



A felhőborítottság változásának vizsgálata az ERA5 reanalízis adatbázis alapján

Soós Virág, Breuer Hajnalka

Eötvös Loránd Tudományegyetem, TTK FFI Meteorológiai Tanszék, soosvirag@student.elte.hu

DOI: 10.56474/légkor.2024.3.5

Az éghajlatváltozás életünk központi témájává vált, mivel hatásai világszerte egyre érezhetőbbek. Ebben a vizsgálatban arra összpontosítottunk, hogy a felhőborítottság változása milyen összefüggéseket mutat a változó éghajlati rendszerrel, valamint az időjárással. A kutatásunk célja az 1983–2022 közötti időszak felhőborítottság-változását elemezni, a közép-európai térségre fókuszálva, felhasználva az ERA5 reanalízis adatbázis adatait. Az analízis során statisztikai elemzéseket végeztünk, a regionális eltérésekre és az évszakos ingadozásokra fókuszálva. Az eredményeket a HuClim adatbázisban található globálsugárzás értékeivel is összehasonlítottuk. Az eredmények alapján megfigyelhető, hogy a felhőborítottság átlagosan csökken. A területi változásokat elemezve azonban megállapítottuk, hogy vannak olyan területek, ahol a felhőzet aránya növekszik a nagytérségi mozgásrendszerek változásának hatása miatt.

Analysis of changes in cloud cover based on the ERA5 reanalysis database

Climate change has become a central issue in our lives as its effects are increasingly felt around the world. In this study, we focused on how changes in cloud cover are related to the changing climate system and weather. Our research aims to analyse changes in cloud cover focusing on the Central European region over the period 1983–2022 using data from the ERA5 reanalysis database. Statistical analyses were performed focusing on regional and seasonal variations. The results were also compared with global irradiance values from the HuClim database. The results show that on average the cloud cover is decreasing. However, when analysing the spatial variations, we found that there are areas where the proportion of cloud cover is increasing due to the influence of changing large-scale motion systems.

Bevezetés és célkitűzés

A felhőzet fontos szerepet játszik a Föld sugárzási egyenlegében. Ha a felhőborítottság csökken, több rövidhullámú sugárzás érkezik a felszínre, ugyanakkor

a földfelszín által kisugárzott hosszuhullámú sugárzásból nagyobb arány távozik a világűr felé (Szabó-Takkáts, 2012). Az éghajlatváltozás egyik fontos hatása lehet a jövőben, hogy az óceánok és a légkör melegeése miatt intenzívebbé válik a párolgás, emiatt

több nedvesség kerül a légkörbe, ugyanakkor a magasabb hőmérséklet miatt a légtömegek csak magasabb hőmérsékleten válnak telítetté, így a felhőképződéshez szükséges kondenzációs folyamatok is csak magasabb hőmérséklet mellett mennek végbe (*Mendoza et al.*, 2021), amely az alacsonyszintű felhőzet csökkenését okozhatja. Az üvegházhatású gázok hatásainak vizsgálata mellett egyre inkább előtérbe kerül a légkörben található aeroszol-részecskék jelenlétének és hatásainak tanulmányozása. Az aeroszol-részecskék is befolyásolják a Föld–légkör rendszer sugárzási egyenlegét. Közvetett hatásuk révén az aeroszol-részecskék befolyásolják a felhőképződésben résztvevő vízcseppek és jégkristályok számát és méretét, módosítva ezzel a felhők albedóját és a csapadéképződés hatékonyságát. A koromrészecskék a Nap sugárzását elnyelve és az elnyelt energiát kisugározva megnövelik a levegő hőmérsékletét azokon a területeken, ahol jelen vannak. Ez a folyamat hozzájárul a légkör felmelegedéséhez és a konvekció, valamint a felhők kialakulásának csökkenéséhez. A felhőkben található korom által elnyelt hő miatt a felhőcseppek elpárolognak, ami a felhőborítottság csökkenéséhez vezet (*Szabó-Takáts*, 2012). Az IPCC 2021-es jelentése szerint nő a tropopauza magassága és a labilitás a légkörben, aminek következménye, hogy ritkábban alakul ki az alacsonyszintű rétegfelhőzet (IPCC, 2021). Emellett a felhőzet az időjárás rövidtávú alakulásában is fontos szerepet játszik, nappal csökkenti a maximum-hőmérsékletet, éjjel viszont mérsékeli a kisugárzás miatt bekövetkező lehűlést, így a felhőborítottságban bekövetkező változások hatásával lehetnek a hőmérséklet alakulására is (*Magos*, 2017). Az éghajlatváltozás hatására megfigyelhetjük az időjárási jelenségek évszakos eltolódását is. Megfigyelhető például, hogy a melegedő éghajlat miatt az őszi időszakban ritkábban alakul ki kisugárzási köd, ami az alacsonyszintű felhőborítottság klimatológiai skálájú vizsgálatakor is kimutatható (*Vautard et al.*, 2009). Továbbá az is gyakran felismerhető, hogy a nagyterületi mozgásrendszerek – ciklonok, anticiklonok, frontok – módosulásai állnak a felhőborítottság változásának hátterében (*Sfīcā et al.*, 2021).

A kutatásunk célja, hogy feltérképezzük és elemezzük a felhőborítottság változását az elmúlt négy évtizedben (1983–2022) Közép-Európa térségében, felhasználva az ERA5 (ECMWF ReAnalysis Version 5) ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) modellen alapuló reanalízis adatbázis adatait, különös figyelmet fordítva a regionális eltérésekre és az évszakos ingadozásra.

Felhasznált adatok és módszerek

A kutatás során az ERA5 modell reanalízis adatbázis adatait használtuk az 1983 és 2022 közötti időszakra vonatkozóan Közép-Európa térségére (é.sz. 40°–55°, k.h. 5°–30°). Az alacsony-, a közép-, és a magasszintű felhőborítottság, valamint a tengersizintre számított légnyomás és az 500, 800, valamint 925 hPa nyomási szintű szél u- és v-komponenseinek értékeit dolgoztuk fel.

Az ERA5 a Copernicus Climate Change Service által összeállított, az ECMWF modellen alapuló reanalízis adatbázis, amely óránkénti globális légköri és felszíni adatokat tartalmaz 1940-től napjainkig, amit folyamatosan bővítenek, hogy naprakész legyen az adatbázis. Az adatok 0,25° térbeli rácshálójával fedik le a felszínt és 80 km-es magasságig 137 szinten állnak rendelkezésre (*Hersbach et al.*, 2020). Az adatbázisból az egyes órákra havonta átlagolt értékeket töltöttük le.

Az ERA5 adatbázis, az ECMWF modellhez hasonlóan, a felhőborítottságot prognosztikai egyenletekkel jelzi előre a vízgőz és a jégkristályok keverési arányából. A felhőzet forrásai a konvekcióból, a rétegfelhők esetében a határreteg turbulenciájából, a nagyterületű felemelkedésből és az adiabatikus lehűlésből származnak. A disszipációs feltételeket a süllyedő mozgások miatti párolgási folyamatok határozzák meg (*Jacob et al.*, 1999).

A különböző paramétereket az alábbiak alapján definiálja az adatbázis ERA5 dokumentáció [1]:

- az alacsonyszintű felhőborítottság a felszíni nyomás 0,8-szorosánál nagyobb nyomású modellszinteken előforduló felhőzet;
- a középszintű felhőborítottság a felszíni nyomás 0,45 és 0,8-szorosa közötti nyomású modellszinteken előforduló felhőzet;
- a magasszintű felhőborítottság a felszíni nyomás 0,45-szörösénél kisebb nyomású modellszinteken előforduló felhőzetet.

Az ERA5 adatbázisból számított eredményeket összevetettük az HungaroMet Nonprofit Zrt. HuClim adatbázisában található globálsugárzási értékekkel is. Ez a Magyarország területét lefedő rácsponti adatsor a HungaroMet 37 mérőállomásának adataiból készül. Az adatsorokat a MASH (Multiple Analysis of Series for Homogenization) homogenizáló módszerrel ellenőrzik, homogenizálják és pótolják, majd az így kapott, hiányoktól és inhomogenitásoktól mentes, ellenőrzött adatsorokat a MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis) interpolációs módszerrel interpolálják [2].

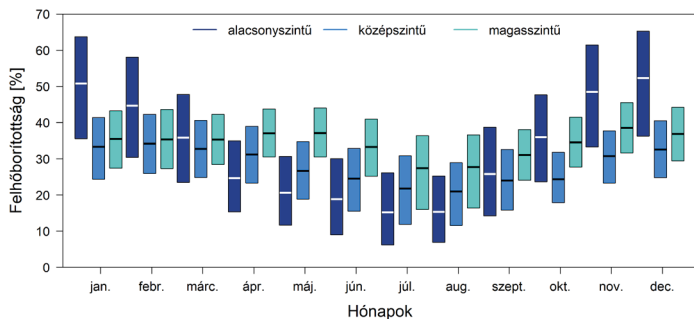
A vizsgálat során különböző statisztikai elemzéseket végeztünk R programozási környezetben az éves és szezonális változások bemutatására.

Vizsgáltuk a felhőborítottság éves és napi menétét időseleteres mozgóátlag-vizsgálattal, végeztünk évenkénti átlagolásokat, havi és napi vonatkozásban, az éves eltérések vizsgálatához.

A változások mértékének vizsgálatához lineáris regressziót alkalmaztunk szignifikancia vizsgálattal összekötve, ami alapján tendencia térképet készítettünk. A lineáris regressziót 5 éves mozgóátlagokból számoltuk az R programozási nyelvbe beépített függvény segítségével.

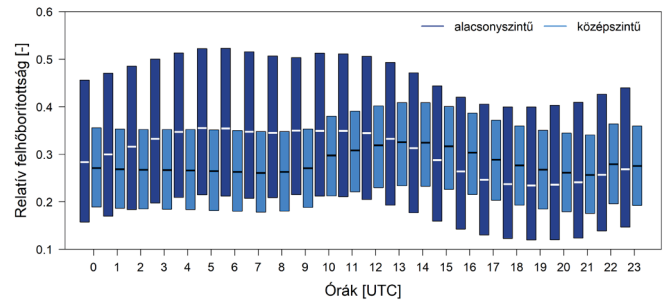
Eredmények

A kutatást általános statisztikai vizsgálatokkal kezdtük az ERA5 reanalízis adatbázis adatait felhasználva. Az első ábrán a felhőborítottság éves menete látható interkvartilis távolság és mediánértékekkel megjelenítve az 1983–2022 közti időszakban a közép-európai térségre. Az alacsonyszintű felhőborítottságot vizsgálva a téli hónapokban jelentkezik egy maximum érték, amely a köd és a hideg légpárna gyakori jelenlétére utal, míg nyáron megfigyelhető egy minimum érték, ami a magasabb hőmérséklettel, az alacsonyabb páratartalommal és térségünkben az anticiklonok dominánsabb jelenlétével állítható párhuzamba, ugyanis magasabb hőmérsékletű szárazabb levegő esetében magasabb szinten (akár 2 km felett) történik meg a kondenzáció (1. ábra).



1. ábra. A felhőborítottság éves menete a vizsgált területen az 1983–2022 időszakban az ERA5 reanalízis adatbázis alapján.

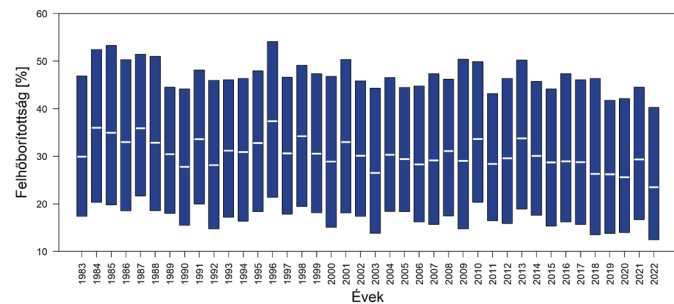
A 2. ábrán a felhőborítottság napi menétét ábrázoltuk ismételten az interkvartilis távolság és a mediánértékek segítségével. Az alacsonyszintű felhőborítottságnak a délelőtti órákban tapasztalható a maximuma, és az esti órákban a minimuma. A reggeli maximum a vizsgált terület tengerfelszínei és hegyvidékei felett kialakuló felhőzet eredménye, a déli maximum a besugárzás maximumához kapcsolódó felhőképződés. A középszintű felhőborítottság menete kevésbé látványos, de a délutáni órákban itt is megfigyelhetünk egy



2. ábra. A felhőborítottság napi menete a vizsgált területen az 1983–2022 időszakban az ERA5 reanalízis adatbázis alapján.

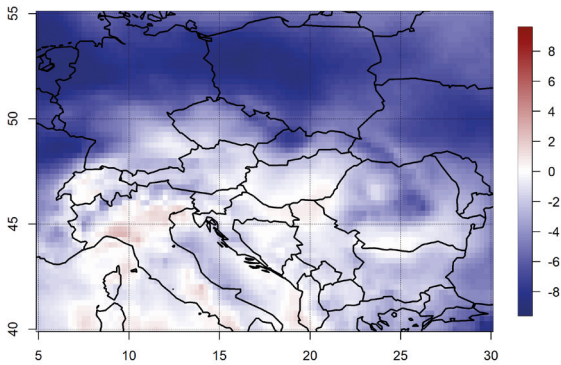
maximumot. Ez a nyári zivatarképződéssel hozható párhuzamba, melyek gyakran jellemzőek a kora délutáni órákra, amikor a felszíni felmelegedés hatására a déli sugárzásmaximumot követően alakulnak ki záporok, zivatarok. A középszintű felhőborítottság továbbá többnyire a frontátvonuláshoz és a meleg advekciónak köthető, amelyeknek nincs napi menete, ezért kevésbé látványos a napon belüli változékonyság.

Az alacsony szinten előforduló felhőborítottság éves változékonyságában (3. ábra) megfigyelhető egy csökkenő tendencia, melynek magyarázata a szakirodalom szerint összetett (Szabó-Takáts, 2012; Mendoza et al., 2021; Sfică et al., 2021), de a változásban szerepe lehet a nagytérségi mozgásrendszerek megváltozásának, a hőmérséklet növekedésének, valamint a légszennyezettség módosulásának is.

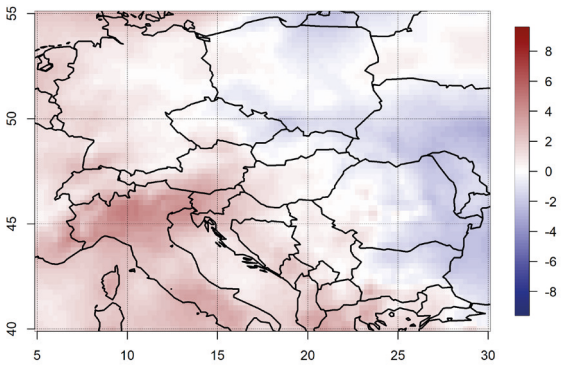


3. ábra. Az alacsonyszintű felhőzet borítottságának évenkénti változékonysága a vizsgált területen az 1983–2022 időszakban az ERA5 reanalízis adatbázis alapján.

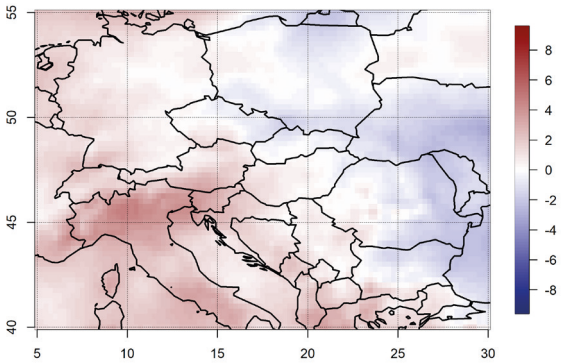
Az alacsonyszintű felhőborítottság változásának területi eloszlásában (4. ábra) a vizsgált terület északi részén, Németország és Lengyelország területén, egy intenzívebb, akár 10%-os csökkenést láthatunk. A déli területekre 1–2%-os csökkenés és növekedés jellemző, melyek vegyesen oszlanak el a térségben. A csökkenés lehetséges oka, hogy a melegebb éghajlat hatására intenzívebbé váló párolgás miatt több nedvesség jut a légkörbe, ugyanakkor a légtömegek magasabb



4. ábra. Az alacsony szintű felhőzet borítottságának trendje [%/40 év] az 1983–2022 időszakban az ERA5 reanalízis adatbázis alapján.



5. ábra. A középszintű felhőzet borítottságának trendje [%/40 év] az 1983–2022 időszakban az ERA5 reanalízis adatbázis alapján.



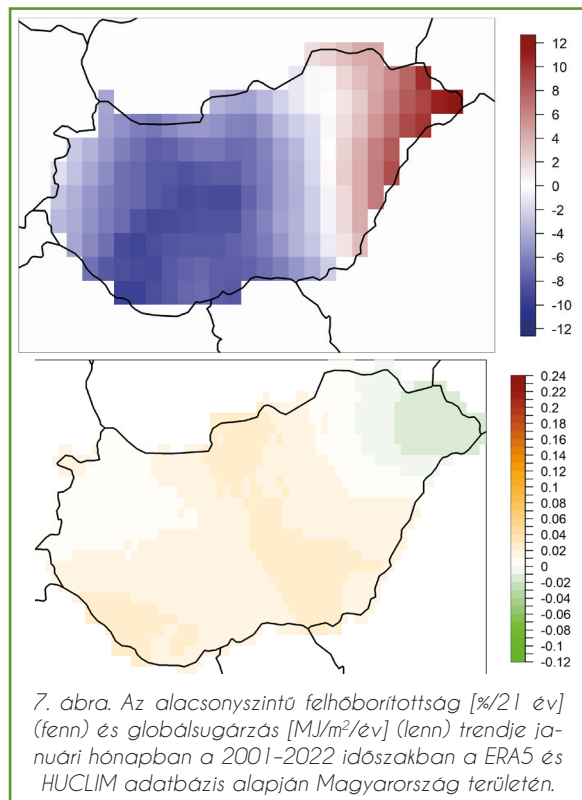
6. ábra. A magas szintű felhőzet borítottságának trendje [%/40 év] az 1983–2022 időszakban az ERA5 reanalízis adatbázis alapján.

hőmérsékleten válnak telítetté, így a felhőképződés magasabb szinten fog bekövetkezni, amely az alacsony szintű felhőborítottság csökkenését okozhatja.

A középszintű felhőzet borítottságának trendjében (5. ábra) a vizsgált terület nyugatra eső részén növekedést tapasztalhatunk, aminek maximuma az Alpokban

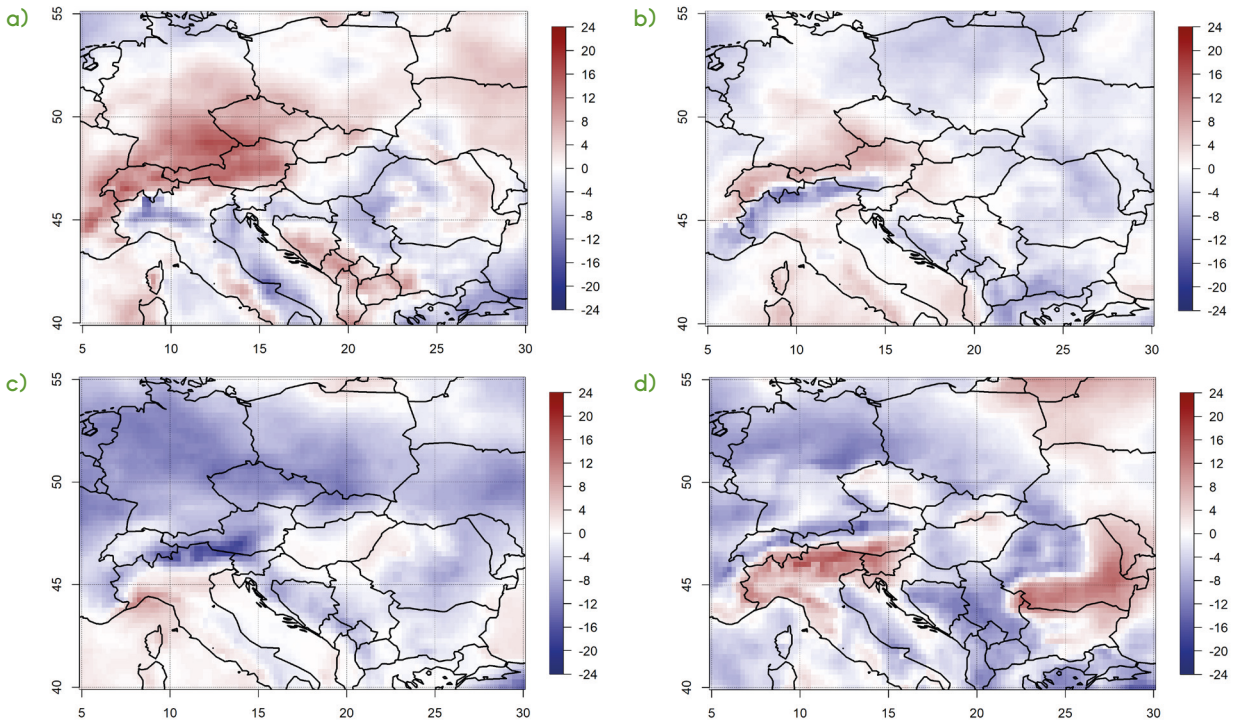
található 5% körül, keletre eső felén csökkenést láthatunk 1–3 százalékos tartományban. A magasszintű felhőborítottság alakulása (6. ábra) is hasonló mintázatot ad, azonban itt kisebb területre jellemző a csökkenés. Ennek magyarázata nagytérségi folyamatok változásához köthető. Több tanulmány megerősíti, hogy a Földközi-tenger felől érkező ciklonok száma növekszik, ami magyarázza a kapott eredményt (Nowosad, 2017; Bartoszek, 2017; Sfică et al., 2021).

Az eredményeket összevetettük a HuClim adatbázisban található globálsugárzás paraméter változásával is a 2001 és 2022 közti időszakra Magyarország területére. A globálsugárzást összevetve az alacsony szintű felhőborítottsággal sok esetben találhatunk hasonlóságokat. A 7. ábra jó példa erre, ami a januári alacsony szintű felhőborítottság és a globálsugárzás változását mutatja. Egyértelműen látszik a kapcsolat: januárban a keleti országrészben az alacsony szintű felhőborítottság növekedése együtt jár a globálsugárzás csökkenésével, míg az ország többi részén éppen ellentétes előjelű tendencia figyelhető meg.



7. ábra. Az alacsony szintű felhőborítottság [%/21 év] (fenn) és globálsugárzás [MJ/m²/év] (lenn) trendje januári hónapban a 2001–2022 időszakban a ERA5 és HUCLIM adatbázis alapján Magyarország területén.

A havi átlagos alacsony szintű felhőzet borítottságának tendenciáját vizsgálva egy érdekes jelenséggel találkoztunk az Alpok és más hegységek vonulata mentén, amit a 8. ábra mutat be. Januárban megfigyelhető,

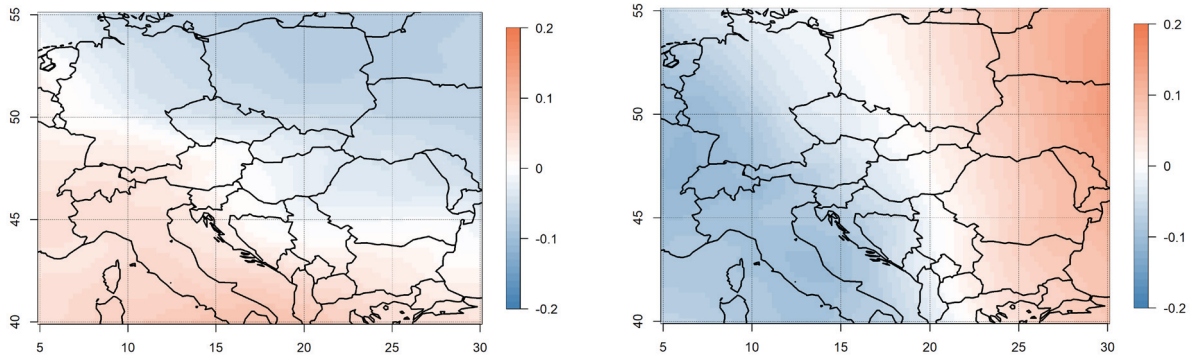


8. ábra. Alacsonyszintű felhőzet boritottságának trendje [%/40 év] januári (a), májusi (b), júliusi (c), novemberi (d) hónapban az 1983-2022 időszakban az ERA5 adatbázis alapján Közép-Európa területén.

hogy az Alpok területén növekvő a felhőborítottság tendenciája, míg az Alpoktól közvetlen délre csökkenő tendenciát láthatunk. Az májusban is felfedezhető, hogy az Alpok északi részén növekvő tendencia van, míg a déli részen csökkenő. Júliusban fordul a helyzet, és a januári eredmény tükörképét kapjuk: az Alpok területén csökkenő tendencia jellemző, közvetlen délre pedig növekvő. A november a május tükörképét hozza, melynek értelmében az Alpok északi részén a felhőborítottság csökken, míg a déli részén növekszik. Novemberben a Kárpátok területén is megfigyelhető ez a jelenség, délkeleti oldalon a felhőborítottság növekszik, északnyugati oldalon pedig

csökken. A Dinári-hegységben a növekedési tendencia a mediterrán ciklonok számának változásához köthető (Horváth et al., 2008). A hegységekhez kapcsolódó felhőképződés változása a nagyterületi áramlási viszonyok változásával magyarázható. A májusban és novemberben egyértelműen az Alpok hegygerince a választóvonal a csökkenő és a növekvő tendencia között.

Ennek alátámasztásaként megvizsgáltuk az 500 hPa-os magassági szinten a szélmező alakulását. A januári 500 hPa nyomási szint u és v szélkomponensének trendje látható a 9. ábrán. A v komponens vizsgálva a terület nyugati részén láthatunk csökkenést, ami az északias áramlások gyakoriságának vagy intenzitásának



9. ábra. 500 hPa nyomási szintű szélmező januári u (bal) és v (jobb) komponensének trendje [m/s/év] az 1983-2022 időszakban az ERA5 adatbázis alapján Közép-Európa területén.

erősödését jelenti. Ha itt északi az áramlás, a domborzat hatására az északi oldalon fog gyakoribbá válni a felhőképződés, mint azt korábban láthattuk is. Habár a havi átlagos szélmező változásaiból nehezebb következtetéseket levonni, az u és v mező trendjéből arra lehet következtetni, hogy a januári időszakban a poláris jet helyzetében – vagy egyes jet helyzetek gyakoriságában – változás történt, a jet délebben helyezkedik el. E hipotézist ERA5 (és más reanalízis) adatsoron alapuló munkák is alátámasztják, miszerint a téli időszakban a jet délebbre húzódott (pl. *Simmons, 2022; García-Burgos et al., 2023*), amelynek hátterében a téli poláris jet növekvő amplitúdója is szerepet játszhat (*Martin, 2021*).

Összefoglalás

Az eredmények alapján megfigyelhető, hogy általánosságban az alacsonyszintű felhőborítottság tendenciája csökkenő, mely a globális felmelegedéssel és az aeroszol részecskék koncentrációjának megváltozásával állhat párhuzamban. A közép- és magasszintű felhőborítottság változásának hátterében a nagytérségi mozgásrendszerek megváltozása állhat. Ha a területi változásokat elemezzük, megállapíthatjuk, hogy vannak olyan területek, ahol a felhőborítottság változására hatással lehetnek az orografikus kényszerek vagy a nagytérségi mozgásrendszerek irodalomban leírt változásai. Továbbá a felhőborítottság változása több, az éghajlatváltozás következtében változó tényezővel is kapcsolatban áll, ilyen például a hőmérséklet és a légköri nedvességi viszonyok változásai, valamint az aeroszol részecskék koncentrációjának megváltozása. A jövőben szeretnénk a kutatást ezek mentén, a nagytérségi mozgásrendszerek vizsgálatával folytatni, hogy még átfogóbb képet kapjunk a felhőborítottság, valamint más időjárási és éghajlati tényezők kapcsolatáról.

Irodalomjegyzék

- Bartoszek, K., 2017*: The main characteristics of atmospheric circulation over East-Central Europe from 1871 to 2010. *Meteorol. Atmos. Phys.* 129, 113–129. <https://doi.org/10.1007/s00703-016-0455-z>
- García-Burgos, M., Ayarzagüena, B., Barriopedro, D., & García-Herrera, R., 2023*: Jet configurations leading to extreme winter temperatures over Europe. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 128(24), e2023JD039304. <https://doi.org/10.1029/2023JD039304>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., and Thépaut, J.N., 2020*: The ERA5 global reanalysis. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 146, 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

- Horváth, K., Lin, Y. L., and Ivančan-Picek, B., 2008*: Classification of cyclone tracks over the Apennines and the Adriatic Sea. *Month. Weather Rev.* 136, 2210–2227. <https://doi.org/10.1175/2007MWR2231.1>
- IPCC, 2021*: Summary for Policymakers. In: (*Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, S., Connors, C., Péan, S., Berger, N., ... Scheel Monteiro, P.M.*) *Climate Change, 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>
- Jakob, C., 1999*: Cloud cover in the ECMWF reanalysis. *J. Climat.* 12, 947–959. [doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<0947:CCITER>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<0947:CCITER>2.0.CO;2)
- Magos L., 2017*: A felhőzet hatása a Föld sugárzási egyenlegére és az emberi hőérzetre ISCCP adatok alapján. Szakdolgozat. ELTE Meteorológia Tanszék
- Martin, J. E., 2021*: Recent trends in the waviness of the Northern Hemisphere wintertime polar and subtropical jets. *J. Geophys. Res.: Atmos.* 126, e2020JD033668. <https://doi.org/10.1029/2020JD033668>
- Mendoza, V., Pazos, M., Garduño, R., and Mendoza, B., 2021*: Thermodynamics of climate change between cloud cover, atmospheric temperature and humidity. *Sci. Rep.* 11, 21244. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00555-5>
- Nowosad, M., 2017*: Variability of the zonal circulation index over Central Europe according to the Lityński method. *Geographia Polonica* 90(4), 417–430.
- Sfičá, L., Beck, C., Nita, A. I., Voiculescu, M., Birsan, M. V., and Philipp, A., 2021*: Cloud cover changes driven by atmospheric circulation in Europe during the last decades. *Int. J. Climat.* 41, E2211-E2230. <https://doi.org/10.1002/joc.6841>
- Simmons, A.J., 2022*: Trends in the tropospheric general circulation from 1979 to 2022. *Weather Climat. Dynam.* 3, 777–809. <https://doi.org/10.5194/wcd-3-777-2022>
- Szabó-Takáts B., 2012*: A felhőfizika alapjai és gyakorlati alkalmazásai. *Földrajzi Közlemények* 136(3).
- Vautard, R., Yiou, P., and Van Oldenborgh, G. J., 2009*: Decline of fog, mist and haze in Europe over the past 30 years. *Nat. Geosci.* 2(2), 115–119. <https://doi.org/10.1038/ngeo414>

Internetes hivatkozások

- [1] ERA 5 data documentation: <https://confluence.ecmwf.int/x/wv2NB>
- [2] odp.met.hu: https://odp.met.hu/climate/homogenized_data/gridded_data_series/Leiras_napi_eghajlati_racsponi_adatok.pdf
- [3] ncei.noaa.gov: <https://www.ncei.noaa.gov/products/climate-data-records/cloud-properties-isccp>