

**Bottyán Zsolt**  
[bottyán.zsolt@zmne.hu](mailto:bottyán.zsolt@zmne.hu)

## LÉGKÖRI ÜVEGHÁZHATÁS A KÖZETBOLYGÓKON

### *Absztrakt*

*A Naprendszer kőzetbolygóinak átlaghőmérsékletét légkör nélküli esetben, a napállandó és a planetáris albedó alakítja. A légkörrel rendelkező planeták esetében a számított egyensúlyi hőmérséklet azonban alacsonyabb, mint a tényleges átlaghőmérséklet, amit az ún. üvegházhatású gázok infravörös tartományon történő elnyelése okoz. Az így kialakuló üvegházhatás a Vénuszon rendkívül nagy, a Földön és a Marson jelentős mértékű átlaghőmérséklet-emelkedést okoz, a légkör nélküli esethez viszonyítva. A vénuszi igen magas felszíni hőmérsékletért az ún. megfutó üvegházhatás, a marsi alacsony intenzitású üvegházhatásért pedig a megszűnt vulkanizmus eredményeképpen eltűnt légkör a felelős.*

*The mean planetary temperature of Earth-like planets in our Solar System basically depend on both solar constant and planetary albedo, too if they have not any atmosphere. The calculated effective radiating temperature is lower than the real mean global temperature on these planets where there is a significant atmosphere around them. This phenomenon so called greenhouse effect based on the strong infrared absorption of some gases like H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and others. The mentioned greenhouse effect is very strong on the Venus and also significant on the Earth and Mars. The very high temperature on the Venus is based on its runaway greenhouse effect and the weaker martian greenhouse effect can be derived from volcanism had been finished a long time ago.*

**Kulcsszavak:** *üvegházhatás, kőzetbolygók, planetáris energia-egyenleg, egyensúlyi hőmérséklet ~ greenhouse effect, Earth-like planets, planetary energy balance, effective radiating temperature*

### **Bevezetés**

Napjainkban igen gyakran hallunk a globális felmelegedéstről, mint az általános éghajlat-változás talán legmarkánsabb tényezőjéről. A globális átlaghőmérséklet mintegy 0,74 °C-os növekedése az elmúlt 150 évben Földünkön tetten érhető (*IPCC jelentés, 2007*). A globális felmelegedés legfőbb oka az emberi tevékenység során a Föld légkörébe juttatott és ott ún. üvegházhatást kifejtő gázok feldúsulása. Jelen munkánkban magával a természetes (nem

antropogén eredetű) légköri üvegházhatással, mint univerzális jelenséggel és ennek éghajlat-módosító hatásával foglalkozunk a Naprendszer kőzetbolygóit illetően.

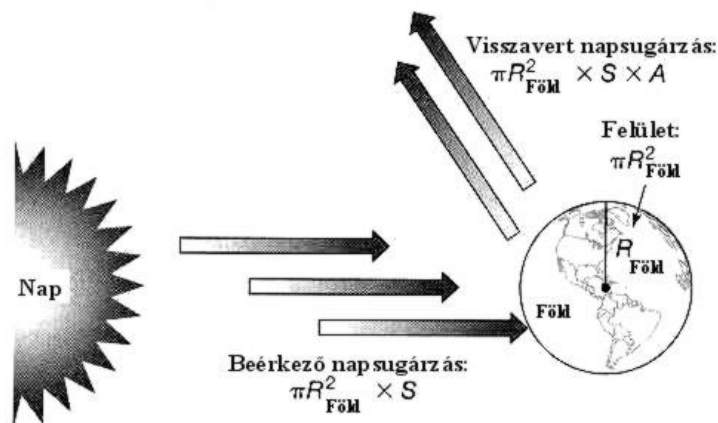
A természetes légköri üvegházhatás bolygónkon - egy rendkívül összetett folyamat részeként – a földtörténet során biztosította az élet kialakulásának és fennmaradásának a klimatikus feltételeit (elsősorban a globális átlaghőmérséklet szabályozásán keresztül). Ez a fontos moderáló hatás a Földön, a szén geokémiai körforgásának köszönhetően jelent meg és ez a folyamat a mai napig hatással van a légköri szén-dioxid koncentrációjára is (*Lunine, 1999*). A többi kőzetbolygó esetében ez a folyamat, ha be is indult, valamilyen oknál fogva megállt, így – ahogy majd látjuk – a többi planétán jelenleg rendkívül szélsőséges éghajlat uralkodik (*Kasting, 1988*). Hogy mennyire fontos a légköri üvegházhatás, azt egyetlen példán keresztül illusztrálhatjuk: amennyiben nem működne bolygónk légkörében ez a folyamat a jelenlegi +15 °C helyett -18 °C lenne a globális átlaghőmérséklet, ami bizonyosan a magasabb rendű élet végét jelentené a Földön, egy intenzív jégkorszak kialakulása következményeként!

Az üvegházhatás tehát szükséges ahhoz, hogy éghajlatunk megfelelő korlátok között maradjon. Ugyanakkor az elmúlt mintegy 150 év éghajlatának története azt is jelzi, hogy az ember képes drasztikusan beavatkozni ezekben a – tőle függetlenül is működő – folyamatokba, ugyanakkor a hatásaival kevésbé van tisztában! Ennek az antropogén hatásnak (jelen esetben az üvegházhatást előidéző gázok szinte korlátok nélküli légkörbe bocsátása) eredménye a globális felmelegedés, aminek rendkívül komoly következményeivel még csak ezután kell igazából szembe néznünk.

### Planetáris energia-egyensúly

Egy *légkör nélküli bolygó* esetében a felszín hőmérsékletének alakulását fizikai értelemben két tényező szabja meg: a naptól érkező *besugárzás teljesítménye* és a felszín *fényvisszaverő képessége* (albedó). Amennyiben feltételezzük, hogy a bolygó éghajlata „nyugalomban van” azaz fennáll a *kvázi-sztatikus állapot*, akkor a naptól beérkező rövidhullámú és a bolygó által kisugárzott hosszuhullámú energiák egyensúlyban vannak (*Kump et al., 2002*). A valóság nem pontosan ezt mutatja, hiszen ha így lett volna, akkor a Föld átlagos felszíni hőmérséklete a földtörténet során végig állandó marad. Természetesen ez nem volt mindig így, de igen rövid időskálán jó közelítéssel fennáll a kvázi-sztatikus helyzet. A két említett hőmérséklet-alakító hatás eredőjeként definiálható egy ún. *egyensúlyi hőmérséklet* ( $T_e$ ) mely a bolygó átlaghőmérsékletét, mint sugárzási egyensúlyi hőmérsékletet reprezentálja. Ez a hőmérséklet jó közelítéssel a légkör nélküli esetben a tényleges átlaghőmérséklettel egyezik meg.

A planetáris energia-egyensúlyi egyenlet meghatározása nem túl bonyolult, de előzetesen néhány geometriai ténytet figyelembe kell venni hozzá. A következőkben a Nap – Föld rendszert vizsgáljuk, de ugyanígy járhatunk el tetszőleges bolygó esetében is (*Kump et al., 2002*).



**1. ábra.** A beérkező és a visszavert napsugárzás mennyisége a Föld esetén (*Kump et al., 2002 után módosítva*)

Ha a Földet úgy tekintjük, mint fekete test, melynek egyensúlyi hőmérséklete  $T_e$ , akkor a *Stefan – Boltzmann-törvény* alapján az egységnyi felületről kisugárzott energia  $\sigma T_e^4$ -vel lesz egyenlő, ahol  $\sigma$  az ún. Stefan – Boltzmann állandó ( $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$ ). Mivel a Föld a teljes felületéről bocsátja ki az energiát, amely a  $4\pi R_{\text{Föld}}^2$  nagyságú gömbfelszínnel egyezik meg, ahol  $R_{\text{Föld}}$  a bolygó sugara, így a Föld által kibocsátott teljes energia mennyisége (*1. ábra*):

$$E_{\text{kibocsát}} = 4\pi R_{\text{Föld}}^2 \cdot \sigma T_e^4$$

Bolygó	Közepes naptáv. (CSE)	Napállandó ( $\text{W/m}^2$ )
Merkúr	0,39	9007
Vénusz	0,72	2643
Föld	1,00	1370
Mars	1,50	609

**1. táblázat.** A Naprendszer közetbolygóinak közepes naptávolsága (CSE, csillagászati egység) és a hozzájuk tartozó napállandók értékei

Egy bolygóra a Naptól érkező rövidhullámú elektromágneses sugárzás teljesítményét egyrészt magának a központi csillagnak a teljesítménye, másrészt a bolygó naptávolsága szabja meg. Tekintve, hogy *Kepler törvénye* értelmében a bolygók naptávolsága változik, célszerű bevezetni az ún. **napállandó** ( $S$ ) fogalmát, mely a légkör külső határán, közepes naptávolság esetén, időegység alatt, egységnyi felületre merőlegesen beeső energiát jelenti. A napállandó értéke a Föld esetében ( $S_0$ )  $1370 \text{ Wm}^{-2}$ . A Naprendszer közetbolygóinak távolságát ismerve, könnyen meghatározhatjuk mindegyik esetben a helyi napállandó értékét, ha figyelembe vesszük a *sugárzási energia változásának távolság-törvényét* (*1. táblázat*).

A Nap irányából nézve a Föld egy körnek látszik, melynek a sugara  $R_{\text{Föld}}$  és felszíne  $\pi R_{\text{Föld}}^2$ . Jegyezzük meg, hogy a sugárzást felfogó felszín nem azonos a teljes felszín felével,

mert a napsugarak nem esnek mindenhol merőlegesen bolygónk adott felületére. A teljes felfogott energiát a Föld kör keresztmetszetének ( $\pi R_{\text{Föld}}^2$ ) és a napállandónak ( $S_0$ ) a szorzata adja. A visszavert energia egyenlő a beérkező energia ( $\pi R_{\text{Föld}}^2 S$ ) és az albedó ( $A$ ) szorzatával. Ha most figyelembe vesszük a nyilvánvaló összefüggést:

$$\boxed{E_{\text{elnyelt}} = E_{\text{beérkező}} - E_{\text{visszavert}}}$$

akkor azt kapjuk, hogy

$$E_{\text{elnyelt}} = \pi \cdot R_{\text{Föld}}^2 \cdot S_0 - \pi \cdot R_{\text{Föld}}^2 \cdot S_0 \cdot A = \pi \cdot R_{\text{Föld}}^2 \cdot S_0 \cdot (1 - A)$$

Tegyük egyenlővé ezek után a beérkező és a kimenő energia-mennyiségeket (az előzőek alapján ezek megegyeznek)! Ekkor a következő egyenlőség adódik:

$$E = 4 \cdot \pi \cdot R_{\text{Föld}}^2 \cdot \sigma \cdot T_e^4 = \pi \cdot R_{\text{Föld}}^2 \cdot S_0 \cdot (1 - A)$$

Egyszerűsítve a fenti egyenletet, megkapjuk az ún. **planetáris energia-egyenleg egyenletét**:

$$\sigma \cdot T_e^4 = \frac{S_0}{4} \cdot (1 - A).$$

Ez a formula mutatja a planetáris energia-egyensúlyt a beérkező rövidhullámú és a kimenő infravörös energia között a Földre vonatkozóan.

### Az egyensúlyi hőmérséklet

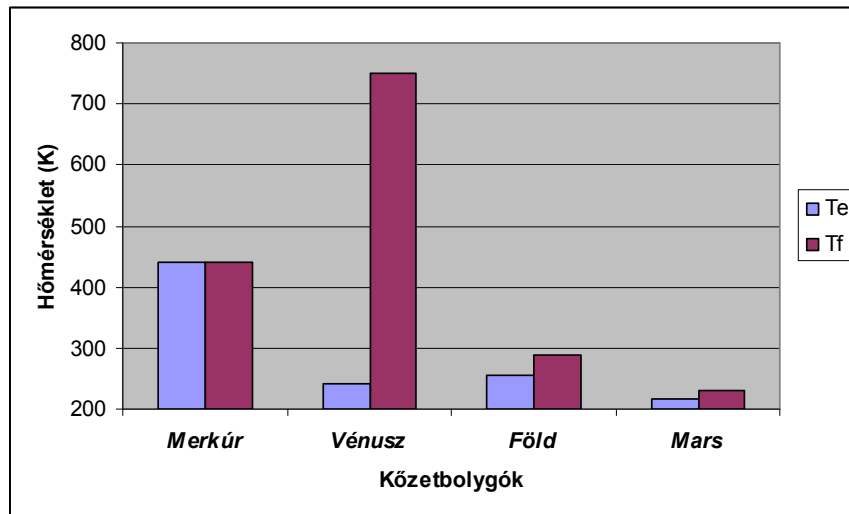
A planetáris energia-egyenleg egyenletét megismerve lehetőség nyílik arra, hogy kiszámítsuk egy bolygó egyensúlyi hőmérsékletét, ha ismerjük a bolygóra vonatkozó globális albedót és napállandót. Az egyensúlyi hőmérséklet számítása a planetáris energia-egyenleg egyenletéből a következő formulával történik:

$$T_e = \sqrt[4]{\frac{S_0 \cdot (1 - A)}{4 \cdot \sigma}}$$

Amennyiben a Föld megfelelő adatait behelyettesítjük ( $S_0 = 1370 \text{ W/m}^2$ ,  $A = 0,3$ ), akkor azt kapjuk, hogy bolygónk egyensúlyi hőmérséklete  $T_e = 255 \text{ K}$  azaz  $-18 \text{ °C}$ , ami jóval hidegebb, mint a valóságban tapasztalt  $+15 \text{ °C}$ -os érték. Ahogy korábban jeleztük, légkör nélküli objektum esetében (pl. Merkúr vagy Hold) az egyensúlyi hőmérséklet jó közelítéssel a tényleges felszíni átlaghőmérsékletet adja meg.

Joggal merül fel a kérdés, vajon mi okozhatja ezt a jelentős átlaghőmérséklet különbséget? Tételezzük fel, hogy a napsugárzáson kívül más külső forrásból nem jut energiához a Föld! Ebben az esetben a többlet-energiának a forrása (ami a  $33 \text{ °C}$ -os hőmérsékleti különbséget okozza), csak a Föld légkörének rendszere lehet, hiszen bolygónk szilárd belsejének hőtermelése (ami alapvetően radioaktív bomlásból és a Föld keletkezésekor képződött hőenergia maradványából származik) rendkívül csekély mértékű a napenergiához képest (*Lunine, 1999*). Erősíti ezt a feltevést az a tény is, miszerint a Naprendszer légkörrel

rendelkező kőzetbolygóinak (Vénusz, Föld és Mars) felszíni átlaghőmérséklete minden esetben **magasabb** az adott planéta egyensúlyi hőmérsékleténél (2. ábra).



2. ábra. A kőzetbolygók egyensúlyi ( $T_e$ ) és tényleges felszíni átlaghőmérséklete ( $T_f$ )

A többlet-energia forrása nem lehet más, mint a légkörben lévő összetevők sugárzás-elnyelése, ami viszont – figyelembe véve az elektromágneses spektrumot – csakis az **infravörös tartományban** valósulhat meg, hiszen a látható tartományban nagyrészt transzparens a légkör. Az atmoszféra bizonyos összetevői tehát erős elnyeléssel (abszorpció) és – *Kirchoff törvénye* szerint – kibocsátással (emisszió) rendelkeznek az infravörös tartományban. Ez azt jelenti, hogy a bolygó felszíni hőmérsékletéből származó termikus sugárzását (*Stefan – Boltzmann törvény*) a légkörben levő gázok egy csoportja elnyeli és egy részét a felszín felé visszasugározza. Ezt a mechanizmust nevezzük **légköri üvegházhatásnak**. Elmondhatjuk tehát, hogy az üvegházhatást produkáló gázok lényegében csapdába ejtik a bolygó felszínéről emittált energia jelentős hányadát (ami egyébként a világűrbe távozna), majd ennek egy részét a felszín felé visszasugározzák, többlet energia-bevételhez juttatva a bolygó felszínét.

Az eddig leírtak alapján feltételeztük, hogy a rövidhullámú tartományon nincs jelentős sugárzásgyengítése a légkörnek, szemben az infravörös tartományban tapasztalt elnyeléssel. Ez jó közelítéssel így is van, bár az ózon és egyéb gázok (oxigén, nitrogén) abszorbeálják a nagyenergiájú fotonokat (0,29  $\mu\text{m}$  alatti tartomány) teljes egészében. A napsugárzás teljes energiaspektrumát (*Planck törvény*) figyelembe véve azonban az említett hullámhossz-tartományban a naptól érkező energiának csak lényegesen kisebb része érkezik bolygónkra, mint a 0,29  $\mu\text{m}$ -nél nagyobb hullámhosszokon (*Péczeley, 1980*).

### Az üvegházhatás erőssége és jelenléte a bolygókon

Az eddig leírtakból következik, hogy az **üvegházhatás erőssége** ( $\Delta T_{\bar{u}}$ ) közvetlenül becsülhető az egyensúlyi és a tényleges felszíni hőmérséklet különbségével:

$$\Delta T_{\bar{u}} = T_f - T_e$$

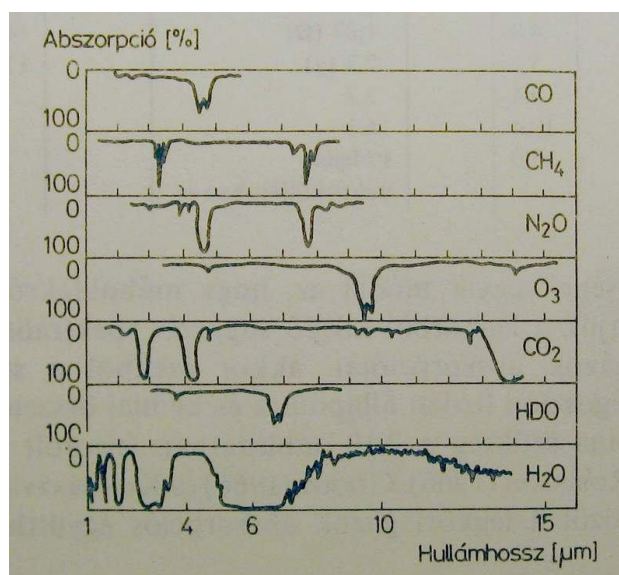
ahol  $\Delta T_{\bar{u}}$  az üvegházhatás erőssége,  $T_f$  a bolygó tényleges felszíni átlaghőmérséklete és  $T_e$  pedig a bolygó egyensúlyi hőmérséklete. Földünk esetén  $\Delta T_{\bar{u}} = 33 \text{ }^\circ\text{C}$ , tehát a légkör 33 fokkal

emeli bolygónk felszínének átlaghőmérsékletét. A 2. táblázatban a Naprendszer bolygóira vonatkozóan bemutatjuk az üvegházhatás erősségét. Jól látható, hogy a légkör nélküli **Merkúron** az üvegházhatás erőssége gyakorlatilag **nulla**, viszont a **Vénuszon** több, mint **500 Kelvinnel** melegebb van az üvegházhatás miatt. Még a Mars esetén is hozzávetőlegesen 13 Kelvinnel magasabban tartja a felszín hőmérsékletét a viszonylag ritka légkör (a földi levegő sűrűségének csak kevesebb, mint századrésze).

Bolygó	Táv.(CSE)	A	S (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>e</sub> (K)	T <sub>f</sub> (K)	ΔT <sub>ü</sub> (K)
Merkúr	0,39	0,06	9007,2	439,8	440	0,2
Vénusz	0,72	0,71	2642,7	242,1	750	507,9
Föld	1,00	0,30	1370,0	255,0	288	33,0
Mars	1,50	0,17	608,9	217,3	230	12,7

**2. táblázat.** A Naprendszer kőzetbolygóinak közepes naptávolsága (**Táv.**), átlagos planetáris albedója (**A**), napállandója (**S**), egyensúlyi hőmérséklete (**T<sub>e</sub>**), átlagos felszíni hőmérséklete (**T<sub>f</sub>**) és az üvegházhatás erőssége (**ΔT<sub>ü</sub>**).

Felmerül a kérdés, hogy a Föld belső szomszédjának (a Vénusznak) a felszíni hőmérséklete miért ilyen kiugróan magas (750 K ≈ 480 °C)? A 2. táblázatban észrevehető, hogy ez a magas hőmérséklet egy rendkívül intenzív üvegházhatás eredménye (ΔT<sub>ü</sub>=507,9 K)! A magyarázat a bolygó légkörének összetételében és sűrűségében rejlik (3. táblázat). A vénuszi atmoszférát kb. 96%-ban CO<sub>2</sub> alkotja és a felszínen a légnyomás mintegy 90-szer nagyobb, mint a Földön, amiből következik, hogy az említett bolygó légkörében a CO<sub>2</sub> koncentráció több nagyságrenddel nagyobb, mint a mi planetánkon! A CO<sub>2</sub> gáz ugyanakkor – hasonlóan néhány más gázhoz - igen jó elnyelő a korábban említett infravörös tartományban és így már érthető, miért ilyen erős az üvegházhatás a Vénuszon (3. ábra).



**3. ábra.** A gázok abszorpciója 1-16 μm között a földi légkörben (Bence et al., 1982.)

Összetevő	Vénusz	Mars
CO <sub>2</sub>	96,5%	95,3%
N <sub>2</sub>	3,5%	2,7%
SO <sub>2</sub>	≈100 ppm	
Ar	70 ppm	1,6%
CO	45 ppm	
H <sub>2</sub> O	45 ppm	

**3. táblázat.** A Vénusz és a Mars légkörének fontosabb összetevői és koncentrációjuk (McFadden et al., 2007)

A Föld esetében a *természetes* (nem antropogén) *üvegházhatást* döntően a légkörünkben lévő *vízgőz* (H<sub>2</sub>O), *szén-dioxid* (CO<sub>2</sub>) és *ózon* (O<sub>3</sub>) okozza (Bence et al., 1982). A vízgőznek és az ózonnak szintén jelentős sugárzás-elnyelése van az 1-15 µm-es tartományban (3. ábra). Vegyük figyelembe továbbá, hogy bolygónk termikus sugárzásának (ami a 288 K-es átlagos felszíni hőmérsékletéhez tartozik) maximális intenzitása a *Wien-féle törvény* alapján 10 µm-es hullámhossznál jelentkezik, ami szintén ebbe a tartományba esik! Meg kell említeni még két fontos természetes légköri összetevőt, a *metánt* (CH<sub>4</sub>) és a *dinitrogén-oxidot* (N<sub>2</sub>O), melyek szintén üvegházhatású gázok, de szerepük az elmúlt 150 évben, az antropogén kibocsátás megjelenésével vált igazán fontossá (3. ábra). Ugyanakkor, az említett gázoknak a légköri koncentrációja csekély (együttesen még a troposzférában is 4% alatt van), amiből világosan adódik, hogy a Vénuszhoz hasonló erősségű természetes üvegházhatást semmiképp nem várhatunk a Föld esetében!

A másik szomszédos bolygón (Mars) is azt tapasztalhatjuk, hogy az ottani – igaz rendkívül kis sűrűségű (átlagos felszíni nyomás 6,1 mb) – légkör domináns összetevője szintén a szén-dioxid (kb. 95%), mely ebben a csekély mennyiségben is jelentős üvegházhatást produkál. A marsi üvegházhatás erőssége közel 13 K (3. ábra)!

Felmerül a kérdés, hogy mi lehet az oka a vénuszi igen tekintélyes és a marsi rendkívül csekély mennyiségű szén-dioxid légköri jelenlétének? Ahogy korábban említettük, a szén geokémiai körforgásának a szerepe alapvető a szén-dioxid légköri koncentrációjának szabályozásában. Ez a mechanizmus bolygónkon, a lemeztectonikán és a hozzá kapcsolódó vulkanizmuson keresztül fejt ki hatását hosszú időskálán (10-100 millió év). A légköri szén-dioxid koncentrációja a jelzett időskálán a gáz kőzetekbe való beépülése és a vulkanizmus során történő légkörbe jutása közti különbség eredményeképpen alakul, mely bonyolult fizikai és kémiai folyamatokon keresztül realizálódik. Amennyiben a körforgás valamelyik ága megszakad, a légköri szén-dioxid koncentráció jelentősen megváltozik. Jelenlegi ismereteink szerint a Vénuszon a gáz kivonódása a légkörből megszakadt és a vulkanizmus eredményeképpen fokozatosan növekvő CO<sub>2</sub> szint miatt az ún. *megfutó üvegházhatás* (*runaway greenhouse effect*) jelenségét tapasztalhatjuk, a már említett magas felszíni hőmérséklettel (Kasting, 1988). A Mars esetében pedig a megszűnt vulkanizmus (tektonizmus) nem tudta a kőzetekben megkötött szén-dioxidot visszajuttatni a légkörbe ezért (és a relatíve gyenge gravitációja miatt) a marsi atmoszféra elvesztette légkörének és ezzel együtt üvegházhatásának jelentős részét is. A Merkúr esetében a napközelségből adódó nagy energiaáram és a bolygó kis tömegéből származó gyenge gravitáció nem tette lehetővé semmilyen légkör tartós fennmaradását.

Tekintve, hogy a szén-dioxid egy viszonylag gyakori vegyület az univerzumban, várható, hogy más bolygórendszerekben is előfordul gázneműként és ott üvegházhatást fejt ki. Ráadásul, a szén-dioxid  $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál magasabb hőmérsékleten (gáznemű halmazállapotban) is meglehetősen stabil vegyület, szemben pl. a vízgőzzel, mely elég könnyen disszociációt szenved az UV-B sugárzás hatására. (Földünkön, a sztratoszférában jelenlevő ózon rétege védi meg a vízgőzt a disszociációtól és egyben az atmoszférából történő végleges disszipációtól). Viszonylagos gyakoriságából és stabilitásából adódóan jelentős szerepet játszhat más bolygórendszerek planétáin kialakuló éghajlatok alakításában és stabilizálásában is.

Meg kell ugyanakkor jegyeznünk, hogy még messze nem ismerjük pontosan a bolygók esetében az átlaghőmérséklet alakító folyamatokat, valamint léteznek olyan jelenségek, amiket nem tudunk megmagyarázni az ismertett üvegházhatás elmélettel. További kutatásokra van szükség a bolygók légkörének hőmérséklet alakításában betöltött szerepét illetően.

## Összefoglalás

Egy adott bolygó esetén a rövidhullámú besugárzás és a hosszuhullámú kisugárzás egyensúlyban van (planetáris energia-egyensúly). A Naprendszer bolygóinak (légkör nélküli esetben) a felszíni globális átlaghőmérsékletét - az adott helyen - a napállandó és a planetáris albedó szabja meg. Az így számított ún. egyensúlyi hőmérséklet – minden légkörrel rendelkező bolygó esetén – alacsonyabb, mint a tényleges (mért) felszíni átlaghőmérséklet. A két hőmérséklet különbségének oka a légkörben lévő – infravörös tartományon elnyelni képes – speciális tulajdonságú gázok jelenléte (szén-dioxid, vízgőz, ózon stb.). A légköri gázok által, az infravörös tartományon történő elnyelés utáni visszasugárzás az ún. üvegházhatás, mely energia-többletet jelent a bolygó számára a légkör nélküli esethez viszonyítva. Az említett hőmérséklet különbség egyben az üvegházhatás mértéke is. A kőzetbolygók esetében a Merkúron nincs, a Földön és a Marson jelentős, míg a Vénuszon rendkívül intenzív az üvegházhatás mechanizmusa, amelynek erőssége az adott bolygó légkörének sűrűségétől és az ún. üvegházhatású gázok (elsősorban a szén-dioxid) koncentrációjától függ. A vénuszi igen magas felszíni hőmérsékletért az ún. megfutó üvegházhatás, a marsi alacsony intenzitású üvegházhatásért pedig a megszűnt vulkanizmus eredményeképpen eltűnt légkör a felelős.

## Irodalom

Bencze, P., Major, Gy., Mészáros E. (1982): Fizikai Meteorológia. Akadémiai Kiadó, Budapest, 300 pp.

IPCC (2007): Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület negyedik értékelő jelentése. Természettudományos alapok. <http://www.ipcc.ch/pdf/reports-nonUN-translations/hungarian/ar4-spm.pdf>

Kasting, J., F. (1988): Runaway and Moist Greenhouse Atmospheres and the Evolution of Earth and Venus Icarus 74. 472-494

Kump, L., R., Kasting J., F., Crane, R., G. (2002): The Earth system with global change update. Prentice Hall, Pearson Custom Publishing, Boston, 351 pp.

Lunine, J., I. (1999): Earth: evolution of a habitable world. Cambridge University Press Boston, 319 pp.



McFadden, L., A., Weissman P., R., Johnson, T., V. (2007): Encyclopedia of the Solar System. Academic Press, 966 pp.

Péczely, Gy., (1978): Éghajlat. Tankönyvkiadó, Szeged, 280 pp.