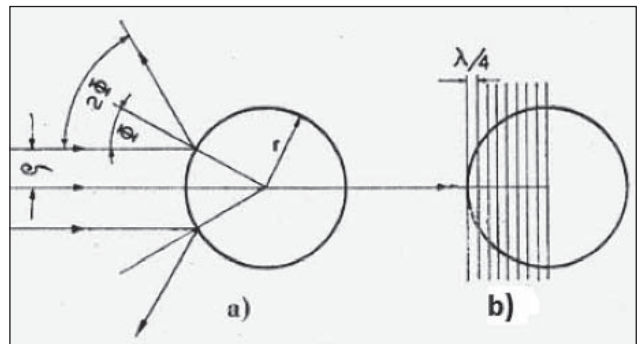


Dr. Balajti István

# Hatásos radarcéltárgy-keresztmetszet növelési lehetőségek I. rész

## BEVEZETÉS

1943. december 20-án, Sári község közelében, hadműveleti szolgálatba léptek az első teljesen magyar fejlesztésű távfelderítő rádiólokátorok. [1] (2 db Sas lokátor, párban telepítve. – Szerk.) Ez csak úgy volt lehetséges, hogy a magyar rádióelektronikai kutatás-fejlesztés és ipar világszínvonalú ismeretekkel rendelkezett a radarban alkalmazható technológiákról, amelyekre alapozva a céltárgyra vonatkoztatott jel-zaj teljesítményviszony maximalizálásával megoldható a cél észlelése, útvonalba fogása és azonosítása. Jáky József, Bay Zoltán és Istvánffy Edvin hamar felismerték a céltárgyról visszaverődő jel nagyságára vonatkozó elméletek, és az ezekhez kapcsolódó mérések szükségességét. Istvánffy Edvin gyakorlatias gondolkodását bizonyítja, hogy a legegyszerűbb geometriai forma, a gömb hatásos radarkeresztmetszetét számította ki, mint a céltárgyra vonatkozó minimális jelszinteket meghatározó etalont, a maximális jelszinteket viszont a légtérben repülő, egy vagy több azonos irányú polarizációval rendelkező félhullámú dipól sugárzókkal értékelték. [2] Az 1. ábra bemutatja Istvánffy a Hold hatásos radarkeresztmetszetének meghatározására használt „egyszerű” geometrián alapuló számítási módszerét és a jóval bonyolultabb nyugaton kidolgozott a gömbfelület Fresnel-zónákra való felosztásának módszerét. Mindkét megoldás végeredménye azonos: a gömbnek minden irányból azonos az RCS-felülete, a beeső és a visszavert elektromágneses hullámokat a tér minden irányában egyenletesen veri vissza, ezért izotróp sugárzóként viselkedik. A gömb e tulajdonságát napjainkban is kihasználjuk a radarok kalibrálására és az egyszerűsített RCS performancia szimulációkhoz. Ha a céltárgy lineáris mérete sokkal nagyobb a hullámhossznál, akkor viselkedése közelít a gömb RCS-je szerintihez, ezt nevezik optikai tartománynak. Ebben a tartományban a fémgömb RCS-je állandó, megegyezik a geometriai vetületével, csak átmérőjétől és felületének anyagminőségétől függ. Ezért a nem fluktuáló céltárgyakat, Marcum vagy Swerling 0 céltárgy típusba tartozónak nevezzük.



1. ábra. A gömb hatásos radarkeresztmetszet számítása: a) Istvánffy által, b) Fresnel-zónák által [2]

1941-ben a Bay Zoltán vezette, a rádióhullám terjedési sajátosságokra vonatkozó méréseket kiterjesztették radarcéltárgy-keresztmetszet vizsgálatokra. A 2. ábrán Bay Zoltán és Dallos György látható, ahogy a 600 MHz vételi

2. ábra. Bay Zoltán és Dallos György beállítja a hullámterjedés és RCS méréshez szükséges adatokat

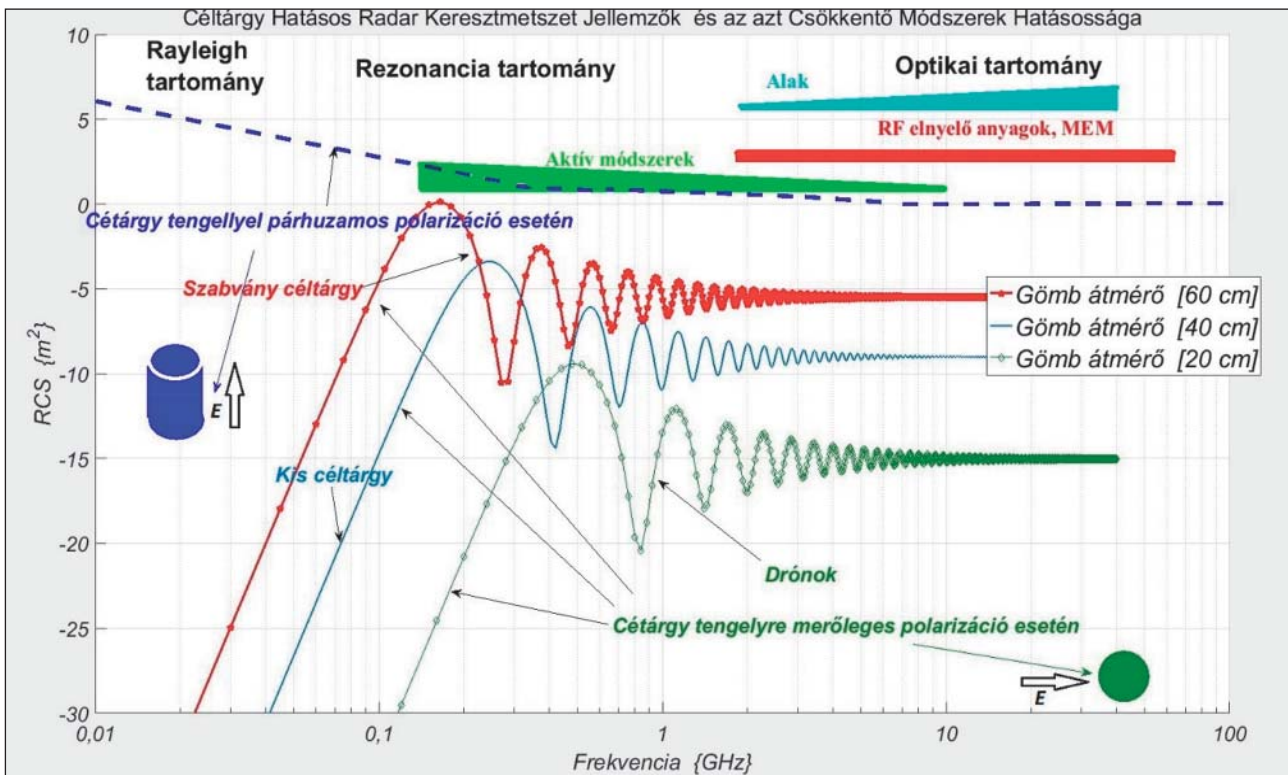


**ÖSSZEFOGLALÁS:** Korunkban már nemcsak a „lopakodó” tulajdonságokkal rendelkező katonai rendeltetésű, de a kompozitanyagok felhasználásának terjedésével a polgári repülő eszközök hatásos radar-céltárgy keresztmetszete is folyamatosan csökken. A radarmérnökök feladatát tovább nehezíti, hogy előtérbe kerülnek a harcászati ballisztikus rakéták/lövedékek, a különböző típusú drónok, madarak, vagy az alacsony Föld körüli pályákon keringő műholdak által megfogalmazott kihívások. Ismert tény, hogy a hagyományos elvárásokkal megrendelt rádiólokátorok számára a repülő eszközök hatásos radarcéltárgy-keresztmetszet (Radar Cross Section – RCS) sajátosságaiból eredő lehetőségek csak minimális szinten vannak kihasználva, ezért a radarszakemberek feladata új műszaki megoldások, fizikai jelenségeken alapuló radarrendszer-struktúrák kidolgozása, amelyek a hatásos radarkeresztmetszet „növelését” célozzák.

**KULCSSZAVAK:** radar, lopakodó technológia, radarcéltárgy keresztmetszet

**ABSTRACT:** In our time, not only the “stealth” military but the effective radar cross-section of civilian airplanes have been steadily declining with the use of composite materials. The task of radar engineers is further complicated by the challenges posed by tactical ballistic missiles / projectiles, various types of drones, birds, or low orbit satellites detection, trajectory maintenance and recognition. It is well-known that radar specialists have the opportunity to develop new technical solutions, radar system structures based on physical phenomena, and the radar features of Radar Cross Section (RCS) which aim at “increasing” the effective radar cross-section.

**KEY WORDS:** radar, stealth technology, effective radar cross section



3. ábra. Céltárgy-tartományok a frekvencia függvényében

lehetőségek mérésére beállítják az adóantennákat. A mérések eredményeként megállapították, hogy az RCS nagysága függ a céltárgy anyagától, a rádióhullámok megvilágítási szögétől, a hullámhossztól, a polarizációjától és a terpviszonyok sajátosságaitól. A mérések azt mutatták, hogy a repülő eszközök RCS mérete, és az ebből adódó jelerősség 5-10 szerese a vertikális polarizációban vehető jelerősségeknek. Ezért a magyar Sas rádiólokátorok vízszintes polarizációt alkalmaztak a tér-letapogatásra. Napjainkban már ismert, hogy a „lopakodó” technológiával készült repülő eszközök kihasználják az alak és az elektromágneses energia elnyelésére kifejlesztett anyagok RCS csökkentő tulajdonságait, amely a legkorszerűbb esetekben kiegészül aktív „elektromágneses energia-elnyelő” módszerek, pl. „plazma pajzs” alkalmazásával. Ezek RCS csökkentő hatása a repülőeszköz fő veszélyeztetettségi irányában jelentős, és a hullámhossz csökkenésével nő. Részletek értelmezése a 3. ábrán.

A magyar rádiólokátorok fejlesztése 1953 után politikai okok miatt gyakorlatilag megszűnt. Ezt követően a radarokkal kapcsolatban csak újítások bevezetésére volt lehetőség.

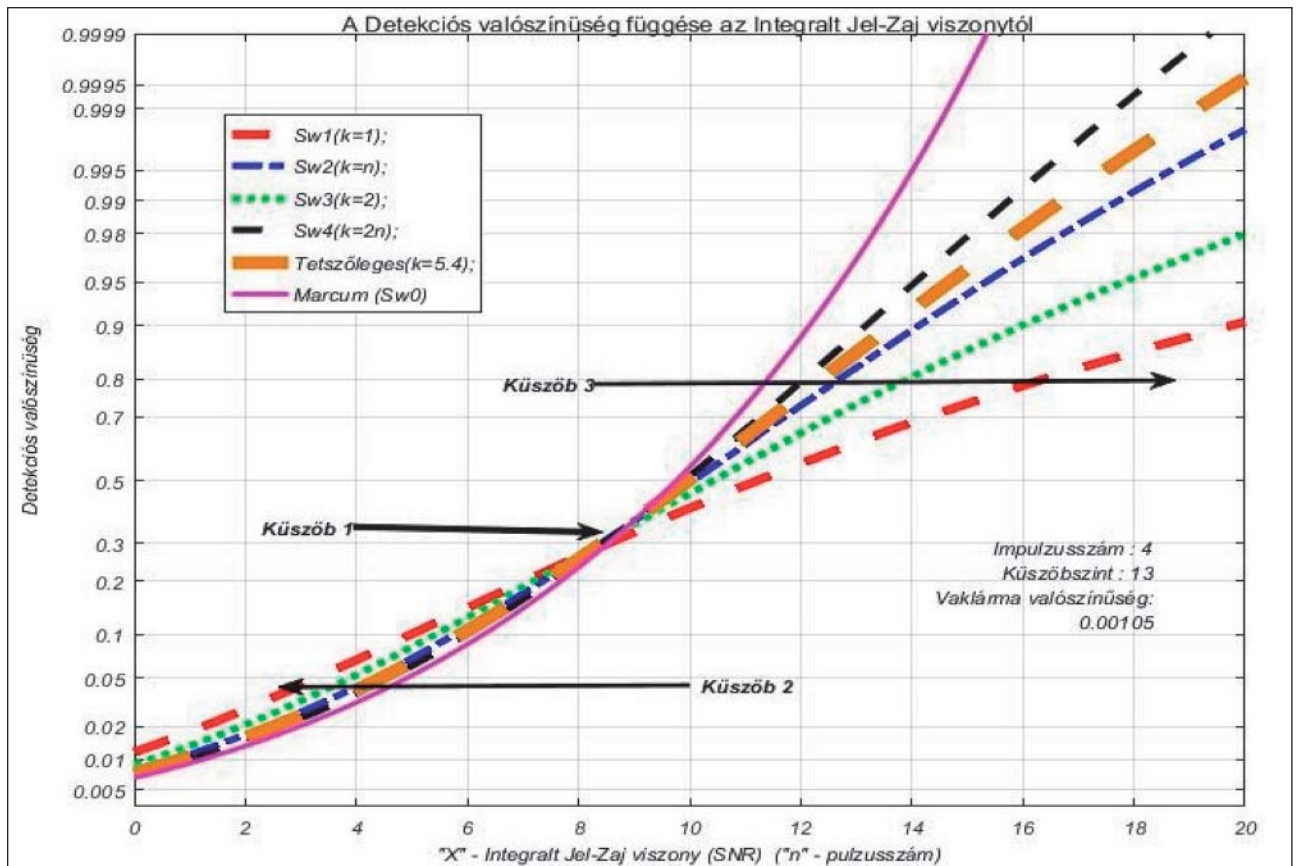
### A CÉLTÁRGYAK HATÁSOS RADARKERESZTMETSZET ÉRTÉKELÉSÉNEK FEJLŐDÉSE

Isványfi 1948-ban megjelent cikkében [2] már ír a Rayleigh-tartomány jelentőségéről. A Sas VHF nagy hatótávolságú radarok számára ez azért volt fontos, mert ebben a tartományban az RCS arányos a hullámhosszal, a reflektált jelek fázisszórása elhanyagolható, ezért a felület nagysága és orientációja a meghatározó és nem a céltárgy alakja. Rayleigh állapította meg, hogy, amennyiben a céltárgy lineáris mérete sokkal kisebb a hullámhossznál, akkor a reflexió tulajdonság az indukált elektromos és mágneses di-

pólmomentumból származtatható. A 3. ábra három különböző átmérőjű gömb szimulációján keresztül mutatja be a RCS változását a különböző frekvencia-tartományokban. Ha a polarizáció merőleges a céltárgy tengelyére, (kezdetben) az RCS elhanyagolhatóan kicsi, a frekvencia növekedésével értéke gyorsan nő. Az ilyen típusú céltárgy (megálapodás szerint) a Rayleigh-modell szerinti. Ebben a tartományban rendkívül erősek a céltárgy tengelyével párhuzamos polarizációjú jelek, amit különösen az „HF” és „VHF” sávban üzemelő radarok vagy „L”, „S” sávban a rotorral rendelkező repülő eszközök, Harcászati Ballisztikus Rakéták (Tactical Ballistic Missile – TBM) eszközök detektálására használhatnak ki a radarok.

Amikor a céltárgy mérete összemérhető a radar üzemi hullámhosszával, akkor az RCS hullámhosszfüggése az elektromos rezonanciatartomány miatt nagy. A „m”-es (VHF) hullámtartományban üzemelő radarok nagy előnye a repülőgépek törzsével összemérhető hullámhossz, amely gyakran a rezonancia-tartományba esik. Ezért kiválóan alkalmasak TBM, UAV& CM (más néven drón) típusú céltárgyak detektálására. [4]

A céltárgy felületének nagysága mellett fontos, hogy az adott hullámtartományban a felület mennyire tükröz, illetve fluktuál. Ebből a szempontból sok azonos jellegű céltárgy csoportja esetén, ha azok egymással korrelációban vannak, és ha lassan fluktuálnak, Swerling 1 (SW1), ha gyorsan fluktuálnak, Swerling 2 (SW2) modell szerint jellemezhető az RCS. Sok kis céltárgy együttese egy nagy céltárggyal (pl. rezonáns felületek), ha azok egymással korrelációban vannak Swerling 3 (SW3), ha nem Swerling 4 (SW4) modell szerinti. (Megjegyzés: A katonai szakirodalom a vadászbombázó repülőgépeket SW3, míg a hadszíntéri rakétákat SW3 és/vagy SW4 típusú modellnek tekinti az S-sávban üzemelő radarok számára.) Ezek a céltárgy típusok Gausz-normal eloszlásfüggvénnyel jellemezhetők, de a céltárgyak hatásos radarkeresztmetszete az esetek 20-30%-ban eltér



4. ábra. Különböző céltárgy típusok, SW1–4, tetszőleges szabadságfokú ( $pl.k=5.4$ ) és Marcum modellek, detektálási lehetőségei, adott küszöbszinthez tartozó jel-zaj viszonyal

a „Central Limit Theorema” elvárásaitól. Ezekre az esetekre 15-20 éve olyan kiterjesztett céltárgymodell típusokat dolgoztak ki, ahol a SW1–SW4 modellek Kszi eloszlásfüggvénnyel írhatók le, és az amplitúdó-eloszlásfüggvények kiegészülnek a nem zero átlaggal jellemezhető esetekkel. Ezáltal további négy céltárgy típust tudunk pontosított modell szerint detektálni, útvonalba fogni, illetve azonosítani. A 4. ábra szemlélteti a különböző fluktuációval jellemzett céltárgy típusok detektálási valószínűségeihez tartozó elvárt jel-zaj viszony értékeket. A „Küszöb 1”-gyel jelzett pontban valamennyi céltárgy modell azonos Detekciós és Vakláma valószínűségekkkel, illetve jel-zaj viszonyal rendelkezik. Fölötte a nem fluktuáló céltárgy (SW0) kis elvárt jel-zaj viszony esetén is nagyobb valószínűséggel detektálható, mint a fluktuáló (pl.SW4). A „Küszöb 2”-vel jelzett pont környezetében a viszony fordított. Ezt a jelenséget napjainkban a polgári alkalmazásban lévő radarokban még nem, a katonai rádiólokációban is csak ritkán, néhány nagyon fejlett radarrendszerben használják ki a célok detektálására, útvonalba fogására és azonosításának elősegítésére.

A hullámhossz növekedésével a gyorsan fluktuáló céltárgyak fokozatosan lassan fluktuálóvá, míg a lassan fluktuáló nem fluktuálóvá alakulnak. Ha a sok kis méretű céltárgy együttese egy nagyméretű céltárggyal tetszőleges visszavert teljesítmény-aránnyal rendelkezik, az a Rice-modell. Bonyolult céltárgyak gyorsan változó teljesítményarányal a log-normál modell szerinti, amelyet újabban tetszőleges szabadságfokú Kszi-eloszlásfüggvénnyel írunk le. Ilyen „extrém” céltárgyak pl. a passzív zavarok, műholdak néhány fajtája és a repülőgép-hordozók.

#### A CÉLTÁRGYAK HATÁSOS RADARKERESZTMETSZET NÖVELÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI

A „lopakodó” és csökkentett RCS képességekkel épülő repülőgépek gyártói (5. ábra), minden tiszteletet megérdemelnének a radarszakemberektől is, hiszen a csúcstechnológiát alkalmazó gépek megépítéséhez szükséges technológiák és gyakorlatban történő alkalmazásuk komplexitása lenyűgöző. Ugyanakkor nagyszerű kihívás számunkra az elvárt és valós performanciák hiányosságainak feltárása, illetve ha ilyen nem találunk, olyan új rádiólokációs rendszerek, megoldások kidolgozása, amelyek továbbra is lehetővé teszik a minőségi légtérelőnézést. A „lopakodó” technológiával rendelkező repülő eszközök RCS csökkentő módszereinek vizsgálata és az ezek ellen alkalmazható módszerek kutatása már jelentős eredményeket ért el. A 3. ábra bemutatja a különböző „lopakodó” technológiák alkalmazhatóságának frekvenciatartomány szerinti függését. Szimulációk és mérések igazolják, hogy a radarok adóteljesítmény vagy antennanyereség növelése célszerűtlen. Eredményesebb megoldások találhatók a különböző frekvenciatartományokban alkalmazható frekvencia „sokszínűség” (diversity), RCS polarizációfüggés és a napjainkban még nem kellően kihasznált, a fentiekben felsorolt céltárgyjellemzők párhuzamos mérését megoldó új radarrendszer topológiák alkalmazásával, amelyek az IT alkalmazó szoftvere radar struktúrák, a hagyományos elven működő radarok mérési szabadságfokát költséghatékonyan a többszörösére növelhetik. [7]

Jelenleg a céltárgyak RCS-értékei nagyon pontosan szimulálhatók, illetve számíthatók, ugyanakkor ezek az ada-



5. ábra. Az F-35-ös többfeladatú „lopakodó” technológiával épült amerikai katonai repülőgép

tok közvetlenül nagyon körülményesen alkalmazhatók a céltárgy-detektálási performanciák értékelésére, hiszen a különböző radartelepülési helyszíneken a hullámterjedési viszonyok és a céltárgyak RCS tulajdonságai rendkívüli mértékben eltérhetnek egymástól. Ezért az új követelmények megjelenésével újra kell értékelni a lehetőségeket, pl. ha elvárjuk, hogy a radarimpulzusok eltérő irányokból különböző hullámsávokban egy időben ériék el a céltárgyat, már nem találunk kidolgozott eljárásokat.

(Folytatjuk)

## IRODALOM

I. Balajti – F. Hajdú: Surprising findings from the Hungarian radar developments in the era of the second

- world war, RADIO SCIENCE BULLETIN 358: (September) pp. 82–108. dokumentum típusa: Folyóiratcikk/Szakcikk nyelv: angol, [http://www.ursi.org/content/RSB/RSB\\_358\\_2016\\_09.pdf](http://www.ursi.org/content/RSB/RSB_358_2016_09.pdf);
- E. Istvánffy, „Radarkészülékek elméleti és gyakorlati problémái”, Elektrotechnika, 1948, Vol. 40, Nr. 8, August, pp. 167–184. (Theoretical and Practical Problems of Radar) ISSN 0367-0708 (in Hungarian);
- H. Kuschel: ‘VHF/UHF radar, part 1: characteristics and applications’, Electronics and Communications Journal, Vol.14, No.2, pp 61–72, April 2002, and Vol.14, No.3, pp 101–111, June 2002.);
- I. Balajti – Gy. Kende – Ed. Sinner: Increased importance of VHF radars in Ground - Based Air Defense, IEEE Aerospace and Electronic SYSTEMS Magazine, Januar 2012, p. 2–18, ISSN 0885-8985;
- D. K. Barton, (2005): Radar system analysis and modeling. Boston, Artech House. 545 p. ISBN 1-580536-81-6; <https://www.magyar-elektronika.hu/34-tartalom/tartalom/1545-a-radarteknika-alapjai-3-resz-a-radar-hatotavolsaga>;
- <http://www.radartutorial.eu/01.basics/Frequency%20Diversity%20Radar.en.html>;
- <http://www.roe.ru/catalog/protivovozdushnaya-oborona/rezonans-ne/>;
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_radar](https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_radar);
- <http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-2249392/The-unjammable-quantum-radar-make-present-generation-stealth-technology-obs>;
- <http://www.kbctv.co.ke/blog/2016/09/23/china-says-it-has-a-new-ghostly-quantum-radar-that-can-spot-us-stealth-aircraft/>.

(Fotók a szerző gyűjteményéből.)

**Hausner Gábor (szerk.)**

## Zrínyi-album

A Zrínyi Kiadó 2017-ben jelentette meg dr. Hausner Gábor alezredes, a Hadtörténeti Intézet és Múzeum hadtörténetésének szerkesztésében exkluzív kivitelű, összefoglaló jelleű emlékkönyvét, a Zrínyi-albumot. A kötet szerzői – Bene Sándor, G. Etényi Nóra, Hausner Gábor, Kelenik József, valamint R. Várkonyi Ágnes – a hadtörténelem tudományterületének kiváló művelői. Hausner Gábor neves szakértője a Zrínyi Miklós hadvezérről kapcsolatos kutatásoknak. A magyar főispán és horvát bán élete során számos, a magyar hadelméletet megalapozó, teoretikus írásművet alkotott. Zrínyi Miklós, a hadvezér és költő jelentősebb hadtudományi munkái: a *Tábori Kis Tracta*, a *Vitéz Hadnagy*, a *Mátyás-tanulmány* és *A török áfium ellen való orvosság*. Személye az önálló magyar hadtudomány jelképévé vált. Nem véletlenül nevezték el Zrínyiről a Nemzetvédelmi Egyetemet, illetve a magyar hadtudomány műveinek megjelentetéséért felelős katonai könyvkiadót is. Zrínyi Miklós (1620 – 1664) a költő, a hadvezér és államférfi munkásságát az elmúlt évtizedek kutatásai új nézőpontokból világították meg és új összefüggésekbe helyezték. A forrásokból kibontakozott Zrínyi egyetemes híre, európai jelentősége, amit jelzett, hogy 1664 tavaszán (még életében) angol nyelvű életrajz jelent meg róla Londonban, amelynek bevezetője szerint „Zrínyi az, akire a Gondviselés Európa sorsát bízta”. A kötet történetész, irodalom- és hadtörténetész szerzői magyar és angol nyelven, kép és szöveg együttesével, albumszerűen idézik fel Zrínyi tetteit, írói és politikai törekvéseit, történelmi jelentőségét, bemutatva portréjának változó vonásait, egyúttal bőséges szakirodalmi tájékoztatást nyújtva a hazai és a külföldi érdeklődők számára.



**A 416 oldalas, cérnafűzött, keménytablás, több mint 100 fotóval, illetve részletes korabeli térképekkel illusztrált könyv 7500 Ft-os áron kapható a könyvesboltokban, illetve közvetlenül a Zrínyi Kiadónál is, 20%-os helyszíni kedvezménnyel.**

**(Cím: 1087 Budapest, Kerepesi út 29/b., Tel.: 06 1 459 5373, e-mail: gyoredina@armedia.hu). (D.Sz.P.)**

