

KLÍMAVÁLTOZÁS HATÁSA A LEVEGŐ MINŐSÉGÉRE

Ferenczi Zita 

Országos Meteorológiai Szolgálat, 1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1.
e-mail: ferenczi.z@met.hu

Bevezetés

Az időjárás és az éghajlat fontos szerepet játszik a levegő minőségének alakulásában. A hőmérséklet, a páratartalom, a szél sebessége és iránya, valamint a keveredési réteg magassága a leginkább meghatározó meteorológiai paraméterek, amelyek jelentősen befolyásolják a szennyezőanyagok légköri szállítását, elkeverését, ülepedését valamint a kémiai reakciók sebességét és az aeroszol részecskék képződését. A felsorolt paraméterek mellett a csapadék is hatással van a légszennyezőanyagok koncentrációjára a nedves ülepedés folyamatán keresztül. Az éghajlatváltozással módosulnak az áramlási rendszerek és velük együtt az említett meteorológiai paraméterek is. Tehát a légszennyezés és az éghajlatváltozás két olyan egymással szorosan összefüggő környezetvédelmi kérdés, amellyel az emberiség az elmúlt évtizedekben szembesült, és amellyel komolyan foglalkozni kell (Jacob & Winner, 2009).

A levegőminőség javítását célzó intézkedések szükségességét és azt, hogy nemzetközi összefogásra van szükség a helyzet javítása érdekében már felismerték a döntéshozók. Azonban ezt a két környezeti kihívást még mindig különálló problémaként vizsgálják a tudományos közösségek és külön foglalkoznak vele az egyes szakpolitikák is. Valójában, számos lehetőség létezik a levegőminőség javítására és az éghajlatváltozás mérséklésére, azonban ezek az intézkedések sok esetben az egyik probléma szempontjából megoldást jelentenek, a másik esetben viszont a helyzet romlását okozhatják. Éppen ezért fontos a két említett környezeti kihívást együttesen is vizsgálni, megtalálni a probléma szempontjából legideálisabb intézkedés csomagot a helyzet javítására és ez a tudomány feladata.

A levegőminőség és az éghajlatváltozás közötti összefüggések

A kontinentális és az óceáni ökoszisztémák, a hidrológiai, biogeokémiai, fotokémiai, mikrofizikai és éghajlati rendszerek kölcsönhatásai annyira összetettek, hogy ezek megértése laboratóriumi vizsgálatokat, megfigyeléseket és komplex modellezési tevékenységet igényel. Az emberiség nemcsak üvegházhatású gázok kibocsátásával zavarja meg a Föld rendszerét, hanem reaktív gázok, vegyületek és aeroszokok kibocsátásával, valamint a földhasználat megváltoztatásával is (erdőirtás, urbanizáció). Mind ezek az antropogén változások és az ezekből eredő éghajlatváltozás módosíthatja a légkör kémiai összetételét. Fontos hangsúlyozni, hogy a klímaváltozásban szerepet játszó folyamatokat meglehetősen nehéz számszerűsíteni, mivel összetett mikrofizikai és kémiai folyamatokat foglalnak magukban. Ezért nehéz megbecsülni a kémiai vegyületek és különösen a légszennyezés éghajlatra gyakorolt hatását és még nehezebb felmérni az éghajlatváltozás hatását a kémiai összetételre, különösen a levegő minőségére.

Az éghajlatváltozás a légkörben a reaktív gázok és az aeroszokok koncentrációjára különböző mechanizmusokon keresztül hat (Doherty et al., 2017). A legfontosabb folyamatok, amelyek hatással lesznek a légszennyezőanyagok koncentrációjának alakulására, az alábbiak:

- a levegő hőmérsékletének változása befolyásolja a kémiai reakciók sebességét;
- a páratartalom változása befolyásolja egyes kémiai vegyületek keletkezését, lebomlását;
- a villámlás gyakoriságának és intenzitásának változása hatással van a légköri nitrogén-monoxid-képződésre;

- a felhőzet változása befolyásolja a légkör összetételét azáltal, hogy módosítja a beérkező napsugárzást, és ezáltal a fotokémiai aktivitást;
- a csapadék gyakoriságának és intenzitásának változásai hatással lesznek a szennyezőanyagok nedves ülepedésére;
- a talajfelszín hőmérsékletének és a csapadéknak a változása befolyásolja a növényzet és a talajfelszín emisszióját;
- az áramlási rendszerek megváltozása befolyásolja a szennyezőanyagok nagytávolságú transzportját, a kontinensek közötti szennyezőanyag cserét;
- a konvektív aktivitás változásai módosítják a szennyezőanyagok vertikális transzportját a felső troposzférába;
- a szél intenzitásának változása módosítja a porrészecskék mobilizációját a száraz területeken, és ezáltal az aeroszolterhelést a troposzférában.

A felsorolt kölcsönhatások megértése kiterjedt kutatásokat igényel, amely előfeltétele egy komplex modellrendszer kifejlesztésének. Mivel a levegő minősége erősen függ az időjárástól (meteorológiai paraméterek értékétől), ezért szükséges a szennyezőanyag-koncentrációk és a meteorológiai változók statisztikai vizsgálata is, amelynek alapvető céljai:

- kiszűrni a meteorológiai paraméterek változékonyságának hatását a légszennyezőanyagok hosszú távú trendjéből (elkülöníteni az emisszió és a meteorológia hatását),
- empirikus/regressziós modellek kidolgozása a levegőminőség előrejelzéséhez,
- betekintést nyerni a szennyezőanyag-koncentrációkat érintő folyamatokba.

A vizsgálatokat nemcsak regionális, hanem városi szinten is fontos elvégezni, mivel Európában a lakosság nagy része városokban él és jelentősen ki vannak téve a nem megfelelő levegőminőség hatásának. Magyarország három nagyvárosára (Budapest, Pécs és Miskolc) vonatkozóan ezek a vizsgálatok megtörténtek (Ferenczi et al., 2021), amelyeknek eredményét a jövőbeli elemzéseknél hatékonyan tudjuk majd használni.

Nagyon sok tanulmányban vizsgálták hogyan fog változni a szennyezőanyagok kibocsátása és az éghajlat a különböző forgatókönyvek alapján. Ezek a vizsgálatok azt mutatták, hogy a szennyezőanyagok kibocsátásának csökkenése nagyobb hatással lesz a levegőminőségre 2050-ig, mint az éghajlatváltozás. Ennek elsősorban az az oka, hogy az O₃ és a PM prekursorokra vonatkozó kibocsátások nagyon jelentős csökkentése várható a következő évtizedekben a szigorú szabályozások miatt és a rendszer válasza az emisszió csökkenésre jelentősebb, mint a klímaváltozásra. Az éghajlatváltozás elsősorban olyan szélsőséges éghajlati eseményekre lesz hatással, mint a hőhullámok, amelyek viszont légszennyezettségi epizódok kialakulását eredményezhetik (Doherty et al., 2017). A 2050–2100 közötti időszakra viszont már Európa mediterrán területeire a talajközeli ózon koncentrációjának emelkedését prognosztizálják elég nagy valószínűséggel. A PM szennyezettségre vonatkozó előrejelzések bizonytalansága jóval nagyobb, egyes tanulmányok az emelkedő hőmérséklet és páratartalom, valamint a csökkenő csapadék mennyiség miatt főleg Közép-Európa északi területeire jeleznek előre koncentráció-emelkedést.

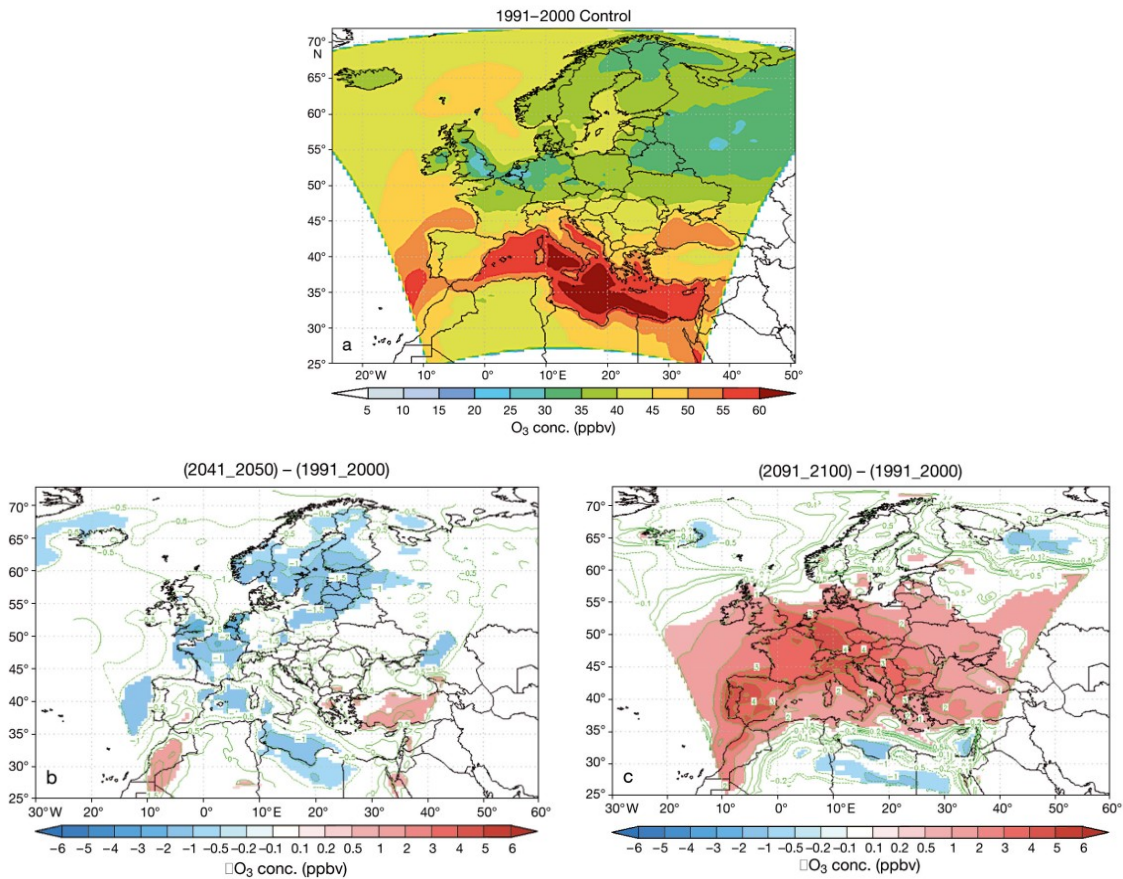
A klímaváltozás és a levegőminőség megváltozása hatással lesz a lakosság egészségére, valamint a természetes- és kultúrnövényekre is. A termesztett növények esetében elsősorban a tenyészidőszakban megnövekvő ózon dózis akár komoly termésátlag csökkenést is eredményezhet.

Klímaváltozás hatásainak vizsgálata kémiai transzport modellel

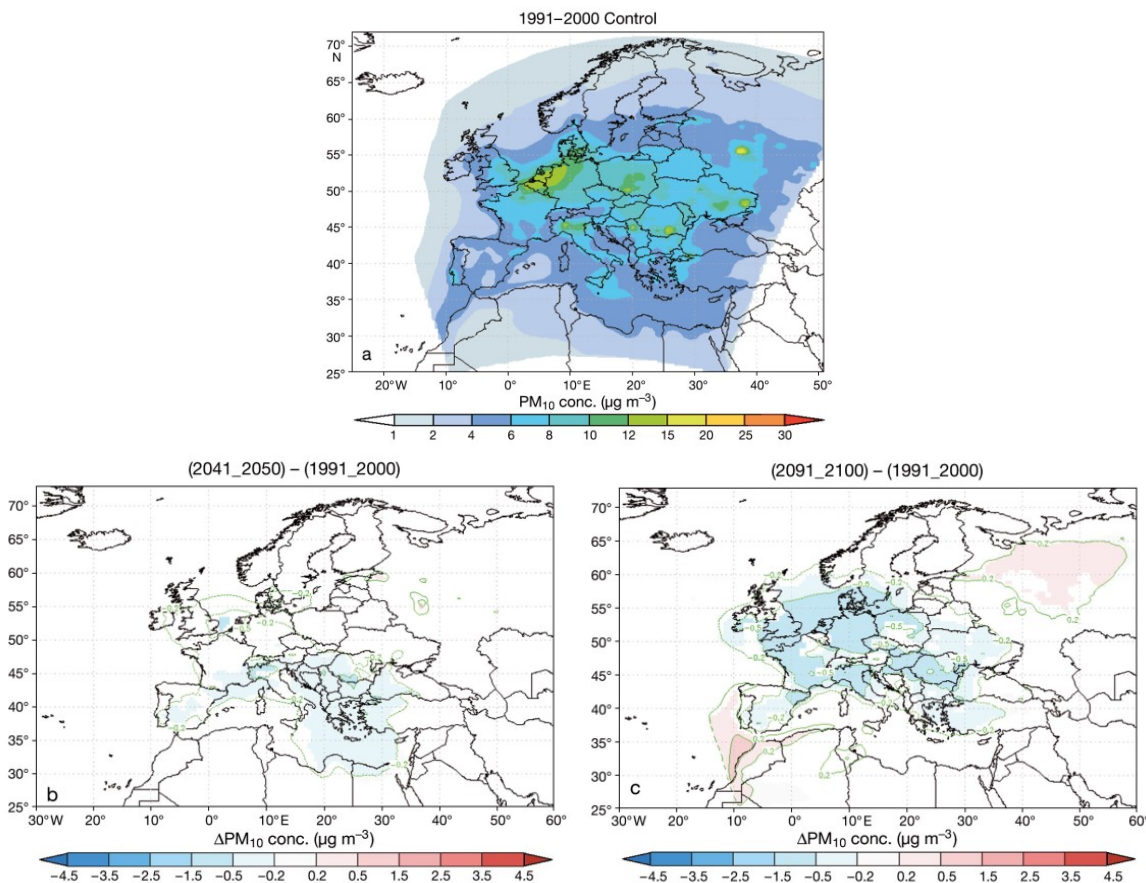
A klímaváltozás hatásait a levegőminőségre kémiai transzport modellel már a 2000-es évek második felétől elkezdték vizsgálni (Meleux et al., 2007, Juda-Rezler et al., 2012). Juda-Rezler és társai 2012-ben publikált cikkükben már Magyarországra vonatkozó vizsgálati

eredményeket is közöltek. A kutatásban a talajközeli ózon és a PM₁₀ koncentráció jövőbeli viselkedését vizsgálták. A számításokhoz a RegCM3/CAMx modell rendszert használták. A modell szimulációkat állandó antropogén kibocsátással és éghajlat állapotától függő biogén emisszióval végezték. A kontroll időszaknak az 1991–2000 éveket jelölték ki, míg két projekció készült a 2041–2050 és a 2091–2100 időszakokra vonatkozóan.

A vizsgálatuk eredménye azt mutatta, hogy a szimulált klímaváltozások meglehetősen gyengén befolyásolják a XXI. század közepének (2041–2050) levegőminőségét főleg Európa középső területén, így Magyarországon is. A század végére (2091–2100) azonban a nyári átlagos O₃ koncentráció növekedése és az éves átlagos PM₁₀ csökkenése mutatkozik Közép-Kelet-Európa térségében a megváltozott éghajlat hatására. A szimulációk eredménye alapján hazánkban a XXI. század végére a nyári átlagos ózon koncentráció 5-6 ppb-vel nő, míg a PM₁₀ koncentráció 1 µg/m³-rel csökken. Fontos hangsúlyozni, hogy a számítások során állandó antropogén emisszióval számoltak, a kimutatott koncentráció-emelkedés, illetve csökkenés csak a klímaváltozás hatását tükrözi. A kimutatott változásokért elsősorban a nyári hőmérséklet növekedése és a nyári csapadék csökkenése volt felelős az ózon esetében, míg a téli csapadékmennyiség növekedése a PM₁₀ esetében.



1. ábra: Az O₃ koncentráció nyári átlaga a referencia időszakban, valamint a 2041–2050 és a 2091–2100 időszakokra várható változás (Juda-Rezler et al., 2012).



2. ábra: A PM_{10} éves átlag koncentráció alakulása a referencia időszakban, valamint a 2041–2050 és a 2091–2100 időszakokra várható változás (Juda-Rezler et al., 2012).

Hazai modellezési tervek a klímaváltozás levegőminőségre gyakorolt hatásának vizsgálatára

Az éghajlatváltozás hatását a levegőminőségre Magyarországon az ALADIN-Climate klímamodell kb. 10 km-es felbontású eredményeiből kiindulva a CHIMERE kémiai transzport modellel végzett számításokra alapozva tervezzük megvizsgálni. A modellel először múltbeli időszakra készítünk szimulációkat és validációs céllal összevetjük az eredményeket az Országos Légszennyezettségi Mérőhálózat mérési adataival. A vizsgálat célja, hogy megállapítsuk, hogy a modell rendszerünk mennyire jól tudja reprodukálni a kontroll időszak levegőminőségi állapotát. Referencia időszaknak a 2000–2005 periódust jelöltük ki, elsősorban a rendelkezésre álló input adatok alapján. A referencia időszakra végzett számításokhoz az EMEP adott évekre vonatkozó rácsponti emissziós adatbázisát használjuk.

A kontroll számítások után fogjuk elkészíteni a jövőre vonatkozó projekciókat a 2021–2050 időszakra vonatkozóan, éves felbontással. Ezekhez a számításokhoz a GAINS modell 2020, 2025, 2030, 2040, 2050 évekre vonatkozó emissziós adatai közül a kevésbé optimista verziót (Baseline scenario) tervezzük használni.

A vizsgálathoz felállított modellrendszer jellemzőit az 1. táblázat foglalja össze. A tervezett futtatás legjelentősebben abban különbözik Juda-Rezler és társai munkájától, hogy nem állandó antropogén emisszióval fogunk számolni. Már a referencia időszak 6 éve is az adott évre vonatkozó rácsponti emissziókkal, majd a projekciók is 5/10 évente változó emissziós értékekkel lesznek számolva. Tehát az eredmények nemcsak a klímaváltozás, hanem a gazdasági előrejelzések alapján készült kibocsátási forgatókönyvek hatását is tükrözni fogják.

1.táblázat: ALADIN-Climate/CHIMERE modellrendszer jellemzői.

modell	ALADIN-Climate	CHIMERE
modell típusa	klímamodell	kémiai transzport modell
felbontás	10 km	0,1°
határfeltétel	ARPEGE-Climat	LMDz-INCA + GOCART
forgatókönyv / emisszió	RCP pesszimista	EMEP és ECLIPSE_V6b_CLE_baseline

A szimulációk eredményeinek segítségével nemcsak az egyes szennyezőanyagok koncentrációjában várható változásokat tudjuk majd vizsgálni, hanem az éghajlatváltozás hatásait leíró indikátorok kiszámításával, a mindennapi életben, és a mezőgazdaságban használt indexeket tudunk előállítani. Ilyen indexek például az

- *AOT40*: az ózon mezőgazdaságra gyakorolt hatásának vizsgálatához legelterjedtebben használt koncentráció alapú mérőszám, amely egy adott küszöbérték (jelen esetben $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) feletti óras koncentráció összeget jelenti, adott időszakra vonatkozóan.
- *SOMO35*: az egészségügyi hatások indikátora az ózon kitettség szempontjából. Az index értékét a napi 8 óras ózon mozgóátlagok maximumának egész évre való összegzésével kapjuk, ha azok magasabbak, mint 35 ppb.
- *POD_y*: a növények által felvett Y küszöbérték feletti, sztómafluxus alapú ózon mennyisége, egy meghatározott időtartam alatt vagy egy növekedési periódusban.

Összefoglalás

Az éghajlat, az ökoszisztémák és a biogeokémiai folyamatok közötti bonyolult kapcsolatok együttesen befolyásolják a levegőminőséget. Annak érdekében, hogy a jövőben várható levegőminőség alakulását előre tudjuk vetíteni, ezeknek az összetett folyamatoknak a jobb megértésére van szükség. Mivel ezeknek a kölcsönhatásoknak regionális és globális vonatkozásait is figyelembe kell vennünk a Föld-rendszer együttes vizsgálatakor, ezért korunk korszerű numerikus modelljeinek a következő folyamatokat is tudniuk kell kezelni:

- fizikai éghajlat, beleértve a többléptékű dinamikát és mikrofizikát;
- légkörkémia és biogeokémiai körfolyamatok;
- szárazföldi ökoszisztémák és hidrológiai folyamatok;
- természeti és társadalmi rendszerek kölcsönhatásai.

A jövő egyik tudományos kihívása nemcsak az, hogy jobban megértsük a Föld-rendszer különböző összetevőinek a viselkedését, hanem a tudományágak összekapcsolása annak érdekében, hogy a bolygónk jövőére vonatkozóan numerikus modell számítások készülhessenek.

A jelenleg is folyamatban lévő kutatás Magyarország térségében várható éghajlat változás hatásait vizsgálja a levegőminőségre vonatkozóan. A kutatás a jelen fázisában a regionális skálán bekövetkező változások hatásait vizsgálja, nem foglalkozik a városi éghajlatváltozás várható hatásaival, ugyanakkor szükségesnek tartjuk ennek a területnek is a jövőbeli vizsgálatát.

Köszönetnyilvánítás:

A cikkben bemutatott kutatás a Széchenyi Terv Plusz program keretében az RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú projekt támogatásával valósult meg.

Hivatkozások

- Doherty, R. M., Heal, M. R., O'Connor, F. M.*, 2017: Climate change impacts on human health over Europe through its effect on air quality. *Environmental Health*, 16(1): 33–44. <https://doi.org/10.1186/s12940-017-0325-2>
- Ferenczi, Z., Imre, K., Lakatos, M., Molnár, Á., Bozó, L., Homolya, E., Gelencsér, A.*, 2021: Long-term characterization of urban PM₁₀ in Hungary. *Aerosol and Air Quality Research*, 21: 210048. <https://doi.org/10.4209/aaqr.210048>
- Jacob, D. J., Winner, D. A.*, 2009: Effect of climate change on air quality. *Atmospheric environment*, 43(1): 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.09.051>
- Juda-Rezler, K., Reizer, M., Huszar, P., Krüger, B. C., Zanis, P., Syrakov, D., Katragkou, E., Trapp, W., Melas, D., Chervenkov, H., Tegoulas, I., Halenka, T.*, 2012: Modelling the effects of climate change on air quality over Central and Eastern Europe: concept, evaluation and projections. *Climate Research*, 53(3): 179–203. <https://doi.org/10.3354/cr01072>
- Meleux, F., Solmon, F., Giorgi, F.*, 2007: Increase in summer European ozone amounts due to climate change. *Atmospheric environment*, 41(35): 7577–7587. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.05.048>
-

ORCID

Ferenczi Z.  <https://orcid.org/0000-0002-9163-4628>