

A felszínhőmérséklet változása Magyarországon 1km-es MODIS adatok alapján 2001 és 2025 között

Báder László, Szilágyi József, Józsa János
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízgazdálkodási és Vízépítési Tanszék, laszlo.bader@edu.bme.hu

DOI:10.56474/legkor.2026.3.3

A Meteorológiai Világszervezet az alapvető éghajlati mutatók között tartja számon a felszínhőmérsékletet. A távérzékelés fejlődésével a Föld teljes felszínén rendszeressé vált a felszínhőmérséklet mérése. A MODIS műszerekkel felszerelt Terra műhold adatai alapján Magyarországon a felszínhőmérséklet sokéves átlaga 2001 és 2025 között 16,31 °C fok volt, amely 1,5 °C fokot emelkedett az időszakban, trendje szignifikáns: 0,63 ±0,15 °C/évtized (p=0,011). Júliusban 2,2 °C, augusztusban 2,14 °C, szeptemberben 1,66 °C volt a felszín melegedése. Ugyanebben az időszakban a levegő éves átlaghőmérsékletének emelkedése 0,65 °C/évtized volt (p=0,003) HungaroMet adatok alapján. Az eredmények ingyenesen elérhetők (figshare.com), segíthetnek a felszínborítás és területhasználat elemzésében és annak meghatározásában is, hogy milyen formában célszerű rendszeresíteni a felszínhőmérséklet adatok közlését.

Land surface temperature changes in Hungary from 1km MODIS data between 2001 and 2025

The World Meteorological Organization defines land surface temperature to be one of the essential climate variables. The latest developments in remote sensing allow for the systematic measurement of land surface temperature (LST) over the entire surface of the Earth. Measurements from the Terra satellite equipped with MODIS instruments, show, that the long-term (2001-2025) average land surface temperature of Hungary was 16.31 °C which has increased by 1.5 °C in this period with trend 0,63 ±0,15 °C/decade, p=0,011. MODIS LST warming was 2.2 °C in July, 2.14 °C in August, and 1.66 °C in September. During the same period air temperature has increased with trend 0,65 °C/decade, p=0,003, based on data from HungaroMet. Annual and monthly land surface temperature maps are available free of charge (figshare.com), providing support for further analysis of land use and land cover.

Az energiamegmaradás törvénye értelmében a Föld felszínét éves és napi ritmusban érő nettó sugárzás hat a felszínre, tárolódik vagy más formában távozik el a felszínről. A folyamatokat a felszíni energiamérleg összetevőinek dinamikus egyensúlya jellemzi (*Bastiaanssen et al*. 1998; *Péczely*, 1998). A légkörzés és vízkörzés ennek a rendszernek az elválaszthatatlan alrendszerét képezik. A bemeneti oldalon a felszíni folyamatok vizsgálatakor a felszínen rendelkezésre álló nettó sugárzáson kívüli természetes folyamatok energiái (radioaktivitás, földhő stb.) elhanyagolhatók, a 173 000 TW-hoz képest a 47 TW mindössze 0,03%-ot jelent (*Davies* and *Davies*, 2010; *Ellison et al*., 2024). Éves szinten a talaj hőáram kiegyenlítődik

és más kisebb tagokkal együtt elhanyagolható. A szárazföldi életfeltételek kialakításában és szabályozásában, a léghőmérséklet élhető tartományban tartásában a Duna vízgyűjtő területén is jelentős szerepet játszik a párolgás (*Eiseltová et al*., 2012; *Báder* 2025; *Báder*, 2026).

Figyelmeztető jel, hogy a szárazföldeken a globális átlagnál nagyobb és gyorsabb ütemben emelkedik a levegő hőmérséklete (*IPCC*, 2019). A melegebb levegő növeli a párolgási igényt, és ahol ezt a vízellátás nem képes biztosítani, ott még jobban melegszik a felszín, még tovább növeli a párolgási igényt, csökkenti a talajnedvességet és bizonyos körülmények között hátráltatja a felhőképződést (*Orth*, 2021). Mindez pozitív visszacsatolást jelent a felszíni folyamatokban. A globális felmelegedés vizsgálatakor (amelyet szárazföldön elsősorban a levegő felmelegedésével jellemzünk) tehát a szárazföldek felszínhőmérséklet-változásának hatását nagyobb hangsúllyal kell kezelni.

A Meteorológiai Világszervezet 2016-ban felülvizsgálta a globális éghajlat megfigyelő rendszerrel (Global Climate Observing System, GCOS) szemben támasztott követelményeket. A meghatározó éghajlati változók szárazföldi paramétereinek csoportjában (Essential Climate Variables, ECV) a felszínhőmérséklet is megjelenik (Land Surface Temperature, LST). A nemzetközi munkacsoport jelentése megerősíti, hogy az éghajlati rendszer működésének jobb megértéséhez a hagyományosnak mondható változók körét ki kell bővíteni (WMO, 2016). A műholdas távérzékelés lehetővé teszi a rendszeres méréseket és az adatok közzétételét, amelyet az éghajlati rendszer változásainak felismerése, azok esetleges befolyásolásának lehetősége is sürget (*Loriani et al*., 2025).

A felszínhőmérséklet MODIS LST távérzékeléssel mért adatai és az ERA5-Land „Skin Temperature" (SKT) reanalízis adatai hasonló értékeket és emelkedő tendenciát mutatnak a 2001-2020 időszakra: 0,26-0,34 °C/évtized a szárazföldek átlagában és 0,62-0,63 °C/évtized Európában (*Wang et al*., 2022). Az antropogén eredetű üvegházhatású gázok okozta pozitív sugárzási kényszer mellett a felszínhőmérséklet emelkedéséhez hozzájárulhatnak a felszínen, a tájhasználatban bekövetkezett változások is (több a burkolt felület, több az épület, megnőtt az energiát elnyelő felület). Az ERA5-Land sugárzás adatainak vizsgálata megerősíti, hogy Magyarországon a nettó rövidhullámú sugárzási energia éves mennyisége 1981és 2020 között, 40 év alatt mintegy 200 MJ/m^2-el nőtt. Ez a többlet rövidhullámú sugárzási energia párolgási vízegyenértékre átszámítva mintegy 80 mm, azaz 2 mm-nyi éves növekménynek felel meg 40 év alatt (*Báder* és *Szilágyi*, 2023). A nettó hosszúhullámú sugárzás közben alig változott. A felszíni energiamérlegben ez a többlet a látens hő, illetve a szenzibilis hő értékére is kihat.

Felmerül a kérdés, hogy miért növekedett Magyarországon az ERA5-Land adatok alapján kimutatott nettó rövidhullámú sugárzási energia mennyisége? Az üveghatású gázokkal foglalkozó kutatások mellett figyelemet érdemelnek az energiamérleggel és a felszínhőmérséklet változásaival kapcsolatos egyébb összefüggések is. A légkör tetejét érő energia mennyisége közel állandó, amelynek egy része – a világűr felé visszavert rövidhullámú sugárzás – nem vesz részt a felszíni és légköri energiacserélő folyamatokban. Ez a planetáris albedó csökkenő trendet mutat az ezredforduló óta, amelynek oka elsősorban a felhő-albedó csökkenése. A Föld felszíne így több rövidhullámú energiát nyel el, ami hozzájárulhat annak melegedéséhez (*Nikolov* and *Zeller*, 2024). Megerősítik a műholdak által mért adatok kiértékelésének eredményét a Földnek a Holdról visszaverődő fényét mérő vizsgálatok. A planetáris albedó csökkenésének az energiamérlegre gyakorolt hatását a Big Bear "Földfény" program 1998-2017 közötti mérései alapján 0,5 W/m^2-re becsülik (*Goode et al*., 2021).

A Föld felszíni folyamatainak megfigyelésére egyedülálló lehetőség, hogy két MODIS műszereket hordozó műhold (a Terra és az Aqua) folyamatos működésének köszönhetően az egész bolygót lefedő több mint 26 éves távérzékelési adatsor áll rendelkezésünkre. A NASA 1999. december 18-án bocsátotta fel a Föld Megfigyelő Rendszer (Earth Observing System, EOS) részét képviselő Terra műholdat, fedélzetén a MODIS szenzorokkal (MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, közepes felbontású képalkotó spektroradiométer). A műhold 36 mérési sávban készít felvételeket, háromféle felbontásban: 250 m (1-2. frekvenciasáv), 500 m (3-7. frekvenciasáv), illetve 1000 m (8-36. frekvenciasáv). Később, 2002. május 4-én állították pályára a hasonló műszerezettségű Aqua műholdat. A műholdak a tervezett működési idejük alatt napszinkron pályán keringtek 705 km magasságban, keringési idejük 98,8 perc, a pálya dőlésszöge 98,2°. Nappal a Terra leszálló pályán északról délre 10:30 kor, az Aqua felszálló pályán, délről északra 13:30-kor halad át az egyenlítőn, éjszaka pedig 22:30-kor, illetve 01:30-kor. Összesen tehát egy napra maximálisan 4 mérés érhető el egy pontban. Magyarország felett a műholdak naponta kétszer haladnak át és készítenek felvételeket egy 2330 km széles sávban. Az egész Földet lefedő felvételek adatai egy

36x18 méretű rácshálózatban kerülnek eltárolásra, amelynek minden rácspontjához egy 1200x1200 pontból álló csempe tartozik (1 km-es felbontás esetén). Magyarország adatai a h19v04 jelű csempén találhatók. A műholdak által készített felvételeket NASA szakértő csoportok (földfelszín, óceán, atmoszféra és kalibrációs csoport) dolgozzák fel és a mért adatokból állítják elő a különböző „termékeket". Minden „termék" – a továbbiakban produktum – több mérési sáv azonos időben készült adatait és más M*D produktumok eredményét is felhasználhatja (A M*D jelölés a Terra /MOD/ és Aqua /MYD/ műholdra egyszerre utal.).

A Föld felszínét elemző csoport állítja elő a M*D11 jelzésű felszínhőmérséklet és emisszivitás adatokat (*Wan et. al*, 2021). Elérhető és letölthető az „Algoritmus Elméleti Alapdokumentum" (Algorithm Theoretical Basis Document, ATBD), amely a változók kiszámításának fizikai alapjait és módszertanát írja le (*Wan* and *Li*, 1997; *MODIS ATBD*, 1999). A felszínhőmérséklet számítása a távérzékelésben elterjedt „split window" (osztott ablak) módszer alapján történik. Az algoritmus azon alapszik, hogy két egymáshoz közeli infravörös hullámhosszon a műszerek a légköri gázok különböző sugárzáselnyelését érzékelik. A felszín hőmérséklete a Planck-függvény segítségével a csatornák valamilyen lineáris kombinációjaként becsülhető meg néhány további paraméter segítségével. A M*D11 produktumoknak jelenleg a MODIS Collection 6.1 verziója érhető el, amely az eredeti mért műholdas alapadatok finomított, újraszámított változata [**1**]. A módosítások a bemenő alapadatok javítása és szűrése alapján készültek (például vízfelületek, felhőborítottság maszkja) az összegyűlt visszajelzések és tapasztalatok alapján. A validációk szerint a tipikus LST pontosság ±1 °C, de inhomogén területek esetén elérheti a ±2–3 °C-ot (*Wan*, 2014). A M*D11 produktum részletes leírását a felhasználói kézikönyv tartalmazza (*MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide*, 2014). A továbbiakban „felszínhőmérséklet adat" kifejezést olyan értelemben használjuk, hogy az az algoritmus szerint kiszámolt eredményt jelenti (nem műszerrel közvetlenül mért adatot).

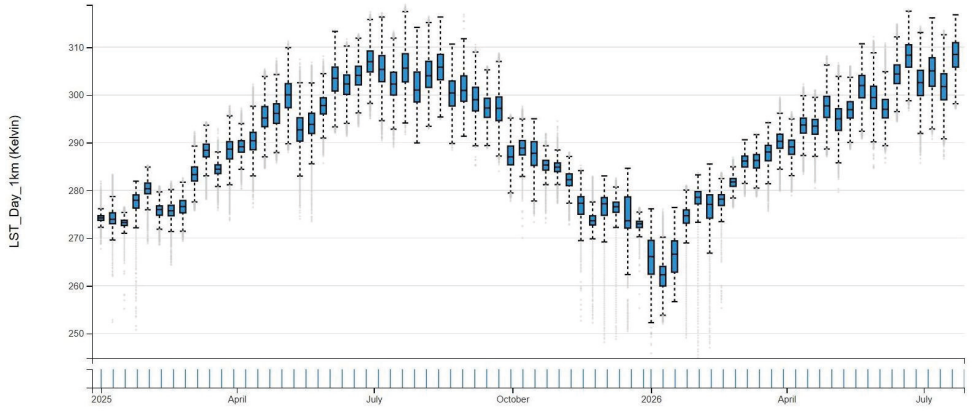
A MODIS felszínhőmérséklet a kutatásokban az egyik leggyakrabban használt adat/változó. Előnye, hogy átmenetet képez a nagyobb térbeli felbontású, időben ritkábban készülő, és a kisebb felbontású, de időben gyakoribb műholdas adatok között (*Phan* and *Kappas*, 2018). Az adatok 2000-től 2025-ig több feldolgozási szinten érhetők el, a M*D11 családon belül külön jelöléssel rendelkeznek, és számos alkalmazási lehetőséget jelentenek. Jelen tanulmányban a MOD11A2 adatait használjuk, amely térbeli felbontásban a legjobb (1 km, egész pontosan 926,6 m), időbeli felbontása pedig még személyi számítógépen kezelhető mennyiségű – mintegy 60 GB – adatot jelent. A MOD11A2 a Terra műhold délelőtti 10:30-as átvonulásának a MOD11A1 produktum adataiból készült nyolc napos felszínhőmérséklet átlagértékét adja meg. A felszínhőmérséklet műholdas méréséhez tiszta égbolt szükséges. A MOD11A1/MYD11A1 1 km-es felbontású produktumok napi adatainak vizsgálata szerint a Közép-Európát lefedő 4 csempe esetén (h18v03, h18v04, h19v03, h19v04) felhőborítottság miatt az adatok átlagosan 61,4%-a hiányzik (*Metz et al*., 2017). A délelőtti átvonulás esetén az adathiány kisebb, 58,3%, a délutáni átvonulás esetén nagyobb, 64,1%. A délelőtti Terra műhold átvonulásakor 5,8%-kal több a felhőtlen cella, mint a délutáni Aqua műhold esetében, ezért használjuk a jelen munkában a MOD11A2 adatait. A hivatkozott tanulmányban a 2003-2016-as időszakban készült 20456 db csempe adatmennyisége 384 GB, amelyben a szerzőknek a hiányzó adatok 68%-át sikerült szűréssel és interpolációs eljárásokkal pótolni. A MOD11A2 esetében ezt a jelentős ráfordítást igénylő pótlást a 8 napos átlagolás miatt nem kell elvégezni, mint a MOD11A1-nél. A MOD11A2 produktum 1 km-es felszínhőmérsékleti adatait ezért már több alkalommal felhasználtuk a párolgás komplementáris módszerével, meteorológiai adatok alapján készült 10 km-es felbontású magyarországi párolgástérképek leskálázásához (*Szilágyi* és *Kovács*, 2011; *Báder* és *Szilágyi*, 2023; *Szilágyi et al*., 2025).

Jelen tanulmány célja, hogy bemutassa a 25 éves MODIS LST adatsorát Magyarországra, a 2001-2025 időszak alatt az éves felszínhőmérsékletben kimutatható változásokat, és ösztönözze a klímaváltozás kutatásában az ok-okozat kapcsolatok vizsgálatát. Az adatok értékelése további kutatást igényel (felszínborítás szerinti szegmentálás, helyi tematikus elemzések, trendek, korrelációk elemzése stb.).

Anyag és módszer

A MODIS felszínhőmérséklet adatok letöltése

A MODIS műholdak adatai a NASA és az USGS internetes oldalain regisztrálás után ingyenesen hozzáférhetők. A munkában a MOD11A2 produktum 2000-2025 időszakára elérhető, a Terra műhold nyolcnapos átlagait tartalmazó h19v04 csempéjének LST_day_1 km adatait használtuk fel, a továbbiakban MODIS LST néven



1. ábra. A MOD11A2 termék felszínhőmérséklet adatai 2025-ben Magyarországra, Kelvin fokban. Minden dobozdiagram a rácspontok napi LST_Day_1km felszínhőmérséklet adataiból képzett nyolc napos átlag eloszlását mutatja be. Az AppEERS alkalmazással, WGS84 shape állománnyal kijelölt területre készült.

hivatkozva. Egy év adatai 46 adatállományt jelentenek, amelyek egész szám formátumban, szinuszoidális koordináta rendszerben vannak megadva. 2023-ig az adatokat a [**1**] oldalról, regisztrálás és a termék kiválasztása után elérhető ftp tárhelyről töltöttük le HDF formátumban. A 2024 utáni adatok már a NASA által a távérzékelési adatok használatának megkönnyítésére fejlesztett új felhasználói felületről lettek letöltve, de az egységes feldolgozás érdekében az ftp oldallal megegyező adatformátumban. Az elemzésre kész minták kinyerésére készült alkalmazás (Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples, AppEERS) sokkal kényelmesebbé és gyorsabbá teszi az adatok letöltését és 2024 októberétől a korábbi Earth Science Data Systems (ESDS) Program valamennyi szolgáltatását fokozatosan átveszi (*AppEEARS Team*, 2026). Az AppEERS alkalmazás nagy előnye, hogy olyan sokszöggel körülhatárolt, vagy vektoros állománnyal megadott terület adatait is egy lépésben le lehet tölteni, amelyek több csempén találhatóak. A NASA szárazföldi folyamatok adatait kezelő archívum katalógusa alapján több más műhold adatai is elérhetőek többféle formátumban: Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC) [**2**] .

Módszer

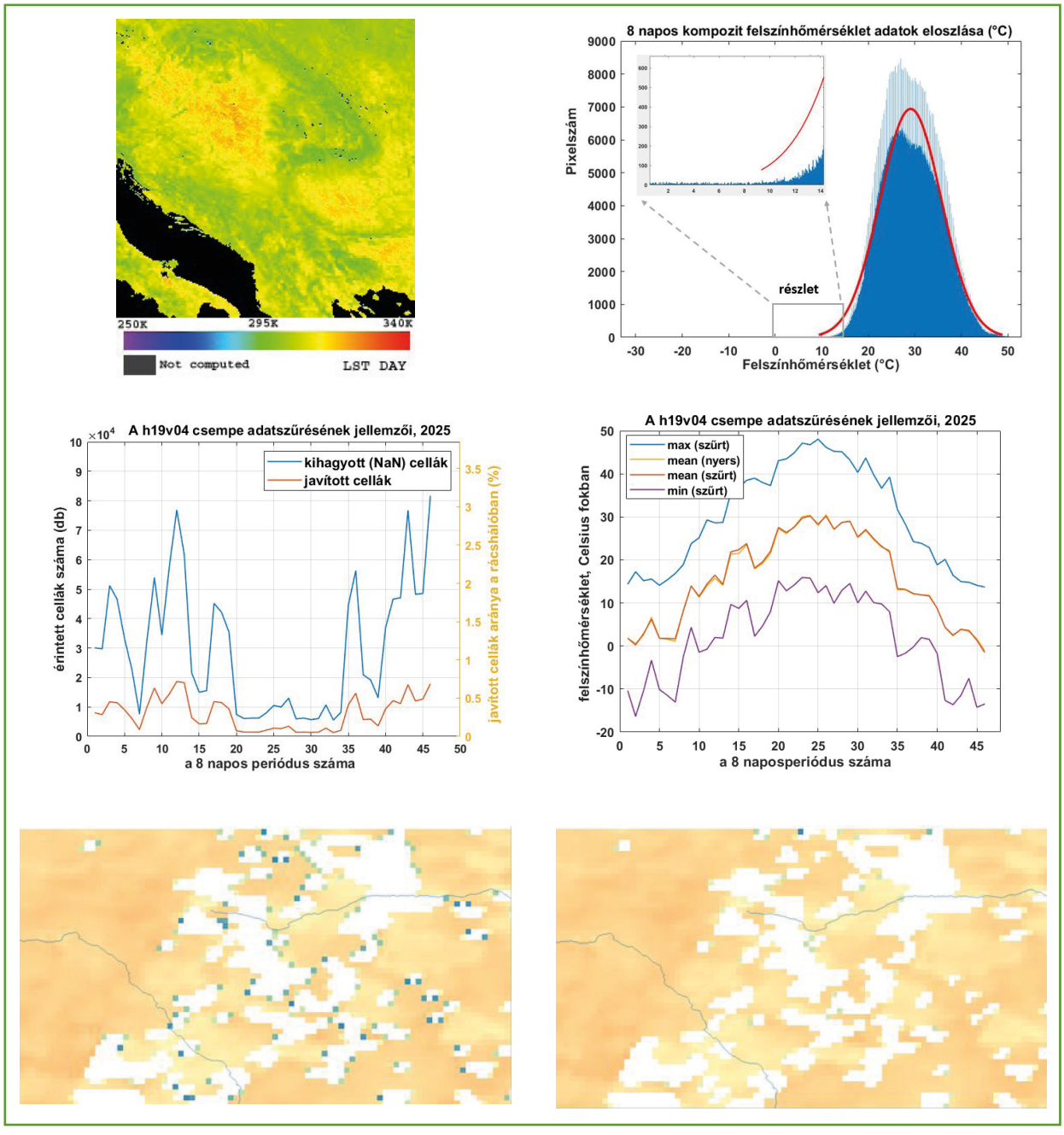
Az adatszerkezet és a feldolgozás főbb lépései jól áttekinthetők az AppEERS alkalmazással letöltött adatok bemutatásával (*1. ábra*). A MOD11A2 a Terra műhold délelőtt 10:30-as átvonulásainak napi MOD11A1 adataiból, a 8 napos periódusok felhőtlen napjainak átlagaiból készült pixelenként, ezért jóval kevesebb hiányzó adatot tartalmaz, mint az egyes napok adatai. Abban a rácspontban ahol nincs legalább két átlagoláshoz felhasználható felhőtlen nap, ott nincs adat. Az átlagolás után a kompozit MOD11A2 még tartalmaz olyan adatot, ahol a nem egyértelműen felhős cellák befolyásolhatják az eredményt. A MODIS LST adatokkal együtt letölthető QC (adatminőség) adatok szerint a nyári félévben a pixelek 0-1,5%, a téli időszakban ennél nagyobb arányban is további vizsgálatot igényelhetnek felhasználás előtt.

A felszínhőmérséklet térképek elkészítése 26 évre, 2000-től 2025-ig minden évre és minden hónapra a következő lépésekből állt:

1. A h19v04 csempe adatainak letöltése (szinuszoidális vetület, HDF formátumban)
2. Vetületváltás WGS84-re HEG konverter segítségével (HDF-EOS to GeoTIFF, HEG), [**3**].
3. Értelmezési tartomány szerinti lehatárolás
4. Számábrázolás változtatása, Kelvinre majd Celsius fokra váltás, tisztítás
5. A csempék 8 napos kompozit adataiból havi adatok készítése

Egy csempe nyers felszínhőmérséklet adatairól ad áttekintést az LP DAAC felületről letöltött jpg ikon (*2a. ábra*). A vetület megváltoztatását követő lépésben a -33 °C foknál kisebb értékeket „nincs adat” értékre állítottuk az „Algoritmus Elméleti Alapdokumentum” ajánlása alapján (felhős cellában a műhold a felhőtető hidegebb hőmérsékletét méri, nem a felszínét, így az kihagyandó).

A lehatárolás után még mindig maradhatnak olyan fátyolfelhővel, ködfolttal befolyásolt, zajos cellaértékek az adatok között, amelyet nem sikerült eddig egyértelműen kiszűrni. Ezek azonosítására megvizsgáltuk az adatok Gauss eloszlását a csempe minden 8 napos periódusa esetében. A 3-szigma



2. ábra. A MOD11A2 termék h19v04 csempe felszínhőmérséklet adatainak szűrése és javítása a 2022-ben, júliusban készült 25. csempe példáján. a) Az LP DAAC oldalról letöltött csempe ikonja szinuszoid koordináta rendszerben, Kelvin fokban. A sötétebb foltok jelzik a kiugró értékeket. b) Egy júniusi csempe értékeinek eloszlása (részlet). A piros Gauss görbe alatti értékek megtartva, a kisebb valószínűségű feltehetően szennyezettek (függőleges tengely: gyakoriság, vízszintes tengely: Celsius fok). c) Az eloszlás alapján javított cellák és a hiányzó vagy határértéken aluli értékek aránya 2025 csempéin. d) A csempék javítás utáni legkisebb-, közép-, és legnagyobb értékei; a javítások hatása a csempékre. e) Javítás előtti csempén kék és zöld színnel látszanak a vélhetően felhősültséggel érintett kiugró adatok. f) Javítás után a kiugró értékek a környező értelmezhető rácspontok adataira, vagy „nincs adat" értékre vannak cserélve (kivéve a csempe szélső adatsorait).

értékeknél kisebb gyakoriságú cellák értékét statisztikailag kiugró értéknek tekintettük, amelyet feltételezhetően a teljesen tiszta égbolt hiánya okoz, és az érték javításra szorul (*2b. ábra*). A példa szerinti 2022-ben a 25. csempe adataiban (a július 12-19. közötti 8 napos periódusban) a felszínhőmérséklet adatainak egy kis hányada a csempére meghatározott 9,34 °C határérték alá esik, amelyeket zajos értékeknek tekinthetünk. Minden csempe esetében más a kiszámolt határérték, januárban például -14,94 °C volt az év 3. csempéjének a január 17-24. közötti határértéke. A kiugró értékek javításához a szomszédos cellák értékét vizsgáltuk meg, és azoknak az átlagával javítottuk az értéket. Ahol a szomszédos cellák között sem volt határérték feletti felszínhőmérséklet, akkor „nincs adat" értéket állítottunk be. A javítható cellák aránya kb. 0,5% volt, az így sem javítható cellák aránya nyáron kb. 1,5%-nak, más időszakokban 3-8%-nak adódott (*2c. ábra*). A fenti algoritmussal javított felszínhőmérséklet adatok csempénkénti átlagain és a felszínhőmérséklet éves lefutásán a javítás nem okoz számottevő változást, a nyers és szűrt adatok középértéke alig különbözik (*2d. ábra*). A térképes megjelenítésen a kiugró értékek foltjai jól látszanak (*2e. ábra*), de tisztítás után számuk lecsökkent, és csak az egyértelműen felhősnek minősített cellák „nincs adat" értéke látható fehér foltként (*2f. ábra*).

A Kárpát-medencét magába foglaló h19v04 csempe letöltött 8 napos kompozit adatainak feldolgozása után az évi 46 db adatállományból készültek az éves átlagok, valamint (a hónapra eső három vagy négy kompozit adatsor átlagolásával) a havi átlagok, majd azokból a trendelemzések. A bemutatott eredmények ábrázolása MATLAB-ban történt, de a térképek közvetlen GIS rendszerben felhasználható formában és jpg formában is elkészültek.

Eredmények

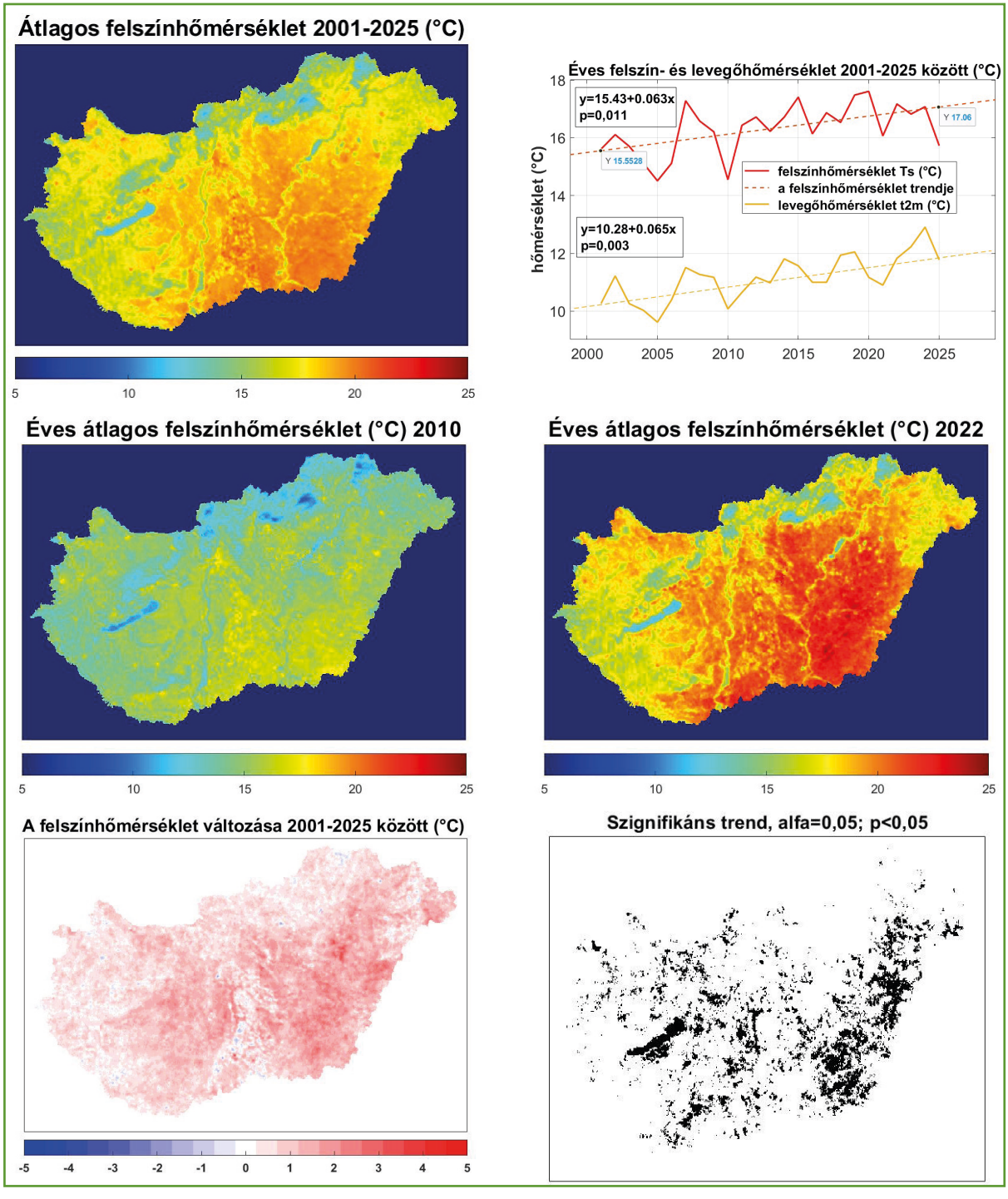
Magyarország felszínhőmérsékletének éves adatai a 2001-2025 időszakban

A felszínhőmérséklet sokéves átlaga Magyarországon a 2001-2025 években 16,31 °C volt, amelynek a térbeli eloszlását az 1 km-es felbontású térkép mutatja be (*3a. ábra*). Az évenkénti országos átlagok alapján számítottuk a trendet (*3b. ábra*). A 2000. évben még nem volt januárra adat, ezért az éves összesítés 2001-től kezdődik. A 25 éves időszak alatt 1,5 °C-kal nőtt a felszínhőmérséklet Magyarországon, trendje 0,63±0,15 °C/évtized. A Mann-Kendall teszt alapján végzett trendelemzésben választott szignifikanciaszintnél ($\alpha = 0,05$) a számolt p-érték kisebb ($p = 0,011$), ezért a felszínhőmérséklet éves átlagának változása nem tekinthető véletlen ingadozásnak, szignifikáns növekedést jelent. A csapadékos, és 2005 után a leghidegebb 2010-es év, valamint a melegebb, aszályos 2022-as év átlagos felszínhőmérsékletének térképein az egyes évek közötti eltérések jól láthatók (*3c., 3d. ábra*). A vizsgált időszakban bekövetkezett változásokat rácspontonként is megvizsgáltuk, amelynek eredménye alapján az ország területének nagy részén növekedett a felszínhőmérséklet (*3e. ábra*). A változások statisztikai vizsgálata szerinti szignifikáns növekedés az ország délkeleti részén a leggyakoribb (*3f. ábra*).

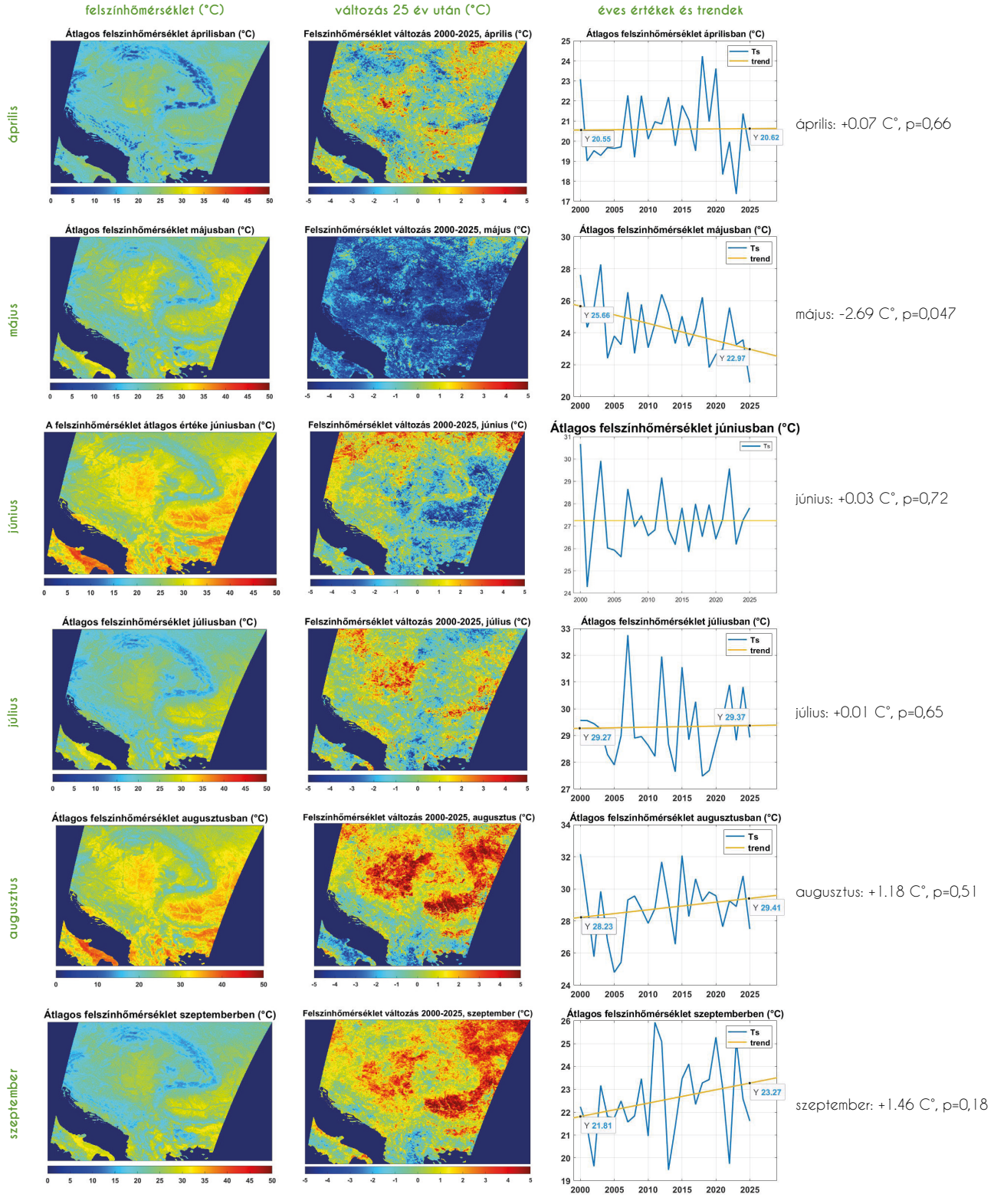
A felszínhőmérséklet havi adatai a Kárpát-medence térségében 2000-2025 között

A h19v04 MODIS csempe a teljes Kárpát-medencét magába foglalja. A nettó sugárzás a nyári hónapokban a legnagyobb, a felszínhőmérséklet emelkedése is ezt az ívet követi az egész térségben. A havi adatokat a teljes csempére, lehatárolás nélkül mutatjuk be a *4. ábrán*.

Az eredeti szinuszoidális vetületben készült felvételek miatt a csempe WGS84 koordináta-rendszerre váltása után a térkép „ferde" (a bal felső és jobb alsó területek hiányoznak), de a teljes Kárpát-medence látszik, a Kárpátok vonulata jól felismerhető. A nyári félév elején, májusban csökkent a felszínhőmérséklet (-2,69 °C), augusztusban és szeptemberben emelkedett (+1,18, illetve +1,46 °C). A változás Mann-Kendall teszttel vizsgálva a csempe teljes területén csak májusban szignifikáns. Júniusban és júliusban nem mutat a felszínhőmérséklet változása trendet, azonban jelentős különbségek láthatók az egyes területek között. Magyarország területére lehatárolva nagyobb a felmelegedés nyáron: júliusban +2,2 °C, augusztusban +2,14 °C, majd szeptemberben +1,66 °C volt a felszín melegedése. Az 1 km-es felbontású térképek lehetővé tesznek más területi elemzéseket is: például augusztusban a Nagyalföld, Vajdaság, Havasalföld, Moldva felszínhőmérséklete jelentősen megemelkedett. Terjedelmi okokból nem térünk ki további esetekre.



3. ábra. Magyarország felszínhőmérséklete a MOD11A2 adatok alapján 2001 és 2025 között 1 km-es felbontásban, Celsius fokban a MODIS Terra műhold 10:30-as nappali mérései alapján. a) a felszínhőmérséklet sokéves átlagának területi eloszlása (Celsius fokban). b) a felszínhőmérséklet éves átlagai és trendvonala (0,63 ±0,15 °C/évtized, Mann-Kendall teszt p = 0,011), valamint az éves levegőhőmérséklet és trendvonala (p=0,003. Forrás: KSH.15.1.1.37. Magyarország és Budapest időjárásának adatai [4]. Mindkettő szignifikáns. c) a csapadékos 2010-es év átlagos felszínhőmérséklete rácspontonként. d) az aszályos 2022-es év átlagos felszínhőmérséklete rácspontonként. e) a felszínhőmérséklet éves átlagának változása Magyarországon 25 év alatt (Celsius fok). f) szignifikáns trend a felszínhőmérséklet változásában, Mann-Kendall teszt, alfa=0,05, p<0,05.



4. ábra. A Kárpát-medencét magába foglaló h19v09 MODIS csempe havi felszínhőmérséklet adatai 1km-es felbontásban a nyári hónapokban a 2000-2025 években, a MOD11A2 termék adatai alapján. Első oszlop: a havi felszínhőmérséklet átlaga rácspontonként. Második oszlop: a hőmérséklet változásának térbeli eloszlása. Harmadik oszlop: a hónap felszínhőmérsékletének átlagai az egyes években, trendvonal (°C) és a teljes időszak alatt bekövetkezett változás.

A távérzékelési adatok és kézi hőkamerával készült felvételek összehasonlítása

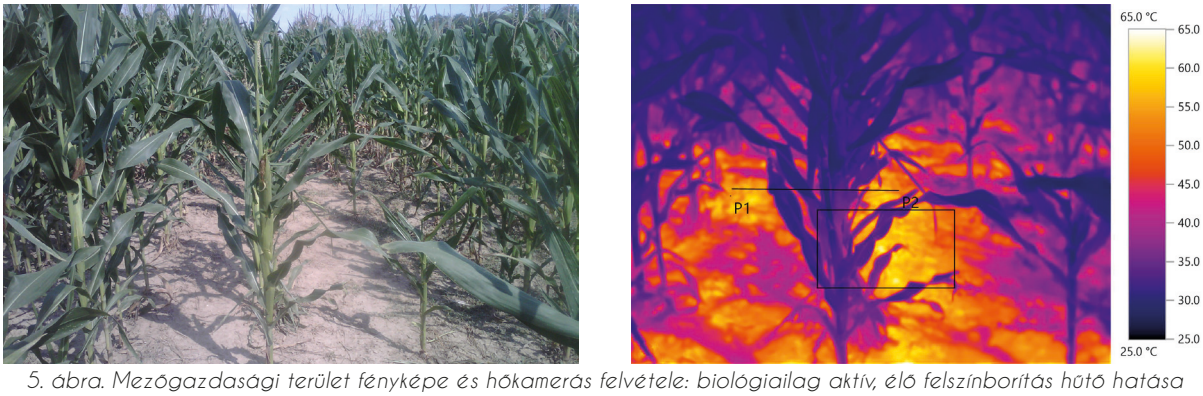
A MODIS LST rácspontok közel egy négyzetkilométeres területéről készült képen átlagos felszínhőmérsékletet látunk. Egy több száz hektáros homogén felszínborítású területre jellemző lehet egy rácspont adata. Fontos azonban megjegyezni, hogy kisebb területek változatossága nem látható. A felszíni folyamatok dinamikája nagyobb felbontású műholdas, repülőgépes, drónos mérések mellett a kézi hőkamerák, hőmérők alkalmazásával tehető láthatóvá (beépített terület, mezőgazdasági terület, erdő stb.). Az átlagolás megtévesztő hatása ilyen mérésekkel csökkenthető és azonosíthatók azok a túlmelegedett területek, ahol beavatkozásra lehet szükség, vagy káros következményekkel kell számolni. Egy részben növénnyel borított felület példáján a felszínborítás hatása bemutatható (*5a. ábra*). A vizsgált kukoricatábla felszínének átlaghőmérséklete 45 °C volt 2024. július 28.-án, délután 3 órakor, szélcsendes időben, 37 °C levegőhőmérséklet mellett. A hőkamerás kép hisztogramjának elemzése szerint a levelek átlaghőmérséklete 34 °C, a csupasz, áthevült talaj átlaghőmérséklete 56 °C volt (*5b. ábra*). A biológiailag aktív, élő felszínborítás hűtő hatása mérhető és érezhető, a két felület átlaghőmérséklete közötti különbség 22 °C. Részletesebb vizsgálatok igazolják, hogy a sűrű növényzettel borított területen a felszínhőmérséklet és levegőhőmérséklet közötti különbség is kisebb (*Good et al*., 2017).

Diszkusszió

A 1 km-es felbontású MODIS LST adatok alapján a felszínhőmérséklet Magyarországon 2001-2025 között 15,55 °C-ról 17,06 °C-ra nőtt, a változás értéke 0,63 ±0.15 °C/évtized. A növekedés összhangban van a levegő-hőmérséklet melegedésével. Magyarországra a HungaroMet levegő-hőmérséklet adatai és a MODIS LST adatai közötti korrelációs együttható értéke r=0,768, a determinációs együttható R^2=0,589.

A felszínhőmérséklet adatok pontossága hatással lehet a kimutatott trendekre és összefüggésekre. A MODIS LST szakértői csoport validálása szerint a felszínhőmérséklet napi adataiban az eltérés jellemzően kevesebb mint, ±0.5 K (*Wan*, 2014). Ennél több, 2-3 K is lehet a felhőfoltokkal érintett pixelekben. A 8 napos kompozit MOD11A2 adatok esetében a felszínhőmérséklet a rendelkezésre álló MOD11A1 napi adatok egyszerű számtani átlaga, azonos súllyal, QC szűrés nélkül. A kompozit QC értékét a napi QC adatok legtöbbször előforduló értéke alapján állítják elő pixelenként (nem pedig az egyes QC biteket feldolgozva). Az *1. ábrán* bemutatott felszínhőmérséklet adatokhoz tartozó QC adatok szerint az ellenőrzésre javasolt pixelek száma a téli félévben 1% körül van, és az átlagos hiba 2 K alatt marad. A nyári félévben ennél kisebb a pixelszám. A pixelértékek hisztogramjának elemzése után a QC bitek szerinti elemzés és javítás helyett a pixelértékek eloszlása szerinti szűrést alkalmaztuk az értéktartomány alsó sávjában. Az adatok Gauss eloszlása alapján a 3-szigma értékeknél kisebb gyakoriságú cellák értékét javítottuk. Az így kezelt pixelek közül mintegy 0,5% „nincs adat” értékre lett állítva és néhány százalék a szomszédos cellák értékei alapján javított pixelek száma. A tisztítás mértéke télen nagyobb, nyáron kevesebb, de arányaiban csekély az összhatása (lásd *2d. ábra*) és szinkronban van az ATBD dokumentumban leírt QC arányokkal.

A havi átlagok számításához a 8 napos kompozit adatokból négynek az átlagából képeztük a havi átlagot, kivéve áprilist és októbert, amikor csak három 8 napos periódus kezdő napja esik a hónapra. Szökőévekben



5. ábra. Mezőgazdasági terület fényképe és hőkamerás felvétele: biológiailag aktív, élő felszínborítás hűtő hatása (Tura, 2024. július 18., Báder László felvétele Testo 852 hőkamerával). a) Kukoricás fényképe közelről; b) a hőképen a levélfelületek átlaghőmérséklete 34 °C, a csupasz talaj átlaghőmérséklete 56 °C. A két felület közötti hőmérséklet-különbség 22 °C.

a háromtagú átlagolás májusra, illetve novemberre tolódott. A változás hatással lehet szökőévekben a két-két érintett hónap átlagára, de a trendeket bemutató ábrákat elemezve nem látható kiugró eltérés, ezért részletesebb hatáselemzésre nem került sor.

Az adatminőséget befolyásolhatja a műhold pályájának változása is. A Terra műhold tervezett élettartama 6 év volt. A NASA 2000 és 2020 között végrehajtotta a szükséges pályakorrekciókat és az folyamatosan pályáján haladva működött. Az üzemanyagkészlet kifogyása után sodródni kezdett, alacsonyabb pályára került és az egyenlítőn korábban halad át (a kezdeti 10:30 helyett 2022-ben már 10:15-kor) és azóta tovább sodródott. A korábbi áthaladáskor a feszínhőmérséklet még alacsonyabb, a kimutatott hőmérséklet emelkedési tendencia ezért magasabb is lehet.

Kitekintés, oktatás- és szakpolitikai ajánlások

Ha a környezet nem képes a táj hűtéséhez szükséges vizet biztosítani (jelentős mennyiségű éghajlati energiát párolgással elszállítani), akkor táji méretű hőszigetek alakulnak ki (*Báder*, 2021). A folyamat messze nyúló és hosszan tartó következményekkel járhat, gyakoribbá válnak a vízhiányos, aszályos időszakok, szélsőségesebbé válik az időjárás (*Schlesinger* and *Jasechko*, 2014; *Putnam* and *Broeckner*, 2017). Az éghajlatváltozás kedvezőtlenül hat a vízmérlegünkre (*Báder*, 2023), felértékelődik a vízvisszatartás, a megfelelő tájhasználat és takarónövények alkalmazása, a kék-zöld infrastruktúra jelentősége. A magasabb felszínhőmérsékletű mesterséges felületeken vagy kiszáradt talajon a párolgás kisebb, mint a növénytakaróval védett területeken, több hő marad a tájban. Erősödnek az intenzív tájhasználat következményei ott, ahol a biológiailag aktív, élő felszínborítás hűtő hatása nem érvényesül megfelelően. Ilyen a helyzet az ipartelepek, csupasz nagytáblás monokultúrás mezőgazdasági területek, erdők vágásterületei esetében. A táj, mint integrált önszabályozó rendszer megfelelő felszínborítás mellett képes a felszínhőmérséklet növekedésének korlátozására, a szélsőséges helyzetek előfordulásának csökkentésére.

Az oktatás minden szintjén tanítják azt, hogy a felszínről kiindulva alulról melegszik fel a levegő. Ez az általános iskolától kezdve a középiskolákig (ahol földrajzból érettségi tétel), az egyetemi oktatásban és a kutatásban is az alapok között szerepel [**5**], [**6**], [**7**], [**8**]. A felszínhőmérséklet emelkedésével egyre csökken a párolgás hűtésének hatékonysága (*Szilágyi et al*., 2024). Hiánypótló, stratégiai jelentőségű feladattá vált az oktatásban a növények klímaszabályozó szerepét, a tágabb összefüggéseket megismertetni (*Ryplová et al*., 2022). A klímaváltozás elleni hatékonyabb fellépéshez hozzájárulhat:

- A felszínhőmérséklet adatok könnyebb elérhetősége és további kutatások ösztönzése (részletesebb adatok, szegmentálás tájhasználat szerint, összefüggések elemzése stb.);
- A felszínhőmérséklet, mint meghatározó éghajlati változó rendszeresítése a Meteorológiai Világszervezet GCOS (Global Climate Observing System) munkaanyaga szerint;
- Az éghajlati rendszer oktatásának fejlesztése, a növények szerepének tudatosítása.

A környezettudomány minden területén (természeti-, gazdasági- és épített környezet) és minden ágazat számára lehetővé kell tenni, hogy a felszínhőmérséklet növekedésének a korlátozásával alakítsák tevékenységüket és hozzájáruljanak a környezeti folyamatok fenntarthatóságához.

További információ: A feldolgozott MODIS LST adatok regisztráció után ingyenesen elérhetők a weben [**9**].

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük NASA LP-DAAC adatközpontjának a MODIS adatokhoz való ingyenes hozzáférést. A kutatást az MTA Fenntartható Fejlődés és Technológiák Nemzeti Program (FFT NP FTA) támogatta, valamint a kutatás az Európai Regionális Fejlesztési Alap (ERFA) finanszírozásával a Széchenyi Terv Plusz részeként, a Környezeti és Energiahatékonysági Operatív Program "Megújuló adatokra támaszkodó, ökoszisztéma-szolgáltatás alapú zöldinfrastruktúra-fejlesztések stratégiai tervezésének megalapozása" című projekt keretében valósult meg (KEHOP PLUSZ-3.2.2-24-2024-00002).

Köszönjük a szerkesztőnek a kézirat gondozását és az ismeretlen bírálóknak az értékes észrevételeiket és javaslataikat, amivel hozzájárultak a cikk végleges formájához.

Irodalom

Báder, L., 2021: A párolgás szerepe és a "Táji hőszigetek" hatása az éghajlati energia- és vízmérlegre. *Légkör* 66.,16-21.

Báder, L., 2023: Magyarország vízmérlege és az éghajlatváltozás. Hidrológiai Közlöny 2023 1., 4-16. https://doi.org/10.59258/HK.10410

Báder, L. & *Szilágyi, J*., 2023: Widening Gap of Land Evaporation to Reference Evapotranspiration Implies Increasing Vulnerability to Droughts in Hungary. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 67, 1028-1037. https://doi.org/10.3311/PPci.21836

Báder, L, Szilágyi, J., Négyesi, K., Nagy, E., Földváry, L., 2023: Changes and trends in the climatic water balance of the danube river basin based on meteorological, hydrological, and gravimetric data for the period 1961-2020. *HydroCarpath Conference*, 9. https://doi.org/10.35511/978-963-334-505-4

Báder, L., 2025: Climatic Energy Balance Diagram depicts Changes in the Water Cycle in the Danube-basin. EWRA 2025 - XIII World Congress of the European Water Resources Association, Palermo. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16931.16162

Báder, L., 2026: Surface Energy Balance of the Danube Region: Assessment of changes between 1961-1990 and 1991-2020 using General Systems Theory and Climatic Energy Balance Diagram. *Science of Climate Change*. Vol. 6.2. pp. 32-36 https://doi.org/10.53234/scc202603/21

Eiseltová, M., Pokorný, J., Hesslerová, P., Ripl, W., 2012: Evapotranspiration – A Driving Force in Landscape Sustainability, *In: Evaporation – Remote Sensing and Modelling. Ayse Irmak, IntechOpen*. https://doi.org/10.5772/19441

Good, E. J., Aldred, F. M., Ghent, D. J., Veal, K. L., and *Jimenez, C.,* 2017: An analysis of the stability and trends in the LST_cci Land Surface Temperature datasets over Europe. *Earth and Space Science*, 9, https://doi.org/10.1029/2022EA002317

Goode, P. R., Pallé, E., Shoumko, A.,Shoumko, S., Montañes-Rodriguez,P., and *Koonin, S. E.,* 2021: Earth'salbedo 1998–2017 as measured from earthshine. *Geophysical ResearchLetters*, 48, https://doi.org/10.1029/2021GL094888

IPCC, 2019: Technical Summary, SPM_Updated-Jan20. Ed: Shukla et al. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes. https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/technical-summary

Metz, M., Andreo, V., and *Neteler, M.,* 2017. A New Fully Gap-Free Time Series of Land Surface Temperature from MODIS LST Data. *Remote Sensing*, 9(12), 1333. https://doi.org/10.3390/rs9121333

MODIS ATBD, 1999: https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod11.pdf

MODIS User Guide, 2014: Collection-6 MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide Version 6.1), https://www.icess.ucsb.edu/modis/LstUsrGuide/MODIS_LST_products_Users_guide_Collection-6.pdf

Orth, R., 2021: When the landsurface shifts gears. *AGU Advances*, 2. https://doi.org/10.1029/2021AV000414

Schlesinger, W. H., and *Jasechko, S*., 2014: Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189–190, 115–117. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.011

Szilágyi, J. and *Kovács, Á.,* 2011: A calibration-free evapotranspiration mapping technique for spatially-distributed regional-scale hydrologic modeling. Hydrol. Hydromech., 59, 118–130 doi:10.2478/v10098-011-0010-z

Szilágyi J., Báder L. és *Józsa J.,* (2025). A területi párolgás havi értékeinek becslése2000 és 2022 között Magyarországon kilométeres felbontásban. *Hidrológiai Közlöny* 105. 3, 4-12. https://doi.org/10.59258/hk.20549

Szilágyi, J., Zhang, Y., Ma, N., Crago, R. D., Qualls, R.J. and *Jozsa, J.,* 2024: Diminishing control of evaporation on rising land surface temperature of the Earth. *Communications Earth & Environment* 5, 613. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01796-8

Metz, M., Andreo, V., and *Neteler, M.,* 2017: A New Fully Gap-Free Time Series of Land Surface Temperature from MODIS LST Data. Remote Sensing, 9(12), 1333. https://doi.org/10.3390/rs9121333

Nikolov, N. and *Zeller, K. F.,* 2024: Roles of Earth's Albedo Variations and Top-of-the-Atmosphere Energy Imbalance in Recent Warming: New Insights from Satellite and Surface Observations. *Geomatics*, 4, 311–341. https://doi.org/10.3390/ geomatics4030017

Phan, T, and *Kappas, M*., 2018: Application of MODIS land surface temperature data: a systematic literature review and analysis *Journal of Applied Remote Sensing* 12(04) 1, https://doi.org/10.1117/1.jrs.12.041501

Putnam, A. and *Broecker, W.,* 2017 „Human-induced changes in the distribution of rainfall" *Science Advances*. 3. https://doi.org/ 10.1126/sciadv.1600871.

Ryplová, R., Broer, Y., Hesslerová, P., 2022: Plant Literacy Teacher's Handbook, https://planteducation.eu/project-results/plant-literacy-teachers-handbook

S. Loriani, A,. Bartsch, E,. Calamita, J. F., Donges, S., Hebden, M., Hirota, A., Landolfi, T., Nagler, B., Sakschewski, A., Staal,·J., Verbesselt, R., Winkelmann, R,. Wood, N., Wunderling, 2025: Monitoring the Multiple Stages of Climate Tipping Systems from Space: Do the GCOS Essential Climate Variables Meet the Needs? *Surveys in Geophysics* 46, 327–374 https://doi.org/10.1007/s10712-024-09866-4

Wan, Z. and *Li, Z.-L*., 1997: "A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data", IEEE Trans. Geosci. *Remote Sens*., v35, n4, pp. 980-996.

Wan, Z., 2014, New refinements and validation of the collection-6 MODIS land-surface temperature/emissivity product: Remote *Sensing of Environment*, v. 140, p. 36-45, accessed February 8, 2016. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.027

Wan, Z., Hook, S., and *Hulley, G*., 2021: MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V061 [Data set]. NASA Land Processes Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD11A2.061 Date Accessed: 2026-04-02

Wang, Y. R., Hessen, D. O., Samset, B. H. and *Stordal, F.*, 2022 Evaluating global and regional land warming trends in the past decades with both MODIS and ERA5-Land land surface temperature data, *Remote Sensing of Environment*, 280. https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113181

WMO, 2016: The Global Observing System for Climate: Implementation Needs. Implementation Plan pp. 202-205. (Ed. Belward et al.) *World Meteorological Organization*. https://library.wmo.int/idurl/4/55469

Internetes hivatkozások

[1]: https://ofi.oh.gov.hu/sites/default/files/attachments/termeszetismeret_6_1.pdf

[2]: https://erettsegi.org/a-levego-felmelegedese.html

[3]: https://www.eltereader.hu/media/2014/05/Meteorologiai_alapismeretek_READER.pdf

[4]: https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/transfer-of-heat-energy

[5]: https://www.met.hu/doc/rendezvenyek/metnapok-2009/02_Kern_Metnap2009.pdf

[6]: https://www.earthdata.nasa.gov/learn/data-in-ac/modis-land-surface-temperature-version-comparisons-appeears

[**7**]: https://www.eltereader.hu/media/2014/05/Meteorologiai_alapismeretek_READER.pdf

[**8**]: https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/transfer-of-heat-energy

[***9***]: https://figshare.com/doi.org/10.6084/m9.figshare.30074032