

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM

KÖRNYEZETTUDOMÁNYI DOKTORI ISKOLA

KÖRNYEZETFIZIKA PROGRAM

Sekély és mély konvekciós folyamatok vizsgálata

MONA Tamás

Doktori disszertáció tézisei

Iskola és program vezető

Dr. JÁNOSI Imre
egyetemi tanár
az MTA doktora

Témavezetők

Dr. ÁCS Ferenc
egyetemi docens
a földtudományok doktora

Dr. HORVÁTH Ákos
OMSZ tanácsos
a földtudományok kandidátusa



Budapest, 2018.

Konvekció

A légköri konvekció egy olyan, a meteorológia minden skáláján nagy jelentőséggel bíró, függőleges tömegmozgásban realizálódó energiaátviteli forma, amely a légkör állapothatározóinak átadását és keveredését eredményezi turbulens módon. A folyamat leggyakrabban a sűrűségváltozásból eredő felhajtóerő idézi elő (szabad konvekció), de egyéb mechanikai erők következtében is létrejöhethet (kényszer konvekció). Két típusa: a sekély és a mély konvekció.

A kutatás tárgya és céljai

A doktori disszertációban két újszerű és egyedi elmélet kidolgozása kerül bemutatásra, egy a sekély és egy a mély konvekció vonatkozásában. A sekély konvekciós kutatás célja egy olyan területileg átlagolt planetáris határréteg magasság (**Planetary Boundary Layer Height – PBLH**) *napi menet forma klasszifikáció* megalkotása volt, amellyel makroszinoptikus időjárási helyzetek jellemezhetőek objektív, numerikus módon. A mély konvekciós vizsgálat esetén pedig a legnagyobb villámlással járó zivatarcellák jellemzése az egyes zivatarok által rendelkezésre álló levegő mennyiségének és minőségének függvényében volt a kutatás fő célja. A teória a *léggűjtő elmélet* elnevezést kapta. Továbbá az értekezésben egy átfogó, hároméves zivatarcella és villámlás statisztikai elemzés is szerepel.

Adatok és eszközök

A sekély konvekciós kutatáshoz a PBLH értékek WRF (**Weather Research and Forecasting**) modell szimulációk formájában álltak elő. A modell futtatások horizontális felbontása 5×5 km-es, vertikális szintjeinek száma 44 volt (a felszín közelében sűrűbben elhelyezkedő szintekkel), illetve a PBLH parametrizációját a Yonsei University séma (Hong et al., 2006) alapján számította a WRF. A modellezési tartomány a teljes Kárpát-medencét magába foglalta. A modelladatok a 2012-es, a 2013-as, és a 2014-es évek nyári napjaira lettek előállítva, 15 percenkénti kiíratás mellett. A feldolgozást a kutatás során készített algoritmus végezte el, amely C programnyelven íródott. Az eredményként kapott PBLH napi menet forma kategóriák megfeleltetését a nagyskálájú időjárási helyzetekkel, a Péczely-féle makroszinoptikus kódokkal (Péczely, 1957) való összevetés igazolta. A Péczely-féle helyzetek Károssy (2018) munkájának köszönhetően voltak elérhetőek.

A mély konvekció esetén, az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) RADAR kompozit és LINET villámlokalizációs adatait felhasználva, tisztán mérési alapon folyt a kutatás. A RADAR adatok 5 perces időbeli és 1×1 km-es térbeli, a villámlási adatok $1 \mu\text{s}$ -os időbeli és ezredfokos térbeli felbontásban voltak elérhetőek. A teljes 2012-es, 2013-as, és 2014-es év volt a vizsgálat időszaka. Az adatfeldolgozás a feladathoz célirányosan megírt C programok segítségével zajlott. A zivatarcellák azonosítása és követése egy TITAN alapú, egyedi fejlesztésű rendszer, a *radarTrack* segítségével történt. A *radarTrack* egy egyszerűsített változata az OMSZ nowcasting rendszerében operatíván alkalmazott algoritmusnak (Horváth & Nagy, 2015; Horváth et al., 2012), viszont a finomabb időlépték és a cellákhoz társított villámok miatt jelentősen eltér egymástól a két eljárás.

Mindkét kutatási rész során az adatok kezelése *bash*, a statisztikák készítése *awk*, és az ábrák generálása *gnuplot* scripteket segítségével történt.

A PBLH napi menet klasszifikációs algoritmus

A sekély konvekciós kutatás motivációja: a planetáris határréteg magasság napi menetének részletes megismerése volt. A kutatás során a WRF modellel számított PBLH adatmezőn belül két alföldi régió lett kijelölve, amelyek az *Alpokalja* és a *Pannon-alföld* elnevezést kapták a munka során. Továbbá a vizsgálatok során a PBLH napi menete a következő részekre lett osztva:

- az *éjszakai szakasz*, ami az előző nap napnyugtájától az adott nap napkeltéig,
- a *felépülési szakasz*, a napkeltétől a napi menet stagnálásáig tart,
- a *plató*, amelynek során a napi menet stagnál (nem változik jelentősen),
- és az *összeomlási szakasz*, ami a platót átvezeti az éjszakai határrétegbe.

A napi menet formáját osztályozó algoritmus a következő lépéseket végzi el mindkét vizsgálati régióra:

1. Adatok előkészítése: Az algoritmus beolvassa az adott nap modelladatait és kiszámítja adott régióra vonatkozóan a területi átlagot minden időlépcső esetén, így előállítva a PBLH napi menetét. Emellett kiszámítja a napi menet maximumát és átlagát is. Az algoritmus tovább halad a 2. lépésre.
2. Lokális maximum keresés: Amennyiben egy napi menet elemre teljesül, hogy egy adott intervallumon belül maximumnak tekinthető és nem egyezik meg a napi

menet maximumával, akkor a formát *kétcsúcs*-nak ítéli az algoritmus. Ez esetben meghatározza az alkategóriát a két maximum közötti különbségek alapján, majd pedig tovább lép a 6. lépésre. Minden más esetben halad tovább a 3. lépésre.

3. Felépülési szakasz meghatározása: Amennyiben a napi menet változásában legalább 8 időlépcsőn (2 órán) keresztül figyelhető meg időlépcsőnként 45 méteres növekedés, akkor az algoritmus tovább lép a 4. lépésre. Ha ez nem teljesül, akkor ugrik az 5. lépésre.
4. Plató meghatározása: Amennyiben a napi menet változásában legalább 8 időlépcsőn (2 órán) keresztül figyelhető meg oszcilláció, akkor az algoritmus a formát *trapéz*-nak ítéli és meghatározza a plató hossza alapján az alkategóriát. Ez esetben az algoritmus ugrik a 6. lépésre, minden más esetben az 5. lépéssel folytatja tovább.
5. Háromszög vagy lapos forma megítélése: Az algoritmus a 3. lépéshez hasonlóan megvizsgálja az összeomlási szakasz „hosszát” is, de ez esetben -45 méteres időlépcsőnkénti napi menet változás a feltétel, szintén 8 időlépcső hosszán. Amennyiben vagy a felépülési szakasz, vagy az összeomlási szakasz hosszára, vagy esetleg mindkettőre teljesül a feltétel, akkor a formát *háromszög*-nek ítéli az algoritmus. A forma alkategóriáját az alapján választja ki, hogy a három lehetőség közül melyik teljesült. Abban az esetben, ha egyik feltétel sem teljesül, akkor a formát *lapos*-nak ítéli. Az utolsó lépés minden esetben a 6. lépés.
6. Karakterisztikus magasság megállapítása: Az algoritmus meghatározza a formát leginkább reprezentáló magasság kódját. Ez kétféleképpen történhet, vagy a napi menet maximumára teljesülő, vagy a napi menet átlagára teljesülő feltétel alapján. Mindig a magasabb alkategóriát adja az algoritmus a forma karakterisztikus magasságának.

Az algoritmus feltételrendszerében számos – itt nem említett – további konstans és kisebb kikötés is szerepel, amelyek biztosítják az algoritmus optimális működését. A konstansok változtatásával az eljárás egyedi feladatokra vagy konkrét helyzetek vizsgálatára is bekalibrálható.

Az algoritmus futtatását végző script *gnuplot* segítségével ábrákat készít a napi menetekről és az ábra címsorában feltünteti a napi menethez meghatározott forma három (*lapos* forma esetén két) karakteres kódját.

A napi menet formák jellemzése

A PBLH napi menetek klasszifikálását követően a formák jellemzése és a hozzájuk társított nagyskálájú időjárási helyzetek ismertetése következik. Illetve megemlítésre kerül, hogy a vizsgálati időszak összesen 276 napja során hány százalékban fordult elő az adott forma.

Trapéz forma: Meredeken felívelő felépülési szakaszból, platóból, és meredeken leívelő összeomlási szakaszból áll. A napi menet jellemzően magas. A forma anticiklonális időjárási helyzetben alakul ki. A PBLH napi menet ideális alakjának tekinthető, vagyis ha külső hatások nem befolyásolják, akkor a napi menet a *trapéz* formát veszi fel. Az Alpokalja régiónál az esetek 66,7%-ában, a Pannon-alföld régió esetén 80,1%-ában fordult elő ez a forma.

Háromszög forma: Meredeken felívelő felépülési és/vagy leívelő összeomlási szakasszal jellemezhető, platóval nem rendelkezik. A napi menet magassága változó, gyakran magas. A forma jellemzően gyors mozgású (hideg) front esetén alakul ki. A *háromszög* forma „dőlése” a front áthaladásának napszakára utal. Az Alpokalja régiónál az esetek 21,4%-ában, a Pannon-alföld régió esetén 13,8%-ában fordult elő ez a forma.

Lapos forma: Nem rendelkezik meredeken felívelő felépülési szakasszal, sem meredeken leívelő összeomlási szakasszal, így jellegzetes platója sincs. A napi menet jellemzően alacsony. A forma front átvonulása után, nedves időjárási helyzetben alakul ki. Az Alpokalja régiónál az esetek 7,6%-ában, a Pannon-alföld régió esetén 5,8%-ában fordult elő ez a forma.

Kétcsúcs forma: Leginkább egy olyan *trapéz*-ra hasonlít, amelyben a plató helyén egy határozott lokális minimum hely figyelhető meg. Ennek köszönhetően a napi menet egy „M” betűre emlékeztető alakot vesz fel. A napi menet általában magas. A forma gyors leforgású, erőteljes helyi vagyis mezoskálájú hatás következtében alakul ki. Az Alpokalja régiónál az esetek 4,3%-ában, a Pannon-alföld régiónál csupán egy esetben fordult elő ez a forma.

Az eredmények összevetése a Péczy-kódokkal

A formákhoz társított időjárási helyzetek hitelesítése a Péczy-féle makroszinoptikus helyzetek alapján történt. Péczy (1957) az alacsony és a magas nyomás középpontok Magyarországhoz viszonyított pozíciója alapján, hat ciklonális és hét anticiklonális helyzet típust különböztetett meg.

Az összehasonlítás során az egyes formáknál tapasztalt Péczy-helyzetek esetszáma került ábrázolásra. Továbbá minden egyes forma esetén felsorolásra kerültek azok a Péczy-kódok, amelyek várhatóan eredményezhetik az adott forma létrejöttét. Így az alapján, hogy hány százalékban teljesültek az előzetes elvárások, a formákhoz társított időjárási helyzet alátámasztható egy mérhető eredménnyel.

Trapéz forma: Az Alpokalja régió esetén 86%-ban, a Pannon-alföld régió esetén 84%-ban teljesültek a formára vonatkozó elvárások. Tehát a formához anticiklonális időjárási helyzet társítható.

Háromszög forma: Az Alpokalja régió esetén 80%-ban, a Pannon-alföld régió esetén 82%-ban teljesültek a formára vonatkozó elvárások. Tehát a formához frontátvonulások időjárási helyzet társítható.

Lapos forma: Az Alpokalja régió esetén 81%-ban, a Pannon-alföld régió esetén 100%-ban teljesültek a formára vonatkozó elvárások. Tehát a formához front mögötti vagy nedves időjárási helyzet társítható.

Kétcsúcs forma: A formára vonatkozó elvárások csupán 68%-ban teljesültek. Ám ez könnyen megmagyarázható azzal, hogy egy alapvetően ritka formáról van szó, és a Péczy-kódok makroszinoptikus helyzetet írnak le, míg a kétcsúcs-hoz mezoszínoptikus időjárás társítható. Az eredmények részletes elemzése alapján a formához társított helyi hatású időjárási szituáció helytállónak mondható.

Az eredmények összességében igazolták, hogy a planetáris határréteg területileg átlagot napi menetének négy forma típusához meghatározott időjárási helyzetek társíthatók. A trapéz formához anticiklonális, a háromszög formához frontátvonulások, a lapos formához nedves időjárási helyzet, illetve a kétcsúcs formához mezoskálájú hatás köthető (Mona et al., 2016a,b). Így a klasszifikációs eljárás alkalmas lehet nyári időjárási helyzetek numerikus és objektív kategorizálására, valamint segítséget jelenthet modell futtatások gyors kielemezésében.

A napi menet klasszifikációs algoritmus alapvetően a sekély konvekció megismerésére lett kifejlesztve, de a munka során tágabb értelmezésre adott lehetőséget. Így olyan forma és időjárási típusok is a kutatás tárgyát képezték, amelyeknél a mély konvekció szerepe a domináns. Habár az emberi életterre közvetlen hatással van a sekély konvekció, mégis a veszélyes időjárási helyzetek általában a mély konvekcióhoz köthetők. A legszélsőségesebb mély konvekciós folyamat pedig a villámlás és a zivatar tevékenység.

radarTrack

A zivatarok leképezése az OMSZ nowcasting rendszerében alkalmazott, TITAN alapú (Dixon & Wiener, 1993) cella-azonosító és követő algoritmus egy átdolgozott változatával történt. A módszer a *radarTrack* elnevezést kapta. Lényege, hogy egy bizonyos RADAR reflektivitási értéket (45 dBZ) meghaladó egybefüggő területeket (minimum 8 pixel) azonosít, majd ezeket a területeket ellipsziszekkel közelíti, és az így kapott cellákhoz villám adatokat rendel. Az előállított zivatarcellák követéséhez, megfigyeli volt-e a cella egy szűk környezetében egy hozzá nagyon hasonló mérettartományba tartozó cella a következő időpillanatban. Amennyiben igen, akkor a cellákat összeköti. Ezt követően az algoritmus előállítja a zivatarcellák statisztikai adatait, a teljes vizsgálati időszakra, illetve az egyes évekre vonatkozóan.

Zivatarcella és villám statisztikákból levont következtetések

A elemzések során felmerült az a probléma, hogy a rövid életű zivatarcellák nem biztosítanak kellően reprezentatív képet a zivatarokról, és nagy számukból kifolyólag maguk felé torzítják az eredményeket. Ezért a *radarTrack* szűrt és szűretlen zivatarcella statisztikákat állít elő, az alapján, hogy a cellák élethossza meghaladja-e a 15 perces (3 időlépcsős) minimumot. A kiértékelések után a következő megállapítások tehetők:

- Egy átlagos zivatarcella élethossza 40 perc, területe 40 km², átmérője 7 km, haladási sebessége 8,6 $\frac{m}{s}$, és haladási iránya Észak-Északnyugati. Élete során átlagosan 200 darab villámmal 2 MegaA áramot generál és a villámok 22%-ban lecsapó villámok.
- A szűrés hiányában a cellák átlagos élethossza a felére, mérete a kétharmadára, sebessége pedig 7,2 $\frac{m}{s}$ -ra csökken. Továbbá a villám teljesítmény is megfelelődik, viszont a lecsapó villámok aránya nem módosul számottevően.

- Tehát a rövid életű cellákat érdemes kiszűrni a vizsgálati adatbázisból, hiszen rövid élethosszuk, kis méretük és alacsony villámmennyiségük csupán zajként jelentkezik az adatsorban.
- Bevezetésre került a *fajlagos áram* fogalma, ami ígéretes paraméternek tűnt az elektromos szempontból legaktívabb zivatarok kiválogatására, de nem váltotta be a hozzá fűzött reményeket. Nagyon magas szórása megbízhatatlanná teszi.
- A LINET felülbecsli a lecsapó villámok arányát a mérőállomások környezetében, de ez a hiba nincs hatással az összesített villámmennyiségre.
- Érdemes a legnagyobb elektromos aktivitású zivatarokat az alapján meghatározni, hogy időlépcsőnként mely cellák teljesítettek villámlási maximumot.

Léggyűjtő

A hipotézis az volt, hogy azok a zivatarok lesznek légköri elektromos szempontból a legaktívabbak, amelyek életük során magukba szívták a konvekciót elősegítő, meleg és nedves légtömegeket. Az, hogy egy zivatar milyen mennyiségű és minőségű levegőt képes magába szívni, függ a rendelkezésre álló légtömegtől. Ennek jellemzésére a *léggyűjtő* fogalma lett bevezetve. Ez alapján azok a cellák lesznek a legvillámosabbak, amelyek léggyűjtője meleg és nedves légtömeggel rendelkezik. Az elmélet igazolására lett kidolgozva egy olyan komplex algoritmus, amely képes megbecsülni a zivatarcellák léggyűjtőjének méretét és minőségét (Mona et al., 2016c). Az eljárás az alábbi elveket követve működik:

- A zivatarcellák mozgásuk során az előttük levő területről szívják be a légtömegeket, ezért egy cella léggyűjtője egy adott időlépcsőben közelíthető egy a cella haladási iránya felé nyíló körcikkkel.
- A körcikk sugara arányos a cella légbeszívási sebességével. A paraméter hiányában a sugár helyettesíthető az egyes cella helyzetek közötti R távolsággal.
- A körcikk Φ nyílásszöge jó közelítéssel 90° -osnak tekinthető.
- Horváth et al. (2006) alapján egy cella elhaladását követően a légkör 3 óra után tartalmaz újra a konvekciót elősegítő légtömegeket. Ez az idő a léggyűjtő τ megújulási idejének nevezhető. Vagyis egy cella léggyűjtője konvekciót elősegítő légtömeget tartalmaz, ha abban τ megújulási időn belül más cella nem haladt át.

Élenhaladáság

A gyakorlatban tehát azok lesznek nagy és jó léggűjtővel rendelkező cellák, amelyeknek R sugarú és Φ nyílásszögű léggűjtőjében nem haladt el más cella az elmúlt τ idő alatt. Vagyis az adott cellának *élenhaladónak* kell lenni a cellák egymáshoz viszonyított mozgási rendszerében. A léggűjtő elmélet akkor számít megalapozottnak, ha az időlépcsőnként villámlási maximumot teljesítő zivatarcellák élenhaladónak tekinthetők.

Az eredményekből levont következtetések

Az algoritmus leírása során ismertette lettek az optimális beállítási értékeket, de érzékenységi vizsgálatok is készültek, amelyek rámutattak az eljárás korlátaira. Az algoritmus működése esettanulmányokon keresztül lett demonstrálva. A hároméves vizsgálati időszak zivataros napjaira kapott eredmények alapján az alábbi következtetések vonhatók le:

- Az algoritmus – figyelembe véve a beállítási értékhatárokat – stabilan működik.
- 500 lehetséges beállítás alapján a modell hatékonysága 82%-osnak mondható.
- Optimális beállítások esetén 86,2%-ban igaz, hogy az elektromos szempontból legaktívabb zivatarok „nagy és jó” léggűjtővel rendelkeztek.

Tézisek

1. A planetáris határréteg magasság területileg átlagolt napi menete négy forma típusba sorolható, amelyek alkalmasak a makroszinoptikus időjárási helyzetek osztályozására nyári helyzetben (Mona et al., 2016a,b).
2. A nagy villámlás gyakoriságú zivatarok nagy mennyiségű, a konvekciót serkentő (meleg, nedves) légtömeget szívtak magukba (Mona et al., 2016c).

A disszertáció témaköréhez kapcsolódó publikációk

- Ács, F., Gyöngyösi, A. Z., Breuer, H., Horváth, Á., **Mona, T.**, & Rajkai, K., 2014a: Sensitivity of WRF-simulated planetary boundary layer height to land cover and soil changes. *Meteorologische Zeitschrift*, **23**, 279–293, doi:10.1127/0941-2948/2014/0544.
- Ács, F., Gyöngyösi, A. Z., **Mona, T.**, Breuer, H., & Rajkai, K., 2014b: Sensitivity of planetary boundary layer height to crop type and fertilization level in an anticyclonic weather. *13th Alps-Adria Scientific Workshop*, **63.**, 267–270, doi:10.12666/Novenyterm.63.2014.Suppl.
- Ács, F., Rajkai, K., Breuer, H., **Mona, T.**, & Horváth, Á., 2015: Soil-atmosphere relationships: The Hungarian perspective. *Open Geosciences*, **7**, 395–406, doi:10.1515/geo-2015-0036.
- Breuer, H., & **Mona, T.**, 2014: Amatőr modellezési hibák a WRF használata során. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, **25**, 45–51.
- Leelőssy, Á., **Mona, T.**, Mészáros, R., Lagzi, I., & Havasi, Á., 2016: Eulerian and Lagrangian Approaches for Modelling of Air Quality. *Mathematical Problems in Meteorological Modelling*, Springer, Switzerland, 73–85.
- Mona, T.**, Ács, F., & Horváth, Á., 2016a: Investigation of weather-PBL height diurnal course relationships in the Pannonian Plain during summer periods. *Abstract Book 2nd PannEx Workshop*, 32. pp, doi:10.21404/PANNEX.2016.
- 2016b: Jellegzetes PHR-magasság napi menetek a Kárpát-medence nyári időszakában. *42. Meteorológiai Tudományos Napok*, 31. pp, doi:10.21404/42.MTN.2016.
- Mona, T.**, Horváth, Á., & Ács, F., 2016c: A thunderstorm cell-lightning activity analysis: The new concept of air mass catchment. *Atmospheric Research*, **169**, 340–344, doi:10.1016/j.atmosres.2015.10.017.

A tézisekben felhasznált publikációk

- Dixon, M., & Wiener, G., 1993: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting – A Radar-based Methodology. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **10**, 785–797, doi:10.1175/1520-0426(1993)010<0785:TTITAA>2.0.CO;2.
- Hong, S.-Y., Noh, Y., Dudhia, J., Hong, S.-Y., Noh, Y., & Dudhia, J., 2006: A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. *Monthly Weather Review*, **134**, 2318–2341, doi:10.1175/MWR3199.1.
- Horváth, Á., Geresdi, I., & Csirmaz, K., 2006: Numerical simulation of a tornado producing thunderstorm : A case study. *Időjárás*, **110**, 279–297.
- Horváth, Á., & Nagy, A., 2015: MEANDER: The objective nowcasting system of the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás*, **119**, 197–213.
- Horváth, Á., Seres, A. T., & Németh, P., 2012: Convective systems and periods with large precipitation in Hungary. *Időjárás*, **116**, 77–91.
- Károssy, C., 2018: A Kárpát-medence Péczely-féle makroszinoptikus időjárás helyze-
teinek katalógusa, 1881-2015. *Léggör*, **63.**, 11–40.
- Mona, T., Ács, F., & Horváth, Á., 2016a: Investigation of weather-PBL height diurnal
course relationships in the Pannonian Plain during summer periods. *Abstract Book
2nd PannEx Workshop*, 32. pp, doi:10.21404/PANNEX.2016.
- 2016b: Jellegzetes PHR-magasság napi menetek a Kárpát-medence
nyári időszakában. *42. Meteorológiai Tudományos Napok*, 31. pp,
doi:10.21404/42.MTN.2016.
- Mona, T., Horváth, Á., & Ács, F., 2016c: A thunderstorm cell-lightning activity analy-
sis: The new concept of air mass catchment. *Atmospheric Research*, **169**, 340–344,
doi:10.1016/j.atmosres.2015.10.017.
- Péczely, G., 1957: *Grosswetterlagen in Ungarn*. Országos Meteorológiai Szolgálat, Bu-
dapest.