

UJFALUDI LÁSZLÓ

TERRAFORMÁLÁS – IDEGEN BOLYGÓK LAKHATÓVÁ TÉTELE

Eszterházy Károly Katolikus Egyetem, Fizika Tanszék
e-mail: ujfaludi.laszlo@uni-eszterhazy.hu

Absztrakt

A terraformálás olyan hipotetikus eljárás, amelynek során egy égitest felszínét és ökoszisztémáját úgy alakítanák át, hogy az emberek számára megfelelő élőhely legyen. Egyelőre csak a Mars jöhet szóba mint lehetséges célpont, de ez is több szempontból vitatott. Nem állnak rendelkezésre megbízható, jól bevált módszerek a terraformálás végrehajtására, továbbá megbízható becslések szerint a művelet sok ezer éves projekt útján lenne végrehajtható. A gazdasági háttér biztosítása ilyen időtávon kétséges, mivel a várható eredmény rendkívül bizonytalan.

Kulcsszavak: terraformálás, élőhely, gazdaságosság, science fiction

LÁSZLÓ UJFALUDI

TERRAFORMING – MAKING ALIEN PLANETS INHABITABLE

Eszterházy Károly Catholic University, Department of Physics
e-mail: ujfaludi.laszlo@uni-eszterhazy.hu

Abstract

Terraforming is a hypothetical process in which the surface and ecosystem of a celestial body would be transformed to make it a suitable habitat for humans. So far, Mars has been the only possible destination, but this is also controversial in several aspects. There are no reliable, well-proven methods for carrying out terraforming, and reliable estimates suggest that the operation would be a project lasting many thousands of years. Ensuring the economic background over such a long period of time is doubtful, since the expected result is extremely uncertain.

Keywords: terraforming, habitat, economy, science fiction

Bevezetés

A terraformálás (Williams, 2016) olyan hipotetikus eljárás, amelynek során egy bolygó, egy hold vagy más égitest légkörét, hőmérsékletét, felszínét és ökoszisztémáját úgy alakítanák át, hogy az hasonlóvá váljon a Földhöz, és így emberek számára megfelelő élőhely legyen. A NASA űrszondái eddig több mint 5000 idegen csillag körül keringő (extraszoláris) bolygót fedeztek fel, ezek között nagy számú Földhöz hasonló lehetne (elvileg) megfelelő élőhelyünk (Kiss, 2024). A reális lehetőségek azonban igen korlátozottak. A legközelebbi „lakhatónak” ítélt extraszoláris bolygó a Proxima Centauri bolygója, a Proxima-b, amelynek Földtől való távolsága 4,25 fényév. Ennek elérése a jelenleg ember által alkotott legyorsabb űrhajóval, a Voyager-2-vel (sebessége: 58.000 km/h) több mint 80.000 évig tartana. A realitásokat figyelembe véve terraformálás szempontjából egyelőre (és valószínűleg még igen hosszú ideig) csak a Naprendszer egyes objektumai jöhetnek szóba.

Terraformálás – tudomány és science fiction

A nyugati műszaki irodalomban az a nézet vált általánossá, hogy a technika eszköz arra, hogy egy anyagiakban gazdag, modern társadalmat hozzunk létre. Eleme még a „mérnök” dicsőítése és az egyetértés abban, hogy óriási léptékű műszaki projektekkel „legyőzhetjük” és „megjavíthatjuk” a természetet olyan erőforrásokat hasznosítva, amelyek egyébként kárba vesznének (SCHMIDT, 2010).

A legkorábbi „kemény science fiction”-ben (1930-1960) ez a nézet uralkodó, majd még a 60-as években is jellemző volt a tudományban és a science fictionben is. SCHMIDT meghatározása szerint (2010) a „kemény science fiction” olyan mű, amely természettudományos alapon áll, nem a fantasztikus elem dominál benne.

Carl Sagan volt az első (SAGAN, 1960), aki felvetette a terraformálás lehetőségét mint az emberek más bolygókra történő áttelepülési módját a Földet sújtó valamilyen katasztrófa vagy – hosszabb távon – bolygónk lakhatatlanná válása esetére. Elhíresült indoklása szerint:

„Mivel hosszú időtávon minden civilizáció ki van téve az űrből jövő veszélyeknek, a túlélés érdekében űrutazóvá kell válnia; nem a felfedezés vágyától, vagy valamilyen romantikus hevülettől hajtva, hanem az elképzelhető legpraktikusabb okból: életben maradása érdekében. Ha hosszú távú túlélésünk a tét, fajunk iránti elemi kötelességünk más világok felkutatása.”

Más vélemények megkérdőjelezték a terraformálást jogi, módszertani és morális oldalról. Egyes szerzők, pl. MILLER (1953) kétségbe vonták a korábbi szerzők által felvetett lehetőségeket. Miller víziója a terraformálásról fájdalomról, áldozatokról és ürességről szól. BLISH (1957) úgy jellemzi a terraformálást, mint az uralkodó körök eszközét az emberi

szabadság elnyomására és az állandó kiszolgáltatottságra. ANDERSON (1964) szerint kérdéses, hogy az emberiség képes-e ellenállni a planetáris imperializmusnak, ahol (mint Földünk esetén ez nyilvánvaló) a profithajszá konfliktusban van a természetes környezettel és a különböző életformákkal.

A technika negatív hatásai fordulatot hoztak, és az „újhullám science fiction” már szkeptikus hangot ütött meg a technikával szemben, ellentétben a „kemény science fiction” narratívájával és értékítéletével. A technikapártiak elutasították ezt a pesszimizmust. Szerintük az erőforrások kimerülése és a túlnépesedés pont olyan problémák, amelyeket a technika tud megoldani.

Vannak, akik – például Carl Sagan, LOVELOCK (1990) Gaia hipotézisén felbuzdulva – a terraformálást mint egy biológiai folyamatot fogják fel. De lényegében ez is a technikán alapul, mivel biotechnológiára és összetett technológiai folyamatokra épül. Mások úgy vizionálták az idegen bolygók terraformálását, ahogyan Amerika első telepesei birtokba vették az Újvilág területeit és erőforrásait, és ott korszerű mezőgazdaságot és ipart hoztak létre.

A Mars terraformálása – problémák (SCHMIDT, 2010; BLISH, 1957)

a) Intenzív kozmikus sugárzás

Mivel a Mars légköre igen ritka, és mágneses tere egyáltalán nincs, az élőlények ki vannak téve a kozmikus sugárzás ártalmainak.

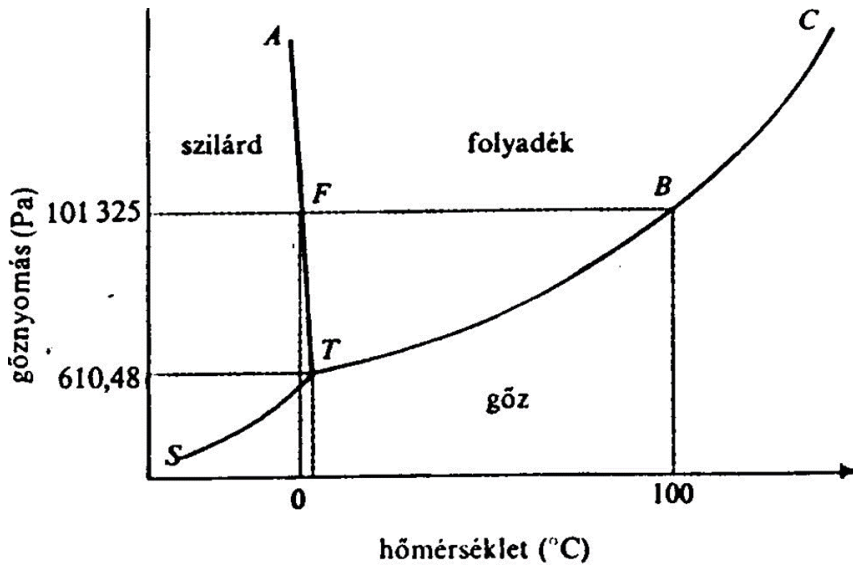
b) Porviharok

Kiszámíthatatlan időközönként hatalmas porviharok keletkeznek, a por a tárgyakat belep, a por eltávolítása (pl. a tervezett átlátszó, zárt építmények külső felületéről) jelentős problémát okozhat, az ott tartózkodóknak látási problémái lehetnek, csökken a növények megvilágítása. A por pontos összetételét sem ismerjük, tartalmazhat toxikus anyagokat is.

c) Vízkészlet

A vízkészletek előállításának problémája. Egyes tanulmányok szerint vizet a sarki jég megolvasztásával lehet nyerni. Honnan nyerhetik ehhez az energiát? Az egyik lehetséges válasz: óriási tükrökkel a napsugárzást a jégre vetítik. A problémák ezzel a megoldással:

- A Mars felületén a napsugárzás intenzitása 42%-a a földiének. A sarkokon ennek csak a töredéke várható.
- Az alacsony légnyomás miatt a folyékony víz rögtön elpárolog, ha nem egy zárt rendszerben tárolják. A jelenség a víz fázisdiagramja (1. ábra) alapján magyarázható.



1. ábra. A víz fázisdiagramja

Folyékony állapotú víz csak az AFTBC-vonal fölött lehet. Az ún. hármas pont (T) nyomása: 610,48 Pa (6,03 millibar). Ahol a nyomás ennél kisebb, ott 0 °C vagy az alatti hőmérsékleten csak jég vagy gőz állapotú víz lehet.

A Mars átlagos légnyomása: 7 millibar, ami kevéssel fölötté van a hármas pontnak, tehát elvileg lehet folyékony víz is (0 °C fölötti hőmérsékleten). A legkisebb légnyomáscsökkenés esetén azonban ez a lehetőség megszűnik. Folyékony víz a sarki jégtakarók alatt lehet, a jég által létrehozott magas nyomás következtében.

d) A talaj szervesanyag-tartalma

A talaj nem tartalmaz szerves anyagot, csak bizonyos nyomelemeket (leginkább a regolit nevű ásványra hasonlít). Ha növénytermesztést akarnak megvalósítani, akkor a szerves anyagot kívülről kell bevinni.

e) Gravitáció

A Marson a tárgyak súlya csak 38%-a a földi súlynak. Kérdés, hogy ez milyen problémákat vet fel az élőlények biológiai folyamataival kapcsolatban. A Nemzetközi Űrállomáson a személyzetnél csonttritkulás és izomatrópia (izomsorvadás) jeleit és a kardiovaszkuláris rendszer problémáit tapasztalták (JONES, 2021). Az egészségügyi problémák kiküszöbölésére több megoldás született, például az izomsorvadás és csontvesztés megelőzése speciális testező gyakorlatokkal (BELYAEV ET AL., 2011). Van olyan elképzelés, hogy a Marson az embereknek naponta bizonyos ideig centrifugákban kell tartózkodni az említett problémák

megelőzésének céljából (JONES, 2021). Az embriók fejlődése is függ a gravitációtól, a madaraknál és kétéltűeknél a gasztrulációnál gravitáció nélkül nem megy végbe megfelelően a sejtváándorlás, az embriogenezis megszakad a súlytalanság állapotában. Az emlős-embriogenezis kevésbé gravitációfüggő folyamat, ennek ellenére a mikrogravitációs körülmények között megszakad, azok a reakciók aktiválódnak, amelyek az erőteljes stresszhatásokat jelzik, és az embrió pusztulását okozzák (RUDEN ET AL., 2018). Vannak olyan tervek, hogy állatokat küldenek a Marsra, hogy vizsgálják azok reprodukciós képességét az ottani körülmények között. Az első betelepülőknek (2. ábra) tehát számos nehézséggel kell szembenéznük.



2. ábra. A Mars terraformálása. Az első betelepülők munkában (fantáziakép).

Egy konkrét terv a marsi élhető környezet létrehozására (McKAY, 1987) úgy próbálná a Mars terraformálását elérni, hogy először üvegházgázokat vezetne be a légkörbe, például a sarki jégsapkák megolvasztása nyomán nagy mennyiségű CO_2 szabadulna fel. Amikor a hőmérséklet eléri az élet számára megfelelő értéket, a kutatók mikrobákat helyeznek el különböző helyszínekre, ezek szintetizálják a többi élőlény számára nélkülözhetetlen kemikáliákat, molekuláris diverzitást hoznak létre és oxigént termelnek. Egy idő után növényeket és fákat ültethetnének, ezek még több oxigént termelnek, és végül a vörös bolygó alkalmas emberi településsé válhat. Ehhez persze türelem kell, mondja McKay, sok-sok generáció türelme és kitaró munkája. Becslése szerint a teljes terraformálás időszükséglete körülbelül 100 ezer év.

Egy alternatív lehetőség az ún. „para-terraformálás”

A para-terraformálás lényege, hogy a bolygót fokozatosan teszik lakhatóvá. Először csak néhány – megfelelően kiválasztott helyszínen – építenének üvegházakat, azokban hajtanák végre a terraformálás előző bekezdésben leírt műveleteit (SCHARPING, 2016). A zárt építményekben a megfelelő légkör és hőmérséklet kialakítása egyszerűbb, és az építmény védelmet nyújtana az intenzív sugárzás ártalmaitól ellen is. Továbbra is probléma lehet azonban a porviharok következményeinek elhárítása (lásd fentebb) (NICHOLS, 2017).



3. ábra. Para-terraformálás a Marson (fantáziakép)

A Bioszféra II kudarca

1991-ben Arizonában egy 2700 m² alapterületű, 200 ezer m³ térfogatú zárt üvegházakat építettek (4. ábra), amelyben egy 8 fős személyzettel önfenntartó ökoszisztémát kívántak létrehozni. Két kísérlet történt, az első 2 évig, a második 8 hónapig tartott. Mindkettő sikertelennek bizonyult (CORNELIUS, 2021). Az alapvető problémák: az oxigénszint folyamatos csökkenése, fokozódó táplálékhiány, egyes állat- és növényfajok kihalása.

(Az impozáns épületegyüttest, akkor már üresen, 1994 tavaszán láttuk az egri főiskola akkori környezettan szakos hallgatóival, akikkel Arizona nemzeti parkjait látogattuk végig.)

Azóta ennek az építménynek egy kisebb szekciójában egy rövidebb programot folytattak, amelyben a Mars felszíni körülményeit próbálták modellezni. Egy hasonló, rövid ideig tartó kísérlet történt Hawaiiiban, a Mauna Loa hegy lejtőjén, mindkét vállalkozás csak igen mérsékelt sikerrel járt (BODNÁR, 2024).



4. ábra. A Bioszféra II épületegyüttese Arizonában

Alternatív elképzelések

Kolóniák a Holdon

A Hold kedvező közelsége vonzó elképzelés lehet űrkolóniák létesítése szempontjából. Elérési ideje a Mars fél évéhez képest csekély: néhány nap, üzemanyagigénye jóval szerényebb, a kommunikáció jóval egyszerűbb. A légkör létrehozása azonban itt illuzórikus. Egy konkrét terv szerint a 40 km átmérőjű Shackleton-kráterben felépítenének egy 1500 m magasságú kupola alatti zárt várost (para-terraformálás), amelyben 10.000 telepes tartózkodhatna, miután robotokkal előkészítenék a tartózkodáshoz alkalmas körülményeket (WARMFLASH, 2014).

A Vénusz terraformálása

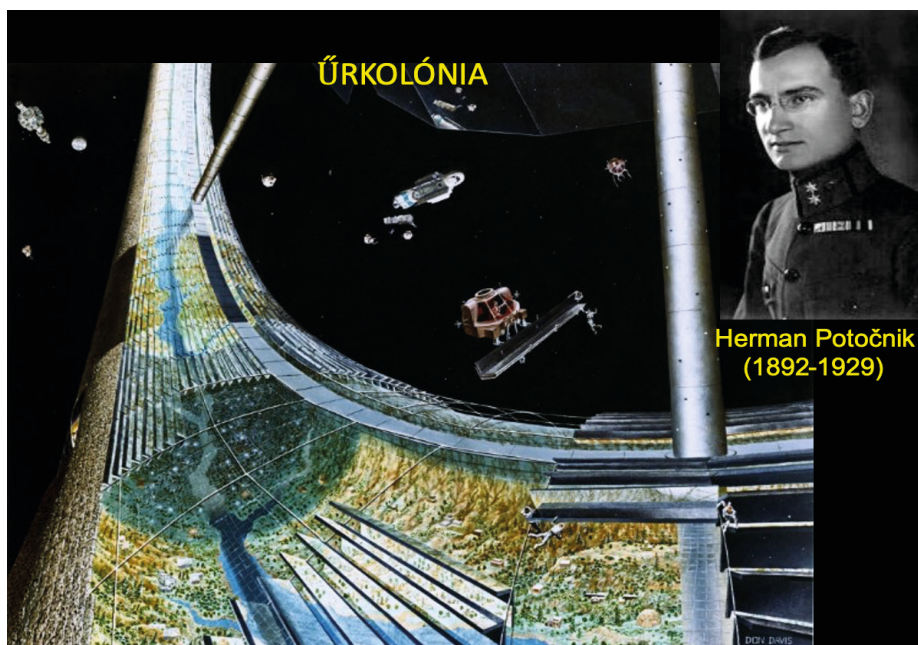
Egyes (igen merész) elképzelések szerint a Vénusz terraformálása is megoldható. A megoldás: termofil mikroorganizmusokat telepítenek oda, majd „various chemical tricks” (különböző kémiai trükkök) alkalmazásával csökkentenék a szén-dioxid mennyiségét (LANDIS, 2012).

Ehhez a mesébe illő elképzeléshez két megjegyzést lehet fűzni:

- 1) nem léteznek olyan termofil élőlények, amelyek képesek lennének túlélni a Vénusz felszínének közel 500 °C-os hőmérsékletét;
- 2) ha léteznek az emlegetett „kémiai trükkök”, azokat miért nem alkalmazzák a Föld légköri szén-dioxid-tartalmának csökkentésére?

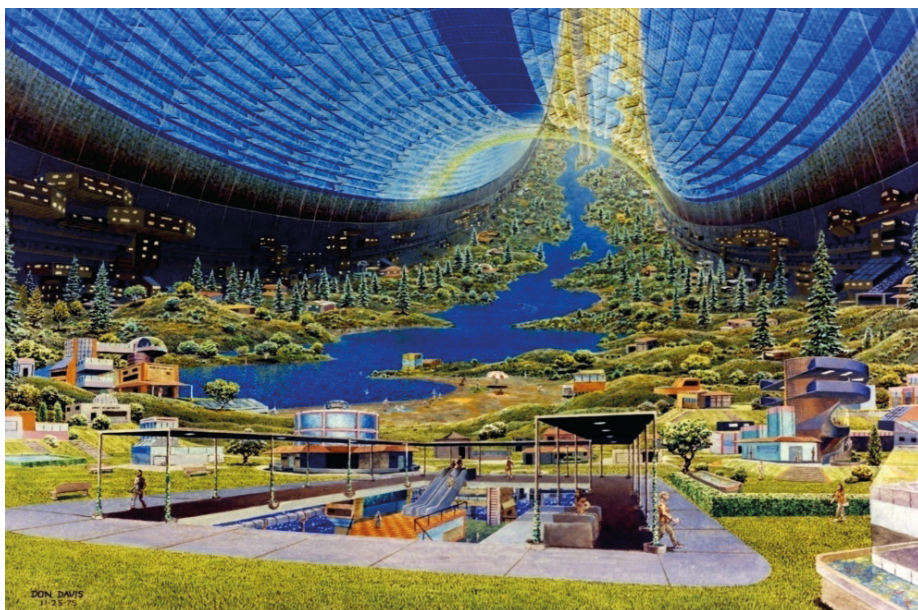
Űrkolóniák

Az űrkolóniák ötletét Herman Potočnik (1892–1929) szlovén származású mérnök-katonatiszt alapozta meg 1929-ben. Leírta egy olyan űrállomás tervét, amely az űrkatatók hosszú távú lakhelye lehet (ПОТОЧНИК, 1929). Az űrállomás koszorú (tórusz) alakú, a gravitációs erőt a tórusz forgó mozgásából származó centrifugális erő helyettesíti (5. ábra).



5. ábra. Hermann Potocnik tervei alapján elképzelt űrkolónia fantáziaképe

O'NEILL „modernizálta” Potočnik tervét (1977), és olyan űrkolóniák tervét vázolta fel, amelyek átmérője 100 km nagyságrendű, és több 10 ezer személy befogadására alkalmasak. Az 5. és a 6. ábrán egy-egy gigantikus űrkolónia fantáziaképe látható. Meg kell jegyezni, hogy az ilyen űrkolóniáknak jelenleg semmi reális alapja nincs, nem szerepelnek az űrkutatási tervek között sem.



6. ábra. Egy űrkolónia belső terének fantáziaképe

A terraformálás tudomány vagy science fiction?

Felvetődik a kérdés: vajon hol van a határ a professzionális tudomány és a „kemény science fiction” között (SCHMIDT, 2010)? A terraformálás bizonyos fokig megtartja tudományos megalapozottságát. Hivatásos tudósok – Carl Sagantól Christopher McKayig és Robert Haynesig tanulmányozták és fejlesztették tovább módszereit. A terraformálás gondolatát egy sor szigorúan lektorált és professzionális folyóirat – a spekulatívabb stílusú *Journal of the British Interplanetary Society*től a konzervatívabb *Nature*-ig és *Science*-ig – közölte. A témát számos tudományos konferencián is megvitatták. De tudomány ez? Sok eleme azt sugallja, hogy nem!

Előszőr: Ez egy olyan tevékenység, amely nem verifikálható semmilyen elfogadható módszerrel. Semmilyen kísérleti módszer nem létezik annak igazolására, hogy a kívánt cél elérhető. Szintén nincs mód annak meghatározására, hogy egy terraformálási tevékenység egyik helyen ugyanazt az eredményt éri el más körülmények között. Valójában minél jobban megismerjük ökológiai és környezeti rendszereinket, annál távolabbinak tűnik az a vágyálom, hogy azokat saját igényeinknek megfelelően átalakítsuk (BODNÁR, 2024). A Mars jelenleg a terraformálók fő céltáblája, de a Mars természeti rendszerének még csak egy kis hányadát ismerjük, és még sok mindent kell megtudnunk, mielőtt egy terraformálási tervet készítenénk, ha egyáltalán lehet ilyet készíteni, és az végrehajtható.

Másodszor: a jelenlegi terraformálási technológiák vagy a jelenlegi technológiák erősen extrapolált változatai, vagy a jelenlegi technológiák jövőbeli fejlődésének feltételezésén alapuló tisztán spekulatív módszerek.

Harmadszor: A legtöbb becslés szerint a terraformálás időtartama sok évezredes időskálán történhet, az erőforrások biztosítása ilyen időtávon valószínűtlen, miközben az eredmény valószínűsége bizonytalan.

Végül: A tudomány és a technika általában emberközpontú célok elérésére használatos eszközök. Ebből a nézőpontból tekintve a terraformálás valahol a tudomány és a kultúra között foglal helyet, úgy középtájon a tudomány és a „kemény science fiction” között.

Irodalomjegyzék

- Anderson, P. (1964). To Build A World. *Galaxy Science Fiction* 22(6), 7–64.
- Belyaev, M. Y., Babkin, E. V., Ryabukha, S. B. & Ryazantsev (2011). Microperturbations on the International Space Station during physical exercises of the crew. *Cosmic Res* 49, 160–174. <https://doi.org/10.1134/S0010952511010011>
- Blish, J. (1957). *The Seedling Stars*. Signet Books New York.
- Bodnár, Zs. (2018). A Bioszféra 2 kudarca: hogy akarunk más bolygókon élni, ha még a Földön sem sikerül leutánozni a természetet? <https://qubit.hu/2018/05/16/a-bioszfera-2-kudarca-hogy-akarunk-mas-bolygokon-elni-ha-meg-a-foldon-sem-sikerul-leutanozni-a-termeszetet>
- Cornelius, K. (2021). Biosphere – 2: The Once Infamous Live-In Terrarium Is Transforming Climate Research *Scientific American*, October, 4. <https://www.scientificamerican.com/article/biosphere-2-the-once-infamous-live-in-terrarium-is-transforming-climate-research/>
- Jones, H. W. (2021). The Partial Gravity of the Moon and Mars Appears Insufficient to Maintain Human Health. 50th International Conference on Environmental Systems. ICES-2021-142. <https://ntrs.nasa.gov/citations/ICES-2021-142>.
- Kiss, L. L. (2024). Keressük a Föld égi mását. *Fizikai Szemle*. 74(7-8), 226–232.
- Landis, G. A. (2012). Terraforming Venus: A Challenging Project for Future Colonization. *AiAA Space 2011 Conference & Exposition* 27. Long Beach, California. <https://doi.org/10.2514/6.2011-7215>
- Lovelock, J. (1990). *Gaia. A földi élet egy új nézőpontból*. Göncöl Kiadó, Budapest.
- McKay, Ch. (1987). On Terraforming Mars. *Extrapolation*, 23(4), 309–314. <https://doi.org/10.3828/extr.1982.23.4.309>

- Miller, W. M. (1953). Crucifixus Etiam. Astounding Science Fiction WordPress.com <https://doomsdayer.wordpress.com/2013/06/18/miller-walter-m-crucifixus-etiam-1953/>
- Nichols, M. R. (2017). If we successfully land on Mars, could we live there? In: Martian homes and gardens. Astronomy. <https://www.astronomy.com/space-exploration/if-we-successfully-land-on-mars-could-we-live-there/> . *Megtekintve: 2025. december 22.*
- O'Neill, Gerard K. (1977). *The high frontier: human colonies in space.* William Morrow & Company. New York.
- Potocnik, H. (1929). The Problem of space travel. The rocket motor. *Berlin: Richard Carl Schmidt & Co.*
- Ruden, D. M., Bolnick, A., Awonuga, A., Abdulhasan, M., Perez, G., Puscheck, E. E., & Rappolee, D. A. (2018). Effects of Gravity, Microgravity or Microgravity Simulation on Early Mammalian Development. *Stem cells and development*, 27(18), 1230–1236. <https://doi.org/10.1089/scd.2018.0024>
- Sagan, C. (1960). Physical Studies of Planets. PhD Dissertation. *University of Chicago.*
- Scharping, N. (2016). Are building the case to terraform Mars? In: Martian homes and gardens. Astronomy. <https://www.astronomy.com/science/these-experiments-are-building-the-case-to-terraform-mars/>. *Megtekintve: 2025. december 22.*
- Schmidt, P. A. (2010): „Terraforming: an investigation of the boundaries between science and hard science fiction.” PhD Dissertation, *University of Minnesota.*
- Warmflash, D. (2014). Forget Mars. Herw's where we should build our first off-world colonies. In: Martian homes and gardens. Astronomy. <https://www.discovermagazine.com/forget-mars-heres-where-we-should-build-our-first-off-world-colonies-182>. *Megtekintve: 2025. december 22.*
- Williams, M. (2016). The Definitive Guide To Terraforming. *Planetary Science*, <https://www.universetoday.com/articles/guide-to-terraforming>. *Megtekintve: 2025. december 22.*