

NOAA AVHRR NDVI adatsorok analízise

Diplomamunka



Készítette:

Fassang Ágnes

ELTE TTK Meteorológiai Tanszék

Témavezetők:

Kern Anikó, dr. Barcza Zoltán, dr. Bartholy Judit

ELTE TTK Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2008.

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
Bevezetés	3
1. Irodalmi áttekintés.....	6
2. Felhasznált adatok és módszerek	7
2.1. NDVI adatok	7
2.2. ECMWF ERA40 Reanalízis adatbázis hóvastagság adatok	9
2.3. A BISE módszer.....	10
2.4. Az MVI korrekció	12
2.5. A Jackknife módszer	13
3. Idősor korrekció	15
3.1. Havas adatok kiszűrése	15
3.2. Téli adatok pótlása a sokéves átlaggal	16
3.3. A BISE és az MVI korrekció alkalmazása.....	18
3.4. A Jackknife módszer alkalmazása.....	20
3.5. A BISE és az MVI korrekció használhatósága a Kárpát-medence vegetációjára	24
3.5.1. Az 1992-es országos aszály vizsgálata.....	25
3.5.2. A nyári aratások vizsgálata	28
3.5. A korrekciók térbeli ábrázolása.....	35
4. Magyarországi vizsgálatok a korrigált adatsorral.....	37
4.1. Minimum, maximum, és flush NDVI térképek.....	37
4.2. A tenzészidőszak hosszabbodásának vizsgálata	40
4.3. Tendenciavizsgálat	42
4.4. Pinatubo vulkán kitörésének hatásvizsgálata	43
Összefoglalás	45
Köszönetnyilvánítás	47
Irodalomjegyzék.....	48

Bevezetés

Az emberi tevékenység hatására az ipari forradalom kezdete óta a légkör összetétele jelentősen megváltozott. A légköri üvegházgázok feldúsulása miatt a felszín közelében az energiamérleg módosult, a mérési adatok tanulsága szerint az elmúlt évszázadban a földfelszín átlaghőmérséklete 0,8 °C-kal emelkedett (IPCC, 2007). A melegedésnek számos következménye van: visszahúzódnak a magashegyi gleccserek, sok helyen korábbra tevődött a tavaszi hóolvadás, és a folyók, tavak jegének megolvadása. Egyes megfigyelések szerint a sarkokon jelentősen elvékonyodott a jégtakaró, és a globális kontinentális jég területe 10%-kal csökkent az elmúlt néhány évtizedben. A Kilimandzsáró havának több mint négyötöde elolvadt 1912 óta (IPCC, 2007). A Himalája Indiában található részén egyes gleccserek olyan ütemben húzódnak vissza, hogy többségük a kutatók szerint 2035-re teljesen eltűnik. Az utóbbi fél évszázadban elvékonyodott az Északi-sarkvidék jege, kiterjedése pedig jelentősen csökkent. Az Arktiszon tavasszal 9 nappal korábban kezd el olvadni az édesvízi jég, mint 150 évvel ezelőtt. Alaszkában az állandóan fagyott talaj, a permafroszt felengedése miatt helyenként 5 méterrel süllyedt meg a talaj. Az olvadások miatt az utóbbi 100 éve alatt a világtengerek szintje 10-20 centiméterrel emelkedett meg (IPCC, 2007).

Változások álltak be a légköri cirkulációban is. A tengerfelszín hőmérséklete és a hótakaró változásai nyomán módosult az általános légkörzés a mérsékelt övben. A változás egyik sajátossága, hogy mindkét féltekén erősödött a nyugat-keleti cirkuláció. A jelenség egyik oka a földrajzi szélességek közötti hőmérséklet-különbségben keresendő. Az észak-atlanti ciklontevékenység az 1970-es évektől megerősödött, ami párhuzamba vonható a tengervíz hőmérsékletének emelkedésével. A változás alapvetően az esetek intenzitásában (szélsébség, csapadékmennyiség) mutatható ki (IPCC, 2007).

Kutatások kimutatták, hogy a vegetációs időszak meghosszabbodott a mérsékelt övben, vagyis a növényzet számára hosszabb termőidőszak áll rendelkezésre (Myneni et al., 1997; 1998; Tucker et al., 2001; Bartholy and Pongrácz, 2005; Fassang, 2006). Az éghajlatváltozás tehát jelentősen befolyásolja a vegetáció állapotát is.

A növényzet is visszahat az éghajlatra, mivel a növények igen fontos szerepet játszanak a légkör nedvesség-, hő- és szén-dioxid forgalmában, és alapvetően meghatározzák a felszín

albedóját. A kölcsönhatás a bioszféra és a légkör között elengedhetetlenné teszi a meteorológus közösség számára is a növényzet állapotának folyamatos vizsgálatát.

Erre a célra többféle módszer és mérőszám is rendelkezésre áll. A felmérés végezhető földfelszíni, és űrbázisú megfigyelések alapján is. Mérőszámként vizsgálható többek között a LAI (levélfelületi index), vagyis az 1 m² talajfelületre jutó levélfelület nagysága (m²). A levélfelületi index fajonként a fejlettségi állapottól, a termesztés módjától, az állománysűrűségtől, a tápanyag- és vízellátottságtól függ. Különböző vegetációs indexek segítségével is lehet felszíni, illetve távérzékeléssel végzett felméréseket végezni. Ezek közé az állapotjelzők közé tartozik a Normalizált Vegetációs Index (Normalized Difference Vegetation Index, továbbiakban NDVI) is.

A mai technológiának köszönhetően nagy területi felbontással szerezhetünk műholdas megfigyeléseken alapuló megbízható információt a Föld felszínéről és légkörének állapotáról. Munkámban a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) műholdak AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) szenzorainak adataiból származtatott normalizált vegetációs indexet használjuk fel a növényzet állapotának megfigyelésére (az ún. Pathfinder adatbázist; James and Kalluri, 1994).

Diplomamunkám célja a Magyarországra vonatkozó vizsgálatok megalapozása, és egy olyan korrigált, a Kárpát-medencére vonatkozó NDVI adatsor létrehozása, amely további vizsgálatokra felhasználható oly módon, hogy a potenciális felhasználónak később már ne kelljen foglalkozni az eredeti adatsorban jelen lévő hibákkal.

A nyers adatsorból korábbi munkámban (Fassang, 2006) már kiválogattam az egyértelműen rossz adatokat, illetve végrehajtottam egy ún. sivatagi korrekciót, amelyre a műszerek fokozatos öregedésének, a több műhold különböző beállításának és az eltérő megvilágítási körülmények miatt volt szükség.

Az NDVI adatsorok jellegükből fakadóan zajosak. Ennek egyik okozója a felhőzet, mivel a műhold egy felhős terület felett való átvonulása során negatív, vagy a növény állapotát korrektül leíró értéknél alacsonyabb NDVI értéket mér, vagyis nem képes az alatta elhelyezkedő vegetáció állapotának felmérésére. A zaj egy másik okozója lehet a műholdzenitszög változása, hiszen a sugárzásmérő műszerek különböző szögben eltérő értékeket mérnek. Nem hagyható figyelmen kívül a napzenitszög sem, hiszen eltérő megvilágítási körülmények között a reflektanciaértékek is mások lesznek. Nagyobb napzenitszögek esetén, vagyis alacsony napállásakor (télen), de ugyanolyan megfigyelési szög esetén az NDVI értéke is alacsonyabb lesz.

Ez sivatagi területek vizsgálata alapján mutatható meg a legegyszerűbben, ahol az egyébként konstans sivatagi NDVI alacsonyabb értéket mutat (Wu et al., 2003). Ebből következően az éves menetet mutató területeken is befolyásolni fogja az NDVI értéket a napzenitszög változása: magas napzenitszög esetén alacsonyabb lesz a vegetációs index értéke, míg alacsony napzenitszög esetén magasabb (továbbra is konstans megfigyelési szög esetén). Zajnak hívhatjuk még azokat a méréseket is, ahol a felszín hó borítja, ezért negatív NDVI értéket kaphatunk, mely nem ad a növényzet állapotáról információt. Ezek a mérések is korrekcióra szorulnak. A felsorolt okok miatt tehát az NDVI adatsorok esetén elengedhetetlen a megfelelő korrekciós eljárás alkalmazása.

A fent említett adathibák korrigálásának előfeladata volt, hogy a hóborította területekből származó, esetlegesen negatív értékeket kiszűrjük. Ehhez a vizsgálathoz használjuk fel az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ERA 40 reanalízis adatbázisát, amelyből hóvastagság adatokat (ECMWF kód: 141) használunk fel a téli hibás értékek kiszűrésére.

Ezután olyan módszert kerestünk a korrekcióhoz, ami Magyarország területére alkalmazható. Szakirodalmi vizsgálatok alapján két olyan módszert adaptáltunk, amellyel megfelelő pontossággal lehet korrigálni zajos NDVI adatsort. Az egyik módszer az ún. BISE korrekció (Best Slope Index Extraction; Viovy et al., 1992), míg a másik módszer az ún. MVI (Mean-Value Iteration; Ma and Veroustraete., 2006) korrekció. Munkám során elvégezzük a BISE és az MVI korrekciót, amelyek már magukra a Pathfinder NDVI idősorokra vonatkoznak. A korrekció a zajos adatokat, illetve a nem valós vegetációs értékeket hivatottak tetszőleges időtartamra, adott pixelre vonatkozó idősorból kiszűrni. Munkámban megvizsgáljuk a két módszer alkalmazhatóságát és különböző paramétereinek értéket a Kárpát-medencére vonatkozóan, illetve további vizsgálatokat végzünk annak megállapítása érdekében, hogy a Kárpát-medencére a két módszerből melyik adja vissza inkább a vegetáció tényleges állapotát.

A minden szempontból korrigált és rekonstruált adatsort a Kárpát-medencére vonatkozóan a munka befejezése után archiváljuk, ami további vizsgálatokra úgy válik felhasználhatóvá, hogy a későbbiekben nem kell az adatsor hiányosságaival, hibáival, és korrekciójával törődni. A többlépcsős korrekciós eljárás után az adatsorból eltűnnek a szisztematikus, illetve véletlenszerű hibák, így a vegetáció állapotáról a lehető legtorzítatlanabb

képet kapjuk a vizsgált 20 évre vonatkozóan. A létrejött adatbázis Magyarországon újdonság, korábban hasonló adatok nem álltak rendelkezésre az ország területére.

Megvizsgáljuk a Kárpát-medence területén, hogy a tenyészidő hossza milyen tendenciát mutat, ezután a teljes adatsort vizsgáljuk, hogy a Nyugat-Európában megfigyelt „zöldülési folyamat” hazánkban is nyomon követhető-e, majd esettanulmányt végzünk a Fülöp-szigeteki Pinatubo vulkán 1991-es kitörése miatt feltételezhető NDVI visszaesésről.

1. Irodalmi áttekintés

Az NDVI idősorokban jelen lévő zaj már a korai vizsgálatokban is problémát okozott és többen próbáltak megoldást találni ennek kiküszöbölésére. Az általam alkalmazott két korrekciós eljárás mellett (BISE, MVI) más algoritmusok is léteznek az NDVI idősorok korrekciójára.

Bradley és társai 2007-ben egy kétlépéses módszert fejlesztettek ki: az első lépés egy, az átlagos éves fenológiai ciklushoz közelítő modell felállítása, a második pedig egy *spline* alapú, és az évközi fenológiai ciklushoz közelítő modell megalkotása. Az idősorok fő tulajdonságai (pl. csúcérték, tenyészidő kezdete, az idősor valódi simasága és érdekessége) a hiányzó és egyértelműen hibás értékek minimalizálása után megfigyelhetővé válnak. A visszatérő, utolsó négyzetes közelítés meghatározza az NDVI értékek felső küszöbét az átlagos idősornál. Ezt a vizsgálatot különböző felszín típusokra végezték el az Amerikai Egyesült Államok nyugati részén. Megállapították, hogy egy átlagos évben a tenyészidőszak kezdete a felszín típusoktól függően 8 napban térhet el. Megfigyelték továbbá, hogy 1990 és 2002 között a tenyészidőszak kezdetének időbeli változékonysága 17 és 35 nap között alakul a felszín típusoktól függően, amely az idősor évközi lényeges változékonyságáról tanúskodik. Az idősor korrekciójuk használata során könnyebbé vált az évközi fenológiai változások megfigyelése, és segített a regionális és lokális skálájú felszínborítottsági trendek megértésében.

Wagenseil és Samimi (2006) vizsgálataikhoz Fourier módszerrel korrigálták az adatsort. Az eljárás harmonikus függvényeket használ a korrekcióhoz, vagyis kizárólag sima átmeneteket tud modellezni, azaz nem képes a hirtelen változások (pl. emberi beavatkozás, természeti katasztrófák, tüzek) leírására.

Korábbi, az ELTE Meteorológiai Tanszékén történt kutatások során (Bartholy and Pongrácz, 2005) már foglalkoztak a NOAA *Pathfinder* NDVI adatsorral a Kárpát-medencére vonatkozóan. Maximum és minimum térképeket állítottak elő Európa és Magyarország térségeire, valamint hazánk néhány területének maximum és minimum menetét elemezték. Majd az NDVI adatsort összevetették a vizsgált időszakra vonatkozó hőmérséklet és csapadék adatokkal. Ehhez a vizsgálathoz a korrigálatlan eredmények lettek felhasználva.

Külföldön számos munka született, amely erre az adatsorra épült. Stöckli és Vidale 2004-ben megjelent tanulmánya az adatsor tulajdonságait is részletesen ismerteti, valamint a Föld különböző területeire vizsgálja az NDVI éves menetét. Megfigyeléseket végeztek a különböző felszín típusokra is (örökzöld tűlevelű erdőktől kezdve a tundrán át a hófedte területekig), hogy milyen éves meneteket produkálnak, illetve vizsgálták az NDVI fluktuációját.

Az ELTE TTK Űrkutató Csoport munkatársai szintén foglalkoznak a vegetáció állapotának és fejlődésének műholdas megfigyelésével saját vételű adatok alapján. Munkáik azonban nem kifejezetten meteorológiai, vagy klimatológiai szempontúak, ugyanis elsődlegesen a terméshozam becslésével foglalkoznak (Ferencz et al., 2004).

Myneni és társai (1997) a magasabb északi szélességeken tapasztalható tenyészidő-hosszabbodásról írtak tanulmányt, amelyben az NOAA *Pathfinder* NDVI adatokat használta fel a 1981-től 1991-ig tartó periódusban.

Tucker és munkatársai (2001) munkájában a tenyészidőre vonatkozó trendekkel foglalkoztak az NDVI adatsorok segítségével, és megfigyeléseket végeztek a Pinatubo vulkán 1991-es kitörésével kapcsolatban is. Megállapították, hogy a növekedő NDVI tendenciában (a vulkán kitörésével a légkörbe jutott kén-dioxid) visszaesést okozott.

2. Felhasznált adatok és módszerek

2.1. NDVI adatok

Munkámban a NOAA kvázipoláris meteorológiai műholdsorozat fedélzetén található AVHRR sugárzásmérőműszer mért adataiból származtatott NDVI értékeket használtam fel a növényzet megfigyelésére. Az adatsor a NOAA *Pathfinder* földfelszínre vonatkozó adatok egy részét képezi (James és Kalluri, 1994). A NOAA műholdsorozat első tagját (NOAA-6) 1979-ben

állították Föld körüli pályára az AVHRR első verziójával, majd a következő években megjelentek a műszer továbbfejlesztett változatai is (1981: AVHRR/2 és 1998: AVHRR/3).

A műszer 5 spektrális csatornában végzi egyszerre 1 km-es horizontális felbontású méréseit (1. Táblázat).

Csatorna sorszáma	Sávszélesség (µm)	Spektrál tartományok	Csatorna rövidítése	Beiktatása az AVHRR (1-3) típusokon
1	0,58 - 0,68	Látható fény	VIS vagy RED	Mind
2	0,725 - 1,00	Közeli infravörös	NIR	Mind
3A	1,58 - 1,64	Közeli infravörös	SWIR	AVHRR3: napközben
3B	3,55 - 3,93	Közeli infravörös	MIR	Mind (AVHRR3: éjjel)
4	10,3 - 11,3	Távoli infravörös	T 4 vagy TIR 1	Mind
5	11,5 - 12,5	Távoli infravörös	T 5 vagy TIR 2	AVHRR2 és AVHRR3

1. Táblázat. Az AVHRR műszer csatornáinak spektrális tartományai

Az AVHRR különösen a vegetáció nagy területű monitorozásához biztosít kedvező feltételeket. A spektrális csatornák közül a látható fény tartományába eső 1-es csatornát (0,58-0,68 µm) és a közeli infravörös 2-es csatornát (0,73-1,1 µm) használják erre a célra. A vegetáció fejlettségét jellemző NDVI értékek származtatása a következőképpen történik **(1)**:

$$NDVI = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (1)$$

ahol IR a 2-es, az R az 1-es csatorna kalibrált radianciáját jelöli. Az NDVI egy dimenziótlan mennyiség, melynek értéke -1 és 1 közé esik

Az általam felhasznált 8 km-es horizontális felbontású adatsor 1981. július közepétől indul, és 2001 áprilisáig tart. Az adatok 10 napos kompozitképek formájában állnak rendelkezésünkre (a továbbiakban dekádnak nevezve egy 10 napos periódust), amelyben egy 10 napos ciklushoz az időszakban mért maximumot rendeljük hozzá minden képponthez. Amikor a műhold az adott terület fölé ér, igen nagy százalékban halad el felhős területek felett. Ekkor az NDVI értéke nem fogja tükrözni a vegetáció állapotát, hiszen a felhők miatt negatív, hibás értéket fog adni. Ha azonban a 10 nap maximumát vesszük, nagy eséllyel fog akadni legalább egy olyan nap minden képpontra, amikor azt pont nem takarja felhő, és valós felmérést fogunk kapni a növényzet állapotáról.

A felhasznált adatsoron az előmunkálatok folyamán elvégezték a Rayleigh szóródás korrekcióját Gordon sugárzás-átviteli modellje alapján (Gordon et al., 1988). TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) mérések felhasználásával, amelyek a légkör függőleges ózontartalmát becslik, az ózon abszorpció hatását is figyelembe vették. Az adatsort azonban nem korrigálták az aeroszolok, a vízgőz, a párolgás szempontjából, illetve a változó geometriai viszonyok hatásaitól. Ezekből néhány zavar automatikusan kikompenzálódik az NDVI értékekben, hiszen az NDVI értékek a két csatorna méréseinek aránya.

A megfelelő elő-kalibrálás hiánya miatt az NDVI idősor esetenként hibával terhelt s így csak korlátozottan alkalmas a földfelszín paramétereinek térbeli és időbeli következetes származtatásához. Ezért is előnyösebb a 10-napos kompozitképek használata, bár előállításuknál a maximális felhőborítottság esete nincs kiküszöbölve. Esetenként megfigyelhető nagyon magas (0,8 feletti) NDVI érték, és időnként néhány képpont a magas napzenitszög miatt hiányzó értéket is produkál.

2000-től kezdve az AVHRR szenzor előregedése az NDVI értékek csökkenéséhez vezetett. A vegetációs területek ezt a hatást részben kompenzálni tudják, ezért ez a jelenség a Líbiai-sivatag felett vizsgálható leginkább (Stöckli et al, 2004). A műhold szenzorainak degradációja a téli hónapokra nagyobb adatkiesést produkál, ezért a NASA a 2001-es Pathfinder adatokat már nem javasolja tudományos célokra a fenti problémák miatt, és 2001 szeptemberétől leállította ezen adatsorok előállítását.

2.2. ECMWF ERA40 Reanalízis adatbázis hóvastagság adatok

A vizsgálatainkhoz felhasználtuk az ECMWF ERA40 reanalízis-adatbázisát, melyet az ECMWF központ állított össze az 1957-2002 időszakra, és a teljes Földre szolgáltat reanalízis adatokat. Az ERA-40 adatbázis számos meteorológiai paramétert tartalmaz 6 órás időbeli felbontásban, 60 vertikális szinttel rendelkezik a felszíntől mintegy 65 km magasságig, és 1 °-os horizontális rácshálózatot fed le (Gibson et al., 1997).

Az adatbázisból a Kárpát-medence térségére szolgáltatott hóvastagság adatokat használtuk fel (ECMWF kód: 141). Az adatok 1×1°-os rácson érhetőek el és a vizsgált időintervallumhoz minden napra rendelkezésünkre állt a hóvastagság értéke.

2.3. A BISE módszer

Ez az eljárás az általunk is vizsgált NOAA AVHRR NDVI adatok hibáinak korrigálására lett kifejlesztve.

A BISE korrekció (Viovy et al., 1992) a vegetáció állapotában bekövetkező változások előreláthatóságán alapul, ugyanis egyértelműen el lehet különíteni a növényzeten végbemenő évközi változásokat a magas frekvenciás zajoktól, amelyek általában a felhőzet állapotának, illetve a zenitszög megváltozásának sajátosságai.

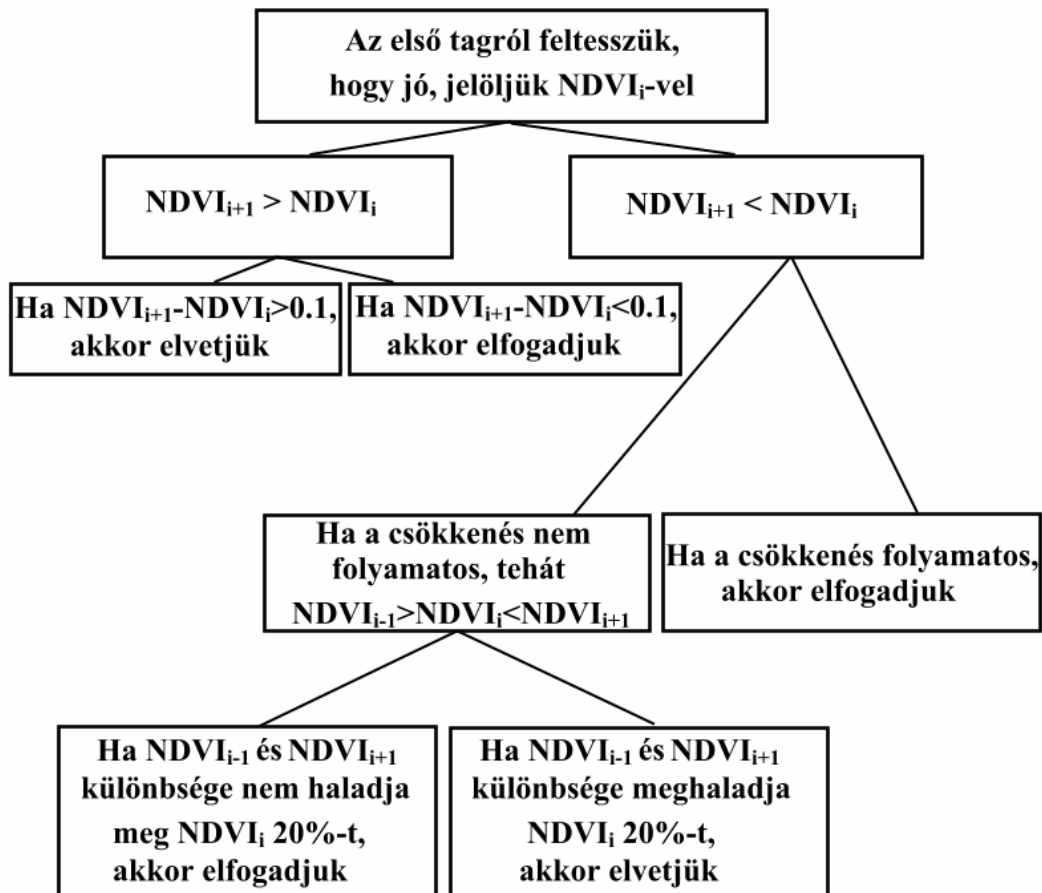
Az algoritmust alkalmazhatjuk egy év vizsgálatára, de akár számolható a 20 éves adatsorra is. Az NDVI idősor első tagjáról feltesszük, hogy reális, és a módszer ettől az értékből indulva a következő értéket vizsgálja. Ha az magasabb, mint az előző, és a növekedés mértéke nem több egy előre definiált küszöbértéknél, akkor elfogadjuk. Ha a következő érték viszont alacsonyabb, akkor az adatok vizsgálata tovább folytatódik egy ugyancsak előre meghatározott hosszúságú intervallumon belül, amelyet a továbbiakban „csúszó ablak”-nak nevezünk. A csökkenés csak akkor fogadható el, ha az egy fokozatos növekedést követ, amelyet a vegetáció produkál. Ha találunk egy elfogadható pontot a „csúszó ablak”-on belül, akkor a továbbiakban ez lesz a kiindulási pont, és az előzőt elutasítjuk. A köztes értékeket interpolációval pótoljuk, és a keresés az utolsó elfogadott ponttól fog folytatódni.

A vegetációs index értékének növekedése, amelyet a növényzet produkál, általában nem ugrásszerű, hanem egy folyamatos növekedést tükröz. Ha mégis ugrásszerű, annak csak kicsiny területi jellege lehet, mivel azonban ezeknek a kompozitképeknek egy pixelnyi méretük 64 km^2 , ezért a hirtelen ugrás nem elfogadható. Egy hirtelen csökkenés pedig csak akkor fogadható el, ha azt lassú újranovekedés követi. Az erőteljes csökkenés oka lehet például aratás, erdőtüz, vagy erdőirtás. Előfordulhat, hogy egy nagyobb vihar fákat dönt ki, és emiatt következik be egy ugrásszerű csökkenés (persze csak kisebb területeken). Ha egy hirtelen csökkenést egy hirtelen növekedés követ, nyilvánvalóvá válik, hogy a vegetáció nem viselkedhet így, ezért valószínű, hogy egy hibás mérésről, felhős területről vagy télen akár hóborított felszínről is szó lehet.

A vegetáció ezen fizikai tulajdonságain alapulva a módszer a növekedést például csak akkor fogadja el, ha az nem haladja meg az általa becsült NDVI küszöbértéket, 0,1-et. A felszínborítottság ugyanis bármilyen változáson mehet keresztül, 0,1 NDVI értéknél nagyobb nem ugorhat egy nagyobb terület (olyan, amilyennel például a NOAA AVHRR NDVI adatok

felbontása bír) értéke az egyik napról a másikra. Az ennél nagyobb mértékű növekedés esetén ezért biztosak lehetünk, hogy nem a növényzet nagy mértékű növekedése generál, hanem magas frekvenciás zajokról lehet szó.

Az **1a ábrán** a BISE korrekció folyamatábrája látható.



1a ábra. Az BISE korrekció folyamatábrája

Ezt a módszert fejlesztették tovább Lovell és Graetz (Lovell and Graetz, 2001), akik ezt az eljárást 10 napos kompozitképekre alkalmazták, amire jelenleg nekünk is szükségünk volt, hiszen a NOAA Pathfinder NDVI adatsora ebben a formában áll rendelkezésünkre. 4 különböző vegetációjú és éghajlatú terület (erdős, mezőgazdasági, szavannás és trópusi terület) megfigyelése alapján a csúszó ablakot három 10 napos kompozitképre találta optimálisnak, a növekedésnél pedig az előre megválasztott küszöbértéket 0,1-nek vette, ugyanezen területek megfigyeléséből.

A csökkenésnél a küszöbérték (továbbiakban α) pedig 20%, vagyis ha a vizsgált elem előtt is, és után is nagyobb értékű tag áll, mint ő maga, akkor a kettő különbsége nem lehet a vizsgált érték 20%-nál nagyobb. A módszert alkalmazzuk Magyarország területére, és vizsgáljuk a számított küszöbértékek jóságát, illetve módosítjuk, ha erre szükség lesz.

2.4. Az MVI korrekció

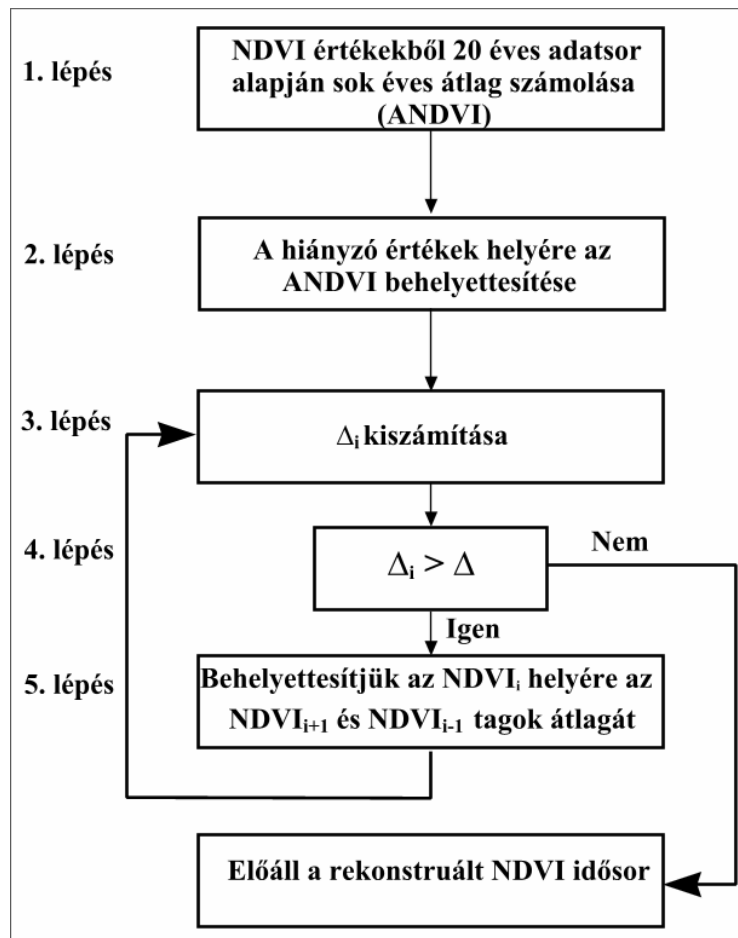
Ezen módszernek (Ma and Veroustraete, 2006) is a magas frekvenciás zajok, valótlan NDVI értékek kiszűrése a feladata.

Az eljárás első lépéseként a 10 napos maximum NDVI értékekből a 20 éves adatsor alapján sokévi átlagot számolnak a módszer kidolgozói, amelyet ezután ANDVI-nak neveznek. Az ANDVI kiszámításánál Ma és munkatársai (2006) figyelmen kívül hagyták az 1981, 1994 és 2001-es éveket, hiszen ezekben az időszakokban nagyon sok a hiányzó adat. 1981 júliusáig, illetve 1994 szeptemberétől kezdve az év végéig nem rendelkezünk adatokkal, illetve a 2001-es adatok is csak áprilisig elérhetők. Következő lépésként az idősorban szereplő olyan érték helyére, amely valami oknál fogva hiányzik, a dekád sorszámát figyelembe véve, ezt az ANDVI értéket helyettesíti be. Egy év vizsgálatánál ezután a vizsgált NDVI értékből kivonja a közvetlenül előtte és utána szereplő NDVI értékek átlagát. Ezután számítja a kapott érték abszolút értékét. Ezt elnevezi a vizsgált tag Δ -jának, vagyis

$$\Delta_i = \left| NDVI_i - \frac{(NDVI_{i-1} + NDVI_{i+1})}{2} \right| \quad (2)$$

ahol $NDVI_i$ a vizsgált érték, $NDVI_{i-1}$ az előző, $NDVI_{i+1}$ pedig a következő értéket jelöli.

Ha Δ_i kisebb, mint egy előre definiált küszöbérték, akkor elfogadja $NDVI_i$ -t. Ha nagyobb, akkor behelyettesíti az előtte és utána álló tag számtani közepét a vizsgált tag helyére. Az **1b ábrán** az algoritmus folyamatábrája látható.



1b ábra. Az MVI korrekció folyamatábrája

Az előbb részletezett egyszerű módon tehát nem csak a hibás adatok kiszűrése történik meg, hanem magának az NDVI adatsornak a pótlása is.

Ma és munkatársai ezt az idősor korrekciót Kína egy adott területére alkalmazták. A küszöbértéket a következőképpen választották: a terület minden pixelére kiszámolt sok éves NDVI átlag egy bizonyos százalékát kellett meghatározni, ami a vizsgált területre 10% volt.

2.5. A *Jackknife* módszer

A *Jackknife* módszerrel (Efron and Tibshirani, 1993) a különböző korrekciós algoritmusok (pl. BISE és MVI) hatékonyságát tudjuk ellenőrizni. A *Jackknife* módszer alapelve

az, hogy egy közelítőleg helyes adatsorból bizonyos százaléknyi adatot Monte-Carlo módszerrel (véletlenszám-generátor alkalmazásával) hibásra cserél. A hibás adatot az eredeti adat módosításával számolja, mégpedig úgy, hogy hozzáadja, vagy kivonja belőle a kiindulási érték maximum 50%-t, melynek mértékét szintén véletlenszám-generátorral határozza meg.

Ha ezután alkalmazzuk a korrekciós eljárásokat, megvizsgálhatjuk, hogy a helyes értékeket mennyire közelíti meg a két korrekciós módszer alkalmazása a hibával terhelt adatsorra. Mivel a módszer jellegéből adódóan az eredeti, vagyis jó értékeket ismerjük, ezért objektív képet kapunk a módszer használhatóságáról, jóságáról.

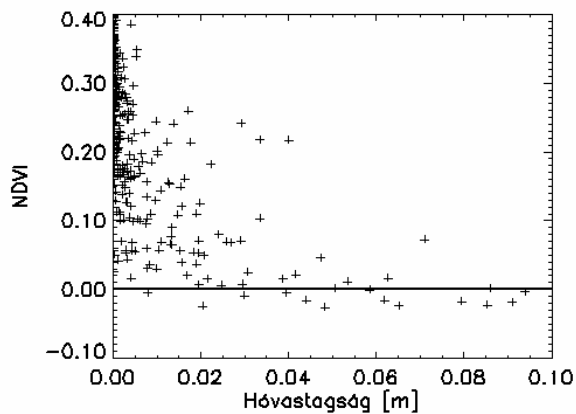
3. Idősor korrekció

3.1. Havas adatok kiszűrése

A korrekció első lépéseként azokat a téli adatokat kellett kiszűrni, amelyek olyan időpontban készültek, amikor az adott területet hó fedte.

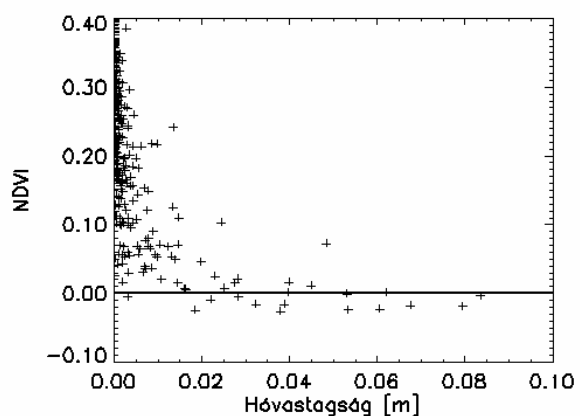
Ezen eljáráshoz az ECMWF ERA40 reanalízis adatbázisa állt rendelkezésünkre, amelyből hóvastagság adatokat (ECMWF kód: 141) használunk fel 1×1 fokos térbeli felbontásban.

Az NDVI adatainkat 10 napos kompozitképekként használjuk fel, míg a hóvastagság adatok napi bontásban szerepelnek az adatbázisban. Ahhoz, hogy összehasonlítható legyen ezen két adatbázis, a napi hóvastagság adatokból 10 napos adatsort kellett képeznünk. A 10 napos adatsor képzése többféleképpen is történhet. Mi azt vizsgáltuk, hogy a magyarországi kivágatra a pozitív és negatív NDVI értékek hogyan függenek össze adott területen a 10 napi hóvastagság minimumával, maximumával, illetve átlagával.



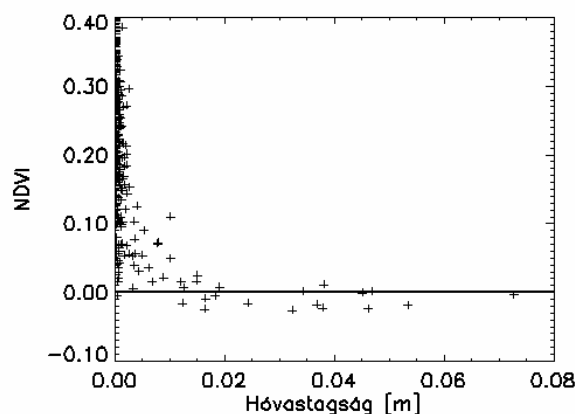
2a ábra.

Az NDVI értékek kapcsolata a napi hóvastagság adatok maximumával



2b ábra.

Az NDVI értékek kapcsolata a napi hóvastagság adatok átlagával



2c ábra.

Az NDVI értékek kapcsolata a napi hóvastagság adatok minimumával

A **2a ábrán** a 10 napi hóvastagság adatok maximumával számoltunk, a **2b ábrán** az átlagával, míg a **2c ábrán** a minimumával. Az adatokat az adott területre vonatkozó NDVI értékekkel vetettük össze novembertől márciusig terjedő időszakban, mind a 20 évre vonatkozóan. Megállapíthatjuk, hogy a 10 napos hóvastagság adatok minimumával számolva tapasztalhatjuk a legerősebb összefüggést az NDVI adatokkal, vagyis minél nagyobb a hóvastagság értékek minimuma, annál biztosabb, hogy az NDVI értékek negatívak lesznek.

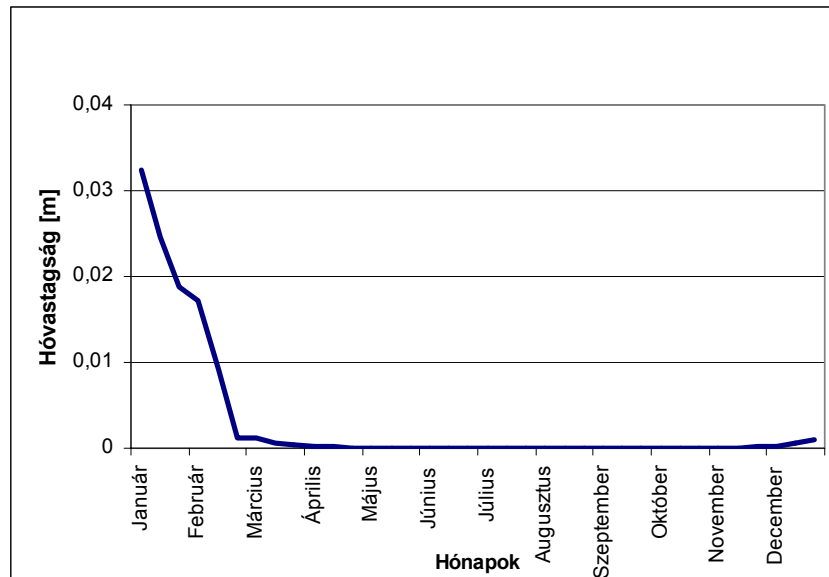
A vizsgálat elvégzése után megállapíthatjuk, hogy a hó jelenléte erőteljesen befolyásolja a 10 napos NDVI kompozitképek értékeinek alakulását, azonban az ERA40 térbeli felbontása túl kicsi ahhoz, hogy egy alaposabb függvénykapcsolatot fel lehessen állítani, számszerűsíteni lehessen. A szerzett tapasztalat alapján a továbbiakban a téli hónapokban (november, december, január, február) előforduló negatív NDVI értékeket elvetjük, és a következő alfejezetben leírt módon pótoljuk azokat.

3.2. Téli adatok pótlása a sokéves átlaggal

Az MVI módszer első lépése a sokéves átlag kiszámolása, illetve a hiányzó adatok sokéves átlaggal való pótlása volt. Tapasztalataink szerint nem helyes, ha egy nyári periódusban a hiányzó vagy hibás értékeket ezzel pótolnánk, hiszen az évi menetek között jelentős különbségek is lehetnek. Ezért korrekciónkat úgy folytattuk, hogy csak a hiányzó, illetve hibásnak ítélt téli

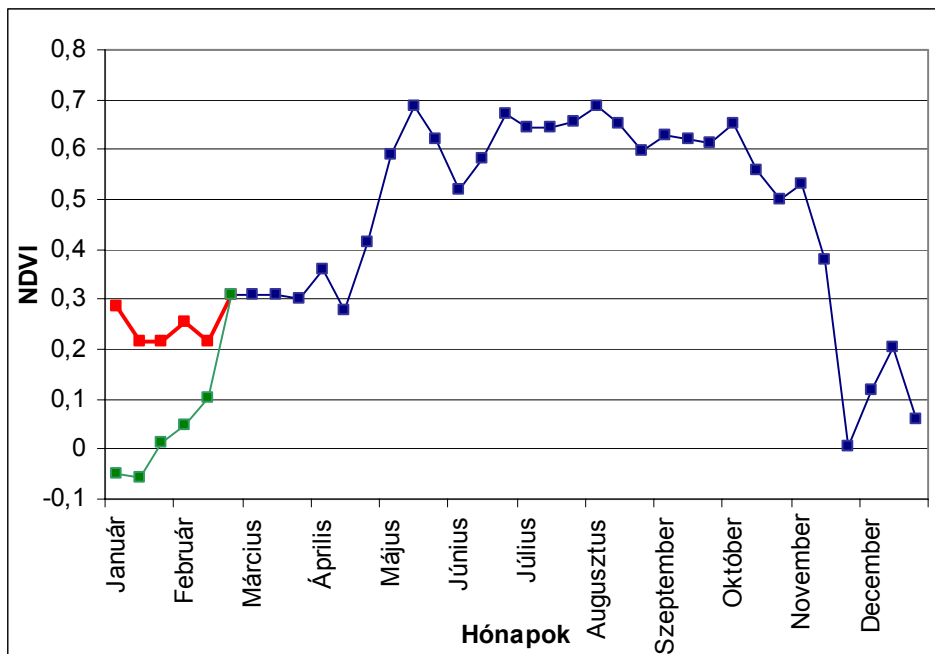
adatok helyére pótoljuk a sokéves átlagot, hiszen a vegetációmentes téli hónapok vegetációs indexének értéke minden évben körülbelül a sokéves átlag körül mozog. Téli hónapként a november, december, január és február hónapokat vettük, hiszen korábbi munkámban (Fassang, 2006) már vizsgáltuk a tenyészidőszak hosszabbodását, amelyből világossá vált, hogy a tenyészidőszak márciusnál hamarabb nem kezdődik el és novembernél később pedig csak igen ritkán ér véget. Ezeket a vizsgálatokat az Alföld egy területére, és a Bükk-hegységben is elvégeztük.

A **3. és 4. ábrán** egy tetszőlegesen kiválasztott pixelre (Északi szélesség 48° , Keleti hosszúság 19°) ábrázoljuk az 1997-es év hóvastagság grafikonját, hiányzó értékeit tartalmazó tömbjét, és a pótoló téli adatait.



3. ábra. A 48°N , 19°E koordinátájú pixel 1997-es évre vizsgált hóvastagság értékei

A **3. ábrán** látható, hogy a vizsgált pixel területét januárban és februárban is hó takarta.

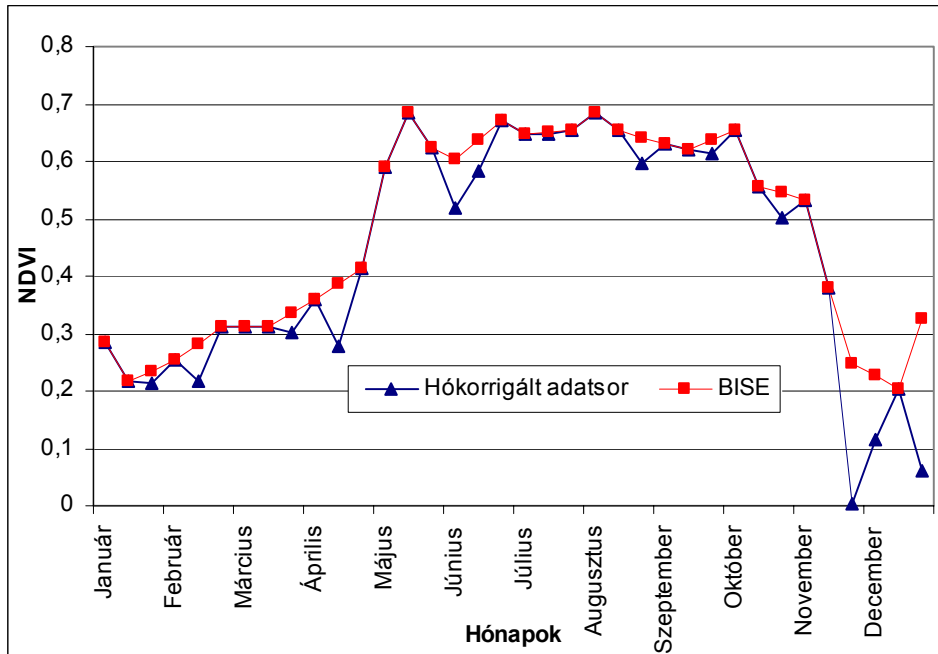


4. ábra. A 48°N, 19°E koordinátájú pixel 1997-es évre vizsgált NDVI értékei

A 4. ábrán ugyanazon pixel NDVI értékei láthatók. A kék jelzi az eredeti adatokat, amelyek a szűrés után is megmaradnak. A zöld menet azokat a téli adatokat jelzi, amelyet a szűrés során elvetünk, míg a piros azokét az elvetett zöld adatokét, amelyeket pótolunk a sokéves (nem negatív értékekből képzett) átlaggal.

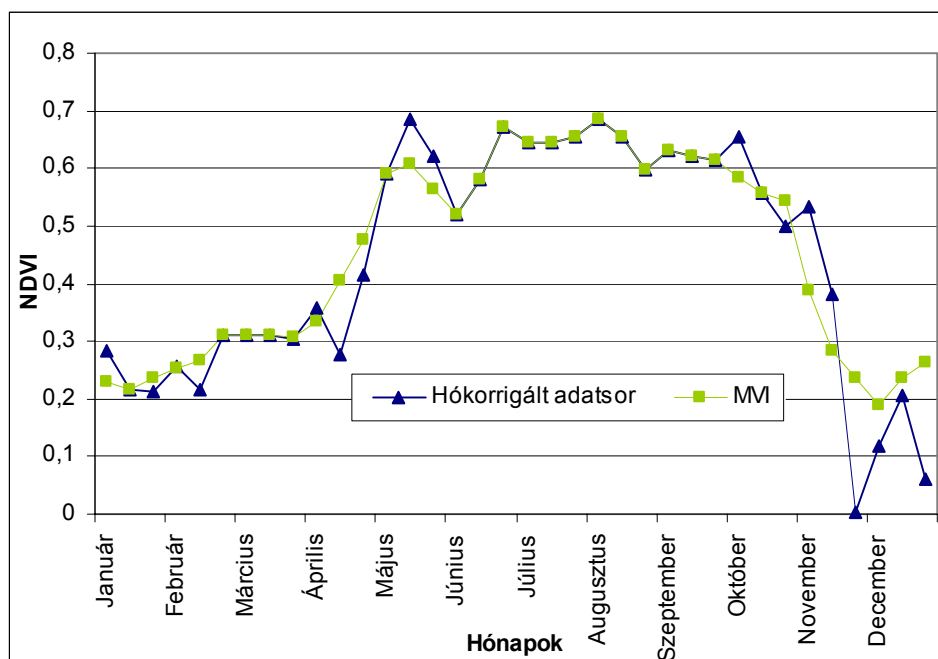
3.3. A BISE és az MVI korrekció alkalmazása

Miután kiszűrtük azokat az NDVI értékeket, amelyek hóborította felszín mellett készültek, és a téli hiányzó adatokat pótolunk a 20 éves átlagértékekkel, a 1.3. és 1.4. fejezetben leírtak szerint elvégeztük a BISE és az MVI korrekciót. Utóbbi azzal a különbséggel, hogy az évközi hiányzó adatok helyére nem pótolunk sokéves átlagot, csak a négy előbbieken meghatározott hónapban. Az 5. ábrán a BISE korrekció, a 6. ábrán az MVI korrekció egy tipikus eredménye látható az 1997-es évre a 48°N, 19°E koordinátájú pixelre.



5. ábra. A 48°N, 19°E koordinátájú pixel 1997-es évre vizsgált hókorrigált NDVI menete, és az erre alkalmazott BISE korrekció

Az **5. ábrán** tehát két menet látható, a kék azt az adatsort mutatja be, amelyet az előző fejezetben létrehoztunk a hókorrigált értékekkel, míg a piros menet a BISE korrekció elvégzése után kapott menetet ábrázolja. Jól látható, hogy a november végén tapasztalható igen nagy visszaesést kiszűrte a korrekció.



6. ábra. A 48°N, 19°E koordinátájú pixel 1997-es évre vizsgált pixel pótlott NDVI menete, és az erre alkalmazott MVI korrekció

A **6. ábrán** szintén két menet látható: a kék ismét a havas értékek miatt szűrt és pótlott adatsort tartalmazza, míg a zöld menet az MVI korrekció elvégzése után kapott menetet. Az általunk zajosnak gondolt adatokat az MVI korrekció is korrigálta.

3.4. A *Jackknife* módszer alkalmazása

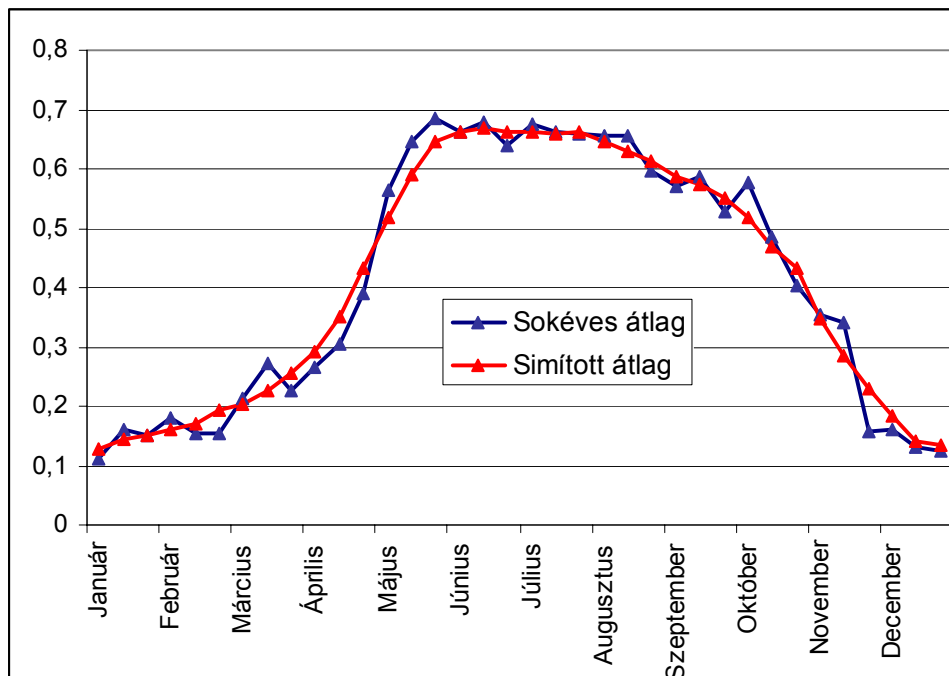
Az előző alfejezetben bemutatott esetekben a korrekciókat a szakirodalomban (Lovell and Graetz, 2001; Ma and Veroustraete, 2006) megállapított alapértelmezett paraméterekkel végeztük el, ahol a vizsgált területek Ausztrália és Kína egy-egy adott régiói voltak. A Kárpát-medence azonban ezektől a területektől eltérő klimatológiai tulajdonságokkal rendelkezik, ezért feltétlenül vizsgálatokat kell végeznünk a bemenő korrekciós paraméterek lehetséges értékeivel kapcsolatban.

Ehhez a vizsgálathoz használtuk fel a 2.5 fejezetben bemutatott *Jackknife* módszert a következőképpen. Első lépésben előállítottuk 8 különböző magyarországi terület 5×5 pixeles, azaz $40 \times 40 \text{ km}^2$ -es terület 20 évre vonatkozó átlagos évi menetét. A területek között szerepel 3 hegyvidéki és 5 alföldi terület, melyet a **2. táblázat** szemléltet.

Vizsgált területek	Központi koordináta	
	Északi szélesség (°)	Keleti hosszúság (°)
Mátra	48,1	20,1
Bakony	47,1	17,4
Őrség	46,9	16,5
Szeged térsége	47,0	20,5
Kecskemét térsége	46,9	18,9
Békéscsaba térsége	46,4	21,5
Tiszafüred térsége	47,6	20,7
Nyíregyháza térsége	47,9	21,7

2. táblázat. A *Jackknife* módszerhez felhasznált 8 terület és azok térbeli elhelyezkedése

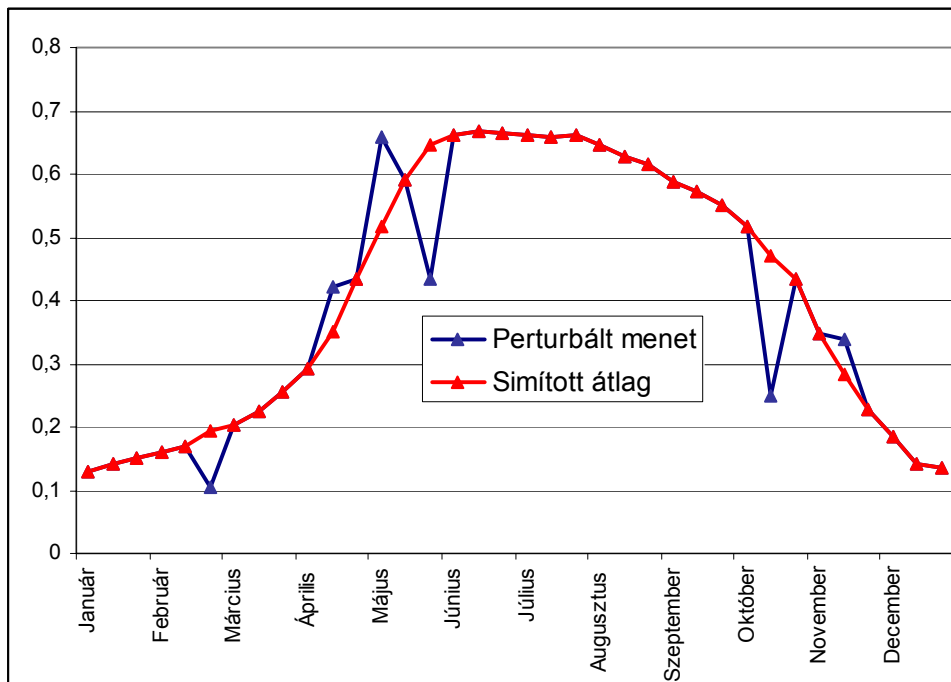
Az előzőekben előállított átlagos menetekon elvégeztünk egy mozgóátlagos simítást is, amelyek közül a Mátrára vonatkozót szemlélteti a **7. ábra**.



7. ábra. A Mátra egy területére számolt sokéves átlag NDVI menet, és annak simított változata

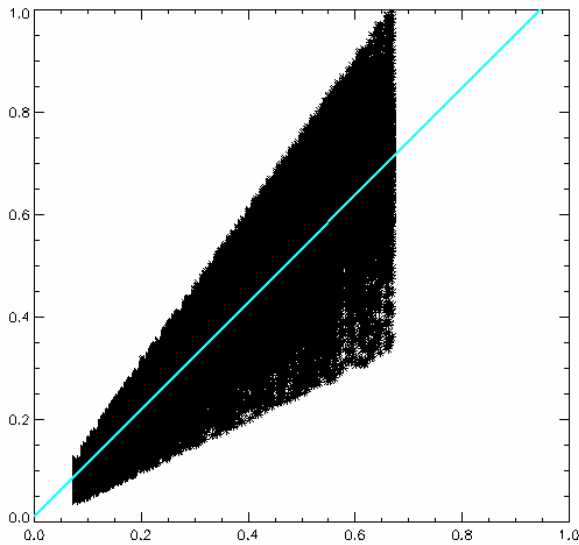
Ezzel a lépéssel elértük, hogy mintaszerű, ám a valóságtól nem elrugaszkodó NDVI meneteket kapjunk.

A következő lépésben alkalmaztuk a *Jackknife* módszert, amely minden alkalommal a 36 értékből legkevesebb 4-et, legfeljebb 8-at változtatott meg. Ezt a lépést a kijelölt Mátrai területre a **8. ábra** szemlélteti.

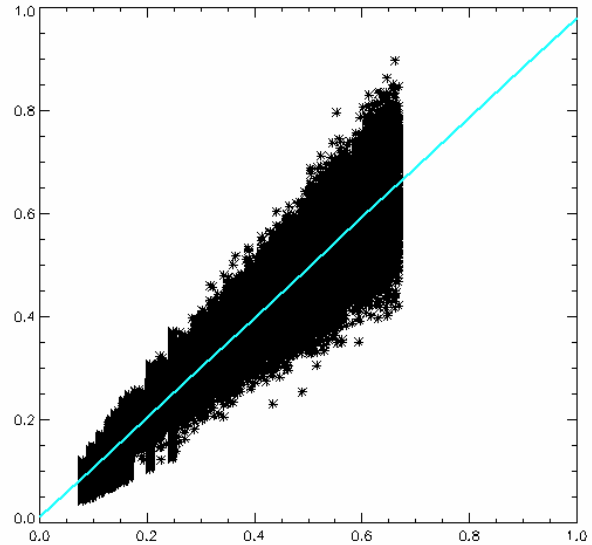


8. ábra. A Mátra egy területére számolt simított sokéves átlag NDVI menet, és annak perturbált változata. A perturbáció minden Jackknife futtatás esetén véletlenszám-generátorral készül, ezért minden esetben más és más.

Ezután a perturbált menetre alkalmaztuk a BISE és MVI módszereket, hogy megvizsgálhassuk, mennyire közelíti meg a mesterséges hibával terhelt menet az eredeti értékeket. Statisztika készítése végett a kiválasztott területekre ötezerszer számoltuk végig az eredeti, és a perturbáció után a korrekciós eljárásokkal kapott eredmény közötti különbséget, az algoritmusok különböző beállításai mellett. **A 9a és 9b ábrák** a BISE (ahol $\alpha=0,25$, csúszó ablak=2) és MVI (ahol a paraméter értéke 0,11) korrekció eredményét mutatjuk be.

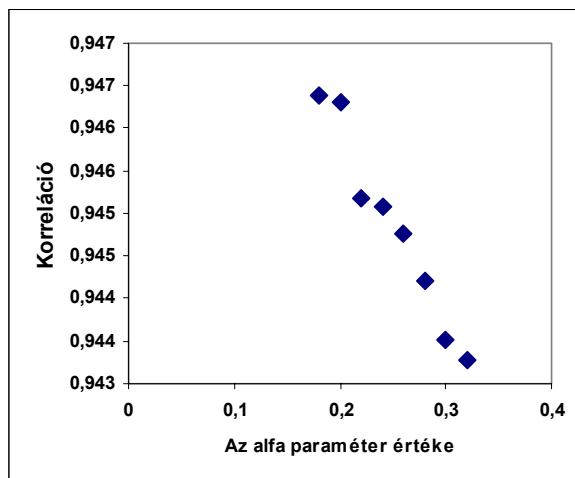


9a ábra. Az eredeti adatsor és a BISE korrekcióval kapott eredmény scatter-plot diagrammja, ahol $\alpha=0,25$, csúszó ablak=2.

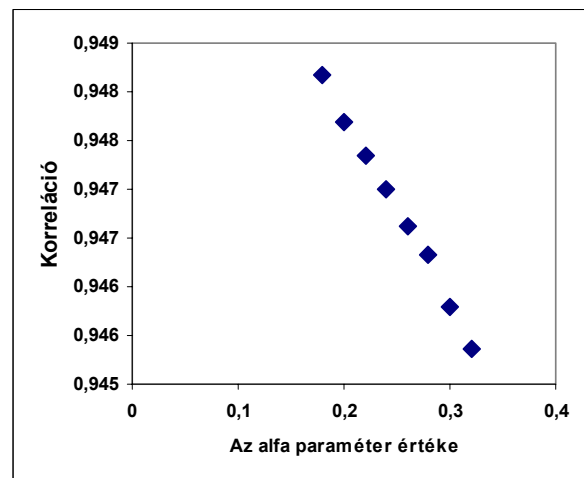


9b ábra. Az eredeti adatsor és az MVI korrekcióval kapott eredmény scatter-plot diagrammja, ahol a paraméter értéke 0,11.

A 10a és 10b ábrákon a BISE módszer alkalmazásával kapott eredményt mutatjuk be.



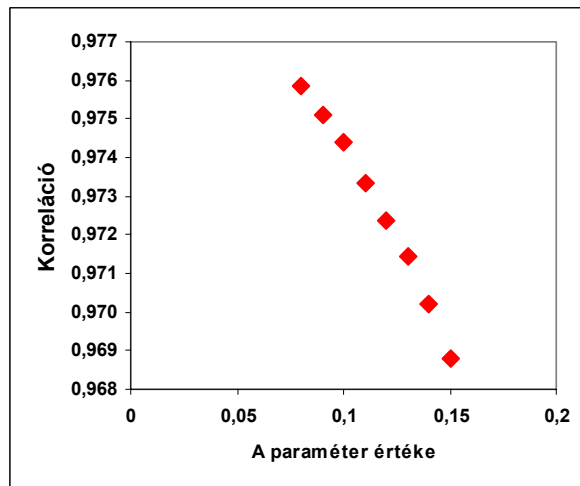
10a ábra. Az α paraméter (lásd 2.3. fejezet), illetve az eredeti és a helyreállított idősor közötti korrelációs együttható kapcsolata. A csúszó ablak értéke 2.



10b ábra. Az α paraméter (lásd 2.3. fejezet), illetve az eredeti és a helyreállított idősor közötti korrelációs együttható kapcsolata. A csúszó ablak értéke 3.

Egyértelműen látható, hogy amennyiben kisebbnek választjuk a BISE módszer α paraméterének értékét, magasabb lesz a korreláció értéke.

A 11. ábrán az MVI korrekció vizsgálatánál kapott eredményt mutatjuk be.



11 ábra. Az MVI paraméter, illetve az eredeti és a helyreállított idősor közötti korrelációs együttható kapcsolata.

Itt is egyértelműen látható, hogy az MVI paraméter kisebb értéke nagyobb korrelációt eredményez.

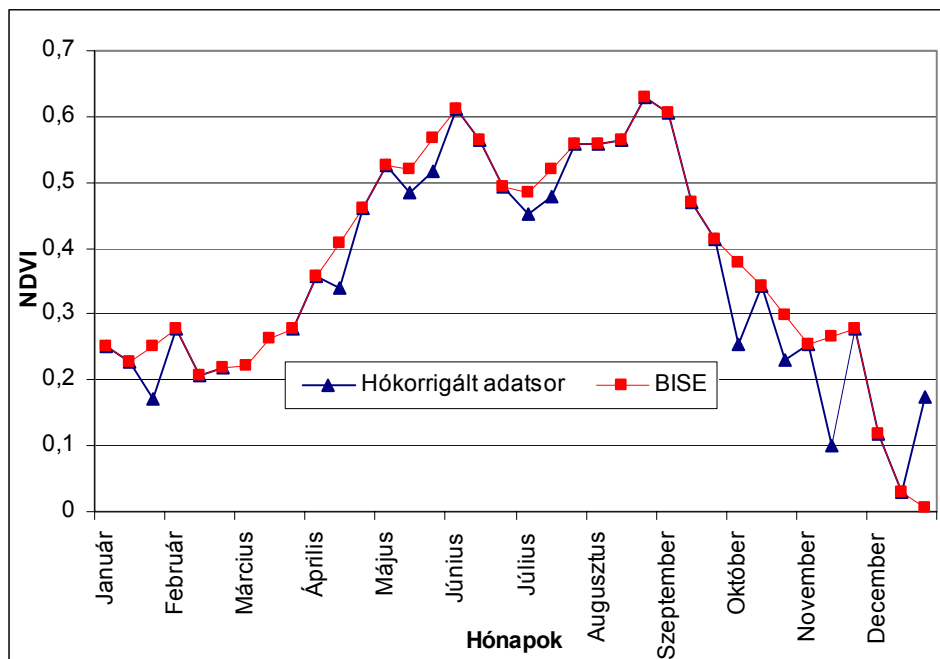
A fentiekben bemutatott statisztikai vizsgálatunk sikeres volt, objektív mérőszám alapján tudjuk rangsorolni az egyes korrekciós eljárásokat. Ez alapján elvileg ki tudnánk választani a Magyarország területén leginkább alkalmazható korrekciós eljárást. Azonban nem szabad elfelejteni, hogy a valóságban előforduló folyamatok soha nem egy hipotetikus, előre meghatározott módon történnek, mindig helyi sajátosságok torzítják az éves, ideális NDVI menetet. Ilyen helyi jelenség pl. az aszály, amely Magyarország területén időről időre befolyásolja a növények fejlődését és állapotát. Ezért további feladatunk, hogy bizonyos eseteket kiragadva a korrekciók gyakorlati alkalmazását kipróbáljuk, amelyre a következő (3.5.) alfejezetben kerül sor.

3.5. A BISE és az MVI korrekció használhatósága a Kárpát-medence vegetációjára

A következőkben azt vizsgáltuk meg, hogy bizonyos fluktuációkat, amelyeket maga a növényzet produkál, kiszűrnek-e ezek a korrekciók. Ha a korrekció kiszűr bizonyos természetes folyamatokat, az adott eljárás nem alkalmazható, hiszen csak ideális, erősen simított esetben használható.

3.5.1. Az 1992-es országos aszály vizsgálata

1992-es év júniusában egy nagyobb aszály sújtotta a Kárpát-medencét, amely rendkívül jó esettanulmányként szolgálhat a korrekciós algoritmusok beállításainak vizsgálatára. Ezek a fent említett korrekciók csak akkor tekinthetők jónak, ha ezeket a természetes visszaeséseket nem szűrik ki.

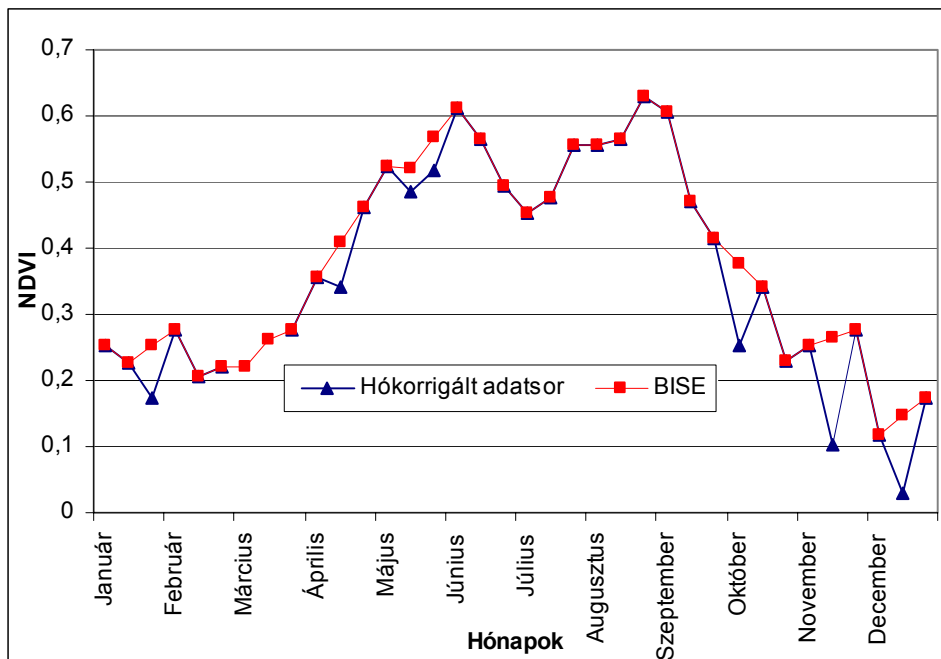


12. ábra. A 47,8°N, 19,7°E koordinátájú pixel 1992-es évre vizsgált NDVI menete, és az erre alkalmazott BISE korrekció

A 12. ábrán a 47,8°N, 19,7°E koordinátájú pixelre figyelhetjük meg az 1992-es évi pótoltságot, amelyet kézzel jelölünk, és láthatjuk az erre alkalmazott BISE korrekció eredményét a cikkben szereplő eredeti beállításokkal, pirossal.

A megfelelő, a valósághoz közel álló eredmény az lenne, ha a júniusban tapasztalt visszaesést a pótoltságon a BISE módszerrel korrigált idősor is visszaadná, és nem szűrné ki, ez azonban a jelenlegi beállításokkal nem teljesen valósul meg.

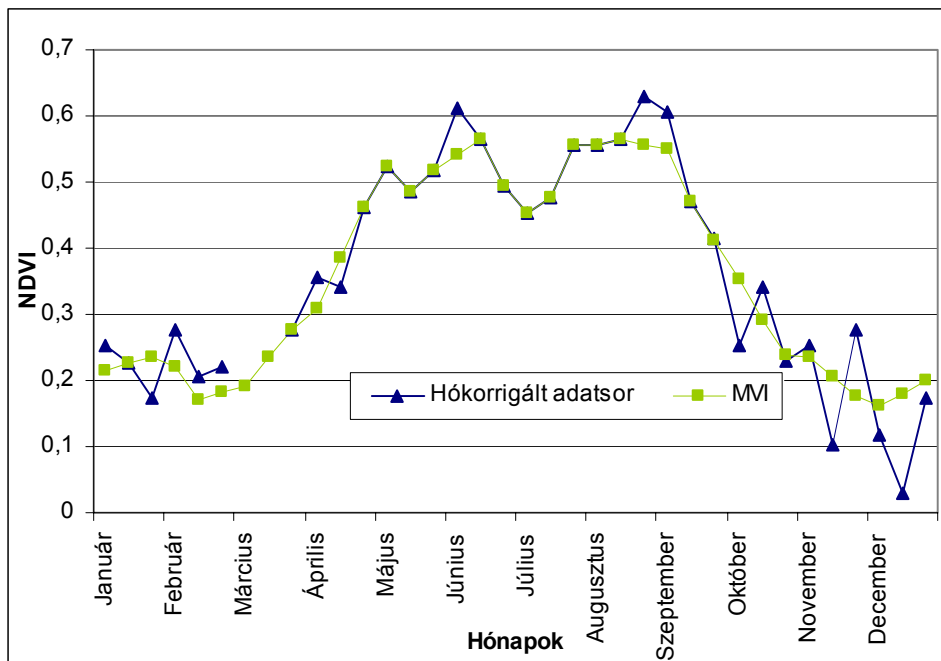
Ebből arra következtettünk, hogy Lovell és Graetz (2001) által meghatározott küszöbértékek erre a területre nem megfelelőek. Jelen esetben a csökkenéshez vizsgált 20% nem elegendő a magyar viszonyokhoz. Azt találtuk, hogy ha ezt az értéket 25%-ra emeljük, akkor ezt a természetes vegetáció általi csökkenést már nem fogja kiszűrni a korrekció.



13. ábra. A 47,8°N, 19,7°E koordinátájú pixel 1992-es évre vizsgált NDVI menete, és az erre alkalmazott BISE korrekció az új beállítással, ahol α paraméter értékét 25%-ra növeltük

A **13. ábrán** kék színnel a 47,8°N, 19,7°E koordinátájú pixel 1992-es évre vizsgált pótolts adatsorát, míg piros színnel az erre alkalmazott módosított BISE korrekciót láthatjuk. Az eredmény arra utal, hogy a korrekció beállítása elfogadható. A *Jackknife* módszerrel vizsgált statisztikai elemzésnél jobb eredményt adott az az eset, amikor az α paramétert kisebbnek választottuk, ezt azonban a fenti példa alapján nem mindig a legcélszerűbb alkalmazni a gyakorlatban.

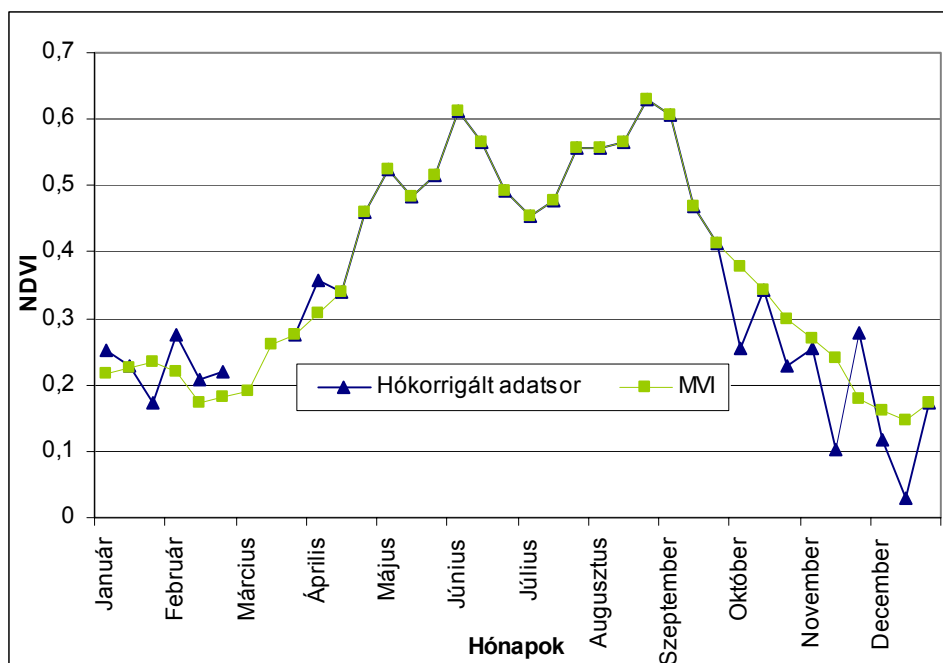
Ezután vizsgáljuk meg ugyanerre a pixelre és évre az MVI korrekció helyességét.



14. ábra. A 47,8°N, 19,7°E koordinátájú pixel 1992-es évre vizsgált NDVI menete, és az erre alkalmazott MVI korrekció

A 14. ábrán a 47,8°N, 19,7°E koordinátájú pixel 1992-es évre vizsgált pótolts adatsor, és az erre alkalmazott MVI korrekció látható. Megfigyelhető, hogy erre az esetre az MVI korrekció teljesen más eredménnyel szolgál. Ebben az esetben azonban csak a júniusi aszály esetét vizsgáljuk, ahol az alacsonyabb értékeket nem korrigálja, azonban az előttük álló magas értékeket csökkenti. Ezért egyértelművé válik, hogy az MVI korrekció Ma és Veroustraete (2006) által meghatározott küszöbértékeken is állítanunk kell, hogy számunkra megfelelő eredménnyel szolgáljon.

Ez a módszer a csökkenést és a növekedést egyszerre vizsgálja, és úgy határozza meg a küszöbértéket, hogy a terület minden pixelére kiszámolt sok éves NDVI átlagnak veszi egy bizonyos százalékát, amit Ma és Veroustraete (2006) 10%-ra határoztak meg. A 15. ábrán ezt a 10%-ot 13%-ra növeltük.



15. ábra. A 47,8°N, 19,7°E koordinátájú pixel 1992-es évre vizsgált NDVI menete, és az erre alkalmazott módosított MVI korrekció, ahol az MVI paraméter értéke 11%.

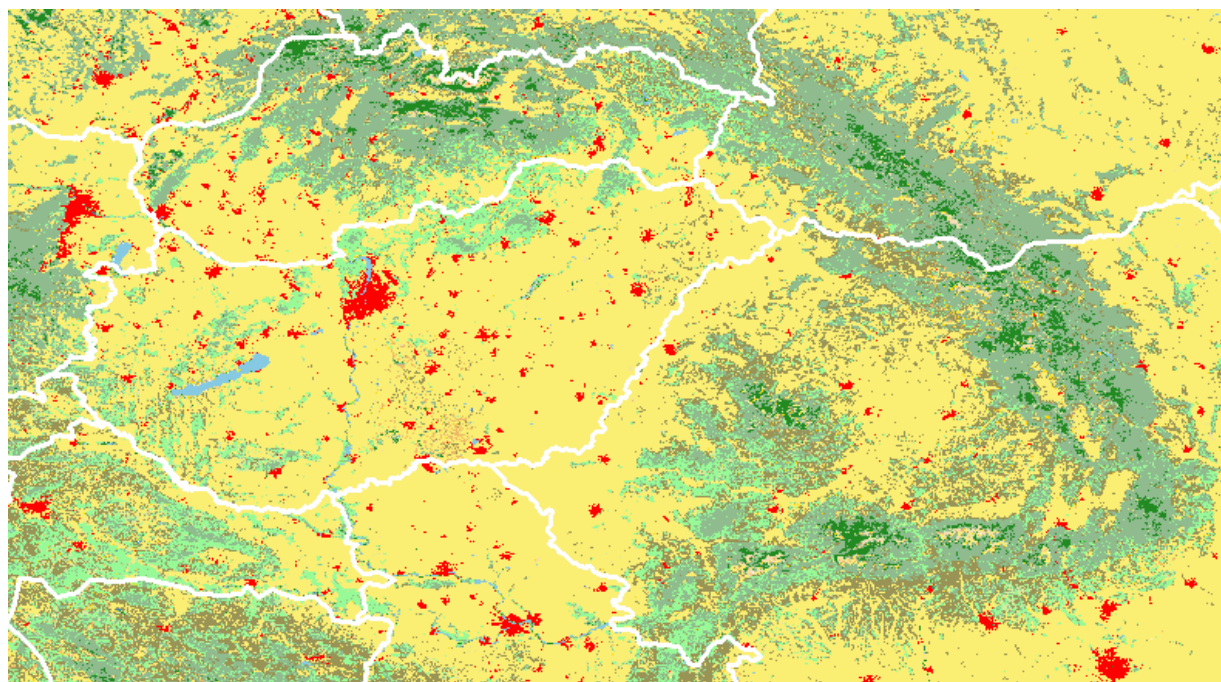
A **15. ábrán** a 47,8°N, 19,7°E koordinátájú pixel 1992-es évre vizsgált pótolts adatsor, és az erre alkalmazott módosított MVI korrekció látható. Megállapíthatjuk, hogy az általunk meghatározott 13% az aszály miatti visszaesést már nem korrigálja. A *Jackknife* módszerrel vizsgált statisztikai elemzésnél itt is a paraméter kisebb értéke adott jobb eredményt, azonban a gyakorlati alkalmazás miatt itt sem használhatjuk a statisztikailag legjobb eredményt (lásd **11. ábra**). A paraméter 0,13-as értéke még mindig elég jó korrelációt mutat ahhoz, hogy alkalmazni lehessen.

3.5.2. A nyári aratások vizsgálata

Rendkívül fontos, hogy a jelen tanulmányban említett korrekciók a nyári aratások során bekövetkezett hirtelen csökkenéseket se szűrjék ki, hiszen a Kárpát-medence jelentős részét mezőgazdasági terület teszi ki.

Vizsgálatainkhoz felhasználtuk az ún. *MODIS* (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) *Land Cover* (Friedl et al., 2002) adatbázist, amely 1 km-es rácson becsüli a felszínborítottságot a Föld teljes területére. Ez az adatbázis 17 felszín típusot különböztet meg

egymástól (amely prezentálja az egész Föld összes lehetséges felszintípusát), az örökzöld tölvevű erdőktől a városi beépített területen keresztül a vízfelületekig. A felszintípusok besorolását az IGBP-DIS (International Geosphere-Biosphere Programme Data and Information System) fejlesztett ki kimondottan erre a célra (Loveland és Belward, 1997). A MODIS felszínborítottsági adatbázis a Kárpát-medence térségére állnak rendelkezésünkre.



16a ábra. A Kárpát-medence felszínborítottsága

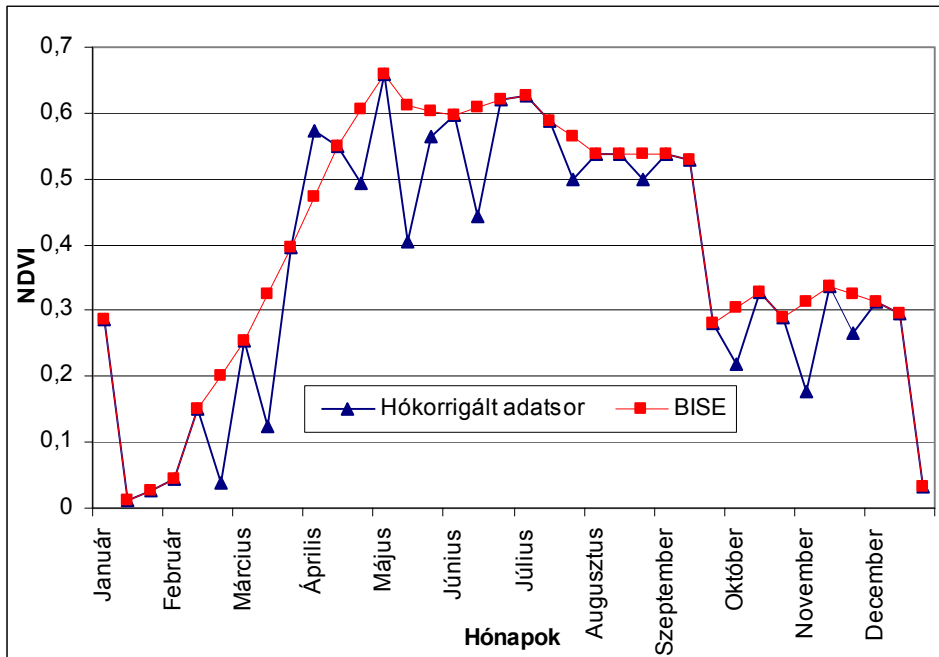


16b ábra. A Land Cover adatbázis színskálája

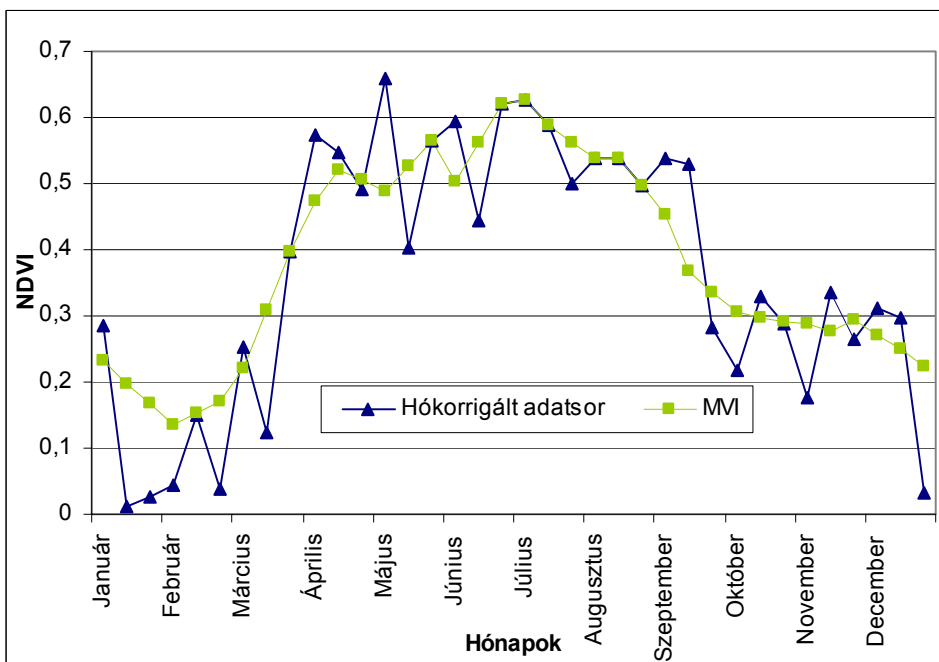
A **16a** és **16b** ábrákon a Kárpát-medence felszínborítottsága és az ehhez tartozó színskála látható.

Olyan 8 km × 8 km-es területeket kerestünk tehát, ahol a felszínborítottság több mint 80%-a mezőgazdasági terület. Az egyik vizsgált területünk így a Szegedtől délkeletre eső 64 km²-es terület volt, melynek központi koordinátái 46,2°N, 20,03°E. A terület a nagysága miatt elkerülhetetlenül vegyes felszíntípusú lesz, de bizonyos részeinek (ebben az esetben a mezőgazdasági növényeknek) hirtelen vegetációbeli csökkenése alkalmával a terület átlagos vegetációs értékének is valamelyest csökkennie kell.

A következő ábrákon (**17a** és **17b**) az 1989-es évi NDVI menete és az arra alkalmazott BISE és MVI korrekciókat figyelhetjük meg.

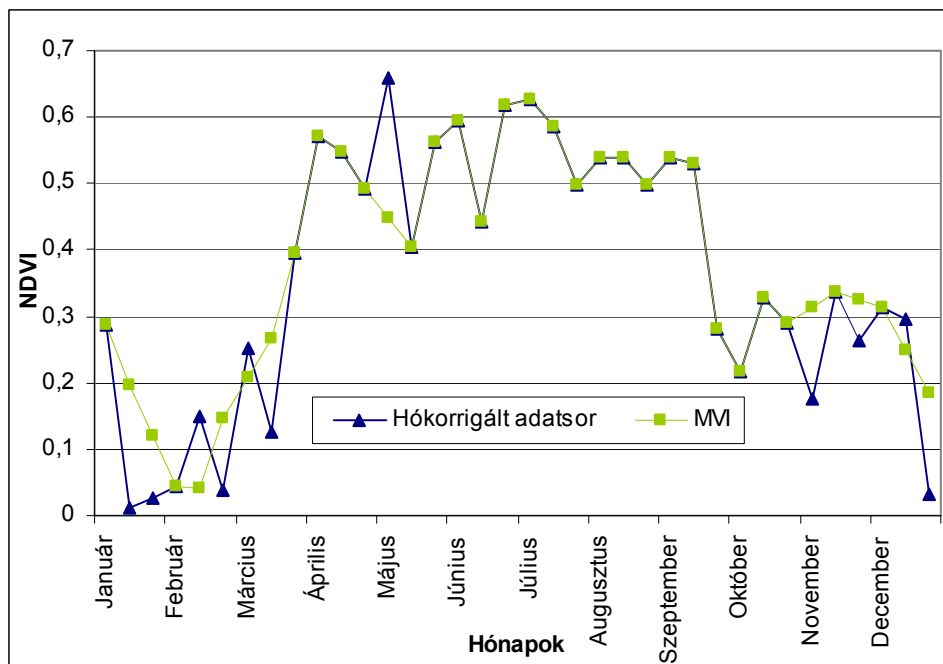


17a ábra. A 46,2°N, 20,03°E koordinátájú pixel 1989-es NDVI menete és az erre alkalmazott BISE korrekció



17b ábra. A 46,2°N, 20,03°E koordinátájú pixel 1989-es NDVI menete és az erre alkalmazott MMI korrekció

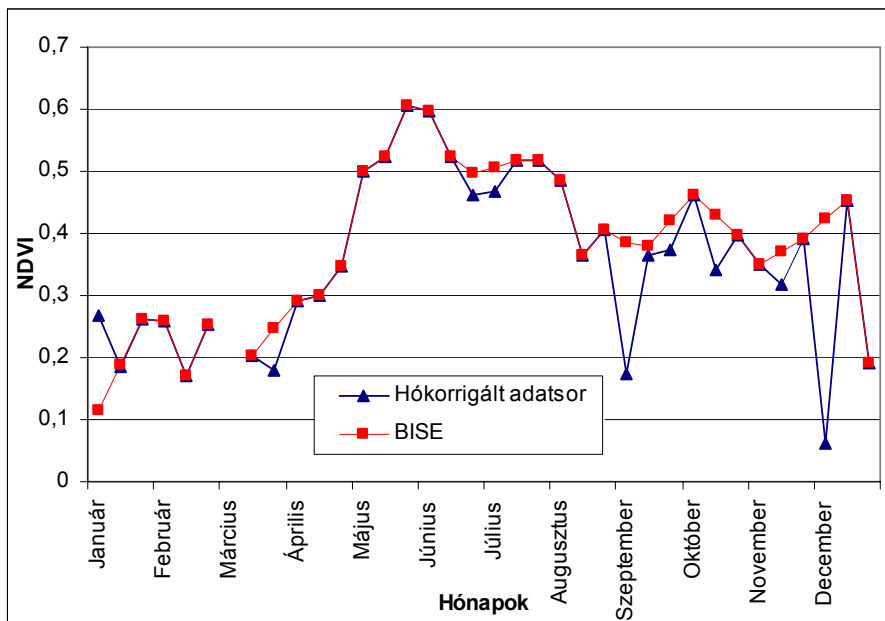
Az eredeti adatsorban egyértelműen látszik a szeptember közepén történő aratás következménye, mely az NDVI érték hirtelen csökkenésében nyilvánul meg. A **17a ábrán** bemutatott BISE korrekció egyértelműen jobban korrigálja a vegetáció állapotában bekövetkezett változást, ezzel szemben az MVI korrekció (**17b ábra**) az előző fejezetben vizsgált aszályos esethez hasonlóan a csökkenés előtt álló magasabb értékeket csökkenti, ami nem elfogadható. Ebben az esetben a küszöbértéket jelentősen meg kellett növelnünk ahhoz, hogy a növényzet állapotában beálló változásokat helyben hagyja a korrekció.



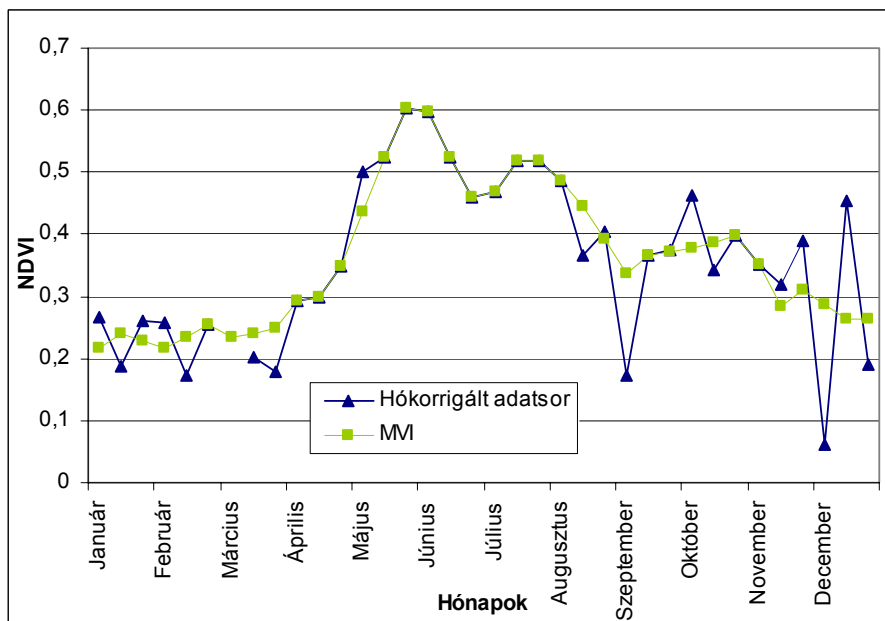
18. ábra. A 46,2°N, 20,03°E koordinátájú pixel 1989-es NDVI menete és az erre alkalmazott MVI korrekció

A **18. ábrán** ennek az eredményét láthatjuk. Szemmel láthatóan az aratás okozta változásokat nem korrigálja ki, ez azonban azt vonja maga után, hogy a zajokat sem. Így például a június közepi visszaesés is benne marad az idősorban, amely egyértelműen nem a növényzet állapotbeli változása. Ebben az esetben tehát nem sikerült az MVI korrekciónak olyan beállítását megtalálni, amely erre a gyakorlati esetre jó eredménnyel szolgált volna.

Másik vizsgált területünk a Kecskeméttől délre eső 64 km²-es 46,9°N, 18,9°E koordinátájú mezőgazdasági terület volt. A következő ábrákon (**19a és 19b ábrák**) az adott koordinátájú, 1996-os NDVI éves menetet figyelhetjük meg, és az ezekre alkalmazott BISE és MVI korrekciót.



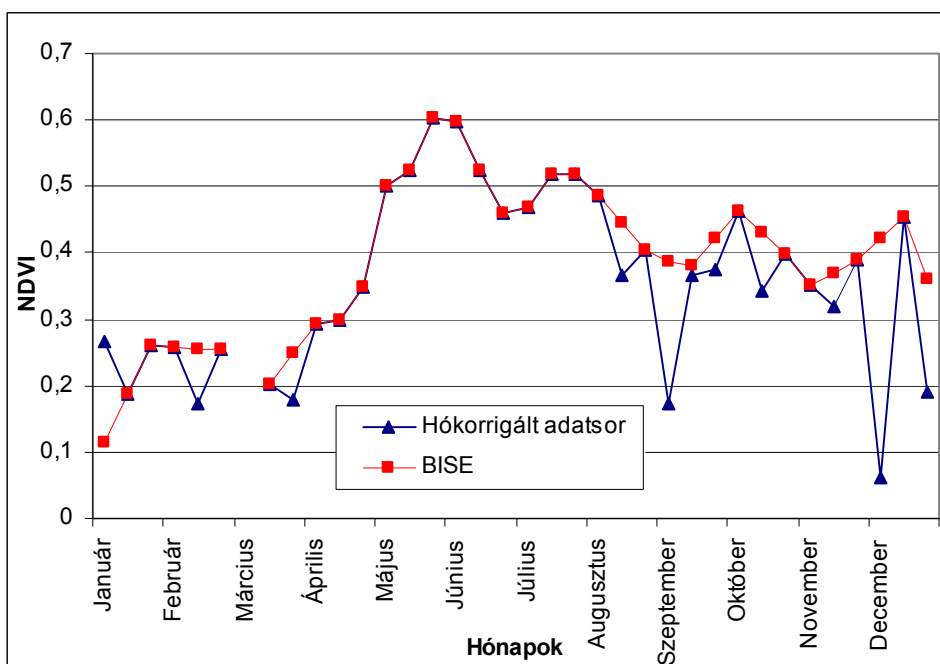
19a ábra. A 46,9°N, 18,9°E koordinátájú pixel 1996-es NDVI menete és az erre alkalmazott BISE korrekció



19b ábra. A 46,9°N, 18,9°E koordinátájú pixel 1996-es NDVI menete és az erre alkalmazott MVI korrekció

Az eredeti adatsorban jól megfigyelhető itt is az aratás júniusi időpontja, melynek következménye az NDVI értékek csökkenése.

Az előző esettel ellentétesen az MVI korrekció adta vissza pontosabban a vegetáció természetes változását. A BISE módszer csökkenéses küszöbértékének változtatásával hiába kísérleteztünk, nem sikerült korigálni az eredményt. Ennek az algoritmusnak azonban van egy másik változtatható állandója, amely nem más, mint a 2.3. fejezetben leírt ún. „csúszó ablak”, melynek értékét eddig 3-nak vettük Lovell és Graetz (2001) munkája alapján. A csökkenéses küszöbérték változtatása után ennek módosításával kísérleteztünk. Az eredmény a 20. ábrán látható, ahol a csúszó ablak értéke 2.



20. ábra. A 46,9°N, 18,9°E koordinátájú pixel 1996-es NDVI menete és az erre alkalmazott BISE korrekció

Megállapíthatjuk tehát, hogy a csúszó ablak értékének csökkentésével a vegetáció által produkált természetes fluktuációt a BISE korrekció már nem szűri ki.

A korrekciók összefoglalásaként elmondhatjuk, hogy sikerült a BISE módszert és az MVI korrekciót a Kárpát-medence térségére adaptálni. A *Jackknife* módszerrel végzett vizsgálatok eredményeivel ellentétben mégsem választhatunk kisebb küszöbértéket sem az MVI, sem pedig a BISE módszer alkalmazásában, hiszen a gyakorlati példák rávilágítottak arra, hogy

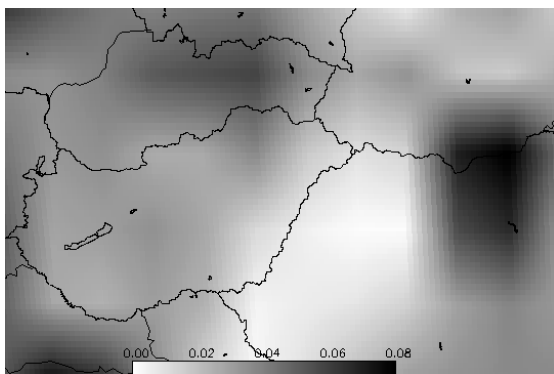
vannak bizonyos természetes fluktuációk, amelyeket nem szűrhetnek ki a korrekciós eljárások, nem megfelelő küszöbértékekkel azonban ezt megteszik.

A növekedés küszöbértékének alapbeállításán nem kellett változtatnunk az egyik esetben sem, hiszen a hazai viszonyoknak megfelel az értéke. A BISE korrekciónál a csökkenés vizsgálatánál 20%-ról 25%-ra kellett emelnünk a küszöbértéket az aszály vizsgálatának megfelelően, míg a csúszó ablak értékét – habár a statisztika a 3-as értékű csúszó ablakra ad jobb korrelációt –, 3-ról 2-re kellett csökkentenünk az aratás jobb korrekciója érdekében. Az MVI korrekcióról elmondható, hogy a küszöbértékét 10%-ról 13%-ra növelve megközelítően optimális korrekciót kaphatunk a Kárpát-medence vidékén.

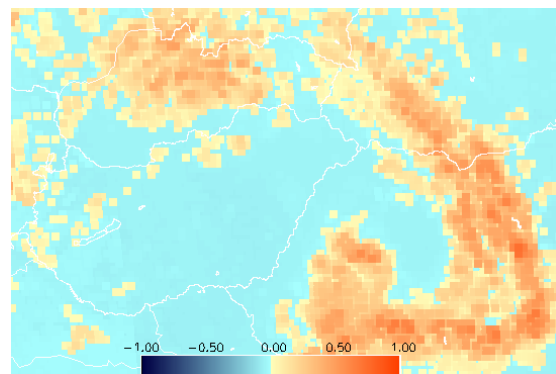
Ahhoz, hogy eldöntsük, hogy a BISE és MVI korrekció közül melyik ad pontosabb eredményt, mindig szükség van az alkalmazás pontos ismeretére. Ha hosszabb idősort vizsgálunk, az MVI korrekció a *Jackknife* vizsgálatok tükrében jobb eredménnyel fog szolgálni. Ha rövidebb idősor (például egy év) korrekcióját akarjuk végrehajtani, ahhoz az MVI korrekció az algoritmusában szereplő korlátok miatt nem alkalmazható, és az olyan évközi fluktuációkat, mint a nyári aratások, nem korrigálja elégségesen, ezért ezekben az esetekben a BISE korrekció sokkal inkább ajánlott.

3.5. A korrekciók térbeli ábrázolása

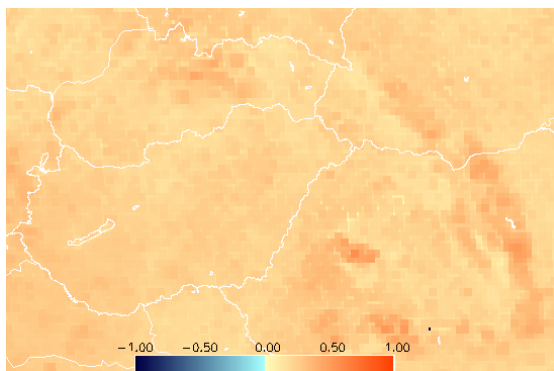
Ebben az alfejezetben a korrekciók hatását mutatjuk be az NDVI mezők térbeli szerkezetére vonatkozóan. A következő ábrák (**21a**, **21b**, **21c** és **21d** ábrák) 1997 januárjának második dekádjára vonatkoznak.



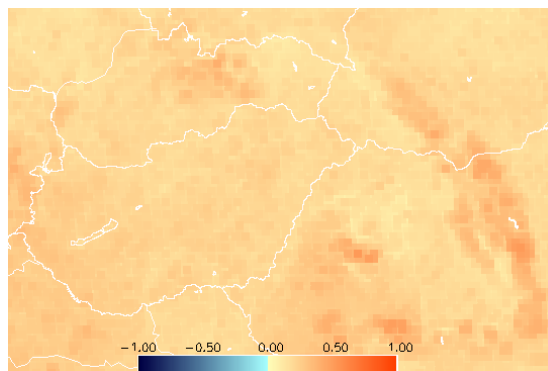
21a ábra. Magyarország interpolált hóvastagság térképe 1997. január második dekádjára (méter)



21b ábra. Magyarország korrigálatlan NDVI térképe 1997. januárjának második dekádjára



21c ábra. Magyarország BISE módszerrel korrigált NDVI térképe 1997. januárjának második dekádjára



21d ábra. Magyarország MVI módszerrel korrigált NDVI térképe 1997. januárjának második dekádjára

A **21a, 21b, 21c és 21d ábrákon** Magyarország interpolált hóvastagság adatai, korrigálatlan, BISE korrigált és MVI korrigált NDVI térképe látható 1997. januárjára vonatkozóan. A **21a ábra** színezése fehér-fekete átmenettel történik, ahol a fehér szín a hómentes állapotot jelöli, míg a fekete a térképen előforduló hóvastagsáérték maximumát, ami jelen esetben 0,08 méter. A **21b, 21c, és 21d** NDVI értékeket ábrázoló térképek színezése pedig a kék és a piros árnyalataival történt. A kék színt a negatív NDVI értékek kapják, amelyeket a korrigálatlan térképen figyelhetünk meg, míg a pozitív értékek piros színezést kapnak.

A magasabb hegyeken a jelentős hótakaró ellenére pozitív NDVI értékeket láthatunk, amely az örökzöld fenyőerdők jelenléte miatt valósul meg, melyről részletesebb leírás a korábbi munkámban található (Fassang, 2006). A korrigálatlan térképen azonban megfigyelhetjük, hogy az országot borító jelentős mennyiségű hó miatt a műszer negatív NDVI értéket regisztrált, amely nem a vegetáció természetes állapotát írja le. A BISE és MVI korrekció után elkészült térképeken ezek a negatív NDVI értékek kikorrigálódnak, így a hó ellenére valós képet kaphatunk a növényzet tényleges állapotáról.

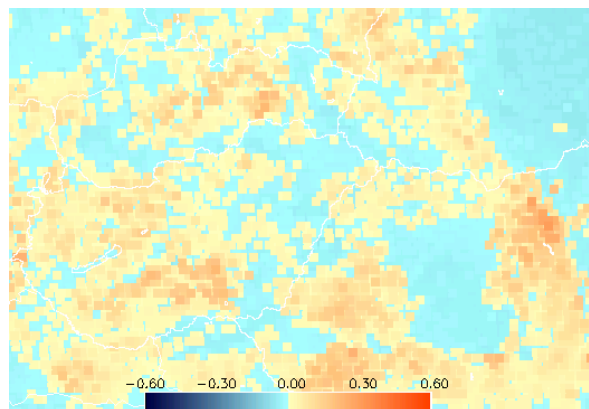
4. Magyarországi vizsgálatok a korrigált adatsorral

Az ELTE Meteorológiai Tanszékén történt korábbi kutatások során (Bartholy and Pongrácz, 2005) vizsgálatokat végeztek a Kárpát-medence térségére, meghatározott évekre készített maximum, minimum és *flush* (a maximum és minimum értékek különbségéből készített) NDVI térképekkel. A kutatásban a korrigálatlan adatsor került felhasználásra.

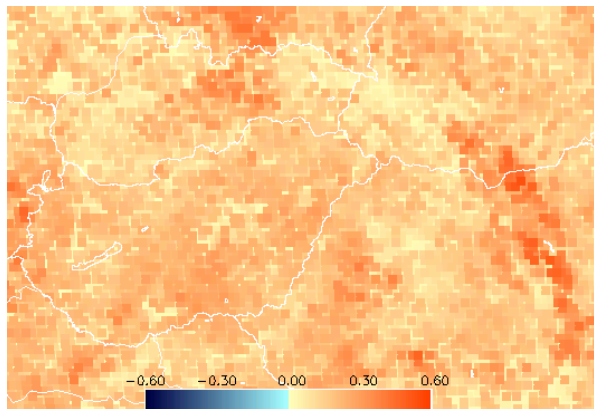
Jelen dolgozatomban elkészítettünk az újraszámított maximum, minimum és *flush* térképeket, amelyeket jelen fejezetben mutatok be. Az eredmények a Bartholy és Pongrácz (2005) által közölt mezők korrigált változatai, pontosabb képet adnak a növényzet állapotáról, a klímafluktuációk és a növényzet állapotának összefüggéséről.

4.1. Minimum, maximum, és flush NDVI térképek

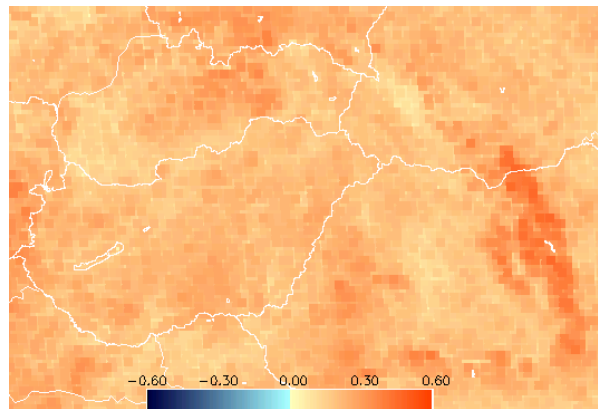
A **22a**, **22b** és **22c ábrákon** a korrigálatlan, a BISE és az MVI módszerrel korrigált adatsor felhasználásával készült NDVI minimum térképek láthatók az 1990-es évre. A **22. ábrákon** a színskála minimuma $-0,6$, míg maximuma $0,6$.



22a ábra. A Kárpát-medence minimum NDVI térképe az 1990-es évre a korrigálatlan adatsor felhasználásával



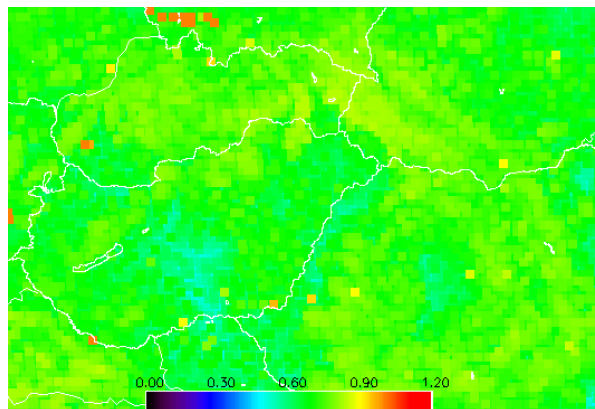
22b ábra. A Kárpát-medence minimum NDVI térképe az 1990-es évre a BISE korrekció elvégzése után



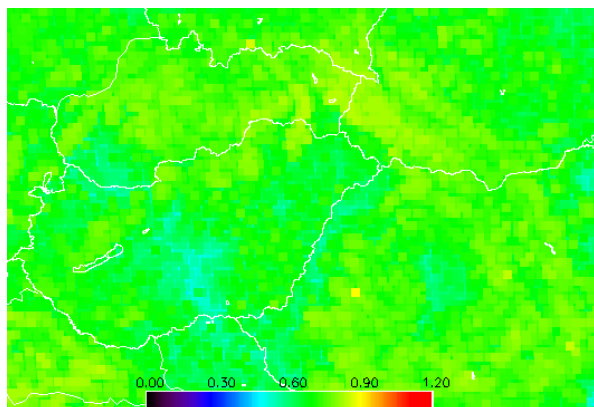
22c ábra. A Kárpát-medence minimum NDVI térképe az 1990-es évre az MVI korrekció elvégzése után

Megfigyelhetjük, hogy míg az eredeti adatsor minimum értékei jórészt 0-nál kisebb számok, addig a korrigált adatsorban ezek az értékek korrigálódtak, amely nagyon fontos a vegetáció állapotának tényleges vizsgálatánál.

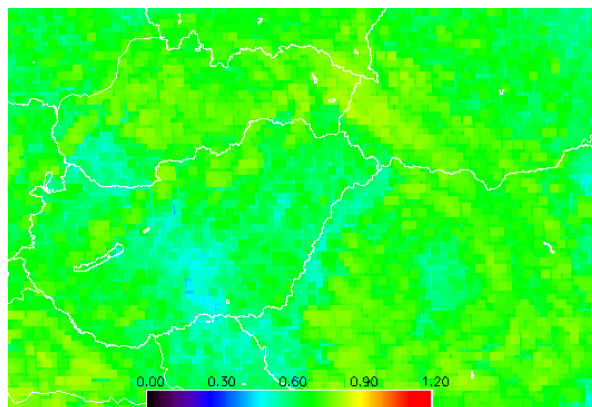
A **23a, 23b és 23c ábrákon** a korrigálatlan, a BISE és az MVI korrigált adatsor felhasználásával készült NDVI maximum térképek láthatók az 1990-es évre. A **23. ábrákon** a színskála minimuma 0, míg maximuma 1,2.



23a ábra. A Kárpát-medence maximum NDVI térképe az 1990-es évre a korrigálatlan adatsor felhasználásával



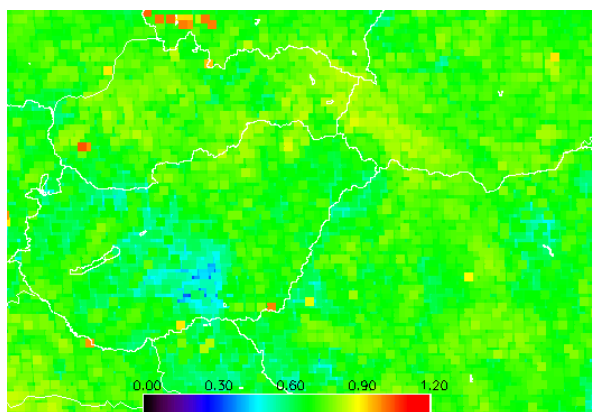
23b ábra. A Kárpát-medence maximum NDVI térképe az 1990-es évre a BISE korrekció elvégzése után



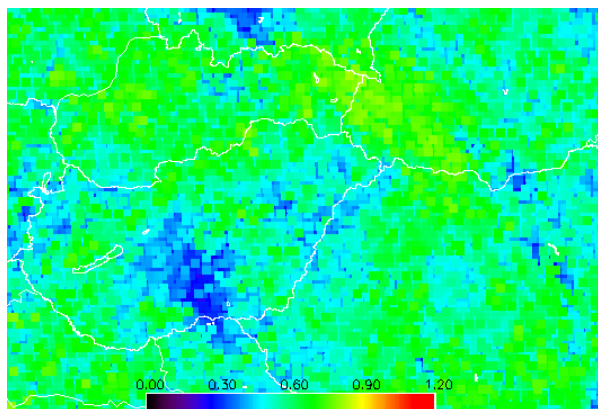
23c ábra. A Kárpát-medence maximum NDVI térképe az 1990-es évre az MVI korrekció elvégzése után

Az eredeti adatsorból készült maximum NDVI térképen szembetűnően sok képpont maximum értéke ugrik 1 felé, amely a két korrekciós eljárás után készült térképen szintén kikorrigálódott. Az ábrákon egyébiránt szépen rajzolódnak ki a hegységek (Dunántúli-középhegység, Északi-középhegység, Kárpátok) magasabb maximumértékei

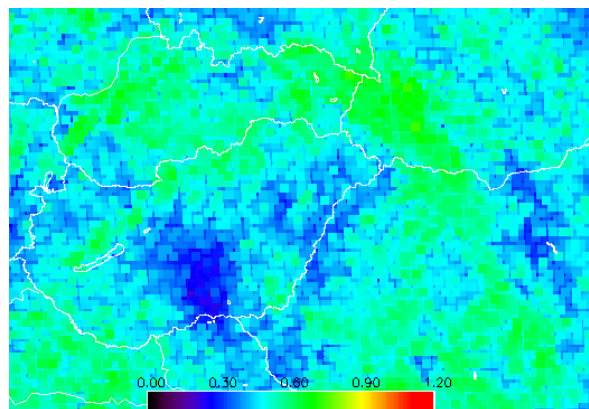
A **24a, 24b és 24c ábrákon** a korrigálatlan, a BISE és az MVI korrigált adatsor felhasználásával készült NDVI *flush* térképek láthatók az 1990-es évre. A **24. ábrákon** a színskála minimuma 0, míg maximuma 1,2.



24a ábra. A Kárpát-medence *flush* NDVI térképe az 1990-es évre a korrigálatlan adatsor felhasználásával



24b ábra. A Kárpát-medence *flush* NDVI térképe az 1990-es évre a BISE korrekció elvégzése után



24c ábra. A Kárpát-medence *flush* NDVI térképe az 1990-es évre az MVI korrekció elvégzése után

Az NDVI *flush* térképek a maximum és minimum értékek különbségéből állnak össze. A korrigálatlan NDVI értékekből készült *flush* térképen a minimum és maximum térképek vizsgálata után előre várható volt, hogy nagyobb értékeket kapunk, amelyet a **24a ábra** szemléltet is. A BISE és MVI korrekciók után ezek az értékek kisebbek lesznek. Érdeemes megfigyelni, hogy az MVI korrekció használatánál a *flush* térképeken alacsonyabb értékek szerepelnek, mint a BISE módszer alkalmazásával készült *flush* térképeken az eltérő algoritmusuk miatt.

4.2. A tenzészidőszak hosszabbodásának vizsgálata

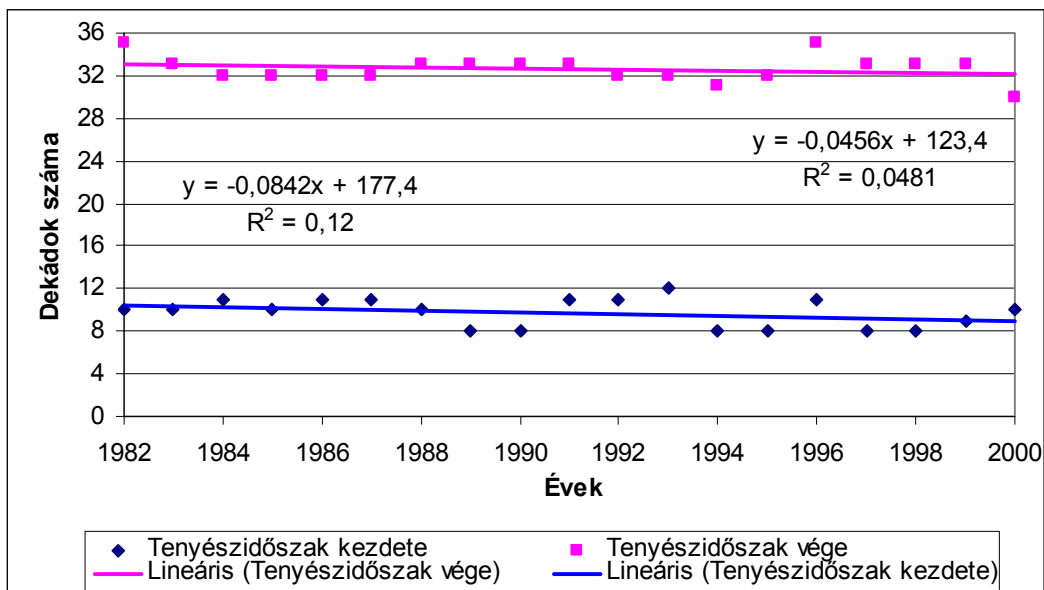
A globális felmelegedéssel párhuzamban a vegetáció fejlődésében is változás tapasztalható (Myneni et al., 1997; Myneni et al., 1998; Tucker et al., 2001). A légköri széndioxid koncentráció növekedési ütemében tapasztalható változások is arra utalnak, hogy a magasabb északi szélességeken a növényzet mennyisége nő és a tenyészidő hosszabbodik (Keeling et al., 1996; Randerson et al., 1999). Ez megegyezik a már korábban megfigyelt tavaszi és téli átlaghőmérséklet-emelkedéssel (Rigor et al., 2000; Hansen et al., 1999; Oechel et al., 2000), az északi sark jégtakarójának csökkenésével (Groisman et al., 1994), az arktikus jég területének csökkenésével (Chapman és Walsh, 1993), az óceánok átlaghőmérséklet emelkedésével (Levitas et al., 2000), és Európa növényzetéről készített fenológiai felmérésekkel (Menzel and Fabian, 1999).

Korábbi műholdas adatok feldolgozásából készült tanulmányok is bizonyítják (Myneni et al., 1997, 1998), hogy a magasabb északi földrajzi szélességeken hosszabbodik a tenyészidő.

Ez bebizonyítható az adatsorunkból hazánk, Magyarország területére is. Vizsgálatainkat az egész Kárpát-medence térségére végeztük el.

A korrekciók eredménye tükrében jelen vizsgálatunkhoz az MVI korrekciót a legcélszerűbb használni, hiszen a hosszabb adatsorok vizsgálatához ez szolgált jobb eredménnyel.

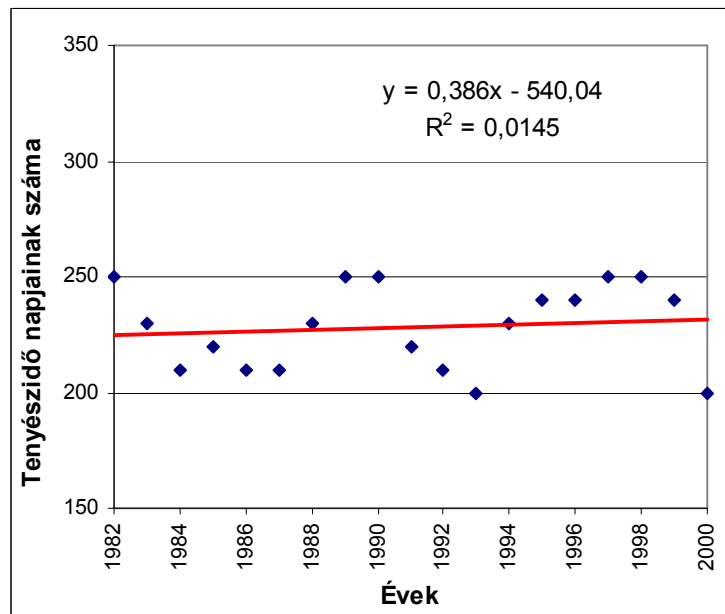
Korábbi tanulmányokból (http://nsidc.org/noaa/search/indicators/green_sindvi.html) megtudhatjuk, hogy a tenyészidőszak kezdetét NOAA NDVI 8×8 km adatokra onnan számolhatjuk, amikor az év során adott terület NDVI értéke eléri és meghaladja a 0,3 értéket, és addig tart, míg ez az érték 0,3 alá nem csökken. Először is megállapítottuk minden egyes évre adott területre ezt a két időpontot, és ábrázoltuk, majd lineáris trendet illesztettünk rá. Ezt láthatjuk a **25. ábrán**. Az x tengelyen az évek figyelhetők meg, az y tengely pedig a dekádok számát mutatja.



25. ábra. A tenyészidőszak kezdetének és végének időpontja, és erre a két menetre illesztett lineáris trend a Kárpát-medence területén.

A **25. ábrán** megfigyelhető, hogy a tenyészidőszak hossza úgy növekszik, hogy a tavasz időpontja korábbra tevődik. Az ősz beköszöntének időpontjában csak elenyésző változás tapasztalható.

Ezután megvizsgáltuk, hogy az eddig vizsgált két dátum között hány nap telt el. Erre az adatsorra illesztettünk egy lineáris trendet, amely a **26. ábrán** látható.

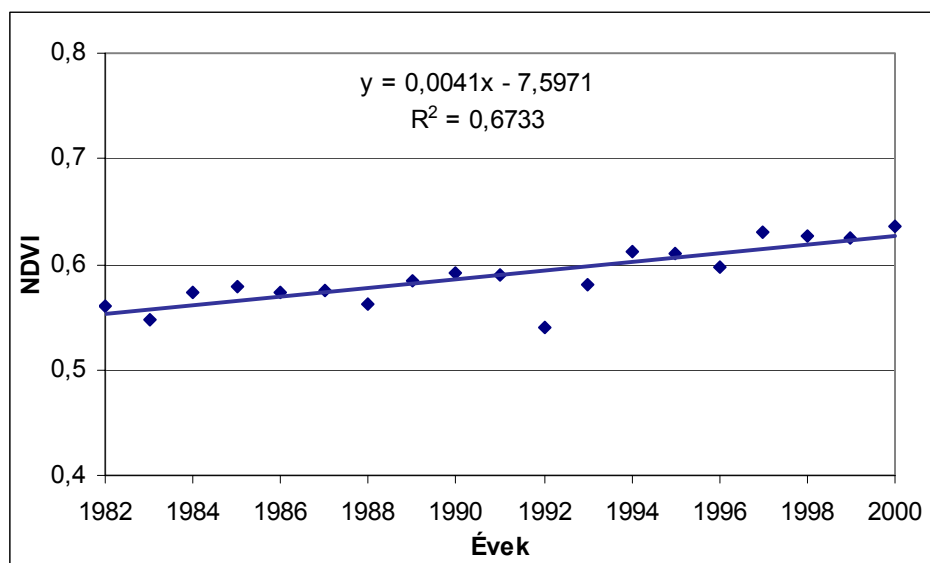


26. ábra. A Kárpát-medence területén az éves tenyészdőszak hossza 19 évre (1982-2000), és erre illesztett lineáris trend

A **26. ábrán** az x tengelyen az évek szerepelnek, míg az y tengelyről a tenyészdő napjainak száma olvasható le. Megfigyelhetjük, hogy a 19 év során, átlagosan 10 nappal lett hosszabb a tenyészdőszak hossza a Kárpát-medencében, ami egy jelentős változást mutat. Elmondható tehát, hogy a magasabb szélességeken tapasztalt tenyészdőszak-hosszabbodás Magyarországon is számottevő.

4.3. Tendenciavizsgálat

A következő vizsgálatunknál arra voltunk kíváncsiak, hogy a tenyészdőre vonatkozó átlagos NDVI értékek a 19 év során milyen tendenciát mutatnak majd. Ebben az esetben az adatsorunk tenyészidejét május elejétől szeptember végéig vettük. Minden évre vettük ennek az időszaknak az átlag NDVI értékét, és lineáris trendet illesztettünk az egész adatsorra. Vizsgálatunk tárgya ismét az egész Kárpát-medence volt. Az eredményt a **27. ábrán** figyelhetjük meg.



27. ábra. NDVI értékek tenyészidőszakra vonatkozó átlagai a Kárpát-medence területére

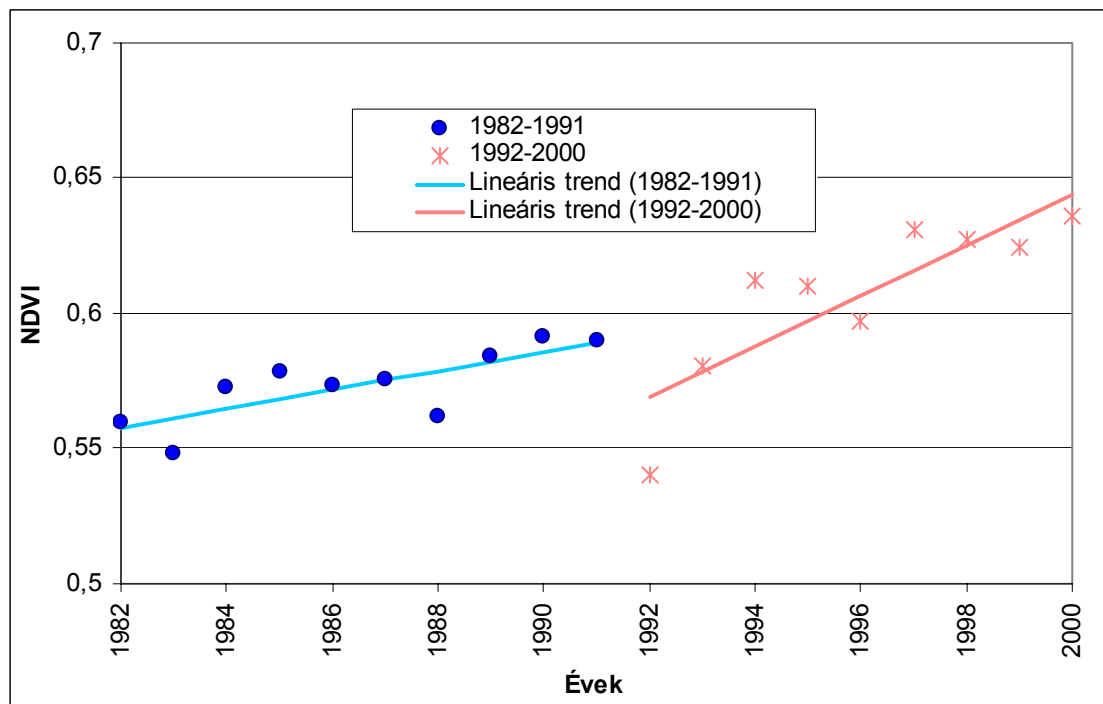
A 27. ábrán tapasztalható egyértelmű növekedéses tendencia az úgynevezett globális zöldülés eredménye. Az NDVI értékek tenyészidőszakra vonatkozó átlagértékeinek növekedése a Kárpát-medencében nem egyedülálló jelenség. Az északi félgömb magasabb földrajzi szélességein és Nyugat-Európában elvégzett vizsgálatok (Xiao and Moody, 2005) ezt egyértelműen kimutatták.

4.4. Pinatubo vulkán kitörésének hatásvizsgálata

A Fülöp-szigeteki Pinatubo vulkán 1991-es júniusi kitörése okozta a közelmúlt egyik legnagyobb, a Föld klímáját is befolyásoló eseményét. A tűzhányó hatalmas mennyiségű vulkáni hamut és egyéb gázokat juttatott a légkörbe. Ez a vulkanikus anyag bekerülve a nagy földi légkörzésbe elérte a magas földrajzi szélességeket is. A Pinatubo robbanása globális környezeti ártalmakkal járt, 20 millió tonna kén-dioxid került a levegőbe, amely eloszlott a felsőbb légkörben és kb. 1-2 évig éreztette hatását. A savas permet a Nap sugarainak visszaverésével csökkentette a földfelszínre lejutó átlagos energiamennyiséget 4 W/m^2 -rel, és ezzel fokozta az általános lehűlést is, melynek mértéke $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ volt (Hansen et al., 1996).

Ez az esemény a vegetáció állapotára sem maradt hatástalan, ezért az eddig egyben számolt lineáris trendet kettébontottuk, hogy megvizsgáljuk, felfedezhető-e a vulkán kitörésének hatása. Minden évre kiszámítottuk a a korrigált adatsorral a tenyészidőszak átlag NDVI értékét,

és lineáris trendet illesztettünk először az 1982-1991-es évek átlagára, majd pedig az 1992-2000-es évek átlagára. Azért vettük az első időszakot 1991-ig, mert a Pinatubo vulkán 1991 júniusában tört ki, és hatását csak a következő években éreztette. A **28. ábrán** vizsgálatunk eredménye látható.



28. ábra. NDVI értékek éves átlagai a Kárpát-medencére vonatkozóan

A vulkán kitörése miatti NDVI visszaesés a **28. ábrán** egyértelműen bizonyítható. A dolog érdekessége, hogy a vulkán, amely egyébként a Fülöp-szigeteken található, pont a magasabb földrajzi szélességeken okozott nagyobb visszaesést az NDVI értékeiben, hiszen a légköri szállítás az általa kibocsátott füstöt, hamut és gázokat elszállította.

Összefoglalás

Dolgozatomban NOAA AVHRR NDVI adatokkal foglalkoztunk. Az adatsor 1981 júliusától 2001 áprilisáig áll rendelkezésünkre, 10 napos kompozitképek formájában.

Korábbi munkámban (Fassang, 2006) a nyers adatsorból kiválogattuk az egyértelműen rossz adatokat, illetve végrehajtottuk az ún. sivatagi korrekciót, amelyre a műszerek fokozatos öregedésének, a több műhold különböző beállításának és az eltérő megvilágítási körülmények miatt volt szükség.

Az ezt követő vizsgálatok során vált nyilvánvalóvá az idősorok zajossága, amely miatt szükségünk volt további korrekcióra.

Első lépésben megvizsgáltuk az ECMWF ERA40 adatbázis felhasználásával a hóvastagság adatok és a pozitív, illetve a negatív NDVI értékek közötti összefüggést, majd megállapítottuk, hogy a téli negatív értékek okozója javarészből a hó jelenléte. Ezeket az adatokat a 20 éves nem negatív értékekből számított átlagértékekkel helyettesítettük.

Második lépésben kerestünk két olyan módszert (BISE és MVI; Viovy et al., 1992; Ma and Veroustraete, 2006), amellyel végrehajtható az idősorok korrekciója. A *Jackknife* módszer alkalmazásával megpróbáltuk a két módszert adaptálni a Kárpát-medence térségére. A statisztikai vizsgálatot gyakorlati vizsgálat követte. Ezek után meghatároztuk a két módszer Magyarországra alkalmazható bemenő paramétereit. Fontos megjegyezni, hogy a két módszer közül a leginkább megfelelő korrekciót mindig az adott helyzet határozza meg. Hosszabb adatsorok vizsgálatánál az MVI korrekció adta a jobb eredményt, míg rövidebb idősorok, évközi fluktuációk vizsgálatához a BISE korrekció ajánlott.

Elvégeztünk összehasonlító vizsgálatokat az eredeti adatsor, és a kétféle korrigált adatsor maximum, minimum és *flush* térképeivel.

Létrehoztunk egy olyan, minden szempontból korrigált és rekonstruált adatsort a Kárpát-medence térségére, ami további vizsgálatokra úgy használható fel, hogy nem kell törődni az adatsor hiányosságaival, korrekciójával.

A korrigált adatsor segítségével megvizsgáltuk a Kárpát-medence területén, hogy a tenyészidő hossza növekedő tendenciát mutat, azaz a tavasz korábban, az ős pedig később köszönt be. Ezután a teljes adatsort vizsgáltuk, és felfigyelhettünk a növekvő tendenciára, amely

a globális felmelegedés hatására bekövetkező „zöldülési folyamat” része, és a vegetáció nagyobb szénmegkötését sejteti.

A Fülöp-szigeteki Pinatubo vulkán 1991-es kitörése miatt bekövetkezett azonban egy visszaesés az NDVI adatsorban, a légkörbe került nagy mennyiségű kénsav miatt, amely eljutott a magasabb földrajzi szélességekre is, és gátolta a napfény légkörön való áthaladását. Ez a növényzetre is hatással volt, az NDVI értékekben egyértelmű visszaesés tapasztalható, amely a magasabb szélességeken nagyobb mértéket ölt.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőimnek, Kern Anikónak, dr. Barcza Zoltánnak és dr. Bartholy Juditnak témavezetésüket, türelmüket, és a rengeteg munkámra fordított idejüket.

Köszönettel tartozunk az amerikai GSFC (Goddard Space Flight Center) DAAC (Distributed Active Archive Center) Intézetének az NDVI adatok létrehozásáért és rendelkezésünkre bocsátásáért.

Köszönöm Ihász Istvánnak (Országos Meteorológiai Szolgálat) az ERA 40 adatokhoz való hozzáférés biztosítását.

Köszönöm Édesanyámnak és Édesapámnak, hogy támogatták az egyetemi éveimet, valamint Testvéreimnek, Sógoromnak és Barátaimnak, akik végig mellettem álltak, támogattak.

Irodalomjegyzék

Bartholy, J. and Pongrácz, R., 2005. Extremes of ground-based and satellite measurements in the vegetation period for the Carpathian Basin. *Physics and Chemistry of the Earth* 30, 81-89.

Bradley, B. A., Jacob, R. W., Hermance J. F., Mustard J. F., 2007. A curve fitting procedure to derive inter-annual phenologies from time series of noisy satellite NDVI data. *Remote Sensing of Environment* 106, 137– 145.

Chapman, W. L. and Walsh J. E., 1993. Recent variations of sea ice and air temperatures in high latitudes. *Bull Am Meteorol Soc* 74, 33-47.

ECMWF, 2004. ERA 40 Years Re-Analysis, daily fields. http://data.ecmwf.int/data/d/era40_daily/

Efron, B. and Tibshirani, R., 1993. *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman & Hall, New York, London.

Fassang, Á., 2006. A NOAA műholdak AVHRR adataiból származtatott NDVI idősorok vizsgálata. *Tudományos Diákköri Dolgozat*, pp31.

Ferencz, Cs., Bognár, P., Lichtenberger, J., Hamar, D., Tarcsai, Gy., Tímár, G., Molnár, G., Pásztor, Sz., Steinbach, P., Székely, B., Ferencz, O. E., Ferencz-Árkos, I., 2004. Crop yield estimation by satellite remote sensing. *International J. Remote Sensing* 20, 4113-4149.

Friedl, M. A., McIver, D. K., Hodges, J. C. F., Zhang, X. Y., Muchoney, D., Strahler, A. H., Woodcock, C. E., Gopal, S., Schneider, A., Cooper, A., Baccini, A., Gao, F., Shaaf, C., 2002. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment* 83, 287-302.

Gibson, J. K., Kallberg, P., Uppala, S., Nomura, A., Hernandez, A., Serrano, A., 1997. ERA description. *ECMWF Reanalysis Project Report Series.*, pp77.

Gordon, H. R., Brown, J. W., Evans, R. H., 1988. Exact Rayleigh scattering calculations for use with the Nimbus-7 coastal zone color scanner. *Applied Optics*, 27, 2111–2122.

Groisman, P. Y., Karl, T.R., 1994. Observed impact of snow cover on the heat balance and the rise of continental spring temperatures. *Science* 263, 198-200.

Hansen, J., Ruedy, R., Glascoe, J., Sato, M., 1999. GISS analysis of surface temperature change. *J Geophys Res* 104, 30997-31022.

IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

James, M. E. and Kalluri, S. N. V., 1994. The Pathfinder AVHRR land dataset: an improved coarse resolution dataset for terrestrial monitoring. *Int. J. of Remote Sensing* 15, 3347-3363.

Keeling, C. D., Chin, J. F. S., Whorf, T., P., 1996. Increased activity of northern vegetation inferred from atmospheric CO₂ measurements. *Nature* 382, 146-149.

Levitas, S., Antonov, J. I., Boyer T. P., Stephens, C., 2000. Warming of the world ocean. *Science* 287, 225-229.

Lovell, J. L., and Graetz, R. D., 2001. Filtering Pathfinder AVHRR Land NDVI data for Australia. *Int. J. Remote Sensing*, 22, 2649-2654.

Ma, M. and Veroustraete, F., 2006. Reconstructing Pathfinder AVHRR Land NDVI time-series data for the Northwest of China. *Advances in Space Research* 37, 835-840.

Menzel, A. and Fabian P., 1999. Growing season: extended in Europe. *Nature* 397-659.

Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar G, Nemani R. R., 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature* 386, 698-702.

Myneni, R. B., Tucker, C. J., Keeling, C. D., Asrar, G., 1998. Interannual variation in satellite-sensed vegetation index data from 1981 to 1991. *J Geophys Res* 103, 6145-6160.

Oechel, W. G., Vourlitis G. L., Hastings, S. J., Zulueta, R. C., Hinzman, L., Kane, D., 2000. Acclimation of ecosystem CO₂ exchange in the Alaskan Arctic in response to decadal climate warming. *Nature* 406, 979-981.

Randerson, J. T., Field, C. B., Fung, I. Y., Tans, P. P., 1999. Increases in early season ecosystem uptake explain recent changes in the seasonal cycle of atmospheric CO₂ at high northern latitudes. *Geophys Res Lett* 26, 2765-2768.

Rigor, I. G., Colony, R. L, Martin, S., 2000. Variations in surface air temperature observations in the arctic, 1979-1997. *J Climate* 13, 896-914.

Stöckli, R. and Vidale, P. L., 2004. European plant phenology and climate as seen in a 20 year AVHRR land-surface parameter dataset. *Int. J. Remote Sensing* 25, 3303-3330.

Tucker, C. J., Slayback, D. A., Pinzon, J. E., Los, S. O., Myneni, R. B., Taylor, M. G., 2001. Higher northern latitude normalized difference vegetation index and growing season trends from 1982 to 1999. *Int. J. Biometeorology*. 45, 184–190.

Viovy, N., Arino, O., Belward A. S., 1992. The Best Index Slope Extraction: A method for reducing noise in NDVI time-series. *Int. J. Remote Sensing*, 13, 1585-1590.

Wagenseil, H. and Samimi, C., 2006. Assessing spatio-temporal variations in plant phenology using Fourier analysis on NDVI time series: results from a dry savannah environment in Namibia. *Int. J. of Remote Sensing*, 27, 3455–3471.

Xiao, J. and Moody, A., 2005. Geographical distribution of global greening trends and their climatic correlates: 1982-1998. *Int. J. Remote Sensing*, 26, 2371-2390.