

Nagy Imre

## LÉGKÖRI GÁZOKKAL TÁPLÁLT IONHAJTÓMŰVEK

DOI: 10.32560/rk.2019.1.17

*Az alacsony pályákon keringő mesterséges holdak, bár az alacsony pályamagasság miatt több feladatra is ideálisak lennének, csak korlátozottan alkalmazhatók, mert a légköri fékeződés gyors magasságvesztéshez, és így rövid élettartamhoz vezet. Az élettartammal kapcsolatos problémára a hajtóközegként a felső légköri gázokat használó ionhajtóművek jelenthetik a megoldást, amelyek energiaszükségletét napelemek biztosíthatják. Ezek a hajtóművek 200 km körüli magasságokban lehetnek hatékonyak jelenleg, távlatilag pedig elképzelhető a működési magasság csökkentése akár 80 km-ig is. Jelen munkában áttekintjük az újfajta ionhajtóművek történetét, a velük szembeni elvárásokat, és megvizsgáljuk az alkalmazásuk lehetőségeit katonai, polgári, illetve tudományos téren egyaránt.*

**Kulcsszavak:** ion-torlósugarhajtómű, mesterséges holdak, földmegfigyelés, űrtávközlés, bolygó kutatás

### A MESTERSÉGES HOLDAK ÉLETTARTAMA

A műholdak élettartama több tényezőtől függ. Ezek közül a legfontosabb a fedélzeti rendszerek várható élettartama. Napjainkban ez hozzávetőlegesen 15 év. Szintén fontos tényező a pályamagasság. A légkör sűrűsége a magassággal exponenciálisan csökken, de alacsony pályákon még jelentősen módosíthatja a pályát hosszabb időtávon. Például 200 km körüli magasságú kezdeti pályáról (LEO) néhány hét vagy hónap elteltével annyit süllyed az űreszköz, hogy a légköri fékeződés hatására felizzik, és az egyre jelentősebbé váló aerodinamikai erők miatt darabjaira szakad a műhold. Ezzel szemben pl. a 35 786 km magas geostacionárius pálya (GEO) lényegében korlátlan ideig fennmaradhat.

A felső légkör sűrűsége a felszínihez képest extrém változásokat mutat. Ennek alapvető oka a sokkal alacsonyabb sűrűség. A fluktuációkat a fűtésben végbemenő változások okozzák. Vanak periodikus jellegű fluktuációk a Föld tengelyforgása miatt, illetve évszakos változások a tengely ferdesége miatt. Ezek mellett jelentős hatása van a Nap aktivitási ciklusa miatt a napállandóban bekövetkező változásoknak is. A naptevékenység, és így a napállandó jelenleg nehezen előrejelezhető kellően pontos napmodell hiányában. A felső légköri nyomást és hőmérsékletet a magasság függvényében az ún. CIRA-86 modell írja le [1] [2].

A felső légkörben a naptevékenység hatására bekövetkező sűrűségváltozások akár évekkel rövidíthetik a mesterséges égitestek élettartamát. A legismertebb az amerikai Skylab űrállomás esete, amelynek utolsó személyzete 1974 február 8-án távozott az űrállomásról. Saját hajtóművek, és így pályamódosítás híján a Skylab ettől kezdve folyamatosan süllyedt a kezdeti 433 és 455 km között húzódó pályáról, míg 1979 július 11-én le nem zuhant. Ez az időpont azonban jóval korábbra esett a becsült 1983 márciusánál [3].

A légköri fékeződés hatása kompenzálható a mesterséges égitest fedélzetén elhelyezett hajtómű segítségével, aminek a működéséhez viszont hajtóanyag is szükséges. Ez meglehetősen költséges megoldás, tekintve a magas, a műholdak árával összemérhető indítási költségeket. Célszerűnek

látszik magasabb pályára juttatni az űreszközt, mivel így kevesebb fedélzeti hajtóanyaggal is biztosítható ugyanaz az élettartam. Ugyanakkor a magasabb pálya kialakítása drágább is. További bonyolítja a helyzetet, hogy pl. egy távközlési műhold esetén sokkal nagyobb teljesítmény kell adott sebességű adatátvitel megvalósításához geostacionárius pályáról, mint alacsony pályáról. A nagyobb teljesítményhez nagyobb napelemek szükségesek, amelyek jelentősen növelik a műhold árát, valamint a tömegét, és így a pályára állítás költségeit is [4]. Cserében viszont magasabb pályán pár műhoddal is megvalósítható a felszín közel teljes lefedése (GEO: 3), míg alacsony pályán legalább több tucat szükséges, ám a jelenleg a megvalósulás küszöbén álló rendszerek tervezői ezres nagyságrendben gondolkodnak (1. táblázat).

A rendszer neve	Üzemeltető	Pályamagasság [km]	Műhold tömege [kg]	Műholdak száma	Hivatkozás
OneWeb	OneWeb	1200	150	648+1972	[5]
Starlink Constellation	SpaceX/Google	550	100-500	~12 000	[6]
?	Samsung	1400	?	4600	[7]

1. táblázat Néhány tervezett nagy műholdrendszer

A jelenleg szokatlanul soknak tűnő egységből összeálló rendszer előnye, hogy érvényesülhet a méretgazdaságosság hatása, azaz egy-egy műhold előállítási költsége a jelenlegi akár 200 millió \$-os ár 1-2%-ára is lecsökkenhet [4]. A OneWeb 2019 február 27-én pályára állított első műholdjainak az előállítása például 1 millió \$ volt, ami a későbbiekben feleződhet [8].

## IONHAJTÓMŰVEK MŰHOLDAKON

Mint az 1. táblázatból látható, a tervezett műholdrendszerek viszonylag magas pályákra kerülnek. Ennek oka, mint azt már említettük, az alacsony pálya fenntartásához szükséges nagy mennyiségű hajtóanyagból származó többletköltség. Ezek a rendszerek a jelenleg elterjedten alkalmazott kémiai hajtóművekkel nem tudnának gazdaságosan működni alacsony pályán.

A megoldást az ionhajtóművek jelenthetik. Ezen hajtóművek technológiáját az 1960-as évek óta fejlesztik, ám az első komoly alkalmazásra az ESA Artemis technológiai demonstrációs műholdján került sor 2001 július 12-én [9]. Az indítás nem sikerült tökéletesre, a műhold nem érte el a tervezett geostacionárius átmeneti pályát. Ez egy geostacionárius pályára szánt szokványos műholdnak a végleges elvesztését is jelentette volna, ám az Artemis fedélzetén kémiai helyett ionhajtóművet helyeztek el. Ennek segítségével, ha lassan is, de végül elérte a tervezett szolgálati pozíciót [9]. Az Artemis esete jelentősen ösztönözte az ionhajtóművek használatát geostacionárius távközlési műholdakon, mind a végleges pálya kialakítására, mind az időszakos pályakorrekciókra.

Az ionhajtóművek alkalmazására alacsony szolgálati magasságú műholdakon napjainkig bezáráson mindössze egyetlen esetre van példa. Ez részben annak köszönhető, hogy a polgári indítások elenyésző része irányul alacsony, ezer kilométer alatti pályákra. Az említett egyetlen eset az ESA GOCE nevezetű geodéziai műholdja, amelynek egyetlen feladata a Föld gravitációs terének, a geopotenciálnak a folyamatos nagy pontosságú mérése volt [10]. A szolgálati magassága 254,9 km volt, azaz jelentős légköri fékező erő hatott rá. Ennek hatását folyamatosan semlegesíteni kellett egyrészt pályamagasság megtartása miatt, másképp heteken belül visszatért volna a sűrűbb légrétegekbe az űreszköz. Másrészt a geopotenciál meghatározásához az űreszköz helyzetének és

sebességének a gravitációs erő hatására bekövetkező változásait kell nagy pontossággal mérni. Mivel a léggöri fékeződés is sebesség-változást okoz, ezt korrekcióba kell venni. Figyelembe véve, hogy a tervezett élettartam 20 hónap volt, a két problémára a legjobb megoldásnak egy folyamatosan üzemelő ionhajtómű bizonyult. A műhold folyamatosan mérte a ráható fékezőerőt, és az ionhajtómű ennek megfelelő nagyságú, de ellentétes erővel kompenzálta azt. Így a szonda látszólag léggöri ellenállás nélküli pályán haladt, amíg el nem fogyott a hajtóanyagként használt xenon. Ez az indítás után ~4,5 évvel következett be. Ezt követően mindössze három héttel később a GOCE belépett a sűrűbb légrétegekbe.

A GOCE megsemmisülésekor a fedélzeti rendszerek és műszerek kifogástalan állapotban voltak, így ha még futotta volna a hajtóanyag-tartalékból, folytathatta volna a méréseket. Az adott élettartam biztosításához szükséges hajtóanyag mennyiségének meghatározása nehézségekbe ütközik a naptevékenység és így a felső léggör kiszámíthatatlansága miatt. A problémára kínáló egyik megoldás, hogy az ionhajtómű a fedélzeti hajtóanyag helyett a felső léggör gázait használja tolóerő létrehozásához, hasonlóan a repülőgépek sugárhajtóműveihez. Az elgondolás először 1995-ben bukkant fel Buford munkájában [4], ám feledésbe merült. Az ötlet 2003-ban merült fel újra Nishiyama tanulmányában [11].

## LEVEGŐVEL TÁPLÁLT IONHAJTÓMŰVEK

Buford a munkájában egy olyan hajtóművet ír le, amely egy méter élhosszúságú kocka alakú műholdat tudna állandó 200 km körüli magasságú pályán tartani [4]. A hajtómű legfontosabb része az abban a magasságban igen ritka léggöri gázok összegyűjtésére hivatott rendszer. Ez egy 15 m átmérőjű gyűrű, amelyben a belépő molekulákat ionizálni kell. Az ionizációt a gyűrű tengelyében elhelyezett katódból kilépő elektronok végzik. Az ionizáció hatásfokának növelése érdekében a gyűrűben homogén mágneses teret kell létrehozni, így az elektronok nem sugárirányban haladnak az anódként is szolgáló gyűrű felé, hanem spirális pályán. A gyűrűben keletkező ionok gyorsítása rácsok között történik. A gyorsítás után a kilépő ionokat semlegesíteni kell, amihez egy magas hőmérsékletre hevített katód szolgál a rácsok mögött. A számítások szerint a megfelelő tolóerő biztosítására mintegy 3 kW teljesítményű napelem szükséges.

Bufordéhoz hasonló alapokon nyugvó, azaz léggöri gázokat használó hajtóművet szabadalmaztatott a Busek Company Inc. Vlad Hurby vezetésével [12]. A szabadalmat jegyzők között található James Szabo, aki neve alapján magyar felmenők leszármazottja.

A Busek-féle megoldás legfontosabb eltérése a Buford-félétől, hogy míg az utóbbi átmérője és így a benne áramló közeg sűrűsége változatlan a hajtómű teljes hosszában, addig az előbbi tartalmaz egy kompressziós fokozatot is. Ez a nagy sebességű (~7,8 km/s) áramlás miatt fellépő torlónyomás segítségével hozza létre a kívánt kompressziót. Mint ilyen, leginkább egy hagyományos torlósugar-hajtóműre hasonlít, azzal a különbséggel, hogy itt nem kémiai üzemanyag elégetése hozza létre a tolóerőt, hanem a levegő ionizálásával nyert, elektromos térrel gyorsított ionok. Az ionokat gyorsító rész egy a Bufordénál bonyolultabb úgynevezett Hall-hatás hajtómű. A Busek-féle megoldás érdekessége, hogy a szerzők szerint 80 és 160 km közötti magasságban is alkalmazni lehetne a leírásuk szerinti konstrukciót.

A hajtóközegként levegőt használó ionhajtóművek az ESA érdeklődését is felkeltették. A koncepció életképességét egy 2007-ben megjelent tanulmányban vizsgálták meg [13]. Az eredmény annyira meggyőző lett, hogy megkezdték egy valós körülmények között is használható hajtómű fejlesztését. A munka 2017-ben vezetett eredményre, amikor is először próbálták ki egy légköri gázokat használó ionhajtóművet igaz, egyelőre csak laborban [14]. Maga a hajtómű a Busek-féle megoldáshoz hasonlít. A nagy sebességű levegőt a torlónyomás segítségével sűrítik, és terelik a Hall-hatás ionhajtómű ionizátorába. A hajtómű nem csak levegővel üzemelhet, hanem a fedélzeten tárolt xenonnal is.

### **Levegővel táplált ionhajtóművekkel szembeni elvárások**

Egy levegővel táplált ionhajtómű használata során több tényezőre is tekintettel kell lenni. Mindezek előtt az élettartama hosszabb kell legyen, mint a mesterséges égitest fedélzetén elhelyezett hasznos teher élettartama. Itt három korlátozó hatást kell megemlíteni. Egyrészt minden napelemmel táplált ionhajtómű közös problémája, hogy a Föld felső légkörében keringve annak magas oxigéntartalma miatti oxidáció következtében folyamatosan csökken a napelemek teljesítménye. Másrészt a Buford-féle elképzelésben az ionok gyorsítását rácsok végzik. Mivel az ionok egy része ahelyett, hogy a lyukakon át távozna, nekiütközik a rácsnak, a rács erodálódik. Ez a hatás a Hall-hatás hajtóműveknél nem lép fel, mivel ott a negatív elektróda szerepét mágneses térben foglyul ejtett elektronok töltik be. Végezetül pedig a kilépő ionok semlegesítésére szolgáló katód élettartama is korlátozott. Az elterjedten alkalmazott magas hőmérsékletre hevített elektródák folyamatosan párolognak, így idővel egyszerűen elfogynak.

Egy ilyen hajtómű alkalmazása céljából fakadóan képes kell legyen semlegesíteni az eszközre ható légköri súrlódást. A levegő sűrűsége a magassággal csökken, akárcsak a keringési sebesség. A kettő közül a sűrűség csökkenése a jelentősebb, mivel hozzávetőlegesen exponenciális függvény szerint megy végbe, míg a helyi első kozmikus sebesség a pálya sugarának négyzetgyökével fordítottan arányos. Mivel a pálya magasság a pálya sugarának és a Föld sugarának a különbsége, magasság változásából származó változás sokkal jelentősebb. Vagyis a súrlódási erő és a hajtóközeg sűrűsége is lényegében exponenciálisan csökken a magassággal. Hogy egy adott hajtómű milyen magasságban tudja stabilizálni az üreszköz pályáját, az attól függ, hogy az adott kialakítás milyen mértékben járul hozzá a légellenálláshoz. A fő problémát a napelemek jelentik, mivel a megfelelő tolóerő létrehozásához nagy felületű napelemekre van szükség, amelyek növelik az üreszköz közegellenállását. Kulcsfontosságú tehát a minél nagyobb hatásfokú napelemek használata. Segítséget jelenthet a műholdtest áramvonalazó kialakítása, amennyiben az adott feladatkör ellátása ezt lehetővé teszi.

Mivel a műholdak pályára állítása során alkalmazott rakétákon véges térfogat áll rendelkezésre az üreszköz elhelyezésére, a hajtómű vagy kellően kompakt, vagy pályára állítás után egyszerűen szétnyitható kell legyen. Ez a követelmény inkább a Buford-féle változatot érinti, mivel a beömlő nyílás egyben az ionizátor anódja is, amit egy ~15 000 menetes tekercs fog körül, de a gyorsítást végző rács átmérője is 15 m [4].

További lényeges szempont, hogy a hajtómű működése során keletkező elektromágneses sugárzás nem zavarhatja a fedélzeti rendszerek működését, illetve a kommunikációt. Az ionizátor mágneses térben elektronok mozognak spirális pályán, így sugároznak is. Ez főleg a Buford-

féle változatot érinti, mivel annál hiányzik a kompresszor fokozat, azaz nagyméretű az ionizátor, így nincs mód az árnyékolására. Ezzel szemben a Busek-féle Hall-hatás hajtómű viszonylag jól árnyékolható, mert összesűrített levegőt használ, és így kellően kompakt.

Meg kell említeni még, hogy mivel napelemek szolgáltatják az energiát, ideális esetben folyamatosan kell érnie őket a napfénynek. Ilyen úgynevezett napszinkron pályák létrehozhatók, ám nem minden feladathoz ideálisak. A probléma megkerülhető, ha elég nagy tolóerejű a hajtómű ahhoz, hogy a sötét időszakokban bekövetkező magasságsökkenést a világos időszakokban korrigálja. Megoldást jelenthet még nagy kapacitású akkumulátorok alkalmazása is.

### **Alkalmazási lehetőségek**

Egy hajtóközegként levegőt használó ionhajtómű alkalmazására több lehetőség kínálkozik, azonban ezekben van egy közös pont, nevezetesen, hogy az űreszközök alacsony pályán mozognak, ahol jelentős a légköri fékeződés hatása. Az első a már említett GOCE-hoz hasonló geodéziai célú műholdak. Az alacsony pálya miatt ezek az űreszközök érzékenyebbek a geopotenciál tér- és időbeli változásaira, ám a jelentős légellenállás miatt rendszeresen meg kell emelni a pályájukat. Az ESA számára fejlesztett, és 2017-ben sikeresen tesztelt hajtómű is várhatóan a GOCE utódján kap majd helyet [13] [14].

Amennyiben a felszínről szeretnénk nagy felbontású felvételeket készíteni, szintén előnyös lehet az alacsony pálya. Hátrányként említendő ugyanakkor, hogy így a látómezőbe a felszínnek kisebb darabja fér el. Ez azt jelenti, hogy egy nagyobb terület lefotózásához több keringés is szükséges lehet alacsony pályán, míg magasabbról ugyanaz a terület egyetlen felvétellel lefedhető. Ilyen műholdakat földmegfigyelő, illetve katonai felderítő céllal állítanak pályára.

Amennyiben a [12] szabadalomban említett 80-160 km működési magasságot sikerül megvalósítani, egy új, eddig elérhetetlen területet nyílna meg a tudományos vizsgálat számára. A jelenlegi eszközökkel ugyanis nem megoldott az ebben a tartományban végbemenő légköri folyamatoknak, illetve a légkör állapotának a monitorozása. Meteorológiai ballonokkal 40 km körüli magasságok érhetőek el, az e feletti tartományok csak rakétákkal, amelyek viszont működési elvükből adódóan csak percekig tudnak adatokat gyűjteni. Ugyanakkor egy tartósan 80 km magas pályán haladó, folyamatos meghajtást igénylő repülőeszköz elmosza az eddig egyértelmű határokat az űreszközök és a repülőgépek között. Ez nemzetközi jogi, illetve nemzetbiztonsági kérdéseket is felvethet különösen, ha katonai alkalmazásra is sor kerül. Az ilyen alacsony pályán működő hajtóművek megvalósításához azonban valószínűleg a jelenleg elérhetőnél lényegesen nagyobb hatásfokú napelemekre lenne szükség még áramvonalazó műholdtest esetén is, így csak távlatilag képzelhető el.

Várhatóan nagy jövő előtt áll a már említett új generációs távközlési műholdakon (pl. OneWeb, Starlink stb.) történő alkalmazás. Ezek viszonylag alacsonyan (~1000 km) keringenek, hogy kevés energiával is nagy sebességű adatátvitelt, illetve alacsony késleltetést lehessen elérni. E fontos jellemzők további javulását is el lehetne érni, ha még jobban le lehetne csökkenteni a keringési magasságot (pl. 200 km közelébe). Ebben segíthetnek az újfajta ionhajtóművek. Arról sem szabad megfeledkezni, hogy ha ezek a tervezett rendszerek kiépülnek, előbb-utóbb jelentősen meg fog nőni az űrszemét mennyisége. Ha a keringési magasság ~200 km, akkor ez a

probléma sokkal kevésbé jelentkezik, mert a működésképtelenné váló műholdak heteken belül elhagyják a keringési pályát.

További, első sorban katonai alkalmazásra ad lehetőséget, hogy ezeknek a hajtóműveknek a segítségével elérhető a pályaelemek jelentősebb módosítása is. Így elérhető a műhold indítása után kialakuló konfliktuszónák megfigyeléséhez ideális (vagy azt közelítő) pálya kialakítása. Korlátként jelentkezik, hogy ezek a pályamódosítások (pl. a pályahajlás megváltoztatása) akár hónapokat is igénybe vehet. Cserében viszont olcsóbb, mint egy új üreszköz pályára állítása, hiszen csak egy már pályán lévő eszköz kap új feladatot.

Távlatilag, első sorban a napelemek hatásfokának javulásával lehetőség nyílna magasabb pályákra szánt üreszközök indítási költségeinek csökkentésére. A rakéta egy kezdeti alacsony pályára juttatná a műholdat, majd a pálya földközelpontjában működtetve az ion-torlósugarhajtóművet a földtávolpont folyamatosan emelhető a kívánt szintre. A további manőverekhez már a fedélzeti hajtóanyagot kell használni. Hátrány, hogy így hónapokig tarthat elérni a kívánt pályát, viszont jelentősen csökkenhetnek a költségek. Nagyban segítene pl. egy űrnapéromű megépítésében, amely költségeinek jelentős részét teszi ki a pályára állítás [15]. Ugyanakkor szükség lehet a létrejövő, és hónapokig fennálló elnyúlt pályák nagy pontosságú modellezésére is amelyre [16] mutat egy lehetséges megoldást.

Nagy távlatokat nyitnak a légköri gázokat használó ionhajtóművek a bolygó kutatásban is, hiszen nem csak a földi légkör alkotóelemeivel működhetnek [17]. Napjainkban a legintenzívebben kutatott bolygó a Mars, amelynek számottevő légköre is van. A Busek-féle MABHET hajtómű használatát is első sorban Mars-szondákon képzelik el. A Mars ugyanakkor nem az egyetlen lehetséges célpont. Ugyanez a napelemes rendszer egy az egyben működőképes a Vénusz-nál is. A Naprendszer távolabbi vidékein is találunk alkalmazási lehetőséget, de az energiaforráson változtatni kell. A napelemek űrszondák energiaellátására történő alkalmazásának a hátrára jelenleg a Jupiternél húzódik. Az újfajta ionhajtóművek igényeinek azonban már ebben a távolságban nem felelnek meg, mert az adott felületből nyerhető teljesítmény a földinek mindössze 1/27-e. Ebben a távolságban már nukleáris energiaforrás (radioisotope thermoelectric generator, RTG – radioaktív izotópos termoelektromos generátor) használata szükséges. Az alkalmazáshoz számításba kell venni, hogy az RTG-kben jelenleg alkalmazott Pu-238 izotóp teljesítménysűrűsége 570 W/kg, amit hő formájában ad le. A hő elektromos árammá alakításának hatásfoka kritikus tényező. Jelenleg az alacsony hatásfok miatt ~5 W/kg elektromos teljesítmény-sűrűség érhető el [18]. Ez azt jelenti, hogy egy ~3 kW elektromos teljesítményű RTG tömege mintegy 600 kg lenne. Az ionhajtóműves szondákon történő alkalmazáshoz javítani kell az energiaátalakítás hatásfokát.

A bolygó kutatató szondákon alkalmazott vegyes üzemű RTG energiaforrású ionhajtóművek nagy előnye, hogy útközben is működhetnek, mert az RTG-k folyamatosan szolgáltatnak energiát. Így az üreszköz hamarabb érhet célhoz, és nagyobb lehetne a hasznos tömege is mint a jelenlegi technológiák alkalmazásával, illetve csökkenhetnek az indítási költségek. Cserében viszont csökken a hajtómű élettartamából a cél égitest felderítésére fordítható rész.

### *Lehetséges cél égitestek és feladatok*

A lehetséges célpontok közös jellemzője, hogy számottevő légkörrel kell rendelkezzenek. Ezek név szerint a Vénusz, Mars, Jupiter, Szaturnusz, Uránusz és a Neptunusz. A bolygók mellett a jelentősebb légkörrel rendelkező holdjaik is megfelelnek. Ezek a Titan és a Triton. A kis- és törpebolygók közül az egykor bolygónak tekintett Plútó is szóba jön.

A bolygókutatásban három alkalmazási terület azonosítható. Egyrészt akár csak a Föld esetében a cél égitest légkörének, felszínének (amennyiben létezik) valamint a belső felépítésének vizsgálata. Bár ezek közül mindegyik tanulmányozható magasabban húzódó pályákról is, alacsonyabb-ról nagyobb felbontású felvételek készíthetők, illetve pontosabb mérések végezhetők.

A másik lehetőség, hogy első sorban a bolygók és a Plútó körüli térség vizsgálata során a légköri gázok használatával, ha lassan, fokozatosan is, de változtatható a pályasík, a fél nagytengely és az excentricitás. Ez főleg kiterjedt holdrendszerek esetén lehet hasznos.

A harmadik alkalmazás a célégitest körüli kezdeti nagy excentricitású pályáknak a mérések megkezdéséhez szükséges pályák kialakítása. Ez általában jelentős fékezést igényel, amit hagyományosan a fedélzeti üzemanyag elégetésével érnek el. Újabban kiaknázásra kerül a bolygók felső légkörének fékező hatása is, ami azonban a szonda szerkezetének, első sorban a napelemszárnyaknak a mechanikai terhelését is jelenti. Ezt a terhelést csökkentheti, ha egy ionhajtómű rásegít a légköri súrlódás fékező hatására. Ugyanakkor fékezésre használni egy légköri gázokat használó ionhajtóművet nem triviális feladat. A legegyszerűbben a Buford-féle megoldással kivitelezhető, mivel ott elég az ionok gyorsítására szolgáló rácok polaritásának felcserélése. A Hall-hatás hajtóművek esetén azonban a polaritáscsere elvi okokból nem kivitelezhető.

## ÖSSZEFOGLALÁS

Az alacsony pályákon keringő mesterséges holdak, bár az alacsony pályamagasság miatt több feladatra is ideálisak lennének, csak korlátozottan alkalmazhatók, mert a légköri fékezés gyors magasságvesztéshez, és így rövid élettartamhoz vezet. Az élettartammal kapcsolatos problémára a hajtóközegként a felső légköri gázokat használó ionhajtóművek jelenthetik a megoldást, amelyek energiaszükségletét napelemek biztosíthatják. Ezek a hajtóművek 200 km körüli magasságokban lehetnek hatékonyak jelenleg, távlatilag pedig elképzelhető a működési magasság csökkentése akár 80 km-ig is. A megvalósíthatóság szempontjából kulcskérdés a minél nagyobb hatásfokú napelemek kifejlesztése, alkalmazása. Előnyt jelent az áramvonalazó kialakítású, alacsony légellenállású műholdtest. A Buford-féle hajtóműnél megoldandó a nagyméretű hajtómű kis térfogatba történő összehajtogatása, illetve a pályára állítás utáni kibontása.

Az első alkalmazás geodéziai műholdakon várható, de a marsi alkalmazás lehetőségét is kutatják. További alkalmazási területként azonosítottuk a földmegfigyelő műholdakat, mind polgári, mind katonai téren, mivel alacsony pályáról adott optikával nagyobb felbontás érhető el, bár cserében csökken az egy felvétellel lefedhető terület nagysága.

Napjainkban születőben van a távközlési műholdrendszerek egy új generációja, amelyek viszonylag alacsony, ~1000 km körüli pályákon működnek, és sok ezer tagból állnak. A működési magasság csökkentése növeli az elérhető adatátviteli sebességet, és csökkenti a késleltetést. Ezeknek



a rendszereknek hátulütője, hogy a nagyszámú műhold a hasznos élettartam végeztével úrszemétté válik, és egyre növekvő zsúfoltságot teremtenek a népszerűvé váló magasságtartományban. Az újfajta ionhajtóművekkel pályán tartott műholdak esetében ez a probléma nem jelenik meg, mert a hajtómű leállása után 1–2 hónapon belül visszahullanak a felszínre.

Távlatilag elképzelhető a pálya jelentősebb módosítása is ezekkel a hajtóművekkel. Ez először katonai műholdakon kerülhet alkalmazásra. A módszer továbbfejlesztésével geostacionárius pályára szánt mesterséges holdak indítási költségei is csökkenthetők oly módon, hogy a kezdeti alacsony pályából fokozatosan alakítják ki a geostacionárius átmeneti pályát. A végleges pálya kialakítása már a fedélzeti hajtóanyag felhasználásával kell folytatódjon.

A bolygó kutatásban is tág tere van az alkalmazásnak. Jelenleg folyik a Mars körüli pályára szánt MABHET hajtómű fejlesztése. Ugyanez a megoldás használható a Vénusznál is. Távlabbi célpontok esetén a napelemek már nem adnak elegendő energiát, így radioizotópos energiaforrásokat kell alkalmazni. Jelen pillanatban azonban nem állnak rendelkezésre megfelelő energiasűrűségű RTG-k. Az energiaellátással kapcsolatos probléma megoldása esetén a szóba jövő további célégitestek a Jupiter, Szaturnusz és Titan holdja, Uránusz, Neptunusz és Triton holdja, valamint a Plútó.

### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] COSPAR International Reference Atmosphere: 1986 (0 km to 120 km), e-dok, url: <http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/atmos/cospar1.html>
- [2] COSPAR International Reference Atmosphere (CIRA-86): Global Climatology of Atmospheric Parameters, e-dok, url: <http://badc.nerc.ac.uk/data/cira/>
- [3] SP-4208 LIVING AND WORKING IN SPACE: A HISTORY OF SKYLAB, e-dok, url: <https://history.nasa.gov/SP-4208/ch19.htm>
- [4] C. R. Buford, Utilization of ambient gas as a propellant for low earth orbit electric propulsion, Massachusetts Institute of Technology. Dept. of Aeronautics and Astronautics, 1995, url: <http://hdl.handle.net/1721.1/31061>
- [5] OneWeb satellite constellation, Wikipedia, e-dok, url: [https://en.wikipedia.org/wiki/OneWeb\\_satellite\\_constellation](https://en.wikipedia.org/wiki/OneWeb_satellite_constellation)
- [6] Starlink (satellite constellation), Wikipedia, e-dok, url: [https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink\\_\(satellite\\_constellation\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Starlink_(satellite_constellation))
- [7] F. Khan, Mobile Internet from the Heavens, arXiv, e-dok, url: <https://arxiv.org/abs/1508.02383>
- [8] <https://spacenews.com/first-six-oneweb-satellites-launch-on-soyuz-rocket/>
- [9] R. Killinger, R. Kukies, M. Surauer, A. Tomasetto, L. van Holtz: ARTEMIS orbit raising inflight experience with ion propulsion, Acta Astronautica, 2003/53 pp. 607-621 DOI: [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(03\)80022-X](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(03)80022-X)
- [10] GOCE, url: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Operations/GOCE](http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/GOCE)
- [11] K. Nishiyama: Air Breathing Ion Engine Concept, 54th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, the International Academy of Astronautics, and the International Institute of Space Law, International Astronautical Congress, Bréma, Németország, 2003, url: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.IAC-03-S.4.02> DOI: <https://doi.org/10.2514/6.IAC-03-S.4.02>
- [12] V. Hurby, B. Pote, T. Brogan, K. Hohman, J. Szabo, P. Rostler: Air breathing electrically powered hall effect thruster, US6834492B2, url: <https://patentimages.storage.googleapis.com/b4/32/e2/a3b044de0baef4/US6834492.pdf>
- [13] D. Di Cara, J. Gonzalez del Amo, A. Santovincenzo, B. Carnicero Dominguez, M. Arcioni, A. Caldwell, I. Roma: RAM Electric Propulsion for Low Earth Orbit Operation: an ESA study, The 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, September 17-20, 2007, url: [http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc\\_articledownload\\_1988-2007/2007index/IEPC-2007-162.pdf](http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2007index/IEPC-2007-162.pdf)



- [14] T. Andreussi, G. Ciafali, V. Gianetti, A. Piragino, E. Ferrato, A. Rossodivita, M. Andrenucci: The 35th International Electric Propulsion Conference Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, October 8–12, 2017, url: [https://iepc2017.org/sites/default/files/speaker-papers/iepc-2017-377\\_ram\\_final.pdf](https://iepc2017.org/sites/default/files/speaker-papers/iepc-2017-377_ram_final.pdf)
- [15] Nagy Imre: Naperőművek Föld körüli pályán, Repüléstudományi Közlemények 2018/2, pp. 67-73, url: [http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018\\_2/2018-2-06-0466\\_Nagy\\_Imre.pdf](http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_2/2018-2-06-0466_Nagy_Imre.pdf)
- [16] Nagy Imre, Érdi Bálint: Numerical investigation of the orbit of Interball-1, Astronomische Nachrichten, 2007/328, pp. 793-796 DOI: <https://doi.org/10.1002/asna.200710811>
- [17] Kurt Hohman, Vladimir Hruby, Bruce Pote, Lynn Olson, James Szabo, Peter Rostler, Hani Kamhawi: Atmospheric Breathing Electric Thruster for Planetary Exploration, NASA Innovative Advanced Concepts Spring Symposium March 27-29, 2012, e-dok, url: [https://www.nasa.gov/pdf/636899main\\_Hohman\\_Presentation.pdf](https://www.nasa.gov/pdf/636899main_Hohman_Presentation.pdf)
- [18] Radioisotope thermoelectric generator, Wikipedia, e-dok, url: [https://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope\\_thermoelectric\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Radioisotope_thermoelectric_generator)

---

### AIR-BREATHING ION ENGINES

*Even if artificial satellites circulating on low Earth orbits are ideal for multiple tasks due to low elevation, they can only be used to a limited extent, because atmospheric braking leads to rapid loss of height and thus short lifetime. The ion thrusters using upper atmospheric gases can be the solution for the lifetime problem. The power can be provided by solar cells. These engines can be effective at altitudes of around 200 km, and in the future it is possible to reduce the operating height down to 80 km. In this work, we review the history of the new types of ion engines and their expectations, and examine their application in military, civilian and scientific fields.*

**Keywords:** *air-breathing electric propulsion, artificial satellites, Earth imaging, space-based telecommunications, planetology*

---

Nagy Imre (PhD)  
Egyetemi adjunktus  
Nemzeti Közszolgálati Egyetem  
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar  
Katonai Logisztikai Intézet  
Természettudományi Tanszék  
[nagy.imre@uni-nke.hu](mailto:nagy.imre@uni-nke.hu)  
[orcid.org/0000-0002-0545-4381](https://orcid.org/0000-0002-0545-4381)

Imre Nagy (PhD)  
Senior Lecturer  
National University of Public Service  
Faculty of Military Science and Officer Training  
Institute of Military Logistics  
Department of Natural Sciences  
[nagy.imre@uni-nke.hu](mailto:nagy.imre@uni-nke.hu)  
[orcid.org/0000-0002-0545-4381](https://orcid.org/0000-0002-0545-4381)

---



<http://journals.uni-nke.hu/index.php/reptudkoz/article/view/264/46>

