

Világjáró részecskék a légkörben

Az Eyjafjallajökull vulkán kitörésének és a fukushimai balesetnek a tanulságai

Miert volt szükséges Európa-szerte légtérzárát elrendelni 2010-ben az izlandi Eyjafjallajökull vulkán kitörése miatt? Hogyan lehetséges, hogy a vulkántól mindössze 150 km-re található keflavíki repülőtér mégis fogadhatta a gépeket? Hogyan juthatott el a vulkáni hamu egészen délre, még Spanyolország térségébe is, majd terjedt szét szinte az egész kontinens felett a légkörben? Miért voltak – ha más nem is – a meteorológiai körülmények viszonylag szerencsésnek mondhatók a fukushimai atomerőmű balesete idején? Hogyan lehet előre jelezni a légköri szennyeződésfelhők útját, és ezáltal idejében felkészülni a szükséges légiforgalmi korlátozásokra vagy kitelepítésekre? Milyen tényezők befolyásolhatják ezen előrejelzések bizonytalanságát? Hogyan jelenik meg a káosz az aeroszolrészecskék' sodródásában? A cikk ezekre a kérdésekre igyekszik válaszolni.

A különböző légköri szennyeződések (gázok, aeroszolrészecskék) terjedésének számítógépes vizsgálata, előrejelzése fontos feladat, hiszen akár az emberi tevékenységből származó, akár a természetes eredetű kibocsátások komoly hatással lehetnek az élővilágra, társadalomra, gazdaságra, és nem eleendő, ha csupán aktuális mérésekből (pl. műholdképről) tudunk tájékozódni. Gondoljunk csak a fukushimai balesetet követő intézkedésekre, vagy idézzük fel például az említett vulkánkitörést: a hamu egy része a szigetre visszahullva okozott nehézségeket, a levegőben sodródván pedig, amellet, hogy megnehezítette az utazni vágyók életét, a légitársaságoknak is hatalmas gazdasági veszteségeket okozott.

A szennyeződések nyomában

A szennyeződések nagy távolságú mozgását légköri terjedési modellekkel lehet követni. Az ún. lagrange-i terjedési modellek

¹ Aeroszol: gáznemű közeg és benne finoman eloszlott szilárd vagy cseppfolyós részecskék együttes rendszere. A szilárd vagy cseppfolyós részecskéket aeroszolrészecskéknek nevezzük. Aeroszolrészecskékről csak vízgőzben telítetlen levegő esetén beszélünk, a köd-, felhő-, csapadékcseppeket nem tekintjük azoknak.

1. A határsebesség

A határsebesség kicsiny, m_r tömegű, r sugarú gömbnek feltételezett aeroszol részecskékre az ún. Stokes-féle közegellenállási erő ($6\pi r \rho v w_{\text{határ}}$) és a nehézségi erő ($m_r g = 4r^3 \pi / 3 \cdot \rho_r g$) egyensúlyából számítható (a részecskékre ható felhajtóerő elhanyagolható):

$$w_{\text{határ}} = \frac{2\rho_r r^2 g}{9\rho v} \quad (2)$$

A határsebesség tehát függ a részecske r sugarától és ρ_r sűrűségétől. g jelöli a nehézségi gyorsulást, ρ és v a levegő sűrűsége, illetve kinematikai viszkozitása. A közelítés a légkörben általában előforduló $\rho_r \approx 1000\text{--}2000$ kg/m³ sűrűségű részecskékre $r \leq 10\text{--}15$ μm sugárral érvényes. Érdemes megjegyezni, hogy $r = 1\text{--}10$ μm -es részecskékre a határsebesség nagyságrendje $10^{-1}\text{--}10^{-2}$ m/s, amely összemérhető a levegőben jellemző függőleges áramlási sebességekkel, ezért a részecskék függőleges áthelyeződését a határsebesség mellett a fel- és leáramlások ténylegesen is befolyásolják.

A nagyobb részecskék határsebessége a négyzetes közegellenállási törvényből számolva ennél lényegesen nagyobb, $1\text{--}10$ m/s nagyságrendűnek adódik. Ennélfogva ezek a részecskék hamar, akár a légkörbe való kikerülésük után néhány perccel visszahullnak a földre, és helyileg okozhatnak problémákat (pl. az Eyjafjallajökull kitörésekor visszahulló hamu).

A gázok $r = 0$ μm sugarú, $w_{\text{határ}} = 0$ m/s határsebességű részecskéknél tekinthetők, amelyek az (1) egyenlet alapján minden időpillanatban a környező levegő sebességével haladnak.

alkalmasak a szennyeződés minden egyes részecskéje útvonalának (trajektóriájának) meghatározására a részecskék mozgásegyenlete alapján. Ennek a módszernek előnye, hogy a különböző tulajdonságú (pl. eltérő sűrűségű vagy méretű) részecskék egyedileg kezelhetők. A mozgásukat a Newton-egyenlet írja le, amely a légköri terjedés skáláján a következő egyenlettel egyszerűsödik:

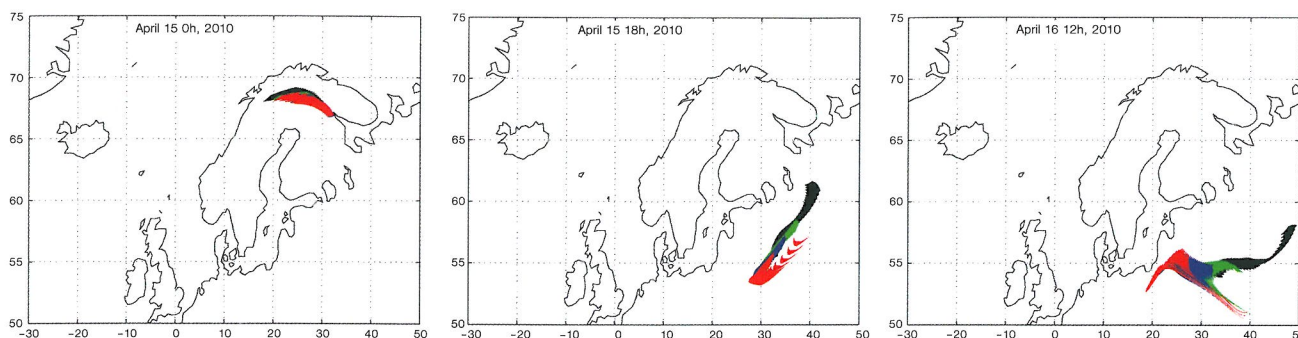
$$\mathbf{v}_r = \mathbf{v} - w_{\text{határ}} \mathbf{n}. \quad (1)$$

Itt \mathbf{v}_r jelöli a részecske sebességvektorát, \mathbf{v} a szélesebbévektor a részecske helyén, $w_{\text{határ}}$ pedig a részecskére ható nehézségi erő hatását figyelembevevő ún. határsebesség (a részecske ezzel a sebességgel esne álló levegőben), \mathbf{n} egy függőlegesen felfelé irányuló egységvektor. Parányi aeroszolrészecskékre a határsebesség négyzetesen növekszik a részecskemérettel (l. **1. blokk**). Az (1) egyenlet annyiban tér el Károlyi György írásában vagy a tavi és folya-

mi sodródást bemutató cikkekben használt mozgásegyenlettől, hogy megjelenik benne a részecskék süllyedését jellemző, $w_{\text{határ}}$ -t tartalmazó tag is.

A részecskék pályáinak numerikus számítása, vagyis a részecskék kis időközönkénti újabb és újabb helyzeteinek meghatározása alapvetően az (1) egyenletben megjelenő \mathbf{v} és $w_{\text{határ}}$ szél- és határsebesség ismeretében zajlik. A légkör felszínhez közeli néhány km-es rétegében a csapadék is jelentős szerepet játszik: felhő- vagy esőcseppel ütközve, azokba kerülve a részecske kimosódhat a felszínre, így a szimulációkban ezt a hatást is célszerű figyelembe venni.

A terjedési számításokhoz szükséges meteorológiai változók (pl. szélesebbévektor, csapadék) múltbéli adatokat tároló adatbázisokból (pl. ERA-Interim [1]) vagy előrejelzési mezőkből származhatnak. Ezek a mennyiségek általában egy háromdimenziós rácsra állnak rendelkezésre néhány óras fel-



1. ábra. A Eyjafjallajökull vulkánból származó, különböző méretű aeroszolrészecskékből álló vulkáni hamufelhők szimulációja 18, 36 és 54 órával a „kitörés” után (piros: $r = 1 \mu\text{m}$, kék: $r = 2 \mu\text{m}$, zöld: $r = 5 \mu\text{m}$, fekete: $r = 10 \mu\text{m}$)

bontásban, így minden számítási időlépésben (aminek a nagysága az adatok időbeli felbontásának töredéke, csak néhány perc) a részecskék pillanatnyi sebességének (1) egyenlet szerinti meghatározása a megfelelő rácspontokból a részecskék helyére való térbeli és időbeli interpolációval történik.

Kicsiny méret – hosszú élet

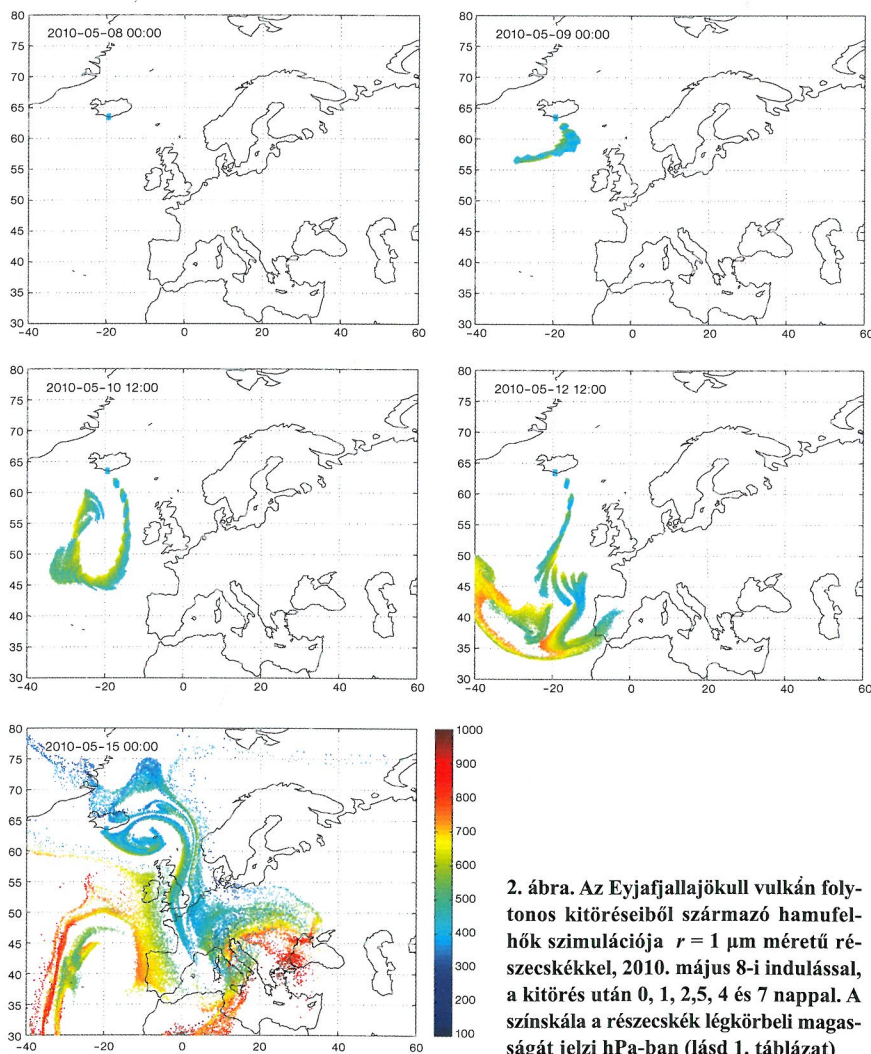
Tekintsünk meg néhány szimulációt, hogy képet kapjunk a vulkáni hamura jellemző sűrűségű ($\rho_r = 2000 \text{ kg/m}^3$), de különböző méretű aeroszolrészecskék levegőbeli vándorlásáról [2]. Az Eyjafjallajökull valóságban bekövetkezett, többé-kevésbé folyama-

tos pöfögésének számítógépes szimulációja helyett először érdemes csak egy-egy pillanatszerűen kibocsátott vulkáni hamufelhő útját nyomon követni. Az 1. ábra egy kezdetben $100 \text{ km} \times 100 \text{ km} \times 4 \text{ km}$ -es, 2010. április 14-én 6 UTC-kor az Eyjafjallajökull fölött kb. 5,5 km magasságban induló hamufelhő terjedését mutatja felülnézetből a következő néhány napra vonatkozóan. A hamufelhő útvonala és szétterjedése nagymértékben függ attól, hogy mekkora méretű szemcsékből áll, hiszen a különböző sugarú, de azonos kiindulási helyzetű részecskék az eltérő határsebességük miatt hamar más-más magasságban találják magukat, ahol az épp uralkodó különböző szélviszonyok hatására egyre jobban elkülönülnek eltérő méretű „párjuktól”, mind magasságban, mind vízszintes irányban. A nagyobb részecskék hamarabb közelítik meg a felszínt, és mivel a felszín közelében általában kisebb és eltérő irányú szélsebességek lépnek fel, vízszintesen „lemaradnak” és más irányban terjednek apróbb társaikhoz képest. Ahogy a keretezett írásban említettük, az igazán nagy ($r > 100 \mu\text{m}$) hamuszemcsék már rögtön a kezdet kezdetén annyira hátramaradnak, hogy szinte azonnal kiülednek, és csupán 10–100 km-es távolságokat tesznek meg a levegőben.

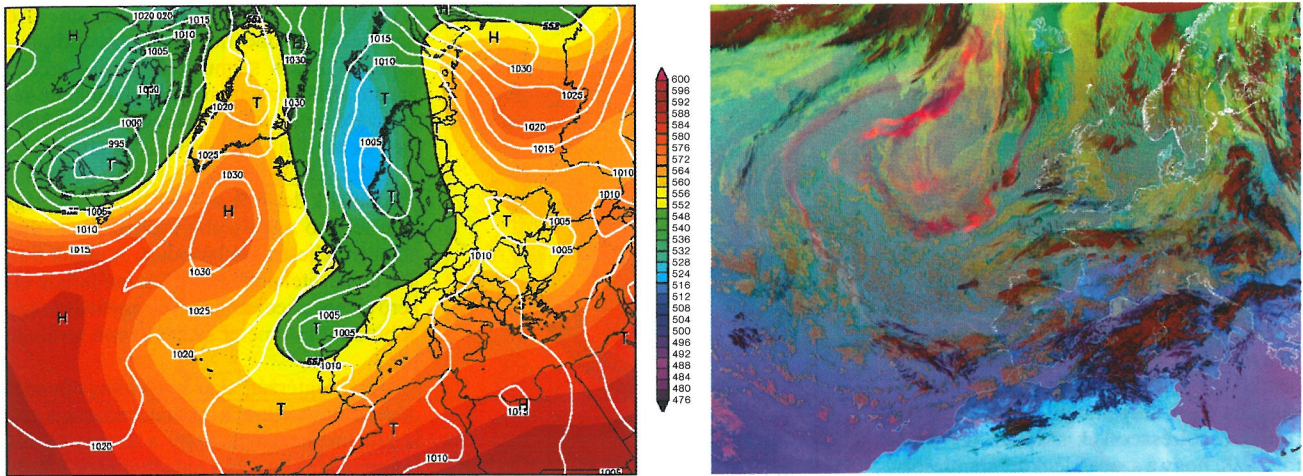
Kedvező és kedvezőtlen áramlási viszonyok

Az Eyjafjallajökull kitörései

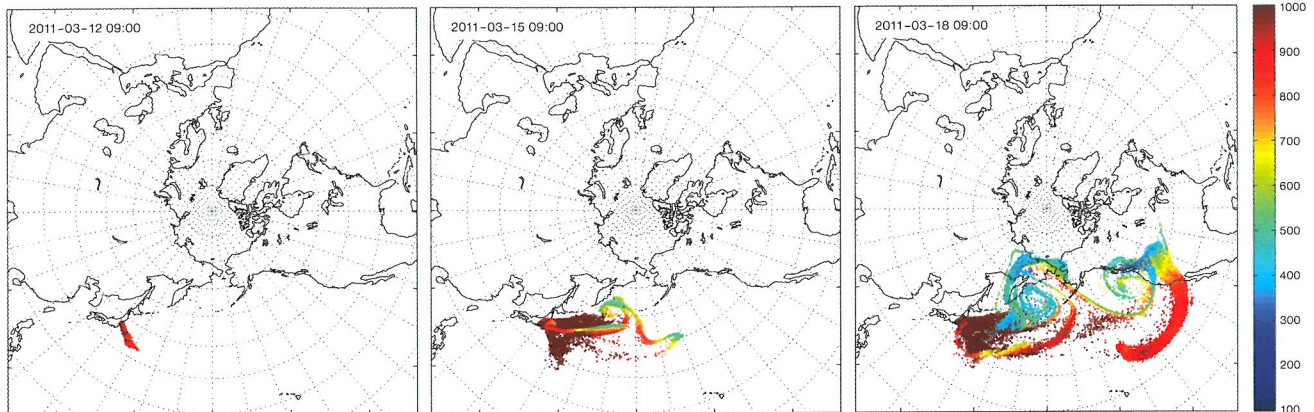
A 2. ábrán az Eyjafjallajökull vulkán folyamatos kitöréseiből származó, kizárólag $1 \mu\text{m}$ -es részecskéket tartalmazó hamufelhők terjedésének szimulációja látható a 2010. május 8–15. közötti időszakra, a 3. ábra pedig a május 10-i meteorológiai helyzetet mutatja be. A részecskék mozgását mindig az éppen aktuális áramlási mező határozza meg, ezt követik nagyon rövid ideig. A 2. és 3. ábrát összevetve máris választ kapunk a cikk elején felvetett kérdések egy részére. Ezekben a napokban Izland térségében észak-



2. ábra. Az Eyjafjallajökull vulkán folyamatos kitöréseiből származó hamufelhők szimulációja $r = 1 \mu\text{m}$ méretű részecskékkel, 2010. május 8-i indulással, a kitörés után 0, 1, 2, 5, 4 és 7 nappal. A színskála a részecskék légköri magasságát jelzi hPa-ban (lásd 1. táblázat)



3. ábra. 2010. május 10-i időjárási helyzet. Bal: felszíni nyomásmező [hPa] (fehér kontúr, H: magas nyomás – anticiklon, T: alacsony nyomás – ciklon) és az 500 hPa-os geopotenciális magasság² mezeje [dekaméter] (színes kontúr) [3]. Jobb: műholdkép (rózsaszín: vulkáni hamu, sárga/drapp: alacsony szintű felhők, piros: vastag felhők) [4]



4. ábra. A fukushimai atomerőmű balesetekor kiáramló radioaktív szennyeződés terjedésének szimulációja a légkörben. A szín-skála a részecskék légköri magasságát jelzi hPa-ban (a barna felel meg a kiülepedett részecskéknek, lásd 1. táblázat) ($r = 1 \mu\text{m}$)

ki, északnyugati szél volt jellemző (amely dél, délkelet irányba fúj), így fordulhatott elő, hogy habár a keflavíki repülőtér meglehetősen közel fekszik a vulkánkitörés helyszínéhez, mégis nyitva tarthatott [5, 6], mivel a hamufelhő az uralkodó szelek miatt mindvégig elsodródott Izlandtól délre, délkeletre elnyúlva, és nem a sziget felett terjeszkedett egyre nagyobbra, mint egy fesztékpaca. A 2. ábra május 10-i képén jól megfigyelhető, hogy a hamu az Izlandtól délnyugatra található anticiklon (3. ábra bal oldali képén H-val jelölve) áramlási tartományába kerül, és az óramutató járásával egyezően visszatekeredik észak felé. A május 10-i szimuláció és az ugyanezen a napon készült műholdképen (3. ábra jobb ol-

p [hPa]	z [km]
1000	felszín
850	1,5
700	3
500	5,5
300	9

1. táblázat. A nyomási szintek átlagos magassága

dali kép) rózsaszínben megjelenő hamufelhő elhelyezkedése között jó egyezés tapasztalható. Ugyancsak az atlanti térségben fellépő északias szelek eredményeképpen juthatott el a vulkáni hamu egészen az Izlandtól 2000 km-nyire lévő Ibériai-félszigetig is, ezzel akadályozva az Atlanti-óceán fölötti légi közlekedést [6]. A 2. ábra május 15-i képén a légkörbe kikerülő részecskék jól kirajzolják egy Izlandtól dél-

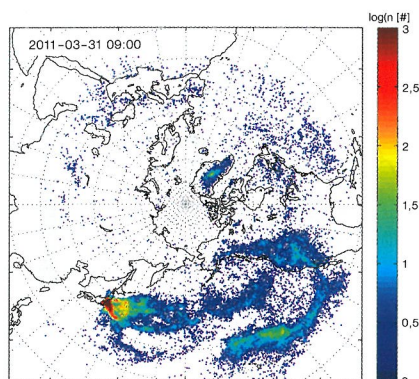
keletre felépülő ciklon, illetve egy Portugáliától nyugatra elhelyezkedő anticiklon áramlási viszonyait, valamint az is figyelemre méltó, hogy a részecskék a Skandináv-félszigettől eltekintve szinte egész Európa fölött megtalálhatók (a koncentráció nem mindenütt lépte át a légtérzár elrendeléséhez szükséges határértéket). A 2. ábra színeiből arra is következtethetünk, hogy ugyanakkora méretű részecskék ugyanannyi idő alatt egészen eltérő magasságokba kerülhetnek.

A fukushimai baleset

Míg 2010 tavaszán az Eyjafjallajökull kitöréssorozata meglehetősen rosszul érintette az európai repülőjáratokat, közel egy évvel később, a Fukushima Daiichi atomerőmű balesetekor a radioaktív szennyeződés levegőbe kiáramló része szerencsére nem a kontinens, hanem nagyrészt a Csendes-óceán felé sodródott. A 4. ábra a folyama-

² Az UTC a Coordinated Universal Time (egyezményes koordinált világidő) rövidítése.
³ A geopotenciális magasság körülbelül az adott nyomási szint tengerszint feletti magasságának felel meg.

tos, minden időlépésben a becsült kibocsátással arányos számú, $r = 1 \mu\text{m}$ sugarú részecske terjedését mutatja be, barnával jelölve a felszín eléré, kiülepedett részecskéket. A légköri szennyeződés többnyire délkelet-kelet-északkelet irányban hagyja el Japán térségét. A márciusi 15-i képen már észrevehető, ahogy az aeroszolrészecskék a Kamcsatka-félszigetnél ciklonális (az óramutató járásával ellentétes) irányban áramlanak, a 18-i kép pedig még szebben elénk tárja ezt, illetve az észak-amerikai partnál kifejlődött ciklont, amelyekbe besodródva a részecskék a feláramlásokkal a felszínhez közeli légrétegekből nagyobb magasságokba (6–7 km) jutnak. A magasba került aeroszolrészecskék számára így lehetővé vált, hogy a szabad légköri áramlásokkal világszerte útra induljanak. A radioaktív szennyeződés néhány nap alatt – természetesen kisebb koncentrációban, felhígulva – megjelent, mérhető volt Észak-Amerikában, majd kis idő elteltével Európában is [7]. Az 5. ábrán a felszín eléré, kiülepedett részecskék számsűrűsége (azaz az ülepedési „koncentrációmező”) igencsak inhomogén eloszlást mutat. A legjelentősebb

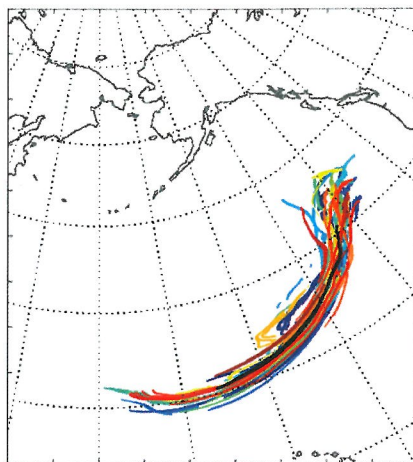


5. ábra. A kiülepedett radioaktív szennyeződés eloszlása. A színek a március 12–31. időszakban kiülepedett részecskék számát (n) jelölik 50 km×50 km-es területi felbontásban

kiülepedés Japán partjainál lép fel, de a féltekén máshol is található olyan területek, ahol sok részecske távozott a légkörből. Ez a fraktálszerű kiülepedési mintázat a vulkáni hamura és mindenfajta kisméretű szennyező részecskére jellemző, és a sodródás kaotikus jellegének a következménye.

Megbízhatunk-e egyetlen előrejelzésben?

Természetesen akár vulkánkitörésből, akár ipari balesetből származó aeroszolrészecskék vagy gázok útját próbáljuk nyomon követni, előre jelezni a légkörben, a szimulációk mindenképpen többféle hibával lesz-



6. ábra. Kicsit különböző kezdeti feltételekből induló meteorológiai előrejelzések felhasználásával kapott $r = 1 \mu\text{m}$ sugarú részecskéből álló szennyeződésfelhők 2,5 nap után. A szennyeződésfelhők 2011. március 12-én 0 UTC-kor kb. 5,5 km magasságban indultak Fukushima felett egy kb. 70 km×70 km-es területről

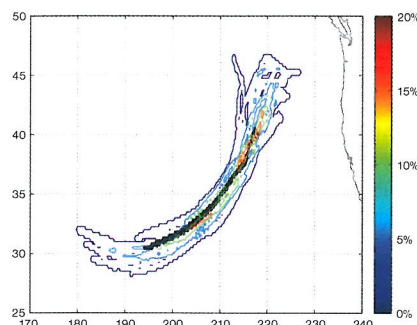
nek terheltek. Egyrészt, ha a számítások szükséges összes felhasznált adatot tökéletesen pontosan is ismernénk, a terjedési modell által figyelembe vett folyamatok, numerikus közelítések befolyásolnák a szimulációk eredményét. Ráadásul a legtöbb esetben csak meglehetősen nagy bizonytalansággal lehet megbecsülni a kibocsátott szennyeződésfelhők kezdeti jellemzőit, és mindemellett a felhasznált meteorológiai adatok is számos bizonytalanságot tartalmaznak, amelyek többek között a meteorológiai mezők kezdeti feltételeiben rejlő hibák következményei. Ez utóbbi hatásának feltárására az „alap”, nagyfelbontású előrejelzés mellett, feleakkora felbontással, kissé perturbált kezdeti állapotokat előállítva is lefuttatják a meteorológiai modellt. Így jön létre a több előrejelzési tagból álló valószínűségi (ensemble, sokasági) előrejelzés. Az ensemble előrejelzés szétartásából az előrejelzések bizonytalanságára következtethetünk, amint azt Horányi András és munkatársainak írása részletesen bemutatja [8].

A többi hibaforrástól ideiglenesen eltekintve, csupán a meteorológiai előrejelzésből fakadó, a terjedésszámításra hatással lévő bizonytalanságok tanulmányozása céljából tekintünk például egy feltételezett, pillanatszerű, kezdetben kb. 70 km×70 km-es kiterjedésű szennyeződésfelhőt Fukushima felett [9]. A 6. ábra mutatja a kissé különböző kezdeti feltételekből induló meteorológiai előrejelzések felhasználásával készített szimulációkban a szennyeződésfelhők elhelyezkedését a Csendes-óceán fölött 2,5 nap után. A fekete a nagyfelbontású előrejelzés, a színek pedig a különböző ensemble tagok alkalmazásával nyert szeny-

yeződésfelhőket jelölik. Mi az, ami első ránézésre szembeötlő? A szennyeződésfelhők az összes szimuláció szerint erősen megnyúltak kezdeti kompakt alakjukhoz képest. Ezt az ezekben a napokban a Japántól keletre található futóáramlás⁴ segítette elő: a részecskék a futóáramlás erős, nyugatias szeleivel kelet felé sodródtak, és a térségben fellépő nagy szélnyírásnak köszönhetően erőteljesen széthúzódtak. A másik fontos észrevétel a különböző színű felhők eltérő elhelyezkedése, amelyek együttesen egy több száz kilométer széles sávon terülnek el.

Akár légtérzár, akár kitelepítés elrendelése kerül terítékre, kockázatelemzésnél célszerű megbecsülni, hogy a szennyeződés merre sodródhat, hol haladhat meg a koncentrációja bizonyos határértéket és ennek mekkora a valószínűsége. Az előbbi példában a nagyfelbontású előrejelzés szennyeződésfelhőjéhez képest jóval nagyobb terület fölött jelennek meg a sokasági előrejelzés felhői. A 7. ábrán a kontúrvonalak arra utalnak, hogy az ensemble tagok hány százaléka szerint lép túl az adott térségben a koncentráció egy bizonyos határértéket. Ebből képet nyerhetünk az adott területre az esemény bekövetkezésének valószínűségéről.

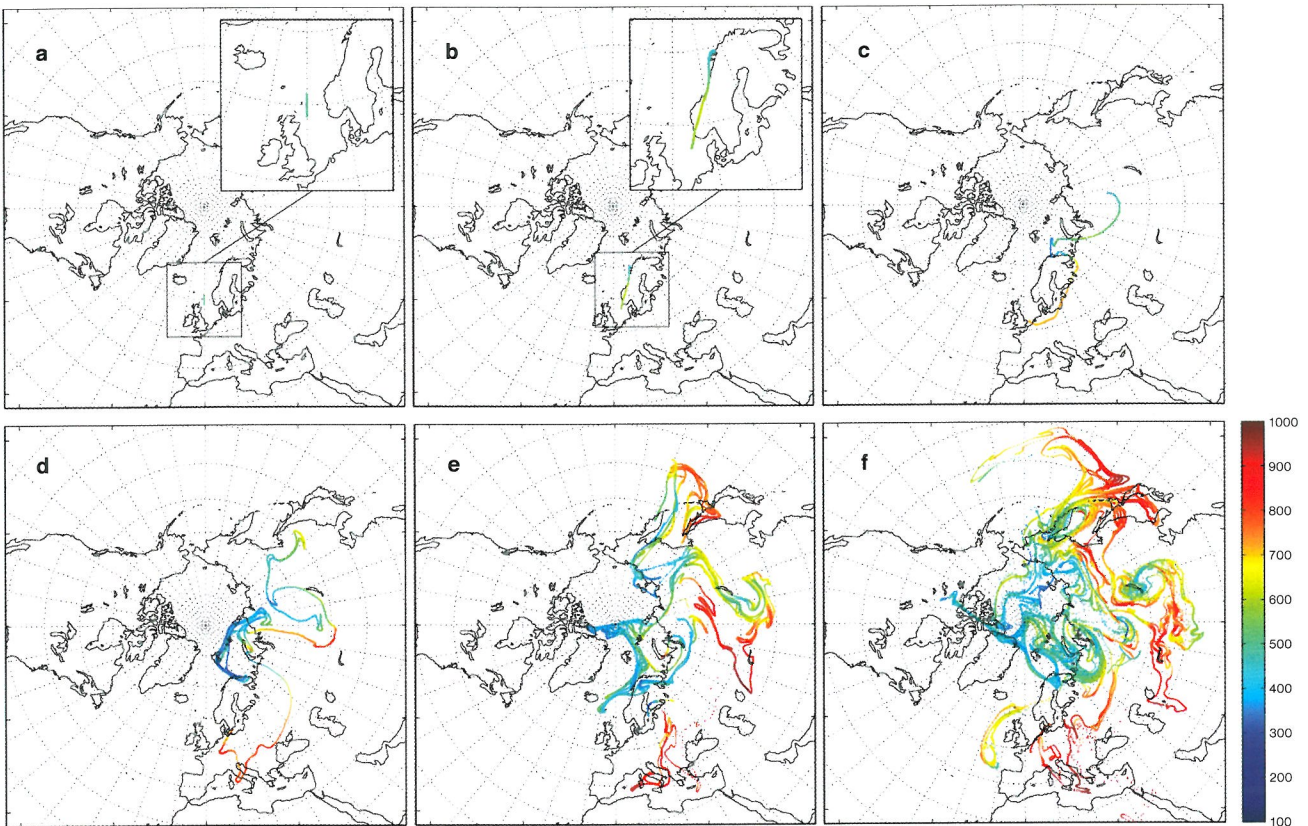
Láttuk tehát, ha pusztán csak az egyik bizonytalansági forrás hatását vizsgáljuk is,



7. ábra. A térképen a kontúrvonalak (2, 5, 10, 15, 20%) mutatják, hogy az ensemble tagok hány százaléka szerint számíthatunk az adott terület fölött szennyeződésre. A fekete szín jelöli azt a területet, ahová a nagyfelbontású előrejelzés felhasználásával jutnak a részecskék ($r = 1 \mu\text{m}$)

a szennyeződésterjedési szimulációk között igen nagy különbségek alakulhatnak ki. Így, ha lehetőség van rá, érdemes minél több hibaforrásra tekintettel lenni, hogy minél teljesebb képet kapjunk az előrejelzés bizonytalanságáról, a modellezett esemény lehetséges kimeneteleiről.

⁴ Futóáramlás: erős, keskeny áramlás egy közel vízszintes tengely mentén, amit a szélesség erős nyírása jellemez.



8. ábra. Egy kezdetben $L_0 = 3^\circ \approx 333$ km hosszúságú $r = 0$ μm sugarú, gáznak megfeleltethető részecskékből álló egydimenziós szennyeződésselhő sodródási képei 0, 2, 4, 6, 8 és 10 nappal a kibocsátás után. A színskála a részecskék magasságát jelzi hPa-ban (lásd 1. táblázat)

Girbegurba, tekervényes fonalak – megmutatkozik a káosz

Az előző esettanulmányokból kiderült, hogy egy-egy kezdetben kicsiny, kompakt szennyeződésselhő alakja hamar eltorzul. A 8. ábra egy vonalszerű felhő fejlődését követi nyomon, amely a sodródás folyamán egyre jobban megnyúlik, széthúzódik, és a szál a különböző légköri képződményekbe kerülve újabb és újabb kacsokat növeszt, az áramlások hatására „összegyűrődik”. Egy-két hét elteltével a megfigyelő a félteke tekintélyes részét behálózó, tekervényes, kacs-karingós fonál képével találkozhat. A részecskék sodródása során a kaotikus visel-

kedés nyilvánul meg abban, hogy a részecskévelhő szálás, fraktál alakzatban terjed szét, és teríti be az egyik, majd előbb-utóbb a másik féltekét is, bonyolult mintázatot kialakítva. A szennyeződésselhők nyúlásának mértéke az ún. topologikus entrópiával jellemezhető (1. 2. blokk).

A véges idejű (pl. 10 nap alapján számolt) topologikus entrópia jól megfigyelhető földrajzi és évszakos eloszlással rendelkezik (9. ábra). Ahogy az áramlási viszonyok alapján várható is, a közepes szélességeken (főként a féltekék téli évszakában) lépnek fel a legnagyobb értékek ($0,6 - 0,9 \text{ nap}^{-1}$) a folyamatosan kialakuló, fejlődő és elhaló ciklonok erős keverési és nyírási hatásának

következtében, míg a legkisebb értékekkel ($0,2 - 0,5 \text{ nap}^{-1}$) a nyugodtabb trópusokon találkozhatunk [11].⁵

A világszerte kalandnak vége szakad

Az aeroszolrészecskék a nehézségi erő, a levegő fel- és leáramlásainak, valamint a csapadék hatására, amint ez az előzőekből is kiderült, előbb-utóbb elhagyják a légkört, kiülednek a felszínre. Az ülepedési mező, ahogyan ez az 5. ábrán is jól kiténik, egyáltalán nem egyenletes, hanem térben és időben meglehetősen inhomogén eloszlást mutat. Mivel a felszínhez közel haladó szennyezőanyagokat alkalomszerűen az éppen hulló csapadék is könnyen kimoshatja a légkörből, rövid időtartamot tekintve a csapadékeloszlás mintázata és a légkörből távozó részecskék helyzetének rajzolata között erős kapcsolat fedezhető fel (lásd pl. 10. ábra).

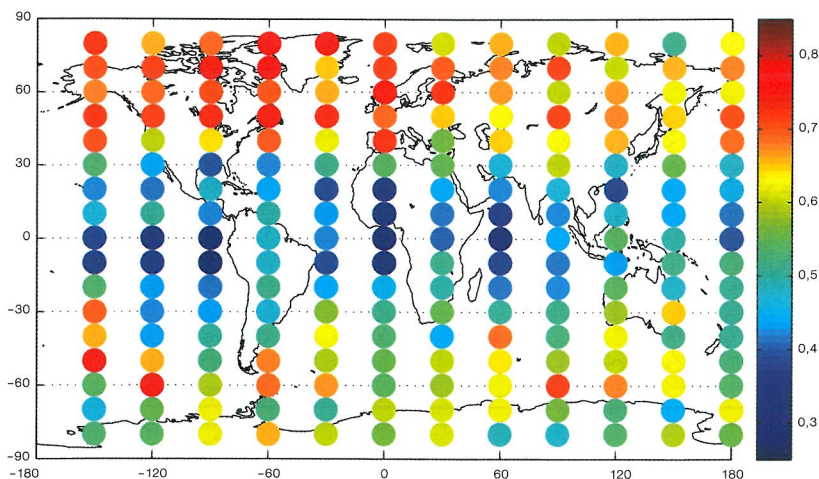
⁵ Néhány hónap elteltével egy szennyeződésselhő részecskéi (amennyiben elég aprók, és ezalatt nem távoztak számottevő mennyiségben a légkörből) már többé-kevésbé jól elkeverednek a féltekék fölött, így a fonál hosszának növekedése, a topologikus entrópia értéke sem függ a kiindulási helyzettől.

2. Topologikus entrópia

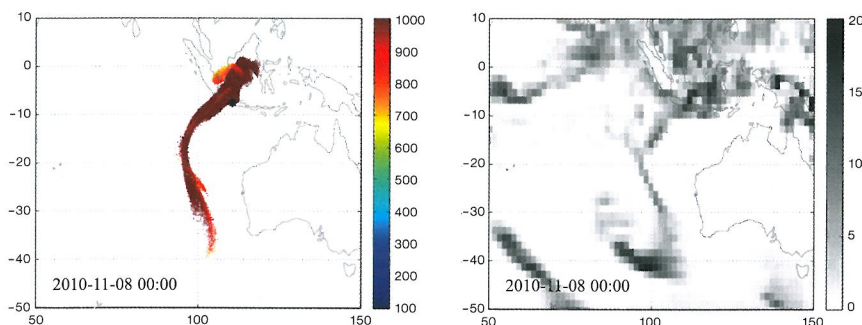
A tapasztalat szerint kaotikus rendszerekben a gyorsan girbegurba alakzattá fejlődő fonalak L hossza időben sebesen, nevezetesen exponenciálisan növekszik

$$L(t) \sim e^{ht},$$

és a növekedés mértékét a topologikus entrópia (h) írja le [10]. Ez a mennyiség a bonyolultság, szabálytalanság mérőszámának is tekinthető. A topologikus entrópia általában nagyobb a Ljapunov-exponensnél, és bizonyos esetekben, így a légköri szennyeződésterjedés kapcsán is, meghatározása egyszerűbb, mint a Ljapunov-exponensé. Jelen esetben h viszonylag nagy értékének ($0,89 \text{ nap}^{-1}$) köszönhetően a 10. napon a felhőfonál hossza már több ezerszeresére gyarapodott, és meghaladja a 10^6 km-t.



9. ábra. A körökkel jelölt földrajzi helyekre 10 napos intervallumokra számolt és időben átlagolt topologikus entrópia [nap⁻¹] a 2009. december – 2010. február időszakban



10. ábra. Bal: A Merapi vulkán kitöréséből származó hamufelhő szimulációja $r = 10 \mu\text{m}$ sugarú részecskékkel, 2010. november 1. 0 UTC indulással, a kitörés után 7 nappal (kezdeti méret: $100 \text{ km} \times 100 \text{ km} \times 4 \text{ km}$, kibocsátás magassága: 5 km). A színskála a részecskék légköri magasságát jelzi hPa-ban (lásd 1. táblázat). Jobb: Teljes csapadékmennyiség a november 8. 0 UTC-t megelőző 12 órában mm-ben

Mivel jellemezhető általánosságban a részecskék légkörből való kiürülésének üteme, és mi mondható el ennek méretfüggéséről? A tapasztalatok szerint a t idő után levegőben maradó részecskék $n(t)/n(0)$ aránya néhány nap után időben exponenciálisan csökken:

$$\frac{n(t)}{n(0)} \sim e^{-\kappa t} = e^{-t/\tau}$$

A kiülepedési folyamat gyorsasága tehát κ -val, a kaotikus jelenségek körében használatos mennyiséggel, az ún. szökési rátával számszerűsíthető (l. Gruiz Márton megfelelő keretezett írását). Ennek reciproka az elterjedtebben használt és a való életben jobban mérhető átlagos légköri

tartózkodási idő τ . Az exponenciális összefüggés csapadéktevékenység hiányában és annak jelenlétében is fennáll. Természetesen a várakozásoknak megfelelően az utóbbi esetben fokozottabb az ülepedés, nagyobb a szökési ráta, és rövidebb az aeroszolrészecskék átlagos légköri tartózkodási ideje.

Meglepő módon az átlagos tartózkodási idő rendkívül gyorsan (ismét exponenciálisan) csökken az r részecskemérettel:

$$\tau(r) \sim e^{-kr},$$

ahol $k \approx 0,21 - 0,28 \mu\text{m}^{-1}$. Parányi szennyezőkre τ a kibocsátás z magasságától függően elérheti a 20–60 napot is, míg az $r = 10 \mu\text{m}$ sugarú részecskék akár a nap töredékére, néhány óra alatt is kipotyoghatnak a levegőből⁶. Érdeemes utánagondolni, hogy ha azzal a naiv feltételezéssel élnénk, hogy a részecskék csupán a saját határsebességükkel hullanak lefelé, az átlagos élettartamuk ($\tau = z/w_{\text{határ}}$) négyzete-

sen függne r -től a (2) határsebesség r -függéséből adódóan. Az exponenciális méretfüggés arra utal, hogy a légáramlások jelentősen hozzájárulnak a részecskék légköri kaotikus mozgásának kialakulásához.

A tanulság dióhéjban

A természetes eredetű és az emberi tevékenységből származó aeroszolrészecskék és gázok légköri mozgását mind környezet-, mind egészségvédelmi szempontból fontos modellezni. A terjedési modellek szimulációit mérések segítségével tesztelhetjük. Fontos megjegyezni azonban, hogy a modell által készített előrejelzések számos hibával terhelték, amiket érdemes szem előtt tartani az eredmények kiértékelése során. A részecskék kaotikus sodródásának, dinamikájának jellemzésére a nemlineáris rendszerek elméletéből ismert fogalmak (pl. a szennyeződésselhők nyúlását jellemző topologikus entrópia vagy az ülepedési folyamat ütemét leíró szökési ráta) jól alkalmazhatók.

A munka az OTKA NK100296 pályázat támogatásával készült.

IRODALOM

- [1] ERA-Interim: http://data-portal.ecmwf.int/data/d/interim_daily/
- [2] Haszpra, T. T. T. (2011): *Volcanic ash in the free atmosphere: A dynamical systems approach*. Journal of Physics: Conference Series, 333, 012008.
- [3] Wetterzentrale: <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/fsreaeur.html>
- [4] EUMETSAT: http://oiswww.eumetsat.org/WEB-OPS/medialib/medialib/images/2010_05_10_1200_m8_rgb_24hmicro.jpg
- [5] http://en.wikipedia.org/wiki/Air_travel_disruption_after_the_2010_Eyjafjallajökull_eruption
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/2010_eruptions_of_Eyjafjallajökull#Effects_of_the_ash_plume_on_air_travel
- [7] Stohl, A., P. Seibert, G. Wotawa, D. Arnold, J. F. Burkhardt, S. Eckhardt, C. Tapia, A. Vargas, and T. J. Yasunari (2012): *Xenon-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition*. Atmospheric Chemistry and Physics 12, no. 5, 2313–2343.
- [8] Horányi A., Szépszó G. és Szűcs M. (2013): *Valószínűségi előrejelzések: áldás vagy átok?* Természet Világa, jelenlegi szám.
- [9] Haszpra, T., Lagzi, I., and Tél, T. (2013): *Dispersion of aerosol particles in the free atmosphere using ensemble forecasts*. Nonlinear Processes in Geophysics, 20, 759–770.
- [10] Tél T. és Gruiz M. (2002): *Kaotikus dinamika*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest.
- [11] Haszpra, T. and Tél, T. (2013): *Topological entropy: a Lagrangian measure of the state of the free atmosphere*. Journal of the Atmospheric Sciences. doi: 10.1175/JAS-D-13-069.1.

⁶ A szimulációinkban megbecsült tartózkodási idő nem veszi figyelembe az eltérő tulajdonságú részecskék kémiai és fizikai átalakulásait, ezért a különböző szennyeződések mért tartózkodási idejéhez képest előfordulhatnak eltérések.