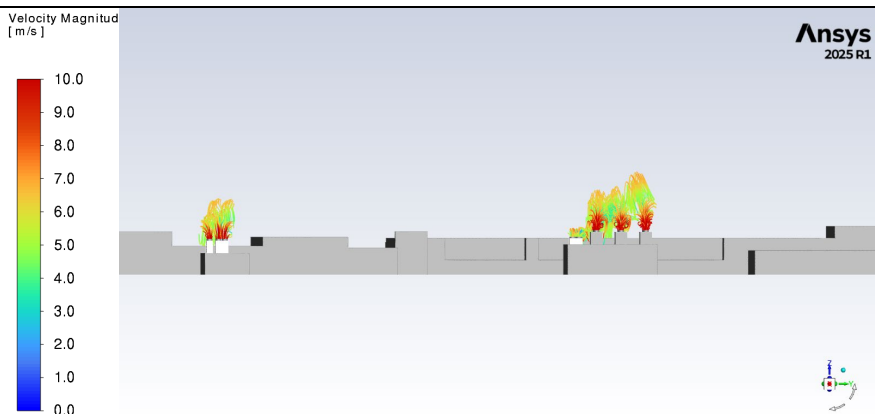
Relatív páratartalom és sebességeloszlás $\alpha = 160^\circ$

Eloszlás		Megjegyzés
		<p>Izometrikus térbeli nézet és z = 25 m sík</p> <p>A hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala- kon jól látható a relatív páratartalom alakulása va- lamint a környező sebességeloszlás a z síkban</p>
		<p>Izometrikus térbeli nézet és z = 25 m sík</p> <p>A 11db-os hűtőtorony csoportot el- hagyó közeg nyomvonala- kon jól látható a relatív páratartalom ala- kulása valamint a környező sebes- ségeloszlás a z síkban</p>

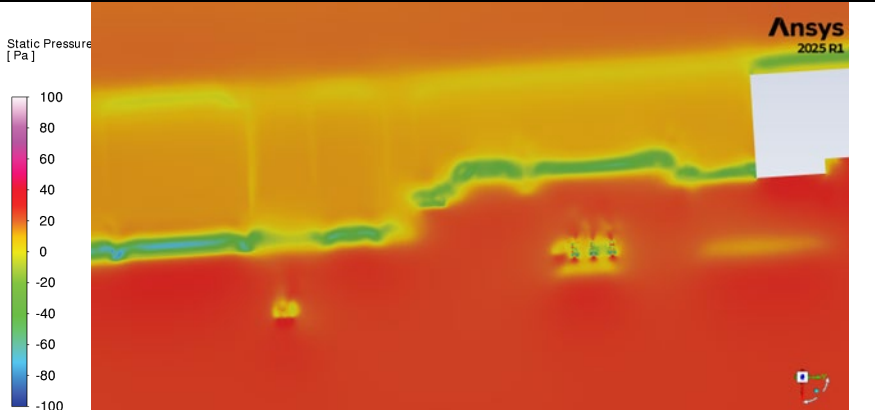
Eloszlás	Megjegyzés
	<p>Izometrikus térbeli nézet és z = 25 m sík</p> <p>A 3db-os hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonalakon jól látható a relatív páratartalom alakulása valamint a környező sebességeloszlás a z síkban</p>

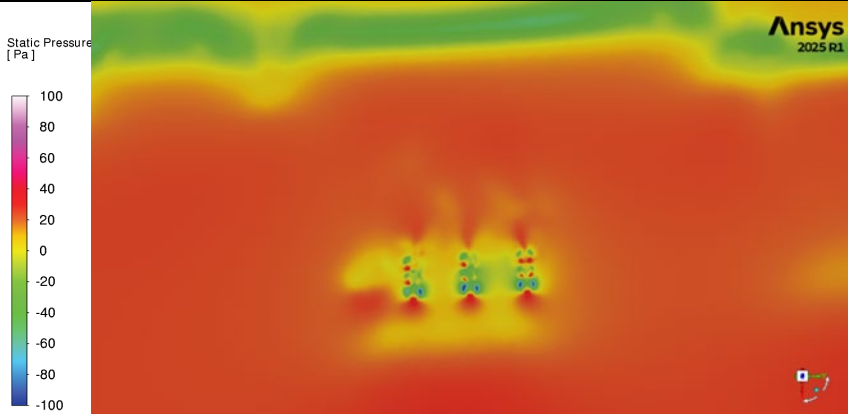
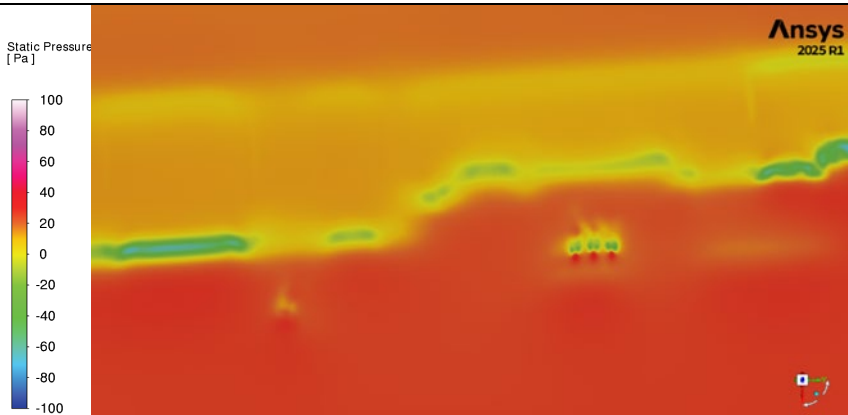
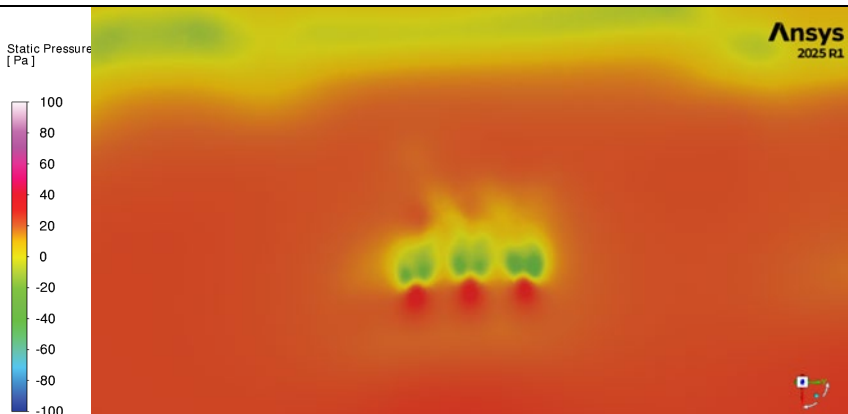
Sebességeloszlás $\alpha = 90^\circ$

Eloszlás	Megjegyzés
	<p>Sík: z = 25 m</p> <p>A két hűtőtorony csoport környezetében kialakuló sebességmező</p>
	<p>Sík: z = 30 m</p> <p>A két hűtőtorony csoport környezetében kialakuló sebességmező</p>
	<p>Izometrikus térbeli nézet</p> <p>A két hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala.</p>

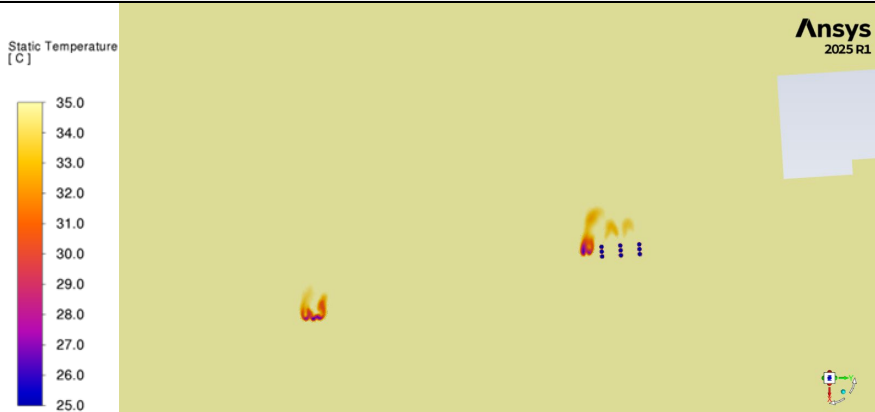
Eloszlás	Megjegyzés
 <p>Velocity Magnitud [m/s]</p> <p>10.0 9.0 8.0 7.0 6.0 5.0 4.0 3.0 2.0 1.0 0.0</p> <p>Ansys 2025 R1</p>	<p>Izometrikus térbeli nézet és z = 25 m</p> <p>A két hűtőtorny csoportot elhagyó közeg nyomvonala és a környezetében kialakuló sebességmező.</p>
 <p>Velocity Magnitud [m/s]</p> <p>10.0 9.0 8.0 7.0 6.0 5.0 4.0 3.0 2.0 1.0 0.0</p> <p>Ansys 2025 R1</p>	<p>Déli nézet</p> <p>A két hűtőtorny csoportot elhagyó közeg nyomvonala és a környezetében kialakuló sebességmező.</p>
 <p>Velocity Magnitud [m/s]</p> <p>10.0 9.0 8.0 7.0 6.0 5.0 4.0 3.0 2.0 1.0 0.0</p> <p>Ansys 2025 R1</p>	<p>Keleti nézet</p> <p>A két hűtőtorny csoportot elhagyó közeg nyomvonala és a környezetében kialakuló sebességmező.</p>

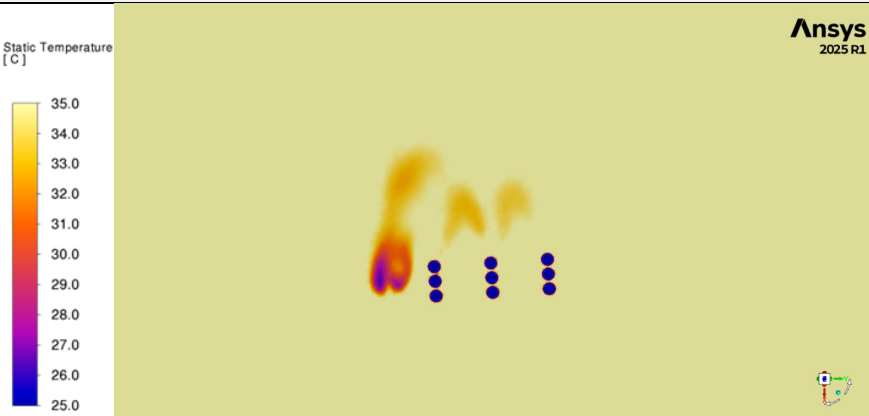


Nyomáseloszlás $\alpha = 90^\circ$

Eloszlás	Megjegyzés
 <p>Static Pressure [Pa]</p> <p>100 80 60 40 20 0 -20 -40 -60 -80 -100</p> <p>Ansys 2025 R1</p>	<p>Sík: z = 25 m</p> <p>A két hűtőtorny csoport környezetében kialakuló nyomáseloszlás</p>

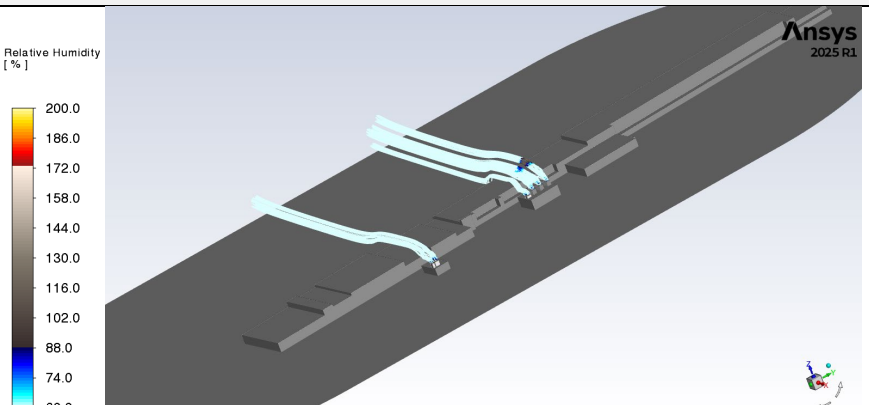
Eloszlás	Megjegyzés
	<p>Sík: z = 25 m</p> <p>Az 11db-os hűtőtorony csoport környezetében kialakuló nyomáseloszlás</p>
	<p>Sík: z = 30 m</p> <p>A két hűtőtorony csoport környezetében kialakuló nyomáseloszlás</p>
	<p>Sík: z = 30 m</p> <p>Az 11db-os hűtőtorony csoport környezetében kialakuló nyomáseloszlás</p>

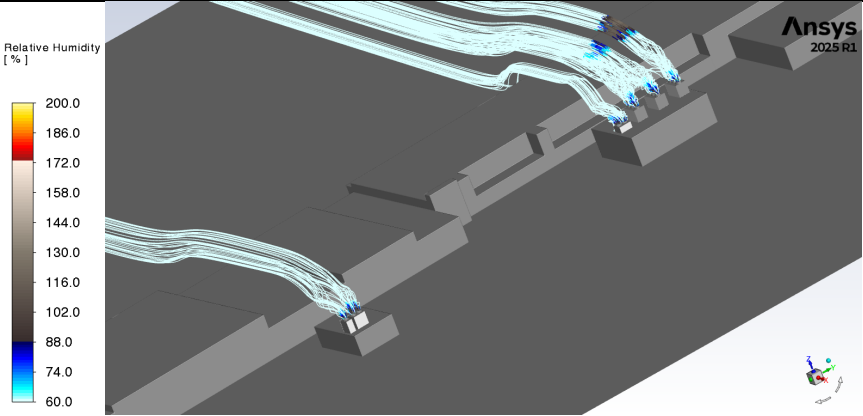
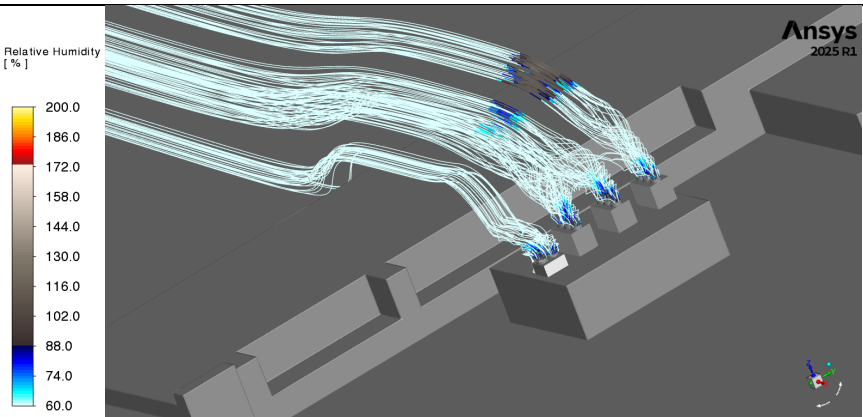
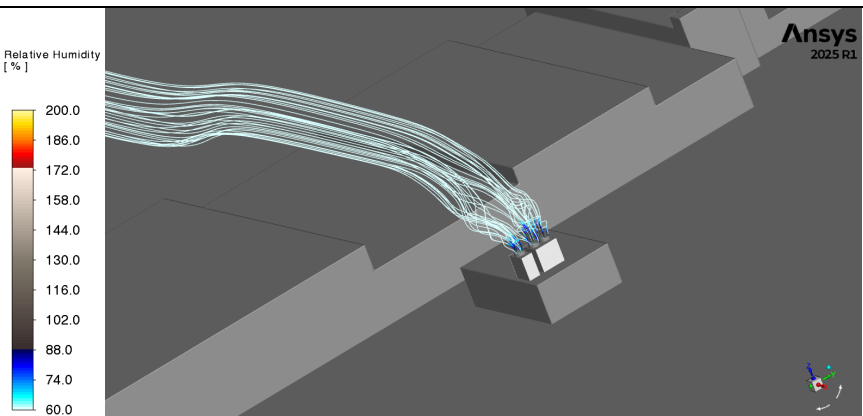
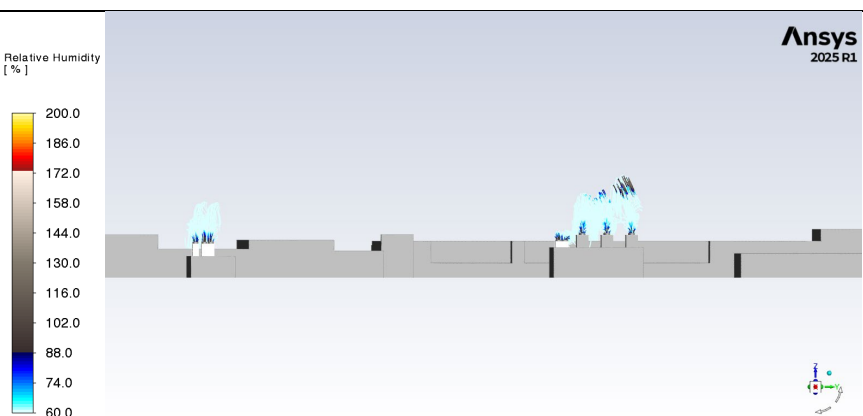
Hőmérsékleteloszlás $\alpha = 90^\circ$

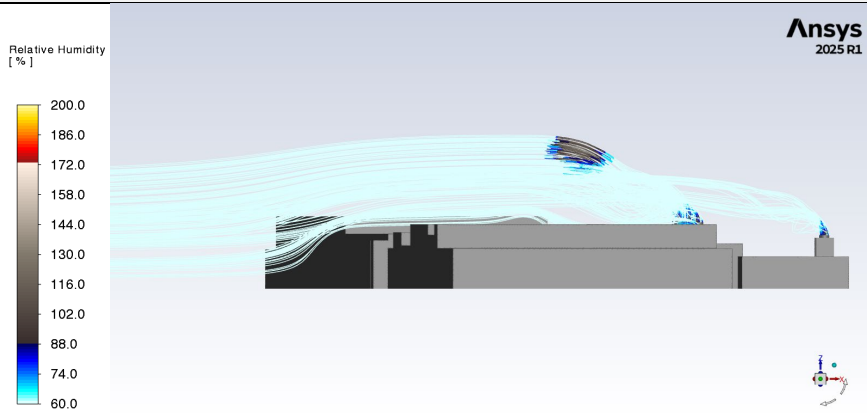
Eloszlás	Megjegyzés
	<p>Sík: z = 25 m</p> <p>A két hűtőtorony csoport környezetében kialakuló hőmérsékleteloszlás</p>

Eloszlás		Megjegyzés
		<p>Sík: z = 25 m</p> <p>Az 11 db-os hűtőtorony csoport környezetében kialakuló hőmérsékleteloszlás</p>
		<p>Sík: z = 30 m</p> <p>A két hűtőtorony csoport környezetében kialakuló hőmérsékleteloszlás</p>
		<p>Sík: z = 30 m</p> <p>Az 11 db-os hűtőtorony csoport környezetében kialakuló hőmérsékleteloszlás</p>

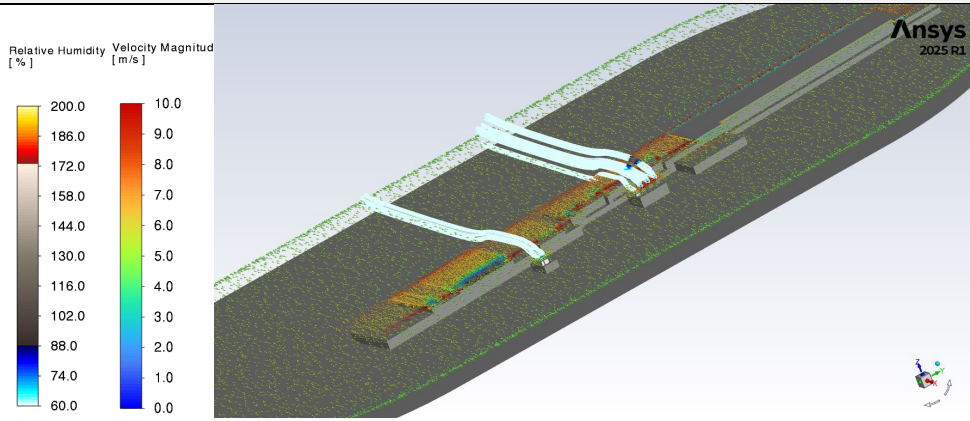
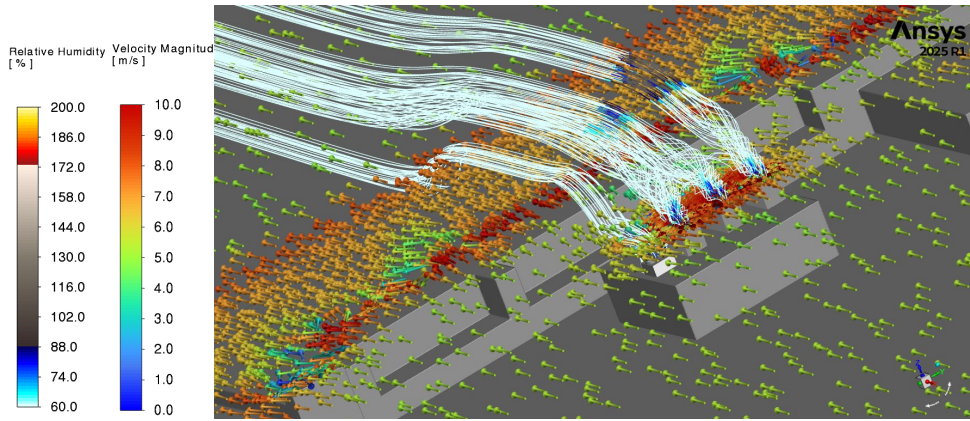
Relatív páratartalom $\alpha = 90^\circ$

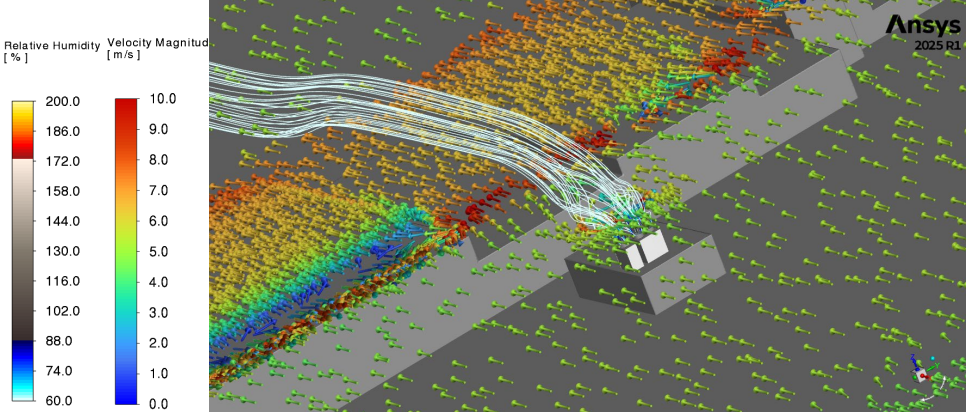
Eloszlás		Megjegyzés
		<p>Izometrikus térbeli nézet</p> <p>A két hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala, melyen a relatív páratartalom változása látható</p>

Eloszlás	Megjegyzés
	<p>Izometrikus térbeli nézet (közeli)</p> <p>A két hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala, melyen a relatív páratartalom változása látható</p>
	<p>Izometrikus térbeli nézet (közeli)</p> <p>A 11db-os hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala, melyen a relatív páratartalom változása látható</p>
	<p>Izometrikus térbeli nézet (közeli)</p> <p>A 3db-os hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala, melyen a relatív páratartalom változása látható</p>
	<p>Déli nézet</p> <p>A két hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala melyen jól látható a relatív páratartalom változása.</p>

Eloszlás	Megjegyzés
	<p>Keleti nézet</p> <p>A két hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonala melyen jól látható a relatív páratartalom változása</p>

Relatív páratartalom és sebességeloszlás $\alpha = 90^\circ$

Eloszlás	Megjegyzés
	<p>Izometrikus térbeli nézet és z = 25 m sík</p> <p>A hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonalakon jól látható a relatív páratartalom alakulása valamint a környező sebességeloszlás a z síkban</p>
	<p>Izometrikus térbeli nézet és z = 25 m sík</p> <p>A 11db-os hűtőtorony csoportot elhagyó közeg nyomvonalakon jól látható a relatív páratartalom alakulása valamint a környező sebességeloszlás a z síkban</p>

Eloszlás		Megjegyzés
		<p>Izometrikus tér- beli nézet és z = 25 m sík</p> <p>A 3db-os hűtőto- rony csoportot el- hagyó közeg nyomvonalakon jól látható a relatív páratartalom ala- kulása valamint a környező sebes- ségeloszlás a z síkban</p>

Összefoglalás

A tanulmány célja a fejlesztési területen elhelyezésre kerülő Baltimore AirCoil (BAC) típusú hűtőtoronyok vízpára-kibocsátásának és ennek környezetre gyakorolt hatásának részletes vizsgálata volt, különös tekintettel a lokális mikroklíma módosulására. A munka során analitikus számításokat és numerikus szimulációs módszereket – különösen az ANSYS Fluent Species Transport modelljét – alkalmaztuk a kibocsátott vízgőz diffúziójának, hígulásának és potenciális kondenzációjának elemzésére.

A numerikus szimulációt részletes, nagy felbontású hálóval és alkalmas fizikai modell alkalmazással végeztük, beleértve a többfázisú diffúziós áramlás modelleket, szélprofilot, valamint a transziens (időben változó) viselkedés szimulációját. A modell segítségével a relatív páratartalom térbeli és időbeli változását is ábrázoltuk.

A vizsgálatnál alapvető feltételezéssel éltünk és vizsgáltuk, hogy a hűtőtoronyok vízpárát fognak kibocsátani, azok a lokális hőmérséklet emelkedést okoznak, illetve mikroklimatikus hatásokat eredményeznek.

A vizsgálat két különböző üzemi teljesítményű BAC hűtőtorony több egységből álló együttese alapján történt (összesen 14db), amelyek együttesen 17,796 kg/s vízpárát juttatnak a környezetbe. Az ehhez tartozó légáram összes tömegárama ~1014 kg/s volt, amely lehetővé teszi a vízpára gyors keveredését és terjedését a környező levegőben.

A szimuláció meteorológiai peremfeltételeit egy valós, 2021-es mérési adatsor adta, ahol a vizsgált esetben a környezeti hőmérséklet 30 °C, a szélesség 4 m/s, és a relatív páratartalom 69% volt. Ezzel egy átlagos forgatókönyv került modellezésre.

Vizsgáltuk a párolgásból származó látens hő környezetre gyakorolt hatását. A számítások alapján a pontforrástól távolodva 100m távolságban $\Delta T < 0,2^\circ\text{C}$ hőmérséklet növekedést prognosztizálunk, ami a távolság növekedésével tovább csökken. A hőmérséklet növekedésével kapcsolatos számítás során nem számoltunk a hígulás mértékével, mely a környezetre gyakorolt hatásokat tovább csökkentené.

Diszperziós számításokat végeztünk a vízpára környezetre gyakorolt hatásával kapcsolatban, vizsgálva a szélhatást és a bekeverés mértékét is. A páratartalom értéke a kibocsátás pillanatában maga, ami egyérelműen kondenzációt eredményez. Ennek egy része feltételezhetően a hűtőtoronyba visszacsurog, azonban a számítás során ezzel nem számoltunk, pedig a környezet terhelését csökkentené. Ellenben a modell számítások alapján 30 m távolságban 1m/s szélesség mellett, már 60% környezeti páratartalom esetén is $RH < 100\%$ értékre csökkent. Természetesen azokban az esetekben, amikor a környezeti páratartalom magas és a toronyok által kibocsátott pára elhanyagolható, főleg nyári időszakban akkor a kibocsátás a környezeti páratartalom értékét nem befolyásolja. Ezért van az, hogy nyáron $RH = 60\%$ környezeti páratartalom mellett nem történik számottevő páratartalom növekedés.

A numerikus szimuláció alapján a kondenzációs zóna az épület környezetében várható elsősorban. A számításokat felhasználtuk a szél hatáskeresztmetszetének meghatározásához. A számítások alapján jól látható, hogy a helyi hőmérsékleti és nyomásviszonyokat nem számottevően befolyásolja a hűtőtoronyt elhagyó közeg párolgásából származó növekedés. Megerősítve a korábbi fejezetben tárgyalt hőmérsékletváltozás jellegét (9. ábra). A szimuláció alapján azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a hűtőtoronyok páraemissziója a vizsgálat alapján feltételezhetően nem okoz jelentős mértékű mikroklíma változást, azonban a kondenzációra bizonyos környezeti viszonyok mellett számolni kell.

Az üzem 2. fázisban telepítendő hűtőtoronyok további 17,796 kg/s vízpárát juttatnak a környezetbe, melynek a teljes tömegáram 35,59 kg/s lesz. A többlet nedveség bár összesítve több páratartalmat juttat a környezetben azonban nagyobb hatáskeresztmetszeten érkező levegő várhatóan nem számottevően növeli annak környezetre gyakorolt hatását.

A számítások alapján a kibocsátott vízgőz mennyiségét összevetve a természetes tavak éves párolgási veszteségeivel az a következtetés vonható le, hogy az éves összes kibocsátás a legrosszabb környezeti viszonyok mellett megfelel a Keleti V-2 víztározóval, amely 550–580 hektár vízfelszínnel rendelkezik. Az összehasonlítás nem teljes mértékben releváns, mert a kényszerkonvekcióból származó közeg áramlása, sokkal nagyobb mennyiségű levegőtárfogat áramlása mellett valósul meg, mely sokkal hatékonyabb hígítást eredményez.

Következtetések

A tanulmányban leírt és az alkalmazott modellek, valamint a szimulációs eredmények és választott meteorológiai feltételek alapján elmondható, hogy a kibocsátástól számított 100m távolságban már nem feltételzhető különösebb vízpára kibocsátá és hőmérséklet emelkedés. Így nem vált ki számottevő környezeti hatást sem vízmennyiségi, sem meteorológiai értelemben.

Azonban a kibocsátási pont körül lévő épületeken - lokálisan - legfőképpen a téli időszakban kicsepódásra kell felkészülni, mely jegesedés okozhat alacsony hőmérsékletek és nagy relatív páratartalom esetén.

Évszaktól függetlenül amennyiben a páratartalom magas, akár 100%-ot megközelíti, akkor eredményezhet annyi többletnedvességet, hogy akár csapadékképződés megindulhat, azonban ez nyilvánvaló tény a természetese párolgási folyamatok esetén is.

Fontos megjegyezni, hogy a tanulmány kizárólag a környezet többlet terhelésére ad iránymutatást.

Irodalom

- [1] S. P. Arya, *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. Oxford University Press, 1999. [Online]. Elérhető: <https://global.oup.com/academic/product/air-pollution-meteorology-and-dispersion-9780195131478>
- [2] J. S. Turner, *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge University Press, 1970. [Online]. Elérhető: <https://www.cambridge.org/core/books/buoyancy-effects-in-fluids/>
- [3] J. H. Seinfeld és S. N. Pandis, *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons, 2016. [Online]. Elérhető: <https://www.wiley.com/en-us/Atmospheric+Chemistry+and+Physics%3A+From+Air+Pollution+to+Climate+Change%2C+3rd+Edition-p-9781118947401>
- [4] W. C. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*. John Wiley & Sons, 1999. [Online]. Elérhető: <https://www.wiley.com/en-us/Aerosol+Technology%3A+Properties%2C+Behavior%2C+and+Measurement+of+Airborne+Particles%2C+2nd+Edition-p-9780471184886>
- [5] Á. Timár, „Párolgásbecslő módszerek összehasonlító vizsgálata a Fertő tóra”, Budapest, 2014.
- [6] ANSYS Inc., „ANSYS Fluent Theory Guide, Release 14.0”, 2011. [Online]. Elérhető: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/main_pre.htm
- [7] International Civil Aviation Organization, „Manual of the ICAO Standard Atmosphere: Extended to 80 Kilometres (262 500 Feet)”, 1993, *ICAO, Montreal, Canada*. Elérés: 2025. június 18. [Online]. Elérhető: <https://aiac.ma/wp-content/uploads/2018/01/Manuel-de-l'atmosphère-Type-OACI-Doc7488-1.pdf>
- [8] H. R. Pruppacher és J. D. Klett, *Microphysics of Clouds and Precipitation*, 2nd kiad. Springer Netherlands, 1997.
- [9] J. M. Wallace és P. V Hobbs, *Atmospheric Science: An Introductory Survey*, 2nd kiad. Academic Press, 2006.
- [10] M. Z. Jacobson, *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. Cambridge University Press, 2005. [Online]. Elérhető: <https://www.cambridge.org/core/books/fundamentals-of-atmospheric-modeling/>
- [11] N. S. Holmes és L. Morawska, „A review of dispersion modelling and its application to the dispersion of particles from industrial sources”, *Atmos Environ*, köt. 40, sz. 23, o. 5902–5928, 2006, [Online]. Elérhető: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231006007834>
- [12] R. B. Stull, *Meteorology for Scientists and Engineers*. University of British Columbia, 2015. [Online]. Elérhető: <https://www.eoas.ubc.ca/books/meteors/>
- [13] S. V Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. Hemisphere Publishing, 1980. [Online]. Elérhető: <https://www.amazon.com/Numerical-Heat-Transfer-Fluid-Flow/dp/0891165220>
- [14] H. K. Versteeg és W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Pearson Education, 2007. [Online]. Elérhető: <https://www.pearson.com/bookstore/product/Versteeg-An-Introduction-to-Computational-Fluid-Dynamics-The-Finite-Volume-Method/9780131274983.html>

- [15] C. E. Brennen, *Fundamentals of Multiphase Flow*. Cambridge University Press, 2005. [Online]. Elérhető: <https://www.cambridge.org/core/books/fundamentals-of-multiphase-flow/>
- [16] Inc. ANSYS, „ANSYS Fluent Theory Guide”, 2021, ANSYS, Inc. [Online]. Elérhető: file:///mnt/data/ANSYS_Fluent_Theory_Guide_14_multiphase.pdf
- [17] T. R. Bott, *Cooling Tower Technology: Theory and Practice*, 3rd kiad. Springer, 2005. [Online]. Elérhető: <https://www.springer.com/gp/book/9781402020121>
- [18] W. K. Lewis és W. D. Whitman, *Principles of Gas Absorption*. McGraw-Hill, 1924. [Online]. Elérhető: <https://archive.org/details/principlesofgasa00lewi>
- [19] Inc. ANSYS, „ANSYS Fluent User’s Guide”, 2021, ANSYS, Inc. [Online]. Elérhető: file:///mnt/data/ANSYS_Fluent_Users_Guide_26_multiphase.pdf
- [20] A. Klimanek, M. Cedzich, és R. Bialecki, „3D CFD modelling of natural draft wet-cooling tower with flue gas injection”, *Appl Therm Eng*, köt. 91, o. 824–833, 2015, [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.076>
- [21] X. Li, H. Gurgenci, Z. Guan, X. Wang, és L. Xia, „A review of the crosswind effect on the natural draft cooling towers”, *Appl Therm Eng*, köt. 150, o. 250–270, 2019, [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.12.147>
- [22] R. N. Meroney, „CFD prediction of cooling tower drift”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, köt. 94, sz. 6, o. 463–490, 2006, [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.03.011>
- [23] A. Chahine, P. Matharan, D. Wendum, L. Musson-Genon, R. Bresson, és B. Carissimo, „Modelling atmospheric effects on performance and plume dispersal from natural draft wet cooling towers”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, köt. 136, o. 151–164, 2015, [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.12.013>
- [24] Y. Lu, H. Gurgenci, Z. Guan, és S. He, „The influence of windbreak wall orientation on the cooling performance of small natural draft dry cooling towers”, *Int J Heat Mass Transf*, köt. 79, o. 1059–1069, 2014, [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmass-transfer.2014.08.070>
- [25] S. Li és M. R. Flynn, „Cooling tower plume abatement and plume modeling: a review”, *Environmental Fluid Mechanics*, köt. 21, o. 521–559, 2021, [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1007/s10652-021-09790-w>
- [26] OMSZ, „Országos Meteorológiai Szolgálat klimatológiai adatbázis”, 2024. [Online]. Elérhető: <https://www.met.hu/eghajlat/Magyarország/>
- [27] H. L. Penman, „Natural evaporation from open water, bare soil and grass”, *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci*, köt. 193, sz. 1032, o. 120–145, 1948, [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- [28] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes, és M. Smith, *Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. in FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. [Online]. Elérhető: <https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>
- [29] M. Hais, K. Wotavová, J. Procházka, J. Brom, és E. Pecharová, „The effect of Temelín nuclear power plant on temperature and wetness parameters of land cover”, *Ekológia (Bratislava)*, köt. 24, sz. 4, o. 438–448, 2005, [Online]. Elérhető: https://www.researchgate.net/publication/228845436_The_effect_of_Temelin_nuclear_power_plant_on_temperature_and_wetness_parameters_of_land_cover

- [30] Institute of Atmospheric Physics Czech Academy of Sciences, „Microclimate of cooling towers – CT-PLUME model results for Temelín nuclear power plant”, 2023. [Online]. Elérhető: <https://www.ufa.cas.cz/en/institute-structure/department-of-meteorology/application-research/microclimate-of-cooling-towers/>
- [31] B. R. Morton, G. I. Taylor, és J. S. Turner, „Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, köt. 234, sz. 1196, o. 1–23, 1956, doi: 10.1098/rspa.1956.0011.
- [32] „AERMOD Model Formulation”, 2006. [Online]. Elérhető: EPA
- [33] „Simplified Procedure for Calculating Exhaust/Intake Separation”, 2015. [Online]. Elérhető: ASHRAE
- [34] D. B. Turner, *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling*, 2nd kiad. CRC Press, 1994. [Online]. Elérhető: <https://www.crcpress.com/Workbook-of-Atmospheric-Dispersion-Estimates-An-Introduction-to-Dispersion/Turner/p/book/9781566700238>
- [35] United States Environmental Protection Agency, „Guideline on Air Quality Models (Revised)”, 2005. [Online]. Elérhető: <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling>
- [36] J. Tu, G. H. Yeoh, és C. Liu, *Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach*. Butterworth-Heinemann, 2018. [Online]. Elérhető: <https://www.elsevier.com/books/computational-fluid-dynamics/tu/978-0-08-100596-4>
- [37] C. Meyer és K. Elsberry, „Impact of computational domain size on CFD analysis of wind structures”, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, köt. 97, sz. 6, o. 297–308, 2009, [Online]. Elérhető: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2009.01.007>
- [38] J. D. Anderson, *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*. McGraw-Hill, 1995. [Online]. Elérhető: <https://www.mhhe.com/anderson-cfd>
- [39] P. J. Roache, *Verification and Validation in Computational Science and Engineering*. Hermosa Publishers, 1998. [Online]. Elérhető: <https://verificationandvalidation.com/>
- [40] C. T. Crowe, J. D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, és Y. Tsuji, *Multiphase Flows with Droplets and Particles*, 2nd kiad. CRC Press, 2011. [Online]. Elérhető: <https://www.routledge.com/Multiphase-Flows-with-Droplets-and-Particles/Crowe-Schwarzkopf-Sommerfeld-Tsuji/p/book/9781439860398>