



SZENT ISTVÁN EGYETEM

**A levegőminőség várható alakulásának vizsgálata  
újgenerációs diszperziós modellek alkalmazásával**

Doktori (PhD) értekezés tézisei

**Homolya Emese**

Budapest  
2020

## **A doktori iskola**

**megnevezése:** Tájépítészeti és Tájökológiai Doktori Iskola

**tudományága:** Agrárműszaki

**vezetője: Dr. Bozó László, DSc**

Egyetemi tanár, az MTA rendes tagja

Szent István Egyetem

Kertészettudományi Kar

Talajtan és Vízgazdálkodás Tanszék

**Témavezető: Dr. Bozó László, DSc**

Egyetemi tanár, az MTA rendes tagja

Szent István Egyetem

Kertészettudományi Kar

Talajtan és Vízgazdálkodás Tanszék

.....  
Az iskolavezető jóváhagyása

.....  
A témavezető jóváhagyása

## Tartalomjegyzék

1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI ÉS A CÉLKITŰZÉSEK .....	4
2. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	7
3. EREDMÉNYEK .....	9
4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK.....	14
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	18
6. PUBLIKÁCIÓK.....	21
7. IRODALOMJEGYZÉK.....	24

## 1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI ÉS A CÉLKITŰZÉSEK

A légszennyezés korunk egyik vezető környezeti problémája (EEA 2019), melynek visszaszorítása komoly kihívás a kutatói közösség és a döntéshozók részéről egyaránt. A légkörbe jutó szennyezőanyagok magas koncentrációja közvetlenül károsíthatja az egészséget, az ökoszisztémát és a beépített környezetet, kiülepedése során pedig a környező természeti közegekbe – a vízbe vagy a talajba – is bekerülhet, ahol további károkhoz vezethet. Mára egyre szélesebb körű érdeklődés övezi a levegő minőségének alakulását és egyre kifinomultabb módszerekkel rendelkezünk a légszennyezettség aktuális állapotának, tendenciáinak és adott feltételek melletti várható megváltozásának kiértékelését illetően.

A levegőszennyezés jelenségét már jóval az ipari forradalom előtt felismerték (Heidorn 1979). Korabeli leírásokból valószínűsíthető, hogy a középkori településeken is okozott problémát a levegő nem megfelelő minősége, mely akkoriban elsősorban a faégetésnek, bizonyos háztartásbeli tevékenységeknek, káros kibocsátással járó mesterségeknek (mint pl. a tímárműhelyek) és az utcákon szétszórt szemét bomlásának volt betudható (Barker et al. 1961). Ekkoriban – bár közismertek voltak a füst és a kellemetlen szagok okozta nehézségek – szerény tudás állt csak rendelkezésre a légszennyezés káros hatásaira vonatkozóan, így a kordában tartására sem indultak meg kísérletek. Feltehetően a XIX. század közepétől kezdett a levegőminőség témaköre egyre inkább a tudományos érdeklődés tárgyává válni, nagyobb figyelmet azonban csak a XX. század folyamán kapott a Los Angeles-i, illetve a londoni típusú szmogok fokozódó megjelenésével.

Az utóbbi évtizedekben a tudomány és a technika fejlődése rendkívüli áttörést hozott a levegőszennyezés kutatásában is. Szervezett mérési programok jelentek meg (EPA 2019, EMEP<sub>web</sub>), egyre kifinomultabb terjedési és levegőminőségi modellek állnak rendelkezésre, folyamatosan bővülnek az ismereteink a jelenség fizikai és kémiai hátterét, valamint a káros hatásait illetően, és nemzetközi programok indultak meg a levegő szennyezettségének mérséklésére.

Mérföldkőnek számít az 1972. évi stockholmi ENSZ konferenciát követően az ENSZ Környezeti Programjának (United Nations Environment Programme, UNEP) létrejötte, az 1970-es évek végétől kezdődően pedig újabb és újabb – már kötelezettségvállalásokat is tartalmazó – nemzetközi szintű megállapodások születtek, melyekben a felek elismerték a környezeti problémák kezelésében való közös érdekeltységüket (Faragó 2018). Az európai légszennyezettség monitorozását és a levegőminőség kiértékelésének módszertanát az Egyesült Nemzetek Szervezetének Európai Gazdasági Bizottsága (United Nations Economic Commission for Europe, UNECE) zászlaja alatt 1977-ben kezdeményezett Európai Mérési és Kiértékelési Program

(Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe, EMEP) fogja össze, mely 1983 óta a Nagy Távolságra Jutó, Országhatárokon Átterjedő Légszennyezésről szóló Genfi Egyezmény (Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution, CLRTAP) részeként működik (EMEP MSC-W 2004).

Bár a legpontosabb információt a légkör állapotáról közvetlen mérések által kaphatjuk, a levegőminőség elemzése ma már elképzelhetetlen arra specializált levegőminőségi modellek alkalmazása nélkül. A levegőminőségi modellek, a légkörben zajló fizikai és kémiai folyamatok matematikai interpretációja révén, kapcsolatot teremtenek a kibocsátott szennyezőanyag-mennyiség és a környezetben mérhető koncentrációk között (Mészáros 1997), ezáltal alkalmasak a szennyezőanyagok légköri terjedésének, kémiai átalakulásának és kiülepedésének leírására. A mai levegőminőségi modellek már nagyon sokféle, a természetben lejátszódó folyamatot figyelembe vesznek, és fokozódó összetettségükből adódóan egyre jobban közelítik a valós környezeti rendszerek viselkedését. Bármilyen összetett és kifinomult is azonban egy modell, a valós rendszerek bonyolultságából, valamint a bennük fellépő visszacsatolásokból és nem-linearitásokból adódóan nem tudja a valós folyamatokat teljesen pontosan leírni, mindig közelítéseket és parametrizációkat kell, hogy alkalmazzon. A modellekkel végzett szimulációk ezért minden esetben terhelték egy adott fokú bizonytalansággal (Angevine et al. 2014), mely az alkalmazott módszerektől, a bemenő adatok pontosságától, a földrajzi környezettől, az időjárási helyzettől és a felbontástól függően is más és más lehet. Minél jobban ismerjük modelljeink működését, jellegzetességeit és korlátait, annál pontosabb képet kapunk erről a bizonytalanságról, és előre tudjuk látni, adott körülmények között milyen pontosságot várhatunk el becsléseiktől.

Doktori munkámban alapvetően a hazai levegőminőség különböző aspektusok szerinti, korszerű eszközökkel történő, modellalapú vizsgálatát tűztem ki célul, ahol a fókusz elsősorban a légköri terjedést leginkább befolyásoló időjárási elemeknek a környezeti szennyezőanyag-koncentrációkra gyakorolt hatásának elemzésére, speciális időjárási körülmények között fellépő kritikus légszennyezettségi helyzetek modellezhetőségére, illetve az antropogén kibocsátáscsökkentések várható hatásainak elemzésére helyeztem. Ezeket a témaköröket úgy választottam meg, hogy végső soron egy átfogó képet adjanak a mai levegőminőségi kiértékelési módszerekről és azok korlátairól, illetve a magyarországi levegőminőség és levegőminőségi elemzések aktuális állapotáról, a modellezés adta lehetőségekről és a további kihívásokról. Az elemzések során – mivel egyes kitzűzött feladatok különböző megközelítéseket igényelnek – kétféle módszert alkalmaztam. A légköri terjedés nyomon követését igénylő esetekben a francia fejlesztésű CHIMERE kémiai transzport modellt (CHIMERE 2017), míg az emissziócsökkentés

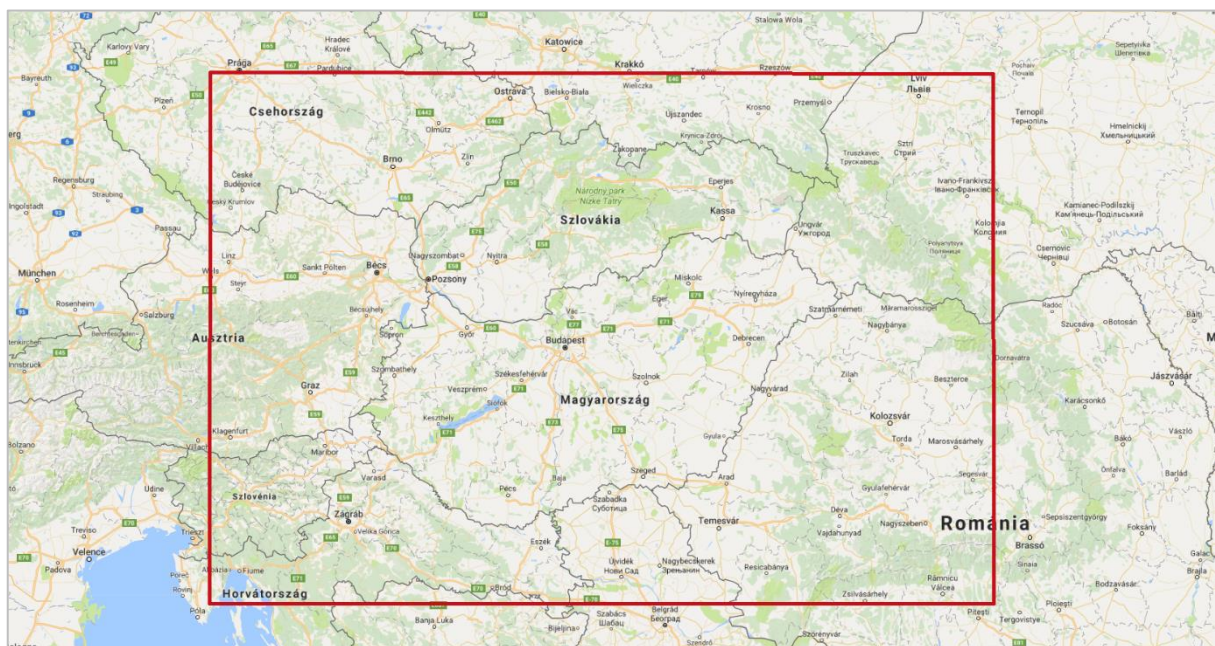
hatásvizsgálataihoz a nemzetközi szinten kidolgozott SHERPA levegőminőség-elemző szoftvert (Thunis et al. 2016) használtam fel. Célkitűzéseim az alábbi pontokban foglalhatók össze:

- az irodalomfeldolgozás során mindazoknak az aktuális és releváns információknak az összefoglalása, amelyek a levegőminőség, a levegőminőségi kiértékelések során alkalmazott módszerek, a kapcsolódó szabályozások, illetve a magyarországi viszonyok átfogó megismeréséhez szükségesek,
- a CHIMERE modell legfrissebb (2017) verziójának magyarországi adaptálása és a SHERPA szoftver telepítése,
- érzékenységvizsgálat elvégzése a CHIMERE modell segítségével arra vonatkozóan, hogy milyen mértékű, illetve hogyan jelenik meg a modellezés folyamán a légköri terjedés tekintetében kulcsfontosságú időjárási elemeknek a kialakuló koncentrációkra gyakorolt hatása,
- esettanulmány kidolgozása egy valós magyarországi kritikus légszennyezettségi helyzet hátterének és valószínűsíthető okainak felderítése, illetve modellezhetőségének vizsgálata céljából,
- az antropogén kibocsátáscsökkentések várható környezeti következményeinek vizsgálata Magyarország területén és annak az aktuális kérdésnek az elemzése, hogy az Országos Levegőterhelés-csökkentési Programban meghatározott célkitűzések várhatóan milyen mértékű javulást hozhatnak a hazai levegőminőségben a PM<sub>2,5</sub> és a NO<sub>2</sub> éves átlagértékeire vonatkozóan.

## 2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Doktori munkám során a levegőminőségi elemzések döntő többségét a CHIMERE modell segítségével végeztem, a hazai kibocsátáscsökkentést célzó intézkedések hatásának kiértékelésére pedig a SHERPA levegőminőség-elemző szoftvert alkalmaztam. A két módszer abban alapjaiban véve eltér, hogy míg a SHERPA a kibocsátáscsökkentések hatásainak elemzésére specializált, grafikus felülettel rendelkező döntéstámogató eszköz, a CHIMERE modell egy terminálból futtatható program, melynek forráskódja hozzáférhető és minden felhasznált input adatfájlja szabadon módosítható, így felhasználhatósága jóval sokrétűbb.

A CHIMERE-rel történő elemzésekhez vizsgálati régióknak egy Magyarországot befoglaló, a Kárpát-medencét nagyjából lefedő területet választottam, melyet a 45° és 50° földrajzi szélességi, valamint a 14° és 25° földrajzi hosszúsági vonalak határolnak (1. ábra). A rácshálózatot – mely a modellben szabadon definiálható – úgy választottam meg, hogy felbontása illeszkedjen az EMEP emissziós leltár adatok 0,1° felbontásához, ami a Kárpát-medence térségében hozzávetőlegesen 10 km-nek felel meg.



1. ábra: A vizsgálati terület

A kibocsátási adatok az EMEP 2015. évi rácsponti emisszió leltárából származnak. Az adatokat, rendelkezésre állásuknak megfelelően, nitrogén-oxidok, illékony szerves vegyületek, kén-dioxid, ammónia, finom eloszlású aeroszol részecskék ( $PM_{2,5}$ ), durva eloszlású aeroszol részecskék ( $PM_{10}$ – $PM_{2,5}$ ) és szén-monoxid esetén 0,1° felbontásban töltöttem le. A biogén

emissziót a CHIMERE szimulációkhoz a MEGAN modell számítja, a szárazföldi durva részecskékre vonatkozó adatok az USGS adatbázisból származnak.

A meteorológiai adatokat az Országos Meteorológiai Szolgálat AROME modellje szolgáltatta, 1 órás időbeli felbontással, az EMEP rács  $0,1^\circ$  felbontásában. A CHIMERE számára az adatokat a meteorológiai preprocesszor készíti elő, a modell saját diagnosztikai eszközeinek segítségével. A Kárpát-medencei meteorológiai adatok 2018. február 8-tól rendelkezésre állnak, egy fájl egy nap adatait tartalmazza. A felszínborításra vonatkozó információ a GLCF adatbázisból származik.

A CHIMERE a szimuláció során előálló koncentráció- és depozíció-eredményeket NetCDF fájlformátumban szolgáltatja, melyből az adatok a megfelelő eszközök segítségével kinyerhetők. A térképi megjelenítés az adatok területi eloszlásának megfigyelésére dolgozatomban elsősorban az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK (Hungarian Advanced Workstation) szoftverével, illetve a Panoply alkalmazás segítségével készült. Fájlműveleteket – úgy, mint alapvető matematikai átalakításokat, vagy az adatok kinyerését – C nyelvű programkódok, illetve a CDO (Climate Data Operator) szoftver segítségével végeztem. A kiolvasott adatok, illetve egyéb, szükséges ASCII fájlok rendezése, átalakítása, előállítása erre alkalmas FORTRAN programkódok írásával, az adatok ábrázolása a Microsoft Excel és a LibreOffice Calc szoftverek felhasználásával történt. Egyes műveletek elvégzése bash script-ek írását tette szükségessé.

A SHERPA számításainak alapját az INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques – Ipari Környezet és Kockázatok Nemzeti Intézete, Franciaország) által elkészített rácsponti emisszió leltár, valamint a CHIMERE kémiai transzport modell számítási eredményei képezik, de rugalmasságából adódóan helyi szinten előállított, nagyfelbontású adatok feldolgozására is alkalmas. A kibocsátáscsökkentésre vonatkozó adatokat kisebb térségekre – Magyarországon a megyéknek és Budapestnek megfelelő területekre – tudjuk bevezetni, százalékos arányban, és az eredményeket is ugyanezek a területi egységeken ábrázolhatjuk, a szoftver saját beépített eszközeinek segítségével.

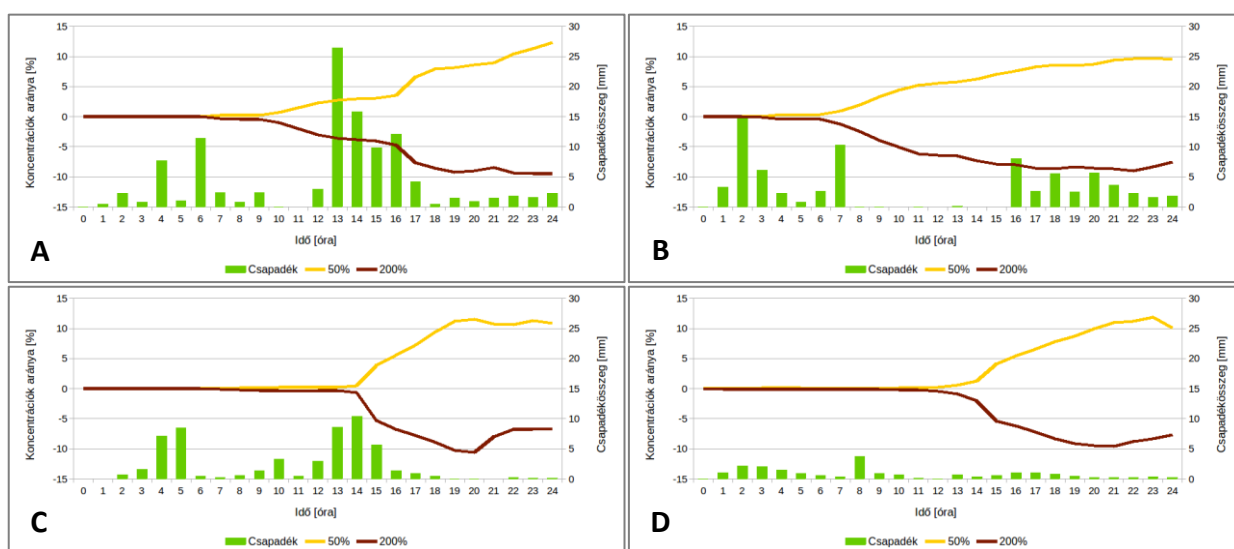
Légszennyezettség szempontjából Magyarországon az aeroszol részecskék okozzák a legkomolyabb problémát, a kritikus levegőminőségi helyzetek döntő többsége a  $PM_{10}$  felhalmozódás következménye. Doktori munkám során az elemzéseket ezért elsősorban a  $PM_{10}$  szennyezésre fókuszálva végeztem el.



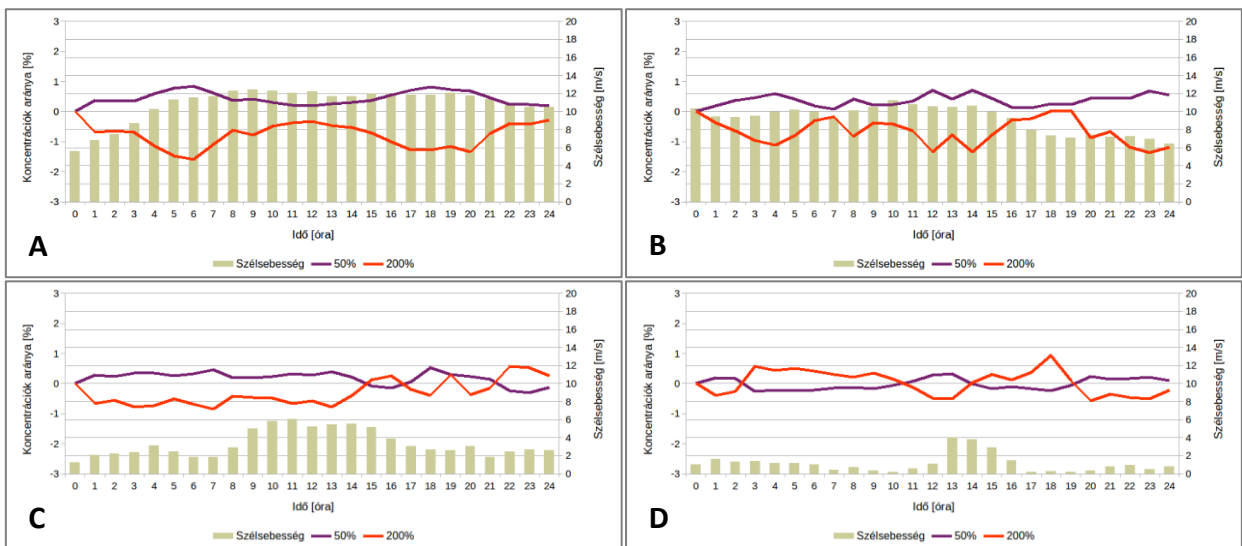
### 3. EREDMÉNYEK

Értekezésemben az irodalomfeldolgozás során igyekeztem mindazokat az információkat összegyűjteni, amelyek mind a nemzetközi, mind a magyarországi levegőminőségi elemzések területén relevánsak, naprakészek és a témakör átfogó megértéséhez szükségesek. Külön hangsúlyt fektettem többek között a modellezés tárgykörének részletezésére, a levegőminőség javítását célzó, érvényben lévő, vonatkozó szabályozásra és a magyarországi aktuális helyzetértékelésre.

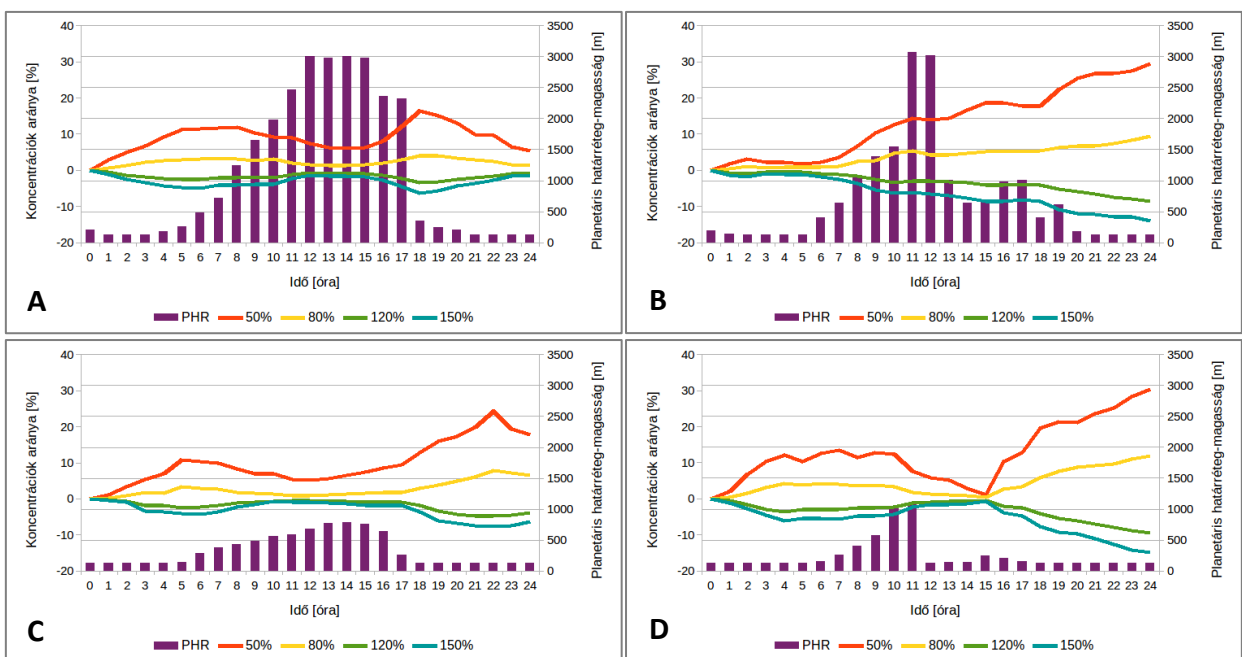
Munkám során elvégeztem egy érzékenységvizsgálatot egyrészt abból a célból, hogy rámutassak a meteorológia szerepére a levegőminőség alakulásában, másrészt annak felderítésére, hogy hogyan jelenik ez meg a modellszimulációkban. Egy-egy modell teljesítménye földrajzi környezetként is változó lehet, a célterület megválasztása így lényeges a modell megismerése szempontjából. Elemzéseimet elsősorban Magyarországra és tágabb környezetére fókuszáltam, így a vizsgálati területnek egy, nagyjából a Kárpát-medencét lefedő térséget választottam. Az érzékenységvizsgálattal – melyet a CHIMERE modell segítségével végeztem el – jól kimutathatónak bizonyult a lokális meteorológiának – azon belül is a légköri terjedési folyamatokat leginkább befolyásoló időjárási elemeknek, vagyis elsősorban a csapadéknak (2. ábra), a szélnek (3. ábra), és a planetáris határréteg-magasságnak (4. ábra) – a környezetben kialakuló szennyezőanyag-koncentrációkra gyakorolt jelentős hatása. A vizsgált elemek értékének adott arányú megváltoztatása a modell input adatmezőjében a szimulációk eredményeként kapott koncentrációk konzisztens megváltozását hozza magával.



2. ábra: A csapadék, valamint a módosított meteorológia melletti koncentrációk eredeti koncentrációkhoz képesti százalékos arányának napi menetei az A)  $18,9^{\circ} - 49,3^{\circ}$ , B)  $19,0^{\circ} - 49,6^{\circ}$ , C)  $17,6^{\circ} - 48,9^{\circ}$  és D)  $19,0^{\circ} - 48,8^{\circ}$  földrajzi hosszúsági, illetve szélességi pontokban



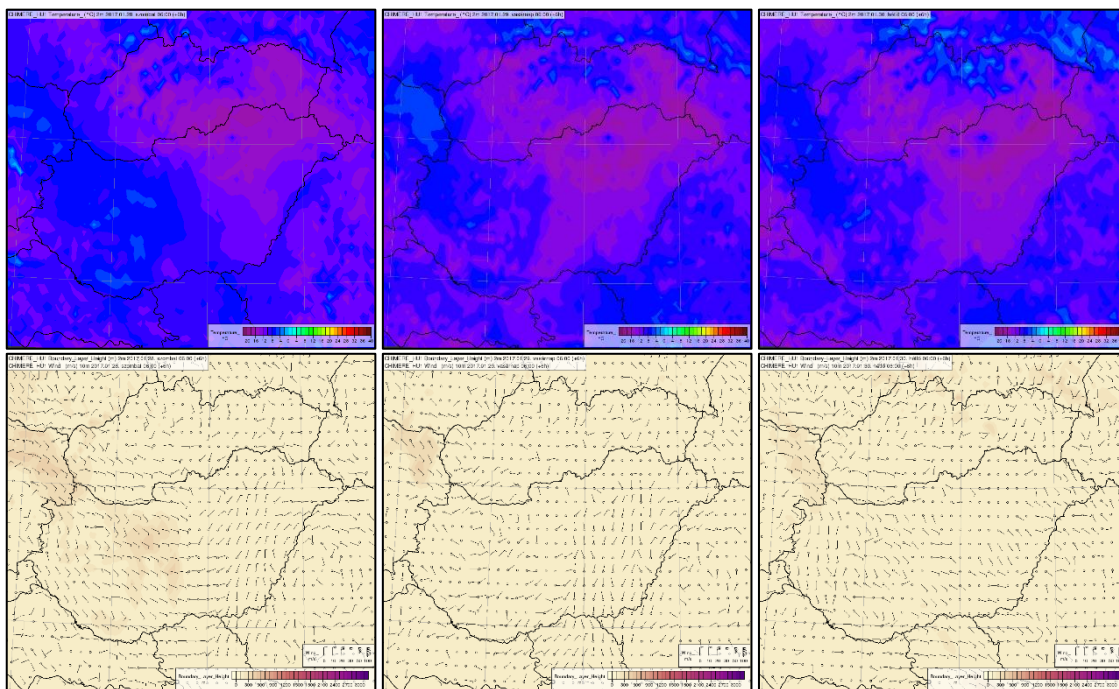
3. ábra: A szélsebesség, valamint a módosított meteorológia melletti koncentrációk eredeti koncentrációkhoz képesti százalékos arányának napi menetei az A)  $23,3^{\circ} - 45,2^{\circ}$ , B)  $18,3^{\circ} - 46,9^{\circ}$ , C)  $21,3^{\circ} - 48,0^{\circ}$  és D)  $14,8^{\circ} - 45,9^{\circ}$  földrajzi hosszúsági, illetve szélességi pontokban



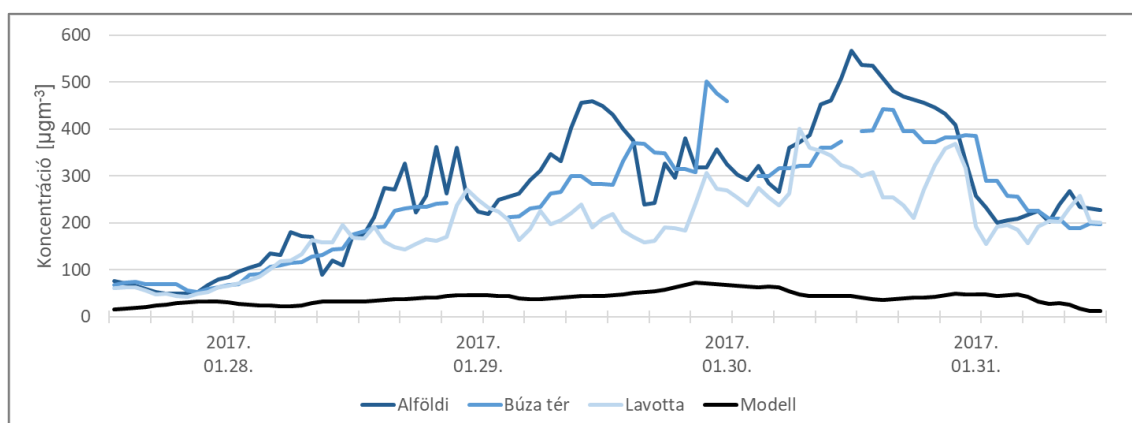
4. ábra: A planetáris határréteg-magasság, valamint a módosított meteorológia melletti koncentrációk eredeti koncentrációkhoz képesti százalékos arányának napi menetei az A)  $24,7^{\circ} - 46,2^{\circ}$ , B)  $20,2^{\circ} - 49,8^{\circ}$ , C)  $18,1^{\circ} - 47,6^{\circ}$  és D)  $20,1^{\circ} - 47,7^{\circ}$  földrajzi hosszúsági, illetve szélességi pontokban

Eredményeim alapján arra is rámutattam, hogy a téli időjárási helyzetek jobban kedveznek a légszennyezettségi epizódok kialakulásának, mint a nyáriak, mely alapvetően az eltérő emissziós mintázatokra és az időjárásbeli jellegzetességekre vezethető vissza. A kritikus légszennyezettségi helyzetek hátterének minél pontosabb feltárása kiemelt jelentőségű, mivel Magyarországon az utóbbi évekre jellemző általános levegőminőség-javulás ellenére továbbra is komoly problémát okoznak az időszakosan fellépő, gyakran az egészségügyi határértékeket jóval meghaladó légköri

koncentrációkkal járó légszennyezettségi epizódok. Doktori munkám során kidolgoztam egy esettanulmányt, melyben egy valós, helyenként rendkívül magas  $PM_{10}$  koncentrációkat okozó, speciális időjárási körülményekhez kapcsolódó, téli kritikus légszennyezettségi helyzet kialakulásának hátterét vizsgáltam a Sajó-völgy területén. A légszennyezettségi epizód kiváltójaként a fokozottan kedvezőtlen meteorológiai helyzetet (5. ábra) és az általa indukált megnövekedett antropogén eredetű kibocsátást azonosítottam.



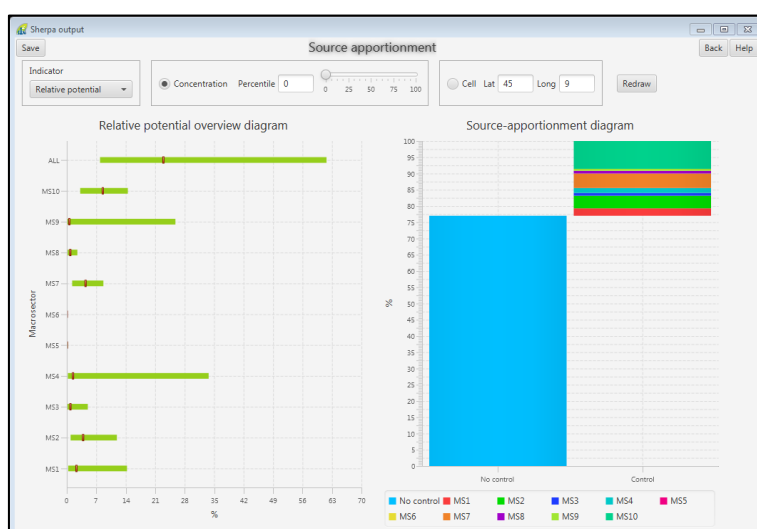
5. ábra: A hőmérséklet, a szélesség és a planetáris határréteg-magasság alakulása a január 28–30. időszakban (06 UTC)



6. ábra: Három miskolci állomás méréseinek (kék), illetve egy Miskolc területére eső modell rácspont (fekete)  $PM_{10}$  idősorai január 28–31. között

A szimulációkat végrehajtva azt tapasztaltam, hogy a modell ebben a speciális helyzetben a valós koncentrációkat jelentősen alulbecsülte (6. ábra), ami alátámasztja a modell alapvető működése, jellegzetességei és alkalmazhatósága ismeretének fontosságát és szem előtt tartását a valós levegőminőségi kiértékelések során, mely emeli az elemzésekben a szakértői részvétel jelentőségét.

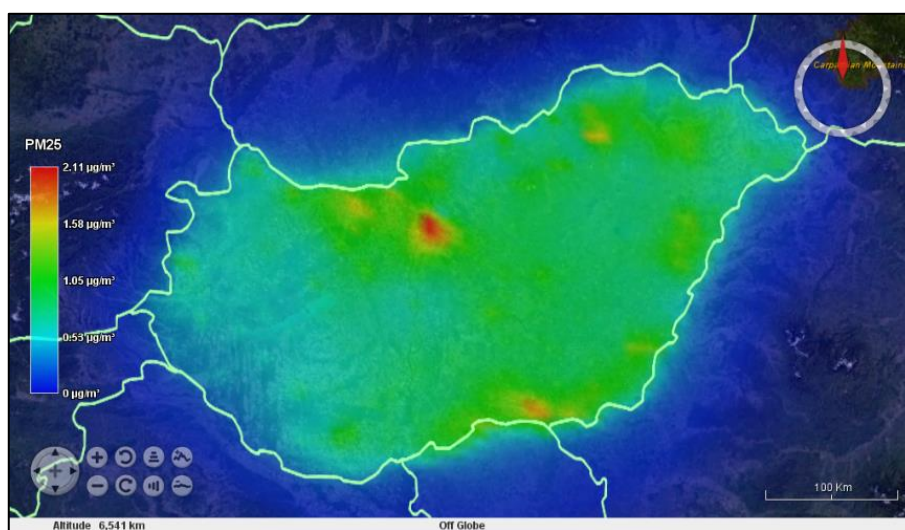
Munkám következő fázisában a magyarországi antropogén eredetű emissziócsökkentés várható következményeinek elemzésével foglalkoztam, melyhez a SHERPA szoftver volt segítségemre. Kimutattam, hogy a kibocsátáscsökkentésre irányuló intézkedések meghozatala során fontos figyelembe venni a szektorális különbségeket, mivel az, hogy a kibocsátás adott mértékű csökkentése milyen levegőminőség-javulást hoz magával, függ attól, hogy az intézkedéseket mely ágazatokra összpontosítjuk. Mivel országon belül helyenként és szennyezőanyagoként is eltérőek lehetnek a domináns emissziós szektorok, egy-egy intézkedés hatékonysága is helyről helyre változhat. Kis területű országnak Magyarországon jelentős a nagytávolságú transzport hatása (7. ábra), ami nem csökkenti a helyi kibocsátáscsökkentések jelentőségét, alátámasztja azonban a légszennyezés nemzetközi szintre emelésének fontosságát.



7. ábra: Magyarország PM<sub>10</sub> szennyezettségét meghatározó források azonosítása

Magyarország aktuális levegővédelmi tervezetét az Országos Levegőterhelés-csökkentési Program foglalja össze. A Program, amellyel, hogy nevesíti az EU által kiszabott kibocsátáscsökkentési kötelezettségek teljesítése érdekében bevezetendő szakpolitikákat és intézkedéseket, számszerű becslést is ad ezeknek az intézkedéseknek az emisszióra gyakorolt várható hatásaira, vagyis ágazatonként megadja, milyen mértékű kibocsátáscsökkentéshez

vezethetnek. Ezeket az információkat felhasználva megvizsgáltam az OLP-ben szereplő tervek várható környezeti következményeit.



8. ábra: A 2030-tól tervezett kibocsátáscsökkentés mellett várható évi átlagos  $PM_{2,5}$  koncentráció-csökkenés mértékének térbeli eloszlása Magyarországon

Az eredmények alapján (8. ábra) a helyi kibocsátások visszafogásával a hazai levegőminőség egyértelmű javulása várható, mely javulás az – eredményként kapott – éves átlagértékekben a számok alapján viszonylag csekélynek tűnhet, éven belüli lefutását tekintve azonban esetenként sokkal hangsúlyosabban is megjelenhet. Ehhez kapcsolódóan nem szabad elfeledkezni a nagytávolságú transzport hatásáról, melynek jelenlegi hozzájárulása a magyarországi légszennyezettséghez számottevő mértékű, ha azonban a környező országok is teljesítik a rájuk kiszabott kibocsátáscsökkentési kötelezettségeket, ez a hatás várhatóan csökkenni fog, ami egyben növeli a helyi kibocsátások szerepét és mérséklésének jelentőségét.

## 4. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Doktori munkámban a Kárpát-medence levegőminőségének elemzését, azon belül is egy átfogó elemzéshez szükséges módszertani háttér kidolgozását, a terjedési folyamatokban leginkább érvényesülő időjárási változók szerepének tanulmányozását, a speciális időjárási körülmények között fellépő kritikus légszennyezettségi helyzetek kialakulási okainak feltárását és a tervezett kibocsátáscsökkentések várható hatásának vizsgálatát tűztem ki célul. A Kárpát-medence területére először történtek ilyen jellegű átfogó vizsgálatok. Eredményeim közül a legfontosabbak a következő tézispontokban foglalhatók össze.

1. A Kárpát-medence területére végzett levegőminőségi elemzések során kapott eredményeim alátámasztják a lokális meteorológiának a kialakuló környezeti szennyezőanyag-koncentrációkra gyakorolt jelentős hatását, mely levegőminőségi modellfuttatások segítségével jól kimutatható. Mind a meteorológiai érzékenységvizsgálat, mind a speciális időjárási viszonyok mellett kialakuló kritikus légszennyezettségi helyzeteket reprezentáló esettanulmány kidolgozása folyamán végzett vizsgálataim alapján levonható a következtetés, hogy – bár a lokális kibocsátás a légkörbe kerülő szennyezőanyagok mennyiségét alapvetően meghatározza – az, hogy a környezetben ezek felgyülemzése milyen mértékű, nagymértékben függ az aktuális meteorológiai helyzettől. A CHIMERE modell alkalmasnak bizonyult ezeknek az összefüggéseknek a tanulmányozására, segítségével egységes kiindulási emissziós adatok mellett a különféle időjárási viszonyok hatása a légkörben kialakuló koncentrációkra jól nyomon követhető.

2. A csapadék, a szélsébség és a planetáris határréteg-magasság hatása a légköri koncentrációkra erőteljes, mely hatás az általam végzett érzékenységvizsgálatban is megjelenik. A csapadék mennyiségének növelése a koncentrációk csökkenését, csökkentése azok növekedését hozza magával. A légköri PM<sub>10</sub> koncentrációkban bekövetkező változás a CHIMERE modellel végzett szimulációkban a csapadék mennyiségének 200%-os, illetve 50%-os megváltozása mellett 24 óra elteltével a +/- 10%-ot is elérheti. Ugyanez a jelenség a kiülepedési mezőkben is nyomon követhető, nagyobb mennyiségű csapadék nagyobb mennyiségű szennyezőanyagot juttat a talajra, kisebb mennyiségű pedig kevesebbet: a csapadék mennyiségének 200%-os, illetve 50%-os megváltozása mellett az eredeti és a megváltozott csapadék melletti szimulációkban kapott depozíciók értékeiben +/- 40% különbség is adódhat. A modellszámításokkal kimutattam, hogy a csapadék mennyisége összefüggésben van a légkörben maradó, illetve a kiülepedő anyagmennyiséggel. Modellszámításaim szerint a csapadék hatása a légszennyező anyagok koncentrációjának megváltozására meghatározóan lokális térskálán mutatható ki.

A szélesebbesség hatása a csapadékéhoz hasonló abban a tekintetben, hogy a szél erősödése a felgyülemlett szennyezőanyag mennyiségének csökkenéséhez, vagyis levegőminőség-javuláshoz, csökkenése pedig annak növekedéséhez, vagyis a levegőminőség romlásához vezet. A CHIMERE-rel készült szimulációk alapján a PM<sub>10</sub> koncentrációkban bekövetkező változás mértéke elmarad azonban a csapadéknál tapasztaltaktól, a szélesebbesség 200%-os, illetve 50%-os megváltozása mellett 1–2%-ra tehető. Megfigyelhető, hogy nagyobb kiindulási szélesebbesség esetében határozottabbak a különbségek, mint gyengébb szélnél. Alacsony szélesebbeségek mellett megindul a légkörbe kerülő szennyezőanyagok helyi akkumulációja, mely a modellszimulációkban is nyomon követhető. A szél hatása nagyobb területen érvényesül, mint a csapadéké.

A kialakuló koncentrációk a planetáris határréteg magasságával is szoros összefüggésben állnak. Eredményeim alapján megfigyelhető, hogy a planetáris határréteg-magasság emelése a szennyezőanyag-koncentrációk csökkenésével, csökkentése a koncentrációk határozott növekedésével jár: a CHIMERE-rel végzett szimulációk alapján a talaj-közeli PM<sub>10</sub> mennyiségében fellépő eltérés 50%-os és 150%-os PHR-változás mellett +30%, illetve –15% is lehet. Látható, hogy a modell válaszreakciója a határréteg-magasság csökkentésére számottevően hangsúlyosabb, mint a növelésére, vagyis a planetáris határréteg vékonyabbá válásával a szennyezőanyagok felhalmozódása intenzívebb, mint amilyen mértékben a vastagodó határrétegben a koncentrációk csökkennek.

**3.** Munkám során kidolgoztam egy esettanulmányt, melyben egy valós, magas PM<sub>10</sub> koncentrációkkal járó kritikus légszennyezettségi helyzet háttérében lejátszódó folyamatokat vizsgáltam. Kimutattam, hogy a légszennyezettségi epizód kialakulása elsősorban a hidegléghőpárnás időjárási helyzethez kapcsolódó gyenge széllel (1–2 m/s a teljes vizsgált időszakban), stabil légkörrel és rendkívül alacsony hőmérséklettel (az éjszakai hőmérséklet az ország területének nagy részén –10 °C alá süllyedt) járó kedvezőtlen meteorológiai viszonyokra vezethető vissza, mely a lakossági fűtés intenzívebbé válásával az antropogén kibocsátás megnövekedését is magával hozta. Az így létrejött kritikus légszennyezettségi helyzetben a legmagasabb mért PM<sub>10</sub> koncentráció meghaladta az 500 µg/m<sup>3</sup> értéket. Az elemzéshez alkalmazott CHIMERE modell a meglévő kiindulási adatok birtokában nem tudta a valós környezeti következményeket visszaadni, a kialakuló légköri koncentrációkat jelentősen alulbecsülte. Azokon a területeken, ahol a szennyezettség a legmagasabb szinteket érte el, a mért és a modellezett PM<sub>10</sub> koncentrációk között többszörös (akár 5–10-szeres) különbség is előfordult. Az eltérések háttérében döntően az emisszió alulbecslését – a leltárhoz képesti értékek jóval magasabbá válását – és a felhasznált időjárási input adatok pontatlanságát valószínűsítem.

Az itt bemutatotthoz hasonló speciális időjárási helyzetekhez kapcsolódó potenciális pontatlanságok ellenére a CHIMERE alkalmas annak kimutatására, hogy a téli időjárási helyzetek jobban kedveznek a magas PM<sub>10</sub> koncentrációkkal járó légszennyezettségi epizódok kialakulásának, mint a nyáriak, melynek háttérében az eltérő emissziós mintázatok és az időjárásbeli jellegzetességek állnak.

4. A PM<sub>10</sub>-re és a NO<sub>2</sub>-ra vonatkozó emissziócsökkentés hatásainak vizsgálata során kimutattam, hogy a várható levegőminőség-javulás nagymértékben függ attól, hogy a kibocsátás visszafogását célzó intézkedéseket mely szektorokra koncentrálni fogatosítjuk. A SHERPA levegőminőség-elemző eszköz segítségével végzett vizsgálatok szerint a lakossági tüzelésből származó PM emisszió 10%-os csökkentése több mint 1,5-szer nagyobb mértékű levegőminőség-javuláshoz vezethet Budapest területén, mint a közúti közlekedésből származó PM kibocsátás ugyanilyen arányú csökkentése. A NO<sub>2</sub> szennyezettséget ezzel szemben a közúti közlekedés korlátozásával mérsékelhetjük hatékonyabban, melynek 10%-os NO<sub>x</sub> kibocsátás-csökkentésével több mint 2,5-szer nagyobb mértékű levegőminőség-javulást várhatunk, mint a lakossági tüzelésből származó NO<sub>x</sub> ugyanilyen arányú visszafogásával.

A legnagyobb kibocsátóként ma Magyarországon a lakossági tüzelés, a közúti szállítás és a mezőgazdaság ágazatait azonosítottam, a meghatározó kibocsátási szektorok azonban országon belül régióként és szennyezőanyagként is eltérhetnek.

5. A SHERPA-val végzett vizsgálataim igazolják azokat a korábbi kutatási eredményeket (Ferenczi et al. 2017), melyek szerint Magyarországon jelentős a nagytávolságú transzport hatása. Hogy ez a hatás milyen mértékben érvényesül, az országon belül helyenként és szennyezőanyagként is változó. Országos átlagban az eredmények alapján a PM<sub>10</sub> szennyezettség 77%-a, míg az NO<sub>2</sub> mennyiség 33%-a határon túli forrásokból származik. Bár a nagytávolságú transzport hatása helyi szinten nem korlátozható, a nemzetközi szintű kibocsátás-csökkentési kötelezettségek teljesítéseként megvalósított helyi kibocsátás-csökkentések következtében fellépő, nagy területre kiterjedő levegőminőség-javulással mértéke mérsékelhető.

6. Az Országos Levegőterhelés-csökkentési Programban meghatározott emissziócsökkentés várható hatásainak elemzésével arra az eredményre jutottam, hogy a tervezett kibocsátás-csökkentést célzó intézkedések országos szinten és a határokon túl is szignifikáns levegőminőségi javuláshoz vezethetnek. A SHERPA-val kapott eredmények alapján a 2020–2029. időszakra tervezett kibocsátás-csökkentés következményeként várható évi átlagos légköri PM<sub>2,5</sub> koncentráció-csökkenés maximális értéke 0,64 µg/m<sup>3</sup>, NO<sub>2</sub> esetében pedig 1,22 µg/m<sup>3</sup>. A 2030-



tól terjedő időszakra a megadott emissziócsökkentés mellett további levegőminőségi javulással számolhatunk, a  $PM_{2,5}$  koncentráció évi átlagos csökkenésének maximális értéke  $2,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , a  $\text{NO}_2$  koncentrációban pedig  $2,31 \mu\text{g}/\text{m}^3$  visszaesést várhatunk. Ezek alapján a  $PM_{2,5}$  szennyezettség az idő múlásával nagyobb ütemű várható javulást mutat, mint a  $\text{NO}_2$ . Fontos szem előtt tartani, hogy a számítások eredményeként kapott értékek éves átlagokban bekövetkező változásokat jelentenek, a hatás többek között az emisszió éven belüli eloszlásának és az időjárási mintázatnak a függvényében ezektől nagymértékben eltérő is lehet. Megfigyelhető továbbá, hogy a városi területeken nagyobb mértékű levegőminőség-javulással számolhatunk, mint a háttérben. Lényeges azonban a helyi hatásokat a nagytávolságú transzport hatásától elkülöníteni, mely utóbbi visszafogása mindenképpen nemzetközi összefogást igényel.

## 5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

Doktori munkám során a CHIMERE kémiai transzport modell, illetve a SHERPA levegőminőség-elemző eszköz segítségével végeztem vizsgálatokat a Kárpát-medence, illetve Magyarország levegőminőségére vonatkozóan. Az eredmények alapján elmondható, hogy a kémiai transzport modell alkalmas a kibocsátás következtében a légkörben kialakuló szennyezőanyag-koncentrációk és a meteorológiai elemek kapcsolatának elemzésére. Kimutatható, hogy a szennyezőanyagok lokális szintű feldúsulása nagymértékben függ az aktuális meteorológiai viszonyoktól. Ha a terjedési folyamatokban meghatározó és közvetlenül érvényesülő meteorológiai változók – mint a csapadék, a szélesebbesség vagy a planetáris határréteg-magasság – értékét módosítjuk, az a koncentrációk megváltozását hozza magával.

A vizsgált időjárási elemekkel kapcsolatban levonható az az általános következtetés, hogy a koncentrációkra gyakorolt hatásuk jelentős, értékük alapvetően befolyásolja a kialakuló légszennyezettséget. Az átkeveredés erősségével összefüggésben lévő szélesebbesség, a csapadék mennyisége és a planetáris határréteg magassága is fordított arányosságot mutatnak a légkörben található szennyezőanyag-mennyiséggel. A gyenge széllel és alacsony határréteg-magassággal jellemezhető csapadékmentes időjárási helyzet kedvez a leginkább a szennyezőanyagok felhalmozódásának, míg az áramlás erősödése, a csapadék megjelenése, illetve a PHR vastagodása egyaránt a koncentrációk csökkenését eredményezi. Közvetett módon a hőmérséklet hatása is kimutatható, mely a kapcsolódó általános időjárási jellegzetességekkel és az emissziós mintázatokkal áll összefüggésben. A lokális meteorológia szerepe a légszennyezettség tekintetében a bemutatott eredmények alapján tehát jelentős. Minél jobban ismerjük a lokális időjárás és a kialakuló légköri koncentrációk közötti összefüggéseket, annál pontosabb értékeléseket tudunk végezni akár az aktuális légszennyezettség, akár a levegőminőségi előrejelzések tekintetében, ezért ezeknek az összefüggéseknek a részletes feltárása alapvető jelentőségű. Természetesen lényeges tényező ebben a kérdésben a földrajzi környezet is, melynek függvényében a helyi viszonyok sokfélék lehetnek. A Kárpát-medence egyedi eset ebből a szempontból, ahol erőteljesen érvényesül a medencejelleg, de területén belül a különféle topográfiai környezetekben egymástól nagyon eltérő helyi viszonyok alakulhatnak ki, melyekre különös tekintettel kell lenni. Az általam elvégzett Kárpát-medencei elemzések rámutatnak néhány alapvető jellegzetességre, a minél pontosabb hazai levegőminőségi elemzések érdekében érdemes lenne azonban a lokális meteorológia és a kialakuló szennyezőanyag-koncentrációk kapcsolatát illetően további, helyi szintre is összpontosított elemzéseket végezni.

Egy, a Sajó-völgy területére elvégzett esettanulmány példáján rámutattam arra, hogy előfordulhatnak olyan időjárási szituációk, amikor a levegőminőségi modell csak nagyon pontatlanul tudja a valós légszennyezettséget megbecsülni. Ilyen szituáció például egy völgy térségében kialakuló hideg légpárna, mely a hozzá kapcsolódó anticiklonális légmozgások következtében létrejövő magassági inverzió és esetenként rendkívül alacsony planetáris határréteg-magasság, gyenge légmozgás, nagyon alacsony hőmérsékleti viszonyok és a hozzájuk kapcsolódó megnövekedett lakossági kibocsátás következtében extrém magas környezeti szennyezőanyag-koncentrációkhoz vezethet. Itt is jelentős szerephez jut a földrajzi környezet hatása. A kritikus légszennyezettségi helyzet kialakulását a vizsgált esetben elsősorban a kedvezőtlen időjárási jellemzők együttesére, valamint az antropogén emisszióknak a leltárhoz – mely a modellszámítás alapját képezi – képesti szignifikáns megnövekedésére vezettem vissza. A hasonló esetek tanulmányozása nagyon fontos abból a szempontból, hogy felismerjük azokat az időjárási helyzeteket, amikor csak fenntartásokkal támaszkodhatunk a levegőminőségi modellek által szolgáltatott eredményekre. Ha ismerjük a modelljeink korlátait és azokat a helyzeteket, amikor a becsléseik pontatlanná válhatnak, illetve tudjuk, milyen irányú eltérésekre számíthatunk az eredményeket illetően – vagyis hogy alul-, vagy felülbecsül a modell – azzal egyrészt az eredményekhez hozzárendelhetünk egy bizonytalansági faktort, másrészt a várható hibák figyelembevételével pontosabb helyzetértékelést tudunk készíteni, amelyre alapozva jobban megfelelő intézkedéseket tudunk bevezetni.

A levegőszennyezés problémájának nemzetközi szintre emelése olyan eszközök kidolgozását is magával hozta, amelyek segítségével egységesen vizsgálható egy-egy terület levegőminősége, illetve a kibocsátáscsökkentés céljából bevezetendő intézkedések várható hatása. A SHERPA szoftverrel végzett elemzések során kimutattam, hogy a kibocsátáscsökkentéshez kapcsolódó várható hatás függ attól, hogy a csökkentést milyen emissziós szektorokra vezetjük be. Az ország különböző területeit tekintve helyről helyre és szennyezőanyagoként is eltérőek lehetnek a teljes helyi kibocsátáshoz meghatározó mértékben hozzájáruló emissziós szektorok. Hogy a kibocsátások korlátozását mely szektorokra a leginkább érdemes összpontosítani, az elsősorban a helyi viszonyoktól függ. Javasolható ezért a kibocsátáscsökkentésre irányuló intézkedések tervezését megelőzően előzetes vizsgálatokat végezni arra vonatkozóan, hogy hogyan – milyen kibocsátási szektorokra koncentrálva – érhető el a leghatékonyabban levegőminőség-javulás.

Az Országos Levegőterhelés-csökkentési Programban meghatározott, a következő évtizedekre beütemezett emissziócsökkentési módszerek megvalósításával a hazai levegőminőség egyértelmű javulása várható. A SHERPA-val kapott eredmények alapján ez a javulás elsősorban viszonylag kismértékűnek tűnhet, fontos azonban szem előtt tartani, hogy ezek az értékek éves átlagok, egy-

egy éven belüli időszakban a különbségek sokkal hangsúlyosabbak lehetnek. Figyelembe kell venni továbbá, hogy Magyarországon, viszonylag kis területe következtében, jelentős a nagytávolságú transzport hatása, vagyis nagy a határokon túlról az ország területére beáramló szennyezőanyagok mennyisége. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a helyi szinten hozott intézkedések jelentősége elhanyagolható lenne. A lokális kibocsátások visszafogása mindenképpen csak a helyi korlátozásokkal valósulhat meg, emellett a helyi emissziócsökkentéssel a tovább szállított szennyezőanyagok mennyisége is csökken, aminek következtében az adott terület kisebb terheléssel bír a környezetére. A nagytávolságú transzport hatása szükségessé teszi a levegőminőség javítására irányuló törekvések minél nagyobb területre való kiterjesztését, ezért a nemzetközi együttműködés alapvető jelentőségű a határokon áterjedő légszennyezés mérséklése céljából.

## 6. PUBLIKÁCIÓK

### AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉBEN MEGJELENT KÖZLEMÉNYEK

#### **Folyóiratcikkek**

Homolya, E., Ferenczi, Z. (2018): A levegőminőség elemzésének egy új lehetősége: SHERPA. *Légtér*, 63, 3, pp. 112–117.

Homolya, E., Rotárné Szalkai, Á., Selmeczi, P. (2017): Climate impact on drinking water protected areas. *Időjárás*, 121, 4, pp. 371–392. IF: 0,49.

Rotárné Szalkai, Á., Homolya, E., Selmeczi, P. (2016): Ivóvízbázisok klíma-sérülékenysége. *Hidrológiai Közlöny*, 90, 2, pp. 21–32.

#### **Nemzetközi konferenciakiadványban megjelent cikkek**

Ferenczi, Z., Homolya, E., Bozó, L. (2020): Detailed assessment of a smog situation detected in the Sajó valley, Hungary, pp. 351–356. In: Mensink, C., Gong, W., Hakami, A. (Editors): *Air Pollution Modeling and its Application XXVI*, Springer International Publishing, Springer Nature Switzerland AG, ISBN 978-3-030-22054-9, ISSN 2213-8684, doi: 10.1007/978-3-030-22055-6, 490 p. 36th International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, Ottawa, Canada.

Ferenczi, Z., Homolya, E. and Bozó, L. (2019): Evaluation of the performance of CHIMERE chemical transport model in fog situations over Hungary. 19th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Bruges, Belgium.

Homolya, E., Ferenczi, Z. (2017): Using the SHERPA tool to support the air quality plan of Budapest. 18th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Bologna, Italy.

Batta, A., Homolya, E. (2015): Sensitivity analysis in the calculation of atmospheric dispersion of radioactive material. 5th International Youth Conference on Energy, Pisa, Italy.

Ferenczi, Z., Homolya, E., Pázmándi, T., Szántó, P. (2014): Comparison of FLEXPART-WRF and SINAC-AROME lagrangian dispersion models: a case study for a nuclear incident. 16th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Varna, Bulgaria.

Homolya, E., Deme, S., Pázmándi, T., Szántó, P. (2014): Atmospheric stability analysis using real meteorological data. 4th European IRPA Congress, Geneva, Switzerland.

Homolya, E., Deme, S., Németh, I., Pázmándi, T., Szántó, P. (2013): Modelling the Dispersion of Radioactive Pollutants in the Atmosphere Using the SINAC Programme System. 4th International Youth Conference on Energy, Siófok, Hungary.

### **Nemzetközi konferenciakiadványban megjelent absztraktok és posztterek**

Homolya, E., Ferenczi, Z., Zagyvai, P. (2016): An analysis of the evolution of radioactive contamination using the FLEXPART model. 17th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Budapest, Hungary.

Selmeczi, P., Homolya, E., Rotárné Szalkai, Á. (2016): Climate vulnerability of drinking water supplies. Geophysical Research Abstracts, 18, EGU2016-7500. EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria.

Selmeczi, P., Rotárné Szalkai, Á., Homolya, E. (2016): Application of geographic information systems in the field of strategic planning in climate politics via the example of drinking water service. Geophysical Research Abstracts, 18, EGU2016-7554. EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria.

Rotárné Szalkai, Á., Homolya, E., Selmeczi, P. (2016): Climate impact on Drinking Water Protection Areas. EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria.

### **Magyar nyelvű könyv, jegyzet, könyvrészlet**

Rotárné Szalkai, Á., Selmeczi, P., Homolya, E. (2016): Ivóvízbázisok klímaváltozással szembeni sérülékenységének vizsgálati módszere. IN: Tudásmegosztás, alkalmazkodás és éghajlatváltozás – a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet kutatási-fejlesztési eredményei a Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer létrehozására, 2016, Budapest.

### **Nemzetközi konferenciakiadványban megjelent absztraktok és poszterek**

Pieczka, I., Homolya, E., Bartholy, J. (2013): Connection between the spectral distribution of solar radiation and ozone concentration in the Carpathian Basin. Sun2climate school, 10–15 March 2013, Thessaloniki, Greece.

Homolya, E., Bérczi, Sz. (2010): „Snowing” on planets and in the solar system. Antarctic Meteorites XXXIII. Presented at 33rd Symposium on Antarctic Meteorites, June 8-9, 2010. National Institute of Polar Research, Tokyo.

### **Idegen nyelvű könyv, jegyzet, könyvrészlet**

Bérczi, Sz., Hargitai, H., Homolya, E., Illés, E., Kereszturi, A., Mörtl, M., Sik, A., Tasnádi, P., Weidinger, T. (2011): Liquids in the Solar System: New Concise Atlas in the Solar System Series of Textbooks at Eötvös University, Hungary. 42. LPSC, #1931, LPI, Houston, USA.

### **Magyar nyelvű könyv, jegyzet, könyvrészlet**

Turczy, G., Homolya, E., Mattányi, Zs. (2016): A magyarországi hegy- és dombvidéki területek villámárvíz veszélyeztetettsége. IN: Tudásmegosztás, alkalmazkodás és éghajlatváltozás – a Magyar Földtani és Geofizikai Intézet kutatási-fejlesztési eredményei a Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer létrehozására, 2016, Budapest.

Bérczi, Sz., Hargitai, H., Homolya, E., Illés, E., Kereszturi, Á., Mörtl, M., Sik, A., Tasnádi, P., Weidinger, T. (2010): Kis atlasz a Naprendserről (13): Folyadékok a Naprendszerben. Uniconstant, Budapest-Püspökladány.

## 7. IRODALOMJEGYZÉK

- Angevine, W.M., Bioude, J., McKeen, S., Holloway, J.S. (2014): Uncertainty in Lagrangian pollutant transport simulations due to meteorological uncertainty from a mesoscale WRF ensemble. *Geoscientific Model Development*, 7, pp. 2817–2829.
- Barker, K., Cambi, F., Catcott, E.J., Chambers, L.A., Halliday, E.C., Hasegawa, A., Heimann, H., Jammet, H.P., Katz, M., Leclerc, E., McCabe, L.C., Macfarlane, W.A., Parker, A., Rose jr, A.H., Stenburg, R.L., Stephan, D.G., Taylor, J.R., Thomas, M.D., Wexler, H. (1961): Air pollution. World Health Organization, Monograph Series, No. 46, 450 p.
- CHIMERE (2017): Documentation of the chemistry-transport model CHIMERE. LMD (CNRS), INERIS, LISA (CNRS), 260 p.  
URL: <http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>  
Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: chimere documentation. Lekérdezés időpontja: 2020.01.08.
- EEA (European Environment Agency) (2019): Air quality in Europe – 2019 report. *EEA Report*, No. 10/2019, ISSN 1977-8449, ISBN 978-92-9480-088-6, doi: 10.2800/822355, 104 p.
- EMEP<sub>web</sub>: EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme).  
URL: <https://www.emep.int/>  
Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: emep. Lekérdezés időpontja: 2019.12.19.
- EMEP MSC-W (EMEP Meteorological Synthesizing Centre – West) (2004): EMEP Assessment Report Summary. United Nations, Economic and Social Council, EB.AIR/GE.1/2004/4, 10 p.
- EPA (United States Environmental Protection Agency) (2019): Air Monitoring, Measuring, and Emissions Research.  
URL: <https://www.epa.gov/air-research/air-monitoring-measuring-and-emissions-research>  
Keresőprogram: Google. Kulcsszavak: epa air monitoring. Lekérdezés időpontja: 2019.10.17.
- Faragó, T. (2018): A nemzetközi környezet- és klímapolitikai együttműködés, pp. 5–19. In: Sági, Zs. (Szerk.): *Mérsékelt öv? Felelős cselekvési irányok a hatékony klímavédelemért*. Klímabarát Települések Szövetsége, ISBN 978-615-00-1120-2, 192 p.



- Ferenczi, Z., Bozó, L. (2017): Effect of the long-range transport on the air quality of greater Budapest area. *International Journal of Environment and Pollution*, 62, No. 2/3/4, pp. 407–416.
- Heidorn, K.C. (1979): A Chronology of Important Events in the History of Air Pollution Meteorology to 1070. *Bulletin American Meteorological Society*, 78, pp. 1589–1597.
- Mészáros, E. (1997): *Levegőkémia*. Veszprém: Veszprémi Egyetemi Kiadó, 167 p.
- Thunis, P., Degraeuwe, B., Pisoni, E., Ferrari, F., Clappier, A. (2016): On the design and assessment of regional air quality plans: The SHERPA approach. *Journal of Environmental Management*, 183, pp. 952–958.