



Hogyan befolyásolják a felhők az éghajlatot?

Geresdi István

Pécsi Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Földrajzi és Földtudományi Intézet, geresdi@gamma.ttk.pte.hu

DOI: 10.56474/legkor.2025.4.1

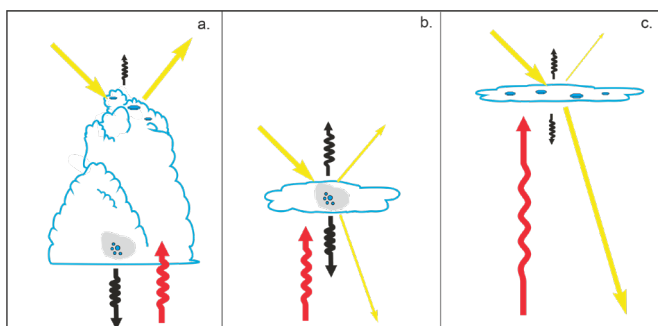
A felhők fontos részei az éghajlati rendszernek. Hatással vannak olyan meghatározó éghajlati jellemzőkre, mint a hőmérséklet és a csapadék. Nem csak szerepet játszanak az éghajlat alakításában, de érzékenyen reagálnak az éghajlati rendszer egyes elemeiben bekövetkező változásokra is. A felhők szerepének tisztázását nehezíti, hogy a tulajdonságaikat (pl. optikai tulajdonság, csapadék mennyisége és halmazállapota, fel- és leáramlások) meghatározó folyamatok rendkívül széles méretskálán – a mikrométerestől a kilométeres nagyságrendig – játszódnak le, továbbá képződésüket és jellemzőiket erősen befolyásolja a felszín és a légkör olyan, lokális (néhány kilométeres kiterjedésű) változékonysága, amelyek nehezen tanulmányozhatóak – akár megfigyelések, akár modellek segítségével – a globális rendszerek vizsgálata során. Noha az elmúlt évtizedekben a mérési eljárások és a numerikus modellek fejlődésének köszönhetően sokat javultak az ismereteink a felhőknek az éghajlat alakításában játszott szerepét illetően, még mindig számos fontos, nem tisztázott kérdés vár megválaszolásra.

How do clouds affect the climate?

Clouds play an important role in the climate. They influence the key climate characteristics, such as temperature and precipitation. However, they not only play a role in shaping the climate, but also respond sensitively to changes in individual climate elements. The processes that impact the characteristics of the clouds (e.g. optical and precipitation properties, updraft and downdraft) take place on an extremely wide scale, from micrometers to kilometers, and their formation and characteristics are strongly influenced by local variability of the surface or the atmosphere (several kilometers in extent). Such small-scale variabilities are extremely difficult to study using global observation and modelling systems. Although our knowledge of the role of clouds in shaping the climate has improved significantly in recent decades due to advances in measurement methods and numerical models, many important questions remain unanswered.

Átlagosan a Föld 60%-át fedi különböző vastagságú és magasságban elhelyezkedő felhőzet. A felhők vertikális kiterjedésüktől és mikrofizikai jellemzőiktől függő mértékben visszaverik a Naptól érkező rövidhullámú sugárzást, továbbá hosszuhullámú sugárzást bocsátanak ki, amelynek egy része a Föld felszíne fele

irányul (1. ábra). A két hatás eredője hozzávetőlegesen -20 Wm^{-2} (Stephens et al., 2012), azaz a felhőzet összességében hűti a felszínt és a légkör felszínközeli rétegét. Mivel ezen hűtő hatás néhány százalékos változása is jelentősen befolyásolhatja a jelenleg megfigyelhető melegezési trend nagyságát, vagy akár előjelét is,



1. ábra. A zivatarfelhők (a), a vertikálisan kis kiterjedésű, alacsony vagy középmagas felhők (b), valamint a magas szintű cirrus felhők (c) hatása a rövid- és hosszuhullámú sugárzás terjedésére. A sárga nyilak a rövidhullámú sugárzásra gyakorolt hatást mutatják. A piros, hullámos nyilak a felszín által kibocsátott, a fekete hullámos nyilak a felhő által kibocsátott hosszuhullámú sugárzást mutatják. A nyilak vastagsága arányos a sugárzás intenzitásával.

ezért nagyon fontos, hogy megértsük, hogy a felhőzet összetétele és kiterjedése hogyan reagál a környezeti jellemzők (pl. hőmérséklet, relatív páratartalom, légköri szennyezőanyagok koncentrációja) változására, illetve hogyan hat vissza ezekre a változásokra (pozitív vagy negatív visszacsatolások). Ezen visszacsatolások hatásának vizsgálatát nehezíti, hogy mértéke függ a földrajzi helyzettől (pl. óceánok vagy szárazföld), a felhő vertikális kiterjedésétől (pl. zivatarfelhő vagy rétegfelhő), a vertikális elhelyezkedéstől (pl. alacsony vagy magas szintű felhőzet), napszaktól (éjszaka vagy nappal), vagy a felhő mikrofizikai jellemzőitől (pl. vízcseppek méret szerinti eloszlása). A fentiekén túl a felhők gyors időbeli és kis térbeli skálán mutatózó változékonysága is hozzájárul ahhoz, hogy napjainkig nem sikerült egyértelműen tisztázni a felhőzet és a globális felmelegedés közötti kölcsönhatás jellegét és mértékét (Forster et al., 2021).

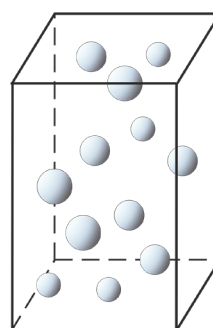
Jelen tanulmányban áttekintjük a felhők azon legfontosabb jellemzőit, amelyek meghatározóak lehetnek az éghajlatra gyakorolt hatás szempontjából. Ezen belül elsősorban a rövid- és hosszuhullámú sugárzás terjedésére gyakorolt közvetlen és közvetett hatásokról lesz szó.

A felhők hatása a sugárzásegyenlegre

A felhők hatása a rövidhullámú sugárzás terjedésére

Mindennapi megfigyeléseink is alátámasztják, hogy a felhők visszaverik a Napnak a látható tartományban (kb. 0,3 – 0,8 μm) kibocsátott sugárzását. A felhőket alkotó vízcseppek és jégkristályok azonban nemcsak

a látható tartományban, hanem a közeli infravörös tartományban (0,8 – 2,5 μm) is jelentős mértékben visszaverik a Naptól érkező sugárzást. A visszaverődés mértékének jellemzésére az albedót használjuk. Ez a mennyiség általában függ a hullámhossztól is, de az alábbiakban ettől eltekintünk. A látható és a közeli infravörös tartományban a visszaverődés mértéke arányos a felhőt alkotó részecskék egységnyi alapterületű oszlopra vonatkoztatott összfelületével, pontosabban a vízcseppek és jégkristályok keresztmetszetének összegével (2. ábra). Így, egy több kilométer vastag esőrétegfelhő vagy zivatarfelhő jóval nagyobb arányban veri vissza a Naptól érkező sugárzást, mint egy néhány-szor száz méter vastag altostratus felhő, vagy a felszín-



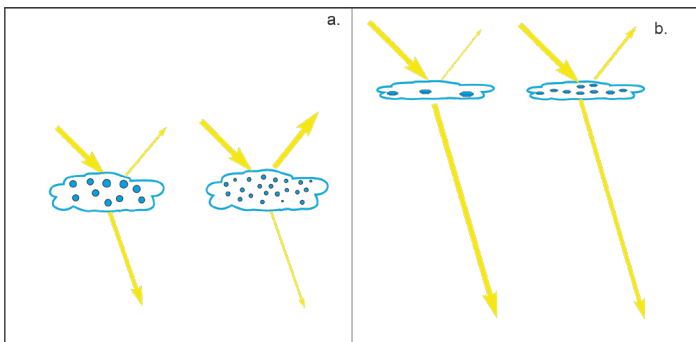
$$E_{\text{shortw}} \approx \sum n_i r_i^2$$

$$E_{\text{longw}} \approx \sum n_i r_i^3$$

2. ábra. A felhők mikrofizikai jellemzőinek hatása a rövidhullámú albedóra (E_{shortw}) és a kibocsátott hosszuhullámú (E_{longw}) sugárzásra. n_i az r_i méretű vízcsepp koncentrációját jelenti. Az összegzést a felhő teljes magasságában, egy egységnyi alapterületű oszlopban található összes vízcsepre kell elvégezni.

közeli köd. Míg a zivatarfelhők a beérkező sugárzás több mint 90%-át verik vissza, addig az alacsony és közép szintű réteges felhőzet albedója 40 és 60% között változik. A néhány-szor száz méter vastagságú réteges, vagy gomolyos felhők albedóját befolyásolja a vízcseppek és a jégkristályok kialakulásához nélkülözhetetlen kondenzációs magvak (angolul Condensation Nuclei, röviden CN), illetve jégképző magvak (angolul Ice Nucleating Particle, röviden INP) koncentrációja. Ez a hatás elhanyagolható a vertikálisan jelentős kiterjedésű zivatarfelhők vagy esőrétegfelhők esetében.

Feltételezve, hogy a kondenzálódott víz mennyisége nem változik, a kondenzációs magvak koncentrációjának növekedésével ugyan csökken az átlagos cseppméret, de ezt kompenzálja a nagyobb cseppkoncentráció miatt megnövekedett összkörmetszet (3a. ábra). Bebizonyítható, hogy állandó kondenzálódott vízmennyiséget és felhővastagságot feltételezve az albedó a vízcseppek koncentrációjának köbgyökével arányos. Az aeroszol részecskék ezen hatását hívják



3. ábra. Az aeroszol részecskék hatása a felhők rövidhullámú albedójára (első indirekt hatás). A kondenzációs magvak (a.) és a jégképző magvak (b.) koncentrációjának növekedése jelentősen befolyásolja a vertikálisan nem nagy kiterjedésű (max. 1 km) réteges vagy gomolyos felhők albedóját.

első indirekt, vagy Twomey-féle hatásnak (Twomey, 1974). Ezt a hipotézist mérések és modellszámítások is alátámasztják. Például Krüger és Graßl (2002) műholdas mérések alapján, Geresdi és munkatársai (2006) pedig modellszámítások segítségével kimutatták, hogy a múlt század 90-es éveiben jelentősen visszaeső SO_2 -kibocsátás olyan mértékben csökkentette a szulfáttartalmú kondenzációs magvak koncentrációját, hogy a közép-európai régióban 2–3%-kal csökkent a felhők albedója. Fontos megjegyezni, hogy a vízcseppek koncentrációja nem egyenesen arányosan változik az aeroszol részecskék koncentrációjával. Ugyanis függ az aeroszol részecskék méret szerinti eloszlásától és kémiai tulajdonságaitól, valamint a felhő dinamikai jellemzőitől (pl. feláramlási sebesség) is. A kondenzációs magvak koncentrációjának változása nemcsak a felhők optikai tulajdonságait módosítja, hanem a csapadék mennyiségét és a felhő élettartamát is (Albrecht, 1989). A nagyobb kondenzációs mag-koncentrációval járó kisebb átlagos vízcseppméret hatására csökken a vízcseppek egymás közötti, illetve a vízcseppek és a jégkristályok közötti ütközések gyakorisága. Így a csapadékképződés folyamata lelassul, a lehulló összcsapadék mennyisége csökken, a felhő élettartama pedig megnő. Ez, az ún. második indirekt hatás a felhővel fedett területek nagyságát is befolyásolhatja.

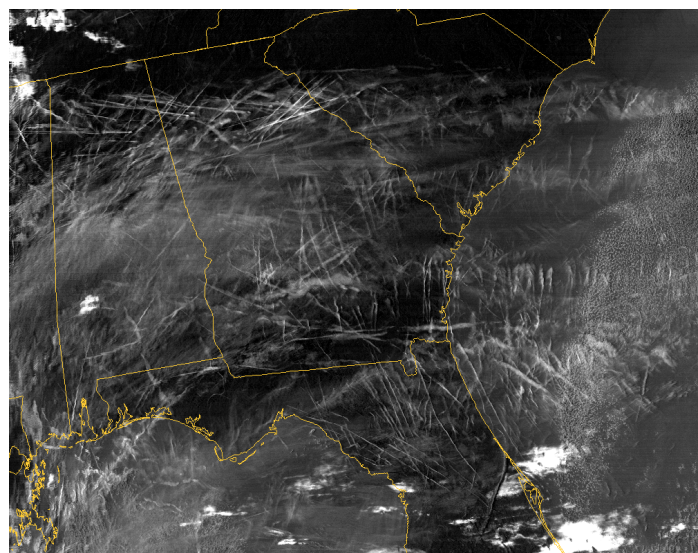
A magas szintű (cirrus) felhők albedóját döntően a felhőt alkotó jégkristályok koncentrációja és alakja határozza meg. A jégkristályok koncentrációja a jégképző magvak koncentrációjától és a levegő hőmérsékletétől függ. A cirrus felhők szintjén a hőmérséklet általában -40 – (-50) °C. Ilyen alacsony hőmérsékleten, természetes körülmények mellett közel 100 jégkristály alakul ki literenként a jégképző magvakra lecsapódó vízgőzből. Összehasonlításképpen, az alacsonyabb szintű

felhőkben a vízcseppek koncentrációja néhány millió literenként. Ez a négy nagyságrendbeli különbség megmagyarázza, hogy miért jóval kisebb a cirrus felhők rövidhullámú albedója, mint egy középszintű rétegfelhőé. A jégképző magvak koncentrációjának hatása jól megfigyelhető, ha a cirrus felhők albedóját a repülőgépek kondenzcsíkjának albedójával hasonlítjuk össze. A repülőgépek által, nagy koncentrációban kibocsátott szilárd halmazállapotú részecskéken – megfelelő vízgőztartalom esetén – jóval nagyobb számban alakulnak ki jégkristályok (3b. ábra) mint természetes körülmények között.

A felszínről azért látjuk fehérnek a kondenzcsíkokat, mert nem csak a Nap direkt sugárzását verik vissza a világűr irányába (4. ábra), de a földfelszínről visszaverődő, illetve a légköri részecskéken szóródó rövidhullámú sugárzást is visszaverik a felszín irányába.

A felhők hatása a hosszuhullámú sugárzás terjedésére

A felhők nem csak a Naptól érkező rövidhullámú sugárzás terjedését befolyásolják, de hatnak a hosszuhullámú ($4,0 - 100 \mu\text{m}$) sugárzásra is. A felhőket alkotó vízcseppek és jégkristályok egyrészt részben elnyelik a felszín és a légkör által kibocsátott hosszuhullámú sugárzást, másrészt hőmérsékletüktől függően sugárzást bocsátanak ki a hosszuhullámú tartományban. Ennek a sugárzásnak a mértéke a vízcseppek és jégkristályok hőmérsékletétől és térfő-



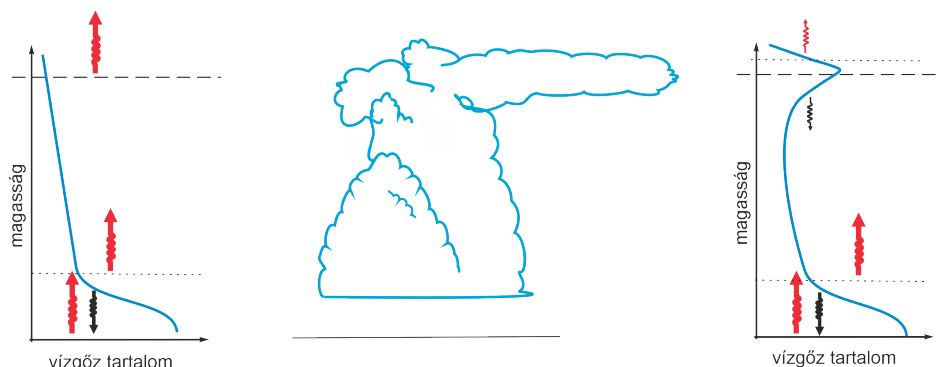
4. ábra. Kondenzcsíkokról készült műholdfelvétel az Egyesült Államok délkeleti vidékén. A kép forrás: NASA Earth Observatory. (https://eoimages.gsfc.nasa.gov/images/imagerecords/4000/4435/contrails_southeast_lrg.gif)

gategységre vonatkoztatott tömegkoncentrációjától függ. Mivel a zivatarfelhők, vagy az esőrétegfelhők esetében 40–60 °C-os különbség is lehet a felhő alapjának és tetejének hőmérséklete között, ezért ezen felhőtípusok esetében a felszín fele irányuló hosszuhullámú sugárzás intenzitása jóval nagyobb, mint a felhő teteje által kibocsátott, felfele irányuló sugárzás intenzitása (1a. ábra). A vertikálisan maximum néhány száz méteres kiterjedésű réteges, vagy gomolyos felhők esetében nincs jelentős különbség a felhő alapjának és tetejének hőmérséklete között, így a felfele és a lefele irányuló sugárzás nagysága közel azonos (1b. ábra). Ezen felhőtípusok estén a kibocsátott hosszuhullámú sugárzás a felhőréteg átlagos hőmérséklete mellett döntően az egységnyi területre vonatkoztatott, függőlegesen összegzett víztartalomtól (angolul liquid water path, röviden LWP) is függ (2. ábra). Hasonló módon lehet értelmezni a döntően jégkristályokból álló cirrus felhők hosszuhullámú sugárzásra gyakorolt hatását. Ebben az esetben a függőlegesen összegzett jégtartalomtól (angolul ice water path, röviden IWP) függ a cirrus felhőzet által kibocsátott hosszuhullámú sugárzás. Az LWP értéke széles határok között változik. Míg a legfeljebb néhány száz méter vastagságú köd esetében az LWP értéke 10–50 gm^{-2} , addig az ugyanilyen vastagságú stratus felhőzet esetében az LWP jellemzően 250 és 500 gm^{-2} között változik. A cirrus felhőkre és a kondenzcsíkokra jellemző IWP érték pedig rendszerint kisebb, mint 1 gm^{-2} . Mivel a felhők által kibocsátott hosszuhullámú sugárzás intenzitása a kondenzálódott víz mennyiségétől függ, ez a mennyiség kevésbé érzékeny a kondenzációs, vagy a jégképző magvak koncentrációjának megváltozására. A felhők hosszuhullámú sugárzását meghatározó kondenzálódott víz

mennyisége döntően a feláramlási sebesség nagyságától és a felszínközeli, illetve cirrus felhők esetében a felső troposzférikus levegő relatív páratartalmától függ.

A fentiekben a felhő alapjától lefele irányuló hosszuhullámú sugárzás hatásairól volt szó. Azontúl, hogy a felfele irányuló sugárzás melegítheti a troposzféra felső régióját, fontos szerepe van a felhők és a köd vertikális kiterjedésének alakulásában. Mivel a felhőtetőnél kibocsátott hosszuhullámú sugárzás csökkenti a felhő tetejének hőmérsékletét, növeli a felhőrétegben az instabilitást, elősegítve a felhő vertikális terjedését.

A vízgőzt gyakran emlegetik, mint legfontosabb üvegházgáz. Szerepe a hosszuhullámú sugárzás terjedésében azonban jóval összetettebb, mint a nagyságrendekkel hosszabb tartózkodási idejű szén-dioxid vagy metáné. Míg az üvegházgázok többsége, így a szén-dioxid és a metán is, közel egyenletesen keveredik el a troposzférában, addig a vízgőztartalom vertikális profilja estében jelentős különbség figyelhető meg a troposzféra alsó és felső tartománya között. Jellemzően a felszín közelében jóval magasabb a vízgőz keverési aránya, mint a magasabb régiókban (5. ábra). Ezt a profilt változtatják meg a felhők, különösen a zivatarfelhők (Wang, 2003). Ez a változás döntően annak tudható be, hogy a felhőket alkotó vízcseppeknek és jégreszciskéknek csak egy része hullik vissza a felszínre. A másik része elpárolog, aminek hatására növekszik a vízgőz mennyisége a felszíntől számított nagyobb magasságokban is (5. ábra). Így a felhőzet, különösen a zivatarfelhők nem csak közvetlenül befolyásolják a hosszuhullámú sugárzás egyenlegét, de közvetett hatásuk is jelentős lehet. Miért érdekes, hogy a zivatarfelhők jelentős mennyiségű vízgőzt juttatnak a légkör felső régióiba? Az üvegházgázok által kibocsátott hosszuhullámú sugárzás energiájának



5. ábra. Jellemző vertikális vízgőzprofil a zivatarfelhő kialakulása előtt (bal oldali profil) és a zivatarfelhő megszűnését követően (jobb oldali profil). A piros és a fekete nyilak a felfele és lefele irányuló hosszuhullámú sugárzást jelölik. A nyilak vastagsága a sugárzás intenzitásával arányos. A legfelső, felfele mutató piros nyíl a légkört elhagyó hosszuhullámú sugárzást jelöli.

nagysága az adott gáz hőmérsékletétől függ. Ha a légkört rétegekre osztjuk, és minden egyes rétegre felírjuk a ki- és beérkező hosszuhullámú sugárzást, akkor könnyű belátni, hogy a Föld-légkör rendszerből kilépő hosszuhullámú sugárzás energiáját a felső szint által kisugárzott energia és az egyes szintek által elnyelt energia fogja meghatározni (Haszpra, 2025). A határ-retegben lévő vízgőzrétegen áthaladó, és a vízgőzréteg által kibocsátott hosszuhullámú sugárzás energiájának összege csak nagyon kis mértékben függ a relatív páratartalomtól. Ennek magyarázata a következő: mivel a felszínközeli vízgőz hőmérséklete közel ugyanakkora, mint a felszín hőmérséklete, nincs lényeges különbség a felszín által kibocsátott és a vízgőzrétegen áthaladó (alacsony RH esetén meghatározó) és a vízgőzréteg által elnyelt és újra kibocsátott (magas RH esetén meghatározó) hosszuhullámú sugárzás energiája között. A lefele irányuló hosszuhullámú sugárzás energiája természetesen függ a planetáris határretegben lévő vízgőz koncentrációjától. Például 100%-os RH esetén (köd) a lefele irányuló sugárzás teljesen kompenzálhatja a kisugárzás okozta energiavesztéséget. A zivatarok hatására megváltozhat a vízgőz koncentrációjának vertikális profilja (5. ábra jobb oldala).

Ebben az esetben a vízgőzkoncentráció nagyobb magasságban is összemérhetővé válik a szén-dioxid koncentrációjával, így a vízmolekulák ebben a magasságban is jelentősen befolyásolják a hosszuhullámú sugárzás terjedését. Csökken a troposzférát elhagyó hosszuhullámú sugárzás energiája, és megnő a lefele irányuló hosszuhullámú sugárzás energiája. Mivel az intenzív, a troposzféra tetejéig emelkedő zivatarok gyakorisága – trópusok vidékétől eltekintve – kicsi, ezért a vízgőz általában a felszín közelében fordul elő nagyobb koncentrációban. Így a vízgőz jellemzően csak a felszín energiamérlegét befolyásolja, kevésbé hat a határreteg felett elhelyezkedő szabadlégkör energiamérlegére.

A felhők hatása a nettó sugárzásegyenlegre

Mint azt a fentiekben is láttuk, a felhőknek a rövid- és hosszuhullámú sugárzás terjedésére gyakorolt hatása függ az adott felhőtípus vertikális és horizontális kiterjedésétől és élettartamától, a felhőréteg hőmérsékletétől és mikrofizikai jellemzőitől (kondenzálódott víz tömege, a vízcseppek és jég-részecskék koncentrációja). Mielőtt a nettó hatás számszerűsítésének nehézségeit áttekintjük, egy rövid kvalitatív összegzést készíthetünk: (i) Mivel az éjszakai órákban csak a hosszuhullámú sugárzás hatásával

kell számolnunk, ebben az időszakban minden felhőtípus melegíti a felszínt és a felszínközeli levegőt. (ii) A nappali órákban a nettó hatás már függ a felhő típusától. Míg a cirrus felhők összességében melegítik a felszínt és a légkört, addig a többi felhő estében inkább a hűtő hatás a jellemző.

A felhőknek a sugárzásegyenlegre gyakorolt hatásának számszerűsítését nehezíti, hogy mind megfigyelések, mind a modellszámítások esetében nagy a bizonytalanság. Loeb és munkatársai (2021) műholdakra szerelt CERES szenzorok mérési adatait elemezve megállapították, hogy a kétezres évek első két évtizedében a felhők albedójának csökkenése miatt a felszínt elérő rövidhullámú sugárzás teljesítménye globális átlagot tekintve $0,40 \pm 0,18 \text{ Wm}^{-2}$ -el nőtt évtizedenként. Ezt a hatást némileg kompenzálja, hogy a mérések szerint csökkenő trend mutatható ki a felhők által kibocsátott, lefele irányuló hosszuhullámú sugárzás esetében (globális átlagot tekintve $0,18 \pm 0,10 \text{ Wm}^{-2}$ évtized⁻¹). Noha az adatok bizonytalansága meglehetősen nagy, a felhőzet változására visszavezethető, csökkenő mértékű hűtő hatás szignifikánsnak tekinthető. A tendenciára vonatkozó viszonylag alacsony globális átlagérték nagy földrajzi változékonyságot takar. Míg az északi féltekén három régióban is (Csendes-óceán keleti, az Atlanti-óceán nyugati területei, és Európa nagy része felett) jelentős a hűtő hatás mérséklődése, kb. $2\text{--}4 \text{ Wm}^{-2}$ évtized⁻¹, addig a déli féltekén a Csendes-óceán keleti területein, illetve Afrika trópusi területein a nettó hűtő hatás növekszik néhány Wm^{-2} évtized⁻¹-del. Arra nem térnek ki a szerzők, hogy ez a változás mivel magyarázható. Lehetséges magyarázatként szolgálhat a felhők optikai tulajdonságainak változása (pl. a kondenzációs magvak koncentrációjának megfigyelt csökkenése miatt), vagy felhővel fedett területek, illetve a felhőzet vastagságának csökkenése.

Gyakran lehet olvasni, illetve tudományos előadásokon is hallani arról, hogy a globális felmelegedés hatására jelentősebbé váló felszíni párolgás elősegíti a felhőképződést. A felhőtakaró kiterjedésének növekedése pedig, mint egy negatív visszacsatolás, csökkenti a felmelegedést. Sajnos a helyzet nem ennyire egyszerű. Ugyanis a felhőképződést nem az abszolút vízgőztartalom, hanem a relatív páratartalom határozza meg. Az utóbbi pedig fordítottan arányosan függ a hőmérséklet exponenciális függvényétől. Így hiába nő a levegő vízgőztartalma, a növekvő hőmérséklet hatására a relatív páratartalom akár jelentősen csökkenhet is (Cséplő et al., 2022). Természetesen a relatív páratartalom változása erősen függ a felszíni

viszonyoktól. Vízfelszín vagy a trópusi esőerdők felett a párolgás mértékének növekedése részben, vagy akár teljesen is kompenzálni tudja a levegő hőmérsékletének növekedéséből származó hatást. A mérsékelt öv nagy kiterjedésű kontinensei felett ez a kompenzáció már kevésbé hatékony. A felszínközeli vízgőztartalom nagyságát jelentősen befolyásolja a talaj nedvességtartalmától függő felszíni párolgás. *Almendra-Martín és munkatársai* (2022) egy, 1991-től 2020-ig tartó adatsort elemezve megállapították, hogy Európában, és azon belül különösen Közép- és Kelet-Európában jelentősen csökkent a felszínközeli talajréteg nedvességtartalma. Az adatok havi bontásban történő elemzésével kimutatták, hogy a csökkenés mértéke áprilisban a legjelentősebb, ekkor szinte egész Európára kiterjedően csökkent a talaj nedvessége a vizsgált időszakban. Ez a megállapítás összhangban van a magyarországi vizsgálatok eredményeivel, miszerint az elmúlt hatvan évben a tavaszi és a nyári hónapokban jelentősen csökkent a felszínközeli levegő relatív pártartalma (*Cséplő et al.*, 2022). Ezen csökkenésnek az egyik lehetséges következménye a felhővel fedett területek csökkenése, ami magyarázatot adhat az albedó megfigyelt csökkenésére.

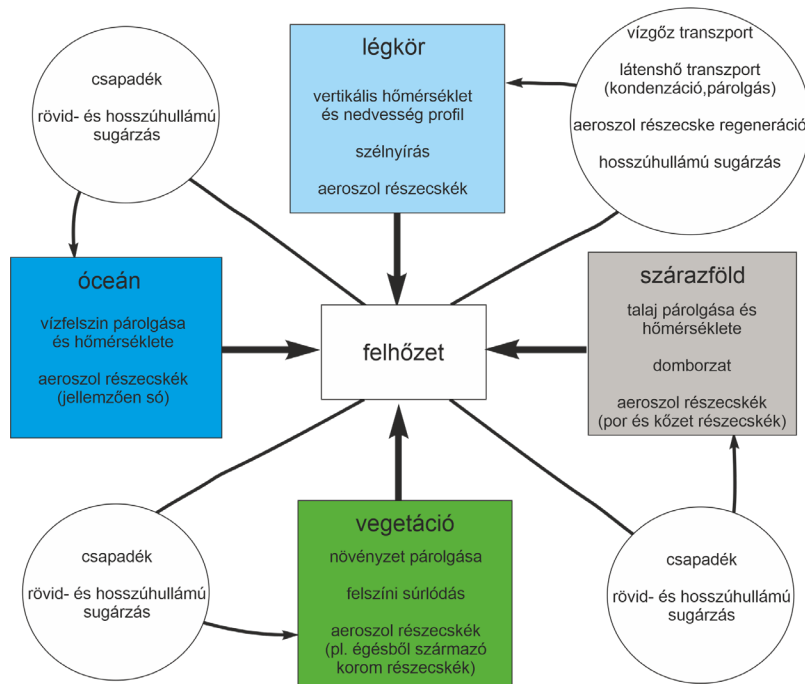
Kísérletek a felhők sugárzásra gyakorolt hatásának mesterséges megváltoztatására

Napjainkban egyre nagyobb teret kapnak azok az elképzelések, miszerint a légkör vagy a felszín jellemzőinek mesterséges, előre megtervezett módosításával lehetővé válik az éghajlat szabályozása, csökkentve az üvegházgázok koncentrációjának növekedése okozta negatív hatást. Széles körben elterjedt, elfogadott magyar kifejezés még nincsen erre tevékenységre. Sokan az angol 'geoengineering' kifejezés egy kicsit furán hangzó, és körülírás nélkül akár félre is érthető szószerinti fordítását, a bolygómérnökséget használják.

A felhők optikai jellemzőinek mesterséges megváltoztatása az egyik legszélesebb körben kutatott témának számít a számos, többnyire csak gondolat-kísérlet szintjén vizsgált lehetőség közül. Több kutatócsoport által vizsgált elméleti lehetőség az óceánok felett nagy területen kialakuló stratus felhőzet albedójának mesterséges növelése (angolul cloud brightening). Az elképzelésnek az a lényege, hogy tengervizet porlasztanak az óceánok felszínéhez közeli levegőrétegbe. Az apró vízcseppek elpárolgását követően mikrométeres vagy annál is kisebb sórészecskék maradnak a légkörben. Ezek a vízben

jól oldódó részecskék a feláramló levegővel magasba emelkedve hatásosan segítik elő újabb vízcseppek kialakulását. Az aeroszol részecskék első és második indirekt hatását is figyelembe kell venni, amikor ennek a kísérletnek a hatásait és a kockázatait szeretnénk megbecsülni (*Feingold et al.*, 2024). A megnövelt kondenzációs-mag-koncentráció elvileg növeli a Föld óceánjai felett nagy területen kialakuló stratocumulus felhőzet albedóját (első indirekt hatás). De mint arról a fentiekben szó volt, a második indirekt hatás miatt csökkenhet a felszínre lehulló csapadék mennyisége, ami egyrészt hatással lehet a lokális ökoszisztémára, másrészt befolyásolhatja a légköri áramlási viszonyokat. Egy másik javaslat, amiről gyakran lehet olvasni, az a cirrus felhők kiterjedésének, illetve a vastagságának csökkentése (angolul cirrus cloud thinning). Mint arról a fentiekben szó volt, a cirrus felhők nettó hatása a rövid- és a hosszuhullámú sugárzás terjedésére a légkör és a felszín melegedését eredményezi. Ezért indokolt lehet a cirrus felhők kiterjedésének, vagy legalább vastagságának csökkentése (a hosszuhullámú sugárzást meghatározó IWP csökkentése), ami mérsékli a lefele irányuló hosszuhullámú sugárzást. A beavatkozás akkor tekinthető hatékonynak, ha hatására a felhőt alkotó jégkristályok kiesnek a felhőből, és lefele haladva elszublimálnak. Ez csak úgy érhető el, ha meg tudjuk növelni a jégkristályok méretét. Ennek egyik megvalósítási lehetősége, ha növeljük a jégkristályok koncentrációját, aminek hatására elvileg növekszik a kristályok közötti ütközések gyakorisága. Ezzel a hipotézissel az a probléma, hogy az alacsony hőmérséklet miatt (kb. -40 – (-60) °C) az ütköző jégkristályok csak kis valószínűséggel tapadnak össze. Így előfordulhat, hogy a beavatkozás a kívánt cél helyett a cirrus felhők melegítő hatását fokozza, mivel a több jégkristály hatására növekszik az IWP értéke.

Mint az a fenti két példából is látható, a felhőképződésbe – és ez valószínűleg igaz más, az éghajlatot befolyásoló folyamatra is – történő beavatkozás hatékonyságának megítélésakor nagyon körültekintően kell eljárni, mielőtt a gyakorlati alkalmazásra vonatkozó első kísérletek megtörténnek. A felhőfizikai tudományos közösség jelenleg úgy látja, hogy a feltételek egyelőre nem adottak a hatások korrekt megítélésre. Ennek az a legfőbb oka, hogy a klíma-modellek napjainkban még nem alkalmasak arra, hogy a felhőkben lejátszódó folyamatok és a globális éghajlatváltozás közötti kölcsönhatást minden részletében pontosan előre tudják jelezni. Ennek okairól a következő fejezetben lesz szó.



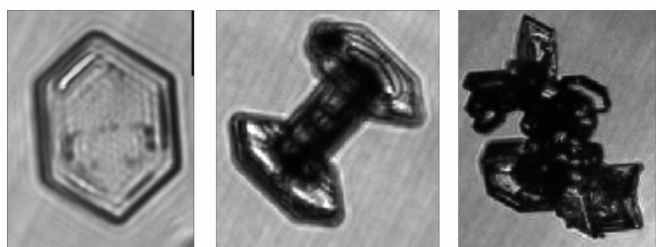
6. ábra. A felhők és az éghajlati rendszer egyes elemei közötti legfontosabb kölcsönhatások. A négyszög alakú dobozokban szereplő jellemzők és folyamatok azt mutatják, hogy az éghajlati rendszer egyes elemei hogyan hatnak a felhőképződésre. A körökkel határolt szövegrészek a felhők hatását jelölik.

A felhők numerikus modellezése a klímamodellekben

A klímaváltozással kapcsolatos kutatások elengedhetetlen feltétele, hogy a Föld-légkör rendszer egészére kiterjedő adatgyűjtést tudjunk megvalósítani, és olyan numerikus modelleket fejlesszünk ki, illetve használjunk, amelyek képesek az éghajlati rendszer egyes elemeiben lejátszódó folyamatok, továbbá az egyes elemek közötti kölcsönhatások korrekten előrejelzésére. Az alábbiakban azokról a kihívásokról és nehézségekről lesz szó, amelyekkel akkor szembesülünk, amikor a felhőkben lejátszódó folyamatoknak a klímára gyakorolt hatását szeretnénk modellezni. A felhők jellemzői, illetve a felhőkben lejátszódó folyamatok szorosan kapcsolódnak, az éghajlati rendszer egyes elemeihez (légkör, óceán, szárazföld, vegetáció), kölcsönhatnak az azokban lejátszódó folyamatokkal. A 6. ábra sematikus összefoglalja, hogy az éghajlati rendszer egyes elemeiben lejátszódó folyamatok, illetve az elemek jellemzői hogyan hatnak a felhőképződésre, valamint, hogy a felhők hogyan hatnak vissza ezekre a folyamatokra és jellemzőkre.

Minden egyes folyamat részletes elemzése messze túlmutatna a jelen cikk keretein. Így az alábbiakban csak az ún. felhő-aeroszol kölcsönhatás egyes aspek-

tusairól lesz szó részletesebben. Mint azt a fentiekben láttuk, a felhők optikai tulajdonságát, valamint a csapadékképződés hatékonyságát jelentősen befolyásolja a kondenzációs magvak koncentrációja. Azonban önmagában a koncentrációra vonatkozó információ nem elég a cseppképződés megbízható előrejelzésére, mivel ténylegesen a részecskék méret szerinti eloszlása és kémiai összetétele együttesen határozza meg, hogy adott feltételek mellett hány vízcsepp alakul ki. Ezért az éghajlati modellek esetében figyelembe kell venni azt, hogy a természetes és mesterséges folyamatok hatására légkörbe kerülő gázok hogyan befolyásolják a légköri aeroszol részecskék képződését. Az aeroszolképződést leíró kémiai reakcióegyenletek felírása (ez különösen igaz a szerves molekulák esetében) és azok numerikus megoldása azonban komoly kihívást jelent. A legújabb globális klímamodellek már képesek arra, hogy becslést adjanak a különböző méretkategóriába (Aitken, finom és durva) tartozó aeroszol részecskék koncentrációjára és a vízben való oldhatóságot leíró higroszkopicitásukra (pl. *Ginoux et al.*, 2001). Természetesen erre csak nagyon erősen leegyszerűsített, számos empirikus paramétert tartalmazó egyenletrendszer adta keretek között van lehetőség. A vízcseppek, illetve a jégkristályok kialakulását elősegítő aeroszol részecskék azonban nemcsak a levegőben lejátszódó



7. ábra. Felhőkben készült nagyfelbontású (kb. $2\text{ }\mu\text{m}$ -es) fénykép különböző, a környezeti feltételektől függően kialakult jégkristály formákról. A jégkristályok mérete $1\text{--}2\text{ mm}$. (Forrás: W. Hall, NCAR)

kémiai folyamatok eredményeként alakulhatnak ki, de jelentős koncentrációban keletkezhetnek az erdő- vagy bozóttüzek során (pl. Pósfai et al., 2003), az óceánokról a szél hatására felemelkedő, és a levegőben elpárolgó vízcseppekből, valamint a sivatagi területekről magasba jutó porrészecskékből (pl. DeMott et al., 2010). Így ezen folyamatok hatását is figyelembe kell venni, ha pontosan előre akarjuk jelezni a felhők optikai tulajdonságát és a kihulló csapadék mennyiségét.

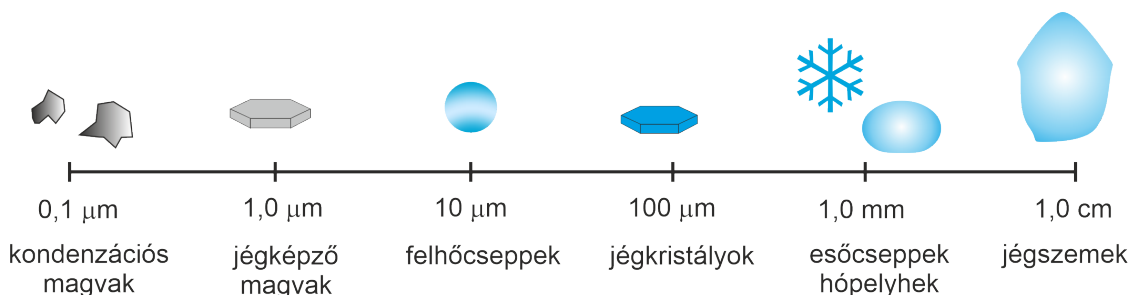
Azonban nemcsak az aeroszol részecskék hatnak a felhőképződésre, hanem a felhőkben lejátszódó folyamatok is hatnak az aeroszol részecskék tulajdonságaira. A kondenzációs magvak egy része a csapadékkal együtt kihullik a felszínre, egy másik része azonban a vízcseppek elpárolgását követően a légkörben marad. Ez utóbbi folyamatot nevezzük regenerációnak (6. ábra). Mivel egy kondenzációs magként viselkedő aeroszol részecske átlagosan ötször vesz részt a felhőképződésben, mielőtt véglegesen kimosódna a légkörből (Pruppacher and Jeanicke, 1995), a keletkezésük jellemző tulajdonságai jelentősen megváltoznak, általában nagyobb lesz a méretük, és megnő a higroszkopicitásuk (Schmeller and Geresdi, 2019). Ez a változás hatással lehet a csapadékképződésre (Xue et al., 2010) és a ködképződés folyamatára is (Bodaballa et al., 2022). A regenerációs folyamatok korrekt numerikus modellezése még az időjárás-elő-

rejelzés céljából kifejlesztett modellek esetében sem megoldott, többnyire kutatási célú fejlesztések történnek még napjainkban is ezen a területen.

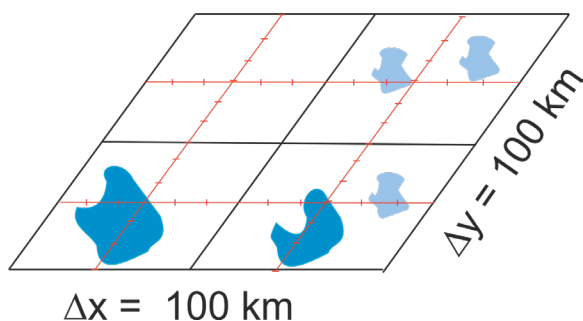
A csak jégkristályokat tartalmazó cirrus felhőzet – a vízcseppeket is tartalmazó felhőktől eltérően – a rövid- és hosszuhullámú sugárzás terjedésre gyakorolt nettó hatása eredményeként melegíti a troposzférát és a felszínt. A többi felhőtípus esetén a jégkristályoknak az optikai tulajdonságra gyakorolt hatása nem ilyen jelentős, de a mérsékelt és poláris övek felhőiben, illetve a trópusi zivatarokban fontos szerepet játszanak a csapadékképződésben. Ezért fontos, hogy a felhőkben kialakuló jégkristályok jellemzőit, szerepüket a csapadékképződés folyamatában minél pontosabban meg tudjuk határozni. A jégkristályok kialakulásának rendkívül változatos módjai és az alakjuk sokszínűsége miatt (7. ábra) a jégképződés és a csapadékképződési folyamatok modellezése még az időjárás-előrejelzés céljára kifejlesztett modellek esetében is csak erősen egyszerűsített formában lehetséges (Geresdi, 2004).

A sok bizonytalanság miatt a különböző kutatóműhelyekben kifejlesztett klímamodellek eltérő közelítéseket alkalmaznak a jégképződést és a jégkristályok növekedését leíró egyenletek felírásakor, ami ahhoz vezet, hogy jelentősen eltérő eredményt adnak a felhők optikai tulajdonságát meghatározó átlagos jégkristálméretre (pontosabban az optikai tulajdonságot meghatározó átlagos effektív sugárra). Az eredmények validálásához szükséges műholdas mérési eljárások még nem állnak rendelkezésre (Wang et al., 2020).

A felhők hatásainak pontos figyelembevételét az is nehezíti, hogy a felhőkben lejátszódó folyamatok nagyon széles méretskálán játszódnak le. A csapadékképződésben részt vevő részecskék és a közöttük lejátszó kölcsönhatás folyamatainak méretskálája a mikrométeres nagyságrendtől a centiméteres nagyságrendig terjed (8. ábra).



8. ábra. A felhőképződésben szerepet játszó és a felhőt alkotó, különböző halmazállapotú és alakú részecskék méretskálája.



9. ábra. A hagyományos klímamodellek horizontális térbeli felbontása (fekete négyzetek), valamint a szuperparametrizáció adta lehetőség a térbeli felbontás növelésére (piros vonalak). A piros vonalak a globális modelltérbe (fekete vonalak) illesztett vertikális síkok irányát mutatják. A késsel jelölt tartományok a különböző méretű felhőrendszereket jelölik.

Az ezen a méretskálán lejátszódó folyamatok (pl. kondenzáció során felszabaduló látens hő, vagy az olvadás hűtő hatása) jelentősen befolyásolják a méteres nagyságrendtől a kilométeres nagyságrendig terjedő légköri áramlást a felhőkben, illetve azok közvetlen környezetében. Ahhoz, hogy a felhők életciklusát meghatározó, felfele, illetve lefele irányuló áramlások kialakulását és fejlődését modellezni lehessen, továbbá, hogy figyelembe lehessen venni a felhőképződést meghatározó felszíni változékonyságot, a modellek térbeli felbontásának el kell érnie a néhány kilométeres horizontális felbontást. Ezt a térbeli felbontást az időjárás-előrejelzés céljaira kifejlesztett mezoskálájú modellekben is csak a 1990-es évek második felében sikerült elérni. Egy jellemző példa a térbeli felbontás fontosságára a magas hegyeknek a felhőképződésre gyakorolt hatásának vizsgálata. Mivel a domborzat hatását jellemzően a felszín mereksége határozza meg, ezért a magashegységek környezetében az elvárt horizontális felbontás 1–2 km. A globális klíma modellek 100 km-es nagyságrendű térbeli felbontása messze nem teljesíti ezt a feltételt, de még a regionális klímamodellek 5–10 km-es felbontása is rosszabb a kívánatosnál. Az elmúlt években jelentős erőfeszítések történtek annak érdekében, hogy a globális klímamodelleket is alkalmassá tegyék a felhőképződés explicit szimulálására (Randall *et al.*, 2019). A sok próbálkozás közül az egyik legsikeresebbnek az ún. szuperparametrizációs eljárás bizonyult (9. ábra). A módszernek az a lényege, hogy a 9. ábrán látható módon kétdimenziós függőleges síkokat illesztnek a rendszerbe. Ezekben a síkokban a horizontális felbontás akár néhány kilométerre is növelhető (sok modell-

ben használnak 4 km-es felbontást, de a 250 m-es felbontásra is van példa). Ezen módszer alkalmazása lehetővé teszi, hogy globális szinten tudjuk vizsgálni a felhők szerepét a klíma szabályozásában, és azt, hogy a lokális változások a klímában milyen hatással vannak a felhőképződésre. A módszer hátránya, hogy a lokális, horizontális áramlások kialakulása (pl. zivatarfelhők kifutószele) és hatásainak figyelembevétele csak korlátozottan lehetséges. Emiatt a felhőknek a globális szintű horizontális levegőáramlásra gyakorolt hatását nem is veszik figyelembe ebben a modelltípusban. A térbeli felbontás további javulását illetően optimisták lehetünk, ugyanis már léteznek olyan globális modellek (pl. Seiki *et al.*, 2022), amelyeknek 1 km-es felbontású rácshálójuk lehetővé teszi, hogy a felhőkben lejátszódó folyamatokat a mezoskálájú modellekben elvárt megbízhatósággal jelezzük előre. Természetesen ezt a térbeli felbontást csak néhány, nagyon nagy teljesítményű számítógép tudja biztosítani, és ezek használata is csak rövid, kb. 1 éves időszak tanulmányozását teszi egyelőre lehetővé.

Összegzés

A mérési módszerek és a numerikus modellek területén végbement fejlődésnek köszönhetően az elmúlt évtizedekben jelentősen növekedtek ismereteink arról, hogy az éghajlati rendszer egyes elemeiben lejátszódó folyamatok hogyan hatnak a felhőképződésre, valamint, hogy a felhők hogyan hatnak vissza ezekre a folyamatokra. Ennek ellenére még mindig nagy a bizonytalanság annak megítélésében, hogy a felhők mikrofizikai és dinamikai jellemzőinek változása hogyan hat a nettó sugárzásegyenlegre, valamint a lehullott csapadék mennyiségére, annak térbeli és időbeli eloszlására. Ennek egyik oka, hogy a kondenzációs magvak és a felhők közötti kölcsönhatásnak még számos részletét nem ismerjük pontosan, és a globális éghajlati modellek csak korlátozottan képesek ezen folyamatok hatásait figyelembe venni. Különösen hiányosak az ismereteink a jégképző aeroszol részecskék és a jégkristályok szerepét illetően. Ezen okokkal magyarázható, hogy a különböző globális vagy regionális klímamodellek eredményeit összehasonlítva szembetűnő, hogy a csapadék változására vonatkozó eredmények esetében milyen nagyok az eltérések. Meggyőződésem, hogy amíg a felhőknek a klímaváltozásban játszott szerepét nem sikerül tisztázni, minden olyan mesterséges beavatkozás, ami a felhők optikai jellemzőinek megváltoztatásán keresztül próbálja mérsékelni a klímaváltozás negatív hatásait, előre nem látható kockázattal jár.

Irodalomjegyzék

- Albrecht, B.A., 1989: Aerosols, Cloud Microphysics, and Fractional Cloudiness. *Science*, 245 (4923): 1227–30.
- Almendra-Martín, L., Martínez-Fernandez, J., Piles, M., Gonzalez-Zamora, A., Benito-Verdugo, P., Gaona, J., 2022: Analysis of soil moisture trends in Europe using rank-based and empirical decomposition approaches. *Global and Planetary Change*. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103868>
- Bodaballa, J.K., Geresdi, I., Ghude, S.D. and Salma, I., 2022: Numerical simulation of the microphysics and liquid chemical processes occur in fog using size resolving bin scheme. *Atmospheric Research*, 266, 105972. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2021.105972>
- Cséplő, A., Izsák, B., Geresdi, I., 2022: Long-term trend of surface relative humidity in Hungary. *Theoretical and Applied Climatology* 149, 1629–1643, <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04127-z>
- DeMott, P. J., Prenni, A. J., Liu, X., Kreidenweis, S. M., Peters, M. D., Twohy, C. H., et al., 2010: Predicting global atmospheric ice nuclei distributions and their impacts on climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(25), 11,217–11,222.
- Feingold, G., et al, 2024: Physical science research needed to evaluate the viability and risks of marine cloud brightening, *Science Advances*. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adi8594>
- Forster, P., Storeymo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., and Zhang, H., 2021: The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity, edited by: Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Pean, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekci, O., Yu, R., and Zhou, B., 923–1054, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021.
- Geresdi, I., 2004: Felhőfizika, 1st ed. Dialóg Campus Kiadó, Budapest; Pécs.
- Geresdi, I., Mészáros, E. and Molnár, A., 2006: The effect of chemical composition and size distribution of aerosol particles on droplet formation and albedo of stratocumulus clouds, *Atmospheric Environment*, 40, 1845–1855.
- Ginoux, P., Chin, M., Tegen, I., Prospero, J.M., Holben, B., Dubovik, O., Lin, S., 2001: Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 106, 20255–20273. 1762 <https://doi.org/10.1029/2000jd000053>
- Haszpra L., 2025: A légkör szerepe az éghajlati rendszerben, *Légkör* 70, 134–142p
- Krüger, O. and Hartmut Graßl, H., 2002: The indirect aerosol effect over Europe. *Geophysical Research Letters*, 29, p 1925, <https://doi.org/10.1029/2001GL014081>
- Loeb, N. G., Johnson, G. C., Thorsen, T. J., Lyman, J. M., Rose, F. G., Kato, S., 2021: Satellite and ocean data reveal marked increase in Earth's heating rate. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL093047. <https://doi.org/10.1029/2021GL093047>
- Pósfai, M., R. Simonics, J. Li, P. V. Hobbs, and P. R. Buseck, 2003: Individual aerosol particles from biomass burning in southern Africa: Compositions and size distributions of carbonaceous particles, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D13), 8483. <https://doi.org/10.1029/2002JD002291>.
- Pruppacher, H.R., Jeanicke, R., 1995. The processing of water vapor and aerosols by atmospheric clouds, a global estimate. *Atmospheric Research*, 38, 283–295
- Randall, D. A. et al., 2019: 100 years of earth system model development. *Meteorological Monograph*, 59, 12.1–12.66.
- Schmeller, G., Geresdi, I., 2019. Study of interaction between cloud microphysics and chemistry using coupled bin microphysics and bin aqueous chemistry scheme. *Atmospheric Environment*, 198, 366–380. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.064>.
- Seiki, T., Roh, W., and Satoh, M., 2022: Cloud Microphysics in Global Cloud Resolving Models. *Atmosphere-Ocean*, 60(3–4), 477–505. <https://doi.org/10.1080/07055900.2022.2075310>
- Stephens, G. L., Li, J., Wild, M., Clayson, C. A., Loeb, N., Kato, S., L'ecuyer, T., Stackhouse, P. W., Lebsock, M., and Andrews, T., 2012: An update on earth's energy balance in light of the latest global observations, *Nature Geoscience*, 5, 691–696, <https://doi.org/10.1038/ngeo1580>, 2012.
- Twomey, S., 1974: Pollution and the Planetary Albedo. *Atmospheric Environment*, 8, 1251–56.
- Wang, P. K., 2003: Moisture plumes above thunderstorm anvils and their contributions to cross-tropopause transport of water vapor in midlatitudes. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108, D6, <https://doi.org/10.1029/2002JD002581>
- Wang, Y., Su, H., Jiang, J. H., Xu, F., and Yung, Y. L., 2020: Impact of cloud ice particle size uncertainty in a climate model and implications for future satellite missions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125, e2019JD032119. <https://doi.org/10.1029/2019JD032119>