

A REPLAT MODELL ÉS ALKALMAZÁSA LÉGKÖRI SZENNYEZŐDÉSEK TERJEDÉSÉNEK VIZSGÁLATÁRA

doktori értekezés tézisei

HASZPRA TÍMEA

Környezettudományi Doktori Iskola
Környezetfizika doktori program

Iskolavezető: **Dr. Galács András**, egyetemi tanár
Programvezető: **Dr. Jánosi Imre**, egyetemi docens

Témavezetők: **Dr. Tél Tamás**, egyetemi tanár
Eötvös Loránd Tudományegyetem
Elméleti Fizika Tanszék

Dr. Horányi András
Országos Meteorológiai Szolgálat és
European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

Konzulens: **Dr. Tasnádi Péter**, egyetemi tanár
Eötvös Loránd Tudományegyetem
Meteorológiai Tanszék

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Elméleti Fizikai Tanszék
Budapest, 2014

1. Bevezetés

A környezetvédelem iránti növekvő érdeklődés, az egészségügyi és gazdasági kockázatok részletes előrejelzésére vonatkozó elvárások hatására az utóbbi évtizedekben megnőtt az igény a légköri szennyeződések terjedésének minél pontosabb nyomon követésére. A különböző forrásokból származó légköri szennyezők a forrásuktól gyakran messzire is elsodródhatnak, és attól távol is légszennyezettségi problémákat okozhatnak. Az időről időre kitörő vulkánok magasba lövellt hamufelhői (pl. a Mount St. Helens (1980), a Pinatubo (1991) vagy az Eyjafjallajökull (2010) nagy kitörései) és az ipari tevékenység következtében előforduló balesetek során légkörbe kerülő szennyeződések (pl. Fukushima (2011)) különösen időszerűvé teszik a légköri szennyeződések terjedésének vizsgálatát. A vizsgált terjedési folyamatok léptékének megfelelően különböző modellek állnak rendelkezésre a szennyeződések terjedésének számítására. A regionális léptéktől a globális folyamatok skálájáig a szennyeződések terjedését a légköri mezők követésén alapuló euleri vagy az egyedi trajektóriákat követő lagrange-i modellek segítségével lehet meghatározni.

Egyedi források esetén jól alkalmazhatók a lagrange-i típusú terjedési modellek, amelyek egyedi részecskék vagy pöffök útját követik nyomon. Előnyük az euleri modellekkel szemben, hogy a terjedési számítások nem kötődnek rögzített rácsfelbontáshoz. A lagrange-i részecske-modellek egy része ún. „álrészecskét” (vagy számítási részecskét) követő modell: minden ilyen részecskéhez mesterségesen hozzárendelt tömeg tartozik, amely a kibocsátott anyagmennyiségtől és a szimulációban követett részecskék számától függ, időben változik, és általában nem felel meg egyetlen valóságos szennyeződés részecskéinek sem. Az ülepedési folyamatok hatására egy-egy „álrészecske” exponenciális ütemben veszít a tömegéből az idő során. Ebben a felfogásban a részecske hatalmas mennyiségű (és ezáltal nagy tömegű) szomszédos valódi részecske tömegközéppontjának tekinthető. Mivel mindössze egy trajektória képviseli ezen szennyezők pályáját, az „álrészecske”-módszer hallgatólagosan feltételezi, hogy ezek a szomszédos részecskék örökké együtt maradnak. A valóságban a terjedés kaotikus jellegéből adódóan azonban a trajektóriáik hamar eltérnének egymástól, és így a különböző helyeken különböző hatásoknak lennének kitéve. Emiatt ezek a modellek fizikailag nem tekinthetők egészen helyesnek. A lagrange-i modellek másik része a valódi részecskét követő modellek közé sorolható: itt a részecskék meghatározott, valóságnak megfelelő sűrűséggel és mérettel rendelkeznek. Azonban az ezen típusú, jelenleg használatban lévő terjedési modellek nem számolnak a részecskék ülepedésével, a csapadéktevékenység hatásával.

Háromdimenziós áramlásban, így a légkörben is, megjelenik a szennyeződések sodródásának kaotikussága. Fontos hangsúlyozni, hogy ez független a légkör turbulens (a kaotikusnál bonyolultabb, nagy szabadsági fokú rendszerekre jellemző) természetétől. A terjedés során jól megfigyelhetők a kaotikus viselkedés jellemzői, úgymint a kezdeti feltételekre való érzékenység (a mozgás hosszú távon előrejelezhetetlen, közeli részecskék pályái kis idő elteltével gyorsan

távolodnak egymástól), az időben szabálytalan mozgás és a szálas, bonyolult, de egyben rendezett (fraktál szerkezetű) geometriai megjelenés. Egy kezdetben kicsiny kiterjedésű szennyeződéshő hamar erősen megnyúlik, a hossza időben sebesen növekszik, miközben tekervényes alakúra gyűrődik. Egy-egy részecske trajektóriája így hamar előrejelezhetetlenné válik, de egy sok részecskéből álló szennyeződéshő vizsgálata képet ad a felhő terjedéséről, későbbi elhelyezkedéséről.

A terjedési modellek által felhasznált meteorológiai előrejelzéseket a légköri hidro-termodynamikai egyenletrendszer numerikus megoldásával állítják elő. A meteorológiai változók mérési pontatlanságaiból és a közelítő eljárásokból adódóan az előrejelzés kezdeti feltételeit nem lehet pontosan meghatározni, a kezdeti hibák a légkör előrejelezhetetlenségéből adódóan egyre nőnek, így az előrejelzések hibával terheltek. Az előrejelzések bizonytalanságáról a több tagból álló, ún. ensemble (együttes, valószínűségi) előrejelzések adnak képet. A terjedési modelleket többnyire egyetlen, a legjobbnak ítélt előrejelzéssel futtatják. Azonban célszerű lehet a szimulációkat a teljes ensemble előrejelzéssel is elvégezni, valószínűségi előrejelzést készíteni, hogy részletesebb és megbízhatóbb képet kapjunk a terjedéssel járó kockázatokról, esetlegesen kitelepítendő területekről, a légtérzár elrendelésének térségéről.

2. Célkitűzések

A doktori kutatás a szennyeződések nagyléptékű terjedésének modellezésére összpontosít, és két fő témakört egyesít: összekapcsolja a légköri szennyeződések sodródásának szimulációit a kaotikus viselkedés tulajdonságainak többféle szempontból történő tanulmányozásával.

A munka során egy viszonylag egyszerű – de a valóságban előforduló fizikai folyamatokat már jól leíró – lagrange-i terjedési modell kifejlesztését tűztük ki célul, amely valós mérettel és sűrűséggel rendelkező egyedi aeroszol részecskéket követ, és a hasonló, valódi részecskék mozgását meghatározó modelleknél több folyamatot vesz figyelembe. A modell működésének megbízhatóságáról néhány valóságban lezajlott eset szimulációjával és az eredményeknek a mérési adatokkal való összevetésével kívántunk megbizonyosodni.

Abból adódóan, hogy „igazi” aeroszol részecskék mozgását írja le, a modell alkalmas a sodródás és az ülepedés folyamatának a dinamikai rendszerek szemléletében, a kaotikus viselkedés szempontjából való tanulmányozására is. A doktori kutatás további célja a Bevezetésben felsorolt jelenségeknek a kifejlesztett modellel végzendő vizsgálata volt, nevezetesen:

- Annak feltárása, hogy a meteorológiai előrejelzések bizonytalansága milyen hatással lehet a terjedési számítások eredményére.
- A részecskék kaotikus mozgásának vizsgálata és jellemzése a dinamikai rendszerek elméletéből ismert, a légkörben még tudomásunk szerint nem tanulmányozott, de igen hasznosnak bizonyuló mennyiségek,

- egyrészt a szennyeződéshők nyúlását jellemző *topologikus entrópia*,
- másrészt a részecskék légkörből való kiürülésének ütemét jellemző *szökési ráta* segítségével.

3. Alkalmazott módszerek

A doktori munka során kifejlesztett lagrange-i terjedési modellben arra törekedtünk, hogy az a viszonylag egyszerű és átlátható felépítés mellett a légkörben előforduló fizikai folyamatokat minél valóságosabban közelítse. A vizsgált szennyeződések nagyszámú részecskéből tevődnek össze, amelyeket valós méret és sűrűség jellemez. A részecskék mozgásegyenlete a Newton-egyenletből következik. A súrlódási erő a hidrodinamikai és a viszkózus gyorsulás viszonyát számszerűsítő Reynolds-szám függvénye. Nagyságrendi becsléssel megmutatható, hogy egy részecske vízszintesen egy másodperc töredéke alatt felveszi a szélesebbeséget, míg függőlegesen a közeg sebességének és a nehézségi erőből adódó határsebességnek az összegét. Így egy részecske vízszintesen a helyi szélkomponensekkel szállítódik, a függőleges mozgását pedig ezen kívül a határsebessége is befolyásolja, amely függ a részecske méretétől, sűrűségétől és aktuális helyzetétől (a levegő sűrűségétől, viszkozitásától).

Mivel a terjedési modell által felhasznált meteorológiai adatok felbontása nem elegendően finom, a kiskálájú turbulens diffúzió részecskékre gyakorolt hatását véletlen folyamatként építettük bele a modellbe. A határretegben a függőleges turbulens diffúziós együtthatót a Monin–Obukhov-féle hasonlósági elmélet alapján határozzuk meg, míg a vízszintes turbulens diffúziós együtthatókat állandónak tekintjük ebben a rétegben és a szabad légkörben is. Ezen kívül a modell figyelembe veszi a csapadéktevékenység hatását is (részletesebben lásd 1. tézis).

A felszíntől távol, a szabad légkörben sodródó részecskék esőcseppbe jutásának esélye csekély az alacsonyabb magasságokban haladókéhoz képest. Nagyságrendi becsléssel az is belátható, hogy nagyskalájú terjedés esetén a turbulens diffúzió szerepe is elhanyagolható. Így a kizárólag szabad légkörben zajló szimulációkban a részecskék mozgását csak a szél általi sodródás és a nehézségi erőből adódó süllyedés határozta meg. Mivel a határsebesség csak kis mértékben függ a magasságtól, a mozgásegyenleteket tovább egyszerűsítettük ezekben a szimulációkban azzal, hogy a határsebességet állandónak tekintettük ebben a rétegben.

Az értekezésben bemutatott szennyeződések terjedésének szimulációihoz a European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) reanalízis mezőit (ERA-Interim adatbázis), illetve előrejelzéseit használtuk fel.

A részecskék mozgásegyenletei vízszintesen polár-, függőlegesen nyomási koordinátákkal vannak kifejezve a felhasznált meteorológiai mezők szerkezetének megfelelően. A modell ezekből a differenciálegyenletekből explicit Euler-módszerrel számítja a részecskék következő időlépésbeli helyzetét.

A felhasznált meteorológiai mezők értékeit csak egy adott, szabályos hosszúsági–szélességi rácson ismerjük különböző nyomási, illetve hibrid koordinátarendszerbeli szinteken, adott időbeli felbontásban. Vízsztentes irányban biköbös spline interpolációval, függőleges irányban és időben pedig lineáris interpolációval számítottuk a részecskék pillanatnyi helyén a meteorológiai változók értékeit. Ez alól az egyedüli kivétel a határréteg vastagsága, amelyet a délutáni órákat leszámítva lineáris interpolációval határoztunk meg, helyi idő szerint 12 és 18 óra között viszont a 12 órás értéket használtuk, különben a lineáris interpolációval alulbecsülnénk a magasságát.

Azokban az esetekben, mikor a szennyezőanyagok kibocsátása a szabad légkörbe történt (pl. vulkánkitörés), a szennyeződéshő terjedésének nyomon követését – annak gyorsabb és egyszerűbb volta miatt – nyomási szintek adatainak felhasználásával végeztük. Felszínhez közeli kibocsátás esetén (pl. atomerőmű balesete) a számítások hibrid koordinátarendszerben zajlottak, mivel annak a sűrűbben elhelyezkedő felszínközeli szintjei az alsóbb légrétegekben a trajektóriák pontosabb meghatározását teszik lehetővé.

Annak érdekében, hogy az eredmények összehasonlíthatók legyenek mérésekkel és más modellek eredményeivel, a részecskék adott térfogatba, illetve területre eső számából koncentrációt számítottunk.

4. Tézisek

1. Kifejlesztettem egy aeroszol részecskéket követő lagrange-i terjedési modellt, a Real Particle Lagrangian Trajectory (RePLaT) modellt. A RePLaT modell magában foglalja a turbulens diffúzió hatását és a csapadék általi ülepedést is. A modell leírása a [4] cikkben olvasható.
 - A modell újdonsága az egyedi részecskékre vonatkoztatott nedves ülepedés beépítése, amely egy, a csapadékinzenzitástól függő véletlen folyamatként van jelen a modellben, és összhangban áll az euleri modellekben szokásos nedves ülepedési parametizációkkal. Ennek során egy részecske bizonyos valószínűséggel egy cseppbe kerül, azaz sűrűsége és mérete hirtelen megváltozik a csapadékinzenzitásnak megfelelően. A cseppé alakult részecske trajektóriáját a továbbiakban már az új méretéből adódó határsebesség határozza meg. A részecske nem pillanatszerűen hagyja el a légkört, hanem a levegőben végighaladva hulló esőcseppként.
 - Mivel a RePLaT modell valós részecskék mozgását követi, alkalmas a sodródás és az ülepedés folyamatának a kaotikus viselkedés szempontjából való tanulmányozására is.
2. A RePLaT modellt az Eyjafjallajökull vulkán kitöréseiből származó hamu, valamint a fukushimai atomerőmű megrongálódásakor levegőbe került radioaktív anyagok légköri ter-

jedésének és kiülepedésének szimulációjával teszteltük egyrészt szabad légkörbeli körülmények között, másrészt pedig a planetáris határréteg fontosabb folyamatainak figyelembevételével.

- Az Eyjafjallajökull esetén a sodródási képeken a vulkáni hamu eloszlása jó egyezést mutatott műholdas mérésekkel. [1]
 - A fukushimai szimulációkban a szennyeződés megjelenésének időpontja különböző mérési pontokra egybeesett a megfigyelésekkel, és a szimulációk a ^{133}Xe nemesgáz mért koncentrációjának időbeli menetét is megfelelően visszaadták. A ^{137}Cs esetén a RePLaT bizonyos időszakokban, főként európai mérőállomásokra, felülbecsülte a koncentrációértékeket.
3. Egy esettanulmányon megvizsgáltuk, hogy a felhasznált meteorológiai mezőkben rejlő bizonytalanságok milyen hatással lehetnek a terjedési számítások eredményeire. Ennek feltárása céljából a szabad légkörben alkalmazott egyszerűsítésekkel egy ensemble meteorológiai előrejelzés minden egyes tagjával különböző méretű aeroszol részecskék terjedésére vonatkozó szimulációkat futtattunk le. [2]
- Bemutattuk, hogy az ensemble előrejelzés szennyeződéshelyei között számottevő függőleges és vízszintes különbségek figyelhetők meg, és a felhők 5–10-szer akkora terület fölött terülnek el, mint a nagyfelbontású előrejelzés szennyeződéshelye. Az eltérés annál nagyobbak adódik, minél kisebbek a részecskék.
 - Az eltéréseket különböző mérőszámokkal számszerűsítettük. Meghatároztuk a szennyeződéshelyek tömegközéppontjának eltérését, a részecskék tömegközéppont körüli szórást, emellett bevezettünk egy új mérőszámot, a különböző ensemble terjedési előrejelzésekben lévő részecske-hasonmások átlagos négyzetes távolságát. A részecskék szórása alapján meghatároztuk, ensemble tagok közötti lagrange-i változékonyság 2–3-szor meghaladta a felhasznált meteorológiai előrejelzések változékonyságát, amit a szélsőségekben számítottunk.
4. A részecskék mozgását a kaotikus viselkedés szempontjából is tanulmányoztuk a dinamikai rendszerek elméletéből ismert, a légkörben eddig még tudomásunk szerint nem vizsgált topológikus entrópia segítségével. [1, 3]
- Egy esettanulmányon keresztül szemléltettük, hogy egy kezdetben kicsiny, egydimenziós szennyeződéshely a sodródás során egyre jobban megnyúlik, „összegyűrődik”, rövid idő után egy féltéke tekintélyes részét lefedő tekervényes, kacsaringós alakzattá alakul. Ennek a szálnak a hossza időben exponenciálisan növekszik, ahol a növekedés-

nek a mértékét a topologikus entrópia írja le.

5. A szimulációkban meghatároztuk a 10 napos topologikus entrópia földrajzi és évszakos eloszlását ideális részecskékre. [3]

- A legnagyobb topologikus entrópia értékek a közepes és magas szélességeken, főként a féltekék téli évszakában lépnek fel ($0,8-0,9 \text{ nap}^{-1}$), míg a legkisebekkel a trópusi térségben találkozhatunk ($0,2-0,3 \text{ nap}^{-1}$).
- Az átlagos topologikus entrópia csak kis mértékben függ a részecskék kiindulási magasságától. Az előzetes vizsgálatok alapján úgy tűnik, hogy a turbulens diffúzió figyelembevétele nem befolyásolja jelentősen a topologikus entrópia értékét.
- Kimutattuk, hogy ez a fajta topologikus entrópia (ideális és kis méretű részecskék esetére) a légkör állapotának egy újfajta mérőszámának tekinthető, amely a szennyeződésterjedés intenzitását és szerkezetét jellemzi.

6. Bemutattuk, hogy a tranziens káosz elméletéből ismert szökési ráta alkalmas mennyiség az aeroszol részecskék légköri kiülepedésének jellemzésére. [1, 4]

- A tapasztalatok szerint a légkörben terjedő, adott szinten kezdetben globálisan egyenletes eloszlásban elhelyezett részecskék száma időben exponenciálisan csökken. Tapasztalataink szerint két időszak különíthető el, melyeket eltérő ütemű exponenciális csökkenés jellemez. Az ezekhez tartozó két különböző kitevő a rövid- és a hosszútávú szökési ráta: a rövidtávú szökési ráta a részecskék többségének, míg a hosszútávú szökési ráta azon kivételes részecskéknek a kihullását számszerűsíti, amelyek hosszú ideig „túlélnek” a légkörben.
- A hosszútávú szökési ráta értéke – a légkörben sokáig maradó részecskék elkeveredése miatt – nem mutat jelentős függést a kiindulási magasságtól, míg a rövidtávú szökési ráta annál nagyobb, minél alacsonyabbról indulnak a részecskék.

7. Vizsgáltuk az advekción, a turbulens diffúzió és a csapadéktevékenység részecskék kiülepedésére gyakorolt hatását, valamint mindkét szökési rátának a részecskemérettől való függését. [1, 4]

- A szökési ráták részecskemérettől való függésére a legjobb illesztésnek mindkét szökési ráta esetén mind a háromféle szimulációban az exponenciális illesztés bizonyult.
- Az alkalmazott nedves ülepedési és turbulens diffúziós parametrizáció hatása független a részecskemérettől, de a csapadéktevékenység szerepét erősebbnek találtuk. A szökési ráták méretfüggésénél a legkisebb mértékű függés a csapadék hatását figyelembe vevő,

míg a legnagyobb a csapadék és a turbulens diffúzió hatását is elhanyagoló szimulációban fordult elő. A csapadéktevékenység bármilyen részecskesugár esetén fokozza a kiülepedést, míg a turbulens diffúzió kis részecskékre ($r < 5 \mu\text{m}$) növeli, nagyobbakra ($r \approx 5\text{--}10 \mu\text{m}$) csökkenti a kiülepedő részecskék számát.

- A szökési ráták mellett meghatároztuk a részecskék átlagos kaotikus viselkedésének időtartamát jellemző átlagos légköri tartózkodási időt is különböző kiindulási magasságok és részecskeméretetek esetén. Az átlagos tartózkodási idő magasabb kezdeti helyzetű részecskékre nagyobb, valamint a szökési rátához hasonlóan exponenciálisan függ a részecskék sugarától. Kicsiny, szabad légkörben induló részecskékre a hosszútávú szökési ráta reciprokával, míg egyéb esetben a rövidtávú szökési ráta reciprokával becsülhető.

5. Következtetések

A doktori munka során kifejlesztettük a RePLaT lagrange-i terjedési modellt. A további finomítás érdekében a modellben a későbbiekben újabb tényezőket is érdemes figyelembe venni, amelyek főként a nedves ülepedés részletesebb leírásával kapcsolatosak. A felhőn belüli és a felhő alatti kimosódás elkülönítése, az eső és a hó általi kiülepedés megkülönböztetése a modell fontos továbbfejlesztendő területei lehetnek.

Összességében elmondható, hogy a létrehozott RePLaT modellel végzett szimulációk kielégítő eredményeket szolgáltattak megtörtént események során kibocsátott szennyezőanyagok terjedésének nyomon követésére. Emellett a modell alkalmasnak bizonyult a légköri kaotikus viselkedés tanulmányozására is.

A tézisek alapjául szolgáló publikációk

- [1] Haszpra, T. and Tél, T.: Volcanic ash in the free atmosphere: A dynamical systems approach. *Journal of Physics: Conference Series*, **333**, 012008, 2011. doi:10.1088/1742-6596/333/1/012008.
- [2] Haszpra, T., Lagzi, I. and Tél, T.: Dispersion of aerosol particles in the free atmosphere using ensemble forecasts. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **20** (5), 759–770, 2013. doi:10.5194/npg-20-759-2013.
- [3] Haszpra, T. and Tél, T.: Topological entropy: a Lagrangian measure of the state of the free atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **70** (12), 4030–4040, 2013. doi:10.1175/JAS-D-13-069.1.

- [4] Haszpra, T. and Tél, T.: Escape rate: a Lagrangian measure of particle deposition from the atmosphere. *Nonlinear Processes in Geophysics*, **20** (5), 867–881, 2013. doi:10.5194/npg-20-867-2013.

Az értekezés témájában megjelent további publikációk

- [5] Haszpra, T., Kiss, P., Tél, T. and Jánosi, I. M.: Advection of passive tracers in the atmosphere: Batchelor scaling. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, **22**, 1250241, 2012. doi:10.1142/S0218127412502410.
- [6] Haszpra, T.: Világjáró részecskék a légkörben – Az Eyjafjallajökull vulkán kitörésének és a fukushimai balesetnek a tanulságai. *Természet Világa*, **144** (Káosz, környezet, komplexitás különszám), 67–72, 2013.

Nemzetközi konferencián bemutatott előadások és posztterek

- [7] Haszpra, T. and Tél, T.: Advection of tracer particles in the free atmosphere: the case of volcanic ash. In: *Particles in Turbulence 2011*, p. 34 (Potsdam, Németország), 2011.03.16–2011.03.18. (absztrakt és előadás).
- [8] Haszpra, T. and Tél, T.: Volcanic ash in the free atmosphere: A dynamical systems approach. In: *XXXI Dynamics Days Europe – Abstracts and Participants*, p. 154 (Oldenburg, Németország), 2011.09.12–2011.09.16. (absztrakt és poszter).
- [9] Haszpra, T., Horányi, A., Tasnádi, P. and Tél, T.: Aerosol particle advection in the atmosphere: Eyjafjallajökull and Fukushima. In: *T4 Conference, International Conference on turbulence, transfer, transport and transformation: Interactions among environmental systems*, p. 29 (Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest, Magyarország), 2012.05.24–2012.05.25. (absztrakt és előadás).
- [10] Haszpra, T., Tél, T., Horányi, A. and Tasnádi, P.: Advection of aerosol particles in the atmosphere: volcanic ash and radioactive particles. In: *Nonlinear Processes in Oceanic and Atmospheric Flows 2012*, p. 30 (Madrid, Spanyolország), 2012.07.03–2012.07.06. (absztrakt és előadás).
- [11] Haszpra, T., Horányi, A., Lagzi, I., Tasnádi, P. and Tél, T.: Aerosol particles in atmospheric turbulence: Eyjafjallajökull and Fukushima. In: *XXXII Dynamics Days Europe – Book of abstracts*, (edited by B. Mehlig, O. Ghavami, S. Östlund and D. Hanstorp), p. 113 (Göteborgs Universitet, Göteborg, Svédország), 2012.09.02–2012.09.07. (absztrakt és előadás).
- [12] Haszpra, T., Lagzi, I. and Tél, T.: Dispersion of aerosol particles in the atmosphere: Fukushima. In: *Geophysical Research Abstracts*, vol. 15, p. 11028 (European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2013, Bécs, Ausztria), 2013.04.07–2013.04.12. (absztrakt és rövid előadás).
- [13] Haszpra, T. and Tél, T.: Aerosol particles in atmospheric turbulence. In: *Book of abstracts Particles in Turbulence 2013*, (edited by F. Toschi and E. Bodenschatz), p. 13 (Eindhoven, Hollandia), 2013.07.01–2013.07.05. (absztrakt és előadás).