



SZALAI SÁNDOR* – SÓDOR BÁLINT** – TRÓZNAI GÁBOR***

KÖZEL 10 ÉVE MŰKÖDIK A MARS KÖRÜLI PÁLYÁN A SZÍNES SZTEREÓKAMERA MAGYAR SZOFTVERREL

1. ÁBRA. A Hubble űrteleszkóp által 2021. június 26-án a Marsról készített kép (Forrás: ESA)

Összefoglalás: A CaSSIS az ESA ExoMars programjának első missziójában (Trace Gas Orbiter TGO) használt nagy felbontású színes sztereókamera. Ezt kilenc ország kutatói és mérnökei fejlesztették ki a Berni Egyetem vezetésével. A CaSSIS részletes színes és sztereó felvételeket készít a Mars felszínéről, segítve ezzel a nyomgázok, például a metán lehetséges forrásainak és nyelőinek felkutatását, amelyek a múltbeli vagy jelenlegi életre utalhatnak. A kamera fedélzeti szoftverét az SGF Technológia Fejlesztő Kft. fejlesztette ki rövid idő alatt. Az űrszondát 2016-ban indították az űrbe, és még ma is működik.

Kulcsszavak: Mars, ExoMars, Schiaparelli, CaSSIS, LEON processzor, Mil 1553, SpaceWire

Abstract: CaSSIS is a high-resolution colour, stereo camera on the first mission of ESA's ExoMars programme (Trace Gas Orbiter TGO). It was developed by researchers and engineers from nine countries, led by the University of Bern. CaSSIS is designed to acquire detailed colour and stereo images of the Martian surface, helping to identify possible sources and sinks of trace gases such as methane that may indicate past or present life. The on-board software for the camera was developed by SGF Ltd., in a short time. The spacecraft was launched in 2016 and is still operational today.

Keywords: Mars, ExoMars, Schiaparelli, CaSSIS, LEON processor, Mil 1553, SpaceWire

* SGF Technológia Fejlesztő Kft. (SGF Kft.), MTA doktora; cégvezető. ORCID: 0000-0003-3979-084X

** SGF Kft., szoftverfejlesztő. ORCID: 0009-0009-0829-9709

*** SGF Kft., ügyvezető. ORCID: 0009-0003-8226-3612

Az Európai Űrügynökség (European Space Agency – ESA) az oroszországi Roszkoszmosz által közösen két misszióban készült megvalósítani a marsi élet kutatását szolgáló ExoMars (Exobiology on Mars) elnevezésű programot. A program első missziója 2016. március 14-én indult Bajkonurból Proton-M rakétán. Az első misszió két egységből állt, a gázforrásokat kutató (Trace Gas Orbiter – TGO), Mars körüli pályán keringő rendszer elsősorban metánt és más légköri nyomgázokat keres, amelyek a Marson zajló aktív biológiai vagy geológiai folyamatok jelei lehetnek. Az első misszió másik egysége a Schiaparelli névre keresztelt leszállóegység volt, amelynek a felszínre juttatását egy, a következő (második) misszióban is alkalmazni tervezett leszállítórendszer (Entry Descent Demonstrator Modul – EDM) végezte, így a leszállás az EDM éles tesztjeként is szolgált. A tervek szerint a TGO a második misszió során adattovábbító központként is tud működni, amely kommunikációs szolgáltatásokat nyújtana a Mars felszínén működő leendő kutatójármű (rover) számára. A TGO orbiter adattovábbító rádiórendszereit a NASA készítette.

2022. március 16–17-én az ESA-tagországok képviselőinek párizsi tanácskozása után az ESA felfüggesztette az együttműködést Oroszországgal az Ukrajna ellen indított háború következményeként. Így a mai napig nem került sor a tervezett második misszióra, amely felszínt kutató járművet (rovert) is szállított volna.





A Mars [1] a Naprendszerben a Föld után következő, a Naptól számított negyedik, szabad szemmel is látható, vörös színben pompázó kőzetbolygó (1. ábra). A vörös szín a felszínen található jelentős mennyiségű vas-oxid-pornak köszönhető. A bolygó a Földről mindig csaknem telekorongnak látható, és így nem mutat fényváltozásokat, távcsővel megfigyelve pedig felszínén számos érdekes domborzati képződmény látható. Érdekes megemlíteni a felszínből jelentősen kiemelkedő hegyet (Olympus Mons), amely 21 km magas, és a csúcsán 80 km átmérőjű, korábbi vulkáni tevékenységre utaló kaldera¹ látható. A másik feltűnő domborzati elem egy jól látható árokrendszer (Valles Marineris), amely közel 5000 km hosszú, és helyenként eléri a 8 km-es mélységet. A bolygó enyhén elliptikus pályán kering a Nap körül, átlagos távolsága 228 millió km, keringési ideje egy földi év és 322 nap (687 nap), tengelyforgása pedig kicsit hosszabb, mint egy földi nap (24 óra 39 perc). A Föld és a Mars is ellipszispályán keringenek, a két bolygó egymástól való távolsága állandóan változik. A Föld mint belső bolygó megelőzi, majd ismét utoléri a Marsot. Az úgynevezett nagy közelségek csak 15-17 évente következnek be, a legközelebbi 2035-ben fog megtörténni.

Tömege közel tizede a Föld tömegének ($6,42 \times 10^{23}$ kg), átlagos sűrűsége $3,9 \text{ g/cm}^3$ (a Föld sűrűségének 0,7-szerese). A marsi gravitációs gyorsulás értéke $3,77 \text{ m/s}^2$. A felszíni átlaghőmérséklete lényegesen alacsonyabb (-63°C), mint a Földé, bár az egyenlítői sávban napközben elérheti a 20°C -ot, de éjszaka jelentősen lecsökken (-60°C alá). Léghőmérséklete igen ritka: a felszíni légnyomás 7,5 millibar, ami csak 0,7%-a a földinek. Jelentős a szén-dioxid-tartalma (96%), de található még benne nitrogén (1,9%), argon (1,6%) valamint oxigén (0,15%) és elhanyagolható mennyiségben szén-monoxid, vízgőz, ózon, xenon és kripton. Forgástengelyének ferdesége 25° , ezért évszakváltozások is megfigyelhetők; például a téli időszakban az északi póluson jól látható fehér folt (1. ábra) változik, ami vízjégből és kicsapódott szén-dioxid-jégből (szárzajég) áll. Ez a sarki jégsapka szezonálisan változtatja a méretét, a nyár folyamán elpárolog belőle, télen pedig a légkör egy része kifagy rá, ennek méretét növelve.

A Földhöz legjobban hasonlító bolygó kutatása régóta foglalkoztatja az emberiséget, különösen a földönkívüli élet lehetőségének vizsgálata miatt.

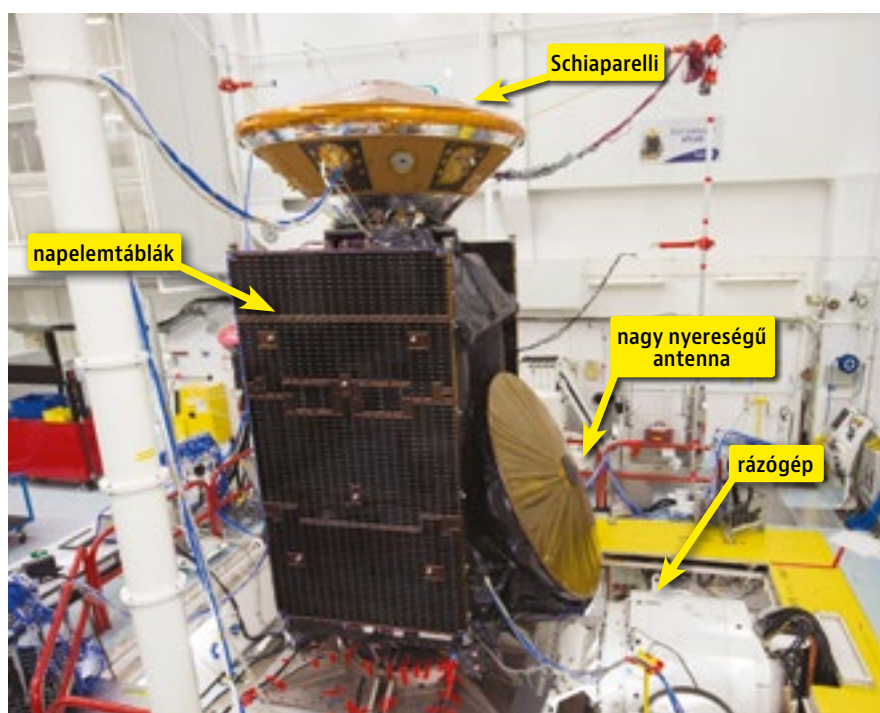
A Mars két holdját 1877-ben fedezték fel, az űrkutatás beköszöntével pedig a legintenzívebben kutatott bolygónak tekinthető. Számos szondával vizsgálták már a Mars felszínét és légkörét az élet nyomainak jeleit és lakhatóságának lehetőségét keresve.

Az ESA első Marsot kutató űrszondája, a Mars Express 2003-ban indult és jelenleg is működik, viszont a Beagle 2 leszállóegysége a leszállás során elveszett. Az ESA Mars-hoz elindított második űrszondája, a TGO szintén tartalmazott egy leszállóegységet (Schiaparelli), amely szintén nem járt sikerrel.

Az első megvalósult ExoMars misszió űrszondájának [2] teljes tömege induláskor 4332 kg (üzemanyaggal együtt), amely a TGO keringőegységből (3732 kg, ebből 113,8 kg a tudományos műszerek tömege) és a Schiaparelli leszállóegységből (577 kg) állt. A TGO mérete $3,5 \times 2 \times 2 \text{ m}$. Két napelemtáblája van, amelyek 2000 wattot szolgáltatnak. Egy 2,2 m-es X-sávban működő nagy nyereségű antenna és 3 db kisebb antenna szolgál a Földdel való kapcsolatra. A Mars-felszíni mérőrendszerekkel (majd a leendő roverrel) való kapcsolattartásra a NASA által fejlesztett URH adóvevők szolgálnak. A Mars körüli árnyékos keringési szakaszokban a TGO műszereinek áramellátását egy 5100 Wh kapacitású lítium-ion-akkumulátor biztosítja.

2. ÁBRA. Fénykép egy kráterről (2024. máj. 15.)
(Fotó: ESA/NASA/Roscosmos)

3. ÁBRA. A ExoMars program szondájának rázástesztje (Fotó: ESA)



¹ Vulkáni eredetű, nagy méretű bemélyedés.

A TGO KERINGŐ EGYSÉG MŰSZEREI (5. ábra):

Légkörkémiiai analízátor

(Atmospheric Chemistry Suite – ACS)

Ez a három infravörös műszerből álló csomag a marsi légkör kémiai és szerkezetét vizsgálja. Az ACS kiegészíti a NOMAD műszer méréseit az infravörös hullámhosszúságú mérések bővítésével, és felvételeket készít a Napról a napfény adatok alaposabb elemzése érdekében.

Színes sztereókamera

(Colour and Stereo Surface Imaging System – CaSSIS)

Nagy felbontású kamera (5 méter per pixel a végleges fényképezési pályán), amely nagy területről képes színes és sztereó képeket készíteni egy optikával. A CaSSIS biztosítja a NOMAD és az ACS által észlelt nyomgázok forrásai és nyelői geológiai és dinamikai hátterének vizsgálatát.

Nagy felbontású neutrondetektor

(Fine Resolution Epithermal Neutron Detector – FREND)

Ez a neutrondetektor képes 1 méter mélységig feltérképezni a hidrogént a felszínen, és a felszín közelében feltárja a vízjég lerakódásait. Ez utóbbi tevékenység akár 10-szer hatékonyabb, mint a jelenlegi mérések.

Infravörös és ultraibolya spektrométer

(Nadir and Occultation for Mars Discovery – NOMAD)

A NOMAD műszerblokk három spektrométert (két infravörös és egy ultraibolya) tartalmaz a légköri komponensek nagy érzékenységgű azonosítására, különös tekintettel a metánra és más biomarker-gáz összetevőkre.

A SCHIAPARELLI [3] EGYSÉG MŰSZEREI:

A leszállási adatgyűjtő

(Atmospheric Mars Entry and Landing Investigation and Analysis – AMELIA)

A légkörbe való belépési és ereszkedési szakaszban gyűjt tudományos adatokat a Schiaparelli szolgálati érzékelőinek segítségével.

A leszállási hőhatások mérésére szolgáló

műszercsomag (Combined Aerothermal and Radio-meter Sensors instrumentation package – COMARS+)

A Schiaparelli hátsó burkolatának hőáramlását figyeli a légkörön való áthaladás során.

Leszállási kamera (Descent Camera – DeCa)

Képet készít a leszállóhelyről, amint az a felszínhez közeledik, valamint a légkör átlátszóságát is méri.

Kompakt lézeres fényvisszaverőkből álló tömb

(INstrument for landing-Roving Laser Retroreflector Investigations – INRI)

A Mars körüli pályán keringő űrszondák célpontként tudják használni a modul lézeres lokalizálására.

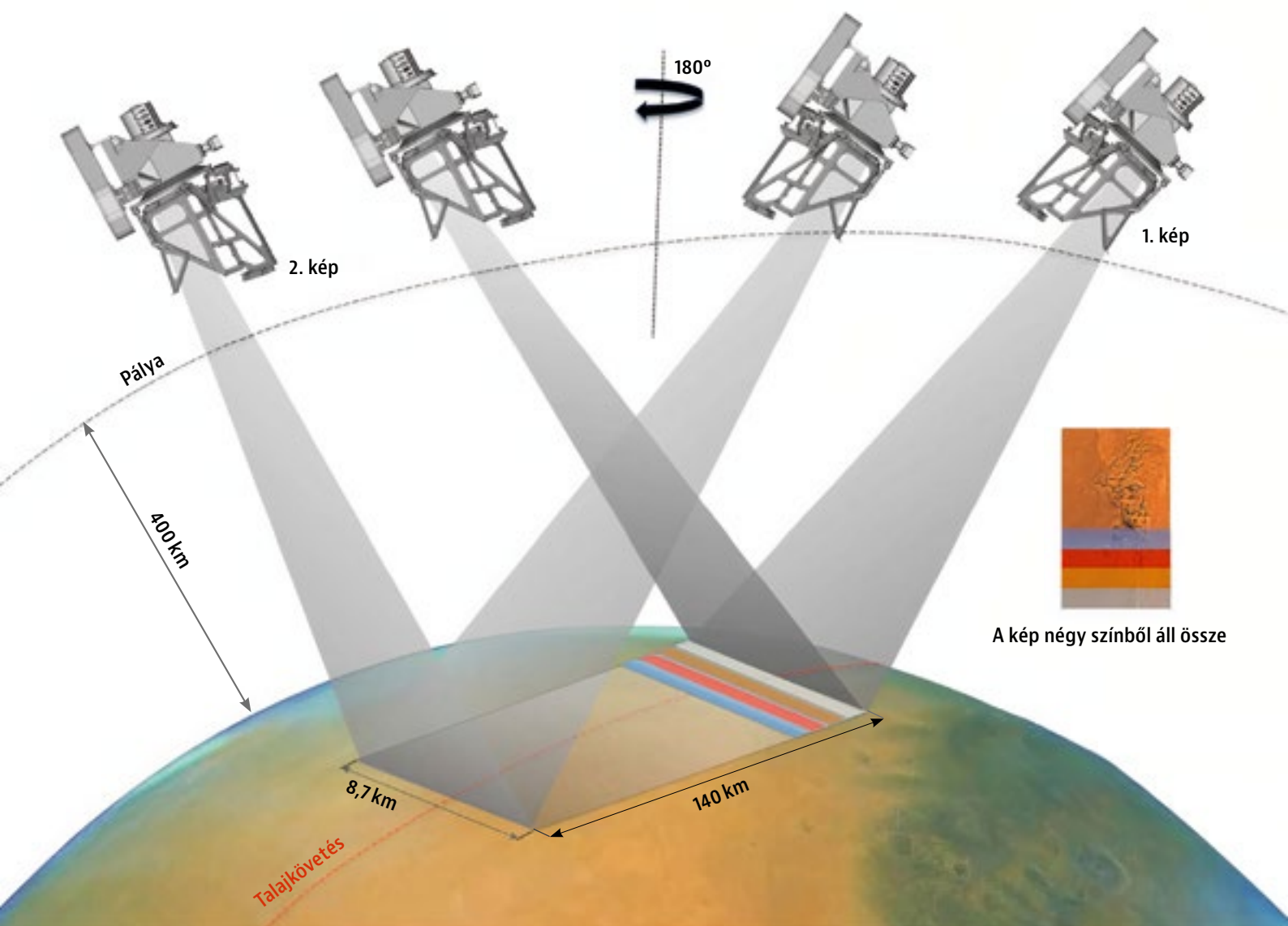
A környezettanulmányozó műszeregység

(Dust Characterisation, Risk Assessment, and

Environment Analyser on the Martian Surface – DREAMS)

Olyan érzékelőkből áll, amelyek a helyi szélsőségeket és -irányt, a páratartalmat, a nyomást, a felszínközeli légköri hőmérsékletet, a légkör átlátszóságát és az elektromos teret mérik a Marson.

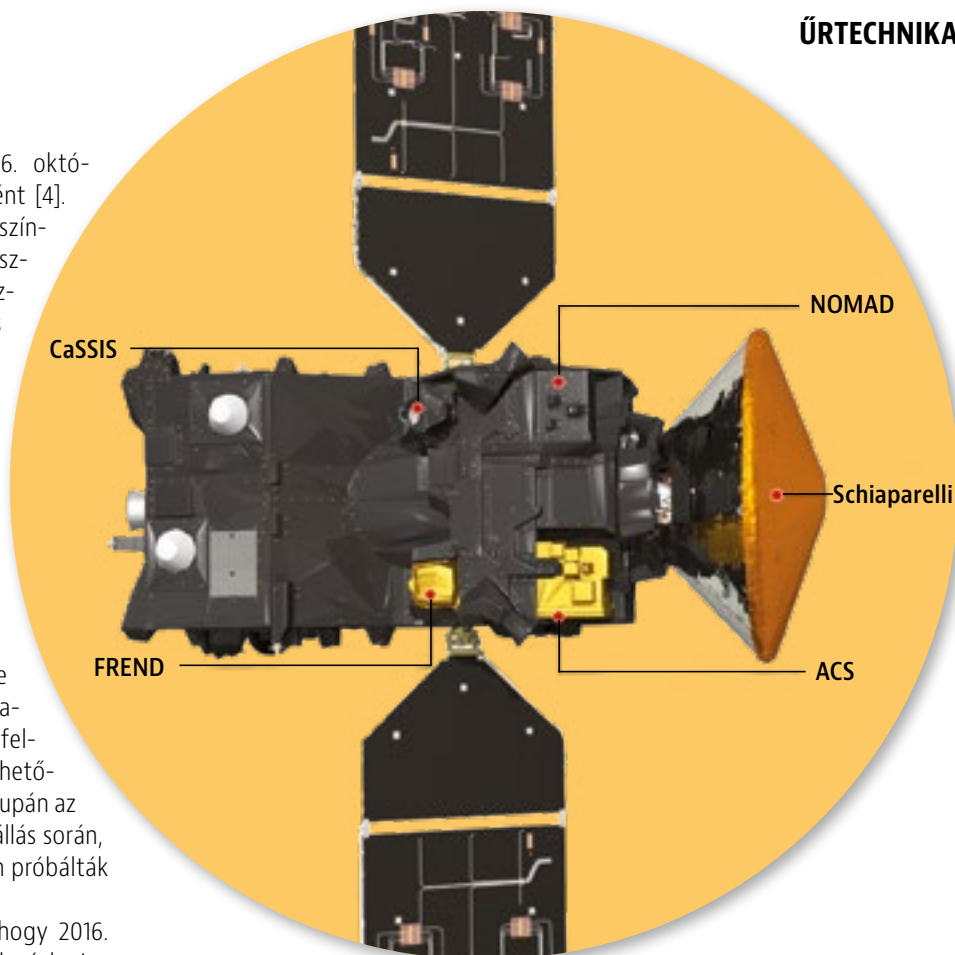
4. ÁBRA. A CaSSIS sztereóképek készítése
(Forrás: UNIBE)



A Schiaparelli és a TGO szétválasztása (2016. október 16.) a Marstól 900 000 km távolságra történt [4]. A Schiaparellivel a légkörbe való belépés és a felszínre való sima leszállás technikáját kellett volna tesztelni, illetve felszíni közvetlen méréseket végezni. A Mars légkörével kivitelezett rövid fékezés (6-7 perc) kritikus folyamat volt, mivel a Földről való irányításra nem volt mód a 9 percnyi jelterjedési holtidő miatt. A Schiaparelli a sima leszállás helyett becsapódott a felszínbe (2016. október 19-én.). Feltehetőleg szoftverhiba miatt 30 másodperc helyett csak 4 másodpercig működtek a fékezőrakéták, vagy a két fékezőernyő korán vált le, esetleg a magasságmérő a vélhető rázkódása miatt téves adatokat küldött a leszállóegység vezérlő számítógépébe, amely ez utóbbiakat nem kezelte megfelelően. A becslések szerint 2-4 km-es magasságból 300 km/óra sebességgel csapódott a felszínbe, ahol a maradék fékező üzemanyag feltehetően berobbant. A Schiaparelli öt műszere közül csupán az AMELIA és a COMARS+ volt bekapcsolva a leszállás során, és a két műszer által továbbított adatok alapján próbálták a leszállási kudarc okát meghatározni.

A TGO-t a szétválás után úgy fékeztek le, hogy 2016. október 17-én a Mars körül négynapos periódusú keringési pályára állt, ami egy $96\,000 \times 300$ km elnyújtott ellipszis volt. Ezután fokozatos lassú légköri fékezéssel 2018 áprilisában közel körpályára állt (360 km, 420 km magasan a Mars felszíne felett), keringési ideje ~2 óra volt. Ez a körpálya a színes sztereókamera (CaSSIS) számára stabil sztereókép-készítést tett lehetővé. Nemcsak az ExoMars programmal kapcsolatban történtek jelentős változások politikai és gazdasági szempontok alapján, de a műszerek fejlesztése során is. Például a CaSSIS-kamera a kezdeti megállapodások alapján svájci és amerikai fejlesztés lett volna. Az USA 2014-ben a NASA által vállalt fejlesztésekből kilépett, és a fővállalkozó, a Berni Egyetem (Universitat Bern – UNIBE) bolygó-képkalkító csoportja (Planetary Imaging Group) svájci szoftverfejlesztőket bízott meg a kamera szoftverrendszerének fejlesztésével. A CaSSIS-ban az ESA új típusú, űrminősítésű processzorait alkalmazták, a megbízott svájci szoftverfejlesztő cég azonban nem tudta az ütemtervet tartani.

Korábban az SGF Kft. mérnökei a Rosetta misszió Philae leszállóegysége központi számítógépének megkezdett fejlesztését vette át a német Légi- és Űrközlekedési Központ (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt – DLR) garchingi intézetétől, majd sikeresen határidőre befejezte. Magyarország még nem volt ESA-tagállam, amikor a kft. a missziókritikus feladatot ellátó szoftverfejlesztést sikeresen befejezte, és a Rosetta szonda 2004 márciusában elindult 10 évig tartó bolygóközi útjára. 2014-ben a leszállóegység sikeresen teljesítette feladatát az SGF Kft. által fejlesztett szoftverével. Ennek ismeretében 2014 végén a Berni Egyetem csoportvezetője megkereste az SGF Technológia Fejlesztő Kft.-t (SGF Kft.), hogy az ExoMars űrszonda indításáig el tudná-e végezni a szoft-



verfejlesztési feladatokat a CaSSIS-kamera számára a hátralévő kevesebb mint egy év alatt. A CaSSIS fejlesztésében kilenc ország (Amerikai Egyesült Államok, Egyesült Királyság, Franciaország, Lengyelország, Magyarország, Németország, Olaszország, Oroszország és Svájc) intézeteiből és ipari cégeiből vettek részt kutatók és mérnökök. A Berni Egyetem vezetésével európai intézetek mérnökei és kutatói fejlesztették a képfelvevő rendszer hardverét (elektronikát és optikát), a vezérlő és adatgyűjtő szoftvert pedig az SGF Kft.-re bízták.

A színes sztereókamera (CaSSIS) [5] az űrszonda Mars-felszín felé néző oldalán (5. ábra) lett elhelyezve. A súlycsökkentés érdekében a sztereókép készítése egyetlen optikai rendszerrel történik, ennek a kamerának a szisztematikus forgatásával (4. ábra). A kamera kutatási feladatai:

- a lehetséges jövőbeli leszállóhelyek felderítése (egy jövőbeli rover számára);
- a dinamikus felszíni folyamatok vizsgálata, amelyek hozzájárulhatnak a légköri gázok keletkezéséhez;
- a metán és más nyomgázok lehetséges felszíni és felszín alatti forrásainak vizsgálata.

A Mars-felszín állandó megfigyelése érdekében a TGO tudományos egysége elsődlegesen a felszínre merőleges orientációban található. Az orbiter olyan tengely körül forog, hogy a napelemtáblák a Nap irányába álljanak, míg az esetleges túlmelegedést okozó felesleges hő leadó radiátorok soha ne kerüljenek napfénybe. A CaSSIS vezérlőrendszere mindig kompenzálja az orbiter oldalirányú elfordulását, de a nominális sztereóképek készítése idején a szonda oldalirányú elfordulása leáll, a sztereóképpárok maximális pontossága céljából. A CaSSIS forgatómechanizmusa képes

5. ÁBRA. A TGO-szondán a műszerek elhelyezése a szétválás előtt. A nagy nyereségű antenna az ellenkező oldalon van (Forrás: ESA)

a teljes teleszkóprendszert 180°-kal elforgatni, és közben tartószerkezete mozdulatlan marad. A CaSSIS forgatómechanizmusa teszi lehetővé, hogy egy teleszkóppal és érzékelőegységgel sztereóképeket készítsen. A sztereóképpárokból először a szonda nyomvonalában 10°-kal előre fordulva, majd 180°-kal elfordulva, 10°-kal hátrafelé nézve készíti a második képet. A sztereóképpárok azonos megvilágítása a sztereójelek optimális korrelációját biztosítja.

A CaSSIS összeszerelt rendszer fényképe a 7. ábrán látható; három funkcionálisan elkülönült egységből áll: teleszkóp, forgatórendszer és elektronika. A teleszkóp és a forgatórendszer mechanikailag közös egységet képez.

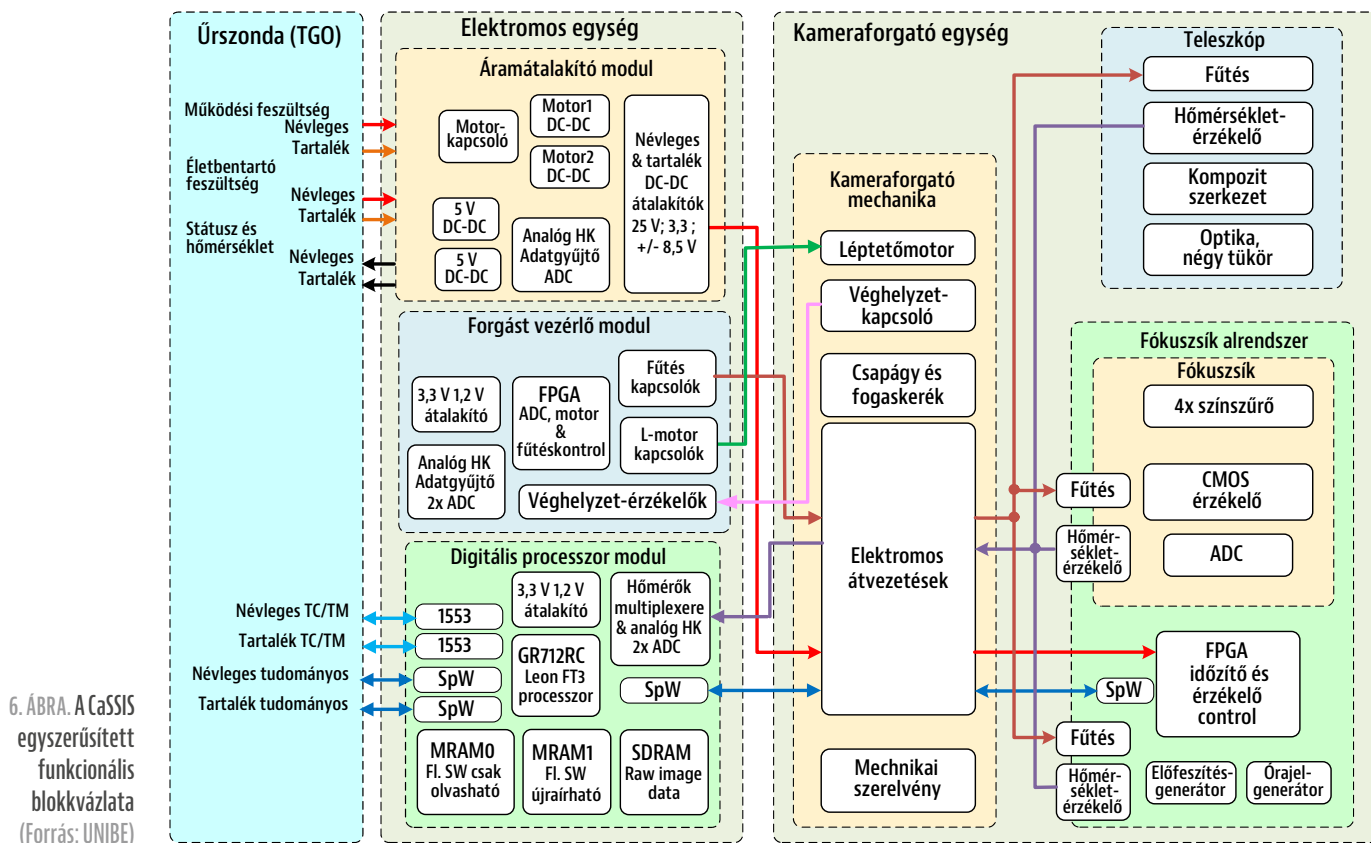
A három fő egységen belüli részletesebb főbb funkciókat külön feltüntetjük a 6. ábrán. Az elektronikai egység három nyomtatott kártyát tartalmaz:

- Feszültségátalakító, amely biztosítja a szükséges feszültségeket a CaSSIS számára a fedélzeti névleges 28 V-ból.
- A digitális processzormodul vezérlését és felügyeletét biztosítja a repülési szoftver (Flight Software – FSW) segítségével, valamint a digitális illesztőegység az űrszonda SpaceWire és Mil1553 kommunikációs buszaihoz.
- A forgásvezérlő modul (Rotation Control Modul – CRCM), amely a forgási mechanizmus léptetőmotorját hajtja.

A digitális processzor modul (DPM), amint már említettük, az ESA által űrkutatásra ajánlott kétmagos LEON3-FT SPARC V8 32 bites GR712RC processzorra épül. Ez a processzor a CQFP240-es csomagolásban robusztus, akár 3 Gy (SI) teljes ionizáló dózissal (Total Ionizing Dose – TID) szemben, és védett egy bit meghibásodásra (Single-Event Latch-Up – SEL és Single-Event Upset – SEU). Alacsony az energiafogyasztása mind az 1,8 V-os,

mind a 3,3V-os tápfeszültségen is. A működési frekvenciája 48 MHz-re lett beállítva a számítóteljesítmény és az energiafogyasztás közötti kompromisszumként. Ez a processzor SpaceWire (SpW) kapcsolatokat és redundáns MIL-STD-1553 interfészeket is tartalmaz.

A LEON processzor hibatűrő (Error Detection and Correction – EDAC) memóriavezérlője tartalmaz két logikát is, mely BCH8 (32 bitenként 8 bitnyi hibajavító és detektáló kód 1 bit hiba javítására és 1 további detektálására) valamint ReedSolomon (32 bitenként 16 bitnyi hibajavító kódolás 4 bites blokkhibák javításához) hibajavító kódolást támogat. A CaSSIS szoftvere a BCH8 hibajavítót használja. A processzor és a memóriák között 32 adat- és 8 EDAC vezetékvonal van. Összesen három memória található a DPM kártyán. Két nem felejtő véletlen hozzáférésű mágneses (Magnetoresistive Random Access Memory – MRAM) memória van, amelyek mindegyike a működtető szoftver (FSW) egy-egy példányát tárolja. Az egyik újraírható, hogy lehetővé tegye az FSW későbbi frissítését és a tartós paraméterek mentését. Tehát mindig két indítható FSW-verzió van a CaSSIS-ban, az egyik változtathatatlan, csak olvasható, utolsó földi FSW példány, a másik pedig az utólagos frissítéseket is tartalmazó változat. Ezek a Cobham UT8MR2M8 típusú MRAM-ok összesen 16 Mbit-esek, és 1 Mrad(Si) TID-nek való ellenállásukkal nagyon ellenállóak a sugárzással szemben, valamint SEL/SEU-immunitással rendelkeznek. Sajnos adatforgalma 8 bit széles buszon történik, és olvasási/írási sebessége 45 ns, ami az alkalmazott processzornál kettő, a memóriavezérlésében ugyancsak kettő várakozási állapot beiktatását igényli. Ezért a nyers négyszínű sztereóképfeldolgozása egy 40 bit adatszél-



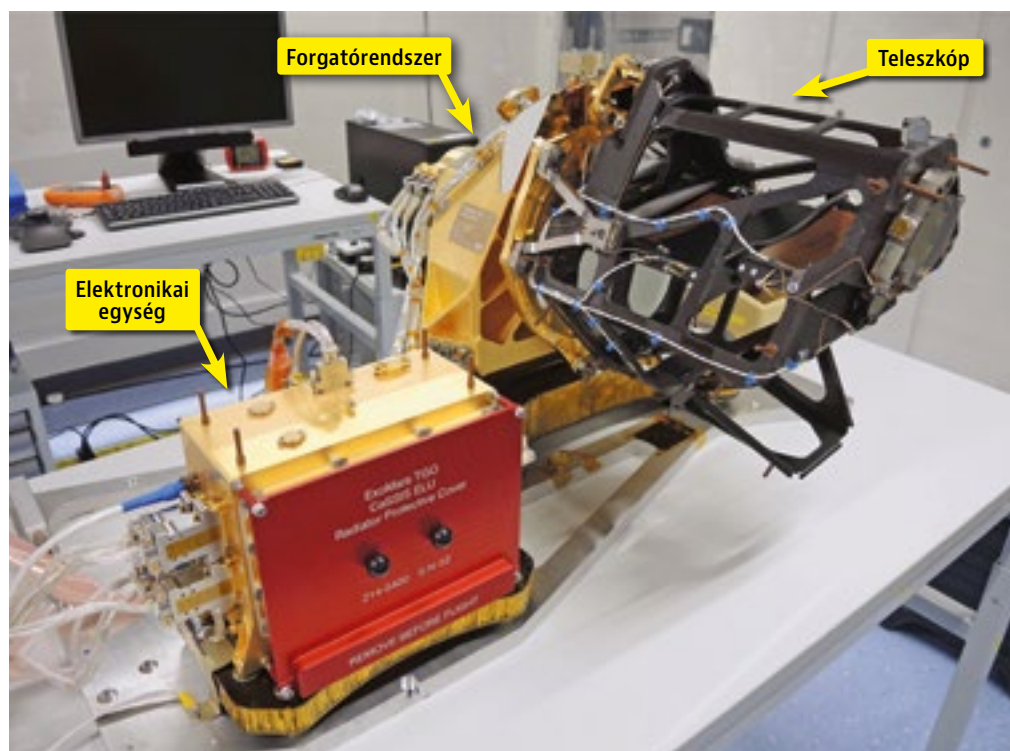
ségű szinkron dinamikus közvetlen hozzáférésű memóriában (Synchronous Dynamic Random Access Memory – SDRAM) történik, amely szintén sugárzásálló (100 krad). Ennek az SDRAM memóriának a fogyasztása viszonylag nagy, így a tervezett két memóriablokk helyett csak egy blokkot alkalmaztak. Ez ahhoz a működési korlátozáshoz vezet, hogy a következő kép elkészítése előtt a sztereópépet (ha szükséges) tömöríteni kell, és a SpaceWire kapcsolaton keresztül el kell küldeni a szonda központi adattárolójába (Payload Data Handling Unit – PDHU), amely majd továbbítja a Földre. Az analóg hőmérséklet-érzékelő és az adatgyűjtő áramkör egy kis hiszterézisű² hőmérsékletszabályzó áramkör; ez lehetővé teszi alacsonyabb átlagos hőmérséklet beállítását, ezzel pedig energiatakarékosabb, mint a klasszikus termosztátok.

A teleszkópforgatás-vezérlő áramkörök minden eleme sugárzástűrő.

Egy kis fogyasztású ProAsic3 flash FPGA található a vezérlőben, amely 100 ms-ként kiolvassa az öt darab nyolccsatornás 12 bites A/D átalakítót soros interfész buszon. Maga a forgatómotor léptetőmotor, és a motor által keltett rezgések csökkentése érdekében az FPGA 1/8 mikrolépésekkel működteti, ami kvázi szinuszos motoráramot eredményez. A léptetőmotorok nagy veszteséggel működnek, ezért a hőmérsékletét két hőérzékelő figyeli a túlmelegedés elkerülésére. Mindkét irányban két-két végálláskapcsoló van, mielőtt a mechanizmus elérné a mechanikus végállást. A CaSSIS túlélési fűtőtéljesítményét úgy kellett meghatározni, hogy a túlélési teljesítmény és a működési teljesítmény közötti különbség nem haladhatja meg a háromszoros értéket. Ezért a fűtéstáplálás közvetlenül a bejövő tápfeszültségre van kötve. A teleszkóp pontos működéséhez 10°C-ra kell felfűteni, amihez kb. 45 perc szükséges. A fűtőtesteket sugárzásálló, névlegesen 10 V-os N-csatornás MOSFET-ek kapcsolják.

A szoftver (FSW) szempontjából a CaSSIS hardverkörnyezet három fő modulból áll, valamint a TGO elektronikus rendszerét (tápellátás és kétirányú adatkapcsolat) kezelő egységéből:

- Az FSW futtatásához szükséges alapvető hardverelemeket a CPU-t is tartalmazó áramköri lapra integrálták. Ez a (CPU) modul biztosítja a kapcsolatot a többi fő modulhoz, nevezetesen az FPGA-hoz és a kameraszenzor illesztő elektronikájához (Proximity electronics – PE).
- Az FPGA-modul (a memóriabuszon keresztül) illesztett (interface – IF) valósítja meg az FPGA-hoz ADC-ken keresztül csatlakoztatott analóg érzékelők által mért telemet-



riai adatok gyűjtésére, és ezáltal a hőkezelő rendszer és a távcső forgató mechanizmusának vezérlésére.

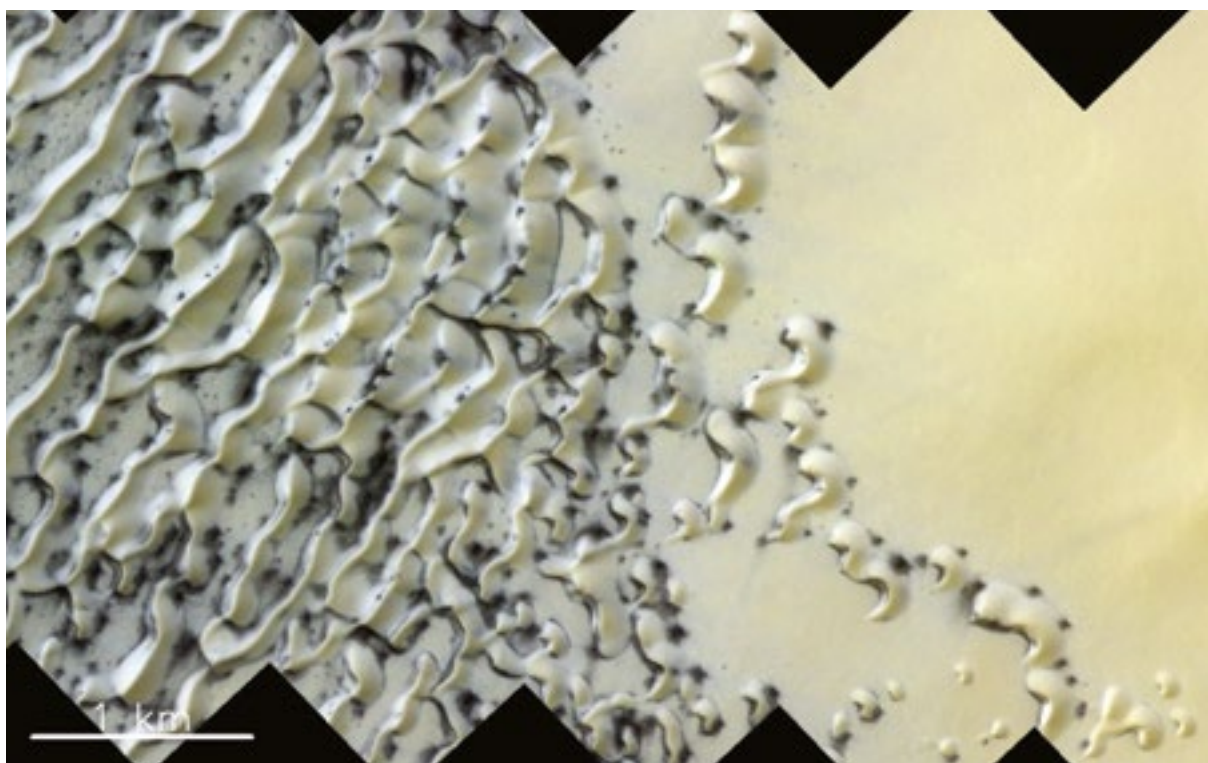
- A PE modul egy SpaceWire (SpW) kapcsolaton keresztül interfészt biztosít a detektorhoz való hozzáféréshez, a képalkotási folyamat vezérléséhez és a detektor által rögzített expozíciós adatok fogadásához.
- Az űrszonda feszültségellátó rendszerének két hálózata van (működési/üzemeltetési, valamint túlélési/életben tartási). Mindkét hálózaton van névleges és tartalék tápvezeték is. Az üzemmódok bekapcsolt állapotának (Bi-level Switch Monitor – BSM) és a hőmérséklet ellenőrzésére szolgáló monitorrendszernek szintén van névleges és tartalék illesztőegysége is. A digitális adatforgalom két szabványos interfész rendszerből (Mil-1553 és SpaceWire) áll. Mindkettő tartalmaz fő és redundáns kapcsolatot is. A LEON3 processzormagban a két szabvány szerinti illesztő logika rendelkezésre áll.

A megbízhatóság és a karbantarthatóság érdekében a CaSSIS a fedélzeti szoftver két független példányát is tárolja. Az egyik egy nem felejtő, csak olvasható memóriában van mentve, míg a másik egy nem felejtő memóriában van, de a küldetés idején újraírható, ami lehetővé teszi a fedélzeti szoftver frissítését. Egy CaSSIS-specifikus indítóprogram (bootloader) inicializálja a LEON3 processzort, ellenőrzi az FSW-képek integritását és betölti a megfelelő szoftvert. Az indítóprogram (bootloader) alapját a Gaisler cég biztosította a GR712RC környezethez, ugyanakkor a CaSSIS speciális követelményei miatt nem lehetett módosítás nélkül használni, és a megbízhatósági követelményekhez kellett igazítani.

7. ÁBRA. A CaSSIS kamera tesztelése
(Forrás: UNIBE)

² A hiszterézis (általában fizikai) rendszerek azon tulajdonsága, hogy érzéketlenek; nem azonnal reagálnak a rájuk ható erőkre, hanem késleltetéssel, vagy pedig nem térnek teljesen vissza az eredeti állapotukba; ezeknek a rendszereknek az állapota függ az előéletüktől.

8. ÁBRA. A fénykép
2019. május 25-én
készült a Mars
északi pólusánál
(Fotó: ESA/NASA/
Roscosmos)



Az adatforgalom megbízhatóságának érdekében a szoftverképek és a tudományos adatok (beleértve az SpW-n keresztül küldött képadatokat is) md5 ellenőrzőkóddal³ vannak védve. A TC és TM (HK) adatokat 2 bájtos CRC (ciklikus redundanciaellenőrzés) védi. A hibás CRC-vel kapott távutasításokat a rendszer figyelmen kívül hagyja. Az MRAM-okban és SDRAM-okban tárolt adatokat a memóriamodulok EDAC mechanizmusa védi (és hiba esetén lehetőség szerint korrigálja).

A szoftver frissítését és ugyanakkor az eredeti változat elérhetőségét a megduplázott MRAM memóriamodulok biztosítják. Az MRAM0 csak olvasható a repülés során, és az FSW első verziójának bináris képét tárolja. Az MRAM1 egy azonos modul, de a futó FSW írhatja azt repülés közben. A szoftver bármely példányának indításával lehetőség van arra, hogy az FSW frissített képét távvezérléssel feltöltsék az MRAM1-be. Bekapcsoláskor vagy újraindításakor a bootloader ellenőrzi az MRAM-okban lévő szoftver kódokat és eldönti, hogy melyik szoftvert kell indítani.

2018 áprilisa óta nagy számú kép készült [6] (2020. december 13-ig a 20 000. kép készült a Marsról). 2023 áprilisában a Föld közelébe került a Mars, akkor heti 300 képet lehetett a Földre továbbítani.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az ExoMars-TGO űrszonda és a CaSSIS kamera jelenleg is stabilan működik a 400 km-es Mars körüli körpályán. A CaSSIS nagy számú lenyűgöző felszíni színes képeiből 180-at a Bilder von Mars című könyvbe Nicolas Thomas vezetésével gyűjtöttek össze, és öt nyelven kiegészítő információkkal látták el. Ezt a Weber Verlag press 2022-ben

adta ki (ISDN:978-3-03922-151-6). A biomarker-gáz keresése (legfontosabbja a metán) eddig nem hozott új áttörő eredményt; ha jelen is van, a koncentrációja legfeljebb csak 0,05 ppbv (parts per billion by volume) lehet. [7] A Föld légkörében közel 2000 ppbv metán van. A sikeres együttműködés a CaSSIS-ban megalapozta, hogy az SGF Kft.-t meghívták a 2029-ben, az ESA űstökös kutatására induló űrszonda (Comet Interceptor) kamerájának (Comet Camera – CoCa) szoftverfejlesztésére is. ■

HIVATKOZÁSOK

- [1] Ian Ridpath: Bolygók és csillagok. Dorling Kindersley Limited, Panemex Kft. és Grafo Kft. Budapest, 1999.
- [2] ExoMars Trace Gas Orbiter Instruments. <https://exploration.esa.int/web/mars/-/48523-trace-gas-orbiter-instruments> (Letöltve: 2025.07.13).
- [3] Schiaparelli: the ExoMars Entry, Descent and Landing Demonstrator Module. <https://exploration.esa.int/web/mars/-/47852-entry-descent-and-landing-demonstrator-module> (Letöltve: 2025.07.13).
- [4] Mars media kit. https://www.esa.int/Science_Exploration/Human_and_Robotic_Exploration/Exploration/Mars_media_kit (Letöltve: 2025.07.13).
- [5] Thomas N. et al.: The Colour and Stereo Surface Imaging System (CaSSIS) for the ExoMars Trace Gas Orbiter. Space Sci Reviews, 2017.10.27. 1897–1944, DOI: 10.1007/s11214-017-0421-1
- [6] CaSSIS in Images https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Search?SearchText=CaSSIS&result_type=images (Letöltve: 2025.07.13)
- [7] ExoMars orbiter continues hunt for key signs of life on Mars. 2021.07.20. <https://www.aeronomie.be/en/news/2021/exomars-orbiter-continues-hunt-key-signs-life-mars> (Letöltve: 2025.07.13)

³ Matematikai eljárás révén véletlenszerűnek tűnő, ellenőrzésre szolgáló kiegészítő kódot hoz létre.