

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Földrajz- és Földtudományi Intézet
Meteorológiai Tanszék

Talajnedvesség-adatbázisok összehasonlítása a Kárpát-medencére vonatkozóan

DIPLOMAMUNKA



Készítette:

Boronyák Virgínia

Meteorológus mesterszak
Éghajlatkutató szakirány

Témavezető:

dr. Kern Anikó

ELTE TTK, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék

Konzulens:

dr. habil. Barcza Zoltán

ELTE TTK, Meteorológiai Tanszék

Budapest

2018

TARTALOM

1.	Bevezetés	3
1.1.	A talajnedvesség fogalma	5
1.2.	A talajnedvesség becslése	6
2.	Talajnedvesség-adatbázisok.....	8
2.1.	Műholdas-adatbázisok	8
2.1.1.	A távérzékelte adatbázisokkal szemben támasztott elvárások.....	8
2.1.2.	ESA CCI SM v03.2	9
2.1.3.	H-SAF SM	12
2.1.4.	SMAP	14
2.1.5.	A Copernicus-program	15
2.1.6.	SMOS	16
2.1.7.	ESA CCI SM v04.2	17
2.2.	Reanalízis adatbázisok.....	18
2.2.1.	Az ERA-Interim és ERA-Interim/Land reanalízisek.....	18
2.2.2.	A TESSEL- és a H-TESEL-modell.....	19
3.	Felhasznált adatok és módszerek.....	22
3.1.	A vizsgált terület kiválasztása.....	22
3.2.	Közvetlen mérési adatsorok.....	23
3.2.1.	A hegyhátsági <i>in situ</i> adatsor.....	23
3.2.2.	A bugaci <i>in situ</i> adatsor	24
3.3.	Az adatsorok összehasonlításának módszertana	26
4.	Eredmények.....	27
4.1.	Az ESA CCI SM v03.2, az ERA-Interim és az ERA-Interim/Land adatbázisok alapján végzett vizsgálatok.....	27
4.2.	Éghajlati vizsgálatok: sokéves havi átlagok	31
4.3.	Éghajlati vizsgálatok: anomáliamezők	35
4.4.	Éghajlati vizsgálatok: átlagos éves menetek Magyarországon	39
4.5.	A felhasznált adatbázisok összehasonlítása közvetlen mérésekkel	42
4.5.1.	Összehasonlítás a hegyhátsági adatsorral	42
4.5.2.	Összehasonlítás a bugaci adatsorral.....	48
5.	Összefoglalás.....	54
	Köszönetnyilvánítás.....	55
	Irodalomjegyzék	56

1. BEVEZETÉS

A talajok vízháztartása a hidrológiai ciklus részeként az éghajlati rendszer egyik fontos eleme (*Entekhabi et al., 2010*). A talajok vízháztartásának alapvető mérőszáma a talajnedvesség, amely definíció szerint az a vízmennyiség, amelyet a talaj időjárás által érintett legfelső rétege tartalmaz (*Hillel, 1982*). A talajnedvesség és annak változása több folyamatot is jelentősen befolyásol, így a radiációs hőmérséklet alakulását, a felszíni energiamérleget, az aszály kialakulását, valamint az árvízi időszakok hosszát és gyakoriságát. Szerepe a numerikus időjárás-előrejelző modellek által készített prognózisoknál és az éghajlatváltozással összefüggő vizsgálatoknál sem elhanyagolható (*Seneviratne et al., 2006*). A talajnedvesség-adatok figyelembevételével javuló évszakos éghajlati előrejelzéseket olyan, az éghajlati változásokra érzékenyebb társadalmi és gazdasági területek is felhasználják, mint a vízgazdálkodás, a mezőgazdaság és a katasztrófavédelem.

A talajközeli nedvességtől függ, hogy a talaj szintjén rendelkezésre álló energia mekkora arányban alakul át látens, illetve szenibilis hőárammá (*Entekhabi et al., 2010*). A látens hő formájában felszabaduló energia a továbbiakban pedig a légköri folyamatok egyik motorjaként működik (*Ács et al., 2015*). A talajnedvesség eloszlásának ismerete a légköri nedvességtartalom és az evapotranszpiráció szempontjából is lényeges, hiszen így pontosabban le lehet írni a felszíni folyamatok időjárásra és éghajlatra gyakorolt hatását. A talajnedvesség a legfőbb forrása a talajvízkészleteknek, elengedhetetlen a mezőgazdasági termelés és a természetes növénytakaró részére is (*Robock et al., 2000*). Ha a talaj nedvességtartalma alacsony, akkor az aszályokhoz és a hőmérséklet emelkedéséhez vezethet. A megnövekedett hőmérséklet következtében a talajok száradása felgyorsul, a viszonylagosan szárazabb talajokról az evapotranszpiráció útján kevesebb vízgőz jut a légkörbe (*Teuling, 2018*).

Az elmúlt évszázadban is, de főként a legutóbbi két évtizedben a délkelet-európai régiót egyre nagyobb mértékben sújtották aszályok jelentős kárt okozva a gazdaság és az élővilág számára. Az 1980-as évektől kezdve a régióban az aszályos időszakok gyakorisága rohamosan megnövekedett, kiemelkedően érintett évek 1993, 1994, 1998 és 2003 voltak (*Alexandris et al., 2012*). Ezen események következtében kialakult az igény egy átfogó, nemzetközi program létrehozására az aszály vizsgálata kapcsán. A délkelet-európai országok összefogásaként kilenc tagországgal 2009-ben megalakult a Délkelet-Európai Aszály

Központ¹, melynek keretein belül a szakemberek aszályvizsgálatokat végeznek, nyomon követik az elsvatagosodás mértékét és hatásait, valamint aszály-előrejelzést tesznek közzé (Bihari, 2010).

A talajnedvesség nagyobb térségre történő reprezentatív mérése meglehetősen nehéz feladat, mivel a talajnedvesség térben és időben gyorsan változó paraméter. A hidrológiai ciklusban betöltött szerepéről kialakult tudásunk a pontméréseknek köszönhető, ahol a hangsúly a nedvesség mélységi eloszlásának leírásán van (Engman és Chauhan, 1995).

A felszíni hidrológiai ciklus legfőbb változói a talajnedvesség mellett a felszín hőmérséklete, a növényzet, valamint a csapadék mennyisége és halmazállapota, melyek mind szoros kapcsolatban állnak egymással (Lakshmi, 2013). A talajnedvesség mértéke meghatározza, hogy a lehulló csapadék mekkora arányban fordítódik lefolyásra, valamint mekkora mennyiség szivárog be a talajba, majd annak mélyebb rétegeibe. Ezen folyamatok aránya a legfőbb mozgatórugó a hidrológiai és geomorfológiai folyamatok hátterében (Baghdadi et al., 2007).

Mivel a talajnedvességnek az éghajlati rendszerben betöltött szerepe kiemelkedő fontosságú, ezért 2008-ban bekerült a Meteorológiai Világszervezet (WMO²) által szabályozott „alapvető éghajlati változók³” sorába. Ez arra szólítja fel a nemzetközi tudományos közösséget, hogy hosszútávú műholdas távérzékelésen alapuló adatbázisokat hozzon létre (Wagner et al., 2012).

Diplomamunkám célja, hogy a tudományos közösség számára jelenleg elérhető talajnedvesség-adatbázisokat bemutassa. További cél a talajnedvesség térben explicit becslése a publikusan hozzáférhető adatbázisok alapján. Az ismertett adatbázisok alapján klimatológiai vizsgálatokat végeztem a Kárpát-medence területére vonatkozóan, mely során különböző statisztikák révén lehetőség nyílt az adatbázisok összehasonlítására. A diplomamunkám elkészítése során főként az ESA CCI SM⁴ v03.2, az ERA⁵-Interim és az ERA-Interim/Land adatbázisokra koncentráltam, azok eredményeit két magyarországi *in situ* pontméréssel is összehasonlítottam, mely mérések Hegyhátsálon és Bugacon folynak.

¹ DMCSEE - Drought Management Centre for Southeastern Europe

² World Meteorological Organisation

³ ECV – Essential Climate Variable

⁴ European Space Agency Climate Change Initiative

⁵ ECMWF's Reanalysis

1.1. A talajnedvesség fogalma

Talajnedvesség alatt azt a vízmennyiséget értjük, ami a talaj telítetlen szejletében helyezkedik el, azaz a felszín és a talajvíz szintjei között. Megadása több mértékegységben is történhet, így többek között elfogadott a m^3/m^3 mértékegység, mely azt mutatja, hogy egységnyi térfogatú talajban mekkora a víz térfogata. A mm/mm mértékegységben történő megadás akkor célszerű, ha azt szeretnénk kifejezni, hogy egységnyi felület felett milyen magas lenne a vízoszlop a talaj többi alkotójához képest. A talajnedvesség kifejezhető a telítési állapot hányadaként is. A talaj alapvetően porózus szerkezetű, ami azt jelenti, hogy az alkotóelemi közötti hézagok szabadon feltöltődhetnek levegővel vagy vízzel. Ha a vízmolekulák teljesen kiszorítják a levegő alkotóit, akkor telített talajról beszélünk. A talaj telítési aránya egy olyan dimenziótlan skalár, melynek értéke 0 és 1 között változhat. Ahhoz, hogy ezt a számot nedvességgé tudjuk konvertálni ismerni kell a talaj porózusságát, így meg tudjuk becsülni, hogy maximálisan mennyi vizet képes felvenni.

A talajállapot leírására másik gyakran használt fogalom a talajból a növények által felvehető vízmennyiség, vagyis a PAW⁶. A PAW mennyiségét úgy számítják ki, hogy a teljes potenciális talajnedvességből (telítettség) kivonják a növények hervadási időszakában fellépő nedvességértéket (definíció szerint ez a hervadáspon), mivel az ezen kívül jelenlévő nedvességet a talajszerkezet annyira leköti, hogy az már nem érhető el a vegetáció számára (Dorigo et al., 2011).

A bevezetett mérőszámokon túl elengedhetetlen tisztázni, hogy a talajnedvesség mérését a talaj mely szegmensén végezzük, főként a geometriai kiterjedésre gondolva. Ez azért fontos, mivel a talajnedvesség nem csak horizontálisan, hanem vertikálisan is erősen ingadozik (Dorigo et al., 2011).

A talajnedvesség becslésére számos módszer áll a kutatók rendelkezésére, melyek lehetnek tisztán vagy részben empirikus alapokon nyugvók. A talajnedvesség meghatározása három módon történhet: pontbeli (*in situ*) mérésekkel, távérzékelés során nyert adatok felhasználásával, valamint a kisebb jelentőséggel bíró felszínmodellek segítségével. A három megoldás közül a pontmérések a legpontosabbak. Fontosságuk abban is megnyilvánul, hogy pontosságuknak köszönhetően ezekhez képest állapítják meg az egyes modellfuttatások és a távérzékelési eredmények megbízhatóságát, azaz referenciaértékeként szolgálnak. További jelentős előnyük, hogy folyamatos méréseket biztosítanak (Albergel et al., 2012).

⁶ Plant Available Water

1.2. A talajnedvesség becslése

A talajnedvesség közvetlen mérése meglehetősen körülményes és időigényes, valamint a pontszerű *in situ* mérések nem reprezentatívak nagyobb térség talajnedvességére vonatkozóan, ezért célszerű annak meghatározására modellfuttatások eredményeit felhasználni (Meng és Quiring, 2008). A talajnedvesség modellezése azonban nehéz feladat, mivel annak idő- és térbeli változása rendkívül függ a légkörben és a felszínen zajló folyamatoktól, valamint a talaj fizikai tulajdonságaitól (Robock et al., 1998). Számos tanulmányban modellfuttatásokkal végzett vizsgálatok révén bebizonyították, hogy a talajnedvesség anomáliája közvetlen hatással van a csapadék alakulására (Koster és Suarez, 2001; Koster et al., 2004; Mo és Juang, 2003). A talajnedvesség alakulására a növényzet is hatással van, a gyökérszóna mélysége függ az egyes növényfajoktól, ezért fontos a modellfuttatásokat a talajt különböző rétegekre bontva végezni (Zuo et al., 2004).

A talajnedvesség-adatok becsülhetők csatolt felszín-légkör modellek esetében, melyek lehetnek általános cirkulációs modellek (Robock et al., 1998) vagy reanalízisek (Balsamo et al., 2009). A felszín-légkör rendszer bonyolultságából fakadóan célszerű minél egyszerűbb és kevesebb prognosztikai változóval rendelkező modellt alkalmazni, mert a bonyolultabb modellek sok esetben több bemeneti adatot igényelnek, amelyek mennyiségét a rendelkezésre álló mérések korlátozzák (Meng és Quiring, 2008).

A felszíni modellek is általánosan használatosak a talajnedvesség modellezésére, amely modellek peremfeltételként meteorológiai adatokat használnak (Dirmeyer et al., 2004). A PILPS⁷-projekt keretein belül a kutatók különböző modelleket vizsgáltak, amelyeket ugyanazon peremfeltételekből indítottak. Arra a következtetésre jutottak, hogy közöttük markáns eltérések léphetnek fel még akkor is, ha a kezdeti felszíni és légköri állapototározókat minden esetben ugyanúgy választják meg (Henderson-Sellers et al., 1993). Guo és Dirmeyer (2006) a GSWP⁸-2 keretein belül 11 különböző felszínmodellt hasonlítottak össze egy 10 éves időszak keretén belül. A modellek validálásához Ázsiában (a korábbi Szovjetunió területén) végzett *in situ* mérések szolgáltak. A közvetlen mérési eredmények a Globális Talajnedvesség-adatbázisból (GSMDB⁹) származnak és a talaj 1 méteres mélységére vonatkoznak (Robock et al., 2000). A kutatók arra a következtetésre jutottak, hogy ha a PAW értéke magas, akkor a modellezett havi átlagos talajnedvesség-értékek hibája is széles sávban mozog (25-65% között),

⁷ The Project for the Intercomparison of Land-Surface Parameterization Schemes

⁸ Global Soil Wetness Project

⁹ Global Soil Moisture Data Base

továbbá azt is megállapították, hogy a talajnedvesség térbeli eloszlása jobban függ a földrajzi elhelyezkedéstől, mint az alkalmazott modelltől.

Általánosságban elmondható, hogy a felszín-légkör modellek jól visszaadják a talajnedvesség éves változásait, ám az éven, esetleg az évszakon belüli változásokat már kevésbé, főként olyan földrajzi területek esetében, ahol a talajnedvesség rendkívül nagy szezonális ingadozásokat mutat (*Dirmeyer, 2004*).

2. TALAJNEDVESSÉG-ADATBÁZISOK

2.1. Műholdas-adatbázisok

2.1.1. A távérzékelte adatbázisokkal szemben támasztott elvárások

A talajnedvesség változásának követésére kiváló minőségű adatsorokra van szükség, amelyek elegendően hosszú intervallumot ölelnek fel, egybefüggőek és kellően finom a tér- és időbeli felbontással rendelkeznek (*Findell et al., 2015*). Az elektromágneses spektrum mikrohullámú tartományában (kb. 1-10 centiméteres hullámhossz) végzett mérésekből származó adatsorok segítségével mindez elérhető, valamint ezen adatsorok alkalmasak arra, hogy felszíni modellek és reanalízisek alapját képezzék (*Albergel et al., 2013*). A mikrohullámú tartomány a legmegfelelőbb a talaj nedvességtartalmának meghatározására. Ennek oka, hogy itt a legnagyobb az eltérés a száraz és a nedves talaj dielektromos állandói között, a különbség pedig egyenes arányban áll a talaj nedvességtartalmával. Hátránya viszont az, hogy hóval és jéggel borított felszín felett, valamint akkor, ha a talaj fagyott állapotban van, nem lehet a talajnedvesség mértékére következtetni. A mérések pontos kivitelezésének további korlátját jelentik a komplex topográfiájú és városi területek (*Ulaby et al., 1982*). A méréseket nehezíti még a növényzet víztartalma is, mely csökkenti a mikrohullámú sugárzás kibocsátását és visszaverődését, sőt sűrű növénytakarójú területek felett akár el is lehetetlenítheti a talajnedvesség meghatározását (*Parinussa et al., 2011*). A dús növénytakarójú területek felett megoldást jelenthet az alacsonyabb frekvenciák – például az L-sáv (1,4 GHz frekvencia körüli intervallum) – használata. Az L-sávban a talaj mélyebb rétege képezhető le, mint a C- vagy X-sávokban, viszont kevésbé jó térbeli felbontás érhető el (*Ulaby et al., 1982*). A passzív mérések esetén egyéb zavaró tényezőként tartjuk számon az elektronika eszközök okozta rádiófrekvenciás interferenciát (*RFI¹⁰*), melynek enyhítésére számos jogi intézkedés született a közelmúltban. Az RFI-zajok kiküszöbölésének másik lehetséges módja alternatív mikrohullámú frekvenciák használata (*Nijs et al., 2015*).

Az adatok mértékegységét illetően a m^3/m^3 az előnyben részesített egység. A globális és regionális klímamodellek térbeli felbontásának növekedésével a távérzékelte adatokkal szembeni követelmények is szigorodtak, a korábbi $50\text{ km} \times 50\text{ km}$ -es felbontás helyett már az

¹⁰ RFI – Radio Frequency Interference

1 km × 1 km-től 25 km × 25 km-ig terjedő felbontás az elvárt. Az időbeli felbontást illetően az adatoknak legalább napi gyakorisággal elő kell állniuk. Az adatsoroknak minimum 30 éves intervallumot kell átfogniuk, amelyet több szenzor eredményeinek együttes felhasználásával lehetséges elérni. Az adatbázisoknak pixelszinten tartalmazniuk kell egy-egy olyan értéket, amely a mérés körülményeiről és a felszínborításról szolgáltat információt, illetve tájékoztat a mérés pontosságáról. Az adatok négyzetes középértékhibája ($RMSE^{11}$, definíciót lásd a 3.3 fejezetben) nem haladhatja meg a $0.04 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -es értéket (*Dorigo et al., 2017*).

Az adatsorokkal szemben továbbá elvárt, hogy elég mély réteget reprezentáljanak, mely kizárólag távérzékeléssel nem érhető el. Erre a 2.2-es alfejezetben bemutatott reanalízisek nyújtanak megoldást a gyökérszínéről is információt szolgáltatva. Arról, hogy gyökérszín alatt mennyire mély réteget értünk nincs tudományos megegyezés, mivel a gyökerek vertikális kiterjedése nagyban függ az egyes növényfajoktól. Továbbá, arról sem született konszenzus, hogy a műholdas távérzékeléssel nyert adatok a talaj milyen vastag réteget reprezentálják, mivel ez a vastagság a talajállapottal és a mérések során alkalmazott frekvenciától egyaránt változik (*Dorigo et al., 2017*). A fejezet következő alfejezeteiben konkrét adatbázisokat fogok bemutatni.

2.1.2. ESA CCI SM v03.2

Az Európai Űrügynökség¹² CCI SM¹³ nevű programja a talajnedvesség, mint az éghajlati rendszer egyik legfontosabb elemének globális monitorozására indult el 2010-ben. A CCI-program nem csupán az Európai Űrügynökség adatait dolgozza fel, hanem azokat egyesíti korábbi EUMETSAT¹⁴ és NASA¹⁵ eredményekkel is. A program legfőbb célja, hogy – elsősorban az éghajlatkutatók igényeinek megfelelően – egy hosszútávú talajnedvesség-adatsort hozzon létre ötvözve a passzív és az aktív módszerekkel nyert eredményeket. A CCI-adatsor megalkotása során, főleg a mikrohullámú C-sávban (4 GHz – 8 GHz) működő távérzékelő szenzorok adatait vették figyelembe, mivel azok megbízható méréseket végeznek és elegendően rég óta vannak használatban. Az adatsor 03.2-es verziója az 1979-től 2015-ig terjedő időszakot öleli fel (*Product Specification Document, 2017*).

¹¹ Root Mean Square Error

¹² ESA – European Space Agency

¹³ Climate Change Initiative Soil Moisture

¹⁴ European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites

¹⁵ National Aeronautics and Space Administration

1. táblázat. ESA CCI SM v03.2 produktumok összehasonlítása
(Product Specification Document, 2017)

<i>ESA CCI SM v03.2</i>	AKTÍV	PASSZÍV	KOMBINÁLT
Időszak	1991.08.05. 2015.12.31.	1978.11.01. 2015.12.31.	1978.11.01. 2015.12.31.
Időbeli felbontás	napi	napi	napi
Térbeli felbontás	0.25° × 0.25° globális	0.25° × 0.25° globális	0.25° × 0.25° globális
Talajnedvesség mértékegysége	telítési százalék [%]	térfogat [m ³ /m ³]	térfogat [m ³ /m ³]
Vizsgált réteg vastagsága	0,5 – 2 cm	0,5 – 2 cm	0,5 – 2 cm
Szenzorok	AMI-WS, ASCAT-A, ASCAT-B	SMMR, SSM/I, TMI, AMSR-E, WindSat, AMSR2, MIRAS ¹⁶	Előzőek kombinációja
Műholdak	ERS-1, ERS-2, MetOp-A, MetOp-B	Nimbus 7, DMSP ¹⁷ , TRMM, Aqua, Coriolis, GCOM-W1 ¹⁸ , SMOS	Előzőek kombinációja

Az adatsor három fő részből áll: aktív és passzív távérzékeléssel nyert és ezek kombinációjával létrehozott adatsorokból (*Dorigo et al., 2017*). Az **1. táblázat** szemlélteti az adatsorok legfőbb jellemzőit a talajnedvességre vonatkozóan.

A rövidebb időszakot felölelő aktív adatsor a MetOp-A és MetOp-B¹⁹ műholdak fedélzetén található AMI-WS²⁰ és ASCAT²¹ műszerek méréseiből származik. A passzív adatok az SMMR²², az SSM/I²³, a TMI²⁴, az AMSR-E²⁵, a WindSat²⁶ és az AMSR2²⁷ műszerek adataiból származtatottak (*Product Specification Document, 2017*).

Egyéb mikrohullámú aktív szenzorok – ahogyan az SMOS²⁸ és a SMAP²⁹ szintetikus

¹⁶ Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis

¹⁷ Defense Meteorological Satellite Program

¹⁸ Global Change Observation Mission – Water "SHIZUKU"

¹⁹ Meteorological Operational Satellites – A/B

²⁰ Active Microwave Instrument – Windscat

²¹ Advanced SCATterometer

²² Scanning Multichannel Microwave Radiometer

²³ Special Sensor Microwave Imager

²⁴ TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission's) Microwave Imager

²⁵ Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System

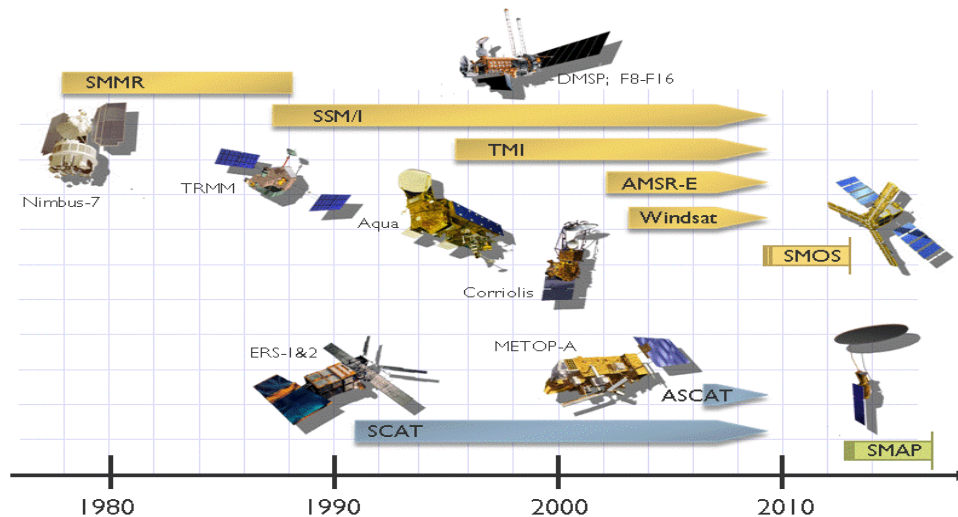
²⁶ WindSat Spaceborne Polarimetric Microwave Radiometer

²⁷ Advanced Microwave Scanning Radiometer 2

²⁸ Soil Moisture Ocean Salinity

²⁹ Soil Moisture Active Passive

apertúrájú radarjainak – adatai az első verziókban nem képezték az adatsor részét, mivel alkalmazásuk újszerűsége miatt a technológia az adatsor kezdeti verzióinak létrehozatalának idején még nem volt kellően megbízható (ESA Soil Moisture CCI, 2012). A SMOS és SMAP műholdak méréseinek integrálása során az jelentette a kihívást, hogy a szenzorok az L-sávban több beesési szögben mértek, valamint további gondot okozott még az RFI is. A kezdeti nehézségeket leküzdve 03.2-es verzió már tartalmaz SMOS-adatokat, ami jelentősen javította az elérhető mérések számát főként Észak-Amerika és Ázsia felett. Habár a 03.2-es verzió során az adatok tér- és időbeli felbontása javult az újabb szenzorok bevonásának köszönhetően, bizonyos területek felett – a mikrohullámú tartományban végzett mérések már említett sajátosságai miatt – még mindig évszakosan vagy egész évben adathiány tapasztalható (Dorigo et al., 2017). A felhasznált szenzorokat és az azokat hordozó műholdakat az **1. ábra** mutatja be, sárga színnel a passzív, kékkel az aktív eszközök szerepelnek.



1. ábra. Az ESA CCI SM adatbázis műholdak és szenzorai (ESA Soil Moisture CCI, 2012)

A talajnedvesség mellett az adatállományok a következőkben felsorolt változókat is tartalmazzák.

- „*sm_uncertainty*”: a talajnedvesség bizonytalansága
Ez a paraméter az adatok szórását tükrözi, mértékegysége megegyezik rendre a három adatsor mértékegységével.
- „*dnflag*”: napszaki jellemző

A paraméter arról szolgáltat információt, hogy az adott földrajzi terület feletti mérés helyi idő szerint nappal vagy este ment-e végbe.

- „*flag*”: minőségi jellemző
A változó a mérés körülményeiről és a felszínborításról ad tájékoztatást.
- „*freqbandID*”: frekvenciasáv azonosítója
A változó tájékoztatást ad arról, hogy az egyes szenzorok milyen frekvenciatartományban mérnek.
- „*mode*” és „*sensor*”: mód és szenzor
A változók információt nyújtanak arról, hogy a méréseket végző műhold le- vagy felszálló ágban volt-e és a mérések melyik műszer segítségével mentek végbe.

Az adatokat tartalmazó fájlok NetCDF³⁰ formátummal rendelkeznek és összevont globális felületi talajnedvesség-értékeket tartalmaznak napi felbontásban 00 UTC-re vonatkoztatva, melyek rövid regisztrációt követően letölthetők az Európai Űrügynökség honlapjáról (*Product Specification Document, 2017*).

2.1.3. H-SAF SM

Talajnedvesség-adatokat az EUMETSAT alá tartozó Hidrológiai SAF (H-SAF³¹) nevet viselő program is szolgáltat. Az H-SAF munkacsoportot 2002-ben hozták létre, amelynek legfőbb célja, hogy új, műholdas távérzékeléssel nyert produktumokat biztosítson különböző meteorológiai vonatkozású kutatási területek számára, amelyekben már meglévő és a jövőben létrehozandó adatokat is integrálnak tudományosan elvárt idő- és térbeli felbontásban. Az operatív felhasználási igényeknek eleget téve további cél 3 fontos hidrológiai paramétert (csapadék, talajnedvesség és hó) tartalmazó adatbázis létrehozása, tudományos célú terjesztése és archiválása. A Hidrológiai SAF vállalja a produktumok verifikálását radarral és billenőedényes csapadékmérőkkel végzett mérésekkel összehasonlítva, a műholdas adatok hidrológiai modellekbe való asszimilációját és azoknak a modellekre való befolyásának vizsgálatát (*Product User Manual H08, 2015*). A projekt során számos adatbázist létrehoztak,

³⁰ Network Common Data Form

³¹ Satellite Application Facility on Support to Operational Hydrology and Water Management

amelyek közül a jelen diplomamunka témájához leginkább kapcsolódókat mutatom be.

A H16, H101, H102 és H103 adatbázisok a felszín felső 5 centiméteres rétegére vonatkozóan szolgáltatnak talajnedvesség-adatokat a telítési talajnedvesség arányában megadva, százalékban kifejezve. A talaj porozitásának ismeretében a telítési százalék könnyen átváltható térfogat/térfogat egységre, így más adatbázisokkal is egyszerűen össze lehet vetni az eredményeket. Az átváltást az (1) egyenlet szemlélteti, ahol θ a telítési százalékban, sm pedig a térfogat/térfogat egységben megadott talajnedvesség, p pedig a talaj porozitása:

$$\theta[\%] = p \frac{sm[m^3m^{-3}]}{100}. \quad (1)$$

Az adatbázisok globálisak, térbeli felbontásuk 25 km × 25 km-től 50 km × 50 km-ig terjed, az időbeli mintavételezés sűrűsége pedig legfeljebb 36 óra. Az adatok a MetOp-A és MetOp-B műholdakon elhelyezett C-sávban működő ASCAT-szenzorokból származnak, az előbbi műhold 2006 októberében, az utóbbi pedig 2012 szeptemberében került napszinkron pályára, operatív tevékenységüket rendre 2008-ban és 2012-ben kezdték meg. A fedélzetükön elhelyezett radar 3-3 db 45°-os szögben oldalra néző antennával rendelkezik, amellyel a műholdak a közepes szélességeken kb. 1000 km-es sávot pásztáznak le, két áthaladás között egy kb. 670 km-es terület esik ki a megfigyelés alól, de ezt az ellentétes fel- vagy leszálló ágban képesek pótolni, ezzel a globális földfelszín 82%-os lefedettsége érhető el.

A Hidrológia SAF munkacsoport rendelkezik egy olyan adatbázissal is, amely a gyökérszóna talajnedvességéről nyújt információt. Az adatbázis az SM DAS 3³² H27 nevet viseli és létrehozatala során a 2.2.2. fejezetben bemutatásra kerülő H-TESEL modellt alkalmazták így a modell vertikális rétegeinek megfelelő mélységekben, 4 szinten tartalmaz értékeket 1992-től 2014-ig napi bontásban. Az adatok megjelenítéséhez a gaussi N640-es rács alkalmas, amely a pólusoktól az egyenlítőig adott szélességi körön egyre növekvő számban tartalmaz a hosszúsági köröknek megfelelő metszéspontokat. Az állományokban talajnedvességi indexek találhatóak (SWI³³), amelyek alapját az ERS1/2 és az ASCAT szenzorok mérései szolgáltatják. A modellfuttatások során a *de Rosnay és munkatársai (2013)* által lefektetett módszer alapján a kiterjesztett Kálmán-szűrőt használják fel (*Product User Manual H27, 2017*). Az adatok rövid regisztrációt követően NetCDF vagy GRIB³⁴ formátumban ingyenesen letölthetők a Hidrológia SAF honlapjáról (*ECMWF, H-SAF Products Download Centre, 2018*).

³² Soil Moisture Data Assimilation System

³³ Soil Wetness Index

³⁴ GRIdded Binary or General Regularly-distributed Information in Binary form

2.1.4. SMAP

A NASA irányítása alá tartozó SMAP elnevezésű műhold 2015 januárjában került kvázipoláris Föld körüli pályára, amely lehetővé tette a passzív és aktív távérzékelési módszerek együttes alkalmazásával származtatható adatok előállítását. Ezeket az adatokat globális talajnedvességi térképek készítéséhez lehet felhasználni (*Entekhabi et al., 2010*). A program részletes bemutatásával a BSc szakdolgozatomban foglalkoztam (*Boronyák, 2016*), jelen dolgozatban a legfontosabb sajátosságait vázolom fel.

A SMAP-et a NASA mérnökei arra tervezték, hogy legalább 3 évig működjön és ezen időszak alatt 2-3 naponként folyamatosan készítsen felvételeket a földfelszín teljes területéről. Ez az időintervallum megfelelő hosszúságú arra, hogy a nagyobb viharok kialakulásának időskálájától kezdve egészen az évszakos változások nyomon követésére alkalmas adatsorokat lehessen előállítani. A SMAP szenzorai a talaj felső 5 cm-es rétegére vonatkozóan szolgáltatnak talajnedvesség-értékeket. A magasabb szélességeken, valamint a Föld hidegebb területein a talaj állapotát is meghatározzák, tehát különbséget tesznek fagyott és olvadt állapot között. A 45° szélességi fokoktól északra és délre, a sarkok felé bináris (fagyott/olvadt talajállapot) értékeket állítanak elő, valamint meghatározzák a boreális erdőségek kiterjedését, ezzel hozzájárulva a szén ciklus kutatásához. (Ezen erdők az északi területeken jelentős nyelői a széndioxidnak). Azokon a földrajzi területeken viszont, ahol a víz folyékony halmazállapotban található, ott a kőzetek, az ásványok és az organikus talajalkotók között található konkrét víztartalmat méri (*NASA, SMAP Handbook, 2014*).

A SMAP műszerei a mikrohullámú L-sávban végeznek méréseket, radarjának térbeli felbontása 3 km × 3 km-es, a radiométerrel nyert adatok pedig 36 km × 36 km-es felbontással rendelkeznek. A két műszer eredményeinek ötvözésével 9 km × 9 km-es térbeli felbontás érhető el. A produktumok hibája nem haladhatja meg a 4%-ot, mindez kombinálás útján valósítható meg (*NASA, SMAP Handbook, 2014*). Bár a SMAP radarja meghibásodásnak köszönhetően 2015 júliusa óta nem végez méréseket, a program továbbra is folytatódik és radar nélkül is képes kiváló minőségű tudományos adatok előállítására (*Colliander et al., 2017*).

A SMAP produktumai közül az L3_FT_A³⁵ elnevezésű adatbázis arról tájékoztat, hogy a 45° szélességi köröktől a pólusok felé haladva a talaj fagyott vagy olvadt állapotban van-e. Az L3_SM_AP³⁶ és az L3_SM_P³⁷ adatbázisok a talaj felső 5 cm-es rétegére vonatkozó napi

³⁵ Level3 Freeze/Thaw Active

³⁶ Level3 Soil Moisture Active Passive

³⁷ Level3 Soil Moisture Passive

talajnedvességet adják meg globális lefedettséggel. Az előbbi produktum időbeli lefedettsége az aktív szenzor meghibásodása miatt csak 11 hetes, a passzív adatok azonban napjainkig előállnak. A passzív adatsorban foglalt talajnedvesség értékei m^3/m^3 mértékegységben kerültek megadásra (Colliander et al., 2017).

A SMAP-program során 1 méteres mélységig a gyökérszónára vonatkozó talajnedvesség adatokat is előállítanak (L4_SM³⁸), melyek a korábbi feldolgozottsági szinthez tartozó mérési eredmények alapján futtatott modellszimulációk eredményei. Az L4_SM adatbázis adatai 9 km × 9 km-es térbeli felbontású napi szintű globális adatok.

Az adatok SMAP-program során létrehozott produktumok HDF5³⁹ formátumban szabadon letölthetők vagy térképen ábrázolva megtekinthetők az NSIDC⁴⁰ honlapjáról (National Snow and Ice Data Center, Scientific Data Search, 2018).

2.1.5. A Copernicus-program

Az Európai Bizottság és az ESA által 2008-ban indított Copernicus-program számos biogeofizikai (pl. különböző felszínek albedója, vegetációs indexek, stb.) adatot szolgáltat a globális talajállapotról és annak változásairól. A program alapvető célja a növényzet, a vízciklus és az energiamérleg megfigyelése (ESA, Copernicus Global Land Service, 2018). Az adatsorok közül a talaj vízháztartásának szempontjából a talajnedvességi index (SWI⁴¹) hordoz legtöbb információt. A talajnedvességi index a talaj egyes rétegeire számszerűsíti a bennük található nedvességet, amelynek mennyiségét a csapadékhullás utáni beszivárgás határoz meg. Az SWI értékének meghatározása a MetOp műholdon elhelyezett ASCAT-szenzor eredményei alapján történik 25 km × 25 km-es térbeli felbontásban (Kidd et al., 2014). Az adatok több időlépcsőben érhetők el, így a felhasználói igényeknek megfelelően lehetnek közel valós idejűek, óránkénti, napi, vagy akár tíznaposak is, sőt már meglévő archivált műholdas mérési eredmények is letölthetők (Lacaze et al., 2015). A globális talajnedvességi indexek térképen ábrázolva megtekinthetők vagy XML⁴² formátumban letölthetők a Copernicus-program honlapjáról. A Copernicus-program keretein belül a Sentinel-műholdak szolgáltatják a program igényelte nélkülözhetetlen adatokat, valamint olyan régebbi földmegfigyelő műholdakat fognak fokozatos leváltani, mint például az ERS (Nagler et al., 2015). A Sentinel-program összesen

³⁸ Level4 Soil Moisture

³⁹ Hierarchical Data Format 5

⁴⁰ National Snow and Ice Data Center

⁴¹ Soil Water Index

⁴² Extensible Markup Language

hat küldetésből áll, melyek közül a Sentinel-1, a Sentinel-2A és a Sentinel-3A műholdjait már sikeresen pályára állították. A Sentinel-1 két műhold (Sentinel-1A és Sentinel-1B) konstellációjából áll, melyeket 2014-ben és 2016-ban bocsátottak fel. A kvázipoláris pályán keringő műholdak a mikrohullámú C-sávban végeznek radarméréseket, melyek térbeli felbontása a $400 \text{ km} \times 400 \text{ km}$ -től egészen az $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ -ig terjed (Nagler *et al.*, 2015). A program adatai ingyenes elérhetők a program honlapján (ESA, Copernicus Open Access, 2018). A Sentinel-műholdcsalád által nyert adatokat rendkívül sok területen fel lehet használni, többek között a katasztrófhelyzetek (pl. bozóttüzek, árvizek, földrengések) elhárításánál, a szárazföldek földhasználatának monitorozásánál, a tengerfelszíni folyamatok (olajfoltok terjedése, hajóforgalom, tengeri jég) megfigyelésénél (Frey, 2014). További lényeges információk nyerhetők a tengerek és szárazföldek felszínének hőmérsékletére, topográfiájára és színére vonatkozóan, valamint a kapott adatok felhasználhatók oceanográfiai és éghajlati kutatásokra egyaránt (Both, 2015).

2.1.6. SMOS

Az Európai Űrügynökséghez tartozó SMOS-program 2009 novemberében indult útjára. A kvázipoláris LEO⁴³ pályán keringő műhold fedélzetén a MIRAS nevet viselő interferometrikus elven működő sugázmérő a SMAP-hez hasonlóan egy szintén a mikrohullámú L-sávban operáló radiométer került elhelyezésre. A sugázmérő térbeli felbontása átlagosan $44 \text{ km} \times 44 \text{ km}$ -es (szélességi körtől függően $35 \text{ km} \times 35 \text{ km}$ -től $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ -ig), ahol a globális lefedettség elérése 3 napot vesz igénybe (ESA, SMOS Product, 2018).

A SMOS-program magasabb szintű produktumainak előállításáért a francia Nemzeti Űrkutatási Központ (CNÉS⁴⁴) felel. A produktumok közül a talajnedvesség szempontjából legfontosabb a Level3 CATDS⁴⁵, amely adatbázis a napi szinten előálló talajnedvesség mellett tartalmaz a növényzet optikai sűrűségére és a talaj dielektromos állandójára vonatkozó adatokat is. Emellett tájékoztat a főként az L-sávban zavaró tényezőként megjelenő rádiófrekvenciás interferencia mértékéről is. Az adatbázis mellett elérhető az ún. Level3 BEC⁴⁶ adatbázis is, amely ugyanazokat a változókat tartalmazza, viszont belőlük létrehozott globális térképek

⁴³ Low Earth Orbit

⁴⁴ Centre National d'Études Spatiales

⁴⁵ Centre Aval de Traitement des Données SMOS

⁴⁶ Barcelona Expert Center

felbontása finomabb, $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$ -es vagy $25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$ -es rácson állnak elő (*Gabarro et al., 2013*).

Az alacsonyabb feldolgozottsági szinthez tartozó adatok BUFR⁴⁷ vagy netCDF formátumban letölthetők az Európai Űrügynökség honlapjáról (*ESA, , 2018*), a magasabb szintű adatok pedig a francia és a spanyol űrügynökségek FTP⁴⁸-szerverein keresztül érhetők el.

2.1.7. ESA CCI SM v04.2

Diplomamunkám elkészítése során jutott a tudomásomra, hogy az Európai Űrügynökség újabb talajnedvesség-adatbázist adott ki ESA CCI SM v04.2 néven, az új adatbázis így 2016. december 12-ig tartalmaz értékeket, az adatok idő- és térbeli felbontása, a felhasznált szenzorok, a pontosság és a minőségi jellemzők kategorizálásában, továbbá az állományok kiterjesztésének tekintetében nem történt változás. Az adatok szintén az ESA honlapjáról tölthetők le.

⁴⁷ Binary Universal Form for the Representation of meteorological data

⁴⁸ File Transfer Protocol

2.2. Reanalízis adatbázisok

2.2.1. Az ERA-Interim és ERA-Interim/Land reanalízisek

Az ERA-Interim és az ERA-Interim/Land az ECMWF⁴⁹ által előállított globális reanalízis adatbázisok, melyek több alapvető éghajlati változó mellett a talaj 4 rétegére vonatkozóan megadott talajnedvességet is tartalmaznak. Előbbi 1979-től napjainkig (havi bontásban) bővülően, míg utóbbi 1979-től kezdődően 2010-ig foglal magában adatokat. Fő különbség a két reanalízis-adatbázis között, hogy az ERA-Interim szimuláció esetében a TESSEL, az ERA-Interim/Land esetében pedig az H-TESSSEL⁵⁰ földfelszíni sémát alkalmazták, ezzel a fejlesztéssel az ERA/Interim-Land alkalmasabbá vált klimatológiai vizsgálatok elvégzésére (Balsamo *et al.*, 2015). A két séma és a közöttük lévő fontos különbségek a következő alfejezetben kerülnek bemutatásra.

2. táblázat. Az ERA-Interim és az ERA-Interim/Land adatbázisok tulajdonságai (Balsamo *et al.*, 2015)

	ERA-Interim	ERA-Interim/Land
Időszak	1979.01.01. – napjainkig	1979.01.01. – 2010.12.31.
Időbeli felbontás	napi (00 UTC)	napi (00 UTC)
Térbeli felbontás	80 km × 80 km	80 km × 80 km
Vizsgált rétegek	0-7 cm, 7-21 cm, 21-72 cm, 72-189 cm	0-7 cm, 7-21 cm, 21-72 cm, 72-189 cm
Talajnedvesség mértékegysége	térfogati talajnedvesség [m ³ /m ³]	térfogati talajnedvesség [m ³ /m ³]
Alkalmazott parametrizáció	TESSEL	H-TESSSEL

Az ERA-Interim/Land az ERA-Interimből származó légköri kényszerek hajtotta modellszimuláció eredménye, amely során a csapadékkorrekción a GPCP v2.1⁵¹ adatbázis szolgáltatta. A GPCP v2.1 adatbázis műholdas távérzékelésből származó mérési eredményeket és billenőedényes csapadékmérők adatait integrálja (Adler *et al.*, 2003). A talajnedvességi

⁴⁹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

⁵⁰ Hydrology-Tiled ECMWF Scheme for Surface Exchanges over Land

⁵¹ Global Precipitation Climatology Project

adatokat az ISMN⁵² adatbázishoz képest validálták. A szintén ECMWF-hez tartozó ingyenesen elérhető ISMN-adatbázis több, mint 500 állomás *in situ* talajnedvesség-méréseit tartalmazza globális térbeli lefedettségben (*Balsamo et al., 2015*).

A felhasznált adatok publikusan elérhető térbeli felbontása $0,75^\circ \times 0,75^\circ$ -os (azokon a szélességi körökön, ahol a Kárpát-medence található ez kb. $80 \text{ km} \times 80 \text{ km}$ -es felbontásnak felel meg). Az adatsorok napi időbeli felbontással rendelkeznek és 00 UTC⁵³-re vonatkoznak. *Balsamo és munkatársai (2015)* kimutatták, hogy az ERA-Interim/Land modellben integrált H-TESSSEL-séma bevezetésével a talajnedvesség $0,23 \text{ m}^3/\text{m}^3 - 0,24 \text{ m}^3/\text{m}^3$ között mozgó éves globális átlaga nem változott az ERA-Interimhez képest, viszont a térbeli változékonysága jelentősen nőtt, így lokális kérdések megválaszolására alkalmasabb lett. Az adatok regisztrációt követően letölthetők netCDF vagy GRIB formátumban az ECMWF honlapjáról (*ECMWF, Public Datasets, 2018*). Az adatbázisok főbb tulajdonságait a **2. táblázat** foglalja össze.

2.2.2. A TESSSEL- és a H-TESSSEL-modell

Az ECMWF új, H-TESSSEL nevet viselő földfelszíni modelljét azért vezette be, hogy ez előzőleg alkalmazott TESSSEL-sémát felváltva annak gyengeségeit és hiányosságait ellenpontozza (*Balsamo et al., 2009*).

A TESSSEL-modell összesen 8 eltérő felszín típust különít el, hatot szárazföld (csupasz talaj, gyér és sűrű növénytakarójú területek, intercepciós réteg, árnyékos és havas területek) és kettőt vízfelszín (nyílt és fagyott vízfelület) felett. A modell vertikálisan 4 réteget foglal magába, melyek alsó határai rendre 7, 21, 72 és 189 centiméteres mélységnél helyezkednek el. A legfelső réteget akár egy réteg hó is takarhatja. Négy réteg alkalmazása még pont ideális ahhoz, hogy túlzottan nagy számításigény nélkül elegendően pontos képet kapjunk a talajban zajló folyamatokról.

A TESSSEL- és a H-TESSSEL-modellek sematikus rajza a **2. ábrán** látható. Az ábra (a) része a TESSSEL-modellben használt különféle felszín típusokat és a vizsgált rétegeket mutatja be. Az ábra (b) része pedig azt szemlélteti, hogy a parametrizációt az orográfiától és talajtextúrától is függővé tették az H-TESSSEL esetében.

A talajok hőháztartását a Fourier-féle diffúziós törvény írja le, figyelembe véve a halmazállapot-változások során bekövetkező hőmennyiség-cserét is. A modellben helyet kapott egy intercepciós réteg is, amelyben addig tud víz elnyelődni, amíg a réteg telítetté nem válik. A

⁵² International Soil Moisture Network

⁵³ Coordinated Universal Time (Egyezményes koordinált világidő)

fennmaradó vízmennyiség megoszlik a felszíni lefolyás és az infiltráció között. A felszín alatti vízárámokat *Darcy törvénye* írja le:

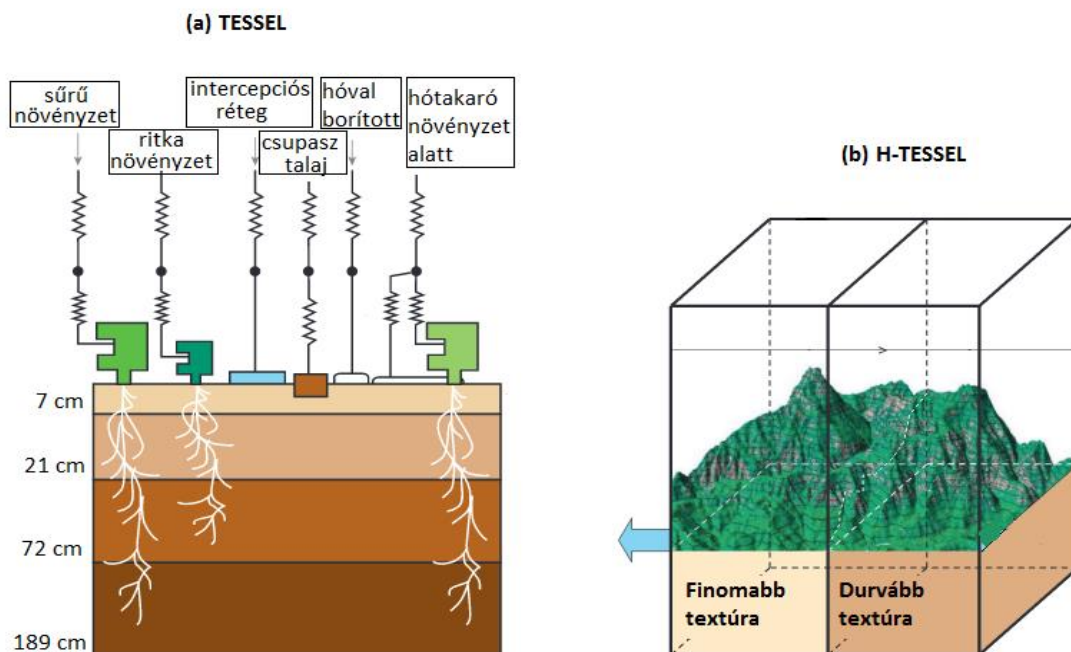
$$F_w = -\rho_w \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} - \gamma \right), \quad (2)$$

ahol F_w [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$] a víz áramsűrűsége, ρ_w [kgm^{-3}] a víz sűrűsége, λ [m^2s^{-1}] és γ [ms^{-1}] a talaj hidraulikus diffúziója és vízvezető-képessége, θ [kgm^{-3}] a talajnedvesség értéke, z [m] pedig a vizsgált réteg vastagsága.

A felső réteg meghatározó folyamati az infiltráció és az evaporáció. Ezen felül, minden réteg rendelkezik egy-egy plusz nyelőtaggal, amely a növények gyökérzetét reprezentálja. A telítetlen rétegben történő vertikális mozgásokat a *Richards-egyenlet* adja meg, amely a (3) *egyenlet* értelmében a következőképp fejezhető ki:

$$F_w \frac{\partial \theta}{\partial t} = -\frac{\partial F_w}{\partial z} + \rho_w S_\theta, \quad (3)$$

ahol t [s] a vizsgált folyamat során eltelt idő, S_θ [$\text{m}^3\text{m}^{-3}\text{s}^{-1}$] a gyökérzet által időegység alatt felvett térfogati vízmennyiség.



2. ábra. A TESSEL- és a H-TESEL-modell sematikus rajza
(*Surface Model HTESEL, 2017*)

A korábbi TESSEL-séma legnagyobb hiányossága, hogy nem veszi figyelembe a talajtextúra területi változásait, csupán egy globálisan egységes (agyagos) textúrával számol. Ez nem jelent különösebb problémát a rövidtávú időjárás-előrejelzéseknél, mert a felszínközeli hőmérséklet és a nedvességtartalom így is pontosan megbecsülhető, de a hosszútávú klimatológiai vizsgálatoknál fontos, hogy pontos talajnedvesség-tartalmat lehessen a mérési adatsorokból meghatározni. A TESSEL-séma hibáinak kiküszöbölésére a séma parametrizációs egyenleteinek felülvizsgálata jelentette a megoldást, ami az új H-TESSSEL séma bevezetéséhez vezetett (*Balsamo et al., 2009*). A szintén 4 réteget tartalmazó H-TESSSEL sémát *Balsamo és munkatársai* (2009) fejlesztették ki. A TESSEL-sémához képest bevezetett legnagyobb változások a következők:

- térben változó talajtextúra alkalmazása,
- a Clapp-Hornberger-parametrizáció helyettesítése a van Genuchten-formulákkal a talaj vízvezető-képességének leírására,
- a talaj infiltrációkapacitása talajtípustól és a helyi domborzati viszonyoktól való függővé tétele, amely miatt a lefolyás nem állandó.

A Clapp-Hornberger-féle és a van Genuchten-féle formulákkal a talaj vízvezető-képessége becsülhető. A kettő közötti különbség az, hogy utóbbi rendelkezik számos talajtextúrától függő változóval.

A kutatók két, éghajlatát tekintve szélsőséges földrajzi területen vizsgálták az új formalizmus beválását. Az új modell elődjéhez képest egyaránt javulást mutatott boreális erdőségi területek és a Szahara felett is. Megállapították, hogy a javasolt változtatások elősegítik az adatasszimilációt, ezáltal még a földfelszíni modellek is pontosabbá tehetők (*Balsamo et al., 2009*).

A korábban bemutatott adatbázisok közül a műholdas távérzékelésen alapuló H-SAF SM adatsor létrehozatalánál is a H-TESSSEL-sémát alkalmazták.

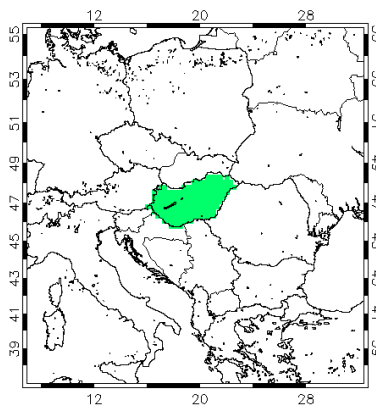
3. FELHASZNÁLT ADATOK ÉS MÓDSZEREK

Munkám során a 2.1-es fejezetben bemutatott ESA CCI SM v03.2 adatbázist, valamint a 2.2 fejezetben bemutatott ERA-Interim és az ERA-Interim/Land adatbázisok által szolgáltatott talajnedvesség-adatokat vizsgáltam. Ezen adatbázisokat hasonlítottam össze Közép-Európára vonatkozóan, főként a Kárpát-medencére fókuszálva és azok alapján különböző éghajlati vizsgálatokat végeztem. Továbbá, meghatároztam a talajnedvesség átlagos éves meneteit havi adatok alapján Magyarországra vonatkozóan. Ezen kívül két magyarországi kísérleti állomás *in situ* adatsoraival is összevettem az adatbázisokat.

A térbeli struktúrákat térképesen jelenítem meg, az idősorokat vonaldiagram segítségével mutatom be.

3.1. A vizsgált terület kiválasztása

Munkám során az eddigiekben bemutatott adatbázisok közül az ESA CCI SM 03.2-es verziójú adatbázisból a kombinált napi talajnedvesség-adatokat vettem figyelembe 1979. január 1-jétől 2015. december 31-éig. Az ERA-Interim és az ERA-Interim/Land adatbázisok adatait pedig az eredeti adatbázisok natív felbontása helyett háromszor finomabb, azaz $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ -os rácsra az ECMWF MARS⁵⁴ rendszere által interpolálva értékeltem ki, hogy azokat pontosabban össze tudjam vetni a műholdas távérzékeléssel nyert talajnedvesség-értékekkel. Az adatokat tartalmazó állományok feldolgozására IDL⁵⁵ nyelven írtam programkódokat.



3. ábra. A talajnedvesség-adatbázisok feldolgozása során alkalmazott térképi kivágat

⁵⁴ Meteorological Archival and Retrieval System

⁵⁵ IDL – Interactive Data Language (Harris Geospatial Solutions Co.)

Az ESA CCI SM v03.2 esetében alkalmazott közép-európai térképi kivágat határoló koordinátái: É.sz.: $37,125^\circ$ - $55,125^\circ$ és K.h.: $7,125^\circ$ - $33,125^\circ$. Az ERA-Interim és az ERA-Interim/Land esetében alkalmazott kivágat határoló koordinátái pedig a következők: É.sz.: $36,75^\circ$ - $55,5^\circ$ és K.h.: $6,75^\circ$ - $33,75^\circ$. Az ESA CCI SM v03.2 kivágatát Mercatorvetületben a **3. ábra** mutatja be, zöld színezéssel az adatbázisok Magyarországot lefedő pixeli látható. Az ECMWF-reanalízisek esetében a kivágatot külön nem jelenítettem meg, mivel az kevésbé tér el az előbbtől.

3.2. Közvetlen mérési adatsorok

3.2.1. A hegyhátsáli *in situ* adatsor

Hegyhátsál község a Dunántúlon, Vas megyében, a Körmendi járásban található. A talajnedvességet mérő szenzor a község közelében lévő TV-torony udvarában helyezkedik el, földrajzi koordinátái a következők: É.sz.: $46,956^\circ$ és K.h.: $16,653^\circ$.

Az adatok a talaj 10 és 40 cm-es mélység között elhelyezkedő rétegre vonatkoznak és az itt lévő integrált talajnedvességet reprezentálják m^3/m^3 mértékegységben. A mérések a 2001-es év közepétől napjainkig folyamatosan zajlanak, a diplomamunkámban feldolgozott adatsor 2001. augusztus 29-étől 2017. december 31-ig bezárólag tartalmaz napi felbontású adatokat.

A méréseket a *Campbell Scientific* cég által gyártott CS615 nevet viselő víztartalom-mérő műszer segítségével végzik, melynek érzékelője méri a talajba szúrt vezetőkön áthaladó elektromágneses hullám sebességét és terjedési idejét. A vizsgált közeg (főként a talaj fizikai féleségétől) függően 600 – 1500 Hz frekvencia között üzemelő készülék működése során meghatározza a talaj dielektromos tulajdonságait, amelyek alapján következtetni lehet a talajnedvesség-tartalomra köszönhetően annak, hogy a víz és a talaj alkotórészeinek elektromos jellemzői nagyban eltérnek egymástól (*Campbell Scientific, 1995*). Az elektródák a talajban kondenzátorfegyverzeteket képeznek. Ismert, hogy egy kondenzátor C_0 kapacitása megadható a fegyverzetek között tárolt Q töltésmennyiség és a kondenzátorra jutó frekvencia hányadosaként. Ha a kondenzátor lemezei közé szigetelőanyagot helyezünk a kapacitás növelhető. Ha az így kapott kapacitás C , akkor fennáll, hogy $C = C_0 \cdot K$, ahol K arányossági tényező a közeg relatív dielektromos állandója vagy permittivitása. K permittivitás megadható a közeg (itt a talaj) és a levegő dielektromos állandójának hányadosaként. A szenzor méri a

talajon áthaladó elektromágneses hullám t terjedési idejét és a vizsgált közegre vonatkozó c_t terjedési sebességét. Ezen mennyiségekre fennálló (4) egyenlet alapján egyszerűen számolható a talajra vonatkozó K_{talaj} dielektromos állandó értéke, ahol az összefüggésben szereplő L paraméter az elektróda hossza.

$$\sqrt{K_{talaj}} = c_t \frac{t}{L} \quad (4)$$

A dielektromos állandó ismeretében következtetni lehet a víztartalomra, hisz a víz molekuláris szerkezetéből adódó erős dipólhatás miatt a nedves talaj ezen elektromágneses paramétere nagyobb, mint a száraz talajé (*van der Velde, 2010*). A módszer előnye, hogy csupán a műszer fizikai kialakításától függ a vizsgált talajtér fogat geometriai kiterjedése, így a térfogatot rétegekre osztva lehetőség nyílik a talajnedvesség vertikális eloszlásának vizsgálatára (*Rajkai, 2004*).

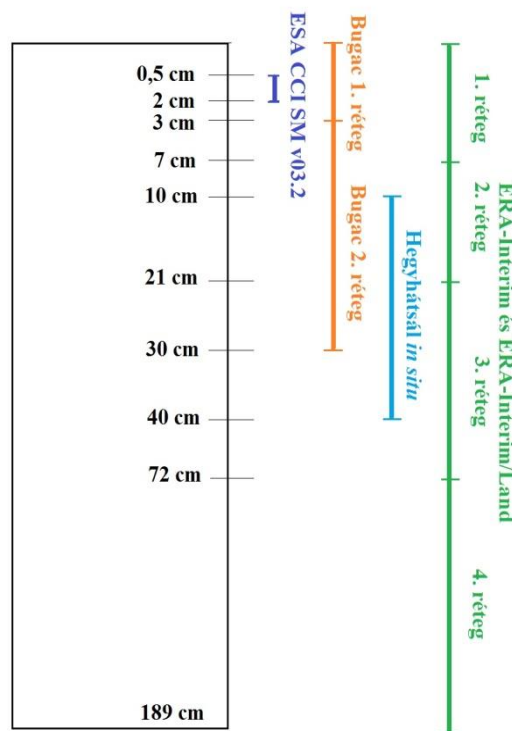
A Hegyhátsálon alkalmazott műszer ily módon térfogati talajnedvesség meghatározására alkalmas. A műszer szenzora két 30 cm hosszú rozsdamentes acélrúdból áll, amelyeknek átmérője 3,2 cm és egymástól ugyancsak 3,2 cm távolságra kell a rudakat elhelyezni. A műszer mérési hibája adott mérési helyszín talajtextúrájához kalibrálva $\pm 2\%$, a pontossága pedig $10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^3$. A mérés minőségét befolyásoló tényezők közé sorolható az adott talaj fizikai félesége, a talajoldatban lévő szabad ionok mennyisége és a talaj szervesanyag-tartalma. A fizikai féleséget illetően főként azoknál a talajoknál kell a kalibrációt fokozott figyelemmel elvégezni, amelyek viszonylagos agyagtartalma meghaladja a 30%-ot. Az agyagos talaj és a szerves anyagok nedvességtartalma magasabb, ezért a kibocsátott elektromágneses jel visszaérkezve az érzékelőhöz nagyobb mértékben csillapodik, mivel az agyagban és a szerves anyagokban foglalt vízmolekulák polarizációjára több energia fordítódik (*Campbell Scientific Inc., CS615 Water Content Reflectometer Instruction Manual, 1995*).

3.2.2. A bugaci *in situ* adatsor

Bugac település a Duna-Tisza-közén, Bács-Kiskun megyében a Kiskunfélegyházi járásban található. A településen talajnedvesség-mérések a Szent István Egyetem Növénytani és Ökofiziológiai Intézetének irányítása alatt 2002 óta folynak (*Nagy et al., 2007*). A diplomamunkám során felhasznált adatsor adatai az adatgyűjtő eszköz cseréje miatt 2005. június 24-től 2017. december 31-ig foglal magába adatokat. A mérések során használt műszer egy CS616-os víztartalom mérő (*Campbell Scientific Inc., 2018*). A bugaci adatsor két

rétegben (0-3 cm és 0-30 cm között) tartalmaz talajnedvesség-értékeket, tehát a talaj 10 cm-rel magasabban elhelyezkedő szeletére ad értékeket. További fontos eltérés, hogy az adatok itt százalékosan szerepelnek, tehát arról nyújtanak információt, hogy a telítési állapothoz képest mekkora arányban található víz az egységnyi térfogatú talajban.

A **4. ábra** bemutatja azt, hogy a számítások során felhasznált adatbázisok a talaj mely szeletét reprezentálják és egymáshoz hogyan viszonyulnak. A talaj legvékonyabb szeletét a műholdas adatbázis reprezentálja, míg legátfogóbb képet a talajnedvesség profiljáról a reanalízisek nyújtanak.



4. ábra. Sematikus talajprofil és az adatbázisok rétegei

3.3. Az adatsorok összehasonlításának módszertana

Az adatsorok számszerű összehasonlítása érdekében meghatároztam az adatsorokat jellemző legfontosabb statisztikákat, azaz az átlagos eltérést (angolul: *bias*), a négyzetes középértékhibát (RMSE) és a korrelációs együttható értékét.

Az átlagos eltérés a két adatsor átlagának (itt számtani közepének) a különbsége, a mérés hibájáról, torzításáról nyújt információt. Meghatározásának módját az (5) egyenlet szemlélteti:

$$bias = \sum_{i=1}^n X_i - \sum_{i=1}^n Y_i, \quad (5)$$

ahol X és Y a vizsgált minta, n pedig a minták elemszáma, amelyeknek a statisztika meghatározása során meg kell egyezniük, ahogyan a lent vázolt négyzetes középértékhiba és korreláció számításánál is.

A négyzetes középértéket a (6) egyenletben leírt módon számítandó ki:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - Y_i)^2}{n}}. \quad (6)$$

Az R^2 pedig nem más, mint a lineáris korrelációs együttható négyzete, amely a (7) egyenlet alapján határozható meg:

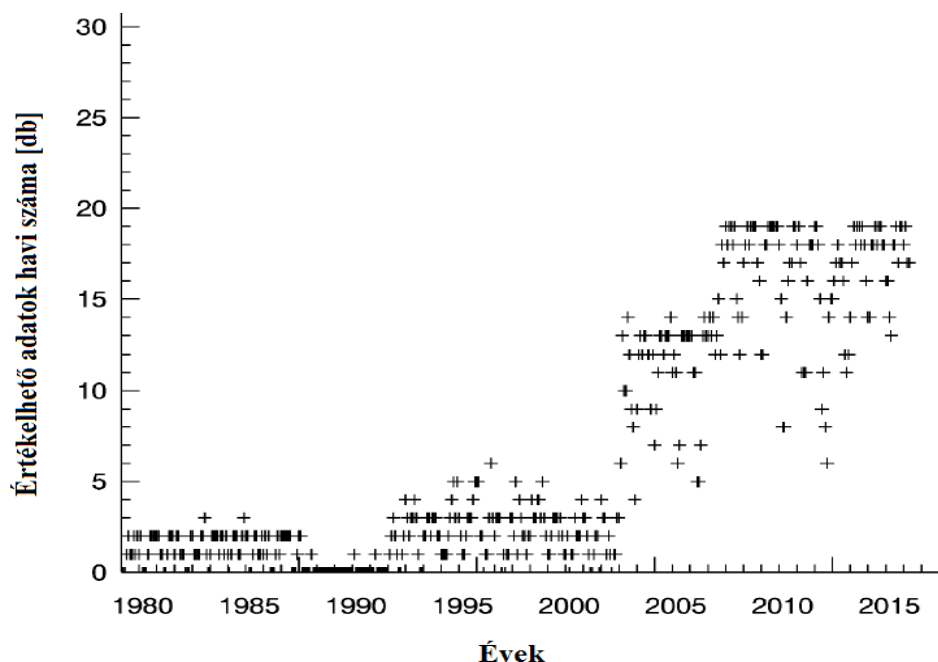
$$R(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{D(X)D(Y)} = \frac{E([X - E(X)][Y - E(Y)])}{D(X)D(Y)}, \quad (7)$$

ahol $R(X, Y)$ a vizsgált adatsorok korrelációja, ami megegyezik az adatsorok $cov(X, Y)$ kovarianciájának illetve $D(X)$ és $D(Y)$ szórásainak hányadosával. A kovarianca pedig annak a várható értéke, hogy a két minta várhatóan mennyire tér el saját várható értékétől. Értéke bármekkora lehet, a korreláció ezzel szemben egy 0 és 1 közé eső valós szám, mivel a kovariancia szórással való normált értéke.

4. EREDMÉNYEK

4.1. Az ESA CCI SM v03.2, az ERA-Interim és az ERA-Interim/Land adatbázisok alapján végzett vizsgálatok

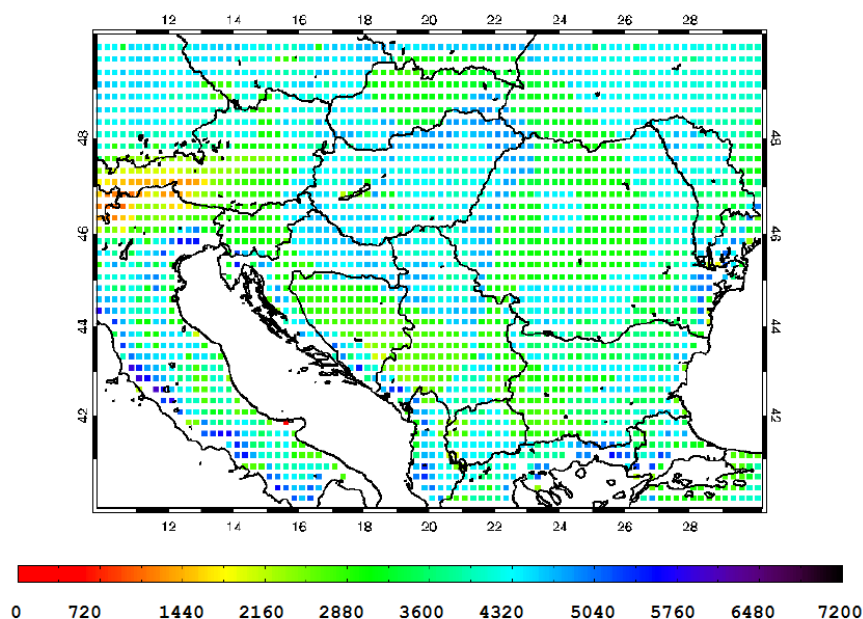
Az ESA CCI SM v03.2 adatbázis kapcsán, műholdas távérzékeléssel nyert adatbázisról lévén szó fontos volt megvizsgálni, hogy az idő előrehaladtával és ezzel párhuzamosan újabb műholdaknak a mérésekbe való bevonásával milyen ütemben gyarapodott az értékelhető adatok száma. Felvetődött az a kérdés is, hogy az adatsorban foglalt időszak elején milyen számban található adatok. Ennek érdekében meghatároztam a teljes közép-európai kivágatra és a teljes időszakra a havi szinten értékelhető adatok mennyiségét. A számításaim során csak azokat a pixeleket vettem figyelembe, amelyek esetében az állományhoz csatolt minőségi jellemző megfelelt a műholdas távérzékeléssel szemben támasztott elvárásoknak, azaz az adott napi talajnedvesség-érték nem hóval vagy jéggel, illetve sűrű növénytakaróval borított területre vonatkozott. Az eredményt bemutató **5. ábrán** az látható, hogy az 1980-as évek végén jelentős adathiány tapasztalható, a vizsgált időszak elején pedig kb. 1988-ig az egy-egy pixelre eső átlagos havi adatmennyiség igen csekély.



5. ábra. Az ESA CCI SM v03.2 adatbázis értékelhető adatainak havi száma, Közép-Európa

Kiseb ugrás mutatkozik a következı évtized első éveiben, 2002-tıl fogva pedig számottevıen nı az adatmennyiség javarészt az aktív szenzorok bevonásának köszönhetıen. A növekedés háttérében egyértelmıen a technikai fejlődés és az egyre több mőholdas szenzor alkalmazása áll, lásd **1. ábra**.

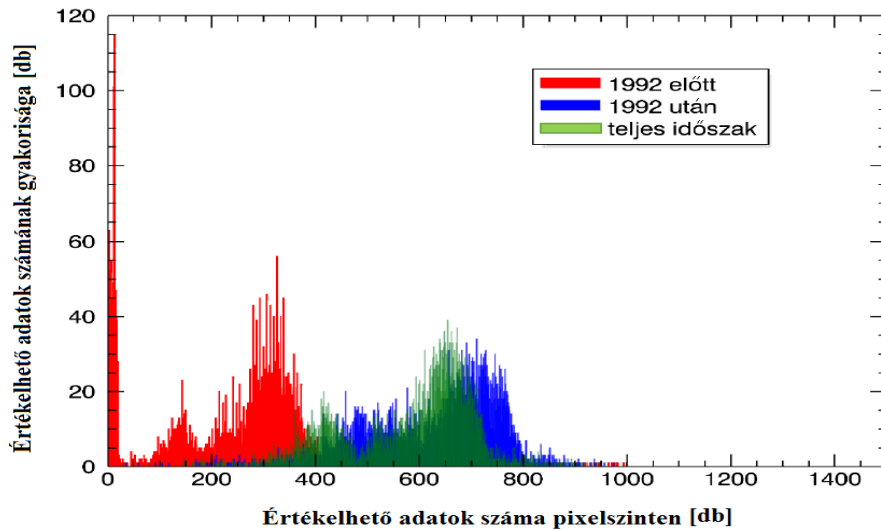
Az adatok számának területi eloszlását is megvizsgáltam, hiszen egy adott földrajzi terület felett értékelhetı mérési adatok száma leginkább a felszınborítottságtól és a domborzati viszonyoktól függ. A **6. ábrán** látható az egyes pixelekre esı értékelhetı adatok száma az 1992-tıl 2015-ig terjedı 26 év hosszúságú idıszakra, mert ez az idıszak foglal magába elegendıen nagy számban adatokat. Az ábrán szembetúnı, hogy az Alpok magasabb vonulatai felett nem használható kellı megbízhatósággal az adatsor, a Kárpátok, a Dinári-hegység és az Appenninek esetében pedig közepes mennyiségő értékelhetı adat található. Az adatsor legjobban az alacsonyabb tengerszint feletti magassággal rendelkező és egyenletesebb topográfiájú területeken szolgáltat nagy számban megbízható mérési eredményeket.



6. ábra. Az értékelhetı adatok számának területi eloszlása a vizsgált térségben (1992 – 2015)

Kiválasztva az 1992-es évet – mivel ez volt az első teljes év, hogy a kombinált produktumban már helyet kaphattak az aktív szenzorok által nyert adatok is – meghatároztam, hogy 1992 előtt és után egy pixelre átlagosan hány darab értékelhetı mérési adat jut, és ezek milyen gyakorisággal fordulnak elő, melyet a **7. ábra** szemléltet. A meghatározás során a minıségi jellemző szerinti szűrés tekintetében ugyanazokat az értékeket vettem figyelembe, mint az elıző ábra elkészítésénél. Az 1992-es év elıtti idıszakban nagyon nagy gyakoriságban

volt nagyon kis mennyiségű adat, ezt a 0-50 közötti darabszámnál kiugró csúcs jelzi. Az 1992-től 2015-ig terjedő időintervallumban ellenben az értékek jobbra tolódásából arra következtethetünk, hogy számottevően nőtt az adatmennyiség. A teljes időszak hisztogramja pedig közelebbi egyezést mutat a vizsgált időszak második intervallumával.



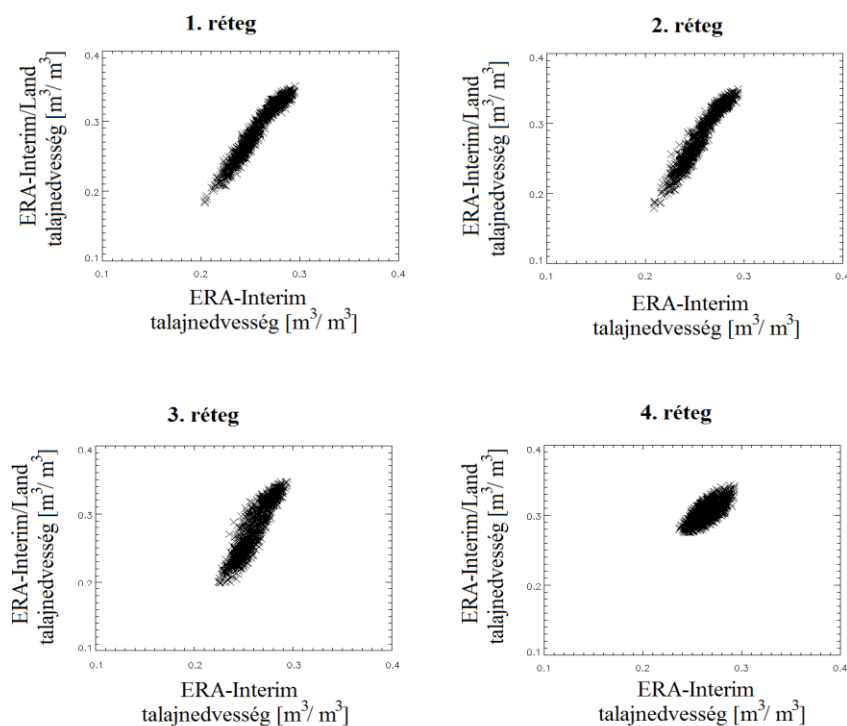
7. ábra. A pixelszinten értékelhető kombinált adatok mennyiségének hisztogramja avizsgált térségben (1979 – 2015)

Az ERA-Interim és az ERA-Interim/Land adatait napi felbontásban vettem figyelembe és mindkét adatsor esetén az elérhető leghosszabb időintervallumon vizsgáltam, így az ERA-Interim esetében 1979-től 2017-ig, az ERA-Interim/Land adatait pedig 1979-től 2010-ig használtam fel. A talajnedvesség értékét mind a 4 rétegre vonatkozóan vizsgáltam, azokat különböző módon hasonlítottam össze a többi adatsorral. Mivel a reanalízis adatbázisok esetében nem tapasztalható adathiány ezért nem tértem ki az elérhető adatmennyiség időbeli és területi változásainak elemzésére.

Megvizsgáltam, majd egy-egy pont-pont diagramon ábrázoltam (**8. ábra**) a két adatsor egyes rétegeinek egymással való kapcsolatát. A ponthalmaz előállításánál minden, az ismertett közép-európai kivágatban szereplő pixelt figyelembe vettem a két adatsor átfedő időszakában, azaz 1979-től 2010-ig. A grafikonok x tengelyein az ERA-Interim, az y tengelyein pedig az ERA-Interim/Land adatbázisban szereplő értékeket tüntettem fel. A rétegenkénti egyezés mind a 4 esetben nagyon magas volt, az értékek halmazának elemi egy határozott, az x-y tengellyel 45°-os szöget bezáró egyenessel párhuzamosan helyezkednek el. Megfigyelhető, hogy az ERA-Interim/Land értékészlete kb. 0,5 - 1 m³/m³-rel nagyobb, a maximum értékei 0,3 m³/m³ és 0,4 m³/m³ között helyezkednek el, míg az ERA-Interim értékei alacsonyabb

talajnedvesség-tartalmat mutatnak.

Ezt követően kiszámítottam az adatsorok egymáshoz való viszonyát jellemző legfontosabb statisztikákat, így az átlagos eltérés értékeit, a négyzetes középértékhibájukat és a lineáris korrelációjukat szintén az átfedő időszakra. Az átlagos eltérés, RMSE és R^2 értékeket pedig a **3. táblázat** tünteti fel.



8. ábra. Az ERA-Interim és az ERA-Interim/Land adatbázisok kapcsolata a Közép-Európai térségben, 1. réteg: 0-7 cm, 2. réteg: 7-21 cm, 3. réteg: 21-72 cm, 4. réteg: 72-189 cm (1979 – 2010)

3. táblázat. Az ERA-Interim és ERA-Interim/Land adatbázisok kapcsolatának statisztikai

	1. réteg	2. réteg	3. réteg	4. réteg
R^2	0,879	0,888	0,842	0,897
RMSE (m^3/m^3)	0,053	0,052	0,050	0,056
BIAS (m^3/m^3)	-0,050	-0,045	-0,032	-0,062

A korrelációs együttható négyzetének magas értékei arra utalnak, hogy a kapcsolat igen erős az adatsorok egymásnak megfeleltethető rétegei között. A négyzetes középértékhibáik azonban átlagban $0,013 m^3/m^3$ -rel magasabbak, mint a műholdas adatbázisoktól elvárt $0,04 m^3/m^3$ -es hibahatár. Az átlagos eltérés előjele mind a 4 rétegben negatív, ami az (5) egyenlet alapján megerősíti azt a megállapítást, hogy az ERA-Interim kisebb talajnedvesség-tartalommal bír minden rétegben.

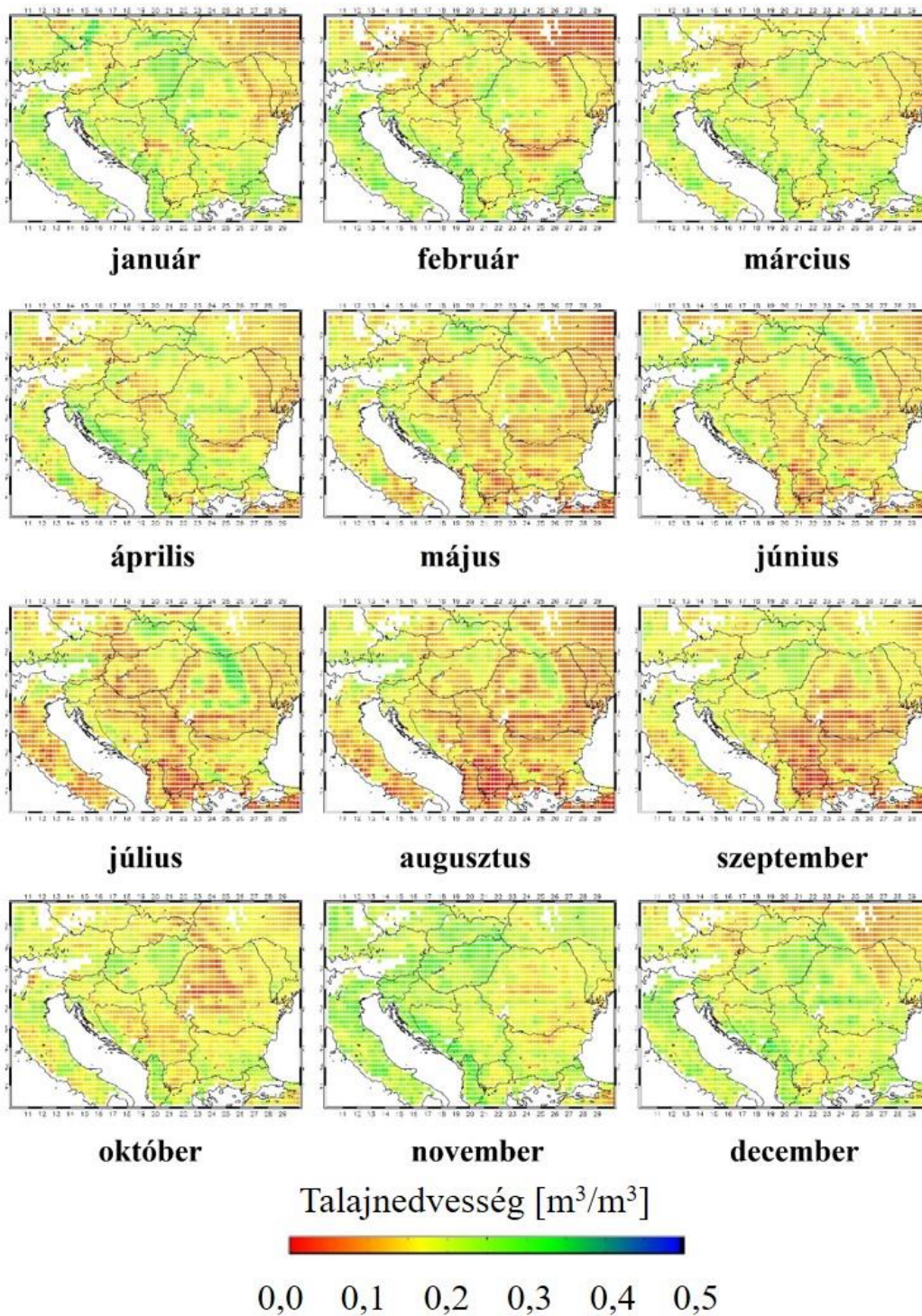
4.2. Éghajlati vizsgálatok: sokéves havi átlagok

A következő lépésben a napi adatok alapján előállítottam a teljes kivágatra vonatkoztatott sokéves havi átlagokat tartalmazó mezőket mindhárom adatbázis esetén és ezeket az adatok térbeli felbontásának megfelelően $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ felbontású rácson ábrázoltam. Az átlagolás alapjául az 1980-tól 2010-ig terjedő normálidőszakot vettem, mivel ezt az időszakot mindhárom adatbázis magában foglalja. A mezők előállítása közben az ESA CCI SM v03.2 esetében az adatsor összes napjára figyelembe vettem a vizsgált pixelek talajnedvesség-méréséhez tartozó minőségi jellemző értékét. Csak azokat a talajnedvességi adatokat használtam fel a számítások során, ahol a mérés nem hóval borított vagy nem 0°C hőmérséklet alatti területen ment végbe, illetve adott időben (napon) és földrajzi helyen a sűrű növénytakaróval borított területeket is kizártam az átlagolásból.

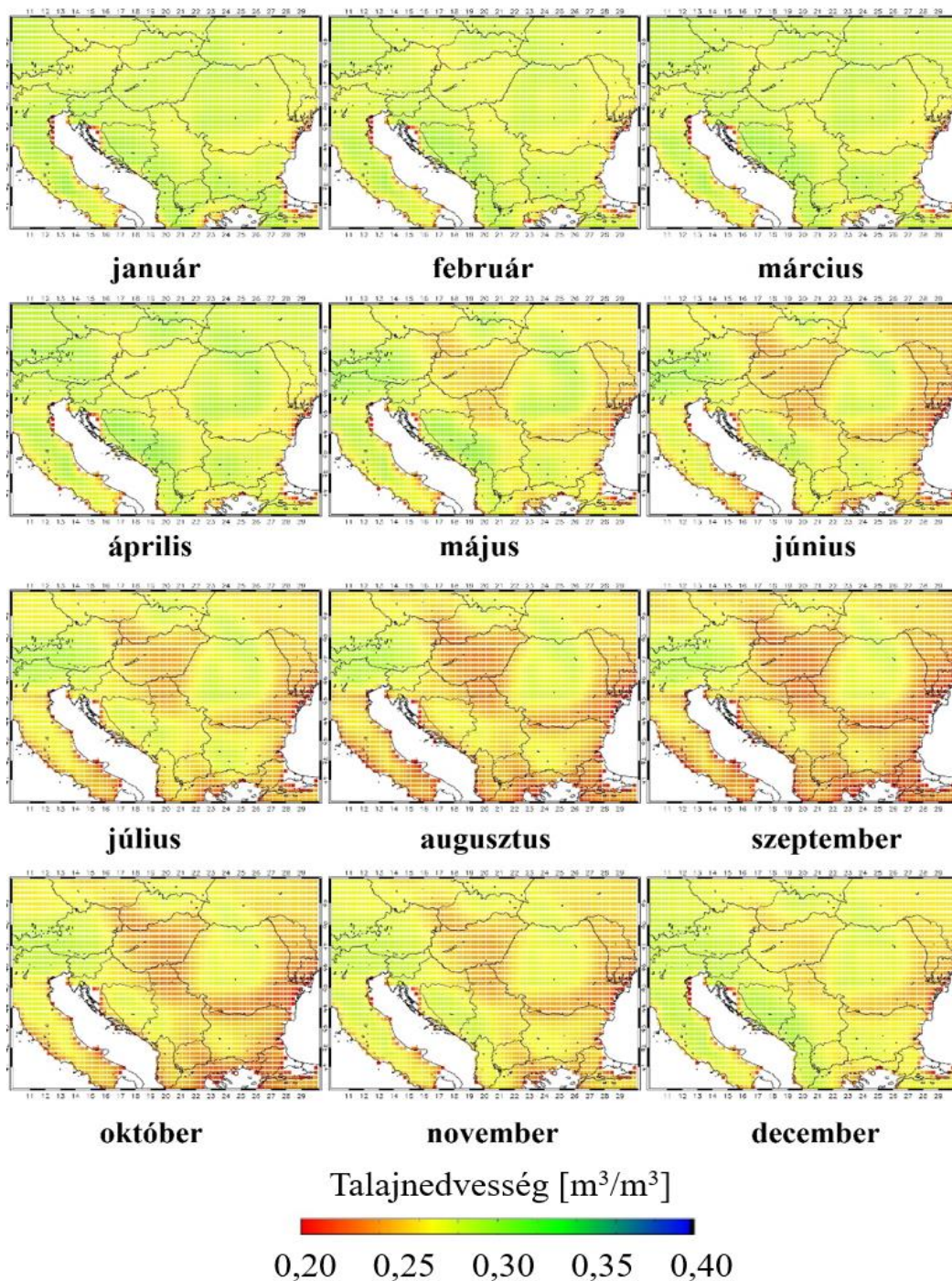
Az ERA-Interim és az ERA-Interim/Land esetében a megjelenítéshez a talaj legfelső, 0 cm-től 7 cm-ig terjedő rétegén végeztem el a számításokat. A kapott havi átlagokat a különböző adatbázisok esetén egy kisebb, a Kárpát-medencét is magába foglaló térképi kivágaton jelenítettem meg, amelyet **9.**, a **10.** és a **11. ábrák** mutatnak be (ahol fontos megjegyezni, hogy az ábrák skálázása nem egységes).

Az egyes adatsorok alapján kapott 12 hónap havi átlagaiban előforduló abszolút minimum- és maximumértékekhez igazítottam a színezést, annak érdekében, hogy a legmegfelelőbb módon tudjam szemléltetni a talajnedvesség havi átlagban vett változékonyságát a Kárpát-medence területén. Az ESA CCI SM v03.2 skálája $0,0 - 0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$, az ERA-Interim adatbázisé $0,2 - 0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$, míg az ERA-Interim/Land adatbázisé pedig $0,2 - 0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ közé esik.

Az ábrák jól tükrözik a talajnedvesség éves menetét, a téli és a kora tavaszi hónapokban magasabb, míg májustól egészen szeptemberig jelentősen alacsonyabb a talaj felső pár centiméteres rétegének nedvességtartalma. Az átlagos havi területi változékonyság is megfigyelhető, a magasabb talajnedvességgel bíró hónapokban inkább a síkvidéki területek, míg a szárazabb hónapokban a hegyvidékek esetében tapasztalhatók magasabb értékek. A száraz hónapokban szépen kirajzolódnak az Alpok és a Kárpátok vonulatai. Az Alpok térségében a műholdas adatsor értékelésénél jelentkező adathiány itt is megfigyelhető, míg ugyanerre a területre az ERA-adatbázisok főként a vegetációs időszakon kívül eső hónapokra adtak magas értékeket.



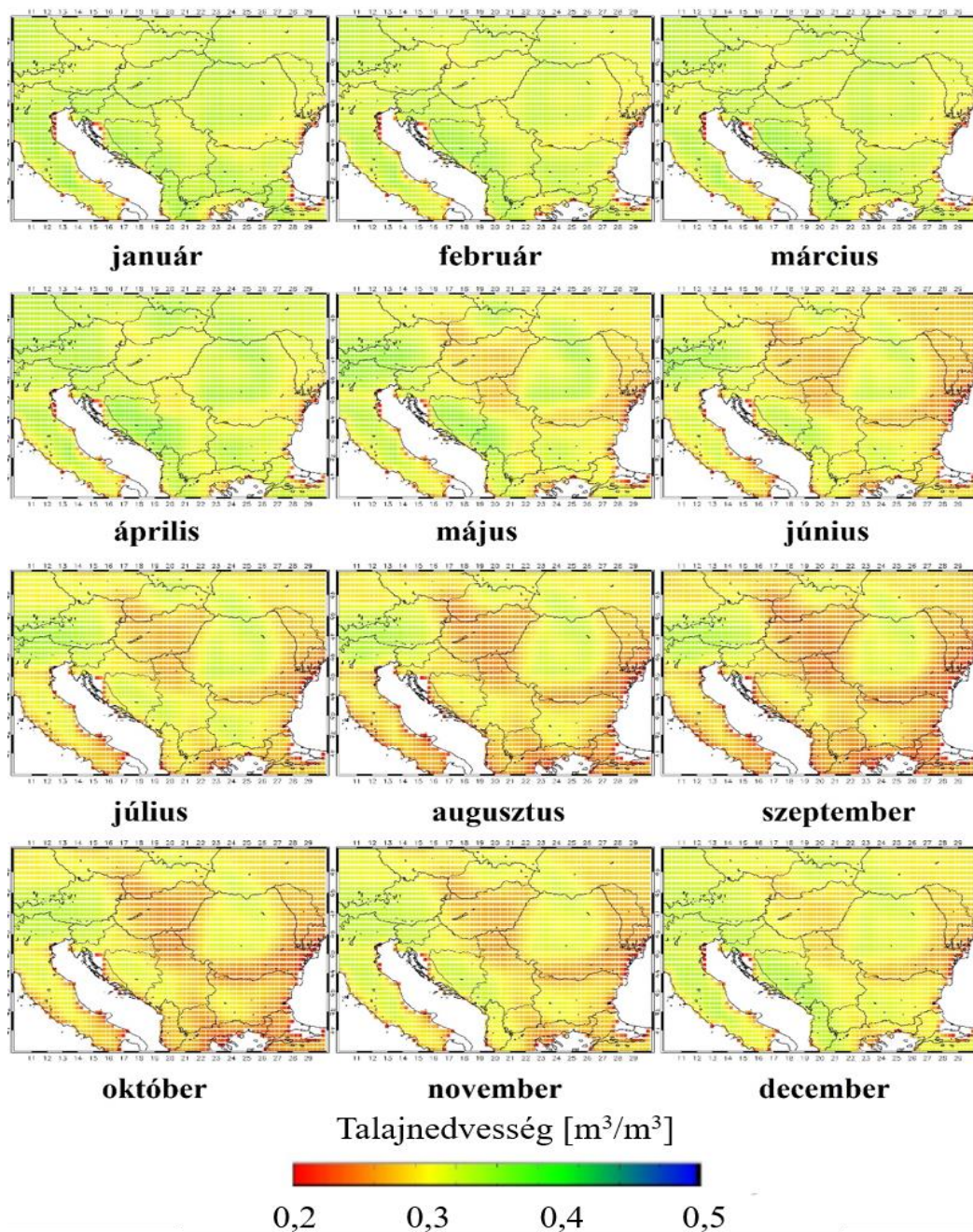
9. ábra. Az ESA CCI SM v03.2 adatbázis alapján meghatározott sokéves havi átlagos talajnedvesség (1981 – 2010)



10. ábra. Az ERA-Interim (1980 – 2010) adatbázis alapján meghatározott sokéves havi átlagos talajnedvesség a legfelső rétegben (0-7 cm)

Az ESA és a reanalízis adatbázisok között markáns különbség mutatkozik a legszárazabb hónapok kialakulásának idejében. Az előbbi esetében egyértelműen július és augusztus bír a legalacsonyabb értékekkel, míg a **9. és 10. ábrákból** arra következtethetünk, hogy az ERA adatok alapján a talajnedvesség a minimumát időben egy-két hónappal eltolva,

augusztus, szeptember és október folyamán éri el. A talajnedvesség térbeli mintája is más, a reanalízisek a téli hónapokban kiegyenlítettebbek, viszont a nyári időszakra kiemelten a Balkán-félszigeten egy jóval szárazabb felső talaj képét vetítik. Magyarországra vonatkozóan pedig a két reanalízis között az a legfőbb eltérés, hogy az Interim adatbázisból meghatározott átlagok kevésbé magas talajnedvességet adnak.

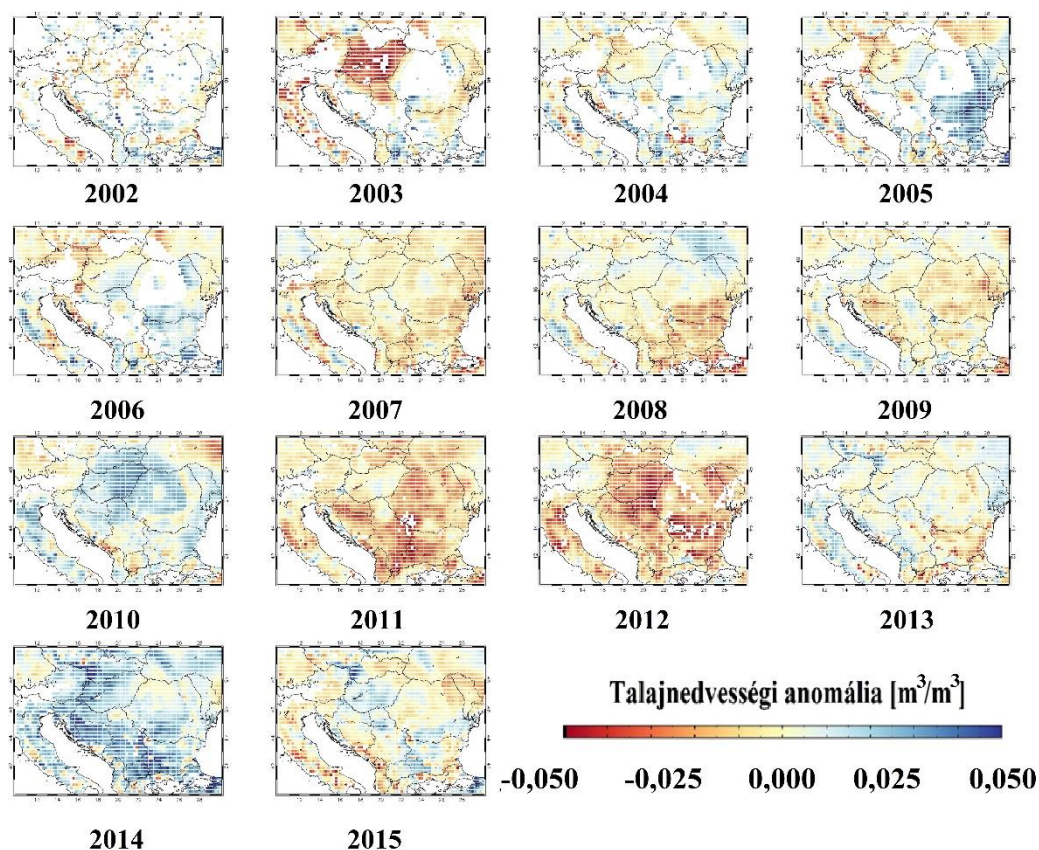


11. ábra. Az ERA-Interim/Land (1980 – 2010) adatbázis alapján meghatározott sokéves havi átlagos talajnedvesség a legfelső rétegben (0-7 cm)

4.3. Éghajlati vizsgálatok: anomáliamezők

További cél volt az adatsor alapján detektálni a szélsőségesen anomáliás viselkedést mutató éveket. Az anomáliavizsgálatok célterülete szintén a Kárpát-medencének tágabb környezete. Az éves anomáliamezők meghatározásánál referenciaként a 2002-től 2015-ig terjedő időszakot választottam, mert ebben az intervallumban volt kellően nagy a műholdas távérzékeléssel nyert adatok mennyisége. A műholdas talajnedvesség-adatok pixelszinten történő minőségi jellemző szerinti szűrését a már ismertetett módon az anomáliák meghatározásánál is elvégeztem. Az adatsorban foglalt időszak elején lévő adathiány miatt csak a 2002 és 2015 között lévő évek éves anomáliamezéjeit mutatom be, melyet a **12.**, a **13.** és a **14. ábrák** szemléltetnek. A pontos összehasonlítás miatt a reanalízisek esetében a referencia-időszakokat szintén 2002-től vettem és záróévekként az egyes adatsorokban foglalt utolsó éveket tüntettem ki, tehát az ESA CCI SM v03.2 esetében 2015-ig, az ERA-Interim esetében 2017-ig, az ERA-Interim/Land esetében pedig 2010-ig. Az intervallum ilyen módon történő megválasztásával ugyan az egyes adatbázisokból nem összehasonlíthatók, a minél tágabb időszakok kijelölése azért szükséges, hogy több évre vonatkozó eredményeket lehessen bemutatni.

A talajnedvességi anomália minden vizsgált évben mindhárom adatbázis alapján végzett számítások során $-0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ és $0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ között mozog. A talajnedvesség vonatkozásában szélsőségesen száraz évek a léghőmérséklet tekintetében a közismerten extrém hőhullámos évek, így 2003, 2011 és 2012, további száraz évek pedig 2002 és 2017 voltak. Pozitív anomália ezzel ellentétben a 2010-es és a 2014-es évek során jelentkezik. Az anomáliamezők szembetűnően visszaadják azt is, hogy melyik két-két egymást követő évben következett be ellentétes irányú változás a talajnedvességben. Ilyen hirtelen változások történtek 2002-ről 2003-ra és 2010-ről 2011-re fordulóra, amikor is a talajnedvességi anomália erősen pozitívból erősen negatívba csapott át. A 2009-es évhez képest azonban 2010-re a változás épp fordított volt, egy relatív száraz évet nedvesebb követett.



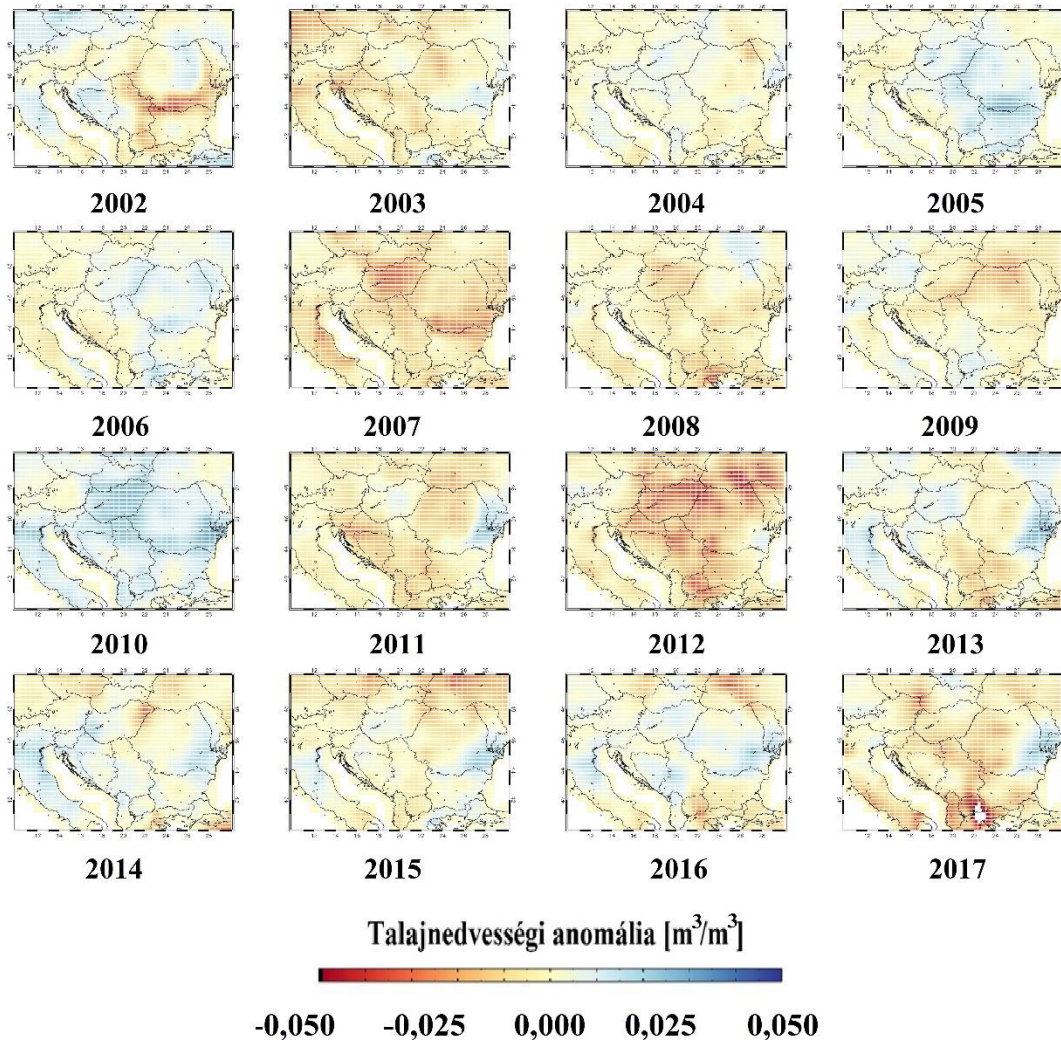
12. ábra. Az ESA CCI SM v03.2 adatbázis alapján meghatározott éves anomáliák (referencia-időszak: 2002 – 2015)

Kern és munkatársai (2017) műholdas távérzékeléssel nyert mérési adatok alapján előállított vegetációs indexeket meteorológiai adatokkal összevetve meghatározták a szélsőséges anomáliával rendelkező éveket a Kárpát-medence országaira, az időjárás vegetációra gyakorolt hatása alapján. Az ily módon történő összehasonlítás azért fontos, mert az anomális viselkedés mértéke nagyban függ az integrálási időszaktól. Több meteorológiai állapothatározó és származtatott index figyelembe vételével pontosabb következtetések vonhatók le. Vizsgálataik során a távérzékelte adatokat a NASA Terra nevet viselő műholdjának fedélzetén lévő MODIS⁵⁶-szenzor szolgáltatja. A vizsgálatok Közép-Európára vonatkoznak, a számításaik során a referencia-időszakot pedig a 2000-től 2014-ig terjedő időszak képezte. A meteorológiai adatokat (napi középhőmérséklet és csapadékösszeg) a FORESEE⁵⁷-adatbázis nyújtotta, amely 1951-től 2100-ig tartalmaz adatokat, így a mérések mellett prognosztizált értékek is szerepelnek benne. A számításokat 6 ország, Magyarország, Bosznia-Hercegovina,

⁵⁶ MODerate resolution Imaging Spectroradiometer

⁵⁷ Open Database FOR ClimatE Change-Related Impact Studies in CEntral Europe

Csehország, Horvátországa, Szlovákia é Szlovénia területére végezték el a felszíntípus alapján mezőgazdasági termelés alá vont, füves területek, valamint lombhullató és örökzöld erők elkülönítésével.



13. ábra. Az ERA-Interim adatbázis alapján meghatározott éves anomáliák (referencia-időszak: 2002 – 2017) a legfelső rétegben (0-7 cm)

A MODIS-szenzor produktumai közé tartozó indexek (NDVI⁵⁸, EVI⁵⁹, LAI⁶⁰, FPAR⁶¹, GPP⁶², és NPP⁶³) finom térbeli felbontása (500 m × 500 m) révén lehetőség nyílt olyan pixelek alkalmazására, amelyek egyféle talajtípust reprezentálnak.

⁵⁸ Normalized Difference Vegetation Index

⁵⁹ Enhanced Vegetation Index

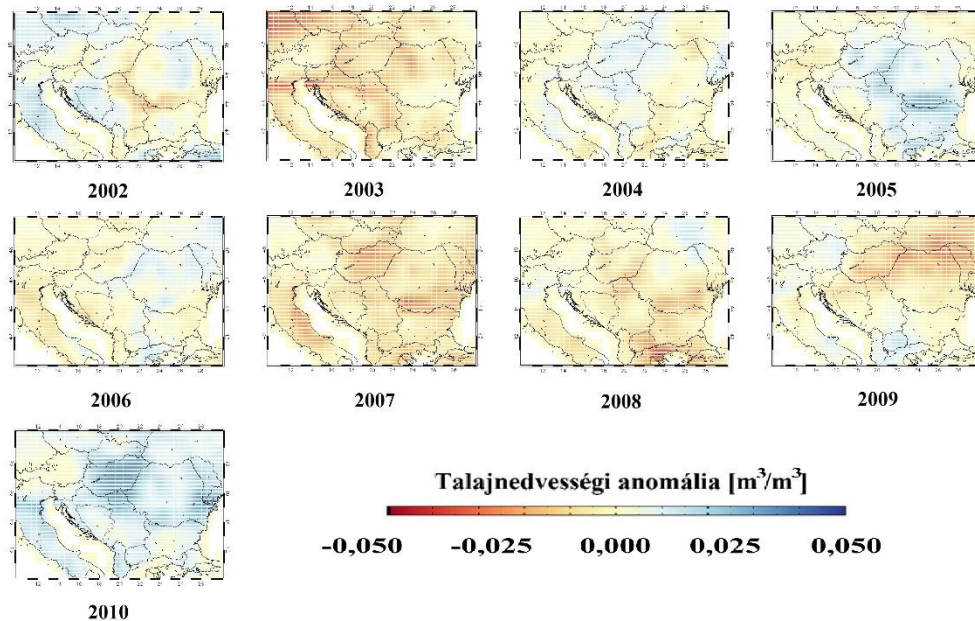
⁶⁰ Leaf Area Index

⁶¹ Fraction of Photosynthetically Active Radiation

⁶² Gross Primary Production

⁶³ Net Primary Production

A kutatók arra a megállapításra jutottak, hogy a meghatározott indexek értékei alapján negatív anomáliával bíró évek 2000, 2003 és 2012 voltak, míg pozitív anomália 2010-ben és 2014-ben volt tapasztalható, mindez az első két felszín típus esetére igaz, a bonyolultabb viselkedést tükröző erdőknél az anomáliák ily módon nem jelentkeztek. Ez egybeesik a talajnedvesség-adatbázisok alapján detektált anomáliás viselkedéssel.

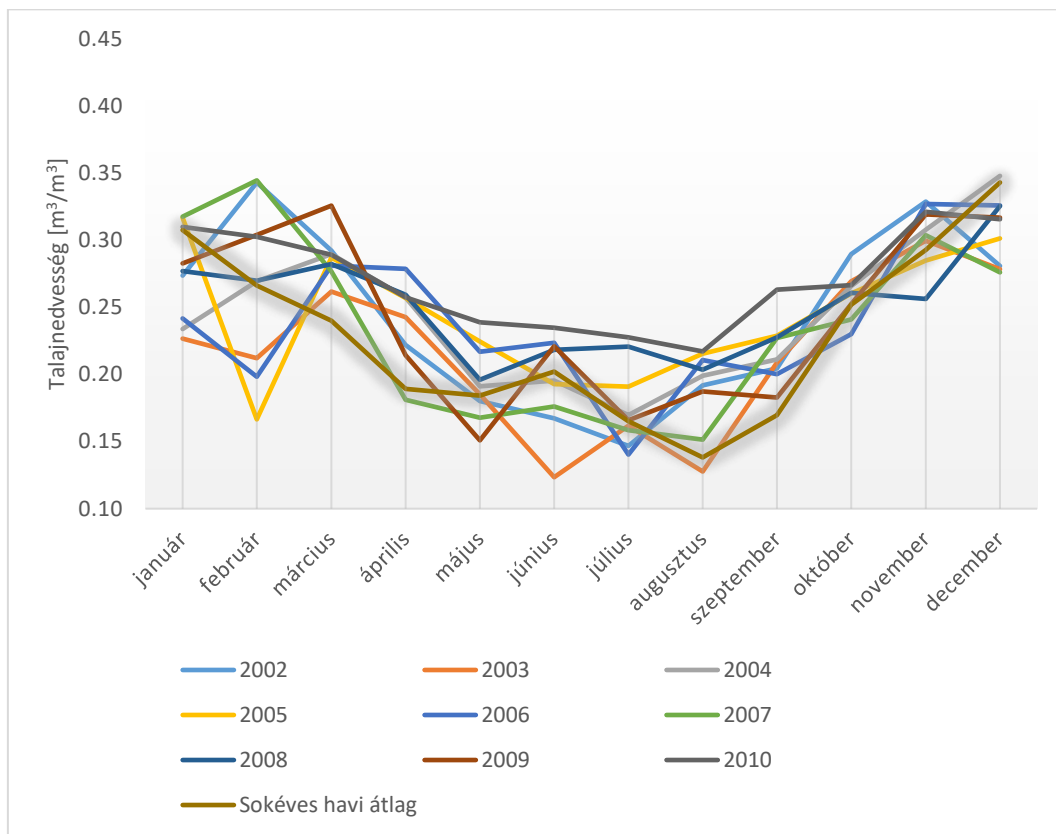


14. ábra. Az ERA-Interim/Land adatbázis alapján meghatározott éves anomáliák (referencia-időszak: 2002 – 2010) a legfelső rétegben (0-7 cm)

A szélsőségesen anomáliás viselkedést mutató évek detektálásával aszályvizsgálatok útján a Délkelet-európai Aszály Központ (*DMCSEE – Summary of Project Results, 2012*) is foglalkozik úgy, hogy különböző aszályindexeket állítanak elő. Az aszályindexek dimenziótlan skalárok, amelyek meghatározásához meteorológiai adatok elegendők, ilyen index például a Standardizált Csapadékindex (*McKee et al., 1993*) és a Pálfai-féle aszályindex (*Pálfai, 2011*). Az indexek értékeiből levont következtetések alapján az elmúlt időszak aszályos évei 2000, 2003, 2011 és 2007 voltak, amelyek közül 2003 kiemelkedik abban a tekintetben, hogy a Kárpát-medencét nagyobb aszály és hőhullám sújtotta, mint Délkelet-Európát. Bár a lehullott éves csapadékmennyiséget tekintve 2000 és 2011 voltak a század eddigi legszárazabb évei a térségben, az aszályindexet tekintve egyértelműen 2003 emelkedik ki (*DMCSEE – Summary of Project Results, 2012*).

4.4. Éghajlati vizsgálatok: átlagos éves menetek Magyarországon

A Magyarország területére szorítkozó éghajlati vizsgálatok során az ESA CCI SM v03.2, az ERA-Interim és az ERA-Interim/Land adatbázisokból havi bontású éves talajnedvesség-értékeket határoztam a 2002-től 2010-ig terjedő időszakokra. Az időszakot azért így választottam meg, mert a műholdas adatbázis a 2002-es évtől szolgáltatat kellő mennyiségű adatot. Az intervallum hosszát pedig az ERA-Interim/Land adatbázis végéhez igazítottam. A műholdas adatok esetében szintén szűrtem azokat a pixeleket, ahol a mérések az elvárásoknak megfelelő körülmények között mentek végbe, tehát kizártam a fagyott és sűrű növénytakarójú területeket. Az eredményeket a **15.**, a **16.** és a **17. ábrák** ismertetik, az ábrán hangsúlyosabb színezéssel szerepelnek a sokéves havi átlagok.

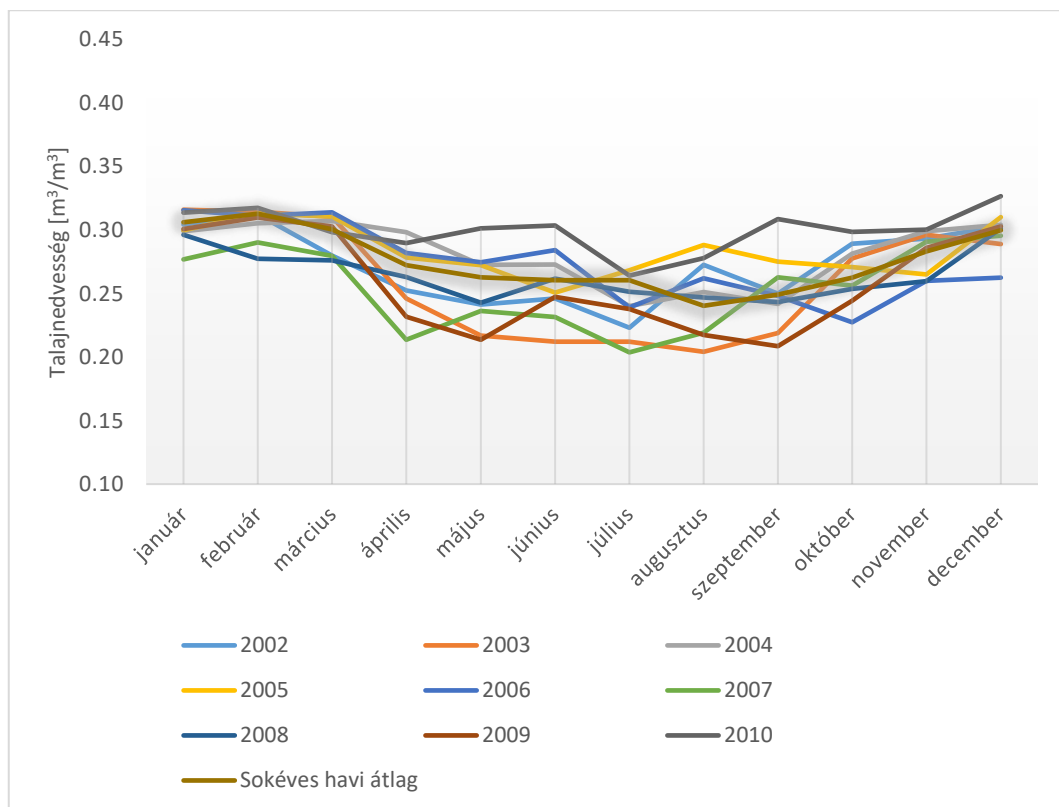


15. ábra. A talajnedvesség éves havi átlagos menetei Magyarországon (2002-2010) az ESA CCI SM v03.2 adatbázis alapján, a talaj felső rétege (0,5-2 cm)

Az ESA CCI SM v03.2 adatbázis értékei nyomán származtatott eredményeket bemutató **15. ábra** alapján elmondható, hogy a felszíni réteg talajnedvessége havi értéke sokéves átlagban kb. $0,14 \text{ m}^3/\text{m}^3$ és $0,35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ között mozog Magyarországon. A talajnedvesség maximuma télen, főként decemberben, minimuma pedig a nyári hónapokban áll be. A 2002-től 2010-ig terjedő időszakot tekintve szinte minden évben egységesen elmondható,

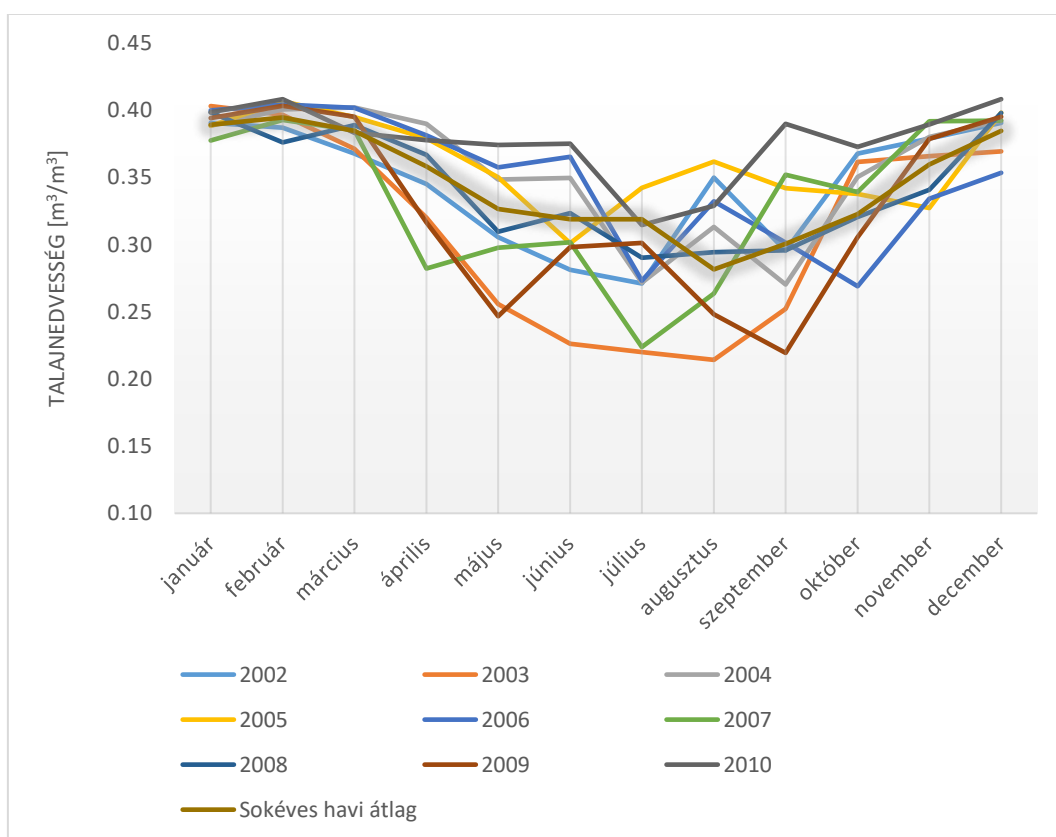
hogy a legszárazabb augusztus, kivéve a hőhullám sújtotta 2003-as évet, ahol július hónapban volt legalacsonyabb a talajnedvesség. Az eredmények jól visszaadják az anomáliavizsgálatok során levont következtetéseket, miszerint 2003 mellett 2002 és 2007 átlagos talajnedvessége volt alacsonyabb a sokéves havi átlagoknál. Feltűnően alacsony volt a 2005 februári talajnedvesség. A magasabb értékekkel rendelkező évek közül pedig egyértelműen 2010 emelkedik ki.

Az ERA-Interim adatbázisból létrehozott, szintén havi bontású éves átlagos meneteket a **16. ábra** szemlélteti. Az ERA-Interim felső rétege (0-7 cm) meghatározott értékek egy szűkebb, $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ és $0,35 \text{ m}^3/\text{m}^3$ közé esnek. A talajnedvességi maximum előfordulása minden évben a téli hónapokra tehető. A vegetációs időszakot lefedő nyári hónapokban a változások már erősebbek az egyes évek között. A sokéves havi átlagok görbéjéhez viszonyítva jóval szárazabb év (alátámasztva az előző megállapításokat) 2003, 2007, 2009 és 2002 voltak. Az abszolút minimum tekintetében pedig 2007 júliusa adódott legszárazabbnak. Az átlagnál nagyobb talajnedvesség-tartalommal bíró évek 2005 (júniust leszámítva) és 2010 voltak. A vizsgált időszak során a viszonylagosan száraz évek száma meghaladta a nedves éveket.



16. ábra. A talajnedvesség éves havi átlagos menetei Magyarországon (2002-2010) az ERA-Interim adatbázis alapján, a talaj felső rétege (0-7 cm)

Az ERA-Interim/Land adataik bemutató **17. ábrán** szintén más intervallumban mozog a talajnedvesség értéke, $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -tól megközelítőleg $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -ig terjed. Az ERA-Interim/Land adatok egyaránt a talaj 0-7 cm-es mélységére vonatkoznak és átlagosan magasabb talajnedvességet tükröznek, mint az ERA-Interim. A télen bekövetkező éven belüli maximum tekintetében a görbék jobban összetartanak, mint a szárazabb időszakokban. A 2009-es év ugyan teljes egészét nézve negatív anomáliával bírt, érdekes, hogy az év során a talajnedvesség legalacsonyabb értékeit nem csak a nyári hónapokban, hanem májusban és augusztusban vette fel. A száraz évek a nyári szórás alapján szintén 2003, 2009, 2007 és 2010 voltak, míg a sokéves átlaghoz képest az év teljes hosszában nagyobb értékekkel rendelkező év egyedül 2010 volt.



17. ábra. A talajnedvesség éves havi átlagos menetei Magyarországon (2002-2010) az ERA-Interim/Land adatbázis alapján, a talaj felső rétege (0-7 cm)

4.5. A felhasznált adatbázisok összehasonlítása közvetlen mérésekkel

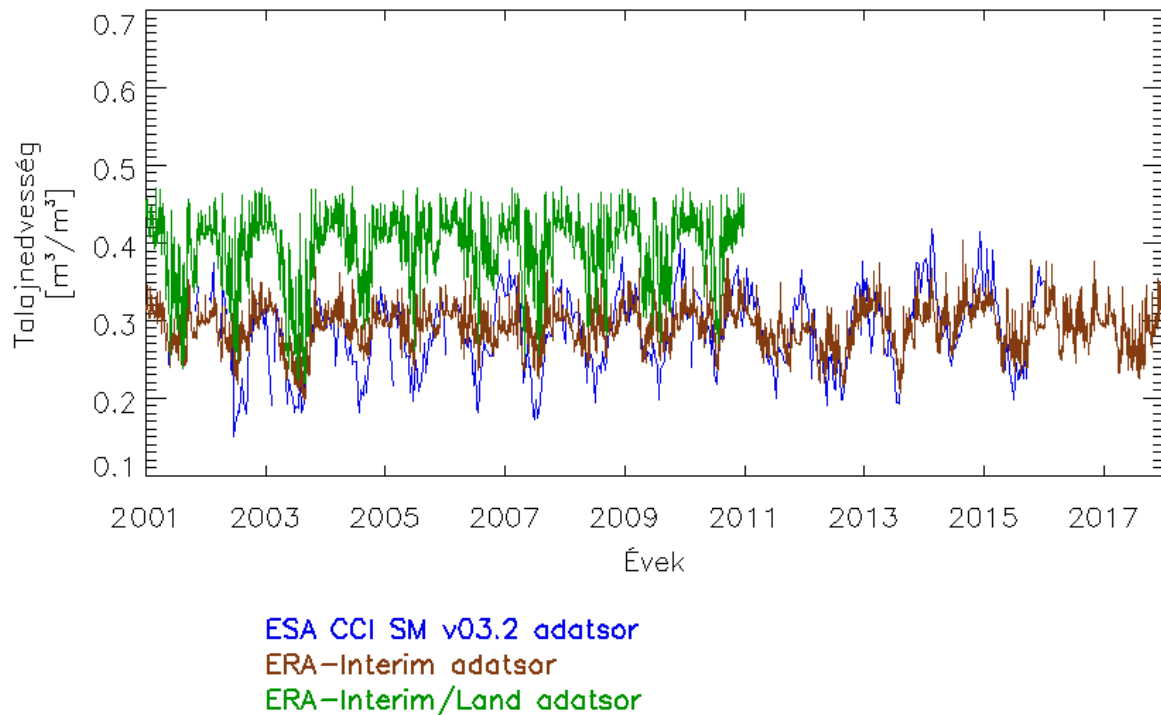
4.5.1. Összehasonlítás a hegyhátsáli adatsorral

Az ESA CCI SM v03.2 adatbázist összevettem a két bemutatott *in situ* adattal, melyek közül elsőként a hegyhátsáli eredményeket mutatom be. Az összehasonlítások elvégzéséhez meghatároztam a műholdas adatbázisnak és a reanalíziseknek azon rácspontját, amely a legközelebb áll a mérőállomás valós koordinátaíhoz. A rácspontok koordinátáit a **4. táblázat** tünteti fel.

4. táblázat. Hegyhátsál és a Hegyhátsálhoz legközelebb eső pixel koordinátái a különböző adatsorok esetén

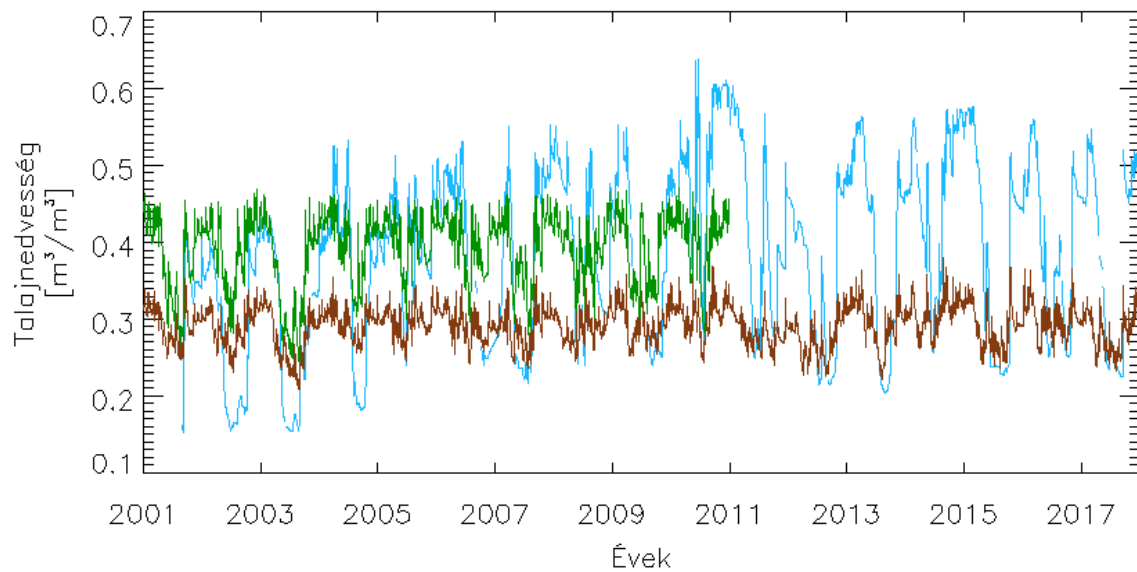
Adatsor	Szélességi kör (É)	Hosszúsági kör (K)
Hegyhátsál <i>in situ</i>	46,956°	16,653°
ESA CCI SM v03.2	46,875°	16,625°
ERA-Interim és ERA-Interim/Land	47,000°	16,750°

Minden adatsorra ábrázoltam a teljes időszakra vonatkozó napi meneteket, ahol az egyes rétegeket az ERA-Interimben és az ERA-Interim/Landben foglalt rétegzettségi szinteknek feleltetem meg. A **18. ábrán** látható a talaj felső szintjére vonatkozó napi adatokból előálló menet. Az ábrán helyet kapott a műholdas adatsor és a reanalízisek első rétege. Az ábra alapján megállapítható, hogy az ESA CCI SM v03.2-es adatsor adatai leginkább az ERA-Interim értékeivel futnak párhuzamosan, bár a műholdas adatsor sok helyen tartalmaz kiugróan alacsony talajnedvesség-értékeket. Mindkettő adatsor esetében $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -es átlag körül ingadoznak az értékek. Az ERA-Interim/Land szintén követi az előbbi két adatsor által lefektetett éves menetet, azonban értékei hozzávetőlegesen $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -rel meghaladják ez előzőek átlagos talajnedvességét. Az *in situ* adatsor az ábrán nem szerepel, melynek az az oka, hogy a talaj mélyebb rétegét (10 - 40 cm) reprezentálja, míg a műholdas adatbázis, illetve a reanalízisek csupán a felső pár centimétert (0,5 - 2 cm és 0 - 7 cm).



18. ábra. A talajnedvesség értéke Hegyhátsálon (2001 – 2017) az ESA CCI SM v03.2 mérési mélységében és az ERA adatbázisok legfelső rétegében (0-7 cm)

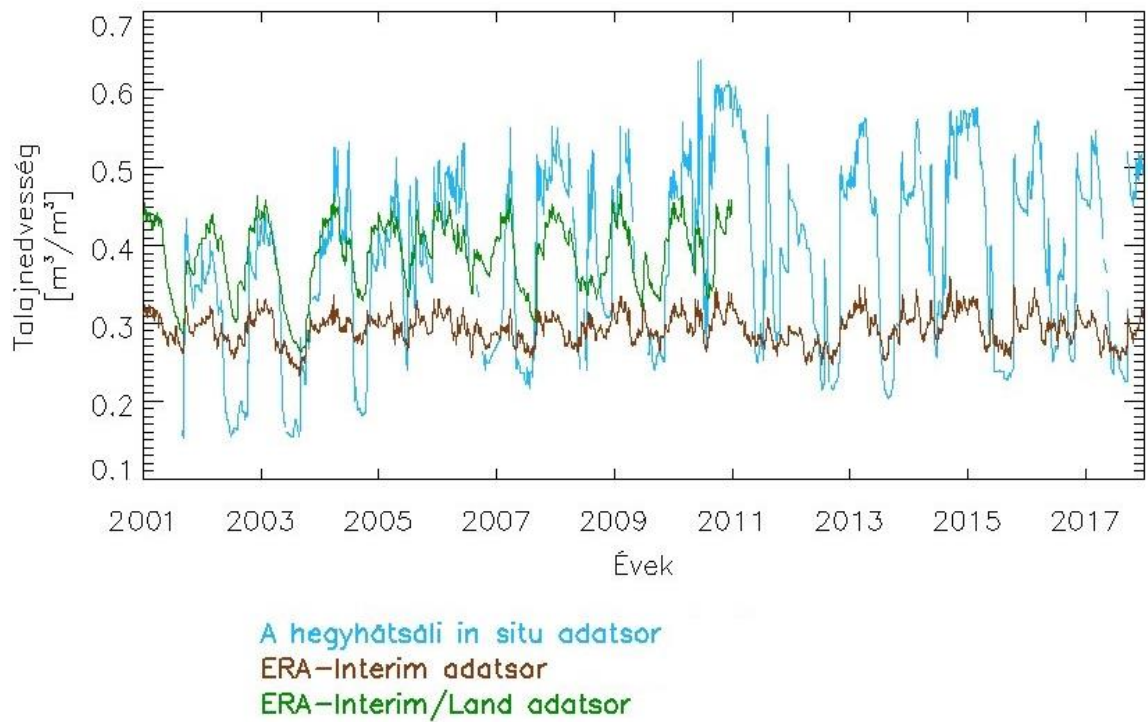
A második rétegre (7 – 21 cm) is előállítottam a napi meneteket (**19. ábra**). Az előzőhöz képest a megjelenítésben a különbség az, hogy itt már nem szerepel az ESA CCI SM v03.2 adatsor, mivel az a 2. rétegre már nem releváns. Az ábra alapján megállapítható, hogy az *in situ* adatsor nagy időbeli változékonysággal rendelkezik, 0,152 m^3/m^3 -tól egészen 0,638 m^3/m^3 -ig tartalmaz értékeket, ahol az adott évben előforduló maximumait tekintve mindkét adatsornál nagyobb talajnedvesség-tartalommal rendelkezik. Az eltérés forrása lehet, hogy a szenzor egy füves kertben került elhelyezésre, ami kevésbé reprezentatív a térség mezőgazdasági művelés alatt álló talajára. A kapott eredmények nagyon hasonlóak az első réteghez, az éven belüli meneteket jól visszaadják a reanalízisek, azonban értékkészleteik kiterjedése most sem közelítik meg az *in situ* adatsorét. A reanalízisek a függőleges tengely mentén egymáshoz képest pedig ismét eltolódnak, a köztük lévő átlagos különbség megközelítőleg ismét 0,1 m^3/m^3 .



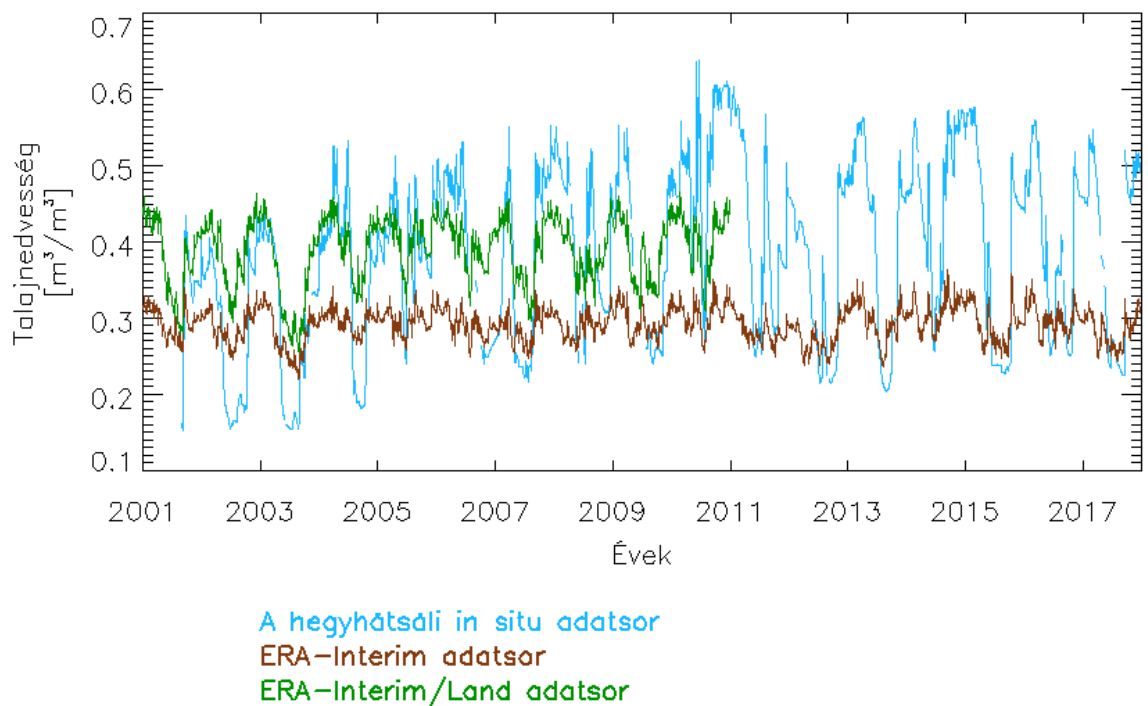
A hegyhátsági in situ adatsor
 ERA-Interim adatsor
 ERA-Interim/Land adatsor

19. ábra. A talajnedvesség értéke Hegyhátsálon (2001 – 2017) az *in situ* mérési mélységben és az ERA-adatbázisok 2. rétegében (7-21 cm)

Végezetül a 3., valamint a reanalízisek 2. és 3. rétegeiből képezett súlyozott átlagra is elvégeztem az összehasonlítást. A súlyozott átlag meghatározására azért volt szükség, mert ezzel a módszerrel lehet helyesen összehasonlítani az adatsorokat. A 4. réteget már nem szerepeltettem, mivel abban a mélysége nem összemérhető az *in situ* adatokkal. A 3. réteg esetében az ERA-Interim/Land adatbázis értékei tágabb intervallumot ölelnek fel. A minimum és maximum értékek itt is ugyanakkora. Az *in situ* adatsorral való egyezés nagyon gyenge. A két réteg átlagából képzett éves menet az ERA-Interim esetében a talajnedvesség legalacsonyabb értékeit fogja meg, az ERA-Interim/Land pedig a lokális maximumok mentén fut az *in situ* adatsorral megegyezően. A meneteket a **20.** és a **21. ábrák** vázolják fel.



20. ábra. A talajnedvesség értéke Hegyhátsálon (2001 – 2017) az *in situ* mérési mélységben és az ERA-adatbázisok 3. rétegében (21-72 cm)



21. ábra. A talajnedvesség értéke Hegyhátsálon (2001 – 2017) az *in situ* mérési mélységben és az ERA adatbázisok 2-3. rétegében súlyozott átlaga alapján (10-40 cm)

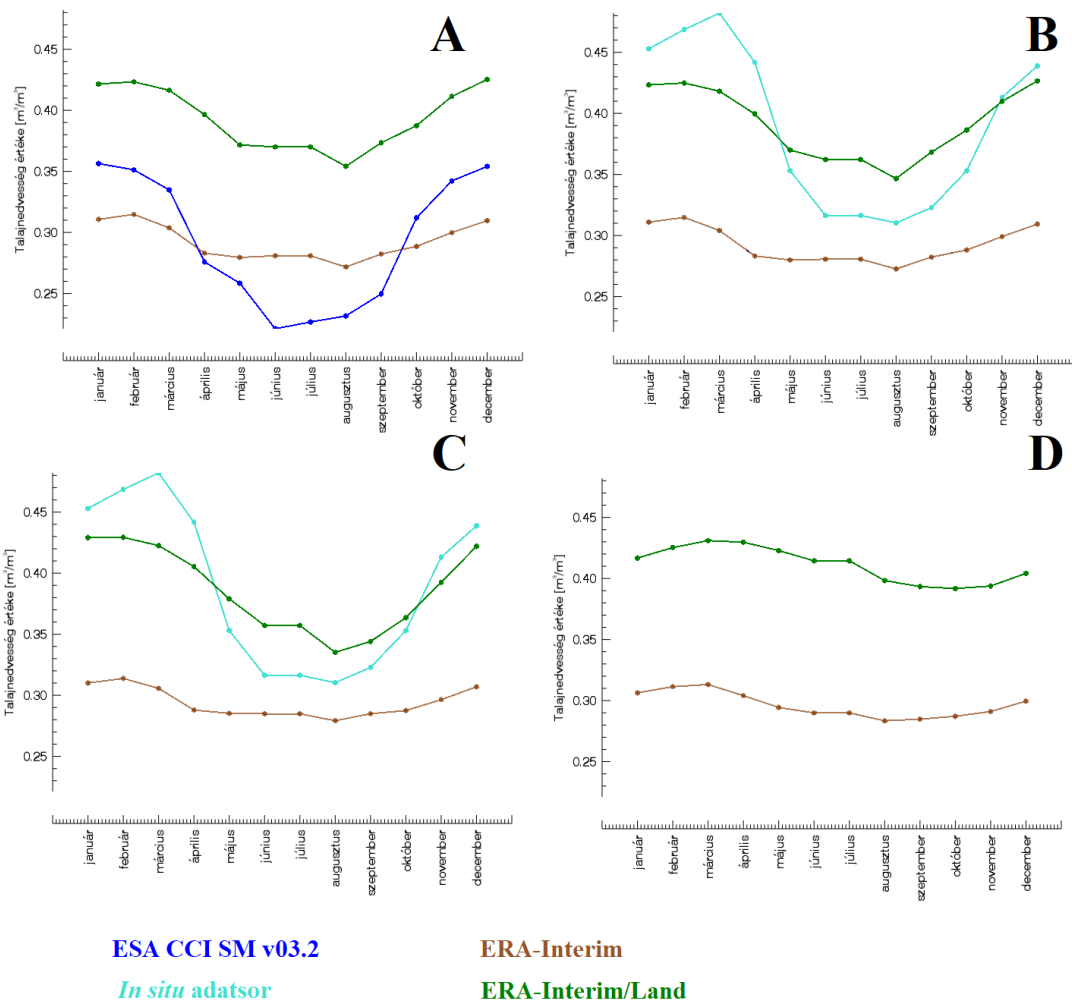
Meghatároztam az adatsorok kapcsolatát jellemző statisztikákat Hegyhátsálra vonatkozóan az első 3 rétegre, valamint a 2. és 3. rétegek súlyozott átlagára, amelyek az **5. táblázatban** olvashatók. A korreláció értékei közepesen erős kapcsolatra engednek következtetni, ahol az *in situ* adatsorral legkevésbé az ERA-Interimmal korrelál. A négyzetes középértékhibák is magasak, az átlagos talajnedvesség-tartalom harmada, negyede. A torzítás az ERA-Interim/Land esetében a legcsekélyebb, a 2. réteget kivéve egy nagyságrenddel kisebb, mint a másik két adatbázis esetében.

5. táblázat. A hegyhátsáli *in situ* adatsor kapcsolata az ERA- és ESA-adatbázisokkal (2001.08.29 – 2010.12.31)

	Statisztika	ERA-Interim	ERA-Interim/Land	ESA CCI SM
1. réteg	R²	0,233	0,094	0,654
	RMSE (m³/m³)	0,138	0,129	0,144
	BIAS (m³/m³)	-0,056	-0,007	-0,077
2. réteg	R²	0,179	0,335	
	RMSE (m³/m³)	0,139	0,114	
	BIAS (m³/m³)	-0,061	0,013	
2-3. réteg súlyozott átlaga	R²	0,856	0,588	
	RMSE (m³/m³)	0,143	0,110	
	BIAS (m³/m³)	-0,940	0,010	
3. réteg	R²	0,204	0,772	
	RMSE (m³/m³)	0,141	0,108	
	BIAS (m³/m³)	-0,068	0,007	

Végül kiszámoltam és egy-egy ábrán megjelenítettem az egyes rétegekre vonatkozóan a talajnedvesség sokéves havi átlagait, vagyis az éves meneteket, amely a **22. ábrán** látható. A réteghatárok megállapításánál szintén a reanalíziseket vettem alapul.

Az 1. réteget tekintve a legmagasabb talajnedvesség-tartalommal bíró hónap az *in situ* adatsor alapján március, az ESA CCI SM v03.2 adatbázis alapján január és december, az ERA-Interim és az ERA-Interim/Land esetén pedig a talajnedvesség februárban és decemberben veszi fel a maximumot. Az év legszárazabb időszaka mind a 4 adatbázis esetében egyértelműen a nyári hónapokban következik be. A reanalízisek és az *in situ* mérési adatsor augusztusra, míg a műholdas adatbázis júniusra teszi a minimum bekövetkeztét.



22. ábra. A talajnedvesség átlagos éves menete Hegyhátsálon (2001.08.29 – 2010.12.31)
A: 1. réteg, **B:** 2. réteg, **C:** 3. réteg, **D:** 4. réteg

Az ESA CCI SM v03.2 és az *in situ* adatok alapján meghatározott éves menetek csaknem egybevágók azzal a markáns különbséggel, hogy a műholdas adatsor átlagosan kb. $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -rel alábecsli a közvetlen mérési eredményeket. Ez a már említett rétegezetségbeli eltéréstől ered, sőt a reprezentált rétegeknek nincs közös intervalluma. Nem meglepő módon a két ERA-adatbázis is egymáshoz képest nagyon hasonló menetet ad vissza, azonban itt is felfedezhető az előbbihez hasonló mértékű különbség, ami vélhetően a reanalízisek megalkotásánál használt eltérő felszíni sémából ered. A 2. és 3. rétegnél már nem tüntetem fel az ESA CCI SM v03.2 eredményeit. Jelentősebb változása az 1. réteghez képest nincsen, a reanalízisekből származtatott átlagok kevéssé térnek el attól.

A 4. réteg esetében pedig már az *in situ* adatsort is elhagytam. Ebben a rétegben talajnedvesség éves menete időben eltolódik a felszínhez közelebb eső szeletekhez képest, az eltolódás mértéke egy hónap.

Az 1. rétegre vonatkozó konkrét értékek a **6. táblázatban** olvashatók, ahol zölddel a maximum-, narancssárgával pedig a minimumértékek tüntettem fel. (A többi réteg esetében eltekintek a sokéves havi átlagok pontos értékének táblázatszerű szerepeltetésétől, mivel a mélyebb rétegeket nem reprezentálják műholdas mérések.)

6. táblázat. A hegyhátsáli talajnedvesség [m^3/m^3] sokéves havi átlagai, felső réteg

1. réteg	jan.	feb.	már.	ápr.	máj.	jún.
<i>In situ</i>	0,453	0,469	0,482	0,442	0,353	0,316
ESA CCI SM v03.2	0,356	0,351	0,335	0,276	0,258	0,221
ERA-Interim	0,311	0,3158	0,304	0,283	0,280	0,281
ERA-Interim/Land	0,422	0,423	0,416	0,397	0,372	0,370
	júl.	aug.	szep.	okt.	nov.	dec.
<i>In situ</i>	0,316	0,310	0,323	0,353	0,411	0,439
ESA CCI SM v03.2	0,227	0,232	0,250	0,312	0,342	0,354
ERA-Interim	0,281	0,272	0,282	0,289	0,300	0,310
ERA-Interim/Land	0,370	0,354	0,373	0,387	0,411	0,425

4.5.2. Összehasonlítás a bugaci adatsorral

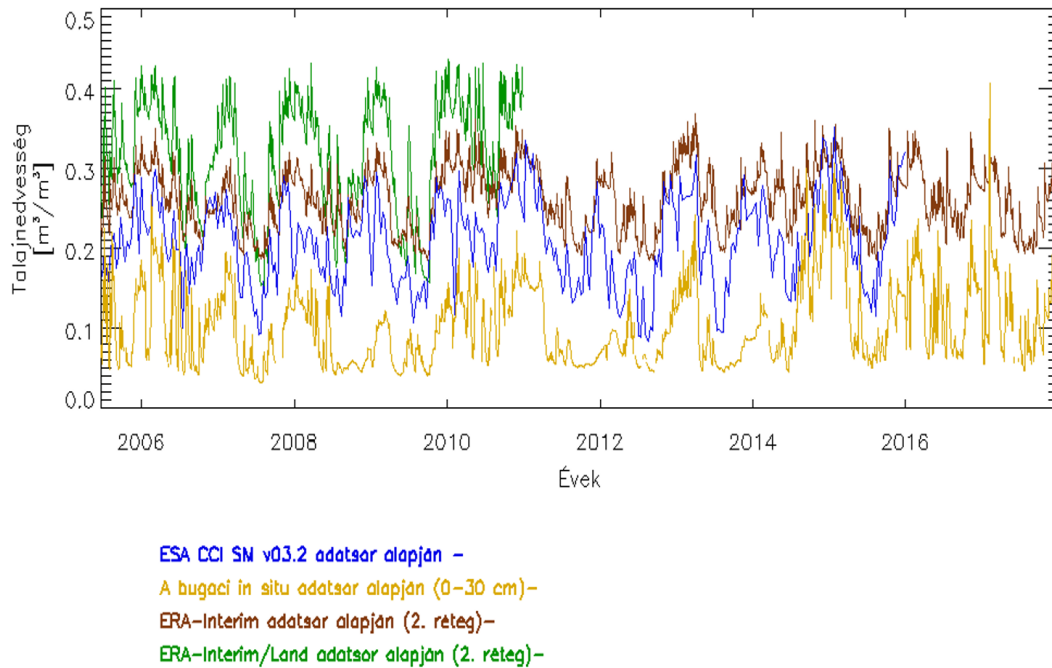
A bugaci *in situ* adatsorral való összevetés első lépéseként szintén meghatároztam az adatbázisok rácshálózata alapján Bugac tényleges földrajzi elhelyezkedéséhez eső legközelebbi pontokat, amelyeket a **7. táblázat** mutat be.

7. táblázat. Bugac és a Bugachoz legközelebb eső pixel koordinátái a különböző adatsorok esetén

Adatsor	Szélességi kör (É)	Hosszúsági kör (K)
Bugac <i>in situ</i>	46,690°	19,600°
ESA CCI SM v03.2	46,625°	19,625°
ERA-Interim és ERA-Interim/Land	46,750°	19,500°

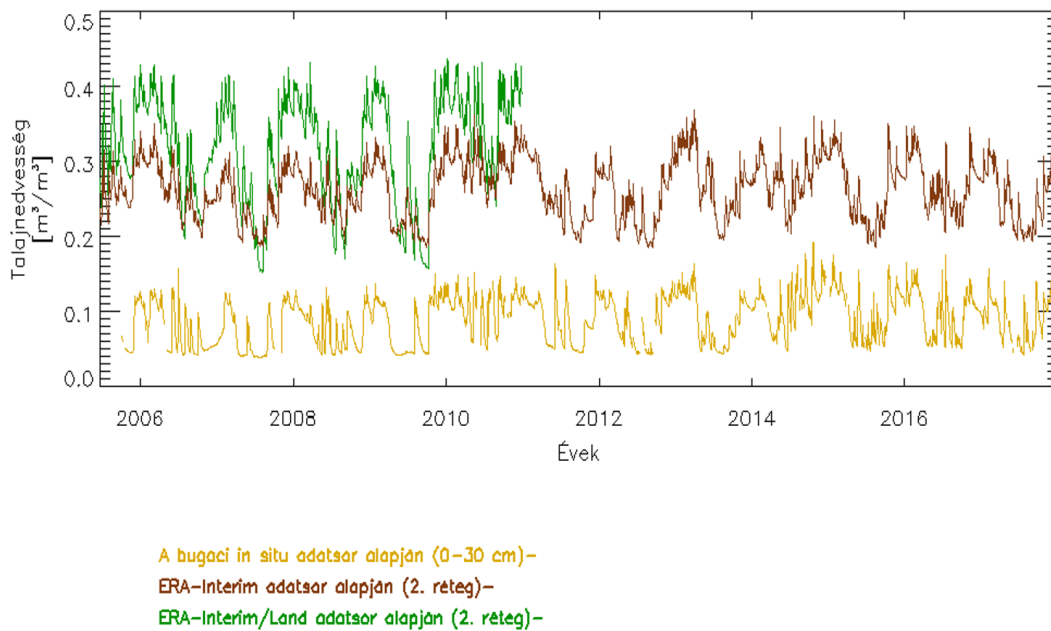
Az éves meneteket ugyanolyan szempontok szerint határoztam meg és ábrázoltam, mint a hegyhátsáli adatsor esetén. A bugaci mérési adatsorok közül az első rétegnél a 0-3 cm közötti, a többi szerepeltetett rétegnél pedig a 0-30 cm közé eső értékeket jelenítettem meg. A **23. ábrán** a renálízis adatbázisok első rétege alapján meghatározott függőleges tartomány értékei láthatók. Az ábra alapján az állapítható meg, hogy az éves meneteket illetően mind a 4 adatsor nagyon hasonlóan fut, azonban az y tengely mentén az értékeik egymáshoz képest

eltolódnak. Legmagasabb talajnedvességet ismételten az ERA-Interim/Land ad vissza, ezt követi az ERA-Interim és az ESA CCI SM v03.2, az *in situ* adatok értékészlete pedig jócskán szárazabb talajt tükröz Bugacon a többi adatbázishoz képest. Az éves menetekben való ingadozás az *in situ*, az ERA-Interim/Land és a műholdas adatbázis esetében közel hasonló, míg az Interim adatai szűkebb talajnedvességi tartományon belül ingadoznak.



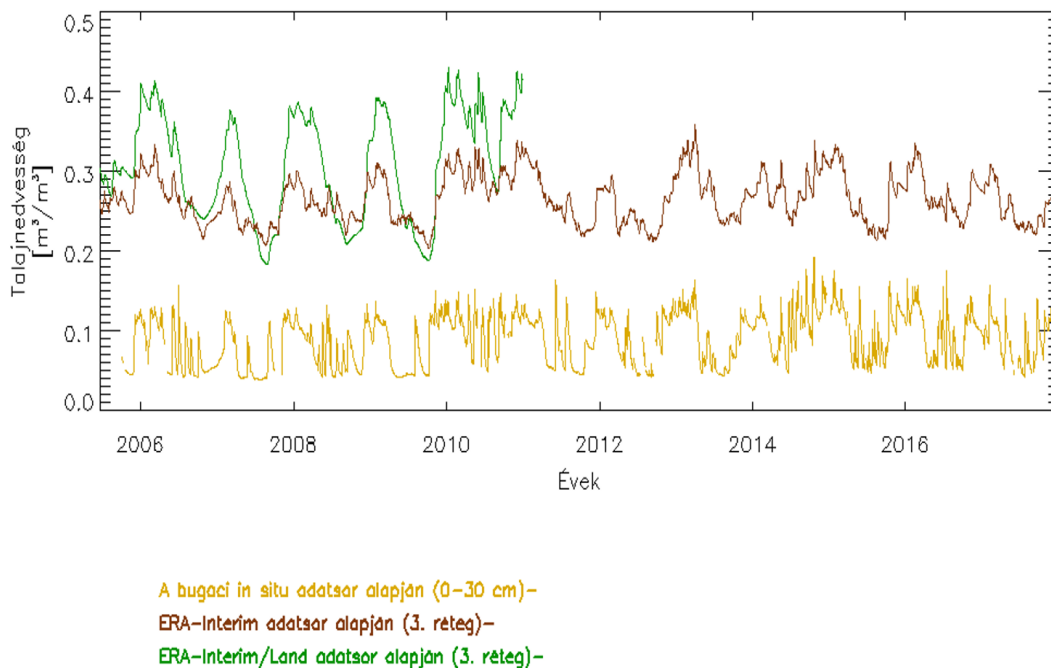
23. ábra. A talajnedvesség értéke Bugacon (2005 - 2017) az *in situ* adatsor és az ERA adatbázisok 1. rétegében (0-7 cm)

A 2. rétegre vonatkozó éves menetek a **24. ábráról** olvashatók le, ahol a talaj felső pár centiméterére reprezentatív műholdas eredményeket szintén kihagytam a megjelenítésből. Az ERA-Interim és az ERA-Interim/L adatsorok a minimumokat tekintve közel lefedik egymást. A teljes mérési időszakban adatokat szolgáltató ERA-Interim és az *in situ* adatsor nagyon hasonló menetet tükröz, viszont a közöttük lévő abszolút eltérés rendkívül nagy: míg az ERA-Interim adatai átlagosan $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ körül, addig az *in situ* adatsor adatai $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ körül változnak. Az *in situ* mérések alapján a bugaci talaj rendkívül száraz.



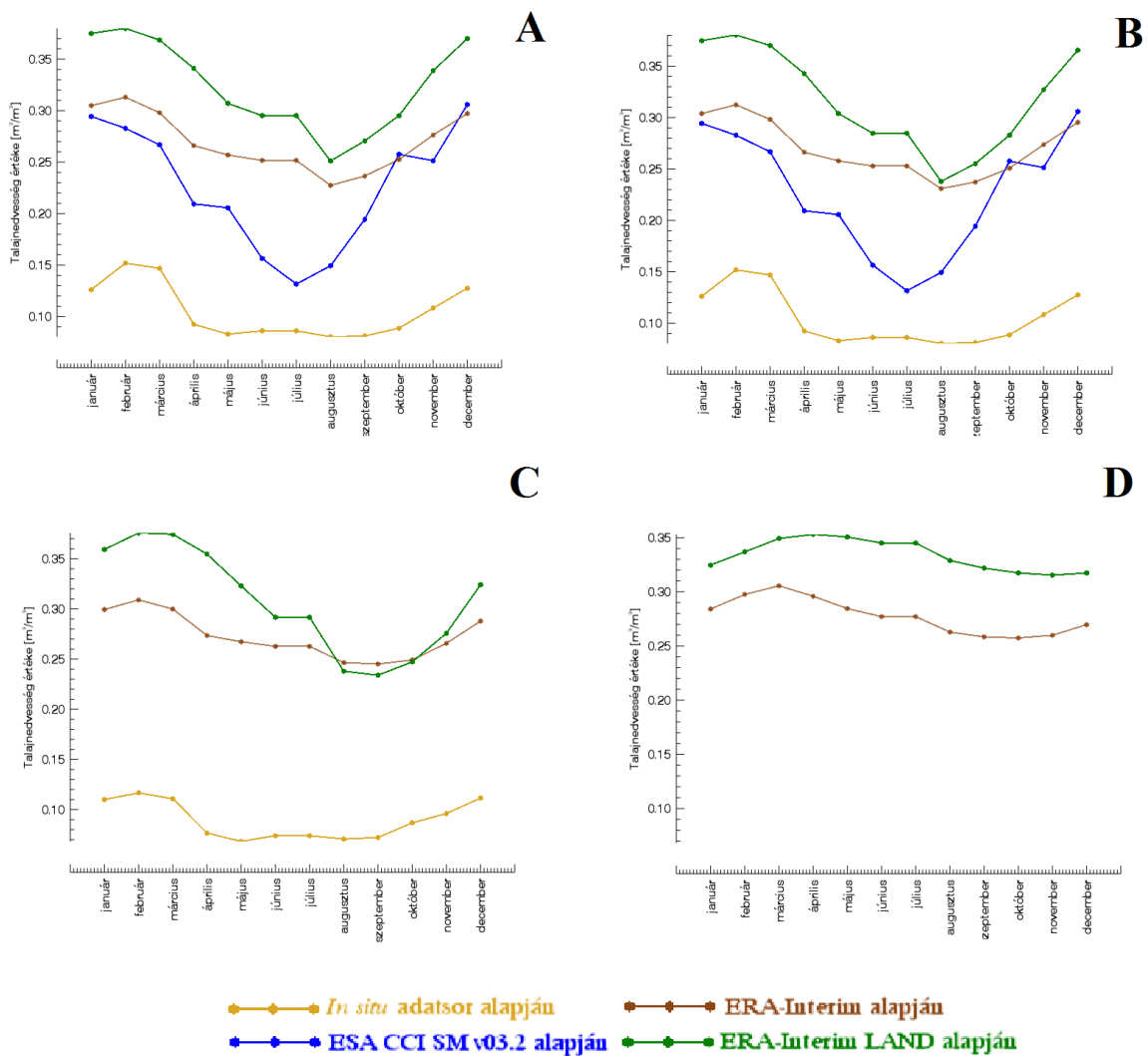
24. ábra. A talajnedvesség értéke Bugacon (2005 - 2017) az *in situ* adatsor és az ERA adatbázisok 2. rétegében (7-21 cm)

A 3. réteg 2005. június 24-e és 2017. december 31-e közötti talajnedvességi menetét a **25. ábra** szemlélteti. Az előző két réteghez képest itt is ugyanaz mondható el, a görbék azonban jobban kisimulnak, a mélység növekedésével csökken az egymást követő napok hatásai.



25. ábra. A talajnedvesség értéke Bugacon (2005 - 2017) az *in situ* adatsor 2. és az ERA adatbázisok 3. rétegében (21-72 cm)

Következő lépésben bemutatom az előbbieken felvázolt statisztikák értékét. Az *in situ* adatsort összevetettem a reanalízisek és a műholdas mérések eredményeivel, amelyeket a **8. táblázat** foglal össze. Mivel a reanalízisek rétegeinek határai itt sem egyeznek meg pontosan az *in situ* mérés függőleges tartományával, ezért Bugac esetén is képeztem egy átlagréteget. Ez a réteg az 1., a 2. és a 3. rétegekből áll elő oly módon, hogy a 3. réteg értékeit súlyozva vettem figyelembe 21 és 30 cm között, majd az így kapott eredményeket használtam fel a többi réteggel való átlag meghatározásánál, így az átlagolt réteg a 0-30 cm közé eső talajszeletet képviseli.



26. ábra. A talajnedvesség átlagos éves menete Bugacon (2005.06.24. – 2010.12.31.)
A: 1. réteg, **B:** 2. réteg, **C:** 3. réteg, **D:** 4. réteg

Az előző közvetlen méréssel való összehasonlításhoz képest a leglényegesebb eltérés a lineáris korrelációs együtthatók négyzeteiben mutatkozik. Ahogyan a meneteket szemléltető ábrák is már tükrözték, a reanalízis adatbázisok értékeivel vett lineáris kapcsolat határozottan

erősebb a bugaci pixelek esetén, a műholdas adatbázissal való korreláció viszont ezen a mérési helyszínen gyengébb. A négyzetes középértékhibák az összes réteg esetén az elvárásokhoz képest túl magasak, mindhárom adatsor esetében meghaladják az hegyhátsáli eredményeket. Az adatsorok közötti átlagos eltérést illetően, ugyancsak a (4) egyenlet alapján az előző ábrákból levont következtetések nyomatékosulnak. Az *in situ* adatsor értékei az ERA-Interimhez képest $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -rel, az ERA-Interim/Landhez képest pedig átlagosan kb. $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -re alacsonyabbak, amely eltérések ahhoz viszonyítva, hogy a talajnedvesség értéke sokéves havi átlagban a teljes Kárpát-medencére vonatkozóan kb. $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ és $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ között változik, rendkívül nagy. Az átlagolt réteg korrelációs együttható értékei szintén magasabbak Hegyhátsálhoz képest, emellett itt kb. $0,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -rel alacsonyabb a négyzetes középértékhiba és az átlagos eltérés az adatsorok között. A súlyozott átlagolás módszerével az adatbázisokból a valósághoz közelebb álló értékek állíthatók elő.

8. táblázat. A bugaci *in situ* adatsor kapcsolata az ERA és ESA adatbázisokkal
(2005.06.24 – 2010.12.31.)

Statisztika		ERA-Interim	ERA-Interim/Land	ESA CCI SM
1. réteg	R^2	0,548	0,564	0,017
	RMSE (m^3/m^3)	0,161	0,223	0,211
	BIAS (m^3/m^3)	0,158	0,219	0,064
2. réteg	R^2	0,659	0,648	
	RMSE (m^3/m^3)	0,175	0,246	
	BIAS (m^3/m^3)	0,175	0,241	
1-3. réteg súlyozott átlaga	R^2	0,570	0,550	
	RMSE (m^3/m^3)	0,105	0,163	
	BIAS (m^3/m^3)	0,103	0,160	
3. réteg	R^2	0,521	0,507	
	RMSE (m^3/m^3)	0,178	0,236	
	BIAS (m^3/m^3)	0,176	0,231	

Számításaim során szintúgy előállítottam a sokéves havi átlagok alapján a talajnedvesség különböző rétegekre vonatkozó éves menetét szemléltető ábrákat (26. ábra). A sárgával jelölt bugaci *in situ* adatsor sokéves havi átlagai mindenütt jóval alacsonyabbak a többi adatsor értékeihez képest.

A legfelső rétegben (**26. ábra (A)**) még feltüntetésre került az ESA CCI SM v03.2 adatbázisból származtatott értékek, és itt figyelhető meg a legnagyobb mértékben ingadozó sokéves menet. A műholdas adatbázis legszárazabb hava (július) közelíti meg leginkább az *in situ* adatsor görbáját. Az ERA-Interim/Land ezt az éves menetet kb. egyhónapos csúszással köveit, bár értékei télen $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -rel nyáron pedig közel $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -rel haladják meg a műholdas adatbázis értékeit. Az ERA-Interim az eddig megszokott viselkedést mutatja, átlagosan alacsonyabb talajnedvességet ad a másik reanalízishez képest, a két adatsor leginkább augusztusban áll közel egymáshoz. Az *in situ* adatsor kiemelkedő maximumot télre és a tavasz első havára teszi, de ez még mindig jócskán alatta marad a többi adatbázisnak. A 2. réteget vizsgálva a reanalízisek kapcsolatáról hasonló következtetéseket vonhatunk le, a két adatbázis augusztusban és szeptemberben közelít leginkább egymáshoz. A 3. rétegnél az ERA-Interim/Land esetében a görbe az x tengely mentén jobbra tolódik, a mélyebb rétegek hozzávetőlegesen egyhónapos késéssel követik a felszínhez közelebb eső rétegekben bekövetkező változásokat. A 4. rétegre mindkét reanalízis minimuma időben jelentősen eltolódik. Az alsó réteg talajnedvességi maximumát tavasszal és nyáron éri el, míg némileg szárazabb időszak ősszel és télen következik be.

A **9. táblázatban** feltüntettem az egyes adatbázisok alapján meghatározott, a bugaci feltalajra vonatkozó sokéves havi átlagok konkrét értékeit. Az adatsorok az ESA CCI SM kivételével egyöntetűen februárra teszik a maximum bekövetkeztét, ezt a zöld kiemelés mutatja. A maximumokat tekintve kb. $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ -es eltérés van az *in situ* és a többi adatsor között. A minimumokat tekintve már nem ilyen éles a különbség, itt a reanalízis adatbázisok kevésbé közelítenek a tényleges minimumhoz. Abban mind a négy adatbázis eredményei megegyeznek, hogy a legszárazabb hónapok július és augusztus voltak.

9. táblázat. A bugaci talajnedvesség [m^3/m^3] sokéves havi átlagai a legfelső rétegben

1. réteg	jan.	feb.	már.	ápr.	máj.	jún.
<i>In situ</i>	0,126	1,151	0,147	0,092	0,083	0,086
ESA CCI SM v03.2	0,294	0,283	0,267	0,209	0,206	0,156
ERA-Interim	0,305	0,313	0,298	0,266	0,257	0,252
ERA-Interim/Land	0,375	0,380	0,369	0,341	0,307	0,295
	júl.	aug.	szep.	okt.	nov.	dec.
<i>In situ</i>	0,074	0,080	0,081	0,089	0,108	0,128
ESA CCI SM v03.2	0,132	0,149	0,194	0,257	0,251	0,306
ERA-Interim	0,233	0,227	0,236	0,252	0,276	0,297
ERA-Interim/Land	0,259	0,251	0,271	0,295	0,339	0,370

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az utóbbi évtizedek gyakori aszályai, valamint a különböző meteorológiai modellek egyre növekvő adatigénye miatt különösen fontossá vált kellően pontos talajnedvesség-adatokat szolgáltató adatbázisok létrehozására.

A talajnedvesség meghatározása történhet közvetlen mérések által, melyek az összes módszer közül a legmegbízhatóbb és a legpontosabb adatok előállítására képesek. A teljes földfelszínt lefedő mérési adatsorok műholdakon elhelyezett távérzékelési szenzorok alkalmazásával származtathatók. A globális talajnedvesség leírására alkalmasak a felszíni modellek is, amelyek már meglévő *in situ* vagy távérzékelte mérési eredményeket felhasználva határozzák meg a talajnedvességet. Nagy előnyük, hogy az alkalmazott felszíni sémától függően figyelembe veszik a talaj fizikai féleségét és a felszínborítás típusát, továbbá a talaj mélyebb rétegeire vonatkozóan is szolgáltatnak információt.

Diplomamunkám során bemutattam a tudományos közösség számára rendelkezésre álló, különböző mérési módszerekkel előállított legfontosabb talajnedvesség-adatbázisokat.

A továbbiakban éghajlati vizsgálatokat végeztem a Kárpát-medence tágabb területére vonatkozóan az ESA CCI SM v03.2-es műholdas távérzékeléssel nyert, valamint az ERA-Interim és az ERA-Interim/Land reanalízis adatbázisok alapján. Meghatároztam a térség sokéves havi átlagos talajnedvességét és térképen ábrázoltam az 1981-től 2010-ig terjedő normálidőszakra. Az adatok alapján éves anomáliamezőket is előállítottam, az egyes adatsorokban foglalt időintervallumoknak megfelelően 2002-től 2017-ig. A származtatott mezők alapján megállapítható, hogy a talajnedvesség tekintetében szárazabb évek 2003, 2007, és 2012 voltak, míg pozitív talajnedvesség-anomália 2010-ben és 2014-ben volt tapasztalható.

Az éghajlati vizsgálatok következő lépésében Magyarországra vonatkozóan átlagos éves meneteket állítottam elő havi adatok alapján a 2002-től 2010-ig terjedő időszakra. Az ESA CCI SM v03.2 adatbázisból származtatott eredmények alapján elmondható, hogy a talaj felső 2 cm-es rétegében a talajnedvesség éven belüli változékonysága nagyobb, mint az ERA-Interim és az ERA-Interim által reprezentált 0-7 cm-es rétegben.

A vizsgálatok záró lépéseként ESA CCI SM v03.2 műholdas adatbázist, és az ERA-reanalíziseket összehasonlítottam két pontméréssel, a Hegyhátsálon és a Bugacon végzett *in situ* mérési adatsorokkal és megjelenítettem az éves meneteket a talaj több rétegére vonatkozóan. Az adatsorok kapcsolatát vizsgálva különböző statisztikákat számoltam. Az *in situ* adatsorok és műholdas, illetve a reanalízis adatbázisok mindkét esetben jól korrelálnak, így elmondható, hogy az adatbázisok képesek visszaadni a talajnedvesség éves változását.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm témavezetőmnek, *dr. Kern Anikónak*, hogy dolgozatom elkészítése során mindvégig odaadóan segített a munkában és értékes tanácsaival elmélyítette a szakmai tudásom. Témavezetőmnek hála rengeteg gyakorlati tudással gyarapodtam és hasznos programozási tapasztalatra tettem szert.

Köszönöm konzulensemnek, *dr. Barcza Zoltánnak*, hogy segítõ figyelemmel kísérte a munkámat.

Köszönöm *Ihász Istvánnak*, az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársának, hogy rendelkezésemre bocsátotta az ERA-reanalízisek adatait.

Köszönöm az Országos Meteorológiai Szolgálat műholdas csoportjának, *dr. Diószeghy Mártának*, *Kocsis Zsófiának* és *dr. Putsay Máriának*, hogy mindennemű szakmai kérdésemre gyors, precíz választ adva segítették elő a munkámat.

Köszönöm *dr. Pintér Krisztinának*, a Szent István Egyetem Növényélettani és Ökológiai Tanszék tudományos főmunkatársának, hogy a Bugacon végzett mérési adatok rendelkezésemre bocsátását.

Hálával tartozom társamnak, *Tominak*, hogy mindvégig biztató szavakkal tartotta bennem a lelket és ösztönözte a munkámat. Köszönöm az irányomban tanúsított türelmét és, hogy szeretettel támogatta tanulmányaimat.

Köszönöm *Édesanyámnak* és *Édesapámnak*, hogy természetszerető otthont teremtve már korán felkeltették érdeklődésemet a természettudományok iránt és tanulmányaim során lelkesen támogattak.

IRODALOMJEGYZÉK

- Ács, F., Rajkai, K., Breuer, H., Mona, T., Horváth, Á., 2015. Soil-atmosphere relationships: The Hungarian perspective. *Open Geosciences*, 7 (1), 395-406.
- Adler, R. F., Huffman G. J., Chang A., Ferraro R., Xie P., Janowiak J., Rudolf, B., Schneider U., Curtis S., Bolvin D., Gruber A., Susskind J., Arkin P., Nelkin E. J., 2003. The Version 2.1 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979 - Present). *Journal of Hydrometeorology*, 4, 1147-1167.
- Albergel, C., Dorigo, W., Balsamo, G., Muñoz-Sabater, J., de Rosnay, P., Isaksen, L., Brocca, L., de Jeu, R., Wagner, W., 2013. Monitoring multi-decadal satellite earth observation of soil moisture products through land surface reanalyses. *Remote Sensing of Environment*, 138, 77–89.
- Albergel, C., de Rosnay, P., Gruhier, C., Muñoz-Sabater, J., Hasenauer, S., Isaksen, L., Kerr, Y., Wagner, W., 2012. Evaluation of remotely sensed and modelled soil moisture products using global ground-based in situ observations. *Remote Sensing of Environment*, 118, 215-226.
- Alexandris, S., Balint G., Fassouli V., Gregorič, G., Herceg, A., Karavitis, C. A., Mattanyi, Zs., Popova, Z., Skondras, N. A., Stamatakos, D., Szalai, S., Tsesmelis, D. E., 2012. Summary of Project Results. Drought Management Centre for South-East Europe, 55 p.
- Baghdadi, N., Aubert, M., Cerdan, O., Franchistéguy, L., Viel, C., Martin, E., Zribi, M., Desprats, J. F., 2007. Operational Mapping of Soil Moisture Using Synthetic Aperture Radar Data: Application to the Touch Basin (France), *Sensors*, 7, 2458-2483.
- Balsamo, G., Albergel, C., Beljaars, A., Boussetta, S., Brun, E., Cloke, H., Dee, D., Dutra, E., Muñoz-Sabater, J., Pappenberger, F., de Rosnay, P., Stockdale, T., Vitart, F., 2015. ERA-Interim/Land: a global land surface reanalysis data set. *Hydrology and Earth Sciences*, 19, 389-407.
- Balsamo, G., Beljaars, A., Scipal, K., Vitebro, P., van den Hurk, B., Hirschi, M., Betts, A., 2009. A Revised Hydrology for the ECMWF Model: Verification from Field Site to Terrestrial Water Storage and Impact in the Integrated Forecast System. *Journal of Hydrometeorology*, 10, 623-643.
- Bihari, Z., 2010. A Délkelet-európai Aszálykezelő Központ. *Agrofórum*, 21, 48 p.
- Boronyák, V., 2016. A talajnedvesség becslése műholdas távérzékelés alapján. Szakdolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest (Témavezető: dr. Kern Anikó, dr. habil. Barcza Zoltán), 47 p.

- Both, E., 2015. Az ESA földmegfigyelési tervei. Úrvilág, Űrkutatási Hírportál. (Internetes elérhetőség: http://www.urvilag.hu/nyeresege_a_kontinensnek/20150210_az_esa_foldmegfigyelesi_tervei_1resz (2018-as állapot))
- Campbell Scientific Incorporation, CS615 Water Content Reflectometer Instruction Manual, 1995. (Internetes elérhetőség: <https://www.campbellsci.com/> (2018-as állapot))
- Campbell Scientific Incorporation, CS616 Water Content Reflectometer, 2018. (Internetes elérhetőség: <https://www.campbellsci.com/cs616-reflectometer> (2018-as állapot))
- Colliander, A., Jackson, T. J., Bindlish, R., Chan, S., Das., N, Kim, S. B., Cosh, M. H., Dunbar, R. S., Dang, L., Pashaian, L., Asanuma, J., Aida, K., Berg, A., Rowlandson, T., Bosch, D., Caldwell, T., Caylor, K., Goodrich, D., al Jassar, H., Lopez-Baeza, E., Martínez-Fernández, J., González-Zamora, A., Livingston, S, McNairn, H., Pacheco, A., Moghaddam, M., Montzka, C., Notarnicola, C., Niedrist, G., Pellarin, T., Prueger, J., Pulliainen, J., Rautiainen, K., Ramos, J., Seyfried, M., Starks, P., Su, Z., Yeng, Y., van der Velde, R., Thibeault, M., Dorigo, W., Vreugdenhil, M., Walker, J. P., Wu, X., Monerris, A., O'Neill, P. E., Entekhabi, D., Njoku, E. G, Yeuh, S., 2017. Validation of SMAP surface soil moisture products with core validation sites. *Remote Sensing of Environment*, 191, 215-231.
- de Rosnay, P., Drusch, M., Vasiljevic, D., Balsamo, G., Albergel, C., Isaksen L., 2017. A simplified Extended Kalman Filter for the global operational soil moisture analysis at ECMWF, *Quarterly. Journal of Royal Meteorological Society*, 139(674), 1199-1213.
- Dirmeyer, P. A., Guo, Z. C., és Gao, X., 2004: Comparison, validation, and transferability of eight multiyear global soil wetness products. *Journal of Hydrometeorology*, 5, 1011–1033.
- DMCSEE – Summary of Project Results, 2012. Summary of the result of the project, co-financed by the South East Europe Transnational Cooperation Programme (contract no. SEE/A/091/2.2/X)
- Dorigo, W. A., Wagner W., Hohensinn, R., Hahn S., Paulik C., Xaver A., Gruber A., Drusch M., Mecklenburg S., van Oevelen P., Robock A., Jackson T., 2011. The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 1675-1695.
- Dorigo, W., Wagner, W., Albergel, C., Albrecht, F., Balsamo, G., Brocca, L., Chung, D., Ertl, M., Forkel, M., Gruber, A., Haas, E., Hamer, P. D., Hirschi, M., Ikonen, J., de Jeu, R., Kidd, R., Lahoz, W., Liu, Y., Miralles, D., Mistelbauer, T., Nicolai-Shaw, N., Parinussa, R., Pratola, C., Reimer, C., van der Schalie, R., Seneviratne, S.,

- Smolander, T., Lecomte, P., 2017. ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 203, 185-215.
- ECMWF, H-SAF Products Download Centre, 2018. (Internetes elérhetőség: http://hsaf.meteoam.it/user_support.php (2018-as állapot.))
- ECMWF, Public Datasets, 2018. (Internetes elérhetőség: <http://apps.ecmwf.int/datasets/> (2018-as állapot))
- Engman T. E., Chauhan, N., 1995. Status of Microwave Soil Moisture Measurements with Remote Sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51, 189-198.
- Entekhabi, D., Njoku, E. G., O'Neill, P. E., Kellogg, K. H., Crow, W. T., Edelstein, W. N., Entin, J. K., Goodman, S. D., Jackson, T. J., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J. R., Koster, R. D., Martin, N., McDonald, K. C., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J. C., Spencer, M. W., Thurman, S. W., Tsang, L., Zy, J. V., 2010. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 704-716.
- ESA, Climate Change Initiative Phase II – Soil Moisture, Product Specification Document, 2017. Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring (EODC) GmbH, 38 p.
- ESA, Copernicus Global Land Service Products, 2018. (Internetes elérhetőség: <http://land.copernicus.eu/global/products/swi> (2018-as állapot))
- ESA, Copernicus Open Access, 2018. (Internetes elérhetőség: <https://scihub.copernicus.eu/> (2018-as állapot))
- ESA, How to Obtain SMOS Data, 2018. (Internetes elérhetőség: https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/smos/content/-/asset_publisher/t5Py/content/how-to-obtain-data-7329 (2018-as állapot))
- ESA, SMOS Product, 2018. (Internetes elérhetőség: <https://smos.cnes.fr/en/SMOS/index.htm> (2018-as állapot))
- Findell, K. L., Gentile, P., Lintner, B. R., Guillod, B. P., 2015. Data length requirements for observational estimates of land-atmosphere coupling strength. *Journal of Hydrometeorology*, 16, 1615–1635.
- Frey, S., 2014. Pályán a Sentinel-1A. Úrvilág, Úrkutatási hírportál. (Internetes elérhetőség: http://www.urvilag.hu/gmes/20140404_palyan_a_sentinella (2018-as állapot))
- Gabarro, C., Martinez, J., Ballabreba J., Piles, M., Umbert, M., Perez, F., Turiel, A., Font, J., Portabella, M., Huoareau, N., Omledo, E., 2013. SMOS Level 3 and Level 4 Research Products Provided by the Barcelona Expert Center. *Geophysical Research Abstracts*, 15.

- Guo, Z., és Dirmeyer, P. A., 2006: Evaluation of the Second Global Soil Wetness Project soil moisture simulations: 1. Intermodel comparison. *Journal of Geophysical Research*, 111, D22S02
- Henderson-Sellers, A., Yang, Z-L., Dickinson, R. E., 1993. The Project for Intercomparison of Land-surface Parameterization Schemes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 76, 489-504.
- Kern, A., Marjanovic, H., Dobor, L., Anic, M., Hlásny, T., Barcza, Z., 2017. Identification of Years with Extrem Vegetation State in Central Europe Based on Remote Sensing and Meteorological Data. *South-East European Forestry*, 8 (1), 1-20.
- Kidd, R., Makhmara, H., Paulik, C., 2014. Operation of the Global Land Component. Product User Manual., Soil Water Index. GIO-GL Lot 1, GMES Initial Operations, 28 p.
- Koster R. D., Dirmeyer, P. A., Guo Z., Bonan, G., Chan, E, Cox, P., Gordon, T., Kanae, S., Kowalczyk, E., Lawrence, D., Liu, P., Lu, C-H., Malyshev, S., McAvaney, B., Mitchell, K., Mocko, D., Oki, T., Oleson, K., Pitman, A., Sud, Y.C., Taylor, C.M., Verseghy, D., Vasic, R., Xue, Y., Yamada, T., 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 305, 1138–1140.
- Koster, R. D. és Suarez, M. J., 2001. Soil moisture memory in climate models. *Journal of Hydrometeorology*, 2, 558–570.
- Lacaze, R., Smets, B., Baret, F., Weiss, M., Ramon, D., Montersleet, B., Wandrebeck, L., Calvet, J. C. Roujean, J. L., Camacho, F., 2015. Operational 333m Biophysical products of the Copernicus Global Land Service for Agriculture Monitoring. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7/W3, 53-56.
- Lakshmi, V., 2013. Remote Sensing of Soil Moisture. *International Scholarly Research Notices Soil Science*, Article ID 424178, 33 p.
- McKee T.B., Doesken N. J., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequencies and duration to time scales. Eight Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, 1993. január 17-22.
- Meng, L., Quiring, S., 2008. A Comparison of Soil Moisture Models Using Soil Climate Analysis Network Observations. *Journal of Hydrometeorology*, 9, 641-659.
- Mo, K. C., és Juang H., 2003. Relationships between soil moisture and summer precipitation over the Great Plains and the Southwest. *Journal of Geophysical Research*, 108, D16, 8610
- Nagler, T., Rott, H., Hetzencker, M., Wuite, J., Potin, P., 2015. The Sentinel-1 Mission: New

- Opportunities in Ice Sheet Observations. *Remote Sensing*, 7, 9371-9389.
- Nagy, Z., Pintér, K., Czóbel, Sz., Balogh, J., Horváth, L., Fóti, Sz., Barcza, Z., Weidinger, T., Csintalan, Zs., Dinh, N.Q., Grosz, B., Tuba, Z., 2007. The carbon budget of semi-arid grassland in a wet and a dry year in Hungary. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 121, 21-29.
- National Snow and Ice Data Center, Scientific Data Search, 2018. (Internetes elérhetőség: <http://nsidc.org/data/search/> (2018-as állapot))
- Nijs, A. H. A. D., Parinussa, R. M., Jeu, R. A. M. D., Schellekens, J., Holmes, T. R. H., 2015. A methodology to determine radio-frequency interference in AMSR2 observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53, 5148–5159.
- NSIDC, Scientific Data Search, 2018. (Internetes elérhetőség: <http://nsidc.org/data/search/> (2018-as állapot))
- Pálfai, I., 2011. Aszályos évek az Alföldön 1931–2010 között (Drouth years in the Hungarian Plain between 1931–2010). In: J. Rakonczai (Ed.), *Környezeti változások és az Alföld (Environmental Changes and the Hungarian Plain)* 96-87 p.
- Parinussa, R., Meesters, A. G. C. A., Liu, Y. Y., Dorigo, W., Wagner, W., De Jeu, R. A. M., 2011. Error estimates for near-real-time satellite soilmoisture as derived from the land parameter retrieval model. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8, 779–783.
- Product User Manual (PUM) for product H8 – SM-OBS-2. SM-OBS-2 - Small-scale surface soil moisture by radar scatterometer. 2015. 29 p.
- Product User Manual H27, 2017. Soil Wetness Index in the Roots Region Data Records, 17 p.
- Public Datasets, 2018. (Internetes elérhetőség: <http://apps.ecmwf.int/datasets/> (2018-as állapot))
- Rajkai, K., 2004. A víz mennyisége, eloszlása és áramlása a talajban. MTA Talajtani és Agrokémiai Kutatóintézet, Talajtani Osztály, Budapest, 2004, 5-19.
- Robock, A., Schlosser, C. A., Vinnikov, K. Ya., Speranskaya, N. A., Entin, J. K., Qiu, S., 1998. Evaluation of the AMIP soil moisture simulations. *Global and Planetary Change* 19, 181–208.
- Robock, A., Vinnikov, K. Y., Srinivasan, G., Entin, J. K., Hollinger, S. E., Speranskaya, N. A., Liu, S., Namkhai A., 2000. The Global Soil Moisture Data Bank. *Bulletin of American Meteorological Society*, 81, 1281-1299.
- Seneviratne, S.I., Lüthi, D., Litchi, M., Schar, C., 2006. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature*, 443, 205-209.
- SMAP Handbook, 2014. Mission Overview In: Soil Moisture Active Passive, Mapping Soil

- Moisture and Freeze/Thaw from Space. National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, 5-29.
- SMOS Product, 2018. (Internetes elérhetőség: <https://smos.cnes.fr/en/SMOS/index.htm> (2018-as állapot))
- Teuling, A. J., 2018. A hot future for European droughts. *Nature Climate Change*, 8, 360-369.
- Ulaby, F. T., Moore, M. K., Fung, A. K., 1982. Microwave Remote Sensing, Active and Passive: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory 2. Artech House, Norwood, MA.
- van der Velde, R., 2010. Soil Moisture Remote Sensing using Active Microwaves and Land Surface Modeling. Doktori értekezés, University of Twente, Enschede (témavezető: Prof. Dr. Ir. Z. Su). 193 p.
- Wagner, W., Dorigo, W., de Jeu, R., Fernandez, D., Benveniste, J., Haas, E., Ertl, M., 2012. Fusion of active and passive microwave observations to create an Essential Climate Variable data record on soil moisture. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1-7, 315-321.
- Zuo, Q., Meng, L., Zhang, R., 2004. Simulating soil water flow with root-water-uptake applying an inverse method. *Soil Science*, 169, 13–24.