

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR

NUKLEÁRIS TECHNIKAI INTÉZET

ATOMENERGETIKA TANSZÉK

IMRE ESZTER ANNA

fizikus-mérnök BSc 1. félév

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA DOLGOZAT

**EGY MARSI KOLÓNIA ENERGIAELLÁTÁSÁNAK
MEGTERVEZÉSE**

Témavezetők:

Biró Bence
PhD hallgató

Prof. Dr. Aszódi Attila
egyetemi tanár

Budapest, 2023

TARTALOMJEGYZÉK

1	Bevezetés	3
1.1	A kutatás célja	3
1.1.1	Expedíciók bemutatása	4
1.1.2	A Mars feltérképezésének jövője	7
1.1.3	Nukleáris meghajtású rendszerek rövid ismertetése	7
1.2	A Mars és a Föld közötti különbség	8
1.2.1	Eltérő körülmények	8
1.3	Az ISRU rendszer ismertetése	11
2	Jelenleg ismert energiahordozók működésének különbsége a Földön és a Marson	12
2.1	Energiatermelő opciók	12
2.1.1	Nukleáris	12
2.1.2	Napenergia	15
2.1.3	Geotermikus energia	16
2.1.4	Szélenergia	17
3	A marsi kolóniák	17
3.1	A kolónia elhelyezkedése	17
3.1.1	Arsia Mons	19
3.1.2	Hellas Planitia	19
3.1.3	Meridiani Planum	20
3.2	A kolóniák mérete	21
4	A kolónia energiafelhasználó berendezéseinek bemutatása	21
4.1	A kolónia lakóhelye	21
4.2	Oxigén előállítása	22

4.3	Mezőgazdaság, élelmiszer előállítása	23
4.4	Víz kinyerése a Marson	25
4.5	Nyersanyag kinyerése	25
4.6	Sterilizálás	26
4.7	Tárolóegységek, energiatárolás	27
4.8	Hulladékkezelés	27
4.9	Kommunikáció	28
5	Egy marsi kolónia energiafogyasztásának számítása	29
5.1	A kolónia fűtése	29
5.2	Oxigén előállítása	35
5.3	Hulladékkezelés, újrahasznosítás	36
5.4	Sterilizáció	39
5.5	Élelmiszer megtermelése	41
5.6	Víz előállítása	45
5.7	Élelmiszer tárolása, hűtés	45
5.8	Számítógép	46
5.9	Összesítés	46
6	Összefoglalás	48
7	Felhasznált források	49

Absztrakt

A Mars feltérképezése több, mint fél évszázados történelemmel rendelkezik, az elmúlt közel hetven évben számos expedíció tárgyát képezte. A kutatások nagy részét motiválta a bolygó kolonizációjának gondolata. Egy marsi kolónia energiaellátásának biztosítása rengeteg kihívást jelent az eltérő körülmények és a különleges berendezések szükségessége miatt. A kolónia energiaellátására számos opció van, a nukleáris energia, a napenergia, a geotermikus energia, és a szélenergia mind-mind kutatások tárgyát képezik, mint egy marsi kolónia energiaellátását biztosító lehetőségek. A legnagyobb potenciál ezek közül a napenergiában és az atomenergiában rejlik, ezért kutatásom során azt vizsgálom, hogy ezen energiahordozók hogyan tudnák energiával ellátni a kolóniát.

Kutatásom során egy lehetséges marsi kolónia energiafelhasználására vonatkozóan végeztem számításokat, majd ezeket összegezve felmértem az általam számított igények megtermelésének lehetőségeit. Számításokat végeztem az oxigénigényt, és annak előállítását illetően, a hulladékkezelés során egy új eljárás elméleti lehetőségét vetettem fel, mellyel 3D nyomtatáshoz szükséges akrilnitril-butadién-sztirol állítható elő újrahasznosítással. Számításokat végeztem továbbá marsi minták gamma-besugárzási dózisével, és az ahhoz szükséges berendezés energiaigényével kapcsolatban, víz kinyerésével, és annak mezőgazdasági alkalmazásával kapcsolatban. Felmértem továbbá a nukleáris reaktorok és a napenergia által biztosított lehetőségeket. A kutatás eredményeként létrejött számítások lehetővé teszik egy marsi kolónia energiarendszerének teljes körű szimulációját.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet szeretnék mondani témavezetőimnek, Prof. Dr. Aszódi Attilának és Biró Bencének a BME TTK Nukleáris Technikai Intézetéből, hogy vállalták a témavezetésem és már egyetemi tanulmányaim előtt foglalkozhattam a témával.

1 Bevezetés

A dolgozatom első fejezetében felvezetem kutatásom témájának jelentőségét, ismertetem a Mars-expedíciókat és jelentőségüket, illetve a nukleáris reaktorok ebben vállalt szerepét, valamint egy marsi kolónia megtervezése során felmerülő nehézségeket. A második fejezetben ismertetem a jelenleg ismert fenntartható energiahordozók működésbeli különbségeit a Marson és a Földön, az azzal járó kihívásokat, illetve abban rejlő nehézségeket, valamint bemutatom, milyen atomreaktor lehet optimális egy marsi kolónia számára. A harmadik fejezetben ismertetem magukat a kolóniákat. Mivel jelenleg nincsen hivatalos, végleges terv egy marsi kolónia földrajzi elhelyezkedését illetően, felmérem, milyenek az optimális körülmények egy kolóniánál, és három javaslatot teszek, melyek az adatok alapján alkalmasak lehetnek egy kolónia számára. A negyedik fejezetben bemutatom a kolónia energiafelhasználó berendezéseit, azoknak a működését, illetve elméleti megoldást keresek a megoldatlan kérdésekre, többek között például a marsi minták gamma-sterilizációjához használatos kobaltizotóp előállítására. Az ötödik fejezetben ismertetem a számításokat, melyekkel a kolónia energiafelhasználását megbecsülöm, illetve ezeket időszakos bontásban összegzem.

1.1 A kutatás célja

Kutatásom célja egy marsi kolónia energiaellátásának megtervezése. Ennek motivációja azon túl, hogy az űrkutatás egyre nagyobb szerepet kap, az is, hogy egy marsi kolónia megtervezésével egy olyan település energiaigényeiről és annak megtermelési lehetőségeiről szerezhetünk tudást, ami speciális körülmények között található, emiatt a rendelkezésünkre álló eszközök korlátozottak. A kutatásom során kapott adatok lehetővé teszik a későbbiekben egy nagyobb felbontású, marsi kolónia energiaellátás pontosabb tervének elkészítését, de akár arra is lehetőséget teremtenek, hogy földi körülmények között – tiszta lapról indulva – még okosabban, még konzisztensebben felépített energiaellátó rendszereket tervezhessünk.

Noha az űrkutatás jelenleg az egyik legdinamikusabban fejlődő tudományterület, még mindig nem áll rendelkezésünkre elég információ magáról a bolygóról, nincs elég eszközünk a pontos számítások elvégzéséhez. Mind az űrkutatás, mind egyéb tudományterületek pl. anyagtudomány, reaktorfizika stb. jövőbeni célkitűzése, hogy az említett területeken konkrétabb tervekkel rendelkezzenek.

Egy marsi kolónia energiaellátásának megtervezésénél optimális lehetőség lehet a napenergia és az atomenergia kombinációjából előállított energiamix. A kutatás során egy

olyan kolóniát demonstrálok, ami különleges körülmények között, korlátolt lehetőségekkel, elszigetelten működik, ezért az energiaellátása során felmerülő lehetőségek is korlátozottak. A Marsnál is alkalmazandó mikroreaktorok a szállítható, gyorsan legyártható kis moduláris reaktorok (angolul small modular reactors, röviden SMRs) kis teljesítményű és méretű típusai, valamint az SMR-ek a Földön is megoldást jelenthetnek elszigetelt, fejlődő települések energiaellátásának termelésére.

1.1.1 Expedíciók bemutatása

A Mars tanulmányozása már évezredek óta célja az emberiségnek, már az ókorban is foglalkoztak mozgásának leírásával [1]. Közel hetven éve foglalkoznak űrkutatási projekteken a bolygó felszínének, éghajlatának, földrajzának kutatásával, ezalatt nagyon sok űrszonda indult a Marshoz, de ezen expedíciók nagy része kudarcba fulladt. Ennek ellenére a vörös bolygó feltérképezése mégsem mondható sikertelennek, számos hasznos kutatási eredménnyel gazdagodott az emberiség az elmúlt időben. Az anyagtudomány, a nukleáris technika és a tömegspektroszkópia fejlődése mind-mind hozzájárult a Mars felderítésének eredményességéhez.

Az egyik legkorábbi kutatási program a Marsz-program volt, melynek keretében hét szovjet űrszondát indítottak el sikeresen a Mars felé. Ezeknek azonban többsége nem tudta sikeresen véghez vinni küldetését. A Marsz-1 ugyan sikertelennek tekinthető, de sikerült megközelítenie a Marsot. Feladata a kozmikus sugárzás, interplanetáris mágneses tér, napszél, meteorit áramok tanulmányozása volt 1962-1963 között. A Marsz-2 1971-ben elsőként elérte a bolygó felszínét. A Marsz-3 leszállóegysége sima leszállást végzett a Mars felszínére, de a kapcsolat megszakadása miatt adatokat nem tudott szolgáltatni. A Marsz-3 keringő egység pályára állt a bolygó körül, és értékes adatokat szolgáltatott a Marsról. A Marsz-4 1973-ban indult, de a fékező hajtómű meghibásodása miatt a Mars körüli pályára állás helyett mesterséges bolygó lett. A Marsz-5 (1973) jelentős tudományos adatokat küldött, leszállóegység nélküli kutató űrszonda volt. Gamma-spektrométerrel vizsgálta a talaj összetételét, radiometriai és fotometriai eljárással tanulmányozta a légkört. A Marsz-6 nyújtott először adathalmazt a marsi légkör szerkezetéről. A Marsz-7 műszaki hiba miatt elrepült a Mars mellett és keringési pályára állt [2].

1962-1974 között a NASA űrszondákat küldött a Mars, a Vénusz és a Merkúr felé a Mariner-program keretében. A 10 szonda közül hatnak volt célja a vörös bolygó felderítése, és 4 expedíció volt sikeres (Mariner-4, Mariner-6, Mariner-7, Mariner-9). A Mariner-4 célja volt

a bolygóközi tér vizsgálata, felvételek készítése, illetve a légkör tanulmányozására irányuló rádió kísérletek. A Mariner-6 célja nagyobb felbontású, színes felvételek készítése volt. A bolygó felszínének 20 %-áról alkotott kiértékelhető képeket, valamint ultraibolya spektroszkópiával kutatta a bolygót. A Mars elhagyása után csillagokról alkotott képeket, a Nap körül állt pályára, a Nap mögötti elhaladásával és rádióhullámokkal is bizonyították az általános relativitáselmélet helyességét. A Mariner-9 célja főként felszíni és légköri mérések voltak. A bolygó felszínének 70 %-áról alkotott képeket [3].

1975-ben a NASA a Viking-program keretében két űrszondát küldött a Marsra (Viking-1, Viking-2). Ezen szondák leszállóegységei végeztek méréseket éveken keresztül a bolygó felszínén. A keringő egységek a Mars két holdjáról is készítettek felvételeket. A szondák célja a marsi élet nyomainak felkutatása volt. A Viking-1 többek között kromatográfval, tömegspektrométerrel és szeizmométerrel felszerelve kutatta a felszínt. Keringő egysége a tudományos kutatás mellett rádiós átjátszó állomásként funkcionált a leszállóegységnek, energiaellátását napelemek biztosították, további energiatárolást nikkel-kadmium akkumulátorokkal biztosították. A szonda felszínre ereszkedése során is tudományos adatgyűjtés történt felső légköri tömegspektrométerrel és késleltetett potenciál analízátorral. A Viking-űrszondák olyan sok adatot szolgáltatottak, hogy egyes adatok még mindig feldolgozás alatt állnak, de így is számos eredménye lett a kutatásnak. A legjelentősebb eredmények:

- A bolygó felszíne egy magas vastartalmú, erősen oxidálódott agyagos rétegből áll, amely nedvesség hatására szabadjára engedi a megkötött oxigént.
- A felszínen a legprimitívebb életformára utaló jelek sincsenek.
- Sikerült légköri nitrogént kimutatni, ami a marsi légkör második leggyakoribb komponense.
- A Mars felszínén az erózió és a felszínformáló folyamatok hatása nagyon lassú.
- A vízpára koncentráció változása a földrajzi helyek között és az évszakok során nem elhanyagolható.
- A CO₂ fagyása és szublimációja miatt a légköri nyomás egy marsi év alatt akár 30%-kal is változhat.
- Az északi jégsapka főleg vízből, míg a déli kifagyott szén-dioxidból áll.
- A Mars felszínén felszín alatti formában számos területen megtalálható a víz.
- A Mars holdjai kis sűrűségűek (átlagosan 2 g/cm³), és ez arra utal, hogy nem a bolygóval keletkeztek, hanem befogott aszteroidák [4].

A Mars Global Surveyor (MGS) 1997-2006 között működött a Mars felszínén, ez alatt 240 000 felvételt készített és sugárzott a Földre. Az MGS nagy eredménye, hogy a szakemberek végig tudták követni a marsi globális porviharok kialakulását. Szintén jelentős eredménye a lézer-magasságmérővel alkotott pontos adatok a felszíni formákról [5].

A Mars Pathfinder űrszonda a Discovery-program keretében 1997-ben érkezett a Mars felszínére. Ugyan a leszálló egységgel három hónap alatt megszűnt a kapcsolat, a program szolgáltat információkkal a légkörről, időjárásról és a felszínről.

A Mars Odyssey űrszonda 2001 óta végez méréseket a Marson, jelenleg a leghosszabb ideje a bolygót vizsgáló berendezés. Fontos eredménye, hogy nagy mennyiségű hidrogént talált a bolygón. Célja ezen túl a felszín hőmérsékleti és közettani tanulmányozása termikus emissziós képalkotó rendszerrel, gamma-spektrométerekkel és neutrondetektorral.

A Mars Express az első európai marskutató orbiter, célja a bolygón képalkotás, a napszél és a légkör felső rétegének kölcsönhatásának vizsgálata és a gravitációs tér változásainak vizsgálata [6]. A MER (Mars Exploration Space Rover) misszió keretében a Spirit és Opportunity marsjárók végeztek méréseket. Célja a múltbeli felszínformáló folyamatokra, vulkanizmusra utaló jelek kutatása, vastartalmú ásványok vizsgálata. A misszió sikeres volt, az eredetileg 90 naposra tervezett küldetés 6 és 14 évre húzódott [7]. Bizonyítékot talált egykori felszíni folyékony halmazállapotú vízre. Az MRO SHARAD (Shallow Subsurface Radar) kísérlete a marsi jégsapkák belső szerkezetét kutatta, öt helyen talált jelentős mennyiségű jeget, például a Hellas Planitia helyen – amit kutatásom során egy kolónia számára lehetséges helynek javaslok, de ezt később részletesen bemutatom. A Curiosity marsjáró 2012 óta térképezi fel a bolygót, célja napszélbeli proton események, másodlagos neutronsugárzás, kozmikus sugárzás megfigyelése, légköri folyamatok és ciklusok vizsgálata [8].

A MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution) a Mars Scout Program második űrszondája, mely 2014-ben állt a bolygó körül pályára. Feladata a marsi felsőlégköri folyamatok vizsgálata, illetve a Mars ember lakhatásra alkalmasságának vizsgálata. A felsőlégkör napszéllel való kölcsönhatását vizsgálja, illetve a benne lévő illékony gázok (CO₂, NO₂, H₂O) szökésével foglalkozik. Legjelentősebb műszere a képalkotó ultraibolya spektrométer [9].

Az ExoMars Trace Gas Orbiter az Európai Űrügynökség (angolul European Space Agency, röviden ESA) és a Roscosmos projektje, melynek fő célja a metán és egyéb légkörben nyomokban jelen lévő gázok megértése, melyek lehetséges biológiai aktivitásra utalhatnak. [10]

A Perseverance marsjáró 2020 óta végez méréseket a Mars felszínén. Tervezésében a Curiosity marsjáróhoz hasonló, de több műszerrel van ellátva. Fő céljai közé tartozik talajminta, regolit vizsgálata, a légkörből oxigén előállítására szolgáló kísérlet, valamint a későbbi kolonizáció előkészítése [11].

1.1.2 A Mars feltérképezésének jövője

A Perseverance Rover célja a Marsról a Földre minta hozatala, és ennek vizsgálata olyan eszközökkel, ami a Marson lehetséges. A várhatóan 2025-ben megvalósuló Artemis projekt célja a Holdon a későbbiekben a Marson alkalmazandó technikák tesztelése, így mint az űrhajó és az utazás, az égitest felszínén alkalmazandó mikroreaktor, a Földdel való kommunikációs rendszer tesztelése, emberi élet alternatív körülmények közötti feltérképezése [12]. A 2030-as évekre néhány fős, majd nagyobb kolóniás missziók vannak tervben, de ezek kezdetlegesek, illetve nincs róluk hozzáférhető információ. Az első, kisebb, néhány fős legénységénél nem állandó lakhely, hanem mozgatható lakóhely és laboratóriumok vannak tervben. A SpaceX első Starship landolása 2029-re van tervben, ember küldése a Marsra pedig 2037-ig tervezett [13].

Egy 2039-re tervezett legénységgel rendelkező marsi misszió számára több lehetséges forgatókönyv van. Hosszú misszió esetén 496 napos az ott tartózkodás, 210 napos oda, és ugyanilyen hosszú visszaúttal. Rövid misszió esetén 30 napos ott tartózkodás van a tervekben 217 napos odaúttal és 403 napos visszaúttal. Lehetséges meghajtási rendszerek közül a legesélyesebb nukleáris elektromos meghajtás (angolul nuclear electric propulsion, röviden NEP) alkalmazása, de emellett esélyes nukleáris termikus meghajtás (angolul nuclear thermal propulsion, röviden NTP), napelemes elektromos meghajtás (angolul solar electric propulsion, röviden SEP), aeroassziszt és kémiai meghajtás használata is, illetve ezek együttes alkalmazása [14].

1.1.3 Nukleáris meghajtású rendszerek rövid ismertetése

A NEP (nuclear electric propulsion) rendszer az atomreaktorból származó hőt villamos energiává alakítja át, mely egy ionhajtóművet hajt meg. Főbb komponensei a kompakt reaktorzóna, elektromos generátor, kompakt hulladékhő-elvezető rendszer (például hőcsövek), elektromos elosztó rendszer és az ionhajtómű, melyben félvezetőket, illetve plazmadiódákat alkalmaznak. Ezen rendszereknél a fűtőelem általában magasan dúsított urán (angolul highly enriched uranium, röviden HEU), valamint bór-karbid (B_4C), berillium és lítium-hidrid (LiH) alkalmazandó a reaktor szabályozására és a neutronok elnyelésére.

Az NTP (nuclear thermal propulsion) esetében az atomreaktorokból származó hő helyettesíti a kémiai üzemanyagok energiáját. Itt a munkafolyadék cseppfolyós hidrogén, aminek hosszú távú, minimális veszteséggel történő tárolása kihívással jár. A reaktor magas hőmérsékleten üzemel, az üzemelésnél cél a reaktort 1 percen belül magas hőmérsékletre hozni. A reaktor mindig HEU-val működik, ami lehet kerámia mátrixba ágyazva, ami biztonságos, illetve fém mátrixba, amely esetében a cél az ötvözet olvadáspontjának maximalizálása. Egy ilyen reaktorban B₄C szabályozórudakat alkalmaznak, lehetséges moderátorok a cirkónium-hidrid (ZrH), ittrium-hidrid (YH), berillium, berillium-monoxid (BeO) és berillium-karbid (Be₂C) lehetnek [14].

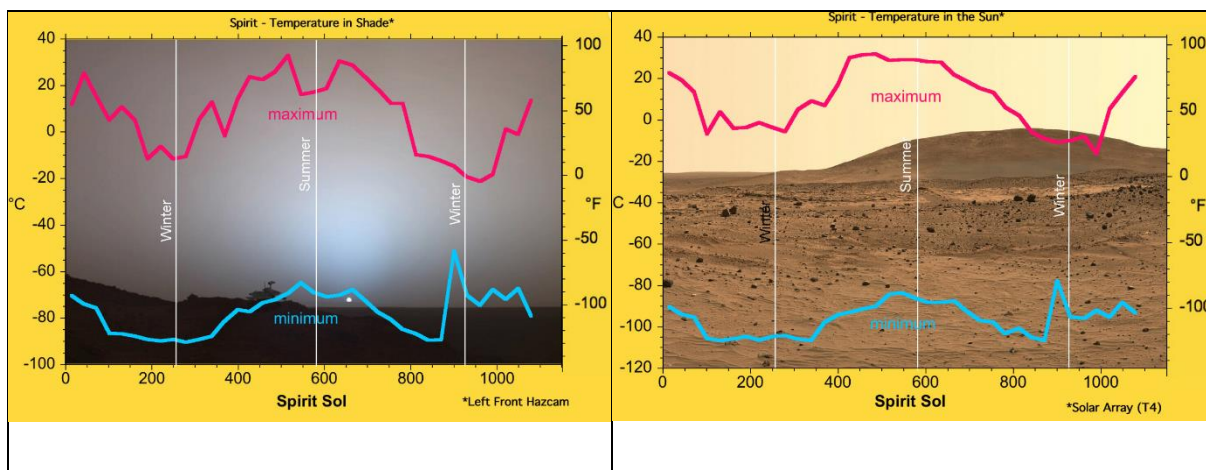
Nukleáris meghajtású rendszer továbbá a radioizotópos termoelektrikus generátor (angolul radioisotope thermoelectric generator, röviden RTG), mely 100kW teljesítményű energiaigényű űrhajóknál gazdaságos. RTG-eket alkalmaztak a Mars feltérképezése során számos alkalommal, például a Viking, Curiosity, Mars Pathfinder eszközöknél. Legelterjedtebb izotóp ezen egységek esetén az alfa-bomló Pu-238, de alkalmazható még Po-210, Pu-240 illetve Am-241 is (ESA) [15].

1.2 A Mars és a Föld közötti különbség

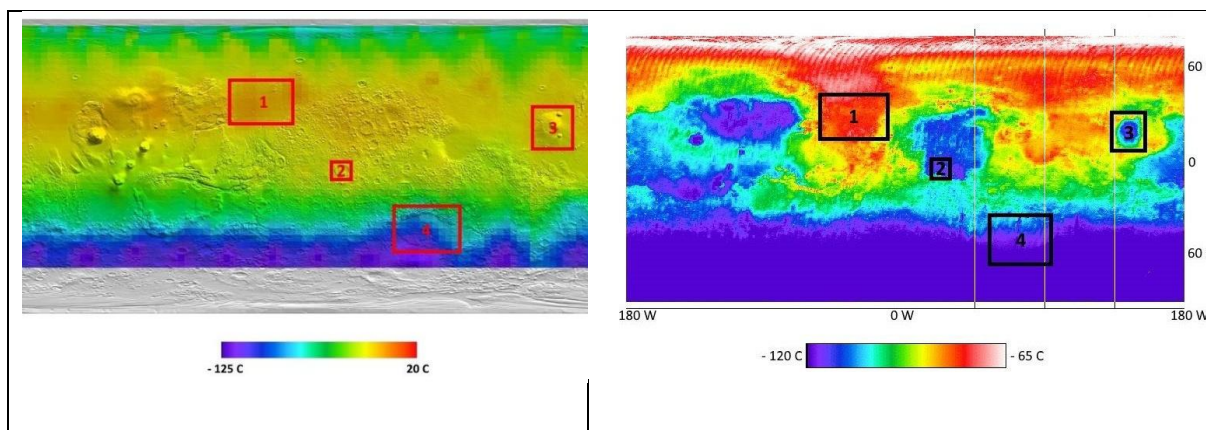
Ebben a részben a Mars és a Föld közötti különbségeket fogom bemutatni, ezzel demonstrálva a marsi kolóniák kihívásait.

1.2.1 Eltérő körülmények

Egy marsi kolónia a földi élettől nagyon eltérő körülmények között helyezkedik el, és ez rengeteg kihívás elé állítja az energiaellátást. Egy marsi nap kb. 3%-kal hosszabb, mint egy földi nap, és nagyjából 80%-kal hosszabb egy marsi év a földinél (687 földi napnak feleltethető meg). A Marson is négy évszak különíthető el. A bolygó északi féltekéjén a tavasz 194, a nyár 178, az ősz 142, a tél 154 nap hosszúságú. Tavasszal a sarki jégsapkák olvadni kezdenek és nyárra el is tűnhetnek. Az olvadó jégből felszabaduló CO₂ vastagabbá teszi a bolygó légkörét. Ősszel a hőmérséklet csökkenésével a jégsapkák is újra megjelennek az északi féltekén. Felhőképződés főleg az északi féltekén nyáron jellemző, főleg vulkánok felett [16].



1.ábra: éves átlaghőmérséklet-változás a Mars felszínén árnyékban és napon [42]



2.ábra: Nappali (balra) és éjszakai (jobbra) hőmérséklet a Mars felszínén [43]

A 2. ábra szemlélteti a Mars felszíni hőmérsékletét az egyes helyeken. Látható, hogy a sarkvidéken a legalacsonyabb a hőmérséklet, illetve a krátereknél nagyobb a napi hőingás.

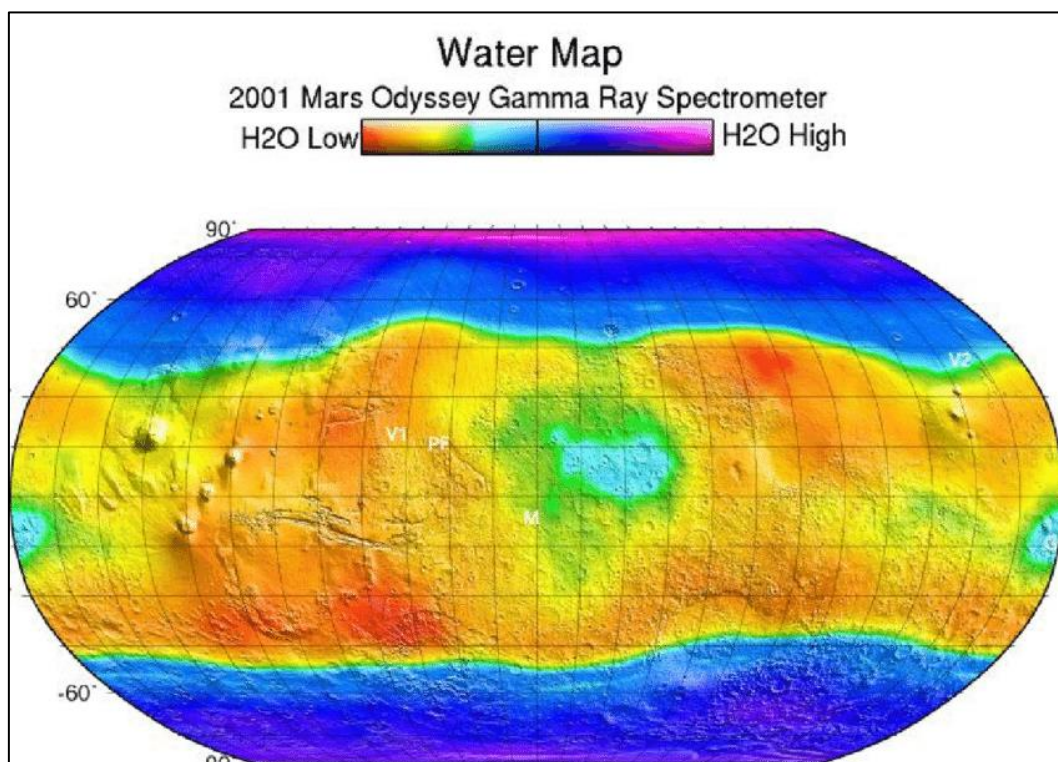
A bolygó felszínén nagyon nagy a hőingás, az átlagos hőmérséklet $-63\text{ }^{\circ}\text{C}$ köré esik. Délben az egyenlítő környékén a hőmérséklet akár $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra is emelkedhet, de a sarkoknál $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékletek is voltak mérhetőek. A legmagasabb mért talajhőmérséklet $27\text{ }^{\circ}\text{C}$, a legmagasabb légköri hőmérséklet $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ volt. A napi hőingás évszaktól függ, de akár $70\text{-}80\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os értéket is elérhet [17].

A Mars légkörét 95%-ban CO_2 , 2.8%-ban N_2 , 2%-ban Ar alkotja, ezen kívül elhanyagolható mennyiségben vízpára, egyéb nemesgázok, CH_4 , H_2 és O_2 is jelen vannak a légkörben. A marsi atmoszféra sokkal vékonyabb a földinél, az átlagos felszíni nyomás 610 Pa , ami a földi érték kevesebb, mint 1%-a [18].

A Mars felszínén a természetes háttérsugárzás sokkal nagyobb, mint a Föld felszínén, hiszen a vékony légkör és a gyenge magnetoszféra a kozmikus sugárzás ellen csak mérsékelt

védelmet nyújt. Az ebből származó átlagos éves dózisegyenérték 240-300 mSv évente, ami a földi érték százszorosa. A kozmikus sugárzás 85%-át protonok, 14%-át alfa-részecskék, 1%-át nehézionok alkotják. Az alfa-részecskéknek a légköri részecskékkel való interakciója során – mint szekunder kozmikus sugárzás – neutronok is keletkeznek [19]. A kozmikus sugárzás negatív hatást gyakorol az emberre, a mezőgazdasági tevékenységet gátolja, a műanyag és fémszerkezeteket károsítja, ezért egy kolónia lakóhelyének kiválasztásakor fontos, hogy az védelmet nyújtson a sugárzással szemben, ezért célszerű barlangok, kráterek környékére telepíteni a kolóniát.

A Mars-on víz főként szilárd halmazállapotában van jelen jég rétegeként, illetve agyagásványok formájában. Jeges formában főleg az északi sarkánál a felszínen, illetve a déli sarkvidéken a szén-dioxid jégsapka alatt van jelen (lásd 3. ábra). Melegebb évszakokban a jégsapkákból jelentős mennyiségű CO₂ szabadul fel, így a jégsapkákat ilyenkor főleg vízjég alkotja. [20]



3. ábra: Víz a Mars felszínén, illetve az alatt, Mars Odyssey gamma-spektrométer mérései alapján [44]

A 3. ábra szemlélteti a Mars térképén a vízben gazdag és szegény területeket. Jól látható, hogy az egyenlítő vízben szegény, egyes területeket kivéve, míg a sarkvidékeken nagyobb mennyiségben van jelen víz.

Egy marsi kolónia számára ideális helyszín kiválasztásánál érdemes figyelembe venni, hogy az adott területen mennyi víz van jelen.

Eltérő körülmény továbbá a Marson és a Földön a talaj összetétele és szerkezete, ami főként a mezőgazdasági tevékenység jellegére gyakorol hatást. A marsi talajt regolit alkotja, ami a szilárd kőzetet borító laza, heterogén lerakódásokból áll, magas a perkloráttartalmú vegyületek koncentrációja, amik mérgezőek. Gyakoriak a porviharok, amelyek néhány héttől akár évekig is tarthatnak. A por emberi egészségre káros lehet, illetve mindent beborít, ezért a napelemek termelésében hosszú távú kiesést jelenthet [21].

1.3 Az ISRU rendszer ismertetése

Az In-Situ erőforrás felhasználás (angolul In-Situ Resource Utilization, röviden ISRU) az űrkutatásban egyéb égitesteken (ez esetben Mars) történő energiafelhasználás, nyersanyagelőállítás, termelés az ottani körülmények tekintetében és az ott zajló kutatásokhoz, emberi tevékenységekhez szükséges energiaigényekhez alkalmazkodva (milyen eszközökkel és nyersanyagokkal lehetne végezni ott a tevékenységet a feltételek függvényében). Az ISRU nyersanyagokat biztosíthat építőanyagok, hajtóanyagok előállításához, illetve az élet fenntartásához.

A Mars esetében ez a talaj mezőgazdasági tevékenységre alkalmassá tételéhez való átalakítását, a víz kinyerését a talajból, az energiatermelést napelemekkel és nukleáris energiával, oxigén és mezőgazdasági célra történő nitrogénvegyületek előállítását jelenti. Az energiatermelő berendezésekhez is állítható elő nyersanyag ISRU módon, például a reaktorokhoz moderátor termelhető, vagy szilícium nyerhető ki regolitból, ami felhasználható napelemek gyártása során. Amennyiben a Marsról visszafelé az úton nem kizárólag nukleáris meghajtású rendszert alkalmaznak, Sabatier-reakcióval ($\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CH}_4$) metán állítható elő hajtóanyagként [22].

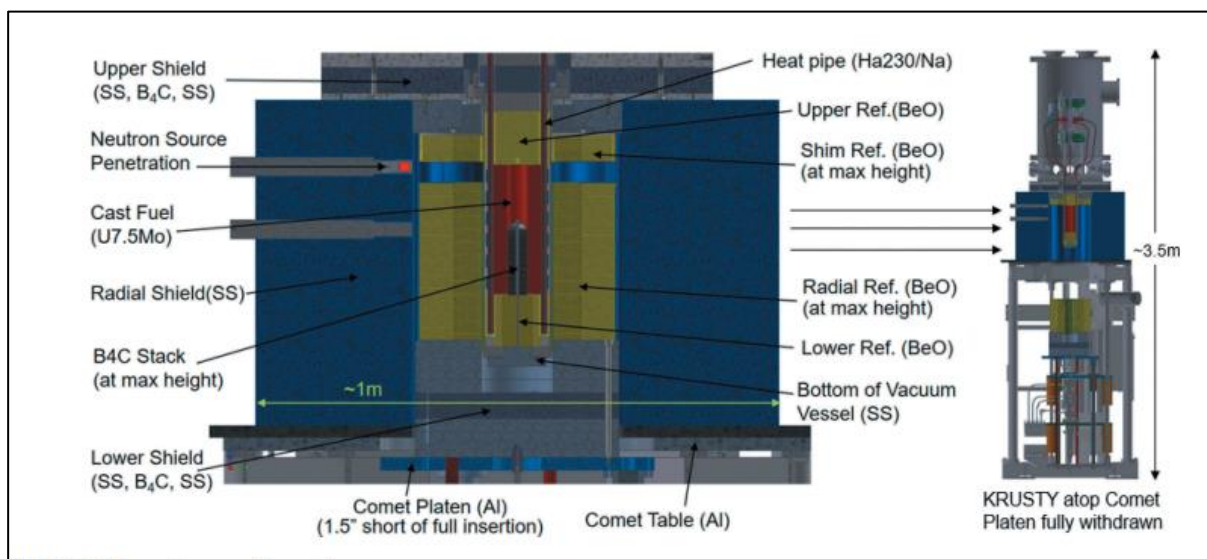
2 Jelenleg ismert energiahordozók működésének különbsége a Földön és a Marson

Ebben a fejezetben a már ismert energiahordozók marsi és földi viselkedése közötti különbségeket fogom bemutatni.

2.1 Energiatermelő opciók

2.1.1 Nukleáris

A nukleáris energia megfelelő opció, megbízható, fedezheti egy marsi kolónia energiaellátását, hosszú távon alkalmazható, ráadásul a hőveszteség a reaktorból felhasználható egyéb ISRU-folyamatokhoz. Mivel víz a bolygó felületén nagyon korlátolt mennyiségben áll a kolónia rendelkezésére, nehezen alkalmazható moderátorként, ha azt helyben kell előállítani, és nem lehet a Földről odaszállítani. Sok negyedik generációs reaktornál a fűtőelem hosszú üzemanyagciklusra van tervezve, ezért elég keveset a Marsra szállítani. Moderátorból azonban több szükséges, ezért célszerű olyat választani, ami a Marson ISRU módon előállítható. A nehézségeket a kiegészített fűtőelemek kezelése, a moderátor (olyan kell, ami ott megtalálható/könnyen előállítható nagy mennyiségben) által felvetett problémák jelentik, illetve kicsi, könnyen összerakható és szállítható reaktorra van szükség, vélhetően mikroreaktorra. Ezek alapján egy marsi kolóniánál negyedik generációs atomreaktorokra van szükség. Ezirányú kutatást jelentenek a Kilopower reaktorok, melyek elektromos teljesítménye 1-10 kW_e közötti skálán mozog. 2018-ban a KRUSTY (Kilopower Reactor Using Stirling Technology) kísérlet ígéretes eredményeket mutatott. Üzemanyagát 93% U-235, és 7% molibdén alkotta. A reaktortartály tömör öntött ötvözet szerkezetből valósult meg, neutronreflektornak BeO-t alkalmaztak, ami csökkenti a γ -sugárzás emisszióját. B₄C szabályozórudak alkotják biztonsági rendszerét, folyékony nátriumos passzív hőcsöveket alkalmaztak, a reaktorzóna hőjét egy vagy több szabad dugattyús Stirling motornak adják át [23].



4. ábra: A KRUSTY reaktor felépítése [45]

Fontos, hogy relatív hosszú üzemanyagciklusú, ISRU rendszerrel előállítható hűtőfolyadékú és moderátorú, nem vízmoderátoros, fokozottan biztonságos, tehát negyedik generációs atomreaktorra van szükség. A reaktor üzemanyagára lehetséges opció a három szerkezetű izotróp részecskékből álló üzemanyag (angolul tri-structural isotropic particle fuel, röviden TRISO). Ennek előnye, hogy biztonságos, magas hőmérséklet esetén is ellenálló, emiatt magas hőmérsékletű reaktoroknál is alkalmazható. HALEU (high assay low enriched uranium) formában van benne hasadóanyag, hosszú üzemanyagciklusú, gazdaságos. A TRISO háromrétegű, szén- és kerámiaalapú rétegekbe beágyazott rendszer, ellenálló a neutronsugárzással, korrózióval, oxidációval és magas hőmérséklettel szemben [24]. Kutatásomban említett kolónia energiaellátásához szükséges energia megtermelésénél alkalmazott reaktorhoz a TRISO üzemanyag alkalmazását szorgalmazom.

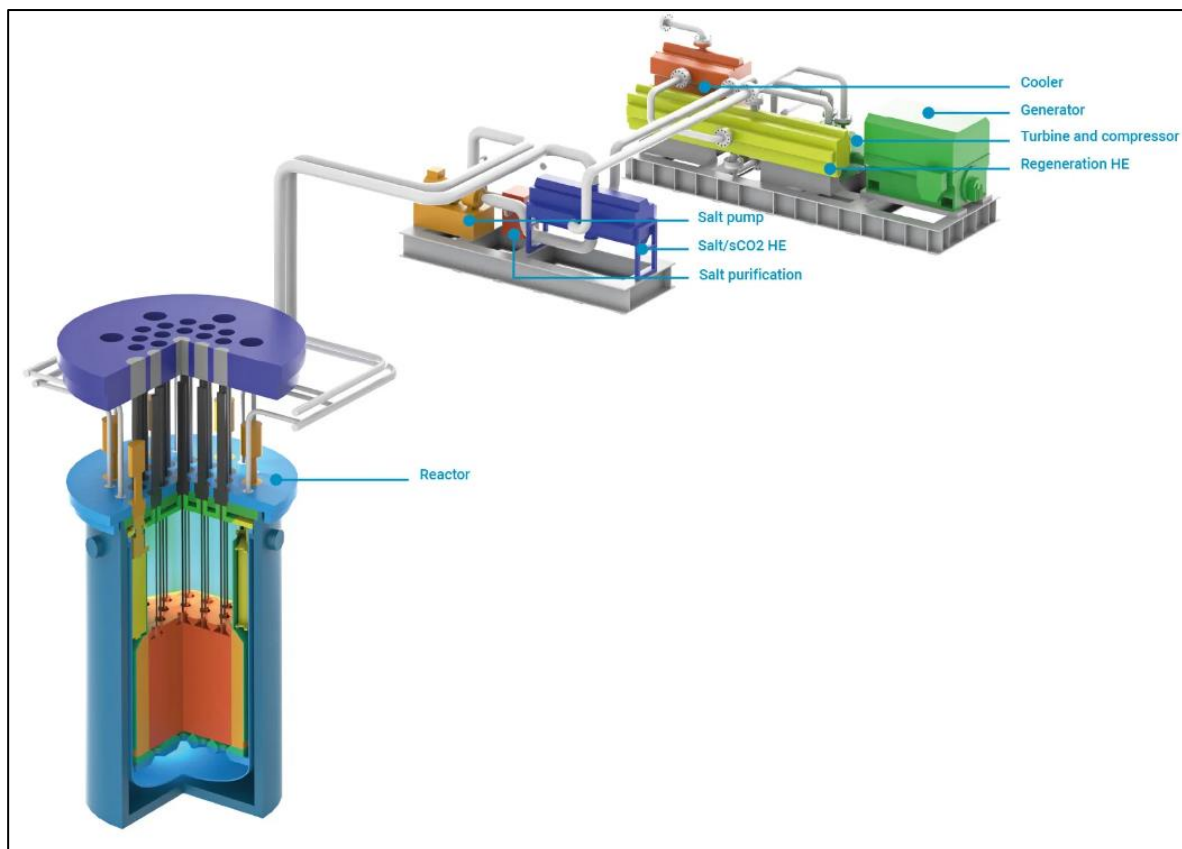
A negyedik generációs atomreaktorok közül egy marsi kolóniához is szóba jöhető reaktortípusok a KRUSTY típuson túl a gázhűtéses (gáz-grafit), illetve a sóolvadékos reaktorok. A gázhűtéses reaktorok magashőmérsékletű reaktorok, a magashőmérsékletű gázhűtésű reaktor (angolul high temperature gas cooled reactor, röviden HTGR) reaktor zónája kavicságyas, mely lehetővé teszi TRISO kavicsok alkalmazását. A hűtőfolyadék CO_2 vagy He, moderátora grafit [25]. Alkalmazása mellett szól, hogy a marsi légkör összetételét nagy mértékben a CO_2 határozza meg, emiatt a hűtőfolyadék könnyedén előállítható ISRU módon. Biztonságossága növelhető víz, mint vészhelyzeti hűtőfolyadék alkalmazásával, azonban mivel víz korlátozott mennyiségben áll rendelkezésünkre, előállítása körülményes és energiaigényes,

a gázhűtéses reaktorok alkalmazási lehetősége korlátozott. Ugyan a CO₂ mint hűtőfolyadék jó ötlet, egy marsi kolóniánál a biztonságot kell előtérbe helyezni.

Ennél előnyösebb megoldásnak ígérkezik a folyékony sóolvadékos reaktor koncepció. Előnyei, hogy biztonságosabb a gázhűtéses reaktornál, valamint kevesebb a keletkező radioaktív melléktermék/végtermék [26]. Itt hűtőközegnek többnyire (fluor-lítium-berillium) FLiBe sóolvadékot alkalmaznak, amit LiF és BeF₂ alkotja [26]. Ennek előnye, hogy a Li és a Be alacsony atomtömegük miatt jó neutronlassítók. A folyékony FLiBe sóolvadék atomenergetikai alkalmazásai nem egyoldalúak, a fúziós plazmafizikában a tokamak tríciumtenyésztésre szolgáló lítiumköpenyére is lehetséges megoldás a FLiBe. Míg abban az esetben a ${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3_1\text{H} + {}^4_2\text{He}$ reakció valósul meg, itt a sóolvadékban jelentősebb a ${}^7_3\text{Li}$ alkalmazása magas neutronabszorpciós keresztmetszetéből kifolyólag [27]. Azt gondolom, hogy egy marsi kolónia számára optimális megoldás lehet egy FLiBe sóolvadékos mikroreaktor. További előnye ennek a reaktor koncepciónak, hogy a LiF és BeF₂ ISRU módon előállítható a Marson. Ez annak köszönhető, hogy lítium-klorid sók marsi detektorokban voltak már detektálva, a Curiosity marsjáró Chemical Camera berendezése alapján pedig fluorapatitok és fluoritok is jelen vannak a bolygón, főképp kalcium-fluorid (CaF₂) formájában, ami fluor előállítására is használatos [28]. Berillium szintűgy előállítható a Marson [29]. Rengeteg kis méretű, kis teljesítményű, de energiatermelési céllal tervezett, könnyen szállítható, hosszú üzemanyagciklusú sóolvadékos mikroreaktor van tervezés alatt, különböző célokkal, de ezek között van, amelyik egy marsi kolónia számára is ideális lehet paramétereit alapján.

Egy ilyen kolónia energiatermelését szolgáltathatja egy, vagy ahhoz hasonló felépítésű és működésű EnergyWell cseh tervezésű mikroreaktor [30]. Ezen reaktor ugyan nem extraterresztriális célra van tervezve, de arra is alkalmas lehet. Elszigetelt településekhez tervezték, és ennek fényében könnyen szállítható, kis méretű. A magas hőmérsékletű sóolvadékos medence típusú reaktor kiemelten magas biztonsági rendszerrel bír. Sóolvadékként FLiBe és nátrium-tetrafluor-borát (NaBF₄) fog szolgálni a tervek szerint. Három hűtőkörből áll, a primer körben FLiBe alkotja az elsődleges hűtőközeget, a reaktorzónában grafitmátrixba ágyazott TRISO üzemanyag van (a grafit a neutronreflektor szerepét is betölti), az egész primer kör egy szállítható egységben helyezkedik el. A terciér körben szuperkritikus állapotú CO₂ tölti be a munkafolyadék szerepét. Ez előnyös, mert CO₂ nagy mennyiségben van a marsi légkörben, ami onnan szétválasztással könnyen kinyerhető. A magas hőmérséklet a reaktor esetében magasabb termodinamikai hatásfokot is eredményez. Biztonságért felelős

rendszerek a B_4C szabályozórudak, illetve üzemzavar esetén $NaBF_4$ engedhető az aktív zónába [30].



5. ábra: az Energy Well reaktor primer, szekunder és terciér köre [30]

A kutatásom szerint a marsi kolónia energiaellátását teljesen vagy részlegesen atomenergia adhatja, mikroreaktor sóolvadék-hűtőközeggel és TRISO üzemanyaggal. Az atomenergiát kiegészíthetik napelemek, és ugyan vannak tervek a szélenergia és a geotermikus energia marsi megvalósítását illetően is [31], kutatásom során csak az atomenergiával és a napenergiával számolok, mert csak ezekhez áll rendelkezésemre elegendő adat, de egyéb energiatermelő lehetőségek további kutatások tárgyát képezhetik.

2.1.2 Napenergia

A napenergia a második legígéretesebb megoldást jelentheti egy marsi kolónia energiaellátásának megtervezéséhez, de nem lehet teljes egészében erre hagyatkozni [31]. Marsjárók, robotok számára megoldható az energiaellátás napelemekkel, de egy kolónia esetében a kolónia lélekszámának növekedésével csökken a napenergia jelentősége az atomenergiához képest, hiszen a kolóniának több olyan energiaigénye is van (pl. oxigénellátás, nyomástartás), amit folyamatosan ki kell elégíteni.

Befolyásoló tényező a kolónia elhelyezkedése, ugyanis az egyenlítőtől távolodva csökken a napenergia kihasználtsága és nő meg ezáltal a nukleáris reaktorok szerepe. A Mars Naptól való távolsága (átlagosan 228 millió km) miatt itt átlagosan a felszínre érő napsugárzás a földfelszíni érték 43%-a [32]. A napenergiában rejlő energiatermelési lehetőséget befolyásolják a hosszú, változatos évszakok, a nagy napi és éves hőingás, illetve a bolygó pályadinamikája. Továbbá a földi állapotokhoz hasonlóan az éjszaka kiesést jelent a napelemek termelésében, valamint nem ugyanakkora a napelemek kihasználtsága sem az év minden szakaszában. A napelemek alkalmazása energiátároló egységek (akkumulátorok) alkalmazását követeli meg, hiszen termelésük nagyban függ az időjárástól [31]. Előny, hogy a marsi regolit magas szilíciumtartalmú, amiből karbotermikus redukcióval, illetve olvasztott regolit elektrolízisével előállítható szilícium [33]. A napelemek ISRU módon előállíthatóak a bolygón, a félvezető gyártása bór szennyezésével történhet, hiszen bór rendelkezésünkre áll a Marson [33].

A legnagyobb kihívást a napenergia számára azonban a marsi porviharok jelentik, amelyek az Opportunity marsjáró esetében is bonyodalmakat okoztak és majdnem a küldetés leállításához vezettek. Probléma továbbá, hogy a porviharok időtartama változó, és több területen is jelentkeznek. A porszemcsék magas vastartalmukból (FeO és Fe_2O_3) kifolyólag viharok során keletkező elektromos mező hatására felmágneseződhetnek, így a naperőművek paneleit nem lehet egyszerűen megtisztítani a portól [34]. Ígéretes megoldási kísérlet az úgynevezett plazmaseprű (angolul plasma broom). A kísérlet során két elektróda és ritkított gáz között nagy áramot hoztak létre, a létrejövő feszültségkülönbség ionizálja a gázt, és plazmaállapot jön létre. A kísérlet során alacsony nyomású CO_2 -gázt alkalmaztak, az alacsony nyomású, magas CO_2 -tartalmú marsi légkör mintájára, így a kísérlet hű demonstrálása volt a marsi körülmények közötti lehetséges alkalmazásnak. A kísérlet hatékonyságát igazolja, hogy a lerakódott porszemcsék több, mint 90%-át el tudták távolítani a 10 cm^2 nagyságrendű felületről néhány plazmanyaláb alkalmazásával [34].

2.1.3 Geotermikus energia

A geotermikus energia is opció lehet egy marsi kolónia energiaellátásának megtermelésére, azonban kevés erre irányuló kutatás és még kevesebb eredmény van, ezért kutatásomban szereplő kolónia esetében ezt az opciót elvettem.

Az InSight projekt keretében szeizmikus mozgásokat észleltek, melyek elméletben hasznosak lehetnek energiatermelés szempontjából. Bizonyos okokból jobban is tudna működni a geotermikus energia a Marson, mint a Földön, például az alacsony légköri nyomás

miatt nagyobb mennyiségű gőz juthat a turbinához. A geotermikus energiatermelés előnye, hogy víz nélkül is megoldható, cseppfolyós CO₂-vel, ami a Marson elérhető, és ideális hozzá az alacsony felszíni hőmérséklet. Az alacsony felszíni hőmérséklet további előnye, hogy a munkaközeget a visszapumpálás előtt jobban le lehet hűteni, és ezért a folyamat nagyobb hatékonysággal végezhető [32].

2.1.4 Szélenergia

A szélenergiában is van lehetőség, mint egy marsi kolónia számára energiát termelő rendszer, de a marsi működés lehetősége számos dologban eltér a földitől. A ritkább (<2%) légkör nagy turbinákat igényel. Emiatt a sűrűségkülönbség miatt egy, a Földön nagy sebességű szél a Mars felszínén gyengének tekinthető. A szélenergia előnye, hogy nincs különleges nyersanyag-igénye, szemben például a nap- és atomenergiával – ugyanakkor a laptopokhoz szükséges műanyag is, aminek ISRU módon történő előállítására további kérdéseket vet fel. További előnye, hogy olyankor, amikor a napelemek kihasználtsága minimális – porviharok idején vagy éjszaka – termel a legtöbbet, ezért elméletben napelemekkel és szélenergia-erőművekkel megoldható egy kolónia energiaellátása, ugyanakkor, mivel erre vonatkozóan nincs elég adat, kutatásom során nem foglalkozok a szélenergiával [32].

3 A marsi kolóniák

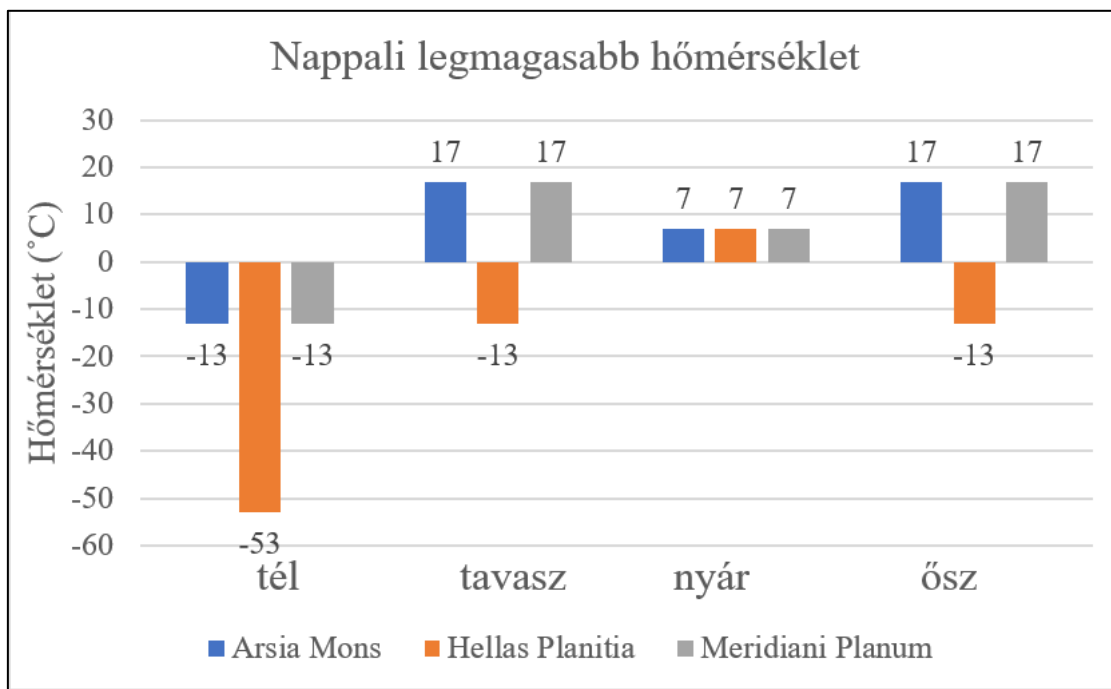
Ebben a fejezetben a marsi kolóniák lehetséges helyét és méretét mutatom be.

3.1 A kolónia elhelyezkedése

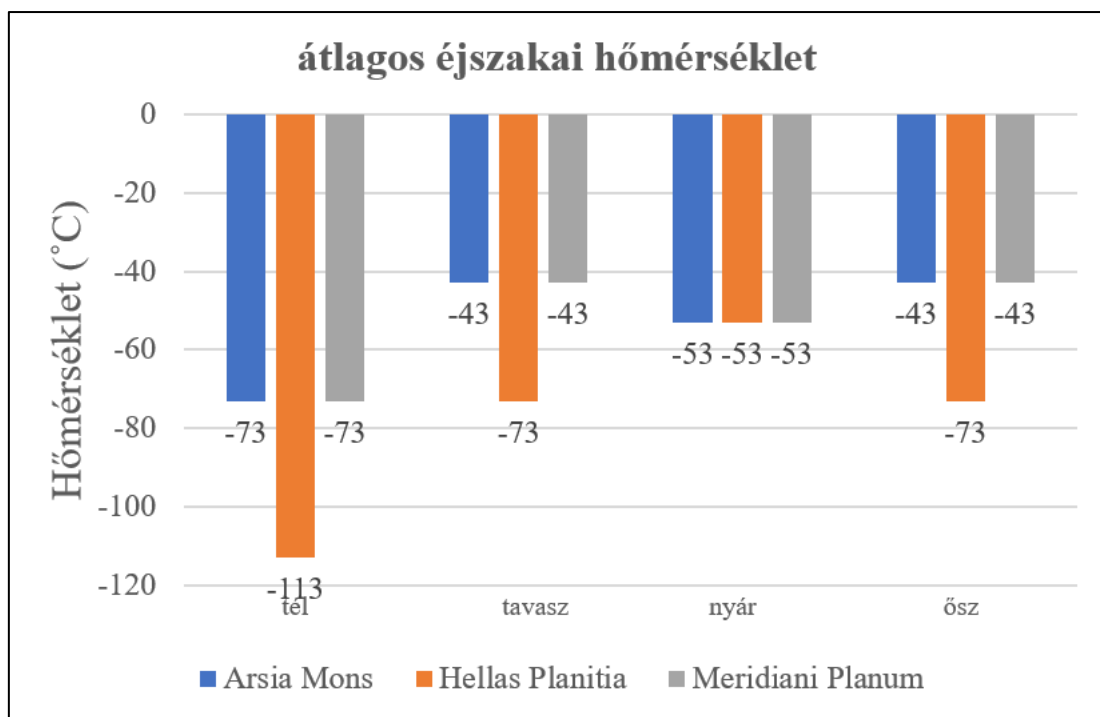
Mivel még nincsen konkrét terv egy marsi kolónia elhelyezkedésére, kutatásom során összegeztem, mik azok, amelyek fontos szempontok egy marsi kolónia földrajzi elhelyezkedésében, és az eddig rendelkezésre álló adatok alapján a Mars mely területei jelenthetnek potenciális helyet egy kolónia számára. Egy egyenlítő menti területen fekvő kolónia előnye, hogy ott magasabb a hőmérséklet, valamint a napsugárzás miatt ott maximalizálható a napelemek kihasználtsága. Ugyanakkor a megnövekedett kozmikus sugárzás miatt előnyös olyan területet választani, ami valamilyen módon árnyékolással bír a kozmikus sugárzással szemben.

További előnyös szempont, hogy víz mennyire van a területen, ehhez neutrondetektorok és gamma-spektrométerek felvételeit felhasználva fontoltam meg a helyszínt a kolónia számára. Ebben az esetben előnyös, ha kristályok formájában vagy jégként van jelen a talajban víz.

A kutatásom során három helyszínt javaslok egy marsi kolónia számára, az Arsia Mons, a Hellas Planitia és a Meridiani Planum. A 6-7. ábrákon látható a három, általam javasolt helyszínen az évszakokban az átlagos nappali hőmérséklet, illetve az átlagos éjszakai hőmérséklet.



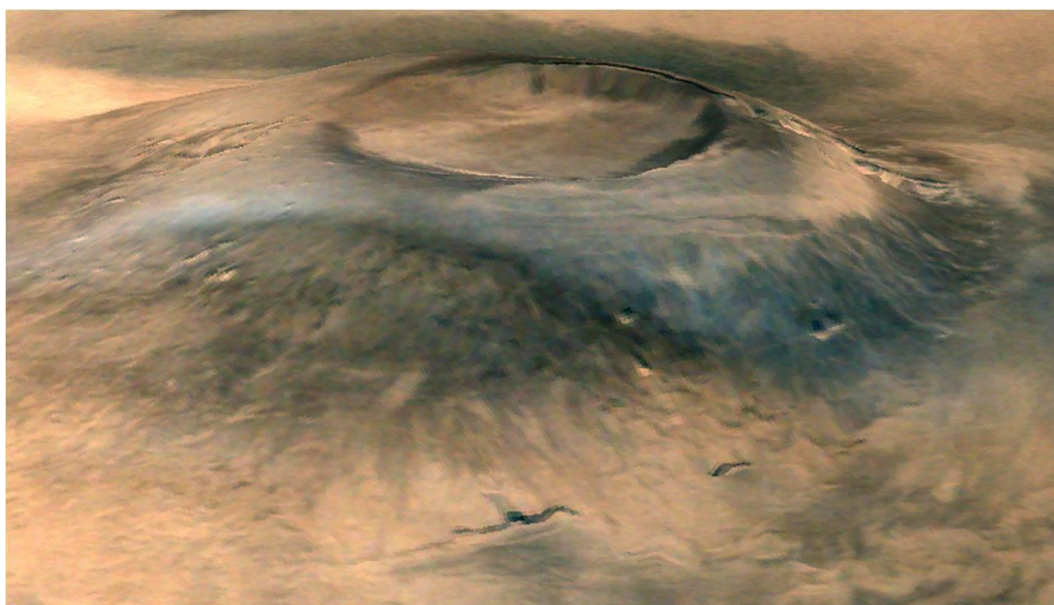
6. ábra: Nappali legmagasabb hőmérséklet a kolóniák lehetséges helyszínein



7. ábra: Éjszakai hőmérséklet a kolóniák lehetséges helyszínein

3.1.1 Arsia Mons

Az Arsia Mons alacsony lejtésű, kimerült pajzsvulkán, mely a magma tározójának kimerülése után zuhant meg, a területet összeomlás metszi. Itt a légnyomás a Marshoz képest magas, 107 Pa. Térfogata a földi Mauna Loa harmincszorosa. A vulkán északnyugati szárnya a délkeleti oldaltól jelentősen eltér, abban a tekintetben, hogy csak az egyik oldalon vannak olyan vonások, amik a gleccserek bizonyítékát jelenthetik [35]. Az Arsia Mons az egyenlítő környékén fekszik, emiatt mind a besugárzási adatok, mind az átlaghőmérséklet ígéretes [36]. Ugyanakkor az Odyssey 2001-es gamma-spektrométere alapján víz errefelé elenyésző mértékben található [37].



8. ábra: A Mars Orbiter Mission fényképe az Arsia Monsról [59]

3.1.2 Hellas Planitia

A Hellas Planitia a Mars déli féltekéjén fekvő kráter, egyike a Naprendszer ismert legnagyobb krátéréinek. A Mars legmélyebb pontja (7152 m), így a légnyomás is itt a legmagasabb a bolygón. Az ESA OMEGA marsi óra és a NASA CRISM képalkotó spektrométer berendezése alapján a területen nagy mértékben találhatóak víztartalmú agyagos kőzetek vas- és magnéziumtartalommal [38]. Ezen a területen a nem sarkvidéki területekhez képest kiemelkedően sok víz található [37], valamint a kráter részben árnyékol a kozmikus

sugárzással szemben, ez mind előnyös egy kolónia számára - ugyanakkor magasabb itt a hőmérséklet [36], mint a vízben gazdag sarkvidéki területeken.



9. ábra: A Hellas Planitia a Nagy Felbontású Sztereo Kamera felvételén (angolul High Resolution Stereo Camera, röviden HRSC) [86]

3.1.3 Meridiani Planum

A Meridiani Planum egy, a Mars egyenlítője környékén elhelyezkedő síkság, mely magas víztartalmú üledékes kőzet felett van. Nem sarkközei vidékek közül ez az egyik, víztartalmú kőzetekben leggazdagabb terület. A Meridiani Planum a Mars egyik legalaposabban vizsgált területe, főleg az Opportunity marsjáró vizsgálta éveken keresztül [39]. Egyenlítő-menti fekvéséből adódóan magas az átlaghőmérséklet [36], és a besugárzási értékek is. A síkság területén közel 20 kráter van [39], amik lehetnek potenciális lakóhelyek a kolóniák számára, mivel részleges védelmet nyújtanak a kozmikus sugárzással szemben.



10. ábra: A Meridiani Planum [87]

Mivel mindhárom helyszín ígéretes, ugyanakkor más-más előnyekkel és hátrányokkal rendelkeznek, kutatásom során mindhárommal számolok, amennyiben szükséges.

3.2 A kolóniák mérete

Salotti számításai szerint egy fenntartható, minimális lélekszámú kolónia 110 főből áll [40]. Ezen kutatás alapján én is 110 fővel számoltam a kolónia igényeit, 496 napos ott-tartózkodással. A kolónia méretét, tevékenységét befolyásoló tényezők az erőforrások elérhetősége, az ISRU tevékenységre alkalmas lehetőségek, a termelési kapacitás egy adott időn belül, és az energiatermelés lehetőségei [40].

4 A kolónia energiefelhasználó berendezéseinek bemutatása

4.1 A kolónia lakóhelye

A 3. fejezetben már megemlítettem a kutatásom során a kolónia számára ideális helyeket. A kolóniák kráterekben helyezkednek el, ahol az átlagos légköri nyomás a felszínhez képest nagyobb és árnyékolva vannak a kozmikus sugárzással szemben. Mivel az általam javasolt három helyszínen jelentősek a felszíni hőmérsékletbeli eltérések, a fűtési igények során ezekkel az adatokkal számoltam. Mivel az éjszakai hőmérsékletre vonatkozóan kevés, és a nappalinál pontatlanabb adatok állnak rendelkezésünkre, 60 °C-os napi hőingással számoltam.

Egy marsi kolónia lehetséges lakóhelye egy 3D nyomtatott épületekből álló település lenne [41], melynek helyszínére a korábbiakban javaslatot tettem. Célszerű a kolóniát kráter, egykori vulkán árnyékolásába helyezni a kozmikus sugárzás elleni védekezés szempontjából. Jelenleg ezzel foglalkozó projekt a NASA CHAPEA (Crew Health and Performance Exploration Analog), illetve a Mars Dune Alpha. Ez egy marsi élőhely demonstrálása, ahol 4 asztronauta tartózkodik a Földön közel marsi körülmények között [41]. Egy lehetséges marsi épületen belül a legjelentősebb energiafelhasználással rendelkező eszközök, amiket eddig kutatásomban nem említettem, a fűtés, a légszilip, a nyomás és a levegő biztosítása, számítógépek tudományos és kommunikációs célra, világítás, 3D nyomtatás, a víz melegítése, illetve az élelmiszerek tárolása.

4.2 Oxigén előállítása

Mivel a Mars légkörében az oxigén igen elenyésző mértékben van jelen (0,174%) [46], a légköri oxigén bármilyen nemű felhasználására nem lehet építkezni, a kolónia méretétől függetlenül szükség van oxigéntermelő berendezésre. Az oxigén előállítására lehetséges megoldás a CO₂ magashőmérsékletű elektrolízise. A CO₂ magashőmérsékletű elektrolízisével mind az élet fenntartásához, mind üzemanyag előállításához szükséges oxigént elő lehet állítani. A szén-dioxid elektrolíziséhez a berendezés már a Földön is működő kompressziós rendszert alkalmaz. A magashőmérsékletű elektrolízisnek az alacsony hőmérsékletűvel (angolul low temperature electrolysis, röviden LTE) számos előnye van, többek között nagyobb termodinamikai határfok, kisebb aktivációs energia, illetve az anód jobb vezetőképessége magas hőmérsékleten. A magashőmérsékletű elektrolízis 750 C°-os hőmérséklet felett működik, ezen a hőmérsékleten az elektrolit anyagok ionvezetők. A magashőmérsékletű elektrolízis kihívása, hogy mind elektromos, mind termikus energiát igényel, előzetes tervek alapján RTG rendszert alkalmaznának a magas hőmérséklet biztosítására [47].

A szén-dioxid magashőmérsékletű elektrolízisén alapul a Marsi Oxigén In-Situ Erőforrás Felhasználás (angolul Mars Oxygen In-Situ Resource Utilization Experiment, röviden MOXIE), mely célja a marsi oxigéntermelés demonstrálása. Ez a projekt az ún. Big MOXIE elődje. Ebben a projektben már cél lesz a szükséges oxigén megtermelése és tárolása már a Marsra érkezés előtt. A MOXIE projekt és az ezen elven működő rendszerek rengeteg kihívást tartogatnak, például az elektrolízishez szükséges nyomás biztosítása, a termikus energiaigény, illetve hátráltató tényező, hogy a folyamat lassú [48].

Alternatív lehetőség az oxigén marsi körülmények között történő előállítására magashőmérsékletű elektrolízis helyett plazmafizikai technika alkalmazása. Az University of Antwerp és az University of Lisbon egymástól függetlenül fejlesztett ki, a magashőmérsékletű elektrolízisnél hatékonyabb eljárást oxigén előállítására az ESA Open Space Innovation Platform keretében. A folyamat a vezető membránok és nem termikus plazma elvén alapul. Egy plazmareaktorban mesterségesen előállították a marsi légkör összetételét (96% CO₂, 2% N₂, 2% Ar), majd elektronnyalábbal, mikrohullámok, rádióhullámok, valamint egyenáram segítségével plazmaállapotot értek el. A plazmában mesterséges villámok szakítják szét a molekulákat, illetve ionizáció történik. A keletkezett részecskék új molekulák, kötések keletkezését teszik lehetővé. Ilyen alapon O₂, CO és nitrogén-oxidokat tudtak előállítani. Előnye, hogy a vékony marsi légkörben ideális a nyomás a plazma működéséhez, és azon állapot elektronnyalábokkal történő elérése. A kísérlet során 1kWh fogyasztással egy óra alatt 47 g O₂-t tudtak előállítani, ez a MOXIE-hoz képest durván harmincszor gyorsabb működés. Emellett a MOXIE az elektrolízis fogyasztásának mindössze 10%-át teszi ki.

Az oxigén mellett jelentős a nitrogén-oxid molekulák keletkezése, ezzel lehetőség nyílik nitrogénalapú trágyák előállítására is a talaj alapú marsi mezőgazdaság részére is. Mivel nagy létszámú kolóniáról van szó, a termelendő oxigén a kísérletben megtermelt sokszorososa, több berendezésre van szükség. A berendezés működése folyamatos [49]. Kihívást jelent még az oxigén tárolása, melyről a későbbiekben ejtek még szót. Ugyan az oxigén előállításának ezen módszere még nagyon friss, és kevés kísérlet valósult meg ennek kapcsán, a kísérletek sikerrel jártak, így reálisnak látom, hogy hosszabb távon a fejlesztés fázisból az alkalmazásba kerül a technológia, mire a marsi kolónia kérdése is közelebb feladat lesz.

4.3 Mezőgazdaság, élelmiszer előállítása

A marsi talaj, a hőmérséklet és az intenzív sugárzás miatt az élelmiszer előállítás a korlátolt, és alternatív mezőgazdasági tevékenységet igényel. Mivel az állattartás nem jöhet szóba, mesterségesen előállított hús vagy növényi alapú táplálkozás lehet megoldás, kutatásom során én utóbbival számoltam. A kutatásomban szereplő növényeket én határoztam meg pontos tervek hiányában annak függvényében, hogy növényi táplálkozással is elegendő legyen a fehérjebevitel.

A legfőbb kihívást a regolit jelenti a benne lévő mérgező perklorátvegyületek miatt (ClO₄⁻), ezért két opció adódik, egy hidroponikus mezőgazdasági rendszer kialakítása vagy a marsi

talaj megtisztítása és termőképessé alakítása. Mivel a hidroponikus rendszer rengeteg olyan eszközt igényel, amit a Marsra szállítani nem gazdaságos, 3D nyomtatással való előállítás pedig nagyon anyag- és energiaigényes [50], kutatásom során a marsi talaj átalakításával számoltam.

A regolit átlagosan 1%-os perkloráttartalommal rendelkezik, általában kalcium-diperklorát formájában ($\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$) [51]. Ezen vegyület felhasználható ipari folyamatok, üzemanyag előállítás során. A talaj megtisztítása reverz ozmózissal történik [52], a kalcium-perklorát vízben oldódó vegyület ($\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). Itt a kalcium-diperklorát kristályosodik, és kiválik a vízzel együtt.

A talaj megtisztítása után a következő folyamat a tápanyagok biztosítása és a trágyázás. Trágyázásra emberi melléktermék hasznosítható, a nitrogénvegyületek előállítására egy opció az oxigén előállításánál már említett plazmareaktor [53]. Ugyanakkor, mint azt számításaim bizonyítják (lásd 5. fejezet), a jelenleg alkalmazott teljesítményű plazmareaktorral még nem lehet annyi nitrogént (NO_x) előállítani, amennyi szükséges lehet.

Mivel a megnövekedett sugárzás negatív hatást gyakorol a növényekre [54], a sugárzás árnyékolása szükséges. Ez megoldható a lakóhelyhez hasonló 3D-nyomtatott épületekkel. A fényt LED-ekkel lehet biztosítani, azonban megfelelő kísérletek és adatok hiányában erre vonatkozóan nem tudok számításokat adni. A fűtést a lakóhelyéhez hasonló módon kell biztosítani a mezőgazdasági épületekhez hasonlóan.

A Marson termesztendő növények a rizs, a hagyma, a paradicsom, a lencse, a spenót, a búza, a spirulina, a szója, a burgonya, az édesburgonya, a mogyoró és a kukorica.[55] Ezen növények kiválasztásánál a szempont egy, a lehetőségekhez mérten változatos étrend kialakítása, illetve a szükséges fehérje- és vasbevitel húsfogyasztás nélkül (pl. spirulina). A szükséges mennyiségeknél és az ehhez szükséges területigénynél a számításaim során marsi adatok hiányában földi adatokkal számoltam, a megnövekedett fizikai tevékenység miatt (közel másfélszeres kalóriabevitel) [56] nagyobb mennyiségű étellel. A spirulina alga, amely jelentős fehérjeforrás lehet, amit a Marson fotobioreaktorban (angolul photobioreactor, röviden PBR) lehet előállítani [57], a többi növény a marsi talaj reverz ozmózissal történő átalakítását követően a talaj alapú termeléssel termesztendő. A fotobioreaktorhoz szükségesek LED-ek, ennek energiaigényével is számoltam.

4.4 Víz kinyerése a Marson

Számos célra szükséges víz előállítása a Marson, amik közül a legjelentősebb a mezőgazdasági tevékenység. A talaj átalakításához szükséges víz kinyerése előre szükséges, és a reverz ozmózist csak egyszer kell végrehajtani. Az öntözés ugyan folyamatos tevékenység, de érdemes a szükséges vízmennyiséget előre kinyerni, mert nincsen adatunk, hogy egy marsi környezetben is ugyanolyan vízigénnyel rendelkeznek-e a növények, mint a Földön. A talajban ásványok formájában jelen lévő víz kinyerésére többféle kísérlet, kutatás irányul, legismertebb talán a Mars Regolith Water Extractor (MRWE) [58]. Az ilyen kísérleteket magas, 200-500 °C-os hőmérsékleten valósítják meg.

Az egyik erre alkalmas rendszer esetében a talajmintát futószalagon túlnyomásos burkolat alá szállítjuk, ahol a minta mikrohullámú sugárzásnak van kitéve. A sugárzás forrása 2, a burkolat tetején lévő magnetron. A mikrohullámok kiszabadítják a vízmolekulákat a talajból és azok a burkolat tetején kondenzálódnak. Ezen rendszer előnye, hogy mivel a molekuláknak az energiaátadás közvetlenül történik, nagy hatékonysággal tud működni. A hatékonyabb működés érdekében a rendszer belső motorját el kell izolálni.

A MACS (Mars Atmosphere Chemistry Simulation) kamra egy 200 l-es kísérleti kamra, amiben a marsi felszíni feltételeket szimulálják, így nyomási és légköri feltételeket is biztosítva vannak a kísérleti berendezésben.[60] Későbbi számításom során ezt a rendszert vettem alapul. További kutatások témája lehet ezen rendszerben a magas hőmérséklet hosszú távú fenntartásának biztosítása, illetve a hatásfok növelése.

4.5 Nyersanyag kinyerése

Egy marsi kolónia kialakításának aktualitását növeli, hogy a bolygón rengeteg emberi hasznosításra alkalmas érc van jelen. Ugyanakkor mivel az előállításukban rengeteg kihívás rejlik, és nem ismeretes, hogy milyen ércből pontosan mennyit szükséges előállítani, számítás elvégzése helyett csak a fémek rövid ismertetését teszem meg.

Mélyégi magmás folyamatok révén mélyen képlékeny réz, króm, vas és nikkell van jelen a bolygón, melyek lehűlés után ásványokat képeznek. Az ezen ásványképző folyamatokban részt venni nem tudó elemek inkompatibilisek. Rengeteg, az emberiség számára hasznosítható fém és ritkaföldfém van jelen a Marson, például a szupravezető fémötvözetek előállítására alkalmas nióbbium, illetve elektronikai célokra használható lantan, európpium és neodímium. A

magma lehülését követően a kristályosodott és fagyott érceken túl maradnak folyékony formában is fémek. Ólom, ezüst, bizmut és ón is képződik ilyen folyamatok során [61].

4.6 Sterilizálás

A Marson zajló kutatói tevékenységek megkövetel biztonsági intézkedéseket, úgymint a kolónia tisztítása, sterilizálása, az idegen testek, mint talaj, kőzetek, légköri minták sterilizálása. Ehhez a nagy karanténlétesítmények alkalmazása nem praktikus, így egyéb módszer használata szükséges. Lehetséges módszerek sterilizálásra a gamma-besugárzás, a száraz hő sterilizáció, a nedves vagy gőzzel történő hő sterilizáció, valamint az elektronnyaláb technika alkalmazása. Gázokat és folyadékokat nem érdemes alkalmazni, mert azok nem hatolnak a céltárgy belsejébe [62].

A legnagyobb hatékonyság miatt kutatásom során gamma-besugárzással számoltam. A módszer kihívása azonban, hogy a Marson a lehetséges mikroorganizmusok több sugárzást kapnak, ezért jobban ellenállók. A gamma-besugárzás ^{60}Co -izotóp (gamma-bomló) alkalmazásával történik [63]. A ^{60}Co -izotóp mesterséges radioaktív izotóp, előállítása rendszerint kutatóreaktorokban (tenyésztőreaktorokban) történik ^{59}Co gyors neutronokkal történő besugárzásával. ^{59}Co kis mértékben fellelhető a Marson is [64], de mivel kitermelése energiaigényes, a Földről való hozatal valószínűleg célszerűbb.

Egy marsi tenyésztőreaktor érdekes kérdéseket vet fel, például lehetséges-e egy energiatermelő céllal működő reaktor primer körén belül leágazó ágot létrehozni izotóptenyésztés céljával. Javaslatom szerint egy külön tenyésztőreaktor telepítése vethető fel. Negyedik generációs kis moduláris vagy mikroreaktorok lehetnek alkalmasak ezen célra, és mivel a ^{59}Co besugárzása gyors neutronokat igényel, a lehetséges reaktortípusok lehetnek gázhűtésű gyorsreaktorok, amiket eleve eredetileg tenyésztőreaktornak fejlesztettek, illetve a folyékony fém hűtésű gyorsreaktor is megoldás lehet.

Az OKLO Inc. által fejlesztett mikroreaktor, az AURORA ugyan földi célra lett tervezve, egy ahhoz hasonló prototípus egy extraterresztrikus kolónia számára is alkalmas lehet izotóptenyésztés céljából. Az AURORA egy gyorsreaktor (FR), nincs moderátora, folyékony fém hűtésű. A teljesítménye $\text{MW}(t)/\text{MW}(e)=4/1,5$. A kis teljesítmény miatt a remanens hőteljesítmény is alacsony, kis méretű, és teljesítménysűrűsége is alacsony. Nincs szüksége víz hűtőközegre, a hőelvonás száraz módon van megvalósítva. Ez is előnyös, mert a Marson a víz

mennyisége kevés, kinyerése pedig körülményes. Az általam felvetett marsi kutatóreaktor kifejlesztése akár további kutatások célja lehet [65].

4.7 Tárolóegységek, energiatárolás

A marsi kolónia esetében sem energia-, sem anyagtárolásról nem lehet konkrét számításokat végezni, ameddig nem ismerjük a termelés-fogyasztás arányát, és nincs adatunk az ott tartózkodásról és a tényleges fogyasztásról. Mechanikus energiatárolás esetében opció a sűrített levegős tárolás, például marsi barlangokban létre lehet hozni mesterséges nyomástartó kamrákat. Szintén opció a lendkerék is. Vegyi tárolásnál, akkumulátoroknál opció a Ni-Fe akkumulátor, ennek előnye, hogy hosszú távú marsi tartózkodás esetén mind a nikkelt, mind a vas nyersanyag megtalálható és kitermelhető a bolygón. Ugyanakkor kihívást jelent az ezen nyersanyagok bányászatához szükséges eszközök megépítésének módja a Marson. Emellett az egyre elterjedtebb lítiumion akkumulátorok is lehetőséget jelenthetnek a Marson az energiatárolásra. Oxigént magas nyomású (200 bar) tartályokban lehet majd tárolni [66]. Jelenleg számításaim (lásd 5. fejezet) szerint egy 110 fős kolónia esetében naponta kb. 390 kg oxigén tárolása szükséges.

4.8 Hulladékkezelés

Jelenleg kevés és nagyon kezdeti fázisban lévő terv van egy marsi kolónia hulladékkezelését illetően. Dolgozatom elkészítése során lehetséges megoldások után is kutattam.

A hulladék kezelése függ összetételétől és újrahasznosításra való alkalmasságától. A nem újrahasznosítható hulladékok esetében opció a helyszíni lerakás, a kilövés és a Nap körül biztos pályára való állítás úgy, hogy az ne akadályozzon további missziókat és pályájukat [67]. Ez a megoldás a lehetséges veszélyes hulladékok, a legénység kellei és az EVA (extravehicular activity) kezelésére. Ugyanakkor a hulladékkezelés ezen módja fenntarthatósági kérdéseket vet fel, ebből a szempontból nem ez a legelőnyösebb módszer az űrszemét kezelésére.

Mivel nincsenek adatok egy marsi kolónia esetében ezekre, későbbi számításaimat az ISS 7 emberre és 210 napra vonatkozó adatai alapján végeztem, 496 napos ott tartózkodásra és 110 főre vetítve [68]. Az emberi eredetű hulladék, például a vizelet a marsi talajgazdálkodásban kerülhet felhasználásra, melyet a mezőgazdaságnál fogok részletesebben tárgyalni. Az élelmiszerhulladék a komposztálás során kerülhet felhasználásra.

Kutatásom során a ruhanemű hulladék feldolgozására eljárást dolgoztam ki, amivel 3D nyomtatáshoz alapanyagot lehet előállítani. A 3D nyomtatásban alkalmaznak akrilnitril-butadién-sztirolt, és amennyiben a kolónia lakosainak ruhája poliakrilnitril szálanyagokból készül, a poliakrilnitrilből előállítható akrilnitril-butadién-sztirol, ami felhasználható a kolónia számára, mint 3D nyomtatáshoz alapanyag. A ruhaiparban alkalmaznak poliakrilnitril (PAN) $((C_3H_3N)_n)$ szálanyagokat, melyek ellenállóképességüknek [69] köszönhetően részlegesen alkalmazhatóak marsi ruházat (nem védőruha) gyártásához. A 3D nyomtatáshoz egy lehetséges alapanyag az akrilnitril-butadién-sztirol $((C_8H_8 * C_4H_6 * C_3H_3N)_n)$, melynek előnye, hogy jó ütésálló, nagy keménységű, jó szilárdságú, jó vegyálló, valamint hőre tágul. Mivel a $-20\text{ °C} - 80\text{ °C}$ hőmérsékleti intervallumon ideális, ezen anyagból előállított 3D-nyomtatott termékek beltéri használatra alkalmasak [70].

Az akrilnitril-butadién-sztirol előállítható sztirol és akrilnitril polibutadién jelenlétében történő polimerizációjával [71].

Ehhez sztirol előállítható etilbenzol dehidrogenizálásával [72] ($C_8H_{10} \rightarrow H_2 + C_8H_8$).

Az etilbenzol etilénből és benzolból előállítható katalizátor jelenlétében Friedel-Crafts reakcióval [73]. Ezen folyamathoz a katalizátor lehet vasalapú [73], ami a bolygón kinyerhető vas miatt előnyös.

Az etilbenzol előállítható benzolból és etilénből ($C_6H_6 + H_2C=CH_2 \rightarrow C_6H_5-CH_2-CH_3$).

Ezen reakcióhoz a benzol a Curiosity marsjáró adatai alapján kis mennyiségben megtalálható a Marson [74], etilént szén-monoxid és hidrogén reakciójával elő lehet állítani vas katalizátor jelenlétében [75] ($2CO + 4H_2 \rightarrow C_2H_4 + 2H_2O$).

Az etilén előállításához szükséges szén-monoxid melléktermék a plazmatechnológiával előállított oxigén előállításánál is: $2CO_2 \rightarrow 2CO + O_2$.

Akrilnitril előállítható PAN szálak láncainak depolimerizációjával [76].

A polibutadién az 1,3-butadién polimere, ebből fémferrit katalizátor jelenlétében előállítható [77], egyéb alkalmazása például a gyurmaragasztó.

Ezen reakciókkal elő lehet állítani a ruhahulladék egy komponenséből 3D nyomtatáshoz szükséges anyagot.

4.9 Kommunikáció

Jelenleg a Marssal való kommunikációért a NASA Deep Space Network (DSP) rendszere felel. A hálózat a Jet Propulsion Laboratory fejlesztése. A Földön 3 helyen (California, Madrid,

Canberra) parabola reflektor antennákkal működik, célja az űreszközökről telemetriai adatok szerzése, parancsok továbbítása az űrhajóknak, szoftvermódosítások feltöltése az űrhajók rendszerébe, a járművek helyzetének és sebességének nyomon követése, illetve rádióhullámok változásainak mérése rádiócsillagászati kísérletekhez [78]. Mivel a helyi kommunikáció egy marsi kolónia esetében bizonytalan, további adatokra van szükség, és kutatásom során nem számoltam ezzel.

5 Egy marsi kolónia energiafogyasztásának számítása

Ebben a fejezetben a marsi kolónia energiafogyasztására irányuló számításaimat és azok eredményét mutatom be.

5.1 A kolónia fűtése

A 3D nyomtatott marsi házak lehetséges nyersanyaga a regolit, ennek hővezetési tényezőjével számoltam. A számítás során a konstansok (fajhő, hővezetési tényező) értékét állandónak tekintettem. Mivel nem áll rendelkezésemre pontos adat arról, hogyan alakul a felszíni hőmérséklet a nap folyamán, ezért úgy tekintettem, hogy a hőmérséklet hajnal 4 és 8 óra között a legalacsonyabb, illetve 12 és 18 órakor a legmagasabb. Számításaimban pontatlanságot eredményezhet, hogy adatok hiányában nem számoltam ki pontosan, melyik helyszínen mikor van a napfelkelte és a naplemente. Mivel mindhárom javasolt helyszín (Hellas Planitia, Arsia Mons, Meridiani Planum) az egyenlítő környékén található, számításaim során a nappalok és éjszakák hosszát közel állandónak tekintettem. Számításaim elérhető adatok alapján készítettem el, azonban abban az esetben, amikor nem álltak rendelkezésre kellő minőségű adatok, akkor valamilyen közelítéssel éltem.

Az 1-es egyenletben kiszámolom a belső levegő tömegét, amit fel kell fűteni. A 2-es egyenletben kiszámolom a fűtés energiaigényét a levegő adott hőmérsékletre való felmelegítéséből és a regolit fal szigetelését figyelembe véve.

$$pV = \left(\frac{m}{M}\right)RT \quad 1$$

$$Q[kWh] = \frac{\Delta T(cm - kdt)}{3.6 * 10^6} \quad 2$$

ahol

p = a marsi házban a nyomás, amit 10^5 Pa-nak tekintettem.

ΔT = a kolónia belső hőmérséklete és a felszíni hőmérséklet közötti különbség, ahol a belső hőmérsékletet 15°C -nak vettem.

c = a levegő fajhője, amit $1,01 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ – nek vettem.

V = a marsi házak belső terének térfogata, amit 4400 m^3 -nek tekintettem.

m = a belső légtömeg.

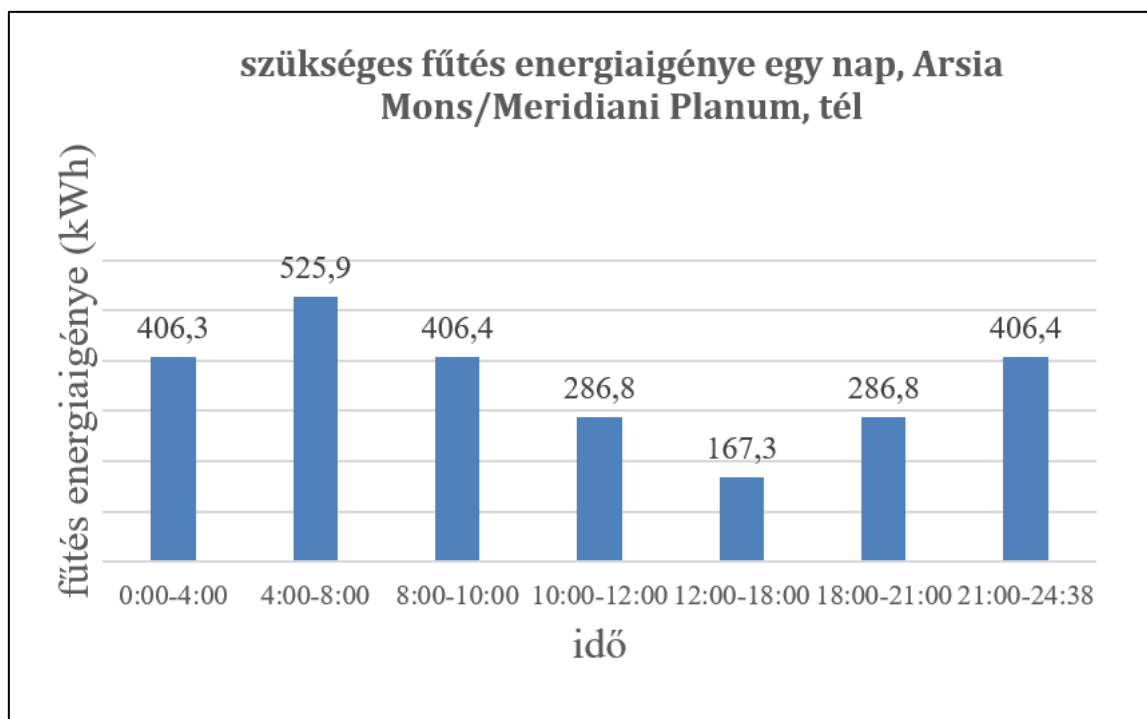
M = a levegő moláris tömege, amit $0,029 \text{ kg/mol}$ -nak tekintettem.

R = az egyetemes gázállandó, amit $8,314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ -nek vettem.

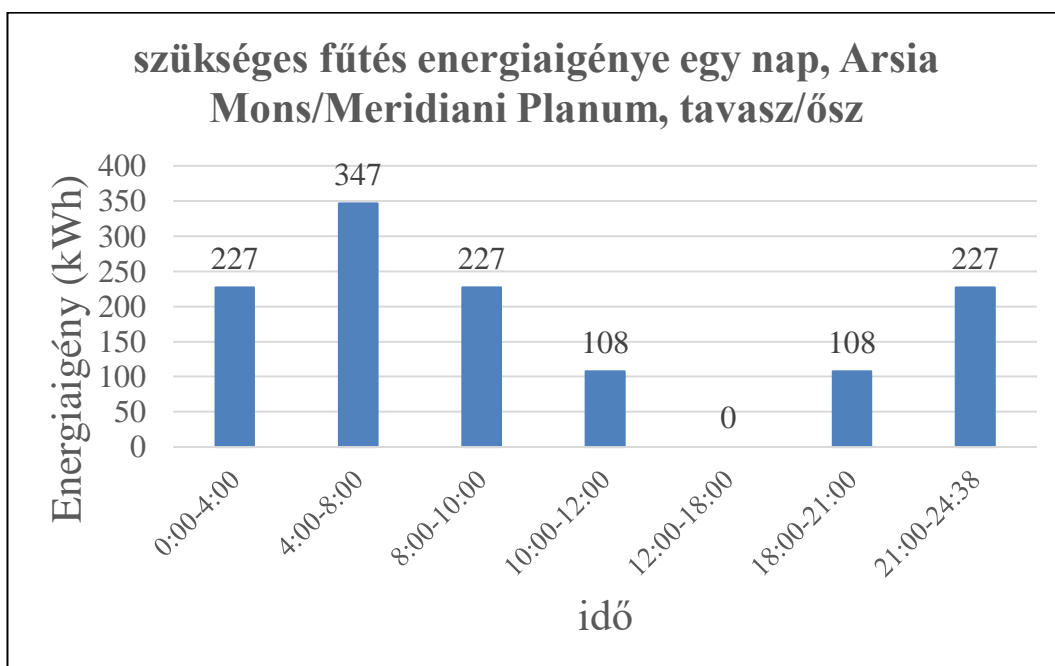
k = a regolit hővezetési tényezője, amit $0,039 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ -nek tekintettem.

d = átlagos falvastagság, amit $0,5 \text{ m}$ -nek vettem

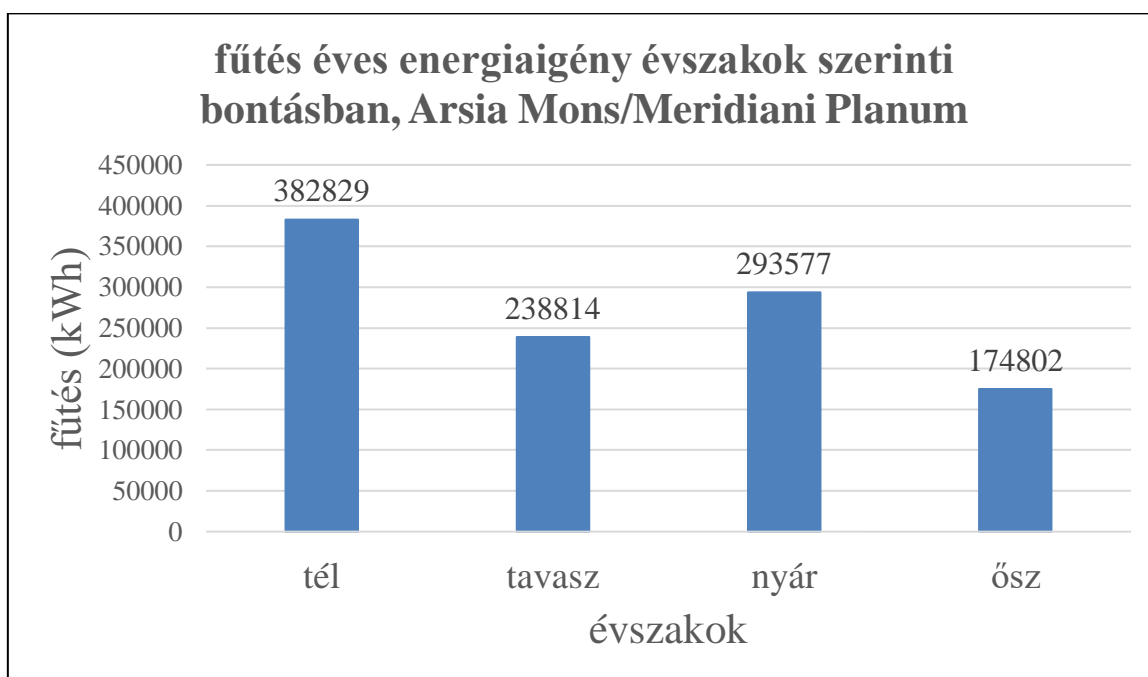
t = vizsgált időintervallum hossza



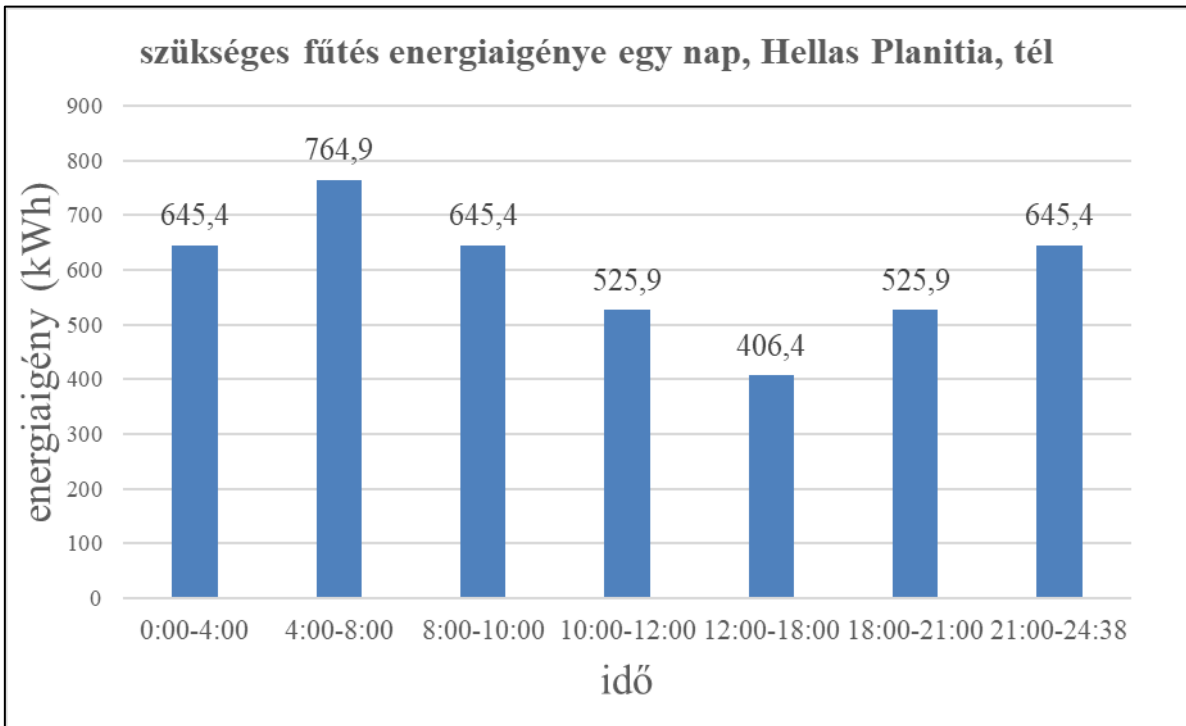
11. ábra: Szükséges fűtés energiaigénye egy téli nap, Arsia Mons/Meridiani Planum



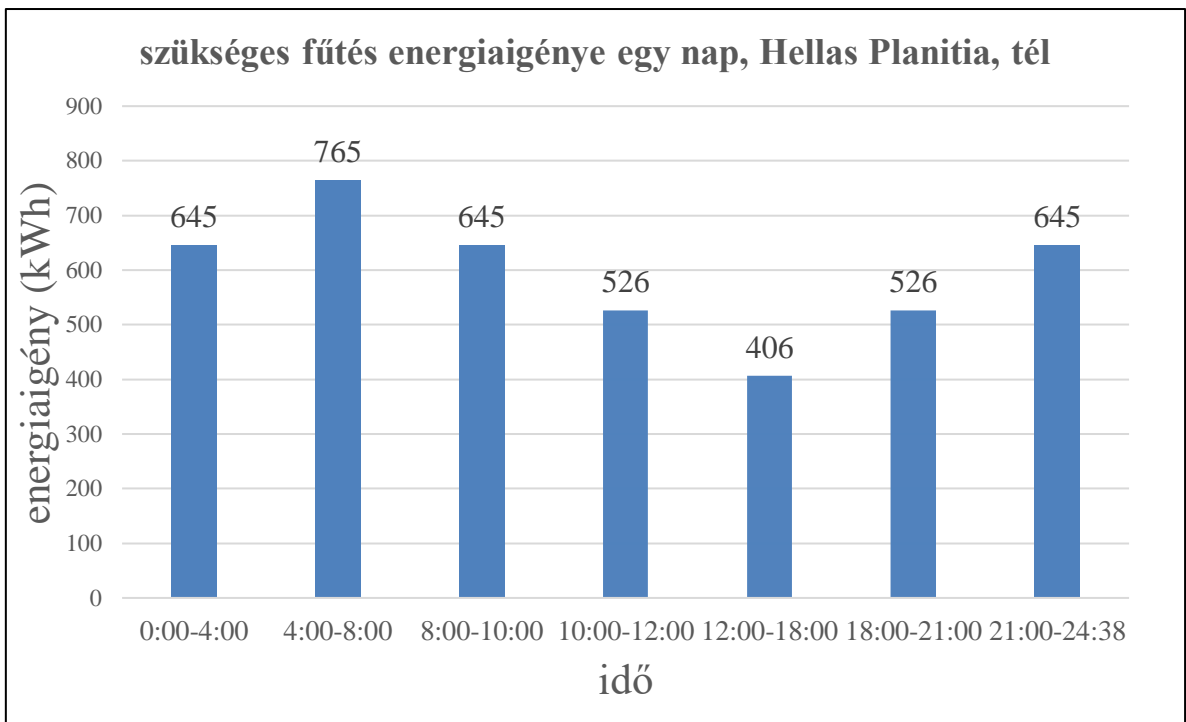
12. ábra: Szükséges fűtés energiaigénye egy őszi/tavaszi nap (Arsia Mons/Meridiani Planum)



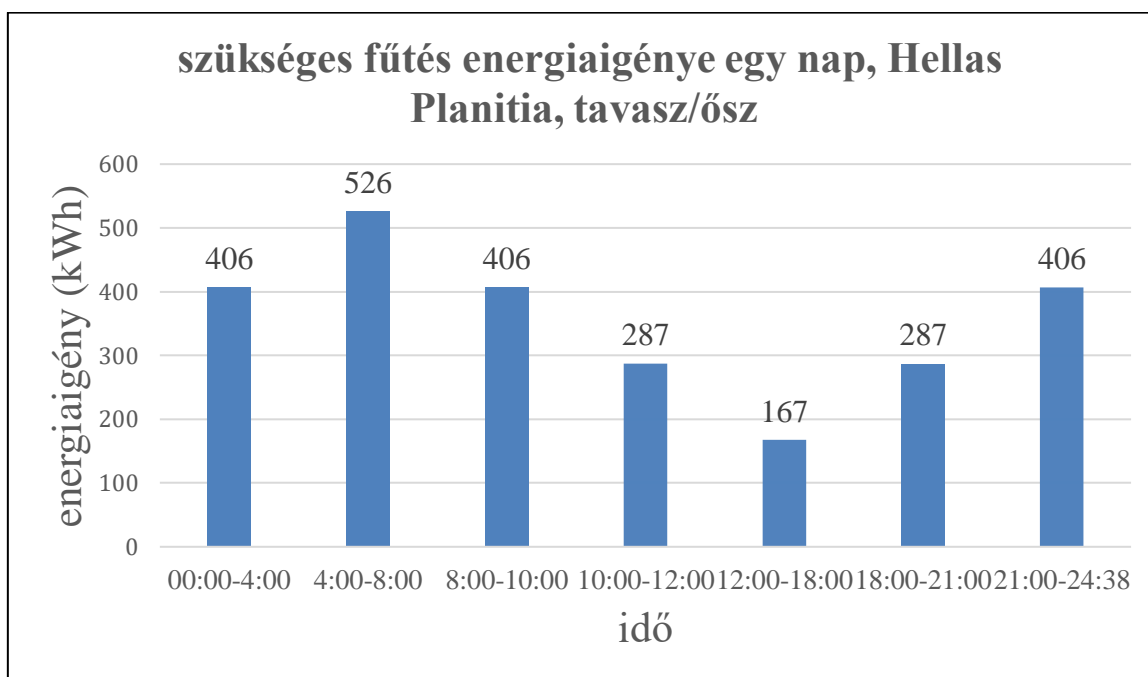
13. ábra: Éves fűtés energiaigény marsi évszakok szerinti bontásban, Arsia Mons/Meridiani Planum



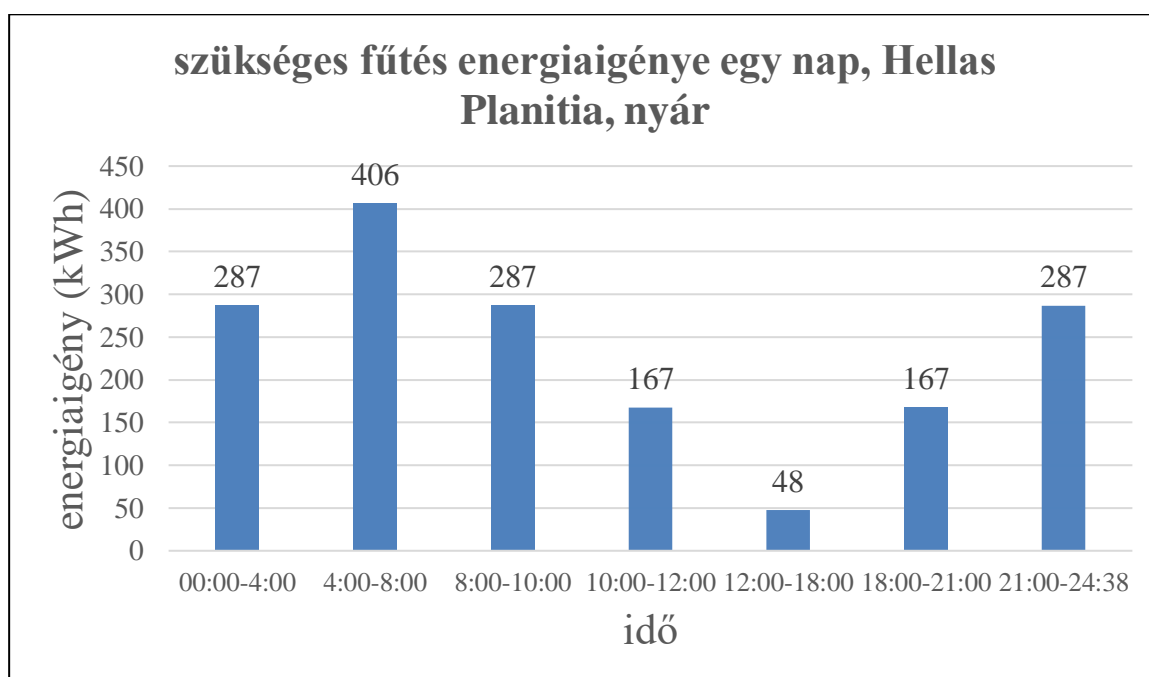
14. ábra: Szükséges fűtés energiaigénye egy nyári nap (Arsia Mons/Meridiani Planum)



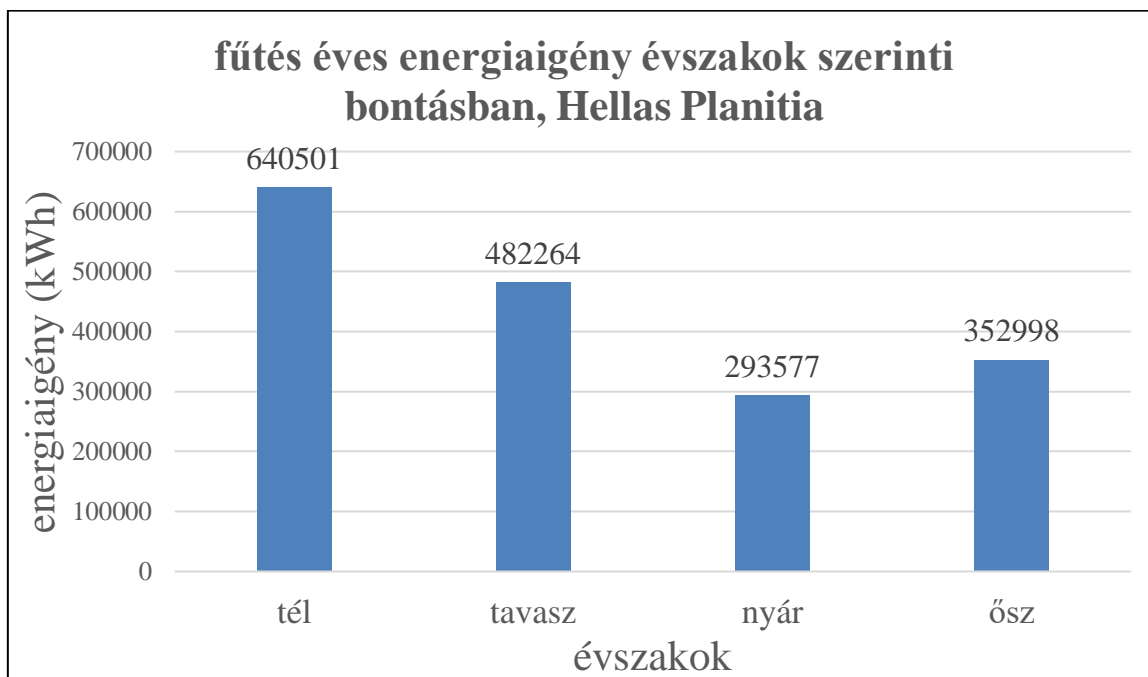
15. ábra: Szükséges fűtés energiaigénye egy téli nap (Hellas Planitia)



16. ábra: Szükséges fűtés energiaigénye egy tavaszi/őszi nap (Hellas Planitia)



17. ábra: Szükséges fűtés energiaigénye egy nyári nap (Hellas Planitia)



18. ábra: Éves fűtés energiaigény marsi évszakok szerinti bontásban (Hellas Planitia)

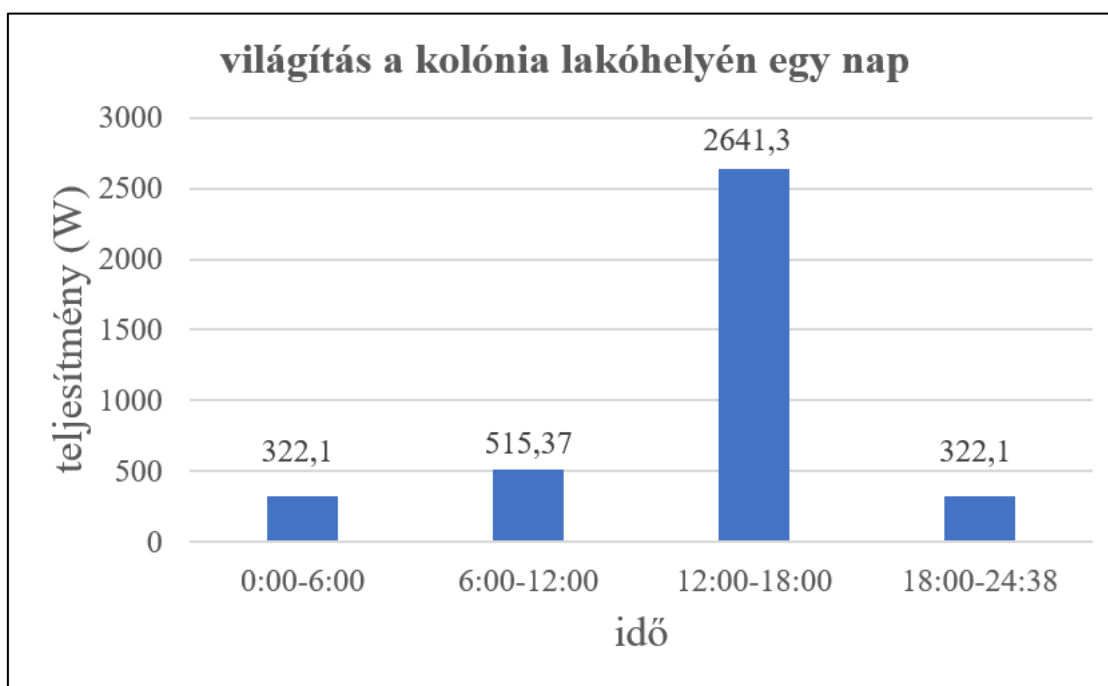
A kolónia lakóhelyének megvilágításakor feltételeztem, hogy az év minden napján azonos mértékű megvilágításra van szükség. A veszteségeket elhanyagoltam.

$$P = \frac{X * A}{683}$$

ahol

P = világítás teljesítménye

X = a megvilágítás mennyisége, amit éjszaka 50 luxnak, délelőtt 80 luxnak, délután 410 luxnak vettem [79]



19. ábra: Világítás teljesítménye a kolónia lakóhelyén egy nap

5.2 Oxigén előállítása

Egy átlagos ember O_2 fogyasztása percenként 1,8-2,4 gramm [80]. Számításaim során a felső értékkel (2,4 g) számoltam. Egy marsi nap kb. 2,6%-kal hosszabb, mint egy földi (24 óra 37 perc), ez alapján egy ember marsi napja során oxigénfelhasználása $(24 * 60 + 37) * 2,4 = 3544,8$ gramm = 3,5448 kg. Egy 110 fős kolónia esetében egy nap alatt a kolónia $3,5448 * 110 = 389,928$ kg oxigént használ fel emberi lélegzésre. Órás bontásban, mivel az oxigén termelése folyamatos, egy óra alatt $0,144 * 110 = 15,84$ kg oxigén előállítása szükséges, amennyiben a berendezés azon teljesítményét számoljuk, amivel a 4. fejezetben jellemzett kísérletet megvalósították. Ez alapján $15,84 / 0,047 = 337$ db ilyen berendezésre van szükség. A kísérlet során egy óra alatt 47 g oxigén előállítására került sor, ehhez 1kWh energiát használtak fel. Ez alapján az oxigén plazmával történő előállítása egy óra alatt 337 kWh energiát igényel.

$$\frac{t_m * m_f * n}{m_0} * E_0 = 337 kWh \quad 3$$

A 3-as egyenlettel számoltam ki mennyi energiát igényel óránként a teljes kolónia számára lélegzésre szükséges energia megtermelése.

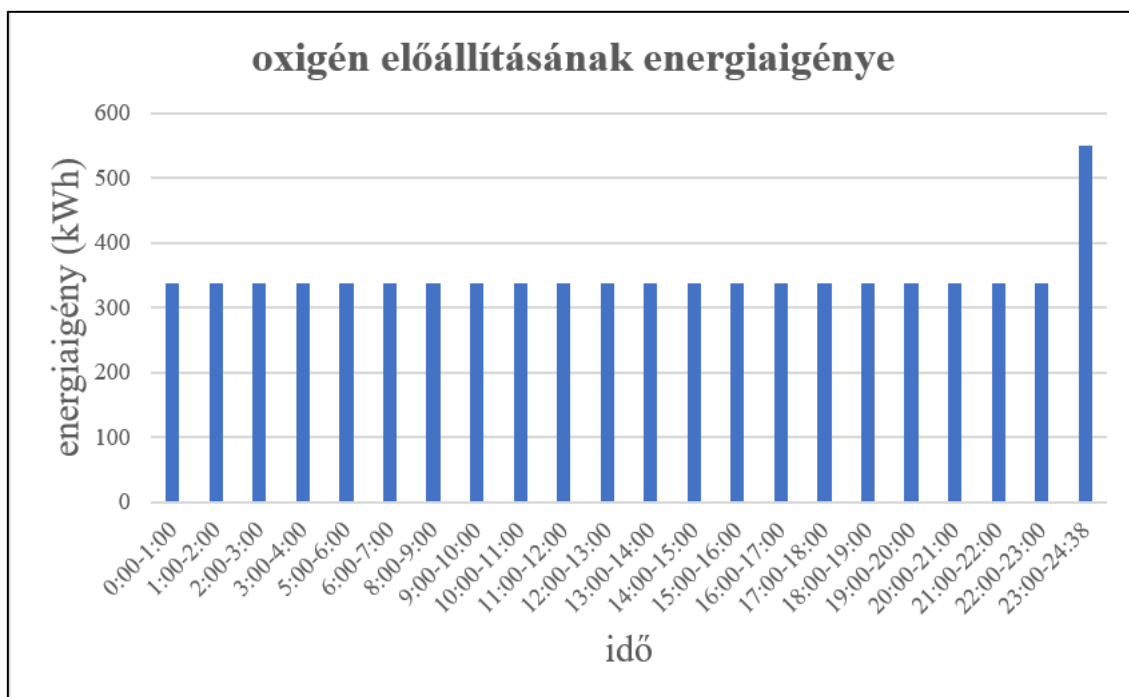
E_0 = a kísérleti berendezés fogyasztása, amit 1kWh-nak vettem

m_0 = a kísérlet során megtermelt oxigén mennyisége, amit 47 g-nak vettem

t_m = egy marsi nap hossza, amit 24 óra 37 percrek vettem

m_f = átlagos ember percenkénti O_2 felhasználása, amit 2,4 g-nak vettem [81]

n = a kolónia lélekszáma (110 fő)



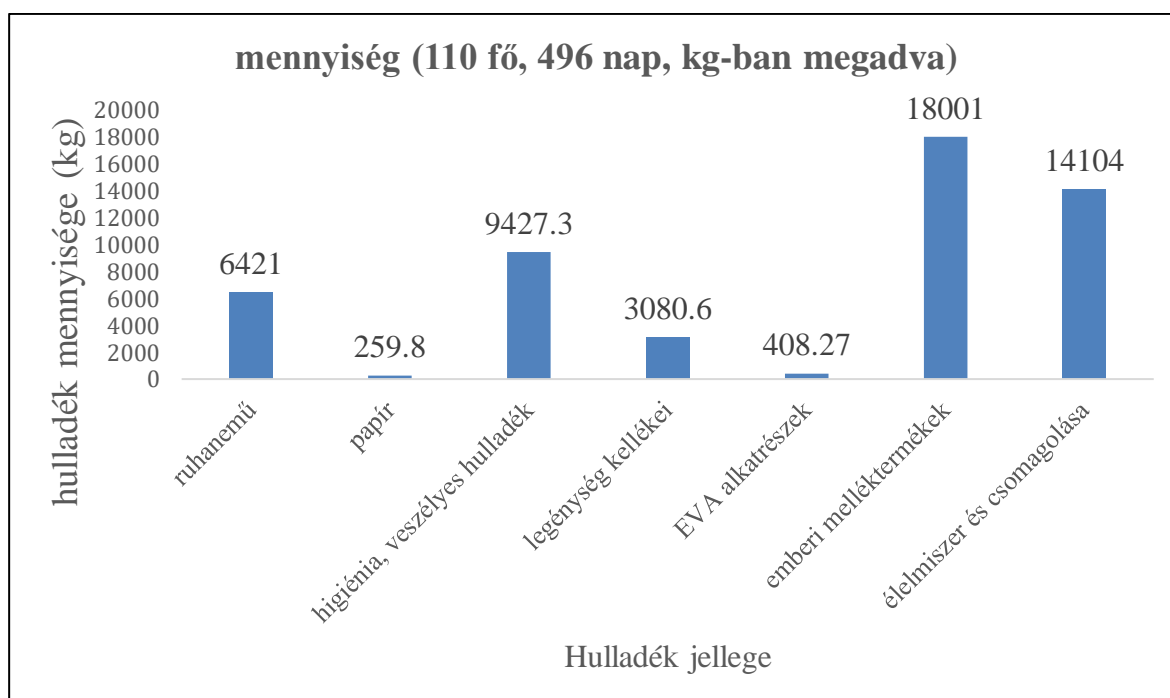
20. ábra: A lélegzéshez szükséges oxigén előállításának energiaigénye

5.3 Hulladékkezelés, újrahasznosítás

Az 1. táblázatban egy, korábbi adatokból számolva találhatóak a lehetséges hulladékforrások, illetve a megtermelt a hulladék mennyisége.

1. táblázat: Egy 110 fős marsi kolónia által 496 nap alatt megtermelt hulladék becsült mennyisége [82]

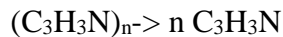
hulladék jellege	mennyiség (7 fő, 210 nap) (kg)	mennyiség (110 fő, 496 nap) (kg)
ruhanemű	173	6421
papír, irodai eszközök	7	259,8
higiénia, veszélyes hulladék	254	9427,3
legénység kellékei	83	3080,6
EVA alkatrészek	11	408,27
emberi melléktermék	485	18001
élelmiszer és csomagolása	380	14104



21. ábra: 110 fős marsi kolónia hulladéktermelése 496 nap alatt

Ebből 14 104 kg (élelmiszer-hulladék) használható fel komposztálásra, 18 001 kg (emberi melléktermék) trágya előállításához, amelyről a későbbiekben még értekezem, és a teljes ott tartózkodás során keletkezendő 6 421 kg ruhahulladék egy része. Napi bontásban egy nap átlagosan 12,95 kg ruhahulladék keletkezik. Amennyiben feltételezzük, hogy ez a ruhahulladék

mind PAN-szálakból készül, $((C_3H_3N)_n)$, ahol $n=100$, akkor 1 poliakrilnitril 100 akrilnitril molekulává szedhető szét depolimerizációval. Poliakrilnitril esetében 60-70°C-os hőmérsékleten történhet meg a depolimerizáció.



Az akrilnitril moláris tömege $M=0,053$ kg/mol, a poliakrilnitrilé 5,3 kg/mol, tehát 46 mol mennyiségű poliakrilnitril szálát kell naponta újrahasznosítani, ez 4600 mol akrilnitril molekulát eredményez ($2,76 \cdot 10^{27}$ db molekula). Az akrilnitril fajhője 1,67-1,75 J/g*°C, én számításaimban 1,71 J/g*°C-rel számoltam. $\Delta T=70-15=55$ °C.
 $E=55^\circ C * 1,71 J/g^\circ C * 12950 g = 1217947,5 J/nap$

$$E = \Delta T * c * m \quad 4$$

A 4-es egyenlettel számoltam ki az depolimerizációs hőmérsékletéhez szükséges energiát.

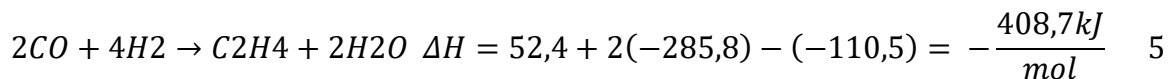
Ahol

ΔT = a hőmérséklet-különbség, amit 55°C-nak vettem

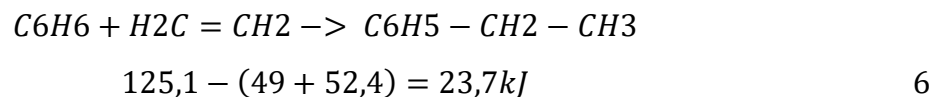
c = az akrilnitril fajhője, amit 1,71 J/g*°C – nak vettem

m = a ruhanemű hulladék mennyisége

A folyamat során további kémiai reakciók, és azok energiaigényei:

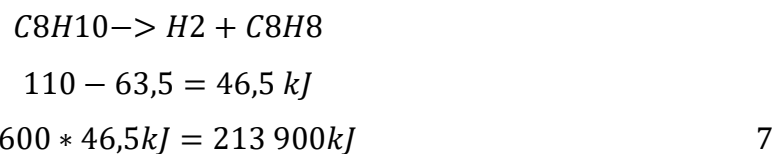


Az 5-ös egyenlet az etilén előállítása szén-monoxidból és hidrogénből vas katalizátor jelenlétében.



A 6-os egyenlet a Friedel-Crafts reakció és annak energiaigénye.

$$4600 * 23,7kJ = 109020kJ/nap$$



A 7-es egyenlet sztírol előállítása etilbenzol dehidrogenizálásával, illetve ezen folyamat energiaigénye.



$$2[(52,4 - 285,8) - (-277,6)] = 88,4kJ \quad 10$$

$$146,4 - 2 * 52,4 = 41,6kJ$$

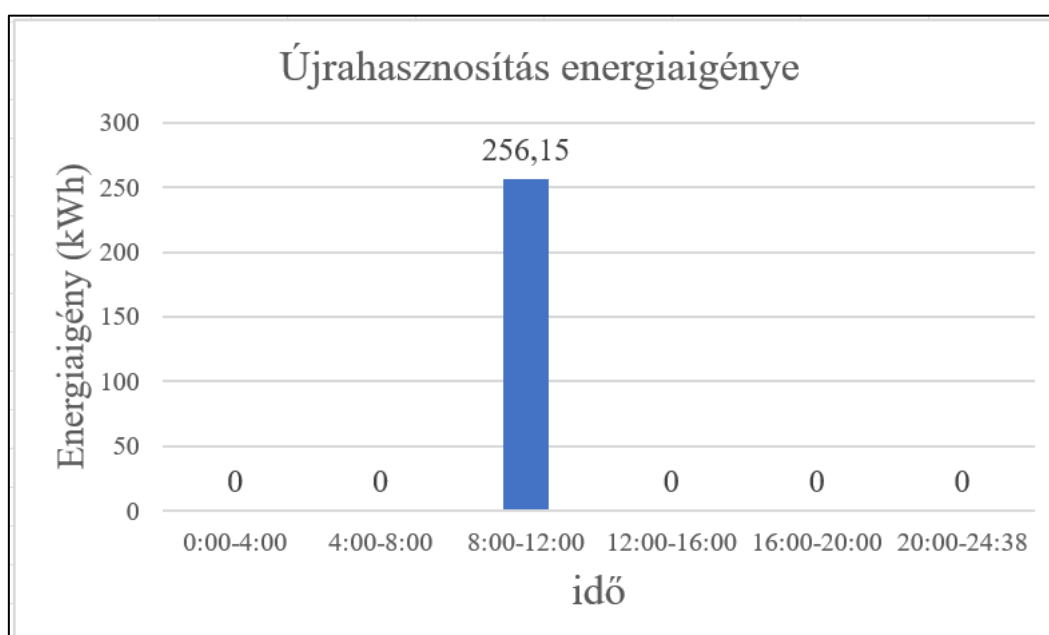
11

A 8-12 egyenletek az 1,3-butadién előállítására vonatkoznak, illetve az ahhoz szükséges folyamatok energiaigényére.

$$0,598 * 109 + 103 * (109020 + 213900) + 1217947,5 = 922137947,5J = 256,15 kWh \quad 13$$

A 13-as egyenlet a poliakrilonitrilből akrilnitril-butadién-sztirol előállításához szükséges folyamatok egy napra vonatkozó összes energiaigényét tartalmazza.

Feltételezésem szerint ezen folyamatok reggeli órákban mennek végbe az előző napi hulladékot újra hasznosítva.



22. ábra: újrahasznosítás energiaigénye

5.4 Sterilizáció

A gamma-besugárzás során a Nemzetközi Atomenergia-ügynökség (angolul International Atomic Energy Agency, röviden IAEA) által meghatározott egészségügyi eszközökre vonatkozó dóziséval számoltam.

$$D=2,5Mrad=25000 Gy [84]$$

Számításaimat azzal a feltevéssel végeztem, hogy naponta átlagosan 10 kg-os mintát vizsgálunk, és ennek a gamma-nyalábokkal történő besugárzása szükséges. A sterilizálás mértéke függ a sterilizálandó anyag minőségétől is, de itt átlaggal számoltam több adat és mérés hiányában. 1,332 MeV-os fotonokkal számoltam, ez esetben $2,1312 * 10^{-13}$ J energia szabadul fel bomlásonként.

$$D = n * \frac{\varepsilon}{m} \quad 14$$

A 14-es egyenlettel számoltam ki az előírt dózis eléréséhez szükséges nyalábok számát adott energiájú γ -nyalábok mellett.

n = a nyalábok száma

ε = 1 γ -foton energiája (1,332 MeV)

D = dózis, amit 25000 Gy-nek vettem

m = a sterilizálandó minta tömege

$$\Delta t = \frac{\Delta N}{A} \quad 15$$

$$E = n * \varepsilon \quad 16$$

$$P = \frac{E}{t} \quad 17$$

A 15-ös egyenlettel kiszámoltam a sterilizációhoz szükséges időt, a 16-ossal az energiát, a 17-essel ezek hányadosaként a berendezés hasznos teljesítményét.

$T_{1/2}$ = felezési idő, amit 5,2713 (földi) évnak vettem

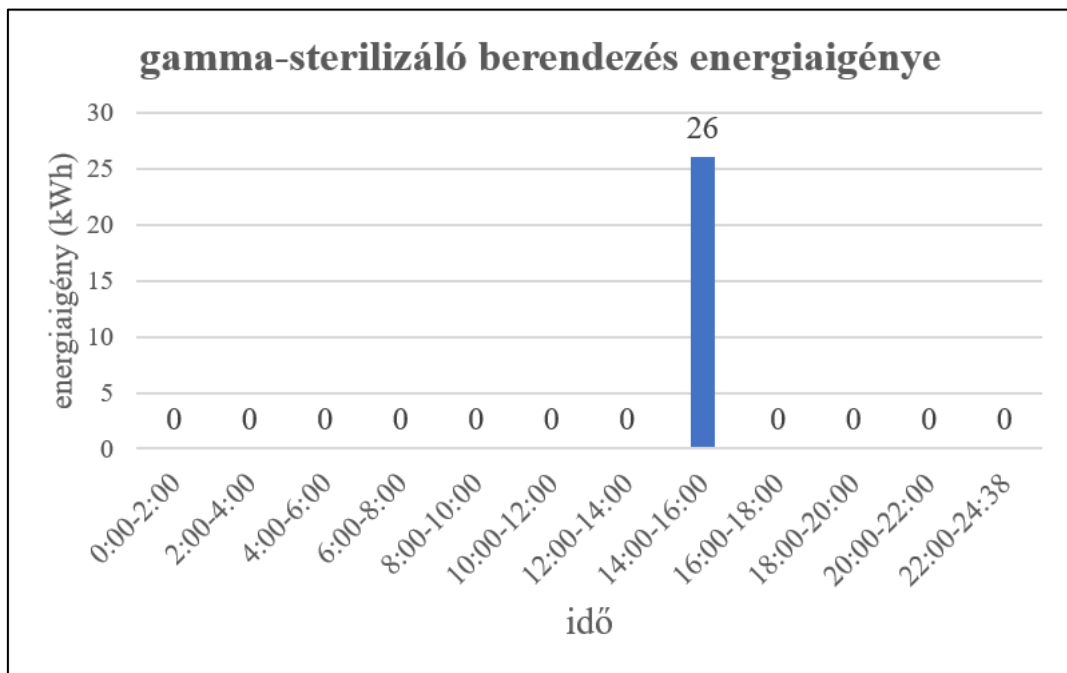
A = előírt aktivitás,[83] amit számításom során $6,105 * 10^{16}$ Bq-nek vettem

$\Delta t = \Delta N / A = 1,17 * 10^{18} / 6,105 * 10^{16} = 19,16$ s

$\Sigma E = n * \varepsilon = 1,17 * 10^{18} * 2,1312 * 10^{-13} = 249350$ J=0,07 kWh

$P = E / t = 249350 / 19,16 = 13014,09$ W

Nagyjából 13 kW teljesítményű berendezésre van szükség, de ez a nap folyamán csak rövid ideig üzemel, feltételezésem szerint délután 2 és 4 között.



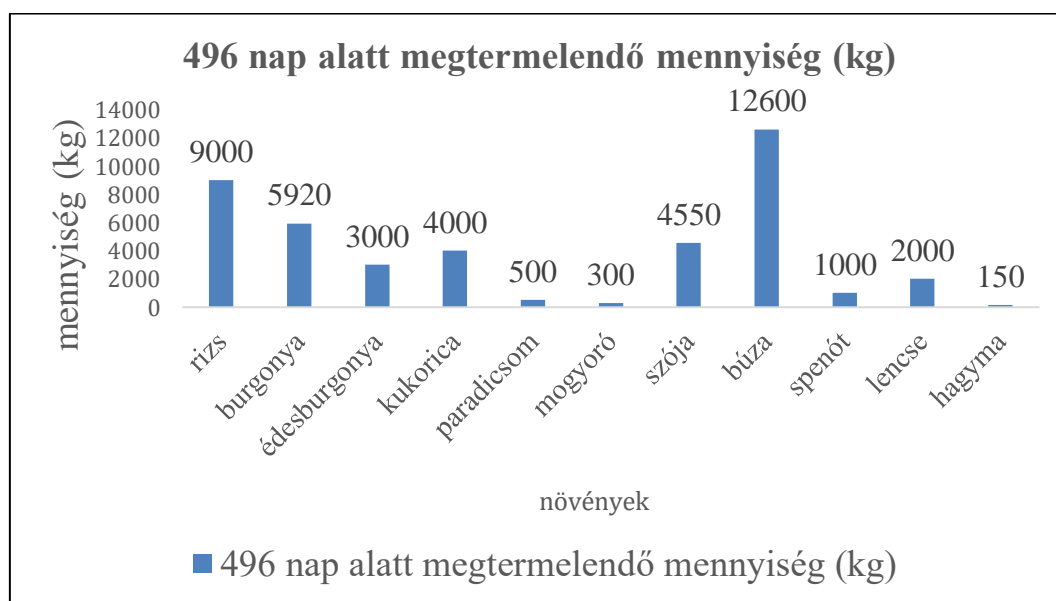
23. ábra: gamma-sterilizáló berendezés energiaigénye

5.5 Élelmiszer megtermelése

Az növények éves szükséges mennyiségének megállapításakor alapul éves átlagfogyasztást, és ajánlott fogyasztást vettem figyelembe egyéb adatok hiányában, a fehérjebevitel és a kalóriaigény átalakulása miatt az átlagnál nagyobb értékkel, 110 főre és 496 napra vetítve számoltam.

2. táblázat: a Marson termelendő növények és azok igényei

növény neve	földigény (m ² /kg)	mennyiség (kg)	termőföld	általános vízigény(l/kg)	vízigény (l)
rizs	2,8	9000	25200	4500	40,5*10 ⁶
burgonya	0,88	5920	5209,6	214	1,27*10 ⁶
édesburgonya	1,54	3000	4620	287	8,61*10 ⁵
kukorica	1,54	4000	6160	383	1,532*10 ⁶
paradicsom	0,8	500	400	1,22	4880
mogyoró	1,55	300	462	5,533	2766,5
szója	1,53	4550	7007	2,145	9600
búza	3,85	12600	48510	2250	28,35*10 ⁶
spenót	0,5	1000	500	292	2,92*10 ⁵
lencse	1,5	2000	3080	5,874	11748
hagyma	0,39	150	58,5	272	40800



24. ábra: A Marson megtermelendő növények mennyisége

A kolónia számára az éves szükséges fehérjebevitel, amennyiben az átlagos tömeg 75 kg, és testtömegenként 0,8 g fehérjét ajánlott naponta bevinni, $75\text{kg} \cdot 0,8\text{g} \cdot 496 \cdot 110 = 3273,6 \text{ kg}$. Amennyiben ennek 50%-át az erre a célra tenyésztett spirulina alga (65/100) adja, $1637/0,65 = 2518 \text{ kg}$ spirulina tenyésztendő. A spirulina tenyésztése PBR-ben történik, jelenleg

egy napi 0,1 kg-os termeléshez 30 l víz szükséges. $2518/496=5$ kg spirulina tenyésztése szükséges naponta a fehérjebevitelhez. Ez $30*50=1500$ l napi vízhasználatot jelent. A PBR LED-eket alkalmaz, ezek fogyasztása 143kWh/kg. Napi 8 órás üzemeltetéssel $(143*10^3*3600)/(8*60^2)=18$ kW-os teljesítményű a fényforrás.

$$m * \varphi * n * t = F \quad 18$$

A 18-as egyenlettel az ott tartózkodáshoz szükséges fehérjeigényt számoltam ki.

m = egy átlagos ember testtömege, amit 75 kg-nak vettem

φ = napi javasolt fehérjebevitel kg-ként, amit 0,8 g-nak vettem

n = kolónia lélekszáma (110 fő)

t = vizsgált idő (496 nap)

F = éves fehérjeigény

Az öntözésre, illetve a spirulina tenyésztéséhez az összes vízigény így 73744000 l az ott-tartózkodás (496 nap) alatt.

Az összes földigény 101 207,1 m².

A mezőgazdasági célra történő világítás kiszámolása során feltételeztem, hogy minden növény fényigénye azonos, valamint feltételeztem, hogy reggel 6 és este 6 között nappali, azon kívül éjszakai fényigénye van a növényeknek. Számításaim során adat hiányában veszteségeket nem vettem figyelembe.

$$P = \frac{X * A}{683} \quad 19$$

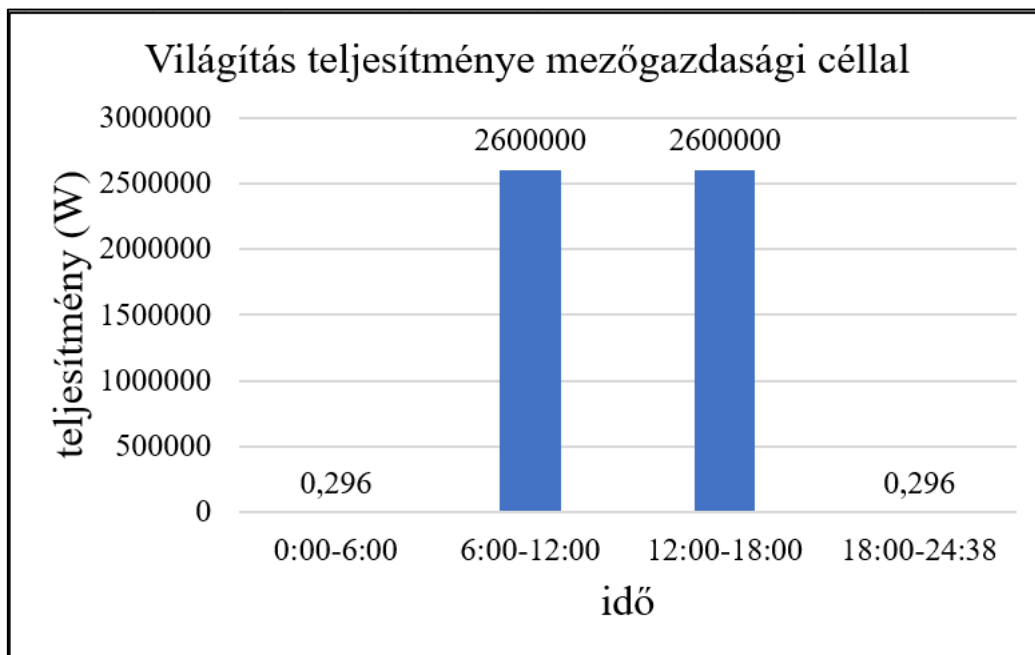
A 19-es egyenlettel a mezőgazdasági céllal történő világítás teljesítményigényét számoltam ki.

ahol

P = a világítás teljesítménye

X = megvilágítás (lux), amit nappal 17500 lux-nak, éjjel 0,002 lux-nak vettem a holdtalan, tiszta égbolt és a nem közvetlen teljes napsütés alapján [85]

A = a megvilágítandó felület, amit korábbi számításaim alapján az összes termőföldek méretének vettem (101207,1 m²)



25. ábra: A mezőgazdasági céllal történő világítás energiaigénye

A regolitban leggyakoribb perklorátvegyület a kalcium-diperklorát ($\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$), ami kb 0,5 g/l mennyiségben van jelen a talajban. A kimosandó föld térfogata, amennyiben a földterületen 20 m mélységig eltávolítandó a ($\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2$), $V=2,02 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Az eltávolítandó perklorát mennyisége ez alapján $2,02 \cdot 10^6 \cdot 500 = 1,01 \cdot 10^6 \text{ kg}$. Mivel $[\text{Ca}(\text{ClO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$, ezért $1,01 \cdot 10^6 \text{ kg}$ kalcium-diperklorát kimosásához $3,03 \cdot 10^5 \text{ l}$ víz szükséges.

A trágyázáshoz előnyös emberi melléktermék mennyisége a 496 napos periódus alatt közelítőleg 18 000 kg termelődik. A plazmareaktorban előállított NO_x alkalmazandó még a talaj nitrogéntartalmának növeléséhez. A kísérlet során a termelési ráta 1,25 g/h volt, 0,79 kWh/g energiaigénnyel. $P_{\text{plazmareaktor}} = 1,25 \text{ g/h} \cdot 0,79 \text{ kWh/g} = 0,9875 \text{ W}$ hasznos teljesítményű a plazmareaktor. Amennyiben feltételezünk ehhez a reaktorhoz egy 40-50%-os hatásfokot, akkor a felvett elektromos teljesítmény kb. 2,2 W.

$\rho_{\text{marsi talaj}} = 1000-1300 \text{ kg/m}^3$ (számításaimban számtani közepe, 1150 kg/m^3). Ekkor a kimosandó talaj tömege $m = \rho \cdot V = 1150 \cdot 2,02 \cdot 10^6 = 2,323 \cdot 10^9 \text{ kg}$. A vízzel történő átmosás hatása a talajra: $2,323 \cdot 10^9 - 0,5 \cdot 2,02 \cdot 10^6 = 2,32199 \cdot 10^9 \text{ kg}$

$$\frac{(2,32199 \cdot 10^9)}{(2,02 \cdot 10^6)} = 1149,5 \text{ kg/m}^3 \rightarrow$$

$$\frac{(2,32199 \cdot 10^9 + 3,03 \cdot 10^5)}{(2,02 \cdot 10^6 + 3,03 \cdot 10^5)} = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ jó megközelítéssel.}$$

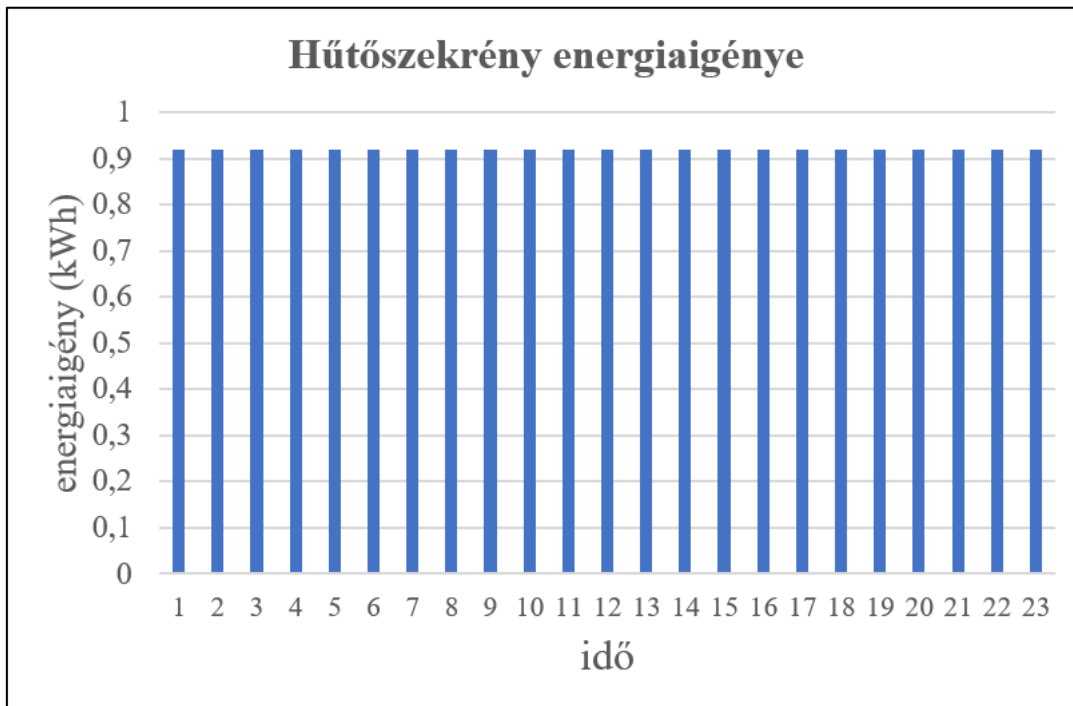
$V=2,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$, $m=\rho \cdot V=4,4 \cdot 10^7 \text{ kg}$. 2m/m%-os nitrogéntartalom esetén 6 hetes trágyázási ciklusokkal, amennyiben a 496 nap alatt 12 alkalommal trágyázunk, összesen 10560000 kg nitrogénre van szükség, ami csak a jelenleginél sokkal nagyobb teljesítményű és produktív plazmareaktorral valósítható meg.

5.6 Víz előállítás

A talaj átalakításához 303 000 l, az öntözéshez 73 000 000 l vízre van szükség, amiket érdemes előre kinyerni. A MACS berendezés felvett teljesítménye $P_{\text{felvett}} = \Sigma E / \Sigma t = 260\,000 / (44 \cdot 60) = 98,5 \text{ W}$.

5.7 Élelmiszer tárolása, hűtés

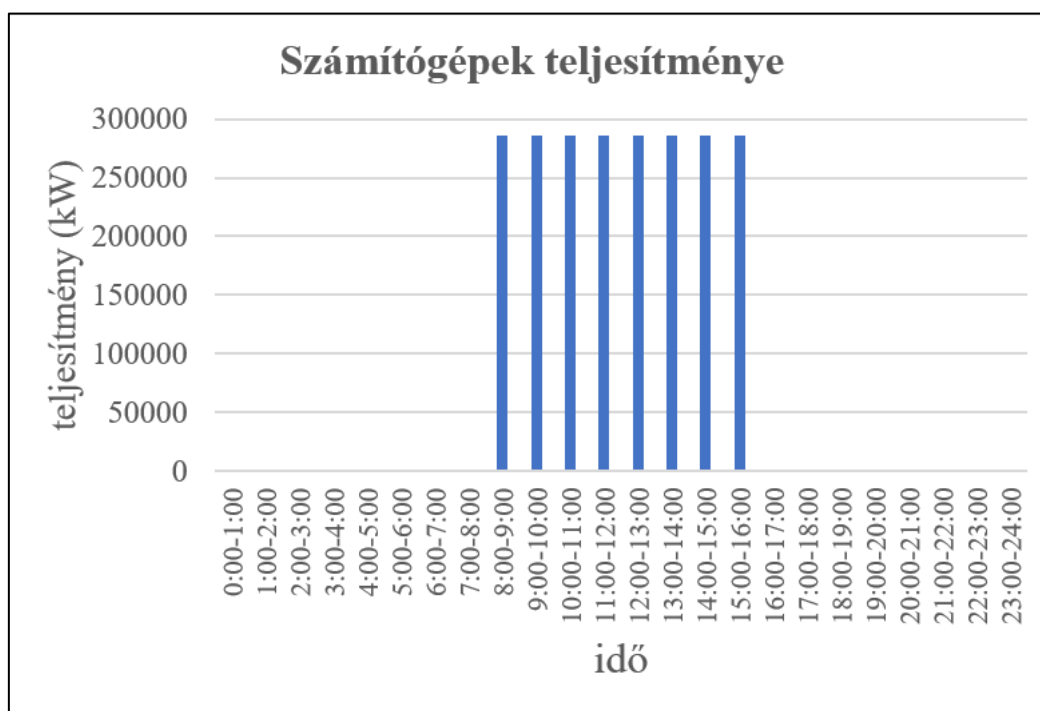
Egy 300 l-es kombinált hűtő-fagyasztó szekrény 24 órás működési ideje alatt vett fogyasztása 1 kWh. Amennyiben 5 főre jut egy ilyen hűtőszekrény, 22 db-ra van szükség. Amennyiben a hűtő folyamatosan üzemel és egy marsi napot 24 órának tekintünk, a fogyasztás óránként 0,92 kWh.



26. ábra: A hűtőszekrények energiaigénye

5.8 Számítógép

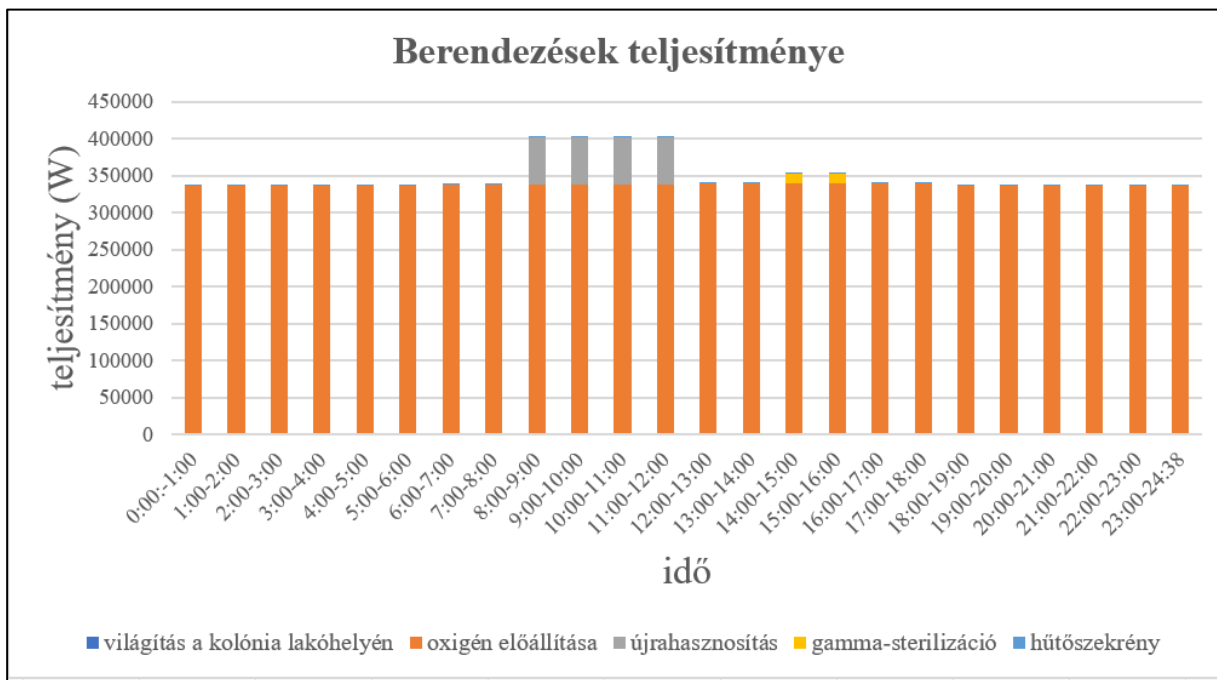
A kolónia villamosenergia-fogyasztásának nem elhanyagolható részét fogják adni a kolóniák által használt számítógépek. A számításom alapjául a NASA Pleiades szuperszámítógépét veszem. Ezen berendezés felvett teljesítménye 2,35 MW. Amennyiben feltételezzük, hogy a kolónia minden tagja rendelkezik ekkora teljesítményű számítógéppel, akkor 285,5 MW a számítógépek által felvett teljesítmény. Számításom során úgy veszem, hogy a számítógépek reggel 8 és délután 4 között üzemelnek.



27. ábra: Számítógépek teljesítménye egy nap folyamán

5.9 Összesítés

A marsi kolónia berendezéseit fogyasztását a 28. ábrán összegeztem. Az ábra nem tartalmazza a mezőgazdasági céllal történő világítás villamos energiaigényét, mert nagyságrendekben nem összevethető ezen értékekkel. Ugyanúgy a házak világítása sem látszik az ábrán, mert a többihez képest elhanyagolható. Az ábrán nincs rajta továbbá a számítógépek energiaigénye sem, mert az is sokkal nagyobb érték, mint a többi fogyasztó, ezért nem lehet reálisan összevetni ezekkel.



28. ábra: egy kolónia egy napra eső villamosenergia-igénye, teljesítményben megadva, órás bontásban.

6 Összefoglalás

Munkám során egy marsi kolónia energiaellátásával és -fogyasztásával foglalkoztam. Javaslatot tettem három lehetséges helyszínre a Mars felszínén. Kiszámoltam több marsi berendezés (oxigén előállítása, újrahasznosítás, gamma-sterilizáció, víz kinyerése, világítás, fűtés, számítógépek, hűtő berendezések) energiaigényét. Felvettem egy lehetséges módot a 3D nyomtatás alapjául szolgáló akrilnitril-butadién-sztirol poliakrilnitrilből történő előállítására, és az ebben a folyamatban részt vevő reakciók energiaigényét is kiszámítottam. Javaslatot tettem a marsi kolónia növényi alapú táplálkozása során termesztendő növényeket illetően, és megterveztem ezek megtermelendő mennyiségét, kiszámoltam termőföld- és vízigényüket. Felvettem a sóolvadékreaktorok alkalmazását, mint marsi energiatermelő eszköz, valamint egy marsi tenyésztőreaktor koncepcióját. A vizsgálataim során kapott eredmények alapján kiszámítottam a kolónia villamosenergia-igényét órás bontásban.

Kutatásomat a jövőben is szeretném folytatni. A kapott eredmények a későbbiekben lehetővé teszik egy marsi kolónia villamosenergia-ellátásának nagy felbontású szimulációját is.

7 Felhasznált források

A nagy számú hivatkozás indoka a kutatásom speciális témája, és az a körülmény, hogy az kívül esik az általános tananyagban. A források egy része enciklopédiából, ismeretterjesztő forrásokból, weboldalokról, kormányzati szervek nyilvános anyagaiból származik, egy másik, kisebb része pedig tudományos publikációkból.

- [1] Hargitai Henrik (2001-2002): A Mars felfedezése, 2.oldal, Budapest, ELTE Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutatási Csoport
- [2] Almár Iván – Horváth András (1981): Űrhajózási lexikon, 452-459. oldal Akadémiai Kiadó és Zrínyi Katonai Kiadó
- [3] Almár Iván – Horváth András (1981): Űrhajózási lexikon, 797. oldal Akadémiai Kiadó és Zrínyi Katonai Kiadó
- [4] Almár Iván – Horváth András (1981): Űrhajózási lexikon, 847-849. oldal Akadémiai Kiadó és Zrínyi Katonai Kiadó
- [5] National Aeronautics and Space Administration (2023): Mars Global Surveyor, [Mars Global Surveyor | Missions – NASA Mars Exploration](#)
- [6] National Aeronautics and Space Administration (2023): Mars Pathfinder, [Mars Pathfinder | Missions – NASA Mars Exploration](#)
- [7] National Aeronautics and Space Administration (2010): Spirit Updates: 2010, [Rover Update: 2010: All - NASA Mars](#)
- [8] National Aeronautics and Space Administration (2023): Mars Reconnaissance Orbiter, [Mars Reconnaissance Orbiter - NASA Mars](#)
- [9] National Aeronautics and Space Administration (2023): Mars MAVEN Mission [Mars MAVEN Orbiter - NASA Mars](#)
- [10] European Space Agency (2016 május 2.): Second ExoMars mission moves to next launch opportunity in 2020, [ESA - Second ExoMars mission moves to next launch opportunity in 2020](#)
- [11] National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory (2021 február 18): Mars Perseverance Landing Press Kit, [mars_2020_landing_press_kit.pdf \(nasa.gov\)](#)
- [12] National Aeronautics and Space Administration (2020 szeptember): Artemis Plan – NASA’s Lunar Exploration Overview, 26-31. oldal, [The Artemis Plan \(nasa.gov\)](#)
- [13] SpaceX (2016 szeptember 29): Making humans a multiplanetary species, 47. oldal, [Wayback Machine \(archive.org\)](#)

- [14] Space Nuclear Propulsion for Human Mars Exploration, National Academies of Sciences, Engineering and Medicine, DOI 10.17226/25977 (2021), 3-54. oldal
- [15] Nuclear Reactors and Radioisotopes for Space, World Nuclear Association, 2021 május
- [16] European Space Agency (2019 szeptember 1.): The seasons on Mars [ESA Science & Technology - The seasons on Mars](#)
- [17] National Aeronautics and Space Administration (2016 október 14.): Mars Facts, [:: NASA Quest > Aerospace :: \(archive.org\)](#)
- [18] Haberle, R. M. (2015 január 1.): Solar System/Sun, atmospheres, evolution of atmospheres, Planetary atmospheres: Mars, in North, Gerald R.; Pyle, John; Zhang, Fuqing: Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition), Academic Press, 168-177. oldal, DOI: 10.1016/b978-0-12-382225-3.00312-1
- [19] Schimmerling W. (2011. február 5.): The Space Radiation Environment: An Introduction, 3. oldal, [The space radiation environment: an introduction. \(nasa.gov\)](#)
- [20] Darling, David (2007 február 26): Mars, polar caps, ENCYCLOPEDIA OF ASTROBIOLOGY, ASTRONOMY AND SPACEFLIGHT
- [21] National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology (2010): Toxic Effects of Martian Dust on Humans, [MEPAG \(nasa.gov\)](#)
- [22] University of Florida (2007 február 4): Sizing of a Combined Sabatier Reaction and Water Electrolysis Plant for Use in in Situ Resource Utilization on Mars
- [23] Hall, Loura (2017 november 15): Powering Up NASA's Human Reach for the Red Planet, National Aeronautics and Space Administration, Space Tech
- [24] United States Department of Energy (2019 július 9): TRISO Particles: The Most Robust Nuclear Fuel on Earth, [TRISO Particles: The Most Robust Nuclear Fuel on Earth | Department of Energy](#)
- [25] International Atomic Energy Agency (1996 november 15): High temperature gas cool reactor technology development, 61. oldal
- [26] An Ho, Matthew Memmott, John Hedengren, Kody M. Powell: Exploring the benefits of molten salt reactors: An analysis of flexibility and safety features using dynamic simulation, Digital Chemical Engineering, Volume 7, (2023) 100091, ISSN 2772-5081, <https://doi.org/10.1016/j.dche.2023.100091>

- [27] Sorbon, B.N. (2015):"ARC: a compact, high-field fusion nuclear science facility and demonstration power plant with demountable magnets." Fusion Engineering and Design. 100: 378-405. o. DOI: 10.1016/j.fusengdes.2015.07.008.
- [28] Forni, O. & Gaft, Michael & Toplis, M. & Clegg, S. & Ollila, A. & Sautter, V. & Nachon, Marion & Gasnault, O. & Mangold, N. & Maurice, Sylvestre & Meslin, P. & Schröder, Susanne & Wiens, R. & Blaney, D. & Cousin, Agnes & DeFlores, L. & Vaniman, David. (2014). First Fluorine Detection on Mars with ChemCam On-Board MSL-Curiosity.
- [29] Materion (2021): Materion is back on Mars, [Materion is Back on Mars](#)
- [30] International Atomic Energy Agency (2020): Advances in Small Modular Reactor Technology Developments: A Supplement to : IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), 2020 Edition, 285-288. oldal
- [31] Mars Society of Canada: ISRU Part 3: How to Generate Energy on Mars (2020 szeptember 16), [ISRU Part III: How to Generate Energy on Mars • The Mars Society of Canada](#)
- [32] Alex Gilbert (2022. november 1): Solar Power is Challenging on Mars, [Solar Power is Challenging on Mars — Power and Resources](#)
- [33] D.C. Nababan, M.G. Shaw, M.S. Humbert, R.Z. Mukhlis, M.A. Rhamdhani, Metals extraction on Mars through carbothermic reduction, Acta Astronautica, Volume 198, (2022) Pages 564-576, ISSN 0094-5765, <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.07.009>.
- [34] Ticos, Catalin & Scurtu, A. & Ticos, Dorina. (2017). A pulsed "plasma broom" for dusting off surfaces on Mars. New Journal of Physics. 19. 10.1088/1367-2630/aa60e5.
- [35] Carr, Michael (2006): The Surface of Mars, Cambridge University Press, ISBN 978-0-511-27041-3
- [36] Kuziakina, Marina & Gura, Dmitry & Zverok, Dmitry. (2019). GIS analysis of promising landing sites for manned flight to Mars. E3S Web of Conferences. 138. 02004. 10.1051/e3sconf/201913802004.
- [37] Heldmann, Jennifer & Brown, Adrian & Clarke, Jonathan & Martinez, Edward & Rupert, Shannon & Thomas, Matilda. (2006). Follow the water: Applying a Mars exploration strategy tot he Arkaroola analog region, South Australia. Science and Technology Series. 111.
- [38] Mark Belan (2022 október 7): Animated Map: Where to Find Water on Mars, [Animated Map: Where to Find Water on Mars \(visualcapitalist.com\)](#)

- [39] Hynek, B.M., R.E. Arvidson, R.J. Phillips(2002): „Geologic setting and origin of Terra Meridiani hematite deposit on Mars”, *J. Geophys. Res.*107, 5088, DOI: 10.1029/2002JE001891
- [40] Sanders, Gerald B., Larson, William E. (2011 január 4): „Integration of In-Situ Resource Utilization into lunar/Mars exploration through field analogs”, *Advances in Space Research*, 47, 20-29. o. DOI: 10.1016/j.asr.2010.08.020
- [41] National Aeronautics and Space Administration: Crew Health and Performance Exploration Analog, [CHAPEA - NASA](#)
- [42] National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology (2007 június 12): Extreme planet takes its toll, [Mars Exploration Rover Mission: Spotlight \(nasa.gov\)](#)
- [43] Kuziakina, Marina & Gura, Dmitry & Zverok, Dmitry. (2019). GIS analysis of promising landing sites for manned flight to Mars. *E3S Web of Conferences*. 138. 02004. 10.1051/e3sconf/201913802004
- [44] Heldmann, Jennifer & Brown, Adrian & Clarke, Jonathan & Martinez, Edward & Rupert, Shannon & Thomas, Matilda. (2006). Follow the water: Applying a mars exploration strategy to the Arkaroola analog region, South Australia. *Science and Technology Series*. 111.
- [45] David I. Poston, Marc A. Gibson , Thomas Godfroy & Patrick R. McClure (2020) KRUSTY Reactor Design, *Nuclear Technology*, 206:sup1, S13-S30, DOI: 10.1080/00295450.2020.1725382, 8.oldal
- [46] Franz, Heather B.; Trainer, Melissa G.; Malespin, Charles A.; Mahaffy, Paul R.; Atreya, Sushil K.; Becker, Richard H.; Benna, Mehdi; Conrad, Pamela G.; Eigenbrode, Jennifer L. (1 April 2017). "Initial SAM calibration gas experiments on Mars: Quadrupole mass spectrometer results and implications". *Planetary and Space Science*. 138: 44–54. DOI: 10.1016/j.pss.2017.01.014
- [47] Eltayeb A, Klaas L, Kölz L, Vieten J, Roeb M, Sattler C. Thermochemical process and compact apparatus for concentrating oxygen in extraterrestrial atmospheres: a feasibility study. *Sci Rep*. 2023 Mar 29;13(1):5148. doi: 10.1038/s41598-023-31120-x. PMID: 36990997; PMCID: PMC10060405.
- [48] Hecht, Sanders, Hoffman, Hartvigsen, Rapp, Nasr (2022 július): MOXIE: Challenges of operating a chemical plant on another planet

- [49] Seán Kelly, Claudia Verheyen, Aidan Cowley, Annemie Bogaerts, Producing oxygen and fertilizer with the Martian atmosphere by using microwave plasma, *Chem*, Volume 8, Issue 10, 2022, Pages 2797-2816, ISSN 2451-9294, <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2022.07.015>.
- [50] Evan Fraser (2023 február 7): Learning to grow food on Mars could transform food production on Earth, [Learning to grow food on Mars could transform food production on Earth \(astronomy.com\)](https://www.astronomy.com)
- [51] Elizabeth Escamilla-Roa, Maria-Paz Zorzano, Javier Martin-Torres, Alfonso Hernández-Laguna, C. Ignacio Sainz-Díaz, DFT study of the reduction reaction of calcium perchlorate on olivine surface: Implications to formation of Martian's regolith, *Applied Surface Science*, Volume 512, 2020, 145634, ISSN 0169-4332, <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.145634>.
- [52] Paul Gilster (2023 január 26): Food production on Mars: Dirt farming as the most scalable solution for settlement, [Food production on Mars: Dirt farming as the most scalable solution for settlement | Centauri Dreams \(centauri-dreams.org\)](https://www.centauri-dreams.org)
- [53] Seán Kelly, Claudia Verheyen, Aidan Cowley, Annemie Bogaerts, Producing oxygen and fertilizer with the Martian atmosphere by using microwave plasma, *Chem*, Volume 8, Issue 10, 2022, Pages 2797-2816, ISSN 2451-9294, <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2022.07.015>.
- [54] Tack N, Wamelink G, Denkova A, Schouwenburg M, Hilhorst H, Wolterbeek H and Goedhart P (2021) Influence of Martian Radiation-like Conditions on the Growth of *Secale cereale* and *Lepidium sativum*. *Front. Astron. Space Sci.* 8:665649. doi: 10.3389/fspas.2021.665649
- [55] Evan Fraser (2023 február 7): Learning to grow food on Mars could transform food production on Earth, [Learning to grow food on Mars could transform food production on Earth \(astronomy.com\)](https://www.astronomy.com)
- [56] American Heart Association (2018 március 22): Astronauts need extra exercise and calories in space, [Astronauts need extra exercise and calories in space \(phys.org\)](https://www.phys.org)
- [57] Suthida Theepharaksapan, Yanika Lerkmahalikit, Chayanin Namyuang, Suda Ittisupornrat, Performance of membrane photobioreactor for integrated *Spirulina* strain cultivation and nutrient removal of membrane bioreactor effluent, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, Volume 11, Issue 5, 2023, 110579, ISSN 2213-3437, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.110579>.
- [58] [Mars Regolith Water Extractor \(nasa.gov\)](https://www.nasa.gov) 09-03-10)

- [59] The Planetary Society: Bruce Murray Space Image Library: Oblique view of Arsia Mons from Mars Orbiter Mission (2015 január 1) [Oblique view of Arsia Mons from Mars Orbiter... | The Planetary Society](#)
- [60] University of Washington, College of Engineering: Mars Atmospheric Simulation Chamber, [Mars Atmospheric Simulation Chamber | Aeronautics and Astronautics \(washington.edu\)](#)
- [61] Hsu, Jeremy (2014 június 14): „What are rare Earth elements?“, Live Science
- [62] "5 The Sterilization of Samples from Mars." National Research Council. 2002. The Quarantine and Certification of Martian Samples. Washington, DC: The National Academies Press. doi: 10.17226/10138. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. 2002. The Quarantine and Certification of Martian Samples. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/10138>.
- [63] Kátia Aparecida da Silva Aquino (2012). Sterilization by Gamma Irradiation, Gamma Radiation, Prof. Feriz Adrovic (Ed.), ISBN: 978-953-51-0316-5, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/gammaradiation/sterilization-by-gamma-irradiation>
- [64] Hugh H. Kieffer (1992). Mars. University of Arizona Press. ISBN 978-0-8165-1257-7.
- [65] International Atomic Energy Agency: Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), 2020 Edition, 297-298. pages
- [66] Schröder, V. & Emonts, B. & Janßen, Holger & Schulze, H.-P. (2004). Explosion Limits of Hydrogen/Oxygen Mixtures at Initial Pressures up to 200 bar. Chemical Engineering & Technology. 27. 847 - 851. 10.1002/ceat.200403174.
- [67] <https://www.nasa.gov/get-involved/prizes-challenges-crowdsourcing/nasa-waste-jettison-mechanism-challenge>
- [68] Finstein MS, Hogan JA, Sager JC, Cowan RM, Strom PF. Composting on Mars or the Moon: II. Temperature feedback control with top-wise introduction of waste material and air. Life Support Biosph Sci. 1999;6(3):181-91. PMID: 11542678.
- [69] Gupta, A. K.; Paliwal, D. K.; Bajaj, P. (1998). "Melting behavior of acrylonitrile polymers". Journal of Applied Polymer Science. 70 (13): 2703–2709. doi:10.1002/
- [70] Plastic Properties of Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), May 15, 2010, at the Wayback Machine. Small table of ABS properties towards the bottom

- [71] SyBridge Technologies (2021 április 15): Know Your Materials: Acrylonitrile Butadiene Styrene, [Know Your Materials: Acrylonitrile Butadiene Styrene \(ABS\) - SyBridge Technologies](#)
- [72] James, Denis H.; Castor, William M. (2007). "Styrene". Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim: Wiley-VCH. doi:10.1002/14356007.a25_329.pub2
- [73] Bruckner Győző: Szerves kémia, II-1-es kötet. Tankönyvkiadó, Budapest, 1979, Furka Árpád: Szerves kémia, Budapest, 1988
- [74] National Aeronautics and Space Administration: NASA Finds Ancient Organic Material, Mysterious Methane on Mars, [NASA Finds Ancient Organic Material, Mysterious Methane on Mars - NASA](#)
- [75] Dr. Siposné Dr. Kedves Éva, Horváth Balázs, Péntek Lászlóné: Kémia 10. Szerves kémiai ismeretek, Bruckner Győző: Szerves kémia, I/1-es kötet: Nyílt szénláncú vegyületek
- [76] Jett C. Arthur, 2 - Chemical Modification of Cellulose and its Derivatives, Editor(s): Geoffrey Allen, John C. Bevington, Comprehensive Polymer Science and Supplements, Pergamon, 1989, Pages 49-80, ISBN 9780080967011, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096701-1.00182-8>.
- [77] [polibutadién \(vilaglex.hu\)](#)
- [78] National Aeronautics and Space Administration: What is the deep space network?, [What is the Deep Space Network? - NASA](#)
- [79] Australian Greenhouse Office. Chapter 5: Assessing lighting savings, Working Energy Resource and Training Kit: Lighting
- [80] Dominelli PB, Wiggins CC, Roy TK, Secomb TW, Curry TB, Joyner MJ. The Oxygen Cascade During Exercise in Health and Disease. Mayo Clin Proc. 2021 Apr;96(4):1017-1032. doi: 10.1016/j.mayocp.2020.06.063. Epub 2021 Mar 11. PMID: 33714599; PMCID: PMC8026750.
- [81] Dominelli PB, Wiggins CC, Roy TK, Secomb TW, Curry TB, Joyner MJ. The Oxygen Cascade During Exercise in Health and Disease. Mayo Clin Proc. 2021 Apr;96(4):1017-1032. doi: 10.1016/j.mayocp.2020.06.063. Epub 2021 Mar 11. PMID: 33714599; PMCID: PMC8026750.
- [82] Finstein MS, Hogan JA, Sager JC, Cowan RM, Strom PF. Composting on Mars or the Moon: II. Temperature feedback control with top-wise introduction of waste material and air. Life Support Biosph Sci. 1999;6(3):181-91. PMID: 11542678.

- [83] French Alternative Energies and Atomic Energy Commission, [Co-60 tables.pdf \(Inhb.fr\)](#)
- [84] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2004). International standards for tissue banks, IAEA, Vienna, Austria
- [85] Paul Schlyter, Radiometry and photometry in astronomy FAQ (2006)
- [86] Freie Universität Berlin (2014 augusztus 18): Deep deep down in the Hellas basin, [Hellas \(Aug 18, 2014\) • Planetary Sciences and Remote Sensing • Department of Earth Sciences \(fu-berlin.de\)](#)
- [87] European Space Agency (2010 május 12): Volcanic Ash in Meridiani Planum, [ESA - Volcanic ash in Meridiani Planum](#)