

Nagy Imre

NAPERŐMŰVEK FÖLD KÖRÜLI PÁLYÁN

Idén 50 éve jelent meg Peter Glaser munkája, amelyben elsőként veti fel naperőművek világűrbe telepítésének lehetőségét. Jelen tanulmányban megvizsgáljuk az elképzelés megvalósíthatóságát az eltelt évtizedek tudományos-műszaki fejlődésének tükrében, és igyekeztünk beazonosítani a további fejlesztéseket igénylő pontokat. A megvalósítást nehezíti, hogy több négyzetkilométernyi felületről kell összegyűjteni a napenergiát, és ennek a felületnek mindig a Nap felé kell fordulnia. A nagy méretek miatt fellépő probléma mellett komoly gondot okoz a disszipálódó teljesítmény elvezetése is a vákuumban. Költségek terén az űrbeli használatra készülő napelemek magas ára mellett a pályára állítási költségek nagysága jelentik a megvalósítás legfőbb akadályait napjainkban.

Kulcsszavak: napenergia, mikrohullámú energiaátvitel, műholdak

BEVEZETÉS

A napenergia hasznosítása a gyakorlatban több úton lehetséges a földön. A legegyszerűbb megoldások levegőt vagy vizet melegítenek fűtési céllal, illetve használati meleg víz termelésre. Az ilyen módszerek falhasználhatósága erősen korlátozott, így csak csekély mértékű hagyományos energiahordozó kiváltására alkalmasak. Bonyolultabbak, ám sokoldalú felhasználást tesznek lehetővé az olyan módszerek, amelyek a napsugárzást elektromos árammá alakítják. Ez történhet hőerőgép, azaz mozgó berendezés segítségével vagy a fényt közvetlenül elektromos árammá alakító fotoelektromos berendezéssel.

Bármilyen úton is hasznosítsuk a napsugárzást energiatermelésre, számolnunk kell két erősen korlátozó hatással. Az egyik probléma, hogy a Föld tengelyforgása miatt nappalok és éjszakák váltakoznak, aminek a következtében egy év alatt legfeljebb 4380 órán át működhetnek ezek a berendezések. A helyzetet rontja, hogy amikor alacsonyan van a Nap, a fénye vastag légrétegen kell keresztülhatoljon, így a légköri aeroszol részecskéi a beérkező fény nagy részét szétszórják, erősen csökkentve a berendezésbe jutó hasznosítható sugárzást. A másik korlátozó hatást a földi időjárási jelenségek jelentik. Ez a hatás erősen függ a földrajzi helyzettől. Száraz, sivatagos környezetben megközelítőleg teljesül az elvileg lehetséges 4380 óra napsütés, ám pl. 2016-ban Magyarországon sehol sem érte el a 2500 órát, ami már így is jelentősen meghaladja az átlagos évben mérhető maximum 2050 órát [1]. Mivel a Föld lakosságának és iparának java a napenergia hasznosítás szempontjából ideális helyektől nagy távolságra koncentrálódik, így ha a segítségével akarjuk kiváltani a hagyományos energiahordozókon alapuló energiatermelést, jelentős szállítási veszteséggel kell számolni, és meg kell oldani a elektromos energia tárolását is. Alternatív megoldási lehetőséget kínál a világűr.

Amennyiben Föld körüli pályára telepítjük a napenergia hasznosítására szolgáló berendezést, a hasznos működési ideje, így a megtermelt energia a felszínen várhatóan a többszörösére emelkedik, és kiszámíthatóvá válik. Cserébe viszont újabb megoldandó problémák merülnek föl. Először is, a nagyméretű és tömegű berendezéseket pályára kell állítani. Továbbá a napelemek által termelt energiát el kell juttatni az űreszköztől a felszínre. A kiszámítható, emberi mércével

kimeríthetetlen, és jószerivel korlátlan mértékben rendelkezésre álló űrbéli napenergia csábítása tanulmányok sorát hívta létre az ötletet felvető Peter Glaser idén 50 éve megjelent munkája [2] óta (pl. [3][4][5][6][8][9][10][11][12][13]). Az elképzelés műszaki megvalósíthatóságában minden szerző egyetért, ám a gazdaságosság kérdésében nincs egyetértés.

Jelen tanulmányban áttekintjük az űrbéli naperóművek megépítése során felmerülő főbb problémákat és a lehetséges megoldásokat, mind műszaki, mind gazdaságosság tekintetében.

ALAPÖTLET ÉS FŐBB PROBLÉMÁK

Az eredeti elgondolás [2] szerint nagyméretű napelemet kell a világűrbe telepíteni, praktikusán geostacionárius pályára. A napelemek által termelt egyenáramot (DC) mikrohullámokká (rádiófrekvencia, RF) alakítás után, egy antenna sugározza le a földi vevőegységre. Mind az adó, mind a vevő antenna mérete jelentős, nagyságrendileg kilométeres átmérőjű, hogy minél nagyobb legyen az átvitel hatásfoka.

Bár az elgondolás tetszetős és egyszerű, ám a megvalósítás nehézségekbe ütközik. Figyelembe véve, hogy a napállandó hozzávetőlegesen $1,4 \text{ kW/m}^2$, 1 GW sugárzási teljesítmény befogásához nagyságrendileg $0,7 \text{ km}^2$ felületre van szükség. Valójában ennél nagyságrenddel nagyobb összfelületű napelemre van szükség AHHOZ, HOGY a felszínen kapjunk 1 GW elektromos teljesítményt a többszörös energiaátalakítás és az átvitel során fellépő tekintélyes veszteségek miatt. Ennek a felületnek mindig a Nap felé irányulnia, ha közel állandó teljesítményt szeretnénk elérni, tehát mozgatni kell. Az eddigi legnagyobb űrbéli szerkezet, a Nemzetközi Űrállomás (ISS) mindössze 3000 m^2 napelemmel van felszerelve [14], amit néhány ezerszeresére kell növelni. Ez műszakilag komoly kihívást jelent.

A másik nehézséget a rendszer egyes részei közötti energiaátvitel jelenti. Miközben a napelemek követik a Napot, az energiatovábbító antenna mindig a Föld meghatározott pontjára kell irányuljon. Vagyis az energiatermelő és lesugárzó alrendszer egymáshoz képest mozog, miközben biztosítani kell a kettő között az energiaátvitelt. Szintén energiaátviteli probléma, hogy a fotoelektromos cellákban keletkező áramot nagy területről kell begyűjteni, és eljuttatni az energiaátalakító rendszerhez. A vezetők elektromos ellenállása és a továbbítandó teljesítmény miatt nagy mennyiségű hő keletkezik, ami aktív hűtés alkalmazását teszi szükségessé. A probléma nagyságát jelzi, hogy egyes tervek (pl. [12] vagy [13]) ezen a ponton szupravezetők alkalmazásával számolnak.

Mint minden geostacionárius pályán keringő testre, a naperóműre is hat a geopotenciál egyenlítői metszetének lapultsága, aminek a hatására a műholdak elvándorolnak szolgálati helyzetükből. Ez egy lassú folyamat, ám előbb-utóbb olyan mértékű lesz, hogy szükségessé válik a beavatkozás. Napjainkban általában kémiai rakétahajtóműveket használnak a korrekcióhoz, de egyre több űreszközön található napelemekkel táplált elektromos hajtómű. Utóbbiak nagy előnye, hogy lényegesen kevesebb hajtóanyaggal érik el a szükséges pályamódosítást.

Egy naperómű esetén is alkalmazható kémiai hajtómű, ám ehhez a nagyságrendileg tízezer tonna tömeg miatt nagy mennyiségű hajtóanyag szükséges. Az ionhajtómű mellett szól a kisebb üzemanyagigény mellett az is, hogy a működtetésére fel lehet használni az erőmű által termelt elektromos áramot. Ugyanakkor nem szabad elfelejteni azt sem, hogy napjainkban legfeljebb

pár tonnás űreszközöket láttak el ilyen megoldással, így a jelenlegieknél legalább 3 nagyságrenddel nagyobb tolóerejű elektromos hajtóművekre lenne szükség.

A HATÁSFOKOK KÉRDÉSE

A jelenleg rendelkezésre álló technológiákkal elérhető hatásfokokat az 1. táblázatban foglaltuk össze [13] alapján. A táblázat sorait összeszorozva a teljes rendszer hatásfoka 8,9% körülinek adódik, ami nagyjából harmada a földi használatra készülő legjobb napelemek hatásfokának. Ebből nem feltétlenül következik, hogy árban ne lenne versenyképes az űrbeli naperómű, hiszen a hazai példánál maradva a felszínen évente 2050 óra napsütés várható, míg a világűrben 8760. A napsütéses órák számát is figyelembe véve a világűrben elhelyezett naperómű ~40%-kal több energiát tudna az elektromos hálózatba táplálni, mint ha a felszínen működne. Ehhez jön még hozzá az energiatermelés egyenletesége és kiszámíthatósága jelentette előny.

Alrendszer	Hatékonyság	Értékelés
Fotoelektromos átalakítás	0,3	javítható
DC-RF átalakítás	0,5	javítandó
RF átvitel	0,85	nehezen javítható
RF-DC átalakítás	0,7	javítható

1. táblázat Űrnaperómű alrendszerének hatásfoka

Ugyanakkor problémát jelent, hogy vákuumban a hulladékhőtől csak sugárzás formájában lehet megszabadulni. Minél magasabb egy felület hőmérséklete, annál nagyobb energiaáramot tud kisugározni adott nagyságú felület, a hőmérsékletet azonban korlátozza a hűtendő berendezések maximális üzemi hőmérséklete. A kisugározandó hulladékhő mennyiségét, illetve keletkezésének helyét az egyes alrendszerek hatásfoka határozza meg.

A napelemek az elnyelt napsugárzásnak csak ~30%-át hasznosítják, a fennmaradó 70% részben elnyelődik. A nem hasznosuló sugárzás a Stefan-Boltzmann törvény alapján akár 90 °C hőmérsékletre is melegítheti a paneleket, ha teljesen elnyelődik. A magas hőmérséklet azonban felgyorsítja a fotoelektromos cellák öregedését, tehát kerülendő. Ha sikerül elérni, hogy a hasznosítatlan résznek csak 50% nyelődjön el, akkor a hőmérséklet hozzávetőlegesen 30 °C-ra csökken. A napelemek hatásfoka növelhető, bár [13] által említett 60% meglehetősen ambiciózusnak célnak tűnik, még ha csak 2050-re is kellene elérni.

A napelemek által előállított egyenáram mikrohullámokká alakításának 50% körüli hatásfoka miatt nagy mennyiségű hőt kell kisugározni. Ha a felszínen 1 GW teljesítményt szeretnénk kapni, akkor a DC-RF átalakítás során 1,7 GW fog disszipálódni. Amennyiben az üzemi hőmérséklet ~100 °C, és a radiátor emisszivitása ~0,85, akkor a Stefan-Boltzmann törvény alapján a felülete a napelemek összfelületének az ötöde-negyede kell legyen. Egy ekkora radiátornak a tömege is tekintélyes, összemérhető a napelemkével (12 kg/m² felületi sűrűséggel számolva [15]). Látható, hogy a DC-RF átalakítás hatásfokán fontos lenne javítani.

Az egyenáramból előállított mikrohullámú sugárzást egy antenna sugározza ki a felszín felé, amelyet a földön egy másik antenna fog fel. Itt is lépnek fel veszteségek, ám ezek elsősorban

az elszökő sugárzás formájában jelentkeznek, és két okra vezethetők vissza. Egyrészt az előálított sugárzásból nyalábot kell formálni, másrészt a nyalábot 2" pontossággal kell a felszín meghatározott pontja felé irányítani [13]. A nyalábformálási veszteségek elfogadható szinten tarthatók az antennák megfelelő méretezésével, ám a nagy pontosságú nyalábvezérlés egy kilométeres tartományba eső antenna esetén jelenleg komoly műszaki kihívást jelent.

A mikrohullámok árammá alakítása már a felszínen történik, így a hatásfoka nem annyira kritikus, mint a fordított irányú. Ha sikerül jelentősen javítani, az csökkenti a világűrbe juttatandó műhold méretét és tömegét, így olcsóbbá teheti a rendszer egészét. Mivel ez az alrendszer a felszínen található, egyszerűen hozzáférhető akár karbantartás, szervizelés, akár fejlesztés céljából. Ez lehetővé teszi a már megépült erőmű teljesítményének viszonylag olcsó emelését is a több évtizednyi működési idő alatt, amennyiben idő közben sikerül javítani az RF-DC átalakítás hatásfokát.

KÖLTSÉGEK

Mint korábban már említettük, a világűrbe telepített naperóművek műszaki megvalósíthatóságáról általános egyetértés van a tanulmányok között. Ahhoz, hogy ténylegesen is megépüljön egy űrbéli naperómű, az is szükséges lenne, hogy költsége arányban álljon a teljes élettartam alatt megtermelhető energia mennyiségével. A költségek nagy része a szükséges fejlesztések, az űrbéli és földi rendszerek kiépítése, illetve az élettartam végén, a rendszer bontása során jelentkeznek.

A jelenleg a világűrbeli használatra tervezett napelemek ára igen magas, mintegy 500 \$/W [16]. Ez természetesen részben a viszonylag kis gyártási mennyiségnek köszönhető. Egy naperómű nagyságrendekkel nagyobb összfelületű napelemet igényel, mint egy átlagos évben pályára állított műholdak összes napeleme. A hatásfokokat figyelembe véve egy, a felszínen 1 GW elektromos áramot biztosító erőműhöz 11,2 GW napelem lenne szükséges. Belátható időn belül elérhetőnek tűnik a 250 \$/W ár [16], de még így is 2800 milliárd \$ lenne csak a napelemek költsége. Ahhoz, hogy versenyképes legyen a világűrbe telepített naperómű, ezt az árat három nagyságrenddel kellene csökkenteni. Bár a gyártás megfelelő szintű felfuttatása csökkentené az egységárat, azonban önmagában nem képes biztosítani a szükséges árcsökkentést.

Alternatív megoldásként szóba jöhet a napelemek méretének csökkentése. Ez úgy lehetséges, ha a napsugárzást fókuszálva juttatjuk a felületükre. Ezzel a megoldással nem csak a napelemek költsége faragható le, hanem megfelelő kialakítású tükröket használva kiküszöbölhető a napelemek és az RF egység közötti mozgás is. A megnövelt teljesítménysűrűségnek ára is van, a napelemeknek aktív hűtésre lehet szükségük, illetve felgyorsul az öregedésük.

Az építés során a költségek másik nagy tétele az alkatrészek pályára állítása. Napjainkban egy évben általában 100-200 rakétát indítanak világszerte összesen, a földi infrastruktúra is ehhez a számhoz igazodik, ennyi indítást tud biztonságosan kiszolgálni. A rendszerben álló rakéták geostacionárius átmeneti pályára legfeljebb 15 tonnát tudnak eljuttatni. Egy erőműnek csak a napelemei lennének 37300 t össztömegűek, amennyiben a rövidtávon elérhető 300 W/kg teljesítménysűrűséggel számolunk [16], ami jelenlegi értéknek kétszerese. Ekkora tömeget mintegy 2500 indítással lehetne pályára állítani, indításonként ~100 millió \$ körüli áron, amihez hozzájön még a RF alrendszer a méretes radiátoraival, illetve az 1 km körüli átmérőjű antennájával. Fókuszáló rendszerrel ez a tömeg jelentősen csökkenthető, ám számolni kell a tükrök tömegével is.

Ilyen rendszert körvonalaz [12] és [13]. Pl. [13] 2 GW földi teljesítményhez 1903 t napelemmel, 957 t tükörrel, és több mint 19000 t tömegű antennával számol, így érve el a ~23000 t teljes tömeget, mindehhez a 2050-re feltehetően rendelkezésre álló műszaki háttérrel alkalmazva.

Tekintve, hogy a műhold tömegének igen nagy, konstrukciótól függően 30-80%-át az antenna adja, felmerült a mikrohullámok helyettesítése lézerrel létrehozott fénnel. A lézeres energiaátvitel előnye, hogy kisebb tömegű berendezést igényel, ám a lézerek hatásfoka jelentősen elmarad a mikrohullámok létrehozásának a hatásfokától [17, 18], ami továbbnöveli a hűtésigényt. További probléma, hogy a fény a rövidebb hullámhossza miatt erősebben szóródik a légkörben, és ki van téve a felhők zavaró hatásának.

A pályára állítási költségek, illetve az indítások száma mérsékelhető, ha csak viszonylag alacsony pályára juttatja fel a rakéta az erőmű alkatrészeit. A végleges, geostacionárius pálya elérése olcsóbb elektromos hajtóművek használatával. A jelenleg gyártott rakéták alacsony föld körüli pályára < 30 t terhet tudnak eljuttatni, azaz így is ezres nagyságrendű indításra lenne szükség. Megoldást az új, a jelenlegiekénél nagyságrenddel alacsonyabb fajlagos költségű, illetve nagyobb teljesítményű űr- és rakéták kifejlesztése jelenthet, és a földi infrastruktúra fejlesztése sem kerülhető el.

ÖSSZEFOGLALÁS

Idén 50 éve jelent meg Peter Glaser munkája, amelyben elsőként veti fel naperőművek világűrbe telepítésének lehetőségét. Jelen tanulmányban megvizsgáltuk az elképzelés megvalósíthatóságát az eltelt évtizedek tudományos-műszaki fejlődésének tükrében, és igyekeztünk beazonosítani a további fejlesztéseket igénylő pontokat.

Azt találtuk, hogy a napenergia viszonylag kis fluxusa miatt olyan nagy kiterjedésű berendezésekre van szükség, amelyek mellett az eddig épített legnagyobb mesterséges égitest, az ISS is eltörpül. Ez már önmagában is komoly műszaki kihívást jelent. A négyzetkilométerekben mérhető napelemeket mozgatni is kell, hogy mindig a Nap felé forduljanak, ami tovább bonyolítja a helyzetet, és nehezíti az energiát a felszín felé továbbító alrendszer táplálását.

Szintén tekintélyes kiterjedése miatt okoznak nehézséget a berendezések hűtéséhez szükséges radiátorok. Teljes felületük, illetve tömegük összemérhető a napelemkével. A radiátorok méretének csökkentéséhez javítani kell az áram sugárzássá történő átalakításának hatásfokát. Ez mellékesen csökkentené a napelemek méretét is, változatlan felszíni teljesítmény mellett.

Ha a felszín felé mikrohullámokkal történik az energia továbbítása, akkor kilométeres tartományba eső antennát kell a napelemekhez csatlakoztatni. Egy ekkora antenna tömege a műhold többi részének akár többszöröse is lehet. Felmerült a mikrohullámok helyett lézer használata, ám a lézerek kisebb hatásfoka miatt ez a radiátorok további növekedésével járna, és számolni kellene az időjárási jelenségek zavaró hatásaival is.

Költségek tekintetében két komoly tétel azonosítható. Az első a napelemek ára, ami jelenleg már önmagában is ellehetetleníti a koncepciót. Ez az ár csökkenthető a termelés felfuttatásával. További költségcsökkenést lehet elérni, ha fókuszálva vetítjük a napfényt a napelemekre. Utóbbi esetben ki lehet küszöbölni a napelemek és az antenna közötti mozgást is, megfelelően elrendezett tükrök segítségével.

A másik nagy költséget jelentő tétel az erőmű pályára állítása. Ehhez a jelenleginél nagyságrenddel alacsonyabb fajlagos költségű, és nagyobb teljesítményű rakétákra lenne szükség.

A világűrbe telepített naperőművek megvalósítása előtt nem látszik elvi akadály, csupán olyan technikai problémák, amelyekre a következő 30–50 évben meg lehet találni a megoldást. Hogy lesz-e és ha igen, mikor űrnaperőmű, az a felsorolt problémák megoldásán túl azon is múlik, hogy milyen tempóban fejlődik például az energiatárolás technikája. Amennyiben sikerül kidolgozni nagy hatásfokú és költséghatékony tárolási módszereket, akkor a felszíni nap- és szélenergia-készítők kiválthatnak lényegében minden más energiatermelési módszert, köztük az űrnaperőműveket.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] https://met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/eghajlati_visszatekinto/elmult_evek_idojarasa/main.php?ful=napfenytartam
- [2] Békési Bertold: A repülőszerkezetek műszaki karbantartása. Repüléstudományi Közlemények, Szolnok, 1999/3, pp. 93–104.
- [3] P. E. Glaser: Power from the sun: its future. Science, 1968/162, pp. 857–861.
- [4] Committee for the Assessment of NASA's Space Solar Power Investment Strategy, Aeronautics and Space Engineering Board, National Research Council, Laying the Foundation For Space Solar Power: An Assessment of NASA's Space Solar Power Investment Strategy. National Aeronautics and Space Administration Press, Washington, D.C., 2001
- [5] J.D. Rouge: Space-based solar power: as an opportunity for strategic security. National Security Space Office, 2007
- [6] URSI inter-commission working group on SPS, URSI white paper on solar power satellite (SPS) systems and report of the URSI inter-commission working group on SPS, URSI, 2007
- [7] N. Shinohara: Wireless Power Transfer via Radiowaves (Wave Series). ISTE Publishing and John Wiley & Sons, Inc., Great Britain and United States, 2014
- [8] J.C. Mankins: New directions for space solar power. Acta Astronautica, 2009/65, pp. 146–156.
- [9] S. Sasaki, K. Tanaka, S. Kawasaki, N. Shinohara, K. Higuchi, N. Okuizumi, K. Senda, K. Ishimura: The USEF SSPS study team, conceptual study of SSPS demonstration experiment. Radio Sci. Bull. 2004/310 pp. 9–14.
- [10] S. Sasaki, K. Tanaka, K. Higuchi, N. Okuizumi, S. Kawasaki, N. Shinohara, K. Sendac, K. Ishimura: A new concept of solar power satellite: tethered-SPS. Acta Astronaut. 2006/60 pp. 153–165.
- [11] X.L. Meng, X.L. Xia, C. Sun, G.L. Dai: Optimal design of symmetrical two-stage flat reflected concentrator. Sol. Energy 2013/93 pp. 334–344.
- [12] J.C. Mankins: The Case for Space Solar Power. first ed. Virginia Edition Publishing, Houston, 2014
- [13] J.C. Mankins: SPS-ALPHA: the first practical solar power satellite via arbitrarily large phased array. Artemis Innovation Management Solutions LLC, September 2012.
- [14] Yang Yang, Aiqun Zhang, Baoyan Duan, Dongxu Wang, Xun Li: A novel design projekt for space solar power station (SSPS-OMEGA). Acta Astronautica, 2016/121, pp. 51–58
- [15] International Space Station, Wikipedia The Free Encyclopedia, e-dok. url: https://en.wikipedia.org/wiki/International_Space_Station
- [16] Spacecraft thermal control, Wikipedia The Free Encyclopedia, e-dok. url: https://en.wikipedia.org/wiki/Spacecraft_thermal_control
- [17] P. Beauchamp, R. Ewell, E. Brandon, R. Surampudi: Solar Power and Energy Storage for Planetary Missions url: https://www.lpi.usra.edu/opag/meetings/aug2015/presentations/day-2/11_beauchamp.pdf
- [18] E. Hoffert, P. Soukup, M. Hofert: Power beaming for space-based electricity on Earth: Near-term experiments with radars, lasers and satellites. ESA Special Publication, 2004/567, pp. 195–201
- [19] R. M. Dickinson: Evaluation of a Microwave High Power Reception Conversion Array for Wireless Power Transmission. Tech. Memo. 33-741, Jet Propulsion Lab. Pasadena, 1975

SPACE SOLAR POWER SYSTEMS

This year, Peter Glaser's work has published 50 years ago, in which he first puts the possibility of installing solar power plants into space. In this paper, we examine the feasibility of the idea in the light of the scientific and technical development of the past decades and we have tried to identify the points requiring further development. Implementation is made difficult by collecting solar energy from several square kilometers of surface, and this surface should always turn to the sun. In addition to the problem with the large dimensions, there is also a serious problem in the discharge of the dissipating energy in the vacuum. In the field of costs, with the high price of space-used-solar cells and the cost of launch vehicles is the main obstacles to implementation today.

Keywords: solar power, microwave power transmission, satellites

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

Imre Nagy (PhD)
Associate professor
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
orcid.org/0000-0002-0545-4381



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2018_2/2018-2-06-0455_Nagy_Imre.pdf

