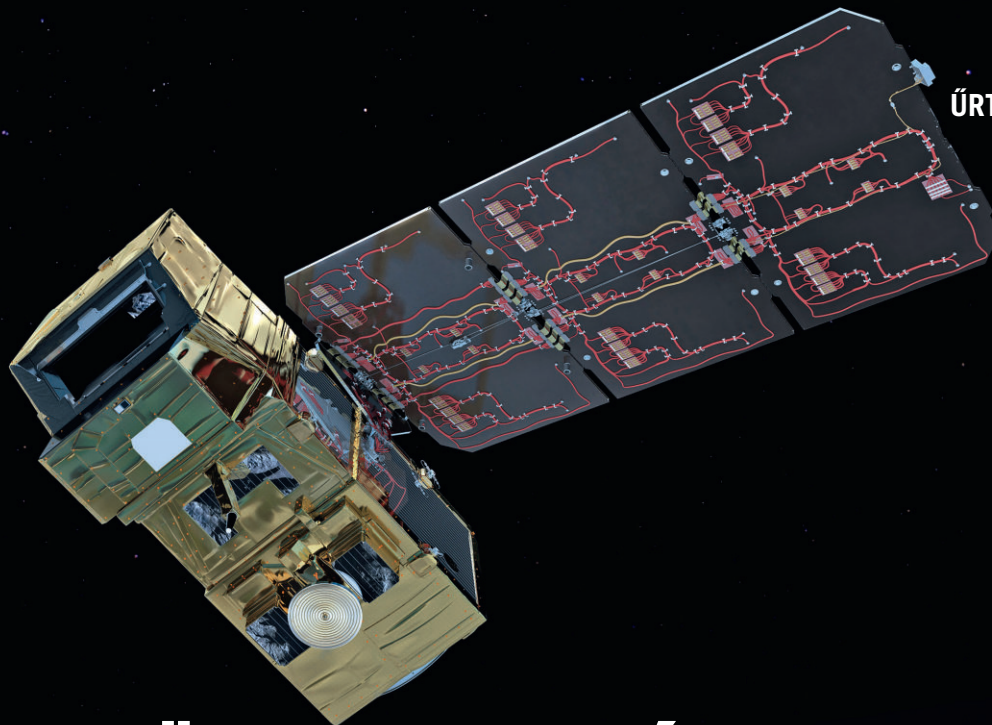




BOZSÓ ISTVÁN\*

# A MŰHOLDAS FÖLDMEGFIGYELÉS FAJTÁI ÉS PLATFORMJAI

## MŰHOLDOK FELÉPÍTÉSE, OPTIKAI ÉS AKTÍV MIKROHULLÁMÚ TÁVÉRZÉKELEÉS ALKALMAZÁSAI

**Összefoglalás:** A műholdas földmegfigyelést bemutató cikkek sorát folytatva az alkalmazási területek bemutatása előtt az optikai és az aktív mikrohullámú földmegfigyelést végző európai Copernicus-program két műholdja kerül bemutatásra. Ezután kitérünk az alkalmazási területekre, melyen belül a két különböző földmegfigyelési technika esetén két esettanulmány kerül részletezésre.

**Kulcsszavak:** űrtechnológia, Sentinel, MODIS, műholdak, földmegfigyelés, NDVI, InSAR

**Abstract:** Continuing the series of articles presenting satellite Earth Observation before discussing the applications of optical and active microwave remote sensing, two satellites of the Copernicus Earth Observation Program are introduced. After which the specific areas of application are described and applications of the two remote sensing techniques are demonstrated through the summary of two case studies.

**Keywords:** space technology, Sentinel, MODIS, satellites, earth observation, NDVI, InSAR

### A MŰHOLD FELÉPÍTÉSE

Általánosságban véve egy Föld körüli pályán keringő műhold a következő rendszerekből áll:

- a műhold mechanikai elemei: a műhold váza és a különböző mechanikai elemek, melyek elszigetelik a műhold belső szerkezetét a világűrtől, megvédik a mikrometeoroktól, és bizonyos szinten védelmet biztosítanak a kozmikus sugárzással szemben;

- a műhold energetikai rendszere: ez látja el a műhold különböző rendszereit energiával, biztosítja a folyamatos energiaellátást, véd a feszültségingadozástól.
- a rendszer elemei a következők lehetnek: napelem, akkumulátor, szabályzórendszer, radioizotópos termoelektromos generátor (jellemzően a mélyűri missziók esetén, ahol a napelemek nem képesek elég energiát

biztosítani a Naptól való távolság miatt);

- a műhold orientációs rendszere: az orientációs rendszer feladata a műhold megfelelő irányultságának beállítása és annak megfelelő megtartása, amelyek elengedhetetlenek a földi szegmenssel történő megbízható kommunikáció biztosítása és a távérzékelési feladatok pontos elvégzése érdekében. A földmegfigyelő műholdak esetén különösen fontos, hogy a műhold távérzékelést végző műszerei mindig a Föld felé „nézzenek”. A rendszer elemei egyrészt azok az eszközök, melyek alapján meg lehet állapítani a műhold irányzatát (pl. giroszkópok, horizontot érzékelő szenzorok, a Nap, a Föld vagy a csillagok állását megfigyelő kamerák, magnetométerek), másrészt az irányzatot befolyásoló berendezések (pl. fúvókák, pörgettyűk);
- küldetési eszközök: azok az eszközök, melyek lehetővé teszik a küldetési feladatok elvégzését. Földmegfigyelő műholdak esetén ezek

\* Tudományos segédmunkatárs, MSc, Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, HUN-REN. ORCID: 0000-0001-8254-1828



2. ÁBRA.  
A Sentinel-2 műhold  
által készített kép a  
Balatonról, hamis színes  
megjelenítésben [4]

- tipikusan a földfelszínt leképző berendezések, tudományos küldetések esetén például részecskedetektorok, magnetométerek, kommunikációs műholdak nagyteljesítményű rádióberendezések és antennák;
- kommunikációs rendszer: ez teszi lehetővé a műhold és a földi szegmens (lásd következő pont) között a kommunikációt. A rendszeren keresztül a műhold adatokat képes lesugározni a földi vevőállomásra, illetve rendszeresen adatokat küld a földi állomásnak és a műholdat üzemeltető szakembereknek a műhold állapotáról. A földi szegmens pedig utasításokat képes betáplálni a műhold központi irányítórendszerébe. A kommunikációhoz szükséges elektromágneses hullámok küldése és fogadása tipikusan egy mikrohullámú rádiókapcsolat használata által valósul meg;
  - földi szegmens: ugyan fizikailag nem része a műholdnak, mégis fontos megemlíteni azt a technikai és emberi infrastruktúrát, mely a Föld felszínén, repülőgépen vagy akár tengeren található. A földi szegmens a műhold kommunikációs rendszerén keresztül tartja a kap-

csolatot a műholddal, követi a műhold pozícióját, és ezáltal ellenőrzés alatt tartja a műhold pályáját, feldolgozza a műhold által lesugárzott adatokat, és ha kell, utasításokat sugároz a műholdnak, melyek biztosítják a műhold hosszútávú és megbízható működését.

A Copernicus földmegfigyelő programban az Európai Űrügynökség (European Space Agency – ESA) több földmegfigyelő műholdat is pályára állított, melyek a Sentinel (Őrszem) elnevezést viselik. A Sentinel-műholdak az elektromágneses spektrum különböző tartományában készítenek felvételeket a földfelszínről, és monitorozzák a Föld légkörének állapotát. A Copernicus-program az Európai Unió űrprogramjának részeként az Európai Bizottság vezetésével az ESA, a tagállamok és számos európai szervezet (EUMETSAT<sup>1</sup>, ECMWF<sup>2</sup>) közreműködésével valósul meg. A következő két fejezetben a Copernicus földmegfigyelő program két műholdját mutatom be, melyek passzív optikai és aktív mikrohullámú földmegfigyelést valósítanak meg, és a modern műholdas földmegfigyelés „zászlóshajóinak” tekinthetők.

## A SENTINEL-2 MŰHOLD

A Sentinel-2 misszió [1] (a Sentinel-1 műholdról a következő fejezetben lesz bővebben szó) immár három azonos műholdból (Sentinel-2A, Sentinel-2B és Sentinel-2C) áll, melyek tervezett élettartama körülbelül 7 év. Az utolsó Sentinel-2C műholdat 2024. szeptember 5-én állították pályára. [2] A műholdak 786 km átlagos felszín feletti magasságú napszinkronpályán keringenek, mely biztosítja, hogy a felvételezés során a földfelszínt elérő nap-sugárzás földfelszínnel bezárt szöge (a beesési szög<sup>3</sup>) állandó maradjon.

A műholdakon elhelyezett ún. Multispektrális Eszköz (Multi Spectral Instrument – MSI) [3] a földfelszínről visszavert napsugarakat gyűjti össze, a sugárzást frekvenciatarományokra választja szét, illetve szűri azokat. A berendezés 13 frekvenciasávban méri a földfelszín ún. reflektanciáját<sup>4</sup>. A reflektancia egy adott felszín visszaverő képességét jellemző számérték, mely tipikusan változik a frekvencia és a beesési szög függvényében, de számos más tényező (pl. felszínborítottság, talajnedvesség, atmoszféra-vízgőztartalom) is befolyásolja az értéket.

A 13 frekvenciasávot a felszíni geometriai felbontás szerint a következő kategóriákba lehet sorolni:

- 10 méteres felszíni felbontás: kék (~493 nm), zöld (560 nm), vörös (~665 nm) és közeli infravörös (~833 nm);
- 20 méteres felszíni felbontás: 4 frekvenciasáv a látható és közeli infravörös sávban (Visible and Near InfraRed – VNIR): ~704 nm, ~740 nm, ~783 nm, ~865 nm; 2 sáv a rövid hullámhosszú infravörös (Short Wavelength Infrared – SWIR) tartományban (~1610 nm és ~2190 nm), pl. hó- és jégtakaró, illetve felhőzet detektálására;
- 60 méteres felszíni felbontás: 3 sáv: ~443 nm, ~945 nm és ~1374 nm a felhőzet kiszűrésére és atmoszférikus korrekciók elvégzésére.

A „C” műhold még nem végez rendszeres megfigyelést, mivel még számos kalibrációt el kell végezni

<sup>1</sup> EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) <https://www.eumetsat.int/>.

<sup>2</sup> ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) <https://www.ecmwf.int/>.

<sup>3</sup> A szakirodalomban: incidence angle.

<sup>4</sup> A szakirodalomban: reflectance.



a műhold műszerein, ezért az „A” és „B” műholdak végzik a folyamatos földmegfigyelést, melynek köszönhetően a visszatérési idő 5 nap, azaz ugyanarról a területről 5 naponta áll rendelkezésre Sentinel-2 felvétel.

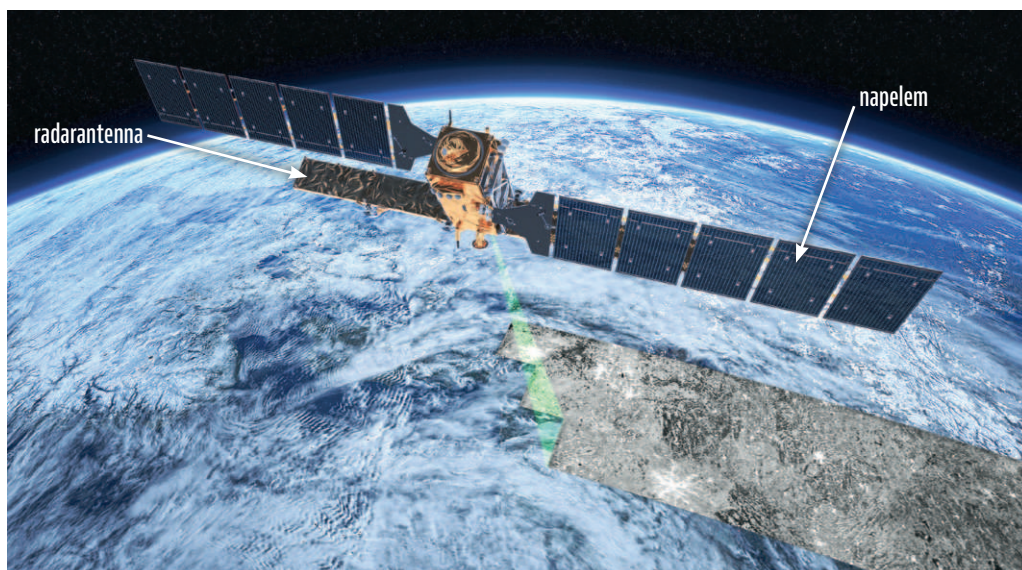
### A SENTINEL-1 MŰHOLD

A Sentinel-1 műholdcsalád 2016-tól 2021-ig két műholdból állt: Sentinel-1A és Sentinel-1B. A Sentinel-1A műholdat 2014. április 3-án, a Sentinel-1B műholdat 2016. április 25-én állították pályára. [5] A Sentinel-1 műholdak egy korábban publikált cikkben (Haditechnika 2024/6-os szám) bemutatott Szintetikus Apertúrájú Radar (Synthetic Aperture Radar – SAR) technikával felvételezik a Föld felszínét a műholdon található mikrohullámú antenna segítségével. A SAR antenna a C-sávban (központi frekvencia 5,405 GHz és a hozzá tartozó hullámhossz 5,55 cm) készít radarfelvételeket a földfelszínről.

A „B” műholdon 2021. december 23-án meghibásodott az antennát energiával ellátó rendszer, lehetlenné téve a földmegfigyelési funkciók ellátását. A hibajavítás többszöri eredménytelen kísérlete után ez a kétműholdas misszió 2022. augusztus 03-án hivatalosan befejeződött. Az ESA azóta felgyorsította a Sentinel-1C műhold gyártási folyamatát a kétműholdas feladat újraindítása céljából, azonban annak pályára juttatása továbbra is várat magára.

A Sentinel-1 pályája szintén egy napszinkron pálya, 12 napos visszatérési idővel, a műhold IW<sup>5</sup> felvételezési módjának alkalmazása esetén. A „B” műhold működése során a visszatérési idő 6 nap volt, azonban ez megnövekedett 12 napra az említett meghibásodása miatt. A műhold számos felvételezési módot támogat, azonban az IW mód alkalmazása a legelterjedtebb.

A két műhold rövid ismertetése után a következő két fejezetben az optikai és SAR távérzékelési alkalmazásokat mutatom be röviden, egy-egy konkrét példával kitérve az alkalmazási lehetőségekre.



### OPTIKAI MŰHOLDAS TÁVÉRZÉKELÉS ALKALMAZÁSAI

Az optikai vagy látható sávban történő távérzékelésnek számos alkalmazása ismert. A teljesség igénye nélkül néhány példa:

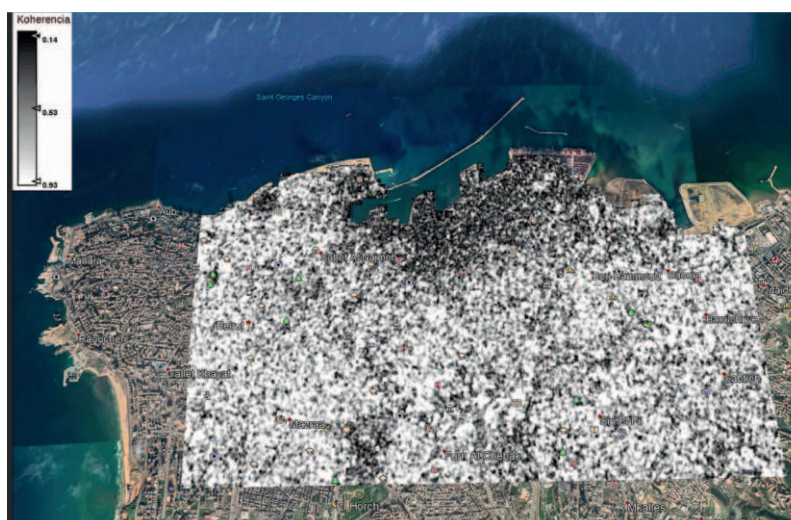
- *földfelszín borítottságának kategorizálása*: a műholdak által különböző sávokban készített reflektanciaértékeket tartalmazó képek alapján lehetséges különböző felszínborítottsági osztályokat alkotni. Az Európai Bizottság az 1980-as évek elején indította útjára a CORINE<sup>6</sup> projektet [8], amelynek célja a közigazgatás megsegítésére egy egységes módszertan kidolgozása volt, és amelynek alkalmazásával létre lehet hozni felszínborítottsági térképeket. A CORINE projekt-

ben résztvevők 6 évente készítenek felszínborítottsági adatbázist, illetve frissítik a korábbi, többek között műholdképek felhasználásával, mely egész Európát lefedi, és öt fő osztályt tartalmaz: mesterséges felszínek; mezőgazdasági területek; erdők és félig természetes területek; vizes élőhelyek; vízfelületek. [9] A CORINE és a hozzá hasonló adatbázisok elősegítik a közigazgatási feladatok ellátását, illetve a felszínborítottság változásának követését, amelynek okai között a klímaváltozás is szerepet játszhat;

- *mezőgazdasági és erdészeti alkalmazások*: a műholdképek alapján különböző vegetációs indexek származtathatók, melyek segítségével végig lehet követni a növények fej-

### 3. ÁBRA.

A Sentinel-1 műhold felvétellek készítés közben, művészi ábrázolás [23]



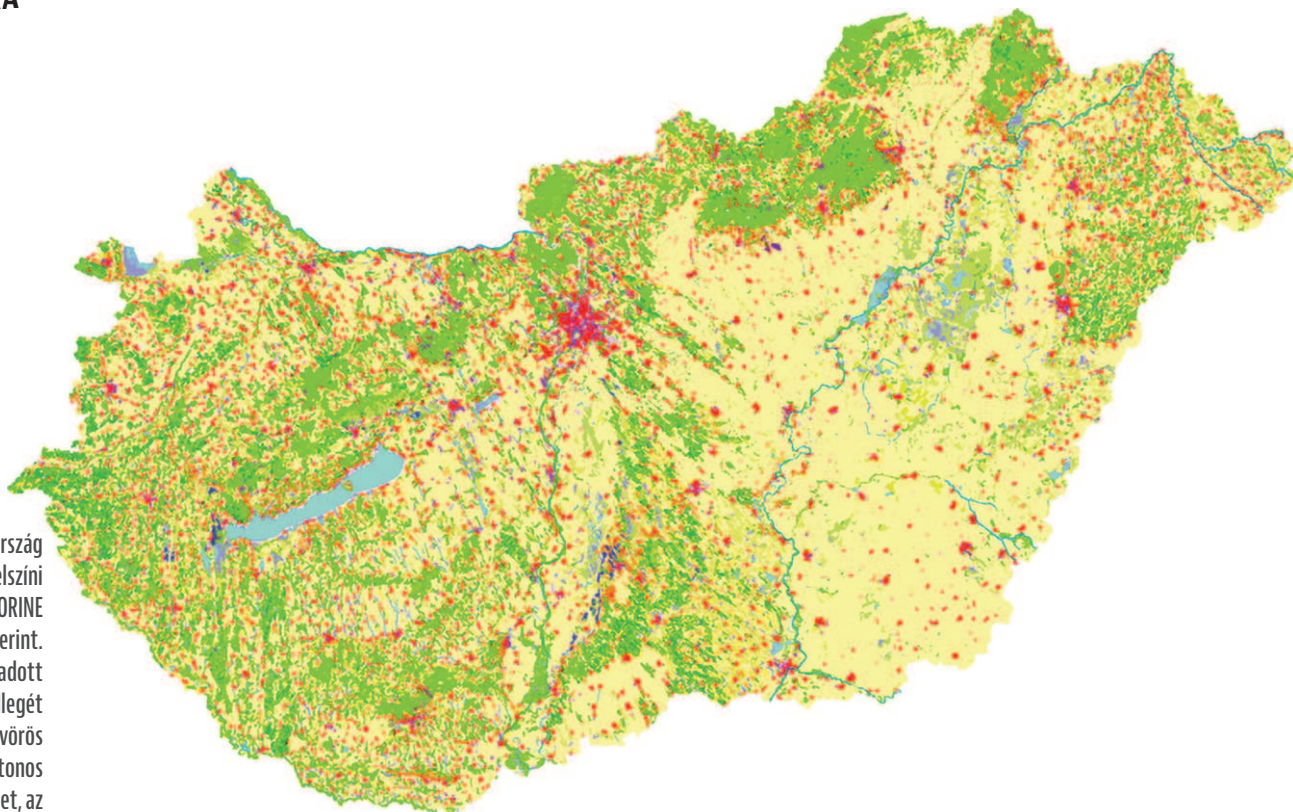
### 4. ÁBRA.

A Sentinel-1 műholdfelvételek (2020. július 31. és 2020. augusztus 6.) alapján számított koherenciaértékek a bejrúti kikötő környezetében. 2020. augusztus 4-én a kikötőben történt robbanás miatt következő pusztítás következtében a koherenciaértékek csökkenése volt tapasztalható (Forrás: A szerző szerkesztése [7] alapján)

<sup>5</sup> A szakirodalomban: Interferometric Wide swath.

<sup>6</sup> CORINE: Coordination of Information on the Environment.





5. ÁBRA. Magyarország kategorizált felszíni lefedettsége a CORINE [8] adatbázis szerint. (A színek az adott területek jellegét mutatják, a vörös például a folytonos városi területet, az élénkzöld erdőt, a világos élénkzöld természetes gyept) (Forrás: A szerző szerkesztése [10] [11] alapján)

lődését, egészségének állapotát, ezáltal lehetséges a mezőgazdaságban termésbecslést végezni, illetve betegségek és kártevők terjedését vizsgálni, az érintett területek kiterjedését felmérni;

- *meteorológiai, klimatológiai alkalmazások:* műholdképek felhasználásával lehetséges pl. a légkörben jelenlevő kihullható csapadékmennyiséget, illetve szállópor-tartalmat vagy a felhőfedettséget felmérni. A felsorolt adatok mind olyanok, melyek felhasználásával modelleket lehet létrehozni a földi légkör állapotának követésére, illetve ezeket meglévő modellekbe betáplálni a pontosabb előrejelzés érdekében;
- *a határőrség, rendőrség és egyéb hatóságok munkájának megsegítése:* tengeri és szárazföldi határok megfigyelése az illegális bevándorlás és embercsempészet megfékezése érdekében, valamint kritikus infrastruktúrák monitorozása;
- *vészhelyzetek monitorizálása:* különböző természeti és ember által előidézett katasztrófák megfigyelése, információ szolgáltatása a hatóságoknak a megelőzési, vé-

dekezési és mentési folyamatok megsegítésére.

A fenti példaalkalmazások után következzen egy részletesebb példa az optikai műholdas adatok felhasználására. Az alábbiakban röviden bemutatott tanulmányt [12] nemzetközi csapat készítette, az elkészítésében részt vett az Eötvös Loránd Tudományegyetem Geofizikai és Űrtudományi Tanszékének kollégája, dr. Kern Anikó is. A tanulmány célja az Észak-Amerikában őshonos tölgy-csipkéspoloska (*Corythucha arcuata*) [13] terjedésének feltérképezése volt Horvátországban és Magyarországon, elsősorban a NASA Terra [14] és Aqua [15] műholdjaiban elhelyezett MODIS<sup>7</sup> [16] műszer által készített képek felhasználásával. A poloska Közép-Európában először 2013-ban jelent meg, azonban az utóbbi években a terjedése felgyorsult a régiókban. [17] Invazív fajról van szó, a poloskának nincsen természetes ellensége; az általa megtámadott tölgyfák leveleiben súlyos károkat tud okozni, lecsökkentve a fotoszintézist.

A tanulmány szerzői szerint az *in situ*<sup>8</sup> elvégzett megfigyelések alapján a régió tölgyfáit (*Quercus* sp.) nem érintette más kártevő vagy betegség által

okozott számottevő pusztítás 2013 és 2019 között. A szerzők kiemelik, hogy ezek a megfigyelések elengedhetetlenek az erdők állapotának monitorozásában, azonban igen korlátozott tér- és időbeli lefedettséggel rendelkeznek. A tanulmány által vizsgált területek a poloska által megfertőzött területekre korlátozódtak, azaz Horvátország északi, Magyarország délnyugati részére.

A szerzők által használt kulcsparaméter az ún. Normalizált Vegetációs Index [18] (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) volt, melyet a MODIS-felvételek alapján számítottak ki a vizsgált területre. Az indexet a műholdfelvételek vörös és a közeli-infravörös sávjából számítják ki, és az értéke erősen korrelál a növények klorofilltartalmával és a fotoszintézis intenzitásával. Az értéke -1 és 1 között változik, ahol az 1-es érték a sűrű, egészséges növényborítottságnak felel meg, 0 a vegetáció hiányát, a negatív értékek pedig a szárazföld hiányát jelzik.

Annak érdekében, hogy megfelelő referenciaadattal rendelkezzenek, a szerzők a poloskafertőzés előtti időszakról egy kb. 20 éves adatbázist ál-

<sup>7</sup> Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

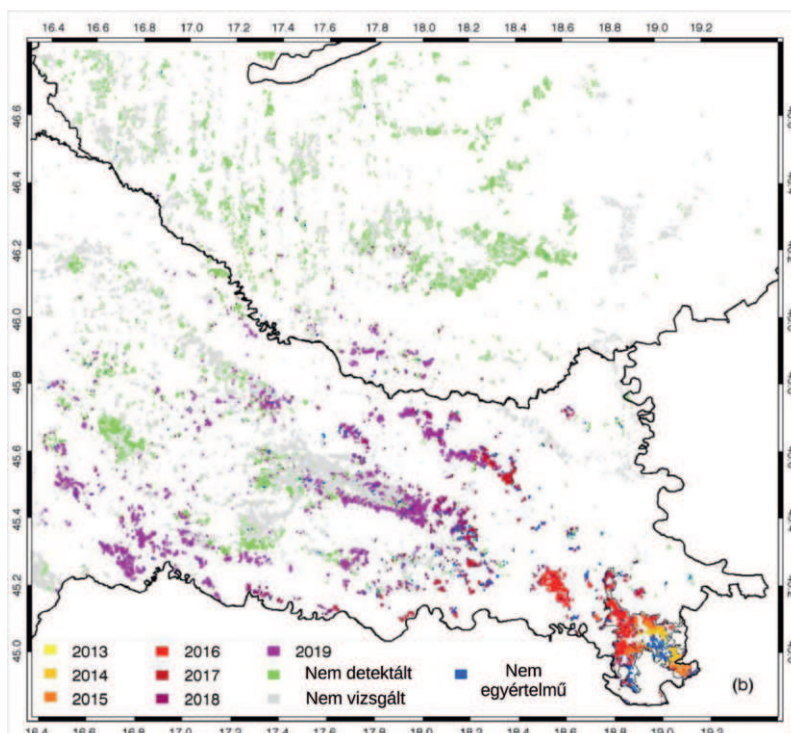
<sup>8</sup> Az *in situ* latin kifejezés, szó szerinti jelentése (adott) pozícióban, (adott) helyen. Olyan mérési technikákat jellemez, melyek a vizsgált jelenség közvetlen közelében képesek információkat szolgáltatni a jelenség paramétereiről. Bizonyos értelemben a távérzékelés „ellentettje”.

lítottak össze a MODIS-képek alapján kiszámítható NDVI értékekből, melynek felszíni felbontása 250 m volt. Az időjárási és egyéb környezeti tényezők kiszűrése érdekében két további, a FORESEE<sup>9</sup> [19] és az ERA5-Land<sup>10</sup> [20] adatbázist is alkalmaztak, melyekből különböző paramétereket használtak fel, és további mennyiségeket származtattak, mint pl. napi maximum-/minimum-hőmérséklet, illetve napi átlagos talajvíztartalom (a 2000 és 2019 közötti időszakra).

Mivel a kártevők tipikusan egy adott fajtát preferálnak, az NDVI alapján mérhető kár az adott faj előfordulási részarányával és a kártevők számával lesz arányos egy adott területen belül. Ezért a szerzők figyelembe vették a vizsgált pixelek esetén a tölgyfák részarányát, amihez a két ország nemzeti felszínborítottsági adatbázisait használták fel.

A szerzők két módszer alkalmazásával azonosították a feltehetően poloskák által „megfertőzött” területeket: az RS módszer (*Remote Sensing*, azaz távérzékelés alapú módszer) csak a távérzékelés alapján kiszámított NDVI értékek idősorának felhasználásával azonosította a fertőzött pixeleket. Ilyen esetben az NDVI értékek erős csökkenése volt tapasztalható egy adott időszakban egy referencia NDVI idősorhoz képest. Az MR módszer (*Model Residual*, azaz modell reziduál alapú módszer) az NDVI értékek vizsgálatánál figyelembe vette egyéb tényezők hatását is, mint pl., hogy mely szakaszában vagyunk a vegetációs időszaknak, illetve a meteorológia és a talajvízszint hatásait is. Ebben az esetben a poloska által okozott károk a késő nyári NDVI értékekben bekövetkezett erőteljes csökkenés formájában jelentkeztek.

A fenti két módszerrel a szerzők két térképet állítottak elő, melyeken nyomon lehet követni a kártevők terjedését (az MR módszerrel létrehozott térképet a 6. ábra mutatja be). A térképeken csak azon pixelek tartalmaznak releváns információt, ahol az erdős területek aránya nagyobb 95%-nál. Az eredmények



6. ÁBRA.  
A tanulmányban [11] bemutatott MR módszer alapján meghatározott tölgy-csipkéspoloska elterjedési térképe. A színek a poloskafaj első megjelenésének évét jelzik (Forrás: A szerző szerkesztése [12] alapján)

alapján a szerzők megállapították, hogy a poloskák terjedését elsősorban a tölgyerdők földrajzi elhelyezkedése határozza meg, és az emberi tevékenység, azon belül elsősorban a főútvonalak közelsége segítette elő.

A következő fejezetben az aktív mikrohullámú távérzékelési alkalmazásokat mutatom be hasonló felépítésben.

### AKTÍV MIKROHULLÁMÚ MŰHOLDAS TÁVÉRZÉKELÉS ALKALMAZÁSAI

A SAR módszerrel elkészített felvételek segítségével lehetséges a felszín elektromágneses-hullámviszaverő képességét becsülni, mely több tényezőtől is függ, de elsősor-

ban a felszín domborzati viszonyaitól. [5] Általában elmondható, hogy minél érdekesebb a felszín, annál jobban képes a radarjeleket visszaverni, ezáltal a SAR felvételen a felszíni formációk és a visszaverő objektumok „fényes” pontként jelennek meg, mely nagyobb visszavert intenzitásértéknek felel meg. A simább felületek tipikusan nem a műhold irányába verik vissza a besugárzott jelet, így „sötét” pixeleket eredményeznek. Az erdők, ahol a jelnek van lehetősége többfajta felületről visszaverődni (levelek, ágak, törzs), szintén fényesebb pixelként jelentkeznek. A felszínen található objektumok és a felszín dielektromos állandója, mely az anyagok elektromágneses térrel való kölcsönhatását

7. ÁBRA.  
Aknaszlatina település elhelyezkedése az ukrán–román határ mentén. [22] A drónfelvétel az Aknaszlatina területén kialakult víznyelőket mutatja (Gönczy Sándor felvétele) [21]

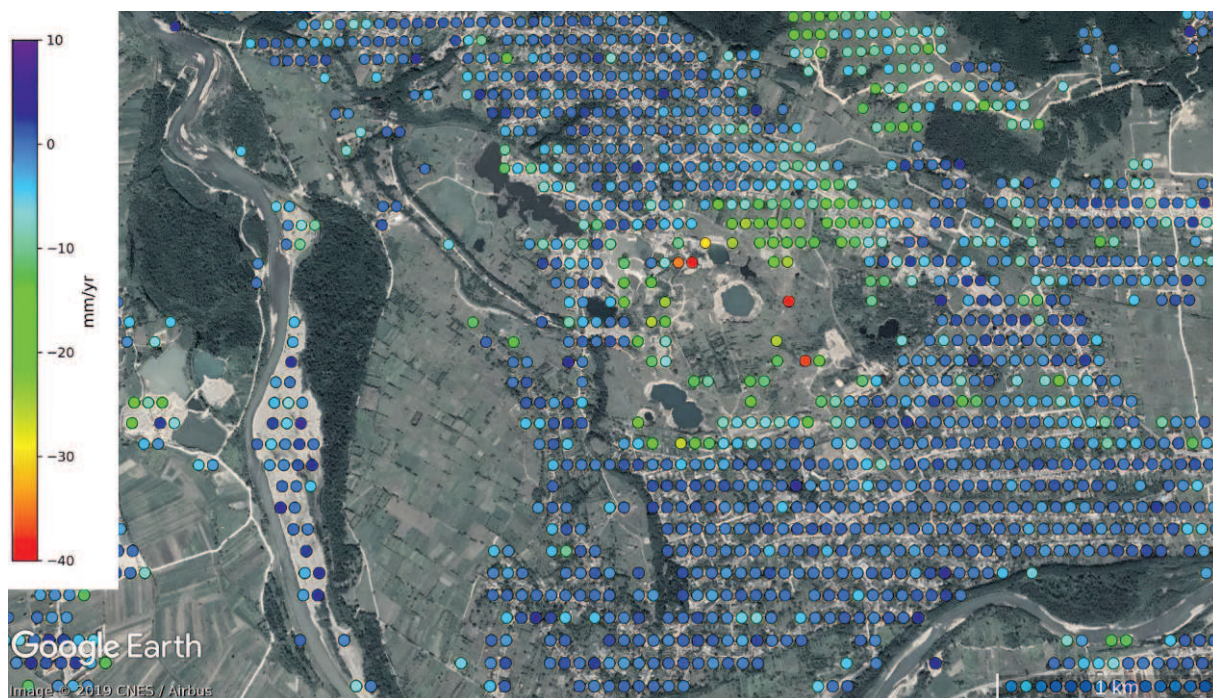


<sup>9</sup> Open Database FOR Climate Change-Related Impact Studies in Central Europe. <https://nimbus.elte.hu/FORESEE/>.

<sup>10</sup> European ReAnalysis, <https://www.ecmwf.int/en/era5-land>.



8. ÁBRA.  
A Sentinel-1 SAR képek  
InSAR feldolgozási  
eredményeiből becsült  
vertikális  
sebességkomponensek  
Aknaszlatina területére,  
mm / év  
mértékegységben [21]



jellemző mennyiség, további meghatározó tényezők, melyeket nagyban befolyásolhat a természetes visszaverő felületek esetén a nedvességtartalom is. A talajban és a növényekben a nagyobb nedvességtartalom nagyobb reflektivitáshoz és ezáltal fényesebb pixelekhez vezet.

A fentiek alapján így a SAR távérzékelésnek egy kézenfekvő alkalmazási területe a talaj nedvességtartalmának monitorozása. A SAR felvételek alkalmazhatók továbbá – az optikai felvételekhez hasonlóan – a felszínborítottság kategorizálására, a mezőgazdaságban és erdészetben, illetve a különböző hatóságok tevékenységének támogatásában is (határok biztosítása, tengeri hajóforgalom megfigyelése, katasztrófák monitorozása). A SAR felvételek felhasználásának nagy előnye, hogy függetlenül a felhőtakaró jelenlététől képes adatokat szolgáltatni egy adott területről, míg a passzív optikai távérzékelés esetén a felhőtakaró jelenléte a felvétel egy részét vagy akár egészét használhatatlanná teheti.

A SAR alapú földmegfigyelés két további területen nyújt többet. A SAR rendszerek sok esetben vertikálisan (V) és / vagy horizontálisan (H) polarizált jelet is képesek kibocsátani és mind a V, mind a H polarizált jeleket

venni. A felszíni szórópontok, felszínnek más-más módon képesek a V és H polarizált jeleket visszaverni. Bizonyos objektumok erősebben verik vissza a V polarizált jelet, mint a H-t, és fordítva, vagy akár konvertálni is tudnak a két polarizáció között. Ezt fel lehet használni pl. a felszínborítottság kategorizálására, az erdei biomassa megbecslésére, tengeri olajfoltok detektálására és követésére.

A SAR felvételek azonban nem csak a visszavert amplitúdóról tartalmaznak információt, hanem a visszavert jel fázisát is tartalmazzák. A fázis elsősorban a műhold és a felszíni szóróobjektum távolságának a függvénye. Több SAR felvétel felhasználásával le lehet követni a fázisban bekövetkezett változások idősorát, mely a SAR felvételekből képzett ún. interferogramok generálásával lehetséges. Egy interferogram, a visszavert intenzitáson túl, mely az amplitúdó négyzete, két SAR felvétel fáziskülönbségét is tartalmazza. Az interferogramok sorozatának feldolgozásával a felszíni szóróobjektumok elmozdulásának és a felszínben bekövetkezett változásoknak a műholdirány<sup>11</sup> komponensét lehetséges végigkövetni. A leírt feldolgozási lépéseket megvalósító módszereket gyűjtőnéven (műholdas) radar-interferometriának vagy rö-

viden InSAR-nak (Interferometrikus SAR) szokás nevezni.

Az InSAR-nak számos alkalmazási területe létezik: természeti katasztrófák (földrengés, földcsuszamlás, vulkánkitörések) megfigyelése, kritikus infrastruktúrák (gátak, erőművek) stabilitásának monitorozása, gleccserek mozgásának megfigyelése.

Az említett SAR alkalmazások közül az InSAR alkalmazására mutatunk be egy példát egy tanulmány ismertetésén keresztül, melynek jelen cikk szerzője is társszerzője volt.

A tanulmányban [21] a szerzők Aknaszlatina (ukrán megnevezése **Солотвино** – Szolotvino) település (Kárpátalja, Ukrajna) (7. ábra) területét lefedő Sentinel-1 SAR felvételek felhasználásával, InSAR módszerek alkalmazásával végeztek el felszíni mozgásvizsgálatot.

A földtörténet során a Kárpát-Pannon régióban nagy mennyiségű só halmozódott fel mind a Kárpátok vonulatán belül, az Erdélyi-medencében, mind a Kárpátok vonulatán kívül. Az Erdélyi-medencében néhány 10 méteres vastagságú sórétegek rakódtak le, melyeket későbbi kéregmozgások ún. só-diapírokká (sódómókká) gyűrtek. A felszínközeli sórétegeket sok településen bányászták a Keleti- és a Déli-Kárpátok mentén a

<sup>11</sup> A műholdirány a műholdat és az adott pixelhez tartozó felszíni elemet összekötő egyenes iránya. (Line-of-Sight – LOS).

mai Ukrajna és Románia területén, az egyik ilyen település az Ukrajnában található Aknaszlatina. Ugyan mára már számos helyen beszüntették a sóbányászatot, sok felhagyott bánya a mai napig komoly kockázatot jelent a helyi infrastruktúrára és a lakott területek biztonságára nézve. Az édesvíznek a felhagyott bányaüregekbe és a talajba történő beszivárgása során a víz kioldja a banyaüregek környezetében a talaj sótartalmát, destabilizálva a banyaüreget, mely a banya beomlásához vezethet. Aknaszlatina területén összesen 10 banya működött, ezek közül a 8-as és a 9-es banya üzemelt a leghosszabb ideig. Aknaszlatinán több banyaüreg beomlása vezetett dolinák és víznyelők kialakulásához, melyek átmérője elérte a 150–230 m-t is. (7. ábra, drónfelvétel)

A szerzők az InSAR módszer alkalmazásával végeztek vizsgálatot annak érdekében, hogy feltárjanak felszíni elmozdulásokat, amelyek esetleg további felszín alatti folyamatokhoz köthetők. A szerzők négy évet felölelő (2014–2019) Sentinel-1 felszálló- és leszálló-irányú SAR képet dolgoztak fel InSAR módszerrel. A módszer alkalmazása során korrigálták az at-

moszférikus hatásokat, melyek befolyásolják a korábban említett interferogramok fázisértékeit. A feldolgozás során olyan pixeleket választottak ki, melyek elmozdulásait nagy megbízhatósággal volt képes meghatározni az alkalmazott InSAR módszer.

A módszer eredményeképpen előálltak a felszíni műholdirányú (LOS) elmozdulások idősorai a kiválasztott pixelek esetén, mind felszálló-, mind leszállóirányban. Az elmozdulási idősorok segítségével meg lehetett becsülni az elmozdulási sebességeket is. Ezután a szerzők – ismerve a műholdak felvételezési geometriáját – megbecsülték a felszálló- és leszállóirányú sebességek alapján a lokális koordinátarendszerben értelmezett elmozdulási sebességek kelet-nyugati és vertikális komponensét. A kelet-nyugati összetevők értékei nem utaltak markáns elmozdulásokra, azonban a vertikális komponensekben (8. ábra) határozott mintázat rajzolódott ki.

A 8. ábrán bemutatott vertikális sebességkomponensek egyértelműen azt mutatják, hogy a kialakult víznyelők körül továbbra is detektálható felszínmozgás, mely arra enged következtetni, hogy a víznyelők ki-

alakulásával nem értek véget a felszíninformáló folyamatok. Fontos megjegyezni azonban, hogy a beomlások körüli terület nem minden pontján sikerült sebességeket meghatározni, így a mozgások térbeli értelemben „alulmintavételezettek” lehetnek.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben röviden bemutattam a Föld körül keringő műholdak felépítését, kitérve a Copernicus földmegfigyelő program két műholdtípusára, a Sentinel-1 és Sentinel-2 műholdakra. Ezután ismertettem az optikai és az aktív mikrohullámú távérzékelés alkalmazási területeit, a műholdképek lehetséges felhasználásának módszerét egy-egy konkrét tanulmányon keresztül bemutatva. A példák alapján talán sikerült az olvasók számára is kézzelfoghatóbbá tenni a műholdas földmegfigyelés területét és demonstrálni alkalmazásának hasznosságát. Ezek után talán nem nehéz elképzelni, hogy ennek a területnek a katonai felderítésben is igen komoly szerepe van, illetve lehet a jövőben. Terveim szerint a cikksorozat következő részében már kifejezetten ezt a területet fogom körbejárni. ■

## HIVATKOZÁSOK

- [1] „S2 Mission” <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-mission> (Letöltve: 2024.10.1.);
- [2] „Sentinel-2C delivers stunning first images.” [https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Sentinel-2C\\_delivers\\_stunning\\_first\\_images](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Sentinel-2C_delivers_stunning_first_images) (Letöltve: 2024.10.2.);
- [3] „MSI Instrument – Sentinel-2 MSI Technical Guide – Sentinel Online – Sentinel” Online. <https://doi.org/10.1080/14432471.2024.2395033> (Letöltve: 2024.10.2.);
- [4] „Lake Balaton in western Hungary” [www.earth.com/image/lake-balaton-in-western-hungary](http://www.earth.com/image/lake-balaton-in-western-hungary) (Letöltve: 2024.10.1.);
- [5] „S1 Mission” <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-mission> (Letöltve: 2024.10.1.);
- [6] A kép forrása: [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Operations/Dressed\\_to\\_thrill](https://www.esa.int/Enabling_Support/Operations/Dressed_to_thrill) (Letöltve: 2024.10.1.);
- [7] „S1 Applications” <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-applications> (Letöltve: 2024.10.2.);
- [8] „CORINE Land Cover” <https://land.copernicus.eu/en/products/corine-land-cover> (Letöltve: 2024.10.1.);
- [9] „Home: Corine Land Cover classes” <https://land.copernicus.eu/content/corine-land-cover-nomenclature-guidelines/html> (Letöltve: 2024.10.1.);
- [10] „CORINE Land Cover - Hungary” [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/corine-land-cover-2000-by-country-1/clc00\\_hu\\_national.eps](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/corine-land-cover-2000-by-country-1/clc00_hu_national.eps) (Letöltve: 2024.10.1.);
- [11] „CORINE Land Cover Classes” [https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/corine-land-cover-2006-by-country/legend/image\\_large](https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/corine-land-cover-2006-by-country/legend/image_large) (Letöltve: 2024.11.4.);
- [12] Kern Anikó, et al. „Detecting the oak lace bug infestation in oak forests using MODIS and meteorological data” *Agric. For. Meteorol.*, vol. 306, 15 Aug. 2021, p. 108436, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108436>;
- [13] Barber, Nicholas A. „Light environment and leaf characteristics affect distribution of *Corythucha arcuata* (Hemiptera: Tingidae)” *Environmental Entomology* 39.2 (2010) pp. 492–497. <https://doi.org/10.1603/EN09065>;
- [14] „Terra | The EOS Flagship” <https://terra.nasa.gov> (Letöltve: 2024.10.2.);
- [15] „Aqua Earth-Observing Satellite Mission | Aqua Project Science” <https://aqua.nasa.gov> (Letöltve: 2024.10.2.);
- [16] „MODIS | Terra” <https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/modis> (Letöltve: 2024.10.1.);
- [17] Csóka György, et al. „Spread and potential host range of the invasive oak lace bug [*Corythucha arcuata* (Say, 1832) – Heteroptera: Tingidae] in Eurasia” *Agricultural and forest entomology* 22.1 (2020) pp. 61–74. <https://doi.org/10.1111/afe.12362>;
- [18] „NDVI – Normalizált Vegetációs Index” [https://www.met.hu/ismertetek/NDVI\\_ismerteto.pdf](https://www.met.hu/ismertetek/NDVI_ismerteto.pdf) (Letöltve: 2024.10.1.);
- [19] Dobor, L., et al. „Bridging the gap between climate models and impact studies: The FORESEE Database” *Geoscience Data Journal* 2.1 (2015) pp. 1–11. <https://doi.org/10.1002/gdj3.22>;
- [20] Balsamo, G., Beljaars, A., Scipal, K., Viterbo, P., van den Hurk, B., Hirschi, M., Betts, A. K. (2009). *A Revised Hydrology for the ECMWF Model: Verification from Field Site to Terrestrial Water Storage and Impact in the Integrated Forecast System*. *J. Hydrometeorol.* 10(3), pp. 623–643. <https://doi.org/10.1175/2008JHM1068.1>;
- [21] Szűcs Eszter, et al. „Evolution of surface deformation related to salt extraction-caused sinkholes in Solotvyno (Ukraine) revealed by Sentinel-1 radar interferometry” *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions* 2020 (2020) pp. 1–25. <https://doi.org/10.5194/nhess-2020-84-supplement>;
- [22] Copyright and License <https://www.openstreetmap.org/copyright>;
- [23] A kép forrása: [https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Images/2014/01/Sentinel-1\\_radar\\_vision](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2014/01/Sentinel-1_radar_vision) (Letöltve: 2024.10.1.).