

EURÓPAI PÉLDÁK INVERZIÓS HELYZETRE: 2015. DECEMBER

EUROPEAN EXAMPLES FOR INVERSION: DECEMBER 2015

Torma Csaba Zsolt^{1,2}, Dezső Zsuzsanna¹¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, H-1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/a és ²Magyar Tudományos Akadémia
tcsabi@caesar.elte.hu, dezsozsuzsi@caesar.elte.hu

Összefoglalás. 2015. év december hónapban Európa-szerte rendkívüli anomáliák mutatkoztak a hőmérsékleti, csapadék valamint légnyomási mérésekben. Jelen munkánkban európai állomási példákon keresztül elemezzük a kialakult inverziós helyzetet, valamint az azt kialakító szinoptikus környezetet. Továbbá rámutatunk a domborzat (tengerszint feletti magasságok közötti különbségekből adódó) időjárást befolyásoló szerepére.

Abstract. Exceptional temperature, precipitation and pressure anomalies were recorded across Europe in December of 2015. In present study, we focus on the inversion situation and assess its forming synoptic conditions based on European station data. In addition, we point out the impact of orography (due to altitude differences) on weather modulation.

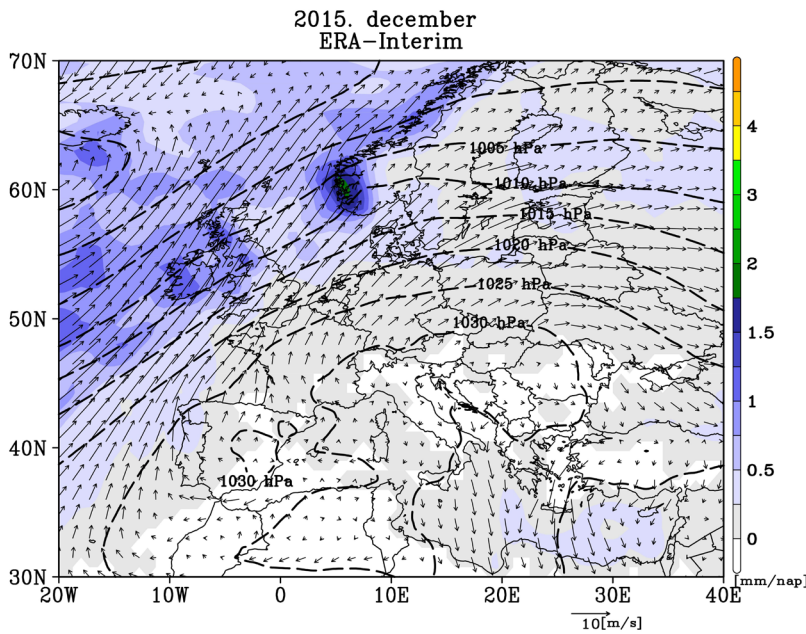
Bevezetés. Európában nagy évenkénti változékonyság tapasztalható a téli csapadékösszegekben (*Reale és Lionello, 2013; Hofstätter et al., 2018*), ami többek között a különböző szinoptikus körülményeknek tulajdonítható (pl. ciklonok). A téli csapadék változékonyságának jellemzésére elég, ha az általunk vizsgált időszak (2015 decembere) gyakorlatilag csapadékmentes időszakára (*Colucci et al., 2017*) és az elmúlt tél (2018/19 tele) Alpok térésegeré vonatkozó híreire gondolunk, amelyek többek között a hegység területén lehullott hatalmas hómennyiségről számoltak be. Ezzel kapcsolatban érdekes lehet megjegyezni, hogy az Alpok térségben az intenzív és hosszan tartó havazások többségéért a Van Bebber által definiált Vb ciklonpályán haladó mediterrán ciklonok tehetők felelőssé (*Messmer et al., 2015*).

A különböző nagytérségi, makroszinoptikus helyzetek nagy hatással vannak Európa időjárására. Ilyen például az Észak-atlanti Oszcilláció (North Atlantic Oscillation, NAO), mely az izlandi alacsony nyomású központ és az azori magasnyomással jellemezhető anticiklon központ között tapasztalható nyomáskülönbség ingadozását írja le. A NAO pozitív fázisa esetén az izlandi ciklon az átlagosnál alacsonyabb, az azori anticiklon az átlagosnál magasabb nyomású. Az erős észak-déli irányú nyomási gradiens következtében megerősödnek a zonális szelek, melyek enyhe, nedves légtömegeket szállítanak az európai kontinens északi felére. Az Atlanti-óceán felett gyakrabban alakulnak ki viharciklonok, viszont Dél-Európa felett az átlagosnál szárazabb és hidegebb légtömegek uralkodnak. Ezzel szemben a NAO negatív fázisa esetén az izlandi ciklon leépül, az azori térségben pedig az átlagosnál alacsonyabb a légnyomás. Ilyenkor teret kapnak a meridionális áramlások, szubtrópusi és sarkvidéki légtömegek alakítják Európa időjárását. A sarkvidéki légtömegek déli irányú terjedésének köszönhetően Észak-Európában hidegebbek és szárazabbak a telek, míg a Földközi-tenger térségében nagyobb gyakorisággal alakulnak ki mediterrán ciklonok, így itt az átlagosnál csapadékosabb az időjárás. A Föld északi féltekéjén a téli időszak időjárásának változékonyságáért igen nagymértékben az Észak-atlanti Oszcilláció felelős (*Herceg-Bulić and Kucharski, 2014*).

2015. év decemberének időjárása a hegyvidéki területeken Európa-szerte a sokévi átlagtól igen eltérő képet mutatott. Európában az említett időszakban jellemzően kevés csapadékot, valamint többnyire magas tengerszinti légnyomási értékeket mértek. Az anticiklonális helyzetnek köszönhetően Európa jelentős részén hosszan tartó markáns inverziós helyzet alakult ki, ami azzal járt együtt, hogy szokatlanul magas havi középhőmérsékleti értékeket regisztráltak a magasban fekvő (1000 méterrel a tengerszint felett, illetve annál magasabban fekvő) területeken üzemelő meteorológiai állomásokon. Ezzel szemben, az ennél alacsonyabban (1000 méter) elhelyezkedő állomásokon nem mutatkoztak kiugróan magas, a sokévi átlagtól nagymértékben eltérő havi középhőmérsékleti értékek. E szélcsendes és csapadékban rendkívül szegény időszaknak az Alpok keleti régiójában található gleccsekre kifejtett hatását, valamint lehetséges jövőbeli előfordulását vizsgálta meg Renato Colucci munkatársaival (*Colucci et al., 2017*).

Munkánk során bemutatjuk, hogy a Colucci és munkatársai által feltárt rendkívüli hőmérsékleti, légnyomási és csapadékösszeg megfigyelések nem csupán az említett munkában bemutatott viszonylag kis régió időjárását jellemezték 2015 decemberében, hanem gyakorlatilag az európai kontinens túlnyomó részén hasonló anomáliák fordultak elő.

Adatok, módszerek. Tanulmányunkban a szinoptikus helyzet vizsgálatához felhasznált meteorológiai változók egy részét (szélmező 10 m-es magasságban, tengerszinti légnyomás, csapadék) az ERA-Interim (*Dee et al., 2011*) adatbázisból származtattuk. Az ERA-Interim globális légköri reanalízis adatbázist a Középtávú Időjárás-előrejelzések Európai Központjában (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) állítják elő. Az adatbázis előállításánál során többek között az összetett 4D-var adatasszimilációs eljárást alkalmazzák. A szigorú minőségi ellenőrzést teljesítő adatbázis 1979. évtől kezdődően 80 km horizontális rácsfelbontás mellett 60 nyomási szintre vonatkozóan (a felszíntől egészen a 0,1 hPa nyomási szintig) tartalmaz adatokat napjainkig (a tervek szerint 2019. augusztusával bezáróan, ezt követő-



1. ábra: 2015. december hónap átlagos tengerszinti légnyomása (hPa, szaggatott vonalakkal jelölve), csapadék (mm/nap) és felszínközeli szélirány és szélerősség (m/s) az ERA-Interim reanalízis adatbázis alapján (<http://apps.ecmwf.int/datasets/>)

en az ERA5 veszi át a helyét, Hersbach et al., 2018). A műholdas megfigyeléseket is felhasználó ERA-Interim adatbázist havonta frissítik, két hónapos késleltetéssel. Mindezen tényeket figyelembe véve az ERA ideális adatbázisnak tekinthető az Európában megfigyelt hosszán tartó csapadékmentes, vagy éppen csapadékos időszakok szinoptikai vonatkozású vizsgálataihoz.

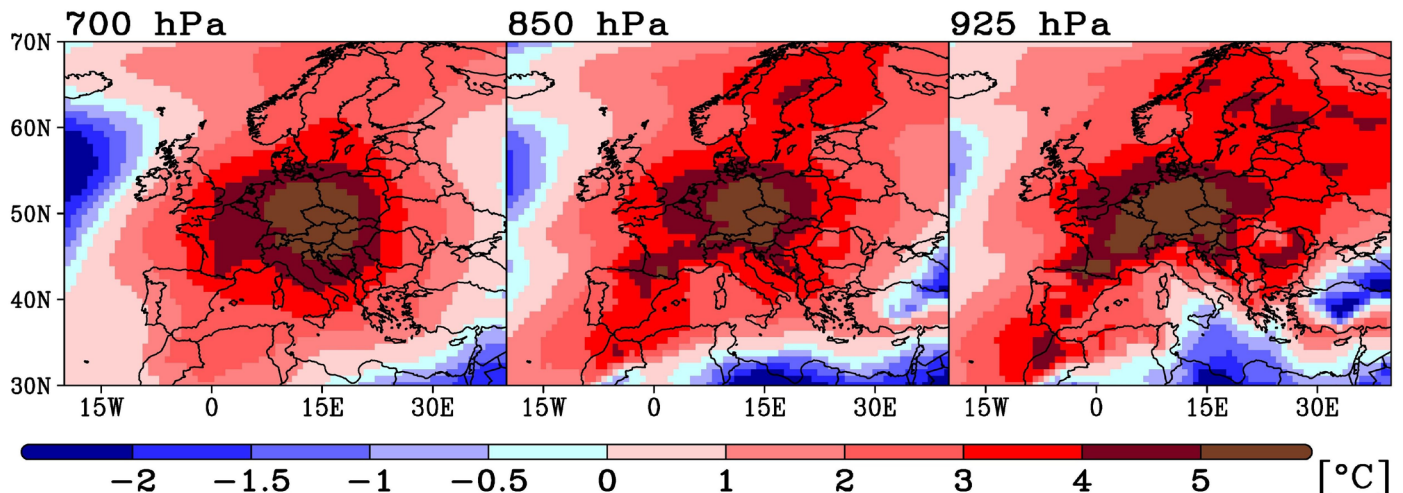
Munkánk során európai meteorológiai állomásokon mért hőmérsékleti adatsorokat is felhasználtunk. Magyarországi mért hőmérsékleti adatsorokat az Országos Meteorológiai Szolgálat bocsátotta rendelkezésünkre Kékestető, illetve Eger állomásokra vonatkozóan (az 1951–2015 időszakot felölelve). A munkánkban szereplő többi állomási adatsorok az amerikai Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal Goddard Űrkutató Intézet (NASA Goddard Institute for space studies) homogenizált adatbázisából származnak (többnyire az 1951–2015 közötti időszakra

vonatkozóan). Az inverziós helyzet további jellemzéséhez felhasznált, Budapestre vonatkozó rádiószondás méréseket a Wyoming Egyetem (University of Wyoming, College of Engineering, Department of Atmospheric Science) publikusan hozzáférhető adatbázisából származtattuk.

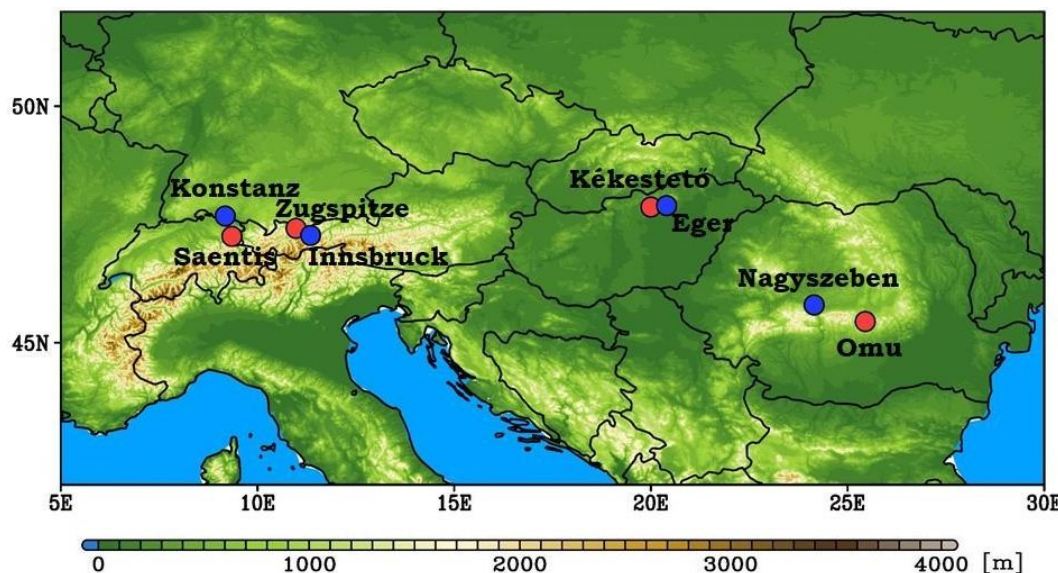
Colucci és munkatársai munkájától eltérően azonban nem egy, hanem négy kiválasztott szűkebb európai régióra vonatkozóan mutatunk be példákat a kialakult inverziós helyzet ismertette, jellemezve. Összesen nyolc állomást választottunk ki az Alpok és a Kárpátok térségéből. Az adatsorok könnyebb összehasonlítása végett a négy hegyvidéki állomás közel azonos földrajzi szélességről került kiválasztásra. Továbbá, minden hegyvidéki állomás közeléből, azzal párba állítva, egy alacsonyabb tengerszint feletti magasságon elhelyezkedő állomást választottunk az inverziós helyzet jellemzésének bemutatásához.

Eredmények. Az Országos Meteorológiai Szolgálat (www.met.hu) műszeres megfigyelései alapján 2015. december hónap során Magyarország időjárását a szokásosnál jóval melegebb, illetve igen csapadékszegény viszonyok jellemezték. Országosan 2,3 °C-kal volt magasabb a havi középhőmérséklet az 1981-2010-es évek decembereinek átlagértékeihez képest. Ugyanakkor az ország teljes területére vetítve az ilyenkor szokásos csapadékösszeg a sokévi átlag (47 mm) csupán 11,5%-át (5,4 mm) tette ki. A hónap elején egy hullámzó frontál-zónának köszönhetően hullott csapadék Magyarországon. Ezt követően egy anticiklon gátolta a további csapadék kialakulását hazánk felett. Ennek következtében a vizsgált időszakban Magyarország területén a legmagasabb havi csapadékösszeg 22,8 mm (Tiszaújváros), míg a legalacsonyabb 0,2 mm (Homokszentgyörgy) volt.

A továbbiakban ERA-Interim reanalízis adatok segítségével bemutatjuk (1. ábra), hogy milyen szinoptikus viszonyok vezettek az előbb bemutatott hőmérsékleti és



2. ábra: 2015 decemberének havi átlaghőmérsékleti anomáliái (referencia időszak: 1981-2010) a 700, 850 és 925 hPa nyomási szinteken az ERA-Interim reanalízis adatbázis alapján (<http://apps.ecmwf.int/datasets/>)



3. ábra: A vizsgált tartomány domborzata a GTOPO adatbázis alapján, valamint a vizsgált alacsony (kék) és a magas tengerszint feletti magasságú (piros) állomások elhelyezkedése

csapadékmérésekben megmutatkozó rendkívüli értékekhez. Továbbá, európai meteorológiai állomási adatok segítségével megvizsgáljuk, hogy a tengerszint feletti magasság milyen módon befolyásolta 2015. december hónap középhőmérsékleti értékeit, illetve a kialakult inverziós helyzetet.

2015. év decemberének időjárásának jellemzéséhez a 1. ábrán az ERA-Interim adatbázis alapján közlünk havi átlagokat tengerszinti légnyomásra, csapadékra, valamint a 10 méteres magasságban mért szélmezőre. Az 1. ábrán bemutatott értékek alapján, illetve a teljes időszak részletes SYNOP állomási méréseit áttekintve megállapíthatjuk, hogy Európa 2015. év decemberének időjárását egy túlnyomórészt Délkelet-Európa felett elhelyezkedő magasnyomású központtal rendelkező anticiklonális rendszer uralta. Európa északi területeit leszámítva igen kevés csapadék hullott kontinens-szerte (egyes délkeleti területeken akár 0 mm körüli havi csapadékösszegeket mértek, pl.: Magyarországon is). Egy nagyon fontos további tényező is megjelenik az 1. ábrán, mely kedvez az inverziós helyzetek kialakulásának: a szélsend. Európában a vizsgált hónap (2015. december) az Alpok és a Kárpátok térségében kimondottan szélsendes időszaknak mutatkozott. Az eddig bemutatott ismereteket kiegészítendő, a 2. ábrán 2015 decemberének havi átlaghőmérsékleti anomáliáit közöljük a 700 hPa, 850 hPa és 925 hPa nyomási szintekre az ERA-Interim adatbázis alapján (1981–2010 időszak szolgált referencia időszakként, mivel ezen adatbázisban az adatok 1979. évtől kezdődően állnak csupán rendelkezésre).

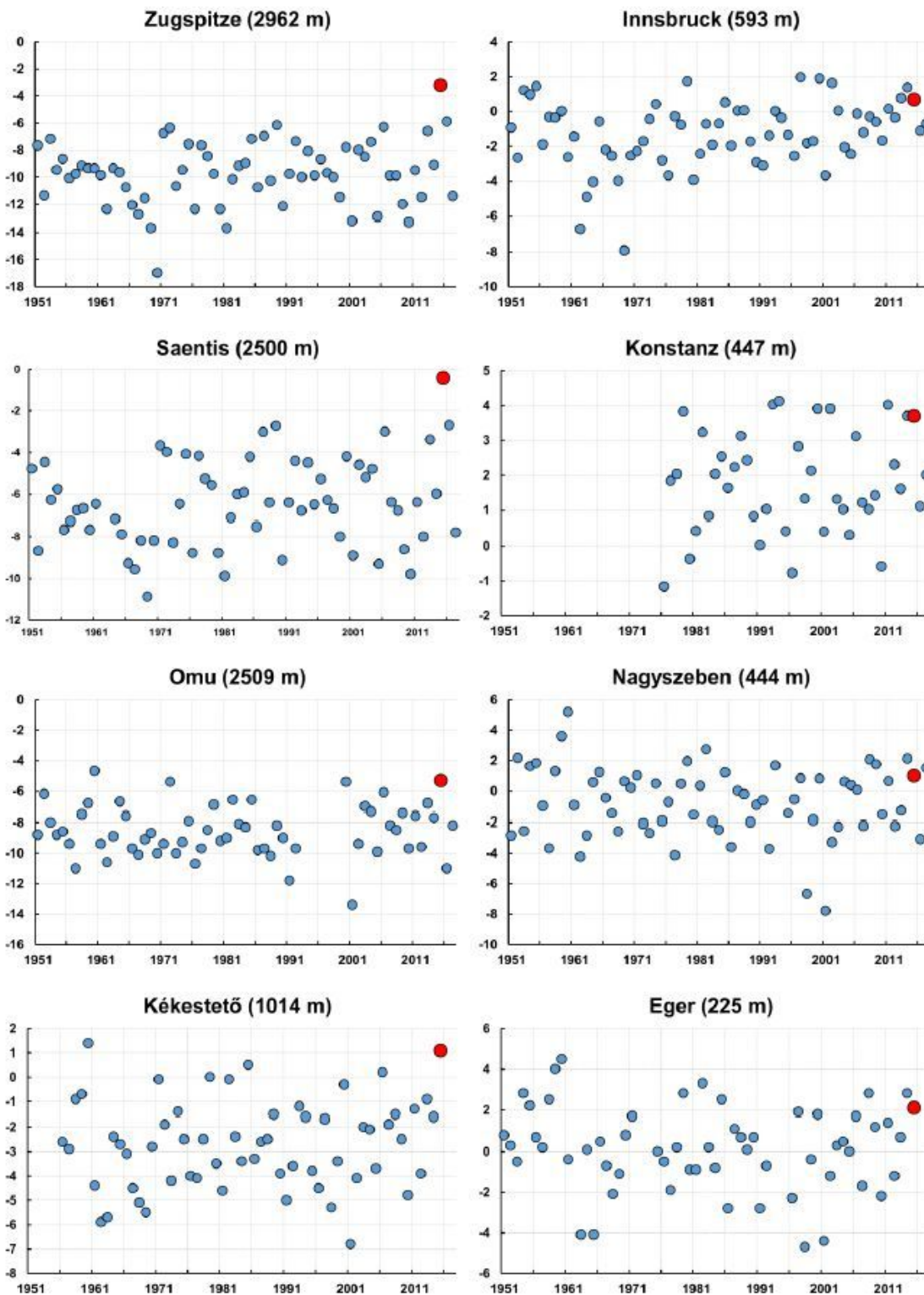
Az eredmények egyértelmű pozitív hőmérsékleti anomáliákat tárnak fel egész Európa területe felett mindhárom nyomási szinten. Ezen anomáliák a kontinens közepén igen markáns, 5 °C-ot meghaladó értékűnek mutatkoztak. A fent felsorakoztatott tények irányítottak bennünket arra, hogy az inverziós helyzet vizsgálatát e térségekben található állomási adatsorokra szűkítsük le (3. ábra).

A 3. ábrán a munkánkhoz felhasznált állomások térbeli elhelyezkedését mutatjuk be. Az Alpok térségéből két

hegyvidéki állomásra vonatkozóan mutatunk be eredményeket: Zugspitze (2962 m) és Saentis (2500 m), valamint ezen állomásokkal párhuzamosan két alacsonyabban fekvő, azonban azok közelében elhelyezkedő állomásokra közlünk további eredményeket: Innsbruck (593 m) és Konstanz (447 m). A Kárpát-medence térségéből szintén két hegyvidéki állomást választottunk: Kékestető (1014 m), valamint Omu (2509 m), továbbá a fent említett hegyvidéki állomásokhoz a lehetőségekhez mérten legközelebb elhelyezkedő

alacsonyan fekvő további két állomási adatsort vizsgáltunk meg: Eger (225 m) és Nagyszeben (444 m).

A megvizsgált, összesen nyolc állomási adatsor alapján a decemberi átlaghőmérsékleteket a 4. ábra foglalja össze. A 4. ábrán az adott régióból származó hegyvidéki (bal oldal) és alacsony tengerszinti magasságon elhelyezkedő (jobb oldal) állomási adatsorokat egymás mellé helyezve közöljük. A kék színtől eltérően pirossal, illetve kissé megnagyobbított szimbólummal jelöljük a 2015. év decemberi átlaghőmérsékleti értékeket. Míg az Alpok térségéből származó hegyvidéki állomási adatok alapján a 2015. decemberi átlaghőmérséklet egyértelműen a valaha mért legmagasabb érték az 1951–2015 időszakot tekintve, addig ugyanazon térségben a jóval alacsonyabban fekvő területeken ugyanazon hónap – bár a melegebb decemberek közé sorolható – egyáltalán nem tekinthető példa nélkülűnek. A Kárpát-medence térségében a Kékestető és az Omu állomásokra vonatkozó adatok az Alpok térségének hegyvidéki területeihez hasonlóan rendkívüli módon meleg decemberről árulkodnak. Meg kell jegyeznünk azonban, hogy a Kárpát-medencében a 2015. év december havi átlaghőmérsékletek a vizsgált hegyvidéki állomásokon bár rendkívülinek mutatkoztak, de a vizsgált időszakban korábban előfordultak magasabb értékek is. 2015 decemberében a Kárpát-medencében az alacsonyan fekvő állomási adatsorokban (az Alpok térségéhez hasonlóan) nem mutatkoztak kiugróan magas havi átlaghőmérsékleti értékek. Külön kiemelnénk, hogy a Kékestető és Eger között meglévő közel 900 méteres szintkülönbség ellenére a 2015. év decemberében a havi átlaghőmérsékletek között csupán 1 °C-os különbség mutatkozott. Átlagos légköri rétegzettségi viszonyok mellett, 6,5 °C/km hőmérsékleti gradienssel számolva a két állomás havi középhőmérsékleti adataiban a mértnél jóval nagyobb – közel 6 °C-os – eltérést várnánk. E tények igen erőteljes inverziós helyzet jelenlétére utalnak a térségben. A téli időszakban ugyanis a hegyekkel körülvett medencékben viszonylag gyakran alakul ki ún. hideg



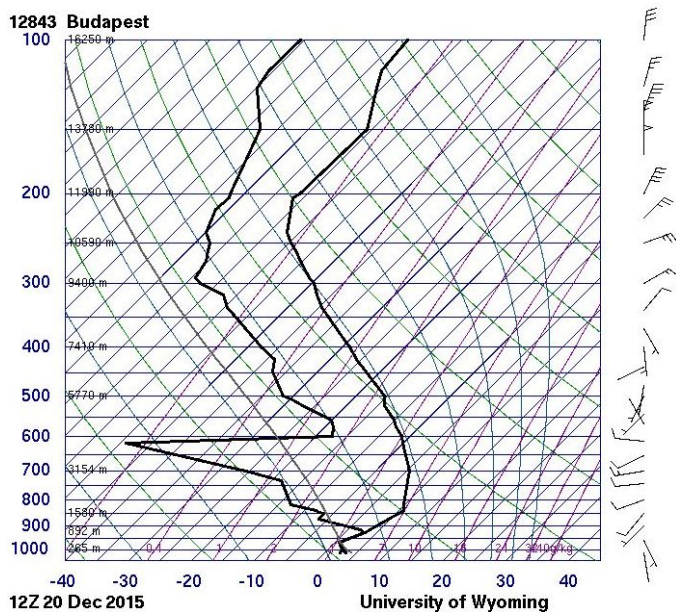
4. ábra: Mért havi decemberi átlaghőmérsékletek hegyvidéki (bal oldal), illetve azokhoz közel elhelyezkedő, de alacsony tengerszint feletti magasságon található állomási adatok alapján (jobb oldal). Forrás: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/stdata/> és Országos Meteorológiai Szolgálat

légpárna. Az erőteljes kisugárzásnak köszönhetően a felszín közelében kisugárzási inverzió, míg az anticiklonban uralkodó leszálló légáramlásnak köszönhetően a magasban zsigorodási inverzió alakul ki. A kettő összekapcsolódása egy igen stabil légréteget hoz létre, ami megakadályozza a medence alján összegyűlt hideg légtömeg átkeveredését. Az inverzió alatti légréteg a felszín kisugárzása miatt bekövetkező hűlés miatt telítetté válik, ki-

alakul a köd. Ha a köd megemelkedik, zárt, alacsony szintű rétegfelhőzet jön létre. Az inverziós réteg felett az anticiklonban a süllyedő levegő adiabatikusan melegszik, így itt nagyon kiszárad a levegő. Az inverziót erősítheti az is, ha a magasban melegadvekción zajlik.

Az így létrejövő alacsony szintű felhőzet lezárja a beérkező rövidhullámú nap-sugárzást az alacsonyan fekvő területeken (Eger), míg a magasban ragyogó napsütésben lehet részünk (Kékestető). Ezt igazolják a SYNOP táviratok alapján kiszámított napfénytartam adatok is. Míg 2015. decemberében Egerben a napsütéses órák számának havi összege mindössze 41,3 óra volt, addig Kékestetőn ebben a hónapban 134,1 órán át sütött a nap. Különösen szembe-tűnő a különbség a december 20. és 28. közötti időszakban, amikor Kékestetőn 65,1 óra, Egerben viszont mindössze 0,5 óra volt a napsütéses órák száma. Ez adhat magyarázatot a két bemutatott állomás havi középhőmérsékleti adataiban tapasztalt viszonylag kismértékű eltérésre (valamint a többi bemutatott

hegyvidéki – nem hegyvidéki állomáspárosok esetében is a rendkívüli – nem rendkívüli mért december havi középhőmérsékletekre is). Ezek alátámasztására az 5. ábrán közlünk Budapest állomásról indított rádiószondás mérési eredményeket. Rendkívüli hőmérsékleti gradiens olvasható le az 5. ábráról. A magassággal a hőmérséklet is emelkedik, oly mértékben, hogy megközelítőleg 1000



5. ábra: Inverzióra utaló rádiószondás mérési adatok Budapest állomásra vonatkozóan (2015. december 20. 12:00). A baloldali fekete görbe a harmatpontot, míg a jobb oldali a légréteg mért hőmérsékletét jelöli. A vízszintesen futó párhuzamos egyenesek a nyomási szinteket, míg az x tengellyel 45° -os szöget bezáró, egymással párhuzamosan futó vékony fekete egyenesek jelentik az izotermákat (az azonos hőmérsékletű pontokat összekötő egyeneseket). A zöld görbék a száraz adiabatákat, a vékony fekete görbék a nedves adiabatákat, míg a lila színű jobbra dőlő egyenesek a telítési keverési arányt jelölik. Az x tengelyen a hőmérséklet $^\circ\text{C}$ -ban, míg az y tengelyen a nyomás hPa-ban van megadva. <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

méterrel a felszín felett több, mint 5°C -kal regisztráltak magasabb hőmérsékleti értéket, mint a talaj közelében. Érdekes megfigyelni, hogy felszínközeli hőmérsékleti értéket csupán közel 3000 méteres felszín feletti magasságban regisztrált újra a szonda. Külön kiemelnénk, hogy az itt bemutatott mérési eredmények nem csupán egy kiragadott példát jelentenek, hanem pár napot leszámítva 2015 decemberében gyakorlatilag teljesen hasonló vertikális hőmérsékleti rétegződés jellemezte az adott térség időjárását.

Összefoglalás. 2015 decemberében a hosszan tartó szélcsendes, anticiklonális helyzet Európa túlnyomó részén (a skandináv országokat kivéve) rendkívüli, gyakran példa nélküli havi középhőmérsékleti anomáliákhoz vezetett a hegyvidéki környezetekben. Ugyanakkor az alacsonyabb tengerszint feletti elhelyezkedésű állomásokon hasonló mértékű havi középhőmérsékleti anomáliák nem mutatkoztak. A kialakult nagytérségű szinoptikus időjárás helyzet jelentős mértékben elősegítette a felszín-közeli inverzió és a hideg légpárna kialakulását, melyre az Alpok és a Kárpátok térségéből mutattunk be példákat. Az általunk közölt eredmények felhívják a figyelmet többek között a téli időszakban megszokott, hó formájában történő vízfelhalmozás/raktározás elmaradásának vagy nagymértékű csökkenésének lehetőségére. További érdekes vizsgálatok tárgyát képezheti a megfigyelt szinoptikus helyzet jövőbeli előfordulási gyakoriságának kutatása is.

Köszönetnyilvánítás. A bemutatott munka az MTA Prémium Posztdoktori, valamint a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj, az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-19-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának szakmai támogatásával készült.

Köszönet illeti az Országos Meteorológiai Szolgálatot, hogy Kékestető és Eger állomásokra a mérési adatokat rendelkezésünkre bocsátotta, a U.S. Geological Survey-t, hogy a GTOPO30 adatbázisaikat közzétették, valamint az ECMWF-et. Amunkában felhasznált adatok többek között a következő honlapokon keresztül érhetők el, illetve tölthetők le:

<https://data.giss.nasa.gov/gistemp/stdata/>

<https://apps.ecmwf.int/datasets/>

<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Irodalom

- Colucci R. R., Giorgi F. and Torma Cs., 2017: Unprecedented heat wave in December 2015 and potential for winter glacier ablation in the eastern Alps, *Sci Rep*, 7: Paper 7090. 7 p. doi: 10.1038/s41598-017-07415-1
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M. A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A. C. M., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S. B., Hersbach, H., Hólm, E. V., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A. P., Monge-Sanz, B. M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N. and Vitart, F., 2011: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteor. Soc.* 137, 553–597.
- Herceg-Bulić, I. and Kucharski, F., 2014: North Atlantic SSTs as a Link between the Wintertime NAO and the Following Spring Climate. *J. Climate*, 27, 186–201, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00273.1>
- Hersbach, H., de Rosnay, P., Bell, B., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Alonso Balmaseda, M., Balsamo, G., Bechtold, P., Berrisford, P., Bidlot, J., de Boissésion, E., Bonavita, M. Browne, P., Buizza, R., Dahlgren, P., Dee, D., Dragani, R., Diamantakis, M., Flemming, J., Forbes, R., Geer, A., Haiden, T., Hólm, E., Haimberger, L., Hogan, R., Horányi, A., Janisková, M., Laloyaux, P., Lopez, P., Muñoz-Sabater, J., Peubey, C., Radu, R., Richardson, D., Thépaut, J.-N., Vitart, F., Yang, X., Zsótér, E. and Zuo, H., 2018: Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP, *ECMWF ERA Report Series 27*.
- Hofstätter, M., Lexer, A., Homann, M. and Blöschl, G., 2018: Large-scale heavy precipitation over central Europe and the role of atmospheric cyclone track types. *Int. J. Climatol*, 38: e497–e517. doi:10.1002/joc.5386
- Messmer, M., Gómez-Navarro, J. J., and Raible, C. C., 2015: Climatology of Vb cyclones, physical mechanisms and their impact on extreme precipitation over Central Europe, *Earth Syst. Dynam.*, 6, 541–553, <https://doi.org/10.5194/esd-6-541-2015>
- Reale, M. and Lionello, P., 2013: Synoptic climatology of winter intense precipitation events along the Mediterranean coasts, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 1707–1722, <https://doi.org/10.5194/nhess-13-1707-2013>.