

## Az űrutazás energetikája

2021. november 11.

### Bevezetés

A "GPK 150" emlékfélévének hetedik nyilvános előadása során az űrutazás energetikai vonatkozásairól hallhatott az érdeklődő közönség. Az emberi jelenlét kiterjesztése a holdra és a hold körüli, ún. ciszlunáris térségre a annak lehetőségeinek és nyersanyagainak és térség kihasználása fogja követni. A földi nehézségi gyorsulás leküzdéséhez, más égitestek megközelítéséhez, a világűrben üzemelő eszközök hőhártásának, üzemelésének fenntartásához, az emberi munkavégzés számára alkalmas környezet biztosításához jelentős energiamennyiség szükséges. A felhasznált energiaforrások a földről, illetve helyben kerülnek biztosításra. Az előadás során az űrbéli küldetések energiaigényére, az energiaellátás lehetőségeire, nehézségeire és a jövőbeli tervekre tért ki Hirn Attila, a REMRED Kft. ügyvezetője, az Energiatudományi Központ Űrkutatási Laboratóriumának vezetője, a Magyar Asztronautikai Társaság Főtitkár-helyettese.

### Az űrtevékenység napjainkban

Jelentős az emberiség tevékenysége az űrben, föld körüli pályákon. Különböző szolgálati rendszerek keringenek geostacionárius pályán, ezek célja elsősorban űrtávközlési (televízió, internet stb.), navigációs (szárazföldön, tengeren, illetve légiforgalmi területeken is) és földmegfigyelési vagy távérzékelési (meteorológia, precíziós mezőgazdasági műveletek segítése, továbbá a katasztrófaelhárítás – és védelem, környezetvédelem), de használják még ezeket a műholdakat katonai célokra is. Alapvetően az 1960-as évektől kezdődően lehet beszélni űrtevékenységről föld körüli pályákon, az azóta eltelt 50-60 évben folyamatosan kerültek műholdak a föld köré, azonban az elmúlt évtizedben jelentősen megnőtt ezeknek az eszközöknek a száma. Ez leginkább annak köszönhető, hogy az űreszközök mérete lecsökkent és olcsóbb a föld körüli pályára állításuk. Vélhetően ez a tendencia nem fog változni, így nőni fog a következő években ezeknek az eszközöknek a forgalomba helyezése a globális lefedettség elérését kitűzve végső célként (az emberiség szélessávú internet elérését szeretnék lehetővé tenni). A ciszlunáris térségbe országok, szervezetek egy meghatározott célú és tevékenységű infrastruktúrát szeretnének kiépíteni annak érdekében, hogy olyan űrtevékenységeket tudjanak azokkal támogatni, mint pl. a távközlés, kommunikáció, stb. Legjelesebb képviselői a NASA, az Európai Űrügynökség és az Orosz Szövetségi Űrügynökség. Várhatóan a következő években a *Lunar Gateway* is meg fog épülni a hold körüli pályán (magyar műszer-csomag is fog az űrállomásba kerülni), amelynek célja, hogy éveken belül ember térjen vissza a hold felszínére és huzamosabb ideig lehessen ott kísérleteket végezni, továbbá később ipari hasznosítás is lehetővé váljon

a területen emberi jelenléttel. Mind az állami, mind a magánszektorban emellett van olyan célkitűzés, hogy a Marsra is embert juttassanak a következő évtizedben.

## Energiaforrások

Az első fő szempont az űrutazást tekintve, hogy a föld nehézségi erejét leküzdjék (~100 GW teljesítmény igény) és föld körüli pályára tudjon állni a műhold. Emellett biztosítani kell a más égitestről való felszállást, bolygóközi, vagy akár a csillagközi térbe juttatást is. Egy műhold, űreszköz pályára állításához jelentős energiamennyiség szükséges. Ez annak köszönhető, hogy egy bolygóhoz való eljutás nem biztosítja a pályára állás energiáját is, így azt külön kell biztosítani, amihez az űreszköz sebességét lassítani kell. Tekintve, hogy a ma aktuális űrprogramok kétirányú küldetések, így számolni kell más égitestekről való felszállással, illetve a Földre való visszatéréssel is. Az űrutazások során szükség van pályamódosításra (~néhány kW teljesítményigény), mert érezhető a geostacionárius pályán a Föld vonzása és annak változása. Illetve űreszközök pozicionálására, ún. attitűd-kontrollra (~néhány W), ha például a Földre szeretné irányítani az eszközt az üzemeltető.

Az utazás mellett az űreszközöket üzemeltetni szükséges. A létfontosságú és egyéb alrendszerekhez nagyobb 100 W szükséges. Ez az igény magába foglalja a tápellátó rendszerek, kommunikációs rendszerek, fedélzeti számítógépek és navigáció biztosítását a műholdban. Kisebb energiaigény szükséges a berendezések temperálására (például az akkumulátorok melegen tartása), ez nagyjából néhány 10 Watt értéket jelent. A Nemzetközi Űrállomás számára készített dózismérő rendszereket a REMDEM Kft., amelynek a neve TRITEL. 2013-ban méréseket végeztek a Nemzetközi Űrállomás fedélzetén ezzel az eszközzel, pár év múlva a Hold Űrállomásra is felkerül egy ilyen eszköz, valamint a jövőben pedig várhatóan egy Mars szondára is felszerelésre kerül. 3-5-10 Wattot fogyaszt ez az eszköz, tehát nem jelentős az energiaigénye. Amennyiben emberes küldetésekről van szó, úgy biztosítani kell az asztronauták ellátását is létfenntartó berendezésekkel nagy megbízhatósággal.

## Energiaellátás a világűrben – lehetőségek és nehézségek

Jelentős mértékben el van zárva az ember az alapvetőnek tekintett szolgáltatásoktól a világűrben (példaként említve az antarktisi körülmények hasonlóak), így autonóm módon és módszertannal kell megoldani az energiaellátását az egységeknek, mivel nem áll rendelkezésre alapvetően külső energiaforrás. Az üzemeltetést tekintve, az **1. Ábrán** látható, hogy milyen módszerekkel, milyen időtartományban, továbbá mekkora teljesítmény kinyerésével lehet energiát biztosítani az űreszközök számára. Vannak olyan küldetések, amelyek esetén csak rövid időre kell biztosítani energiaforrást, azonban vannak évtizedes

küldetések is, így széles skálán mozog a szükséges teljesítmény mértéke. Ezeket az igényeket biztosítani lehet:

- Elem, akkumulátor;
- Vegyi üzemanyag;
- Napelem;
- Üzemanyagcella,
- Reaktor;
- RTG (Radioizotópos termoelektromos generátor) segítségével is.



1. Ábra: Lehetséges energiaforrások [1]

Fontos megállapítani a fő szempontokat, amelyek szerint szükséges kiválasztani az energiaforrásokat egy-egy küldetésre. Elengedhetetlen az **energiasűrűség** vizsgálata, azaz mekkora tömegeből milyen energiamennyiséget lehet kinyerni, mert számít, hogy mekkora a tömege az energiaforrásnak (például egy napelem sokkal könnyebb, mint egy reaktor). Fontos tényező még a termelés **megbízhatósága**, folyamatossága, tekintve, hogy az űrben nem áll rendelkezésre azonnali javítás lehetősége. Kell vizsgálni az tápellátás **élettartamát** is, mert hosszútávú küldetés esetén számít az energiaforrás megbízhatósága. További jelentős tényező a **biztonságos** üzemeltetés és hogy ez ne veszélyeztesse a többi alrendszer megfelelő működését. Utolsóként szükséges említeni a berendezés beruházásának **fajlagos árát** és annak **fejlesztési idejét**. Az űrutazásban egy kilóval nehezebb berendezés jelentős többletköltséget tartalmaz az utazás során, így törekedni kell minél hatékonyabb, minél gyorsabb fejlesztésre.

*Különböző energiaforrások elemzése:*

- **Elem, akkumulátor:**

Elektrokémiai elven működik és alacsony az energiasűrűsége, addig üzemel, amíg le nem merül, így ez utóbbi jelentős hátrány és nem alkalmazható hosszabb küldetésre újratöltés lehetősége nélkül (például fotovoltaikus cellák alkalmazása). Fontos szempont, hogy a környezeti hatásokat túrnie kell ezeknek a berendezéseknek, így a

hőmérsékletet is és figyelni kell az akkumulátorok megfelelő temperálására is. Példa: *Szputnyik-1*, illetve *Rosetta Lander*.

- **Üzemanyagcellák:**

Hasonlóan az előző típushoz elektrokémiai folyamatban termel energiát az eszköz, azonban az elektróda nem „fogy el”, mint egy közösleges elemnél és az oxidáló szer(„üzemanyag”) pótolható az energiatermelés során, ennek köszönhetően nagyobb energiamennyiséget lehet kinyerni cellákból (nagyobb energiasűrűség és teljesítmény, ~250-350 W/kg).

- **Fotovoltaikus panelek:**

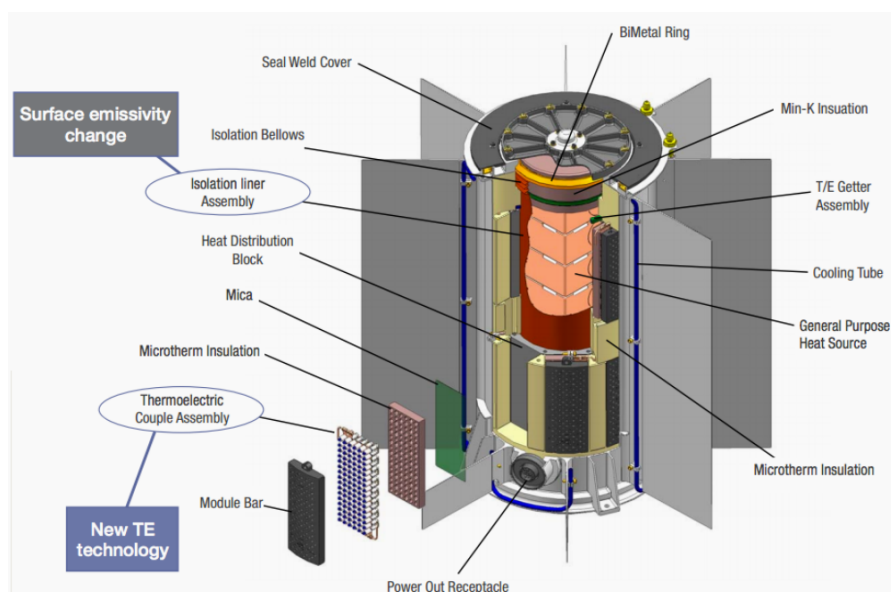
A földi paneleknek is vannak jelentős előnyei és hátrányai, utóbbiak közé tartozik az előrejelzés bizonytalansága. Ehhez képest a világűrben jobb környezet adott az üzemeltetés szempontjából, mert sokkal jobban számítható a geostacionárius pályákon keringő panelek egységnyi felületére eső kinyerhető energia mennyisége, emellett tervezhető és jól becsülhető a termelés időpontja, mivel egy adott keringési időszakban tudja az irányító, hogy mikor mozog az egység a föld árnyékában, illetve a „nap felőli” oldalon. 30%-os hatásfok érhető el ezekkel a panelekkel (35%-os hatásfok van tervbe véve). Az idő előrehaladtával azonban a szélsőséges körülmények miatt degradálódnak ezek a berendezések (meteor-erózió, hőingadozás, sugárzás – napkitörések és van Allen-övek), így károsodnak a napelemcellák, amelyek hatásfok csökkenést eredményeznek. Amennyiben nyitószerkezettel is rendelkeznek ezek a panelberendezések (pl.: Nemzetközi Űrállomás), úgy annak az elhasználódása, elromlása is egy plusz kockázati faktor az energiatermelésben. Példa: *Rosetta Lander*, *MSR ERO*.

A naptól való távolság jelentősen befolyásolja a kinyerhető energiamennyiséget (Föld közelében ~300 W/m<sup>2</sup>), távolodva a naptól csökken ennek a technológiának az alkalmazhatósága (pl.: a *Rosetta Lander* 64 m<sup>2</sup> nagyságú panelei a Jupiter környékén már nem tudták üzemeltetni a műholdat). Azonban a naphoz közeledve is adódhatnak a problémák ennél a panelnél, mert a panelek felhevülnek túl közel kerülve a Naphoz. A legközelebb keringő szonda a *Parker Solar Probe* volt, amelynek 1 W megtermelt energiamennyiséghez 13 W hőenergiát kellett elvezetnie, ez 500-szor nagyobb, mint amit a geostacionárius műholdakon működő paneleknek szükséges disszipálni.

- **Radioizotópos egységek:**

A radioaktív elemek bomlásuk során hőt bocsátanak ki és ezt a hőt hasznosítja a technológia. Ennek melegen tartásához és üzemeltetéséhez szükséges egy **RHU** (Radioactive Heater Units) egység, amely körülbelül 3 cm magas és 2,5 cm átmérőjű henger alakú eszköz, tömege ~40g és 2,7 g Plutóniumot tartalmaz, nagyjából 1-2 W teljesítményt ad le, amellyel segít melegen tartani az akkumulátort. Azonban nem

csak hőtermelésre, hanem elektromos energiaellátásra is lehet használni, ilyenek az **RTG** (Radioactive thermoelectric Generator) radioaktív termoelektromos generátorok, amelyek elektromos energiát állítanak elő. Jellemzően itt alfa-sugárzó izotópokat alkalmaznak (a jelentős sugárzás elkerülése végett) és a berendezésben nincsen mozgó alkatrész, ennek köszönhetően hosszabb élettartama van a kopás és elhasználódás kiküszöbölése végett.



2. Ábra: Radioizotópos termoelektromos generátor [2]

A jellemző izotópok továbbá:  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Am}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ , azonban minden egyes izotópnak megvan a hátránya, mert eltérnek felezési időben és bomlási módban. Ezt a technológiát a nagyobb bolygókat meglátogató küldetések során szokták alkalmazni, pl.: *Voyager*, *Apollo* küldetések. Legfejlettebb típusa a NASA által több küldetésre fejlesztett MMRTG, amelynek a teljesítménye 2 kW és 110 W-t lehet biztosítani az egységnek.

Más módszerek is vannak a hatásfok növelésére: Seebeck-effektus helyett, Stirling motorral felszerelt SGR (Stirling Radioisotope Generator) és ASGR módszerek alkalmazása, amiben a konverzió a Stirling-motor segítségével történik és hélium a folyamat munkaközege. Ennek a típusnak a hátránya, hogy tartalmaz mozgó alkatrészeket, így nagyobb a kockázata, hogy meghibásodik üzem közben, viszont négyszer jobb hatásfokkal rendelkezik. Fontos megjegyezni, hogy ez a típus „még nem repült”, de alapos teszteléseket végeztek már rajtuk, így a jövőben valószínűleg alkalmazni fogják ezt a módszert is.

Nagyobb teljesítmény kinyeréséhez atomreaktorokat is lehet alkalmazni, azonban magas pályán vagy bolygóközi küldetések során használják csak ezeket a műholdakat, hogy meghibásodás esetén a földre „ne térjen vissza” és ne okozzon nagyobb kárt. Pályára állás után indítják be ezeket az egységeket. Egy amerikai

(SNAP-10A) és 37 szovjet-orosz ilyen típusú műhold van jelenleg üzemben. Teljesítményüket tekintve több 100 kW-os értéket is elérhetnek ezek az egységek, viszont nagy a tömegük, így költségesebb az előállításuk és üzemeltetésük.

### Rakétameghajtások – űrutazás:

Meghajtásokat tekintve domináns a **kémiai** anyagok alkalmazása. Ezek az anyagok mind szilárd és folyékony hajtóanyag típusban fellelhetők, mert geostacionárius pálya vagy bolygóközi utazás eléréshez többfokozatú rakéta meghajtás szükséges. **Ionhajtóműveket** (elektromágneses elven működő) is használnak, de alapvetően kisebb tolóerő érhető el ezekkel a berendezésekkel, viszont hosszabb ideig üzemeltethetők, így megbízható és praktikus megoldást nyújtanak, ha nem rövid idő alatt kell gyorsítani a hajtóművet. Emellett még **nukleáris** meghajtásokat is alkalmaztak már az űrutazásban. Ennél a típusnál a folyamatban nincsen égés, így nem szükséges oxidáló anyag hozzá a fajlagos tolóereje azonban 3-6% a kémiai hajtóművekhez képest, viszont nagyobb a teljesítménysűrűsége a maghasadási folyamat végett. Tekintve, hogy az a háttérsugárzás, amely éri az űrhajósokat eleve nagyobb, mint a földön, így a meghajtó sugárzás nem okoz jelentős többletet. Gyorsabb utazás érhető el ezzel a technológiával (Marsi utazást ilyen típusal tervezik). Technológia példa: NERVE (NASA).

„Atomrobbantás” segítségével is próbáltak meghajtót üzemeltetni (*Project Orion*), azonban ennek eredménye az Atomcsend Egyezmény lett, amely megtiltotta a légköri atomrobbantásokat az országok számára. Ennek várhatóan nem lesz jövője továbbra sem az atomenergia békés célú felhasználása miatt.

### Egyéb lehetőségek:

- Indítás az Egyenlítő közelében;
- Égitestek perdületének kihasználása, hintamanőverek alkalmazása, mert a szondának segítség a bolygó megkerülésében;
- Fékezés a bolygó légkörének segítségével;
- Napvitorlás alkalmazása;
  - o Napból kiáramló fény „gyorsíthatja” fel az űreszközt, amennyiben megfelelően nagy az energiatermelő felület ennek eléréséhez;
  - o Pl.: LightSail-2 projekt (2019).

## Kitekintés

A nukleáris energiaellátásra fókuszálva a további Hold és Mars expedíciókat szeretné a NASA atomreaktorok segítségével üzemeltetni. A NASA kW és MW egységeket tervez, úgy, hogy számításuk szerint egy MARS bázishoz 40 kW teljesítmény lesz majd szükséges. A kW (**KiloPower**) egységek Stirling motor segítségével fogják átalakítani a hőenergiát villamos energiává. Egy egység 4 kW teljesítményű, 93%-os dúsítású uránnal rendelkezik, a folyamat hűtőközege folyékony fém (nátrium), 750 kg tömegű

és 5 m hosszú. Míg a MW (MegaPower) egységek 2 MWe teljesítményre lesznek tervezve, 16-19%-os dúsítású uránnal üzemelnének, levegő munkaközeggel, tömegük 40 tonna lenne és 4 méter hosszú, 2 méter átmérőjű berendezések lennének. Oroszországban is vannak erre irányuló fejlesztések, amelyek atomreaktort és ionhajtóművet együttesen alkalmaznának az űrutazásban, akár az űrvontatásban is.

A napvitorlás technológiához hasonlóan lézereket is szeretnének alkalmazni (Breakthrough Starshot) az űrutazásban, amellyel kicsi műholdakat (Sprite műholdak – bélyeg méretűek) felgyorsítanának a földről lézerek segítségével 0,2 fénysebességre annak érdekében, hogy 20 éven belül elérjék a legközelebbi csillagrendszert, azonban ennek a rendszernek sok a nehézsége, még kidolgozás alatt áll a projekt.

Űrlifttel is szeretnének megvalósítani, hogy ne kelljen rakétákat alkalmazni a sztratoszféra eléréséhez, azonban ennek a projektnek is sok problémája adódik, hiszen 42000 km kábel lenne szükséges a megvalósításhoz, amely földhöz rögzített, a túlsó végén pedig ellensúllyal rendelkezik. Van olyan elképzelés miszerint ez hamarabb fog megvalósulni a Holdon, mint a Földön.

További lehetőségek között szerepel a fúziós hajtómű alkalmazása, ami D/T helyett  $D/3_{He}$  reakció elvén működne, sugárvédelmi szempontból kedvezőbb megoldás, azonban még a Földön sem üzemel ilyen berendezés (ITER épülőben), így egyelőre bizonytalan, mikor lesz erre lehetőség. További lehetőség az elektromágneses gyorsítás alkalmazása a Hold felszínéről (hasonló elven, mint a vonatok a Földön).

## Források

1. Hirn Attila (2021): Az űrutazás energetikája c. előadása
2. <https://rps.nasa.gov/resources/56/enhanced-multi-mission-radioisotope-thermoelectric-generator-emmtg-concept/>

Móczár Botond Máté

Az Energetikai Szakkollégium tagja