

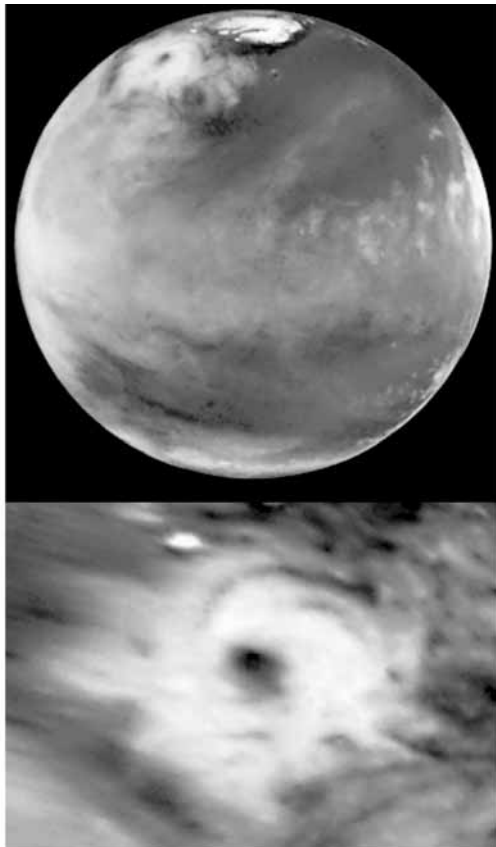
# ÉGHAJLATVÁLTOZÁS A MARSON

## I. RÉSZ

A 80-as évek derekán a *Légkör hasábjain* cikksorozat jelent meg Rákóczi Ferenc professzor tollából a bolygók légköréről. Már akkorra is sok ismeret gyűlt össze űrszondás mérések segítségével, főleg a Vénuszról és a Marsról. Az azóta eltelt két évtized mérései birtokában már az időbeli változásokról is képet lehet alkotni, legalábbis a Mars esetében. Ezzel foglalkozik Kereszturi Ákos két részben megjelenő cikke. (A szerk.)

### Bevezetés

Mai ismereteink alapján a meteorológia és az éghajlatban sok fogalmát kisebb-nagyobb változtatásokkal a Marsra is alkalmazhatjuk, amely érdekes új terepe lehet a kutatásoknak (1. ábra). A vörös bolygónál az éghajlat és változásainak ismerete két okból kiemelten fontos. Egyrészt a felszíni viszonyok elképzelhetővé teszik, hogy egykor ott is kialakult, esetleg máig fennmaradt az



1. ábra. Egy ciklonális jellegű légörvény az északi féltekén, a helyi nyár idején (fent) és közel függőleges rálátású helyzetre torzított, kinagyított képe (lent). A kb. 1600 km átmérőjű képződményt vízfélgömbök alkotják. A képet 410 nm-en, a kék fény hullámhosszán készítette a Hubble-űrtéleszkóp 1997.05.27-én WFPC-2 kamerájával (Jim Bell (Cornell), Steve Lee, Mike Wolff (SSI), NASA).

élet, amit erősen befolyásolhat a klíma. Emellett az éghajlat ismerete az ún. klimatikus planetomorfológiának (az egyes égitesteken az éghajlat és a felszínformák kapcsolatának) kutatásában nyújt segítséget. A Marsra a klíma változása jelentős felszíni átalakulásokat eredményez, mivel a felszíni viszonyok a két fontos illó anyag (H<sub>2</sub>O és CO<sub>2</sub>) esetében is azok hármaspontjainak\* közelében vannak. Ezért csekély éghajlati változás is komoly felszíni módosulásokkal járhat.

Mind a Föld, mind a Mars esetében az éghajlatváltozásoknál a nagy kérdés, hogy mekkora időintervallumra végezzük el vizsgálatunkat, keresve a határt a fluktuációk, ingadozások és a hosszabb skálájú éghajlatváltozások között (Bartholy, 1999). A Marsnál a korlátozott megfigyelési információk alapján viszonylag rövid időszakra, néhány évtizedre tudunk csak átlagolni, tehát hajlamosak vagyunk rövid időskálákat használni. Elméletileg a Mars éghajlata instabilabb a Földénél, ezért talán indokolt is a rövid időskálájú megközelítés. Az alábbi cikkben a hagyományos, földi éghajlattani témakörök és alapfogalmak szerint összegezzük ismereteinket a Marsról, bár néhol a vörös bolygó adottságaihoz alkalmazkodva egyes részeket elhanyagolunk, másokat a földinél részletesebben tárgyalunk. A ma általánosan elfogadott magyarázatokból és elgondolásokból merítünk – noha ezek a gyorsan növekvő ismeretanyag függvényében változhatnak a közeljövőben.

### Az éghajlatot kialakító tényezők a Marsra

A Mars légköri folyamatainak megértéséhez szükséges általános háttérismereteket az alábbiakban összegezzük, numerikusan pedig a mellékelt táblázatban sorolunk fel néhány fontos paramétert. A **pályaelemek** szempontjából kiemelt jelentőségű, hogy a Mars kb. másfélszer messzebb van a Naptól, mint a Föld, ezért a napállandó értéke (593 W/m<sup>2</sup>) átlagosan kb. 43%-a a földinek. A földinél sokkal nagyobb a pálya excentricitása, a bolygó elnyúlt útvonalán a minimális és a maximális besugárzás között egy marsi évben az átlagértékhez viszonyítva kb. 40%-os az eltérés. Ezért naptávolban a felszíni átlaghőmérséklet 20–30 fokkal alacsonyabb, mint napközben. A forgástengelynek a pályasíkhoz viszonyított ferdesége a földi értékhez közeli, tehát évszakok váltakoznak a Marsra, amelyek a pálya elnyúlt alakja miatt aszimmetrikus jellegűek a két féltekén (1. később).

A légkör összetétele alapvetően eltér a mai földitől, elsősorban szén-dioxidból áll, emellett kisebb arányban előforduló, de fontos összetevő még a nitrogén és az argon.

A felszíni **átlaghőmérséklet** -53 °C, a maximum

Jellemző	Mars	Föld
Átlagos naptávolság (millió km)	228	150
Keringési idő (földi nap)	687	365,25
Excentricitás	0,0934	0,0167
Forgástengely ferdesége (fok)	25,19	23,45
Tengelyforgási idő (földi óra)	24,62	23,93
Légköri összetétel:	95% CO <sub>2</sub> 2,7% N <sub>2</sub> 1,6% Ar 0,13 O <sub>2</sub> 0,07 CO 0,03% H <sub>2</sub> O	78% N <sub>2</sub> 21% O <sub>2</sub> 1,9% Ar 0,035% CO <sub>2</sub> 0,4-4% H <sub>2</sub> O 0,0018% Ne
Légkör tömege (kg)	2,17x10 <sup>16</sup>	4,99x10 <sup>18</sup>
Átlagos légköri molekulatömeg (g/mol)	43,4	29
Átlagos hangsebesség (m/s)	229	321
Átlagos felszíni hőmérséklet (°C)	-53	+15
Maximális felszíni hőmérséklet (°C)	+20	+60
Minimális felszíni hőmérséklet (°C)	-140	-90
Átlagos felszíni légnyomás (hPa)	6,1	1013,25
Átlagos albedo	0,25	0,37
A víz átlagos forráspontja a magasság 0 méteres kezdőszintjén (°C)	+2	100
Napállandó a bolygó átlagos naptávolságában (W/m <sup>2</sup> )	593	1365

1. táblázat A Mars és a Föld éghajlat szempontjából fontos paramétereinek összehasonlítása

nyáron, alacsony földrajzi szélességen, dél körül +20 °C, míg a sarkvidéki hideg éjszakákon a minimum -140 °C is lehet. A légkör tömege közel százada a földinek, amely a nálunk jellemzőnél háromszor gyengébb gravitációs térben szerény, 6,7 hPa körüli felszíni légnyomást eredményez. Utóbbi értéke évszakos változást mutat (l. később).

A magassági viszonyok érezhető hatással vannak a légköri jelenségekre. A bolygó legmélyebb és legmagasabb pontja között 29 km a különbség. Az áramlásokat befolyásolja, hogy az északi félteke nagy része olyan síkság, amely az egyenetlen felszínű déli felföldeknél 3-5 km-el mélyebben fekszik. Fontosak továbbá a nagy becsapódásos medencék, amelyekben a hideg levegő tartósan meg tud ülni, közülük legnagyobb a 2100 km átmérőjű, 9 km mély Hellas-medence. A pólussapkák domborzati hatása is számottevő, ahol a nagyobb északi sapka közel 1,2 km-rel magasodik a környezete fölé, és róla könnyen "lefolyik" a nehéz hideg levegő. A legmagasabb hegyek a Tharsis-hátság emelkednek, amelyek 24–25 km-rel emelkednek a környezetük fölé (Hargitai és Nemerkenyi, 2007).

A klímát erősen befolyásolják azok a pufferek, amelyekben a légköri gázok tárolódhatnak. Legnagyobb puffer a krioszféra (a felszín alatti réteg, amelyben a köztörmelékbe belefagytak az illók), ennek H<sub>2</sub>O-tartalma globális vízborítás egyenértékben 50–200 m körüli. (Globális egyenértéken azt a vastagságot értjük,

amelyet a felszínen a vízréteg képezne, ha teljes mennyisége folyékony formában, egyszerre, egyenletesen csapódnak ki egy tökéletes gömb alakú Marson.) A krioszférában emellett sok CO<sub>2</sub> is lehet, lényegesen több mint amennyi most a légkörben található.

Valamivel kevesebb illót tárolnak a sarki réteges üledékek a két pólussapka körül, itt szintén a légkörinél több CO<sub>2</sub> lehet megkötve, az itt tárolt H<sub>2</sub>O mennyisége pedig 10–15 m globális vastagsággal lehet egyenértékű. Az állandó pólussapkában lévő H<sub>2</sub>O a két féltekén együtt néhány méteres globális vízborítást adna. Vízpárából nagyon kevés, közel annyi van az egész légkörben, mint nálunk a sztratoszférában. Az északi pólussapka fagyott vízjege mobilisabb a délinél, a légköri vízgőztartalom ezért az északi nyár idején a legmagasabb, de ekkor is globálisan csak maximum 100 mikrométerrel lehet egyenértékű.

Az albedó legélénkebben a felszíni por és fagytakaró jellegétől függ, az átlagos értéke 0,25 körüli. Legfényesebbek az állandó pólussapkák és az évszakos fagytakaróval borított vidékek. Utóbbi évszakos változást mutat, akár csak a széllal szállított finom felszíni por eloszlása – mindezek az albedó módosítása révén erősen befolyásolják a meteorológiai viszonyokat.

A Marson alapvetően háromféle felhő van: H<sub>2</sub>O-, CO<sub>2</sub>- és porfelhő, bár némi keveredés is lehet ezek anyaga között. (Jelenleg a ködöket is a felhők közé sorolják, a kettő megkülönböztetésének egyelőre nincs biztos

alapja.) A marsi  $H_2O$ -felhők vízjégből állnak, reggel és este gyakoriak, és sokszor hullámszerű a megjelenésük (2. ábra). 5 és 60 km-es magasság között jellemzőek, délután főleg a nagyobb vulkánok felett mutatkoznak, a Tharsis-vulkánok például egész évben erősen felhősek. Hasonlóan tartós néhány mélyedésben a felhő- avagy ködborítás: a Hellas-medence felhőtakarója a déli télen erős, majd tavasszal gyengül, és a melegedéssel párhuzamosan eltűnik. A Valles Marineris mély árokrendszerében az északi nyáron jellemzők a felhők. Eddig egy alkalommal sikerült a felszínről, az Opportunity rover fotósorozatán egy konvektív felhőnek a fejlődését nyomon követni.



2. ábra. A 104 km átmérőjű Mie-kráter felett mutatkozó orografikus felhő (MGS, MSSS, NASA, JPL)

További jellegzetes felhőalakzat a trópusi felhőöv a d.sz. 10 és é.sz. 30 foka között, az afélium időszakában (Clancy *et al.*, 1996), az északi tavasz és nyár alatt. Ez a Hadley-cella felszálló ága lehet, amikor az északi évszakos pólussapka szublimál. Hasonló felhőv a déli nyár idején nincsen (Hale *et al.*, 2005). Az éjszakai oldalon főleg naptávolban jellemzők az alacsony szintű felhők, amelyek sűrűbbek nappali társaiknál, és a napfelkelte után gyakran széteszlanak, illetve magasabbra emelkednek.

A  $CO_2$ -felhők képződéséhez nagy magasságban van elég hideg. A felsőlégkörben 90–100 km környékén lehetnek ilyen ritkás felhők fagyott szén-dioxid kristá-

lyokból. Ezek kondenzációs magvaiként a magasba feljutott, kb. 100 mikrométeres porszemek szolgálhatnak. Az alacsony szintű szén-dioxid felhők vagy ködök a téli pólussapka felett főleg éjszaka jelentkeznek, és nem emelkednek 15 km-nél magasabban a felszín fölé.

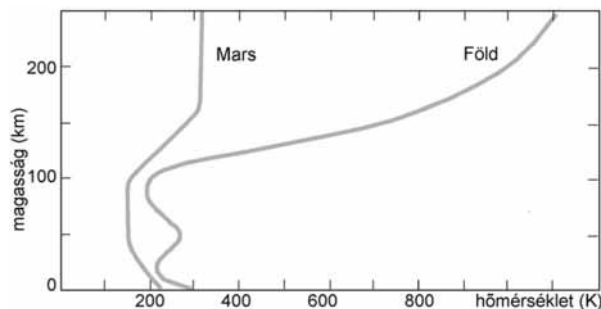
A Marson a csapadék főleg a felszíni albedó módosítása útján játszik szerepet az éghajlat alakításában. A kicsapódó  $H_2O$  világos fagytakarót formáz a téli féltekén, majd a tél előrehaladtával, a hőmérséklet további csökkenésével a  $CO_2$  is elkezd kicsapódni. A szén-dioxid kifagyása révén alakulnak ki a nagyságrendileg 100 km átmérőjű téli sarkvidéki hideg foltok az évszakos pólussapka területén, főleg a déli féltekén. A színeképek alapján finomszemcsés  $CO_2$  csapadék lehet az ilyen hideg foltokban.

Kevésbé erős külső tényező az árapály, amely esetében a Földnél elkülönítünk gravitációs eredetű, és főleg 80–100 km között a termoszférában érzékelhető besugárzásos eredetű napi széljárást. A Marsnál ezek mértéke nem ismert pontosan, de a kis légköri sűrűség miatt feltételezhető, hogy jobban érezhetőek a következményei, mint a Földnél – azonban nagytömegű hold hiányában a gravitációs eredetű komponens gyengébb lehet. Szintén külső, de alárendelt tényező a kozmikus por. Bár a Mars közelebb van a törmelékekkel teli kisbolygóövhöz, egyelőre nincs kimutatható alapja, hogy a két égitest között jelentős eltérést lenne a világűrbeli behulló por mennyiségében.

A légköri folyamatok **változékonyságát** illetően fontos, hogy a felszíni anyagok és a légkör hőkapacitása is lényegesen kisebb a földinél, emellett alacsonyabb a felszíni gázsűrűség. A ma jellemző ritka légkör és száraz felszín élénken reagál a változásokra. Míg a Föld éghajlatának stabilizálásában kulcsszerepet játszik a világtenger nagy hőkapacitása, a mechanikai tehetetlensége, és a keskeny áramlások hőszállítása, a Marsnál nincs hasonló. A bolygó életének nagy részében nem volt kiterjedt felszíni vízborítása (Kereszturi, 2006). Amikor viszont a feltételezett ősi északi óceán létezett, az erősen befolyásolhatta a klímát.

### Általános légkörzés

A bolygó általános légkörzésében hasonlít a Földre, az eltérő felszíni hőmérsékletű és nyomású területek felett nagyléptéken vizsgálva **Hadley-cellák** vannak, amelyek alacsony szélességen keleties passzát szeleket okoznak a felszínen. A cellák felszálló ága a termikus egyenlítővel együtt vándorol. A Marson télen feltehetőleg a polárfront térségében ciklonális és anticiklonális légörvények figyelhetők meg (de nyáron eddig nem sikerült azonosítani ilyeneket), emellett jellemzők a topografikusan generált állóhullámok. A légkör függőleges hőmérsékleteloszlása a 3. ábrán látható.



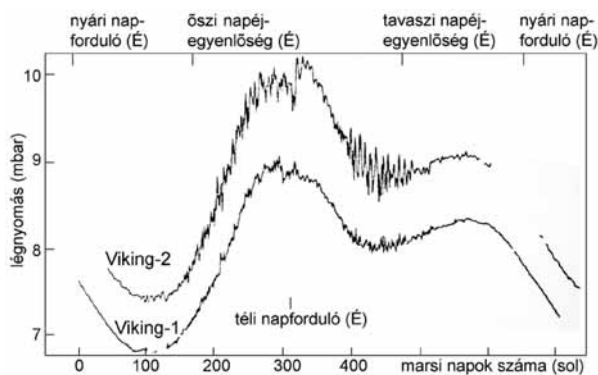
3. ábra. A hőmérséklet függőleges változása a Marson és a Földön, nappali időszakban

A marsi légkörnek a földinél kisebb a **hőkapacitása** és a **hőtehetetlensége**, emiatt nagyobb a mobilitása. Utóbbit tovább fokozza, hogy a felszín szintén kisebb hőtehetetlenségű a földinél, mivel nincsenek rajta óceánok, emellett hővezető képessége is kicsi. A földi körülményekhez viszonyítva a termikus egyenlítő helyzete erősebb kitéréseket mutat a Marson. A ritka légkör élénken reagál a hatásokra, a földinél rövidebb az igazodási ideje, az az időtartam, amíg egy új éghajlati állapot stabilizálódhat. Tehát "gyenge az atmoszféra áramlási rendszerének memóriája", rövid idő alatt is erős változások történhetnek.

Szintén a kisebb hőkapacitással és a mobilis légkörrel kapcsolatosak a **lejtőszelek**, amelyek erősebbek lehetnek, mint a Földön. Az eddig készült megfigyelések és modellek alapján a Marson a nappal felfelé, az éjjel lefelé fújó lejtőszelek sebessége néhol a 100 km/h-t is elérheti. Ezeknek fontos szerepe lehet a pólussapkánál, amelyek tereplépcsőt alkotó pereméről könnyen "lefolyik" a hideg levegő.

Részben a kis hőtehetetlenséggel összefüggésben jelentkeznek erős **szelek a terminátornál**, amelyek a hidegebb és sűrűbb gázt tartalmazó éjszakai féltekéről fújnak a melegebb és ritkább nappali oldal felé. A földinél ritkább légkörnek gyengébb üvegházhatása és kisebb tömege miatt a területi hőmérséklet különbségek, és az adott helyen mérhető hőingás nagyobb a földinél. A légkör mennyisége is évszakos periódussal változik: közelítőleg max. 25%-a (!) kicsapódik a téli félteke pólussapkájára. Ettől erős évszakos légnyomásingadozás (4. ábra) és hozzá kapcsolódó gázáramlás jelentkezik, amely a nyáritól a téli félteke felé tart. Mivel a déli félteke tele hidegebb, ekkor több széndioxid fagy ki, és ezért a déli tél idején alacsonyabb a légnyomás, mint az északi tél alatt.

A fenti extrémítások miatt a Hadley-cirkuláció erős évszakos változásokat mutat. Jelenleg úgy fest, hogy napfordulókor egyetlen Hadley-cella létezik kb. 40 fokos szélességek között, és egy lényegesen kisebb, cella jellegű szerkezet talán a téli pólus felett. Az északi és a déli napfordulókor mutatózó Hadley-cella sem egyforma. A déli nyár idején megfigyelhető lényegesen erősebb, részben az erősebb besugárzás miatt, részben



4. ábra. Nyomásgörbe a Viking-1 és 2 felszíni megfigyelései alapján egy marsi év alatt

mert ekkor gyakrabban van porvihar, amely fokozza a cirkulációt. Napégyenlőség környékén két Hadley-cella van, és gyengébb a Hadley-cirkuláció, mint az egyetlen cella idején. Ciklon-anticiklon rendszerek télen, a közepes szélességeken lehet megfigyelni, ezek nyárra teljesen eltűnnek.

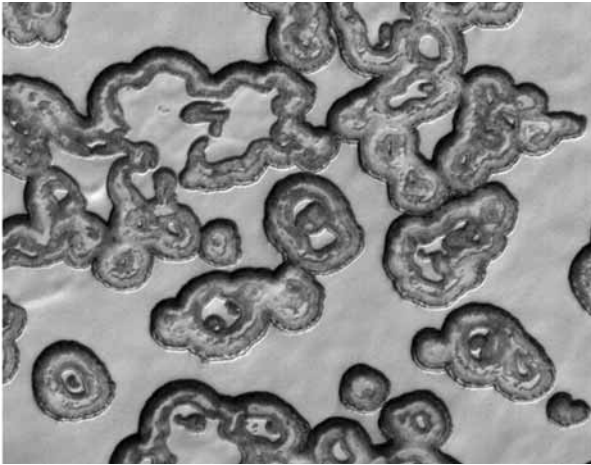
### Légköri körfolyamatok

A Marson a légköri körfolyamatok közül legfontosabb a  $\text{CO}_2$ -, a  $\text{H}_2\text{O}$ - és a porciklus. A  $\text{CO}_2$ -ciklus élénkségének oka, hogy a szilárd/gáznemű halmazállapot határa a mai, változékony légköri viszonyok közelében van. Ezért ősszel és télen a légkör egy része kicsapódik az adott félteke sarkvidékére, évszakos pólussapkát alkotva, tavasszal pedig visszaszublimál a légkörbe (Titus *et al.*, 2001). Ezzel a légnyomást, az áramlásokat, valamint a látens hő elnyelésével (szublimációkor), és kibocsátásával (kondenzációkor) a légköri hőmérsékletet befolyásolja. A ciklus lépéseinek intenzitása erősen függ a kifagyott  $\text{CO}_2$  albedójától, szemcseméretétől.

A  **$\text{H}_2\text{O}$ -ciklusban** lényegesen kevesebb  $\text{H}_2\text{O}$  részt, mint a Földön, a légkörben egyszerre 1–2  $\text{km}^3$   $\text{H}_2\text{O}$  lehet. Az évszakosan mobilis, tehát a légkörben hol növekvő, hol meg csökkenő  $\text{H}_2\text{O}$ -mennyiség főleg az állandó pólussapkából származik. A légköri koncentráció éves ingadozása nagy, a maximális koncentráció közel egy nagyságrenddel haladja meg a minimálisat. A maximális érték naptávolban jelentkezik, mivel akkor van nyár az északi féltekén, ahol nagyobb a pólussapka és mobilisabb a vízjég tartalma. A déli nyáron kisebb a légköri vízgőzkoncentráció, főleg mert a déli sapka nagy részét állandó széndioxid fedőréteg borítja, maga alá rejtve a vízjeget (5. ábra). Emellett a déli sapka világosabb is, és ezért az erősebb besugárzás ellenére sem melegszik fel annyira, mint északi párja.

Az északi nyár idején a  $\text{H}_2\text{O}$  a déli féltekén növekvő évszakos sapkára fagy ki. Onnan a déli nyár idején szublimál vissza a légkörbe, és rakódik le északon. Utóbbi időszakban intenzívebb az áramlás (Richardson, Wilson, 2000), és a modellek alapján a mai éghajlaton

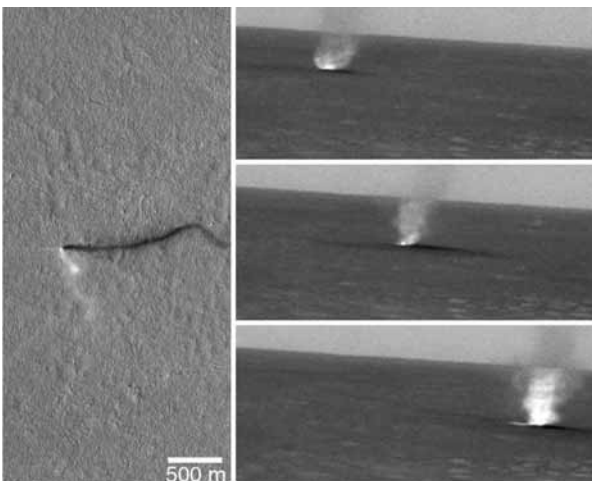




5. ábra. A déli pólussapka 2 km átmérőjű részlete a helyi nyár idején. A mélyedések alján a vízjég sapka anyaga látható, amely a vízszintesen évente kb. 3 méternyit hátráló szén-dioxid jég alól bukkan elő (MGS, MSSS, NASA, JPL).

egy kiterjedt déli, szabad felszínű vízjég sapka gyorsan az északi sarki vidékre vándorolna (Houben *et al.*, 1997). Az évszakos melegedéssel párhuzamosan nem csak az adott félteke pólussapkája felett nő a légköri vízgőztartalom, hanem az egyenlítőn vidékén is, ez a regolitban lévő H<sub>2</sub>O-forrásra utal.

A légköri **porciklus** jelentőségét a földi H<sub>2</sub>O-hoz hasonlíthatjuk. Az aeroszolok a Földhöz hasonlóan segítik a légköri nukleációt, és sugárzáselnyelőként szolgálnak, melegítve az atmoszférát, csökkentve a függőleges hőmérsékleti gradienst. Leglátványosabb megjelenési formáik a különböző méretű porviharok. A legkisebb ilyen képződmények: a tölcser alakú porördögök (6. ábra), amelyek a nyári félévben, főleg a helyi 14–15 óra körül mutatkoznak. Nagy porviharok napközeli környékén jellemzők, a legnagyobbak 1–2 hónappal napközelpont



6. ábra. Egy porördög képe (balra) marskörüli pályáról, ahol a fehér szín a napsütötte por alkotta oszlopot, a jobbra húzódnó sötét sáv pedig annak árnyékát mutatja 2001. április 10-én. Jobbra egy másik porördög képei láthatók, amelyet a Spirit rover 2005. március 10-én déltájban fotózott le a felszínen (MGS, MSSS, NASA, JPL).

után. Globális porviharok csak ekkor vannak, de nem feltétlenül minden marsi évben.

Egy globális porvihar egyharmad marsi éven keresztül is tarthat. Általában déli közepes szélességű területekről indulnak ki, a helyi nyár derekán. Először főleg K–Ny-i irányban növekszenek, globálissá viszonylag gyorsan, feltehetőleg egy kritikus határ átlépése után válnak. A vihar legerősebb tomboláskor a por 60 km-es magasságig is feljut. Egy globális porvihar után néhány héttel vagy hónappal tisztul le a légkör nagyjából a korábbi szintre.

A porviharok számos következménnyel járnak: Globális és regionális porviharok a légkör 40–50 km alatti régióját 1–2 nap alatt 5–30 fokkal melegíthetik. Nagy porviharok alatt a légkör közel izotermikus lehet akár 50 km-ig. A légköri por felerősíti a Hadley-cirkulációt, és egy porvihar a légkör felfűtésével meg is könnyíti a következő porvihar kitörését. Bár a porelvándorlás és -lerakódás csak mikrométeres réteget érint, mégis erősen befolyásolja az albedót és ezzel a felszín melegedését. A porviharok révén globálisan évente mikrométeres nagyságrendű portakaró anyaga változtat helyet. Ebből több rakódhat le északon, mert a szemcsékre ott a viharok idején CO<sub>2</sub> csapódhat ki, hiszen ekkor van helyi tél. A marsi porviharok feltehetőleg azért nőhetnek sokkal nagyobbra a földiekénél, mert a bolygót borító globális sivatag kiterjedt porforrásként szolgál, emellett a ritka marsi légkör élénken reagál a változásokra.

### Évszakos jelenségek

A marsi évszakok fő kialakító oka a tengelyferdeség, de emellett a jelenségben a földinél erősebben beleszól az elnyúlt pálya miatt változó naptávolság is. Ettől a déli nyár rövidebb és melegebb, a déli tél hosszabb és hidegebb, mint északi megfelelőik. Alapvető különbségek mutatkoznak még a légköri H<sub>2</sub>O-tartalomban, a porviharok eloszlásában, és a szelek jellemzőiben is a két félteke évszakai között.

Az évszakokat a két féltekén párhuzamosan, az **északi nyártól** kiindulva mutatjuk be. Amikor nyár van az északi féltekén, a Mars naptávolban jár, ahol lassabb a pályamenti keringési sebessége. A nagyobb távolság miatt ekkor gyengébb a besugárzás, mint napközelpont (a déli nyár idején), és a lassabb keringés miatt tovább is tart az északi nyár, mint déli párja. Ekkor tehát északon hosszú és enyhe nyár jellemző, a d.sz. 10 és az é.sz. 30 foka között húzódnó trópusi felhőövvel. Az északi pólussapka ekkor éri el minimális kiterjedését, a légköri vízgőztartalom pedig a róla szublimáló H<sub>2</sub>O miatt a maximális koncentrációját. Ugyanekkor a déli pólussapka növekszik, ahol sarki köd és rendkívüli hideg jellemző.

Ahogy a bolygó pályáján továbbhaladva közelít a

Naphoz, csökken az északi és nő a déli féltekére jutó besugárzás, a termikus egyenlítő dél felé tolódik. A csökkenő naptávolság révén gyorsan melegszik az idő, ezért a déli, kiterjedt évszakos pólussapka sebesen zsugorodik. A sapka elszublimáló anyaga nyomán a sötétebb felszín a napsugaraktól gyorsan melegszik. A sapka határa mellett ezért jelentős hőmérséklet különbségek alakulnak ki – ezzel kapcsolatban pedig erős szelek és helyi porviharok támadnak. Egyes marsi években a legnagyobb porviharok globális méretűvé növekszenek. A **déli nyár** napközben következik be, ahol a Mars gyorsabban kering, ezért itt a nyár viszonylag rövid és meleg. Ugyanakkor az északi pólussapka halmozódik, amelyre a kifagyó H<sub>2</sub>O-val együtt sok por is lerakódik.

### Visszacsatolási mechanizmusok

A **jég – albedó – hőmérséklet** hurok keretében összetett kölcsönhatások zajlanak, amelyeknek csak néhány vonatkozását vázoljuk. Ha valamilyen okból a felszínen a vízjég borítás terjedni kezd, csökkentheti a légkörbe kerülő por mennyiségét, amely nem rakódik a fagyra, és így nem csökkenti annak albedóját. Ez a felszín albedójának növekedése és a hőmérséklet esése, valamint a légkörzés gyengülése felé hat. Ugyanakkor, ha valahol kiterjedt fagyborítás keletkezik, a légkörzés hosszú idő alatt a szublimáció révén elszállíthatja onnan a vízjeget. Erre a jelen éghajlati viszonyok közepette alacsony szélességről magasabb szélesség felé kerül sor. Ettől alacsony szélességen csökken az albedó, jobban felmelegszik a felszín, és több por kerülhet az atmoszférába, elősegítve annak is a melegedését. Ha pedig a pólussapkára rakódó por miatt, az a lecsökkenő albedótól a sapka elszublimál, akkor sapka nélküli meleg időszak is beköszönhet. A melegebb klímán erősödik a H<sub>2</sub>O-cirkuláció, amitől kiterjedhet a vízjég, főleg ha ezt a pályaelemváltozások miatt csökkenő besugárzás is támogatja. Ekkor ismét a légkör nagyobb része kifagyhat, "légkörösszeomlás" következhet be.

Mindezek a tengelyferdeség változásaival kapcsolódhatnak össze, amely külső éghajlati kényszerként hat. A változások során lezajló jelenségeket erősen befolyásolhatja a rendszerben lévő CO<sub>2</sub> mennyisége. A bolygó gyenge gravitációs tere, a mágneses tér hiányában a légkört erodáló napszél, és a fokozatosan gyengülő vulkáni aktivitás miatt a légkör tömege és üveg-házhatása a bolygó fejlődés során, hosszú időskálán csökkent. A modellek szerint amikor a csökkenő hőmérséklet nyomán a jégsapka egyszer kialakul, erős visszacsatolás révén gyorsan növekedhet, míg végül a légkör jelentős részben "összeomlik", és létrejön a mai, ritka atmoszférájú állapot (Haberle et al., 1994.).

A **felhőzet – hőmérséklet** hurok szintén fontos tényező lehet, de jellemzői alig ismertek. Ennek oka, hogy a felhőzet az albedó növelésével csökkenti a fel-

színre jutó sugárzást és így hűlést okoz – ugyanakkor vissza is veri a (marsi) teresztrikus sugárzás egy részét, és ezzel melegedést okoz. A jelenséget még összetettebbé teszi, hogy a felhők ezen jellemzői erősen függenek az őket alkotó aeroszolak szemcseméretétől.

**Kereszturi Ákos**  
geológus

### Hivatkozások

- Bartholy, J., 1999: Az éghajlat, mint rendszer, globális klímaváltozások. (fejezet a Humánökológia: A természetvédelem, a környezetvédelem és az embervédelem tudományos alapjai című könyvben. Szerk.: Nánási Irén.) Medicina Kiadó, 177-203.
- Clancy, R.T., Grossman, A. W., Wolff, M. J., James, P. B., Rudy, D. J., Billawala, Y. N., Sandor, B. J., Lee, S. W., Muhleman, D. O. 1996: Water vapor saturation at low altitudes around Mars aphelion: A key to Mars climate? *Icarus*, 122, 36-62.
- Haberle, R.M., Tzler, D., McKay, C. P., Davis, W. L. 1994: A model for the evolution of CO<sub>2</sub> on Mars, *Icarus*, 109, 102-120.
- Hale, A. S., Tamppari, L. K., Christensen, P. R., Smith, M. D., Bass, D., Qu, Z., Pearl, J. C. 2005: Water Ice Clouds in the Martian Atmosphere: A View from MGS TES, 36th Lunar and Planetary Science Conference #1083.
- Hargitai H. és Nemerkenyi Zs. 2007: A Mars térképe. in: Földgömb, 2007/1. Heiling Média Kft., Budapest.
- Houben, H., Haberle R. M., Young, R. E., Zent A. P. 1997: Evolution of the Martian water cycle, *Adv. Space Res.*, 19, 1233-1236.
- Kereszturi A. 2006: Fejezetek a Mars fejlődéstörténetéből, *Magyar Tudomány*, 946. 946-954.
- Richardson, M. I., Wilson, R. J. 2000: Control of the Martian water cycle by the northern polar ice cap, 2nd Mars Polar Science Conference #4093.
- Titus T., Kieffer, H. H., Mullins, K. F., Christensen, P. R. 2001: TES premapping data: Slab ice and snow flurries in the Martian north polar night. *Journal of Geophysical Research*, 106, 23181-23196.

\* \* \*