

Végvári Zsolt\*

# Kilopower – villamos erőmű a Marson I. rész

## A VILLAMOSENERGIA-TERMELÉS TECHNOLÓGIÁI

Az emberiség évről évre nagyobb mértékben függ a villamos energiától. A világ teljes energiaigénye is folyamatosan emelkedik, de tény az is, hogy a villamosság aránya az összes energiafelhasználáson belül is folyamatosan nő. Világviszonylatban az elmúlt 40 évben a teljes energiafelhasználás megduplázódott, míg a villamosság aránya ezen időszak alatt a négyszeresére nőtt [1]. Mi az oka a villamosság népszerűségének? Viszonylag könnyen és olcsón előállítható, illetve távvezetékkel gazdaságosan szállítható. Tiszta és megbízható, ráadásul számos olyan technológia létezik (gondoljunk csak a félvezetőkre), ahol nincs is alternatívája. Bár gazdaságos tárolása jelenleg még nem megoldott (az akkumulátorok drágák és kicsi az energiasűrűségük is [2]), a villamosság elterjedését segíti az univerzalitása. Ez alatt azt értjük, hogy az energia szinte bármilyen formájából elő tudunk állítani villamosságot és viszont. Természetesen nem mellékes, hogy ezek az energiakonzverziók milyen hatásokkal zajlanak.

Villamos energiát szinte bármiből nyerhetünk, gondoljunk csak a fizika óráról ismert ebonit-rúdra. De elektromossággá alakítható a nyomás (Hall-elem) vagy a hőmérséklet különbség is (Peltier-elem). Ezek az eljárások széles körben ismertek, de csak speciális környezetben alkalmazzák őket, mivel a hatásfokuk alig néhány százalék. Ha ipari mennyiségben állítunk elő villamos áramot, akkor gyakorlatilag csak két nagyobb releváns technológia létezik. Egyre jobban terjednek a napelemek, mivel évről-évre olcsóbbak és folyamatosan javul a hatásfokuk is. Jelenleg a kereskedelemben elérhető típusok a fény energiájának kb. 20%-át képesek elektromossággá konvertálni. A technológia nagy előnye, hogy mindenféle komolyabb kísérő hő, zaj stb. jelenség nélkül egy szilárd félvezetőrétegben indukálódik elektron-áram a becsapódó fotonok hatására [3]. Az eljárás nyilvánvaló hátránya, hogy gyengébb fényviszonyok

között radikálisan romlik a teljesítménye, este pedig szünetel a villamos energia előállítás. A technológia gyorsan terjed, de ez még mindig csak annyit jelent, hogy a 2015-ös 1%-hoz képest, 2018-ra csaknem megduplázódott (1,8%) az aránya az emberiség teljes villamos termelésén belül [1].

A fentiekből következik, hogy jelenleg a világ elektromos energiájának 98%-át generátorok állítják elő. Ezeknek a villamos gépeknek kiemelkedően jó a hatásfokuk, a forgó mechanikus mozgásnak több mint 95%-át képesek villamossággá alakítani, így az igazi kérdés már csak az, hogy mivel forgatjuk őket? Kisebb és közepes léptékben (aggregátorok) erre alkalmasak az egyszerű dugattyús motorok és gázturbinák is, nagyobb léptékben pedig a turbinák. Ezeket forgathatja a lezúduló víz energiája, vagy a lapátokra engedett nagy nyomású forró gőz is. A vizet pedig forralhatjuk szén-, olaj- vagy gáztüzeléssel, esetleg nukleáris energiával. A háztartási mérettől egészen óriási teljesítményekig építhetők szélerőművek is, de a villamosságot itt is minden esetben generátor termeli.

## VILLAMOS ENERGIA A VILÁGŪRZEN

Először is válaszoljunk meg a kérdést, hogy mire is kell villamos energia az űrben? Tulajdonképpen mindenhez. Az eszközeink világűrbe juttatásához és az ott történő pályamódosításokhoz rakétákat használunk, de ezen kívül mindenre az elektromosságot alkalmazzuk, a már korábban említett univerzalitása miatt. Ezzel működnek az űreszközök létfenntartó rendszerei (fűtés és levegő-keringetés), motorok forgatják az antennákat és árammal működik az összes kommunikációs és számítástechnikai eszköz, így a navigáció is. A különféle mérő- és laborszakozók is elképzelhetetlenek villamos áram nélkül, de ennek előállítás a világűrben komoly nehézségekbe ütközik.

**ÖSSZEFOGLALÁS:** 2014-ben Barack Obama elnök jelentette be, hogy a NASA a Hold-expedíciók felújítása helyett, inkább a Marsra történő utazás előkészítésére fordítja erőforrásait. Ez számtalan olyan új kihívást jelentett a mérnökök számára, amelyek gyökeresen új technológiákat kívánnak. A probléma nagyságrendjét jól érzékelteti, hogy míg a közepes Föld – Hold távolság kb. 400 000 km, addig a Mars nagyjából 26 havonta kerül földközébe, ami 80 millió km-t jelent. Vagyis a Mars a legjobb esetben is 200-szor messzebb van, mint a Hold. Komoly kockázatot jelent a hosszú út során a kozmikus sugárzás, majd a Mars légkörében történő landolás. Egyebek mellett sokáig megoldatlan volt az űrhajó, illetve később a kolónia elektromos energiával történő ellátása is. A nehézségek miatt a tervezett indulás időpontját többször is elhalasztották, jelenleg a 2030-as vagy még inkább a 2033-as időpont tűnik valószínűnek, de egy új technika miatt talán az elektromos áramra már nem lesz gondjuk a leendő Mars-utazóknak.

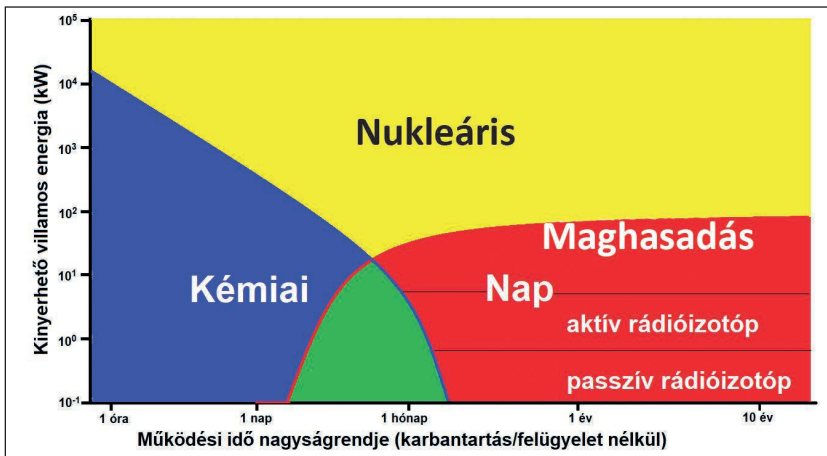
**KULCSSZAVAK:** KRUSTY, Kilopower, Mars-kolónia, Stirling-motor, nukleáris energia

**ABSTRACT:** It was in 2014 that president Barack Obama declared NASA will concentrate its resources for preparing a travel to the Mars despite the renewal of Moon expeditions. It accounts lot of new challenges for the engineers that need radically new technologies. In order to demonstrate the magnitude of the problem we should see the mean Earth-Moon distance is 400 000 km but Mars is in near-Earth position only by 26 months and it means 80 million km. So the Mars even in the best position is 200 times farther than the Moon. During the long travel the cosmic radiation will be a serious risk and later the landing in the atmosphere of the Mars. Among other things the electrical power supply of the spaceship and the colony was unsolved for a long time. Because of the difficulties the time of the launch was postponed many times. Now 2030 or even more 2033 seem imaginable. But thanks for a new technology perhaps the prospective Mars-travellers won't have a problem with the electrical power.

**KEY WORDS:** KRUSTY, Kilopower, Mars-colony, Stirling-engine, nuclear power

\* Mk. alezredes, MH Modernizációs Intézet, kiemelt főtiszt, NKE doktorandusz, vegvari.zsolt@hm.gov.hu. ORCID: 0000-0003-2543-6049





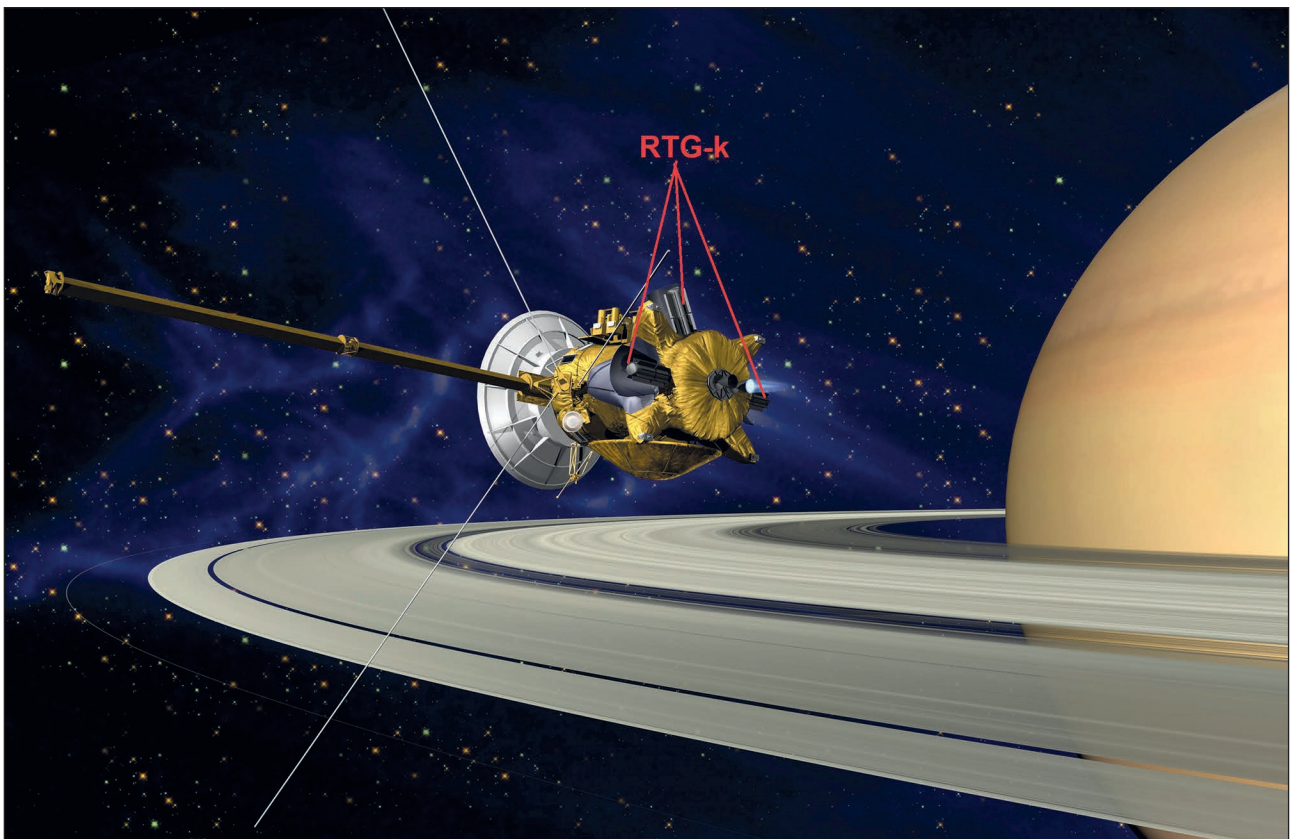
1. ábra. Az űrben elérhető villamos energiaforrások összevetése (A szerző saját szerkesztése, a Stanford University Radioisotopes – Applications in Physical Sciences alapján)

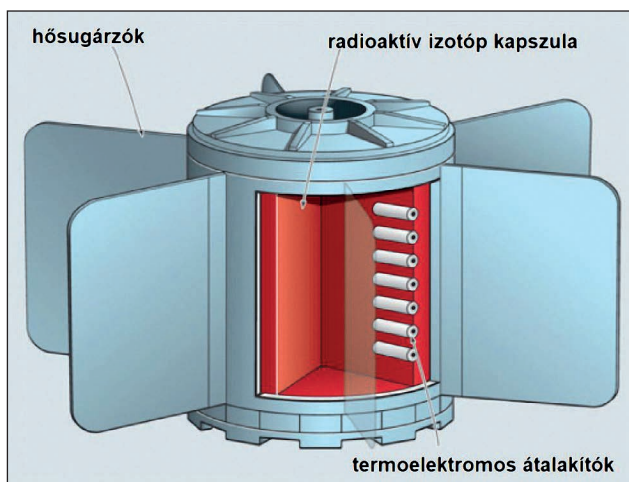
Az erőművi technológiák a hatalmas méretük és tömegük miatt nyilvánvalóan nem alkalmasak arra, hogy az űrbe telepítsük őket. Kisebb aggregátorok használata pedig az üzemanyag és az égéshez szükséges levegő űrbe szállításának magas költsége miatt lehetetlen. Mivel az űrben nincs klasszikus értelemben vett időjárás, a működésükre pedig nincs nagy hatással a hideg, szinte kínálják magukat a napelemek. Valóban, a napelemek már az 1960-as évektől használatosak az űrtechnikában. Az első ilyen eszközöknek a hatásfoka csupán néhány százaléknyi és az áruk is csillagászati volt, ám az űrben remekül működtek és

működnek ma is. De mindez csak akkor igaz, ha a fény intenzitása megfelelő! A Föld légkörének peremén a nap  $m^2$ -enként kb. 1370 W energiát szolgáltat [4]. Ez bőven elégséges egy űrállomás működtetéséhez és még arra is, hogy akkumulátorokat töltsünk fel arra az időre, amikor az állomás a Föld árnyékába kerül. De mi a helyzet a Mars-on? Mivel az elektromágneses hullámok, mint a fény, energiája a távolság négyzetével arányosan csökken, a Naptól mintegy másfélszer messzebb lévő Marson már csak kb. 600 W-ra számíthatunk  $m^2$ -enként [4], amit némileg még a ritka légkör is ront. A Mars tengelyforgási ideje kb. 24 óra 40 perc, tehát a földinél alig több időt kellene akkumulátorokkal áthidalni.

Látható, hogy egy, a Nemzetközi Űrállomáshoz hasonló méretű objektumnak a Mars felszínén történő működtetéséhez hasonló mennyiségű akkumulátor és mintegy 2,5-szer több napelemre lenne szükség. Ennek tömege jelentős lenne, de a marsi utazásnak van még egy sajátossága, ami miatt el kell vetni ezt a technológiát. Az űrhajó a visszaúthoz szükséges üzemanyagot, annak jelentős tömege miatt nem viszi magával a Marsra, hanem azt is ott kell előállítani és hasonló a helyzet a létfenntartáshoz szükséges oxigénnel is. A Mars légköre főleg szén-dioxidból áll, így abból kellő energia befektetésével nyerhetünk oxigént, ehhez már csak némi hidrogén kell, ami szintén elérhető a Marson is,

2. ábra. Fantáziarajz a Cassini–Huygens szondáról. Piros színnel bejelöltük az RTG-eket. Érdekes, hogy az elhelyezkedésük semmilyen szimmetriát nem mutat (Fotó: NASA)





3. ábra. A rádióizotópos termo-elektromos generátor (RTG) felépítése

és máris kész a megfelelő rakéta-hajtóanyag, a hidrogén-peroxid ( $H_2O_2$ ). Ennyi energia termeléséhez elégséges tömegű napelemet viszont már nyilvánvalóan nem vihet magával az expedíció, így csak egyetlen olyan primer energia<sup>1</sup> jöhet szóba, aminek kellően nagy az energiasűrűsége ahhoz, hogy racionális tömegviszonyok között magával vihesse egy űrhajó. Ez pedig nem más, mint az atomenergia.

Az atomenergia űrben történő felhasználása egyáltalán nem újkeletű, már a korai űrszondákban is alkalmazták, hiszen könnyen belátható, hogy az gázóriások pályáján már nem sok hasznát vesszük a napelemeknek. A Jupiter távolságában a napsugárzás intenzitása csak 4%-a a földinek, a Szaturnusznál már csak 1%-a, a Neptunusznál pedig alig 1 ezreléke. A Cassini űrszondát 1997-ben bocsátották fel és 2004-ben érte el a Szaturnuszt, illetve annak holdját, a Titánt. Az eredeti terv szerint 2008-ig tartott volna a küldetés, de azt 2017-ig meghosszabbították. Az űrszök tömege a több mint 3500 kg, míg üzemanyag nélkül 2412 kg, de ebből 349 kg volt a Titánon landoló Huygens leszállóegység, és kb. 350 kg az egyéb tudományos műszer. Mindezek közel 20 évig tartó működtetéséhez a Cassini kb. 30 kg-nyi plutóniumot és három darab rádióizotópos termogenerátort [5] (Radioisotope Thermoelectric Generator), vagyis RTG-t vitt magával.

Az RTG-k működése az ún. Seebeck-effektuson alapul [6], vagyis ha két különböző fémeket két helyen összekapcsolunk és a kapcsolódási pontok eltérő hőmérsékletűek, akkor azok között feszültség jön létre. Ez a jelenség a fémek párosától függően Kelvinenként csak néhány mV feszültséget hoz létre, de ha a nukleáris elemekkel létrehozott párszáz fokot összevetjük a világűr hidegével, már elég nagy a hőmérsékletkülönbség ahhoz, hogy komolyabb teljesítményt adjon le az eszköz. Az RTG-k igen nagy előnye, hogy nem tartalmaznak mozgó alkatrészt, ezért nagyon megbízhatóak és a hatásfokuk a világűrben 3-7% is lehet. Az alkalmazott radioaktív anyag felezési idejétől függően viszont az RTG-k öregsznek. A Cassini három RTG-je az induláskor még 885 W névleges teljesítményre volt képes, de mikor 20 évvel később a Szaturnusz légkörébe zuhant, már csak 633 W volt a teljesítmény. Atomenergiát használnak bizonyos (elsősorban ex-szovjet) katonai műholdak is, mert az ellenséges ballisztikus rakéták bemérésére telepített radarok több kW-nyi energiaigényéhez már irreálisan nagy felületű és sérülékeny napelem kellene. Ezekben a műholdakban azonban már nem RTG-t,

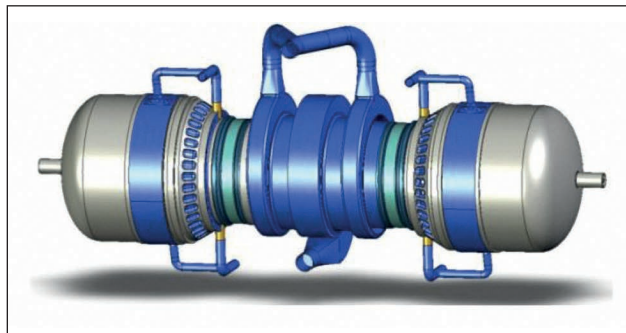
hanem atomreaktort használtak. Ezek az izotópok természetes bomlásával szemben már egy kontrollált láncreakciót valósítanak meg, így jóval magasabb hőmérséklet jön létre, amit aztán szintén a Seebeck-effektussal alakítanak villamos árammá.

### A STIRLING-MOTOR

Nyilvánvaló, hogy ha a naptól távoli helyeken szeretnénk nagyobb mennyiségű villamos energiát előállítani, akkor arra a jelenlegi technológiai szinten csak az atomenergia alkalmas, de a technikának kétségkívül vannak korlátai. Ha több energiára van szükségünk, akkor nagyobb felezési idejű izotópot vagy egyenesen dúsított izotópokat tartalmazó reaktort kell alkalmazni, de akkor a sugárzás is megnő. Adott esetben már az elektronikus berendezéseket is árnyékolni kell, ami jelentős tömeggel jár, ha pedig emberek is tartózkodnak a közelben, az tovább bonyolítja a helyzetet. Az egyetlen megoldás, hogy viszonylag mérsékelt sugárzású anyagot használunk, de megnöveljük a hőenergia-villamos energia konverzió hatásfokát. Szerencsére erre létezik a Peltier-elemeknél hatékonyabb eljárás is, az ún. hőlégmotor vagy Stirling-motor, ami a generátor működtetéséhez szükséges forgó mozgást képes létrehozni a hőmérséklet-különbségből.

Az eszköz valójában már 200 éve ismert, működési elvét 1816-ban egy skót lelkész, bizonyos Robert Stirling írta le először. Az Otto-motorokhoz hasonlóan ez is egy dugattyús-forgattyús hőerőgép, de azzal ellentétben, ez külső égésű. A dugattyús hőerőgépeknél a munkát a hő hatására kitáguló gázok végzik a dugattyú mozgásával a hengerben. Ehhez a belső égésű eszközökben szelepeken keresztül üzemanyagot juttatunk a hengerekbe, majd miután elégettük és munkát végeztünk vele, az égéstermékek újabb szelepeken keresztül távoznak. A külső égésű hőerőgépeknél a gáz egy zárt rendszerben áramlik. A hengerben egy külső forrás által melegítjük fel a gázt, majd az a tágulás után lehűl és összehúzódik. A motor elméleti jelentősége azért nagy, mert elvi hatásfoka megközelíti a tökéletes Carnot-körfolyamat hatásfokát. A Stirling-motor (hőlégmotor) tényleges hatásfoka viszont a hőmérséklet-viszonyoktól függ, vagyis minél nagyobb a hőmérséklet-különbség, annál jobb a hatásfok [7]. Ez egyben magyarázza azt is, hogy miért nem terjedt el a Stirling-motor eddig a gyakorlatban. A földi hőmérsékleti körülmények között ugyanis – fosszilis hőforrást használva és a korábban rendelkezésre álló anyagok hőtechnikai tulajdonságai mellett – hosszú ideig meg sem lehetett közelíteni az Otto-motorok hatásfokát. Elsősorban a korszerű anyagszerkezeteknek köszönhetően, ez a helyzet mára jelentősen megváltozott.

4. ábra. A duál Stirling-motoros energia-konverter vázlatrajza



A világűrben, a radioaktivitást kihasználva elég komoly hőmérséklet-különbség hozható létre, így jogos a kérdés, hogy korábban miért nem alkalmazták ezt a megoldást az űrtechnikában. Erre az lehet a válasz, hogy az alkalmazott anyagok kedvező hőtechnikai tulajdonságai mellett, azoknak komoly mechanikai igénybevételt is el kell viselniük. A Strling-motor ugyan nem tartalmaz szelepeket, és a felépítése általában lényegesen egyszerűbb a belsőégésű motorokénál, de a továbbra is meglévő forgattyús-dugattyús szerkezetnek a szélsőséges hőterhelés mellett is éveken keresztül megbízhatóan kell működnie, valamint deformáció nélkül el kell viselnie pl. a felbocsátáskor jelentkező gyorsulást is. Úgy tűnik, hogy ezt a problémát sikerült most megoldaniuk amerikai mérnököknek, de az áttörés nem egy új elv gyakorlati felhasználásán alapul, hanem azon a csendes anyagtechnológiai forradalmon, ami az elmúlt években lezajlott.

(Folytatjuk)

#### FELHASZNÁLT IRODALOM

[1] Key World Energy Statistics 2017. International Energy Agency, 2017. DOI: 10.1787/key\_energ\_stat-2017-en;

- [2] Végvári Zsolt: Akkumulátorok a gyalogos lövészkatónák felszerelésében, a fejlesztés lehetséges irányai. Műszaki Katonai Közlöny, 26. évf. 2. sz., 2016.;
- [3] Végvári Zsolt: A megújuló villamos-energiaforrások felhasználásnak lehetőségei harctéri körülmények között. Hadmérnök, 11. évf. 1. sz., márc. 2016.;
- [4] Catling, D.: Planets and radiations. Jegyzet, University of Washington, 2013;
- [5] Quick Facts | Mission, Solar System Exploration: NASA Science. <https://solarsystem.nasa.gov/missions/cassini/mission/quick-facts>. 2018.10.11. [2018.12.21];
- [6] Jiang, M.: An Overview of Radioisotope Thermoelectric Generators. Stanford University, 15-2013. <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph241/jiang1/>. 2018.09.28. [2018.12.21];
- [7] Gras, P.: Operating principles of Stirling engine., 02.09.2017. <http://www.robertstirlingengine.com/principles.php>. 2017.09.02. [2018.12.21].

#### JEGYZETEK

1 A természetben előforduló energiaforrások, mint a kőolaj, földgáz, a nukleáris energia vagy a megújuló források.

#### Krámlí Mihály

## Az Osztrák–Magyar Monarchia csatahajói 1904–1914

2018-ban jelent meg a Hadtörténeli Intézet és Múzeum kiadásában *Az Osztrák–Magyar Monarchia csatahajói 1904–1914* című kötet. A könyv hosszú évek kutatómunkájának eredményeként foglalja össze a Monarchia két utolsó, a megépült, valamint a megtervezett, megszávozott, de már az építés megkezdéséig el nem jutott csatahajóosztályának történetét.

A világméretű haditengerészeti fegyverkezési verseny hatására az osztrák–magyar haditengerészet 1904-ben határozta el a minőségi ugrás végrehajtását a csatahajó-építésben. Szakítva a „puszta partvédelem” korábbi jelszavával a haditengerészet úgy döntött, hogy a jövőben a legnagyobb tengeri hatalmakéval egyenértékű csatahajókat épít. Ebben az esztendőben kezdték meg a később RADETZKY-osztályúnak nevezett csatahajók tervezését, amelyek 1907 és 1911 között épültek meg. Miután 1906-tól a világ vezető tengeri hatalmai megkezdtek az áttérést az új, dreadnought-típusú csatahajókra, a Monarchia haditengerészete számára a valódi áttérést az igazi dreadnoughtok, a későbbi TEGETHOFF-osztály egységei jelentették, amelyek 1908-ban jelentek meg a tervezőasztalon, majd 1910 és 1915 között épültek meg. Ezen osztály utolsó tagja, a SZENT ISTVÁN, magyar hajógyárban épült. Az új, még nagyobb és erősebb csatahajók tervezése 1911-ben kezdődött és 1914-ben fejeződött be. Építésüket az osztrák és a magyar politikusok 1914-ben megszávozták, de a világháború kitörése után gyártásukat törölték a költségvetésből. Az első világháború előtt megépült két csatahajóosztálynak köszönhetően a Monarchia a mediterrán hatalmi térben igazi tengeri hatalommá vált.

A kötet a tervezés és az építés története mellett bemutatja az elkészült hajók tevékenységének krónikáját is. A műszaki adatok mellett, egy külön fejezet egyedülálló módon, részletesen ismerteti e hajók nehéztüzérségét és tűzvezetését is.

E hiánypótló könyv az eddig megjelent legnagyobb terjedelmű mű, amely eredeti források alapján részletesen és teljeskörűen mutatja be e csatahajó-osztályok történetét.

**A 400 oldalas, fűzött, keményfedelű, 66 fekete-fehér képpel illusztrált kötet ára 4700 Ft; kereskedelmi forgalomban nem kapható, kizárólag a Hadtörténeli Intézet és Múzeumban (Budapest, 1014, Kapisztrán tér, 2–4.) szerezhető be.**

(Pollmann Ferenc)

