

Éghajlati idősorok homogenizálása: Módszertani fejlődés 1996–2021 között

DOMONKOS PÉTER

Összefoglalás: Az éghajlat tér- és időbeli változásainak számszerű jellemzéséhez éghajlati megfigyelések idősorait használjuk. Számos éghajlati elem jellemzéséhez műszeres megfigyelések száz évnél is hosszabb idősorai állnak rendelkezésre. Általános tapasztalat azonban, hogy a mérés eszközei és az éghajlati megfigyelések egyéb feltételei változnak az idő múlásával, és ezek befolyásolják a feljegyzett idősorokban mutatkozó időbeli változásokat. Ahhoz, hogy hű képet kapjunk a közelmúlt éghajlati változásairól, a nem éghajlati hatásokat (úgynevezett inhomogenitásokat) el kell távolítani a feljegyzett éghajlati adatokból, amely eljárást az éghajlati idősorok homogenizálásának nevezzük. Homogenizáláshoz a szomszédos megfigyelőállomások idősorainak összehasonlítását és alkalmas eszközökkel történő statisztikai elemzését, valamint a megfigyelések technikai feltételeinek változásáról készült feljegyzéseket (úgynevezett meta-adatokat) használunk. A homogenizálás sikeressége függ a homogenizált adatbázis tulajdonságaitól és a választott homogenizáló módszer alkalmasságától. A statisztikai eszközökkel történő homogenizálásnak nagyjából száz éves múltja van, és az 1990-es évektől kezdve különösen intenzív a módszertani fejlődése. Több tucat statisztikai homogenizáló módszer került kidolgozásra világszerte, és összehasonlító teszteket is végeztek a módszerek pontosságának értékelésére. Mindazonáltal, e témának átfogó és kielégítő mélységű elemzése a mai napig nem született. Szerző kb. 20 éve foglalkozik idősorok homogenizálásával, és az általa fejlesztett módszer (ACMANT) a legpontosabb a világon a ma rendelkezésre álló módszer összehasonlító tesztek alapján. A tanulmányban ismertetésre kerülnek az utóbbi negyedszázad módszertani fejlődésének legfontosabb állomásai, kiemelve az eredményes homogenizálás mára már ismertté vált feltételeit, valamint a tudásunkban továbbra is meglévő „hézagokat”.

Kulcsszavak: *megfigyelt éghajlati adatok; idősor elemzés; relatív homogenizálás; töréspont detektálás; éghajlati trendek*

Homogenization of climate time series: Methodological development 1996–2021

PÉTER DOMONKOS

Abstract: Time series of observed climatic data are needed to the quantitative description of spatial and temporal variability of climate. For the characterization of several climate variables, the time series of more than hundred years long climate records are available. There is a general experience, however, that the used meteorological instruments and several other conditions of climate observations change in time, and such changes impact the seeming climate variability appearing in the observational records. To obtain a realistic picture about the near past climate changes, the non-climatic effects (so-called inhomogeneities) should be removed from climate records. This operation is named time series homogenization. The comparison between climate records from neighboring stations with adequate statistical methods, as well as written documents of station history (so-called metadata) are used to homogenization. The success of homogenization depends both on dataset properties and the suitability of the chosen homogenization method. Statistical homogenization has a century long history, and the methodological development is particularly intense from the 1990s. Dozens of homogenization methods have been created worldwide, and some method comparison tests have also been done for the evaluation of method accuracies. Nevertheless, a universal and sufficiently profound analysis of the topic is still missing. Author has been dealing with time series homogenization for approx. 20 years, and the method he has developed (ACMANT) is the most accurate method according to presently available method comparison test results. In this study the most important steps of the last 25-year methodological developments are presented, highlighting the proven conditions of successful homogenizations, but mentioning also still existing gaps in our knowledge.

Keywords: *observed climate data; time series analysis; relative homogenization; break detection; climatic trends*

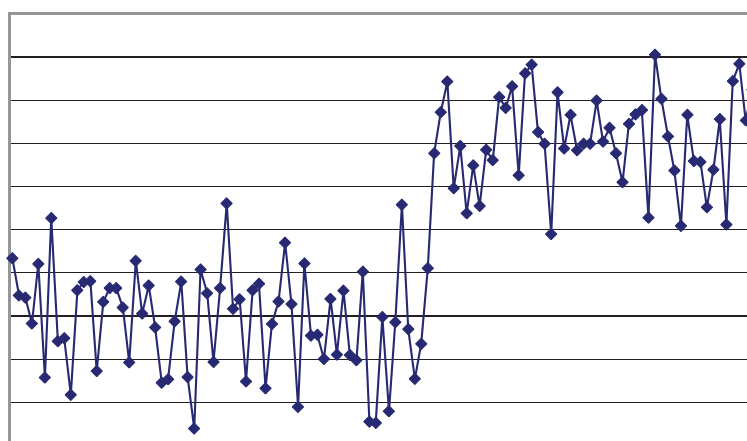


Bevezetés

Ha valaki kíváncsi arra, hogy milyen ütemben melegedett az éghajlat a lakóhelyén, és ezt maga szeretné kiszámítani a feljegyzett hőmérsékleti adatokból, akkor egy lineáris trend idősorra illesztését kell elvégeznie, amely egyszerű feladat. Tegyük fel, hogy az eredmény 2°C -os melegedést mutat 50 évre. Megbízhatunk-e abban hogy az adatok és a számítás pontosan tükrözi a melegedés mértékét? Ha a mérési körülményeket sikerült 50 éven át változtatlan állapotban tartani, akkor igen. Ha azonban a korábban használt higanyos hőmérőt időközben elektromos műszerre cserélték, a műszer árnyékolási módját megváltoztatták, a korábbi csupasz talajt füvesítették, ráadásul a korábbi észlelőt a fia váltotta fel, aki nagyon lelkes, de este csak késői órában jut hozzá, hogy leolvassa a műszert, stb., akkor lehetséges, hogy a 2°C -os melegedés felét nem az éghajlatváltozás okozta, hanem a hőmérsékletmérés módjának a változása. És természetesen az is lehetséges, hogy a valós melegedés nem kisebb, hanem nagyobb mértékű volt annál, mint amit a feljegyzett adatok sugallnak. Az adatokban mutatkozó, éghajlati és nem éghajlati okok miatt előforduló időbeli változások szétválasztását az éghajlati idősorok homogenizálásának, röviden homogenizálásnak nevezzük.

Általános tapasztalat, hogy átlagosan kb. 20 évente fordul elő inhomogenitást okozó esemény. Az inhomogenitások mértéke és gyakorisága függ az éghajlati megfigyelések egységességére tett erőfeszítések következetességétől és a gazdasági feltételektől (tehát országonként és időszakonként változhat), de még az éghajlati elemtől is (például a hőmérséklet idősorokban gyakoribb az inhomogenitás, mint a csapadékmennyiség idősorokban, mivel a hőmérsékletmérés érzékenyebb a mikrokörnyezet kis változásaira).

Az inhomogenitás leggyakoribb formája az időszakokra számított átlagos értékek hirtelen megváltozása. Ez azért van így, mert az inhomogenitásokat okozó tényezők többsége (noha nem mindegyike) valamely konkrét időpontban történik, és azonnali hatású, például állomás áttelepítése, műszercsere, észlelő személyzet változása, stb. Az éghajlati elemek idősorában diszkrét időpontban bekövetkező hirtelen változást töréspontnak nevezzük. Töréspontok az éghajlat természetes változékonysága miatt is előfordulnak, de a viszonylag nagy változással járó, egyszerű szemrevételezéssel is észrevehető töréspontok valószínű oka az inhomogenitás (1. ábra).



1. ábra: Töréspont a szakasz-átlagok látványos méretű megváltozásával, szimulált értékek sorozatában.



A nem klimatikus okokból előforduló töréspontok többsége kicsi ahhoz, hogy ránézésre látszódjon. Például az 1950 utáni hőmérséklet inhomogenitások mértéke Európában többnyire 1°C -nál kisebb, míg a kevésbé fejlett országok megfigyeléseiben és korábbi időszakok éghajlati feljegyzéseiben az 1°C -ot meghaladó inhomogenitások is gyakoriak. A pusztá szemrevételezés azonban semmiképpen sem elegendő az adatok homogenizálásához, hiszen általában a kisebb és nagyobb inhomogenitások, valamint az éghajlat természetes változékonysága együttesen alakítják ki azt a képet, amelyet egy a mérési feljegyzések idősorából készült grafikon mutat. Az inhomogenitásoknak az éghajlat természetes változékonyságától történő elkülönítéséhez a szomszédos megfigyelőállomásokról származó adatokkal történő összehasonlítást alkalmazunk, amikor csak lehetséges.

A modern kori éghajlati feljegyzések jelentős hányada csak kis inhomogenitásokat tartalmaz. Vajon fontosak ezek, kell ezekkel egyáltalán foglalkozni? Az inhomogenitások kiszűrése az éghajlati megfigyelésekből az több és más mint pusztá pedantéria, mivel az adatok felhasználásánál gyakran nagy fontosságú azok pontossága. Itt csak az éghajlati modellek tesztelésére utalunk példaként: az éghajlati modellek a tényleges légköri folyamatok fizikai törvényeit másolják bizonyos kényszerű egyszerűsítésekkel. Ezen egyszerűsítések nem kívánt hatásainak mérséklése érdekében az éghajlati modelleket a megfigyelt éghajlati adatok tér- és időbeli változásaival való összehasonlítással tesztelik. Ha ezek a tesztek hamisan mutatják a modell hibákat a felhasznált megfigyelési adatok hibája vagy inhomogenitása miatt, ez téves következtetésekre vezethet a modellfejlesztési munkában. Ebből következik, hogy egy kis hiba a jelenkori éghajlat értékelésében az éghajlati előrejelzések lényegesen nagyobb hibáját okozhatja.

Az éghajlati elem fajtája, valamint a megfigyelési adatok térbeli sűrűsége és időbeli felbontása alapján a homogenizálási feladatok meglehetősen különbözőek. *Moberg & Alexandersson (1997)* szerint a jó homogenizáló módszer detektálja valamennyi inhomogenitást, korrektül meghatározza azok mértékét és időbeni lefutását, kerüli a szükségtelen beavatkozásokat az adatokba ott, ahol inhomogenitás nem fordul elő, ezeken kívül pedig objektív, reprodukálható és automatikusan futtatható. Legalábbis ez a cél, amit megközelíteni próbálunk a homogenizáló módszerek fejlesztésénél. A negyedszázaddal ezelőtt megfogalmazott, lényegét tekintve ma is érvényes célkitűzést két dologgal egészítjük ki: az egyik, hogy az éghajlati variabilitás homogenizálás útján történő hű reprodukálása általában fontosabb, mint az egyedi inhomogenitások kezelése, a másik pedig az állomás-történeti dokumentumok, úgynevezett meta-adatok figyelembevétele (utóbbiakat a statisztikai módszerekkel optimálisan kombinálva kell felhasználni).

A statisztikai homogenizáló módszerek fejlesztése és alkalmazása nagyjából száz éves múltra tekint vissza, ám volt két olyan tényező, amelyek csak 1990 körül jelentek meg, és akkortól kezdve adtak lendületet a módszertani fejlődésnek. Az első, hogy 1990 körül vált nyilvánvalóvá és közismertté a globális felmelegedés problémája (ugyanis az IPCC, azaz Intergovernmental Panel on Climate Change) 1990-ben adta ki első hivatalos jelentését), és ugyanebben az időszakban vált általánossá a kielégítő kapacitású személyi számítógépek használata.

E tanulmány középpontjában a homogenizálás területén az utóbbi negyedszázadban bekövetkezett fejlődés ismertetése áll. A következő fejezetben a homogenizálás néhány alapfogalmát ismerhetjük meg, valamint összefoglaló képet kapunk az 1990-es évek közepére elért ismeretekről. A harmadik fejezetben bemutatjuk az utóbbi negyedszázad módszertani fejlődésének főbb állomásait, a módszerek hatékonyság tesztelésének módját és néhány fontosabb teszt eredményt. A bemutatást általában a matematikai részletek mellőzésével



végezzük, kivétel csak az ANOVA korrekciós modell lesz, ahol a képletek megadásával is kiemeljük a módszer fontosságát.

Előzmények és alapfogalmak

Szokásos terminológiával az aktuálisan vizsgált idősor a jelölt idősor, az azonos éghajlati körzetbe eső állomások idősorai szomszéd idősorok, míg az összehasonlításához ténylegesen felhasznált idősorokat referencia idősoroknak nevezzük. A jelölt idősor és a referencia idősor különbségéből az éghajlat változékonysága kiesik, feltéve hogy az éghajlat azonos módon változik a szomszédos megfigyelőállomásokon. Csapadékmennyiségnél a jelölt idősor és referencia idősor hányadosát kell képezni, és ezen hányadosból esik ki az éghajlati változékonyság, de a következőkben csak különbség idősort említünk az egyszerűség kedvéért. A különbség idősorok alkalmazásával végzett homogenizálást relatív homogenizálásnak nevezzük. Ha a szomszédos állomások közötti távolság túlságosan nagy ahhoz, hogy az éghajlati tendenciákat hasonlóan fogadjassuk el, akkor relatív homogenizálás nem alkalmazható. Ilyen esetben felmerül a különbség idősor képzése nélküli, úgynevezett abszolút homogenizálás lehetősége, amellyel meta-adatokra és éghajlati ismeretekre támaszkodva egyes inhomogenitások kiszűrhetők. Abszolút homogenizálásnál fokozott a veszélye annak, hogy a természetes éghajlati változékonyság egy része is eltávolításra kerül, ezért ennek alkalmazása korlátozott, és a tanulmány további részében kizárólag relatív homogenizálással foglalkozunk.

A különbség idősorokban tehát nincs jelen a zónára jellemző éghajlat jele, de az időjárás rövid távú térbeli különbségei bennük maradnak. Ezek, valamint esetlegesen előforduló nem szisztematikus hibák zajként hatnak az inhomogenitások detektálásánál. A jel-zaj arány függ az inhomogenitások mértékétől és tartósságától, valamint néhány más tényezőtől is, amelyeket itt nem részletezünk. Mivel az inhomogenitások előfordulása meglehetősen gyakori, gyakran megtörténik, hogy egy jelölt idősort és a vele képzett különbség idősort több inhomogenitás is befolyásol. Az egyes inhomogenitások befolyásolhatják az idősor különböző szakaszait, vagy együttesen is hathatnak az idősor egyes szakaszaira. Ha egy idősorban több inhomogenitás is előfordul, az inhomogenitások együttesét többszörös inhomogenitásnak nevezzük.

Többnyire 30–100 év közötti hosszúságú, napi vagy havi felbontású idősorokat homogenizálunk. Egy relatív homogenizáló módszernek legalább három része van, ezek a) különbség idősorok képzése, b) inhomogenitások detektálása, valamint c) adatok korrekciója. Ezek részletes kifejtését az alábbiakban láthatjuk.

a) A különbség idősorok képzésének kiinduló gondolata az lehetne, hogy minden jelölt idősorhoz az azonos éghajlati régióból származó és inhomogenitásokkal legkevésbé szennyezett idősort érdemes felhasználni referencia idősorként. A probléma az, hogy homogenizálás előtt nem tudjuk mely idősorok tekinthetők homogénnek (ha vannak ilyenek). A helyes eljárás az, ha a homogenizálás előtt egyetlen idősorról sem feltételezzük, hogy az homogén. Ebből következik, hogy relatív homogenizálás alkalmazásához egyetlen szomszéd állomás idősora általában nem elegendő. Három olyan különbség idősor képzési módot ismerünk, amelyeknél az összehasonlításához felhasznált szomszéd állomás idősorok homogenitását nem várjuk el: 1.) szomszédos állomások idősoraiból, azok átlagolásával szerkesztett egyetlen referencia idősor képzése, amelyre szerkesztett referencia idősorként hivatkozunk a továbbiakban; 2.) egy körzeten belül az összes szomszédos állomás idősorai egyenként kerülnek felhasználásra referencia idősor szerepben, erre a páronkénti összehasonlítás kifejezéssel hivatkozunk; valamint 3.) a szomszédos állomások csoportosításával és az azonos csoportokhoz tartozó állomások idősorainak átlagolásával több



szerkesztett referencia idősor képezhető, mely módszerre a többszörös referencia idősor kifejezéssel hivatkozunk.

b) Az inhomogenitások detektálása alatt általában a töréspontok felderítését, és előfordulásuk időpontjának meghatározását értjük. Ez az esetek döntően nagyobb hányadában statisztikai módszerrel történik, mivel azok alkalmazása objektív és többnyire megbízhatóbbak, mint a szubjektív értékelés. A töréspontoknál kisebb gyakorisággal, de léteznek olyan inhomogenitások is, amelyeknél az inhomogenitás mértéke nem hirtelen, hanem fokozatosan növekszik, és léteznek olyan inhomogenitás detektáló módszerek, amelyekkel nemcsak töréspontok, hanem lineárisan változó mértékű inhomogenitások is detektálhatók. A homogenizáló módszerek többségénél azonban az inhomogenitás detektálás és töréspont detektálás kifejezések egymás szinonimái. Az inhomogenitás detektálást érdemes először évi felbontású adatokon végezni (évi átlagok sorozatán, azonos évszakhoz tartozó középértékek évi sorozatán, stb.), majd a töréspont hónapját és napját egy későbbi lépésben pontosítani.

c) Az adatok korrigálásához meg kell határozni a detektált inhomogenitások nagyságát. Ez történhet a töréspontoknál előforduló szakasz-átlag értékek megváltozásának egyenkénti becslésével, vagy az összes matematikai ismeretlen (éghajlati jel és inhomogenitás mértékek) egyetlen egyenletrendszerrel történő megoldásával.

A homogenizálás során gyakran meg kell oldani olyan problémákat is, mint a nyilvánvalóan hibás adatok kiszűrése, évszak szerinti különbségek az inhomogenitás mértékében, vagy különböző hosszúságú, esetleg részben hiányos idősorok együttes használata. A homogenizáló eljárások nagy része háromnál több lépést tartalmaz azért is, mert a kezdetben fennálló inhomogenitások kiszűrése gyakran több fázisban, iterációval történik.

Mindaddig csak szakasz-átlagok változásaival foglalkoztunk, pedig az inhomogenitások gyakran okoznak változást a valószínűségi eloszlás egyéb tulajdonságaiban is (szórás, extrém értékek stb.). Vannak homogenizáló eljárások a valószínűségi eloszlás többféle tulajdonságának a homogenizálására is, de ezek alkalmazhatósági köre szűkebb és megbízhatóságuk kevésbé ismert. A tanulmány állításai általában a szakasz-átlagok homogenizálására vonatkoznak, kivéve amikor másképp említjük.

Homogenizálás az 1990-es évek közepéig

Ismert volt, hogy egyetlen idősort sem szabad homogénnek feltételezni, és legtöbbször szerkesztett referencia idősort használtak. Az ilyen referencia idősorokban az inhomogenitások mértéke általában kicsi, mert az átlagolás során a különböző előjelű inhomogenitások legyengítik egymás hatását. Gyenge pontja az alkalmazásuknak, hogy néha az azonos előjelű inhomogenitások befolyásolják az idősorokat, és ez nemcsak véletlen felhalmozódás miatt lehetséges, hanem azonos típusú mérés technikai változások előfordulása miatt is. Mindazonáltal, a szerkesztett referencia idősorok alkalmazása gyakori volt, és az is maradt. A szerkesztett referencia idősorban lévő inhomogenitások a különbség idősor zaj tagját bővítik, ennek hatását pedig iterációval szokás csökkenteni. Az iterációval történő homogenizálás rendszerint a legnagyobb inhomogenitások kiszűrésével kezdődik, és valamely soron következő lépésben felhasználnak olyan idősort vagy idősorokat, amelyek a megelőző lépésben már homogenizálva lettek részben vagy egészben.

Általános volt, hogy az egyes töréspontok helyének és nagyságának pontos detektálására nagyobb hangsúlyt fektettek, mint az inhomogenitások együttes hatásának értékelésére. A homogenizálásról szóló tanulmányok nagy hányada egyedi töréspontok detektálásával foglalkozott, és összességében tízen felüli számú egyedi töréspont detektáló módszert dolgoztak ki. Ezek jelentékeny hányada megközelítőleg azonos hatékonyságú,



pontosságukat a különbség idősor inhomogenitásainak jel-zaj aránya határozza meg. Közülük a SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) vált kiemelkedően népszerűvé (Alexandersson, 1986), egyszerű és megbízható alkalmazhatósága miatt. Megjegyezzük, hogy az „SNHT” jelölheti a fent nevezett irodalomban alkalmazott teljes homogenizálást, vagy annak csak töréspont detektáló részét.

Fontos lépés volt viszont a „ketté szeletelés” („binary segmentation”) módszer bevezetése (Easterling & Peterson, 1995) a többszörös inhomogenitások detektálására. Ez egy hierarchikus módszer, melynek egy adott lépésében csak egyetlen töréspont detektálása történik, majd a töréspont mentén két részre vágjuk az idősort, és a szeleteket egyenként vizsgáljuk az esetleges további töréspontok megtalálása érdekében. Egyszerűsége ellenére, ez a módszer kiváló hatékonyságú.

Az inhomogenitások korrekciója a különbség idősorban mutatkozó szakasz-átlagok közötti differenciák számításával történt, egymástól függetlenül végzett becslésekkel az egyes töréspontoknál. Ezen típusú korrekciónak az iteratív alkalmazása egymáshoz hasonlóvá teszi a homogenizálás alá vont idősorokat. A homogenizáló módszerek megbízhatóságát a töréspontok detektálásának helyességével vizsgálták, szimulált adatokon vagy pedig meta-adatok segítségével. Úgy tűnik, hogy akkoriban még senki nem gondolt arra, hogy az iterációval végrehajtott korrekciók során nyert és egy adott régió belül viszonylag egyforma éghajlati trendek akkor is hamisak lehetnek, ha a töréspontok felismerése helyes. Ez azért van így, mert a leírt, és máig is széles körben alkalmazott iterációs módszer nem garantálja azt, hogy a konvergencia a valós éghajlati trendhez közelít.

Módszertani fejlődés 1996–2021 között

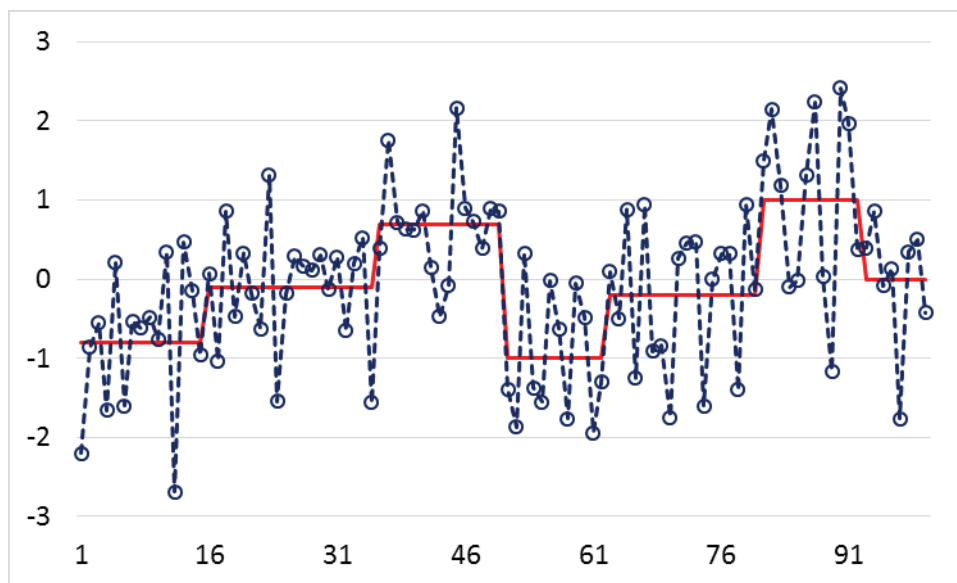
1996 októberében Budapesten került megrendezésre az első nemzetközi homogenizálási szeminárium, melynek során két teljesen új homogenizáló módszer is bemutatásra került. Ezeket azonos gondolat ihlette: a többszörös inhomogenitásokat nem egyenként, hanem egymással összehangolt módon kell detektálni és korrigálni. A célkitűzés azonos volt, a javasolt megoldási módok viszont teljesen különbözőek: Szentimrey (1996) az általa konstruált MASH (Multiple Analysis of Series for Homogenization) módszerben t-tesztek kombinációjával, Caussinus & Mestre (1996) pedig lépcsős függvény illesztésével javasolták megoldani a többszörös inhomogenitások összehangolt detektálását. A két módszer új utakat javasolt a referencia idősorok képzésére és az inhomogenitások korrekciójára is.

A MASH módszer (Szentimrey, 1998) többszörös referencia idősorokat használ a különbség idősorok képzéséhez, t-tesztek kombinációját a töréspontok detektálásához, míg a korrekciók meghatározása még hordoz hagyományos elemeket. A t-teszt kombinációk alkalmazása során minden lehetséges töréspont szám és töréspont hely kombinációk figyelembevételre kerülnek, és a legvalószínűbb kombináció kerül kiválasztásra. A többszörös referencia idősorok használata több különbség idősor együttes használatát teszi lehetővé, és minden egyes különbség idősor alapján készül becslés az egyes töréspontoknál fellépő inhomogenitás mértékére. Az inhomogenitások korrigálásánál az azonos töréspontokra vonatkozó egyedi becslések minimuma kerül alkalmazásra, majd a homogenizálás iteratív módon folytatódik a maradék inhomogenitások detektálásával és korrigálásával. Megjegyezzük, hogy a többszörös becslések együttes értékelése alapján végzett inhomogenitás korrigálást későbbi alkalmazások ensemble homogenizálásnak nevezik (például Domonkos & Coll, 2017a). MASH az első volt abban is, hogy töréspont detektáló módszere képes a meta-adatok automatikus figyelembevételére. A MASH módszernek van automatikus és interaktív változata is. Az interaktív verzióban a felhasználó dönt az iteráció



soron következő lépéseiről, valamint az évi és szezonális értékek homogenizálásának összehangolásáról.

A Caussinus–Mestre módszer (későbbi tanulmányokban „PRODIGE” néven hivatkozott, Caussinus & Mestre, 2004) páronkénti idősor összehasonlítással képez különbség idősorokat, lépcsős függvény illesztést használ töréspont detektáláshoz és az ANOVA korrekciós modellnek az együtt homogenizált, valamennyi idősorra felírt egyenletrendszerével számítja a korrekciókat. A lépcsős függvény illesztése (2. ábra) a négyzetes hibák összegének minimalizálásával történik, ennek eredményeképpen a hiba becslésnél gyakran használt RMSE (Root Mean Square Error) szempontjából ez az inhomogenitás detektálási módszer az optimális megoldást adja, feltéve hogy valamennyi inhomogenitást töréspont okozza, és a töréspontok száma ismert.



2. ábra: Lépcsős függvény illesztése szimulált adatok idősorára.

Reális homogenizálási feladatokban azonban a töréspontok száma ismeretlen. Mivel a töréspontok számának növelésével a négyzetes hibák összege minden esetben csökken, a töréspontok optimális számának becsléséhez empirikus formulát használunk. Ez a PRODIGE módszer esetében a Caussinus–Lyazrhi kritérium (Caussinus & Lyazrhi, 1997). Teszt eredmények azt mutatják, hogy ez a töréspont detektálási módszer az éghajlati trendek kissé pontosabb reprodukálását eredményezi, mint az egyéb módszerek. A PRODIGE módszerben alkalmazott páronkénti összehasonlítás során minden idősor párhoz tartozik egy töréspont detektálási részeredmény. E részeredmények kiértékelése manuális, és ennek során lehetőség van meta-adatok figyelembevételére is. A PRODIGE módszer egyéb műveletei automatikusak.

A PRODIGE homogenizáló módszer legfontosabb új eszköze az ANOVA korrekciós modell. Fontossága miatt ezt a korrekciós módszert részletesen ismertetjük. Az ANOVA korrekciós modell azután kerül alkalmazásra, hogy a töréspont detektálás művelete az azonos éghajlati régióba tartozó és együtt homogenizált idősorok mindegyikében befejeződött. A modellben minden inhomogenitás töréspont, és a megfigyelési adatok (x) az éghajlati jelen (u) kívül csak „állomás hatás”-t (v) tartalmaznak, ugyanis a zaj zérus a modellben. Állomás hatás homogén idősorban is van, ilyenkor ennek értéke a teljes idősorban állandó, míg az inhomogenitások azonosak az állomás hatás időbeni változásaival. Az előbbiekből



következik, hogy bármely két szomszédos töréspont között az állomás hatás értéke állandó, hiszen az ilyen szakaszok homogének. E modell alapján minden jelölt idősorra (G) felállítható egy egyenletrendszer, amelyből az éghajlati jel és az állomás hatás időbeni változásai kiszámíthatók. Az egyenletekben az együtt homogenizált idősorok száma N ($s = 1, 2, \dots, N$), $j_{s,k}$ az s sorszámú idősor k -adik homogén szakasza, l a homogén szakasz hosszát, y időpontot, w súlytényezőt jelöl, az aposztrof pedig azt jelzi, hogy a keresett érték becslése áll az egyenletben.

$$\sum_{s=1}^N w_{G,s} u'_{s,y} + \sum_{s=1}^N w_{G,s} v'_s(y) = \sum_{s=1}^N w_{G,s} x_{s,y} \quad (1)$$

$$\sum_{y=j_{s,k}+1}^{j_{s,k+1}} u'_{s,y} + l_{s,k} v'_{s,k} = \sum_{y=j_{s,k}+1}^{j_{s,k+1}} x_{s,y} \quad (2)$$

Az első egyenletet az idősor valamennyi pontjára kell felírni, a másodikat pedig minden egyes idősor (a jelölt idősort is beleértve) homogén szakaszaira. A súlytényezők az éghajlati trendek régióon belüli különbségeinek hatását hivatottak mérsékelni, míg az optimális súlyok az úgynevezett ordinary kriging módszerrel határozhatók meg. A bemutatott komplett modellt „weighted ANOVA”-ként is említi az irodalom, mivel gyakrabban alkalmazzák azt az egyszerűsített modellt, amelyben az éghajlati trendek regionálisan azonosak, és valamennyi súlytényező értéke 1. Az egyszerűsített modell számára elegendő egyetlen egyenletrendszert felírni, hiszen az egyes jelölt idősorok számára felírt egyenletrendszerek kizárólag a súlytényezőkben különbözhetnek. Mivel az együtt homogenizált idősorok megközelítőleg azonos éghajlati zónához kell tartozniuk, az egyszerűsített és a súlyozott ANOVA modellek közötti pontossági különbség kicsi, ritkán haladja meg az 1–2%-ot. A PRODIGE az egyszerűsített ANOVA modell alkalmazását tartalmazza.

Bizonyítható, hogy az ANOVA korrekciós modell az inhomogenitások optimális becslését adja abban az esetben, ha valamennyi inhomogenitást töréspont okozza, és a töréspontok helye ismert. Teszt kísérletek azt mutatják, hogy a módszer előnye akkor is jelentős marad, amikor a töréspontok számának és időpontjuknak a becslése pontatlan. Az, hogy a teszt eredmények ezt mutatják, szemléletesen alapon is várható: a homogenizálás során a valós éghajlati változékonyságot igyekszünk megközelíteni, és helyes töréspont detektálás esetén a korrekciók optimális becslése egyenletrendszer használatát igényli. Tudjuk, hogy egy egyenletrendszerben álló ismeretleneket azok egyenkénti becslésével nem lehet pontosan meghatározni, következésképp minél közelebb vagyunk az optimális megoldáshoz, annál jelentékenyebb lesz az egyenletrendszerben szereplő ismeretlenek korrekt módon történő kiszámításának pozitív hatása. Ezt is igazolják a tesztek, ugyanis a helyesen felépített homogenizáló módszerek előnye növekszik a jel-zaj aránnyal.

Visszatérve a fejezet fő témájához, még csak az időszak elején járunk. 1997-ben *Alexandersson & Moberg (1997)* az SNHT olyan változatát mutatták be, amelyben töréspont típusú és lineárisan változó mértékű inhomogenitások is detektálhatók. Ezzel egy időben, *Moberg & Alexandersson (1997)* a svéd hőmérsékleti idősorok mintaszerűen végrehajtott homogenizálásának részletes leírását publikálták. 1998-ban egy újabb, az MLR (Multiple Linear Regression) módszer (*Vincent, 1998*) került bemutatásra, amellyel töréspontok és lineárisan változó mértékű inhomogenitások is detektálhatók. Későbbi kutatások azonban azt mutatták, hogy a homogenizálás pontossága nem növelhető a modell-inhomogenitások



típusának változatossá tételével, mert az egyes inhomogenitás típusok beazonosításánál gyakoribb a tévedés, mint annak eldöntésénél, hogy fennáll-e egyáltalán szignifikáns inhomogenitás. Jelenleg, a modern homogenizáló módszerek kizárólag töréspontot képesek detektálni, és például egy lineárisan változó mértékű inhomogenitást egy vagy több töréspont beiktatásával szerkesztett lépcsős függvényvel tudnak közelíteni.

Az ezredforduló tájékán már az éghajlati jellemzők napi értékeit is homogenizáltuk. Ennek legegyszerűbb módja az, ha a havi átlagértékekre számított korrekciót a hónap minden egyes napjára alkalmazzuk. Ahhoz, hogy elkerüljük a korrekció ugrásszerű megváltozását a hónap határoknál, simítani szükséges a napi korrekciók időbeni függvényét. Vincent et al. (2002) olyan lineáris simító függvényt mutattak be, amely megőrzi a havi átlagos korrekciók mértékét.

2005-ben hosszú csapadékidősorok mintaszerű homogenizálása került részletes leírásra és publikálásra (Auer et al., 2005). A tanulmányban a meta-adatok használata és az inhomogenitások szezonális változásainak értékelése különösen érdekes.

2006-ban, az ötödik nemzetközi homogenizálási szemináriumon kerültek bemutatásra először olyan módszer összehasonlító tesztek, amelyek a töréspont detektálás eredményességének a négyzetes hibák összegére és trend becslésekre gyakorolt hatását is értékeli (Domonkos, 2008; 2011). E tesztekben tökéletes referencia idősorokat feltételező modell és egységes módon végrehajtott korrekciók alapján lettek meghatározva a töréspont detektáló módszertől függő négyzetes hiba összegek és trend becslések. Ugyanitt, egyes teszt adatbázisok parametrizációja szimulált és valós éghajlati idősorokon detektált töréspontok statisztikai tulajdonságainak iterációs közelítésével került meghatározásra, abból a célból, hogy a valós éghajlati adatbázisokhoz megközelítően azonos tulajdonságú teszt adatbázisokat tudjunk használni. Tudomásom szerint ilyen típusú vizsgálatot más kutatók nem végeztek, kivétel Lindau & Venema (2019), akik részben hasonló vizsgálatokat végeztek és amelyre még visszatérünk.

Della-Marta & Wanner (2006) módszert dolgoztak ki a napi hőmérsékletek valószínűségi eloszlás értéktől függő korrekciójára. Az ilyen típusú fejlesztés is szükséges, mert más hatású egy inhomogenitás az extrém hőmérsékletekre, mint az átlagos értékekre. A javasolt korrigáláshoz a hőmérsékleti értékek valószínűségi eloszlását hasonlítjuk össze a jelölt idősor és egy másik, vele szorosan korrigáló szomszéd idősor között, az idősorok egy meghatározott közös szakaszán. E közös szakasz nem tartalmazhat töréspontot sem a jelölt idősorban, sem pedig a referenciaként használt szomszéd idősorban.

2007-ben indult az európai COST projekt ES0601, népszerű nevén „HOME” öt éves programja, amely további lendületet adott a homogenizáló módszerek fejlődésének. HOME a felszíni éghajlati adatok homogenizálásával foglalkozott, és elsősorban az európai országok meteorológiai szolgálatainak képviselői vettek részt benne. Azt látjuk, hogy ezekben az években a magaslégköri adatok homogenizálásában, valamint tengeren túli kutatócsoportok munkáiban is megjelentek új és hasznos módszer leírások és módszer alkalmazások.

Haimberger (2007) reanalízis adatsorok használatát vezette be a rádiószondával mért magaslégköri hőmérséklet idősorok homogenizálására. Mivel a rádiószondázó állomások térbeli sűrűsége kicsi, és a reanalízis magaslégköri hőmérsékletek jól közelítik a tényleges értékeket, ez az újítás lényegesen emelte a magaslégköri hőmérsékletek homogenizálásának minőségét. Nem sokkal később reanalízis magaslégköri hőmérséklet adatokat a homogenizált magaslégköri hőmérsékletek pontosságának becslésére is felhasználtak (McCarthy et al., 2008). A rákövetkező években a felszíni éghajlati adatok homogenizálásában is megjelent a reanalízis adatok használata, de megjegyezzük, hogy ez utóbbi előnye kevésbé egyértelmű.



A hatodik nemzetközi homogenizálási szemináriumon (2008) került bemutatásra a súlyozott ANOVA korrigálás modellje (*Szentimrey, 2010*), ezt megelőzően csak az egyszerűsített ANOVA modell volt kidolgozva inhomogenitás korrigálás céljára. Érdekes, hogy Szentimrey noha ajánlja, ő maga a MASH homogenizáló módszerben nem használ ANOVA korrekciókat. Súlyozott ANOVA korrigálás modell használata tudomásom szerint kizárólag az ACMANT (Applied Caussinus-Mestre Algorithm for the homogenization of Networks of climatic Time series) homogenizáló módszerben van (*Domonkos, 2022*), egyszerűsített súlytényező számítással, nevezetesen az optimális súlyokat ordinary kriging adná, míg az ACMANT módszerben a térbeli korrelációk négyzetei adják a súlyokat.

Menne & Williams (2009) automatikus módszert dolgoztak ki az idősorok páronkénti összehasonlítására, és ezen az alapon fejlesztették ki a PHA (Pairwise Homogenization Algorithm) homogenizáló módszert. Ebben a többszörös töréspontok detektálása a SNHT detektáló módszerrel és lépésenkénti kettő szelektálással történik. A PHA módszer nem tartalmaz iterációt, fokozottan igyekszik elkerülni szükségtelen töréspontok alkalmazását, és teljesen automatikusan futtatható. A módszer képes a meta-adatok automatikus figyelembevételére. A PHA módszer igen hatékony a regionális trendek pontos reprodukálásában, míg viszonylag kevésbé pontos az egyedi idősorok homogenizálásánál, valamint kicsi jel-zaj arány esetén. A PHA eredeti célja az USA felszíni hőmérsékleti trendjeinek megbízható becslését lehetővé tévő homogenizálás volt, amelyet kiválóan oldott meg.

Körülbelül a PHA fejlesztésével egy időben indultak kísérletek a PRODIGE módszer automatizálására, de az automatizált verzióval kapott eredmények gyengébbek voltak, mint az eredeti módszer eredményei, és abban az időben a szakmai közösség kevés információt kapott ezekről a kísérletekről.

2010-ben kezdődött az ACMANT homogenizáló módszer fejlesztése. Legkorábbi verziójának (nevezzük „nulladik verzióknak”) leírása nem került publikálásra, viszont ez a verzió vett részt a HOME módszer összehasonlító tesztelésén. Az ACMANT a PRODIGE módszer lépcsős függvény illesztési módszerét átvette, és kifejlesztette annak kétváltozós verzióját. A töréspont detektálást évi adatok idősorain végzi (meghatározott kivételektől eltekintve), és egy külön lépésben pontosítja havi időskálán a töréspont helyeket. Az ACMANT módszer általában szerkesztett referencia idősorokat használ, és fő verziója teljesen automatikusan futtatható. Az ACMANT nulladik verziója egyenként korrigálta az inhomogenitásokat és iterációt tartalmazott. Röviddel a HOME tesztek után az ACMANT átvette az egyszerűsített ANOVA modell alkalmazást is a PRODIGE módszerből. Az ACMANT első verziója még csak havi hőmérséklet idősorok homogenizálására volt alkalmas, de a következő években folytatódott a módszer fejlesztése.

A HOME projekt keretében először került kifejlesztésre olyan teszt adatbázis, amellyel nemcsak a töréspontok detektálásának helyessége, hanem teljes homogenizáló módszerek (kezdve az idősorok összehasonlításától az inhomogenitások korrigálásáig) tesztelhetők. E tesztadatbázisnak hőmérséklet adatbázis és csapadék adatbázis részei vannak. Az egyenként 100 év hosszúságú, homogén, havi bontású idősorok homogenizált európai éghajlati idősorok adatainak randomizálásán alapulnak, ezekhez töréspont jellegű, valamint kisebb számban trend jellegű inhomogenitásokat adtunk (*Venema et al., 2012*). Az így szimulált idősorokból azonos éghajlati régiókat szimuláló, 5–15 idősort tartalmazó csoportokat szerkesztettünk. A létrehozott adatbázis 15 hőmérsékleti és 15 csapadék régiót tartalmaz, és 2010-ben ezzel az adatbázissal teszteltük homogenizáló módszereinket. A homogenizálás sikerességét a homogenizált és a tökéletesen homogén idősorok összehasonlításával végeztük. Az összehasonlításhoz a meteorológia más területein is használatos RMSE (a négyzetes hibák



átlagának négyzetgyöke) indikátort használtuk az egyedi értékek és a teljes idősorra vonatkozó lineáris trend hibáknak a jellemzésére. Az egyedi értékek hibáiból levonásra került az idősorra vonatkozó, homogén és homogenizált átlagos értékek különbsége, mert a homogenizálás nem idősor átlagokat, hanem időbeli változékonyságokat reprodukál. Az így módosított RMSE elnevezése CRMSE (Centered RMSE, Venema et al., 2012). Az 1. táblázat bemutat néhány eredményt, amelyek a fentebb ismertetett homogenizáló módszerek pontosságát hasonlítják össze.

1. táblázat: A COST HOME módszer összehasonlító tesztjeinek néhány eredménye (Venema et al., 2012).

	Hőmérséklet (°C)		Csapadékmennyiség (mm)	
	Havi CRMSE	Trend RMSE	Havi CRMSE	Trend RMSE
Homogenizálatlan	0,57	1,19	10,6	15,0
ACMANT	0,34	0,63	–	–
MASH	0,36	0,35	9,7	7,5
PHA	0,39	0,69	–	–
PRODIGE	0,35	0,33	9,0	8,8
Egyéb módszerek	0,46–0,69	0,66–1,09	9,7–15,4	9,2–16,0

A MASH és PRODIGE módszerek nyújtották a legjobb eredményeket, illetve az egyedi értékek hibájának minimalizálásában az ACMANT módszer is jó eredményt ért el. E teszteknek két nagyon fontos tanulságuk volt: az egyik, hogy a homogenizálás eredményességének értékeléséhez nem elegendő a töréspont detektálás helyességének értékelése, sőt ez utóbbi félrevezető lehet ha az előbbinek a szerepében alkalmazzuk. A másik fontos tanulság pedig az volt, hogy az egyes homogenizáló módszerek pontosságai között olyan markáns különbségek mutatkoztak, amelyekhez hasonlókat nagyon ritkán tapasztaltunk a töréspont detektálási módszerek eredményességének tesztelésénél. A HOME tesztek eredményeit 2012-ben publikáltuk (Venema et al., 2012).

A HOME tesztek kiértékelése után egy HOME munkacsoport alakult egy új, a korábbiakat meghaladó hatékonyságú homogenizáló módszer kidolgozására, amelynek a HOMER (HOMogenization Software in R) nevet adtuk. A munkát a HOME projekt vezetője, Olivier Mestre irányította, aki a PRODIGE módszernek is egyik fejlesztője volt. A HOMER alapja a PRODIGE volt, ezt kiegészítettük egy a biostatistika terén akkor újonnan kifejlesztett többszörös töréspont detektáló módszerrel, az úgynevezett joint segmentation módszerrel (Picard et al., 2011), amely az összes együtt homogenizált idősor valamennyi töréspontját összekapcsolt módon keresi. Ezeken kívül bekerült az ACMANT-nak két művelete, nevezetesen a töréspontok idejét havi skálán finomító eljárás, valamint a kétváltozós töréspont detektáló módszer. Emeltük az előzetes adatminőség ellenőrzés (például fizikailag irreális értékek kiszűrése) színvonalát és fejlesztettük az interaktív homogenizálást segítő képi megjelenítések minőségét is.

Itt kitérünk arra, hogy mikor és mire jó az a kétváltozós töréspont detektálás, amit az ACMANT és HOMER módszerek alkalmaznak. A hőmérsékletek inhomogenitásának a mértéke gyakran függ a napsugárzás mennyiségétől, mivel a hőmérők típusában, elhelyezésük módjában valamint a mikrokörnyezetben előforduló változások a sugárzástól függő módon hatnak a mért értékekre. A napsugárzás a közepes és magas földrajzi szélességeken jelentős amplitudójú és megközelítőleg szabályos évi ritmus szerint változik, emiatt a hőmérsékleti inhomogenitások gyakran mind az évi középhőmérsékletre, mind pedig az évszakos ingásra



hatással vannak. Az ACMANT módszerben kifejlesztett kétváltozós detektálás egyszerre két idősorra illeszt lépcsős függvényt az összesített négyzetes hibák minimalizálásával, és annak a feltételnek a teljesítésével, hogy a töréspontok helye a két idősorban egyező (*Domonkos, 2022*). Megjegyezzük, hogy az ötlet nemcsak a lépcsős függvény illesztéssel történő töréspont detektálás esetén alkalmazható. A kétváltozós detektálás pontosságot növelő hatásához nem szükséges hogy a valós töréspont előfordulások minden esetben azonos időpontban legyenek, mivel negatív hatás a detektálás eredményességében kizárólag akkor lép fel, ha az egyik változóban gyengén szignifikáns töréspont fordul elő egy olyan időpontban, amikor a másik változóban nincs töréspont (3. ábra).

A	erősen szignifikáns		+++++	
	gyengén szignifikáns	-----	+++++	+++++
	nincs töréspont		-----	
		nincs töréspont	gyengén szignifikáns	erősen szignifikáns
B				

3. ábra: Kétváltozós detektálás hatása az A és B idősorokban lévő töréspontok helyes detektálására: kék - pozitív, piros - negatív, szürke – közömbös.

A HOMER módszer (*Mestre et al., 2013*) felajánl automatikusan generált megoldásokat, de alapvetően arra épül, hogy a felhasználó maga dönt bizonyos részletekben. A módszer csak havi felbontású idősorokat homogenizál, de már 2011-ben publikálásra került egy napi idősorok valószínűségi eloszlását homogenizáló módszer, a SPLIDHOM (SPLIne Daily HOMogenization) (*Mestre et al., 2011*), és a HOME projekt weblapja a HOMER és SPLIDHOM együttes használatát javasolta a napi adatok homogenizálására. A SPLIDHOM a *Della-Marta & Wanner (2006)* módszeréhez hasonló megoldást kínál. *Mestre et al. (2011)* vizsgálták a napi adatok homogenizálásának megbízhatóságát is, változó térbeli korrelációk és a SPLIDHOM módszer alkalmazásával. Egyértelmű, hogy a valószínűségi eloszlás eredményes homogenizálása szorosabb térbeli korrelációkat kíván, mint a szakasz-átlagok homogenizálása, de ennek a témának a kidolgozásához még további kutatások szükségesek. A HOMER teljes történetéhez hozzátartozik, hogy a HOME projektet követően Mestre más munkát kapott a Meteo Franceban, emiatt a módszer kicsit gazdátlan maradt, pedig összetett szerkezete miatt alapos tesztelést és kiigazításokat igényelt volna.

A hetedik nemzetközi homogenizálási szeminárium alkalmával mutatta be először *Guijarro (2011)* azt az automatikus módszer összehasonlító teszteket produkáló eljárását,



amely a későbbi MULTITEST (MULTIple verification of automatic softwares) projekt (2015–2017) kiinduló ötletét adta. Guijarro módszere szimpla fehér zaj szerkezetű homogén idősorokat állít elő, de azokat képes reális térbeli korrelációkkal rendelkező szimulált éghajlati régiókba rendezni. Az idősorokhoz töréspontokat ad, akár előre meghatározott dátumnál, akár véletlenszám generátorral randomizált időpontokban. *Guijarro (2011)* már ekkor automatikus tesztnek vetett alá néhány, akkoriban szabadon hozzáférhető és automatikusan futtatható homogenizáló módszert.

A HOME projektet követő években Guijarro kidolgozta a CLIMATOL homogenizáló módszert. Hasonlóan néhány más homogenizáló módszerhez, a többszörös töréspontok detektálása a CLIMATOLban is SNHT töréspont detektálással és a ketté szeletelés lépésenkénti ismétlésével történik. A módszer az együtt homogenizált idősorok mindegyikét kiegészíti egy előzetesen meghatározott időszakra, amennyiben az idősorok különböző időszakokat fednek le a homogenizálás előtt. A kiegészítés térbeli interpoláció alkalmazásával történik, és az idősor átlagok pontossá tétele érdekében gyakori, hogy az interpolációt a program többször is megismétli. Az itt leírt idősor kiegészítést a CLIMATOL minden ketté szeletelés után újra végrehajtja, és végül az interpolált értékek alkalmazása oldja meg az inhomogenitások korrigálását (*Guijarro, 2018*). A CLIMATOL „születési időpontja” nehezen meghatározható, mert ugyan már a HOME teszteken is szerepelt egy CLIMATOL nevű homogenizáló módszer, de annak más algoritmusa volt (és kevésbé volt sikeres). Az új CLIMATOL módszer alap üzemmódban teljesen automatikus, havi és napi idősorok homogenizálására egyaránt alkalmas, számos szabad választást enged a felhasználóknak, és viszonylag nagy pontosságú az egyedi idősorok homogenizálásában.

Haimberger et al. (2012) a magaslégköri hőmérséklet idősorokat oly módon homogenizálta, hogy a reanalízis adatokon kívül szomszéd idősorokat is felhasznált, ahol a térbeli közelség ezt lehetővé tette. Ez a követendő példa, ugyanis mindig a rendelkezésre álló hasznos információk teljes körének figyelembevételére kell törekedni. Hasonló pozitív példát találunk később a teljes légoszlop vízgőztartalmának homogenizálásánál *Nguyen et al. (2021)* tanulmányában.

Példaszerű következetességgel végrehajtott és részletesen leírt homogenizálást mutatott be *Trewin (2013)* az ausztrál napi hőmérséklet adatbázis homogenizálása alkalmával. A homogenizálási procedúra az idősorok válogatásával, előzetes vizsgálatukkal és a meta-adatok gyűjtésével kezdődött. Ezt az évi vagy szezonális átlagos hőmérsékletekben előforduló szignifikáns töréspontok PHA módszerrel történő detektálása követte, majd a napi hőmérsékletek valószínűségi eloszlásának *Della-Marta & Wanner (2006)* szerinti homogenizálásával fejeződött be az eljárás.

A szélső idősorok homogenizálására mutattak be új eljárást *Azorin-Molina et al. (2014)*. Ebben mezoszkála modellel generált idősorokat alkalmaztak referencia idősorként. Az ötlet azért különösen értékes, mert a szomszéd állomások szélső idősorainak homogenizálás céljára történő felhasználását gyakran korlátozza a helyi domborzati viszonyok erős befolyása a szélsőre.

A nyolcadik nemzetközi homogenizálási szeminárium alkalmával *Domonkos (2014)* bemutatta az ACMANT második generációját (ACMANTv2). Ekkor az ACMANT módszerrel már lehetett csapadék idősorokat, valamint napi felbontású idősorokat is homogenizálni. Olyan éghajlati régiókban, ahol az év egy szakaszában a csapadék domináns formája hó, az évet esős és havas évszakokra kell bontani, és az ACMANT módszer kétváltozós töréspont detektálással keresi a töréspontok helyét, míg a korrekciókat külön számítja az esős évszak, illetve havas évszak inhomogenitásaira (*Domonkos, 2015*). Ezt a fajta



évszakra bontást az magyarázza, hogy a hócsapadék mérésében több és nagyobb inhomogenitások fordulnak elő, mint az eső mérésében.

2014-ben az ENSZ Meteorológiai Világszervezetén (World Meteorological Organization, azaz WMO) belül munkacsoport (TT-HOM) alakult a homogenizáló módszerek fejlesztésének és használatának az irányítására. A munkacsoport három éves programjának legfontosabb feladata egy homogenizálási útmutató kidolgozása volt.

Nagy méretű, napi hőmérsékleti adatokat szimuláló teszt adatbázis fejlesztését publikálta egy nemzetközi kutatócsoport (*Willett et al., 2014*). Az adatbázis az USA négy régiójára szimulált egyenként 150–300 idősből álló, reális térbeli korrelációjú adathálózatosokat. Az adatok szezonális változásai és a hőmérséklet perzisztenciája is jól közelítik a reális viszonyokat. Az adatsorokba töréspontokat helyeztek, és módszer összehasonlítási teszteket végeztek velük. E tesztek eredményeit sokféle szempontból értékelték (*Killick, 2016; Killick, Jolliffe & Willett, 2021*), de nem találtam olyan információt, amelyből az átlagos trendbecslés hiba látszódná vagy kiszámítható lenne. A regionális átlagok becslési hibáira vonatkozó eredmények sincsenek, de azok nem is lennének reálisak, mert a statisztikailag független minta mérete mindössze 4. Ki vannak viszont számítva az egyes idősorokra vonatkozó RMSE értékek, ebben az ACMANT és CLIMATOL módszerek adták a legjobb eredményeket.

2015-ben indult a spanyol MULTITEST projekt, amelyet a tarragonai University Rovira i Virgili egyetem vezetett, de az adatbázisok generálásának és homogenizálási módszerek futtatásának nagyobb hányadát José A. Guijarro, a spanyol meteorológiai szolgálat (Spanish State Meteorological Agency – AEMET) kutatója végezte. A projektben külső szakértőként vett részt Victor Venema, a TT-HOM munkacsoport vezetője. Havi hőmérséklet és csapadék idősorokat generáltunk, és a szabadon hozzáférhető automatikusan futtatható homogenizáló módszerek eredményességét teszteltük. Ezek az ACMANT, CLIMATOL, MASH, PHA és RHtests (*Chan & Feng, 2019*) módszerek voltak. Vártuk esetleges újabb automatikus homogenizáló módszerek nevezését is, de ilyenek nem voltak. A teszt adatbázis hatalmas mérete miatt interaktív módszerek tesztelése nem jött számításba. Valójában nem egy, hanem több, egymástól különböző tulajdonságú adatbázisokat hoztunk létre. A szimulált adathálózattal lefedett éghajlati régiók száma több ezer volt, a régiók többsége 10 idősort tartalmazott, de teszteltünk 20–40 idősort tartalmazó régiókat is. A tesztek többségében az ACMANT (akkor ACMANTv3) adta a legjobb eredményeket minimális különbséggel a CLIMATOL eredményei előtt. A projekt hivatalos három éve alatt csak konferencia és szemináriumi publikációink voltak (*Guijarro et al., 2017*).

Gubler et al. (2017) egyszerű példát mutattak be a megfigyelőhálózat térbeli sűrűség homogenizálás eredményességére gyakorolt hatásának a jellemzésére. A Svájcban feljegyzett, homogenizálatlan hőmérséklet és csapadék idősorok sűrű hálózatából véletlen kiválasztással elhagyták az idősorok egy részét. A sűrű adatmező jó minőségű homogenizált változatát a HOMER módszer és meta-adatok felhasználásával biztosították, ezt követőleg azt vizsgálták, hogy milyen módon változik a homogenizálás eredménye az idősorok ritkítása miatt. Egy másik ok, ami miatt ezt a tanulmányt említjük, az a HOMER szoftver (*Mestre et al., 2013*) egy súlyos hibájának a felismerése és tárgyalása. A joint segmentation módszer nem tesz különbséget éghajlati változás és állomás hatás változás között. A probléma nem új, de súlyossága ekkor tudatosult. HOMER használók egyéb problémákat is jelentettek a HOMER szoftverrel kapcsolatban, de utóbbiakról nem tudjuk, hogy mennyire gyakoriak, és azt sem, hogy felhasználó függőek-e.

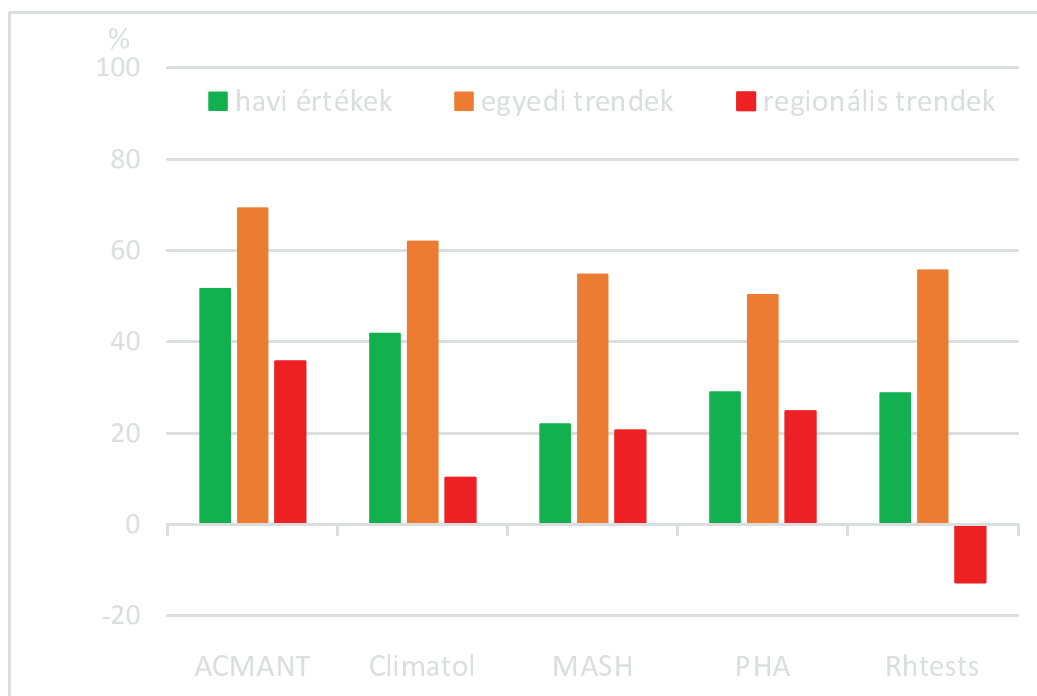
Domonkos & Coll (2017b) a szomszéd idősorok számának és térbeli korrelációinak a homogenizálás eredményességére gyakorolt hatását vizsgálták az ACMANT módszer



használatával. A vizsgálatokhoz a *Willet et al. (2014)* napi hőmérsékleti adatbázisból néhány egyszerű átalakítással létrehozott havi teszt adatbázisokat használtak (*Domonkos & Coll, 2017b*). Ezek alapján megközelítőleg 30 a felhasznált szomszéd idősorok optimális száma, feltéve, hogy az idősorok adathiánytól mentesek. A viszonylag gyengén korreláló (0,4–0,6) szomszéd idősorok felhasználása abban az esetben is előnyös a pontosság növelésére, ha sok más szomszéd idősor erősen korrelál a jelölt idősorral.

A 2017 és 2018 években a PRODIGE – HOMER módszer család két automatikus változáról is születtek tanulmányok. *Rustemeier et al. (2017)* a HOMER módszer alapján kifejlesztett automatikus módszert (HOMPRA vagy AHOPS – HOMogenized PRecipitation Analysis of European in-situ data – nevéken említett) használt egy nagy méretű európai csapadék adatbázis homogenizálására. *Chimani et al. (2018)* pedig a PRODIGE módszer egy automatizált változatát, a HOMOP módszert összehasonlító tesztnek vetették alá egy szintetikus napi légnedvesség adatokat tartalmazó adatbázison. A HOMOP eredményességét az ACMANT és MASH módszerek eredményességével hasonlították össze. Eredményeik szerint a HOMOP és ACMANT módszerek pontossága nagyjából egyforma, és mindkettő kicsit jobb, mint a MASH pontossága. Hiányzó maradt viszont mind a HOMPRA mind a HOMOP módszerek esetében a MULTITEST adatbázison történő tesztelés.

A MULTITEST tesztelések két új vonással bővültek 2017-ben. Ezek egyike, hogy néhány akkor fejlesztett MULTITEST adatbázisban a homogén havi idősorok a *Domonkos & Coll (2017b)* adatbázisból származnak. A másik pedig az, hogy ekkortól kezdve regionálisan átlagolt CRMSE és trend differenciákat is számítottunk. A tesztek futtatását 2018-ban fejeztük be, és pár évvel később jelent meg belőle lektorált közlemény. Itt egyetlen ábrával foglaljuk össze a *Domonkos et al. (2021)* által közzétett 12 különböző teszt adatbázis 1900 szimulált éghajlati régiójával kapott eredményeket (4. ábra), mely a CRMSE és trend differenciával jellemzett inhomogenitások eltávolításának sikerességét ábrázolja.



4. ábra: MULTITEST eredmények 12 nagy méretű hőmérséklet teszt adatbázison: az inhomogenitások eltávolításának aránya az inhomogén adatok hibájának százalékában.



Valamennyi teszt adatbázis közepes földrajzi szélességek szimulált havi középhőmérsékleteit tartalmazta. Lehetséges, hogy a teszt adatmezők pontos homogenizálása nehezebb volt, mint számos, a valóságban előforduló homogenizálási feladat, és ezért mutatkozik mérsékeltnek a hatékonyság. Általános, vagyis nemcsak a MULTITEST eredményekre jellemző, hogy a regionális trendben lévő inhomogenitások korrigálása kevésbé sikeres, mint az egyedi trendeké, de általános az is, hogy az egyedi idősorokban nagyobb inhomogenitások fordulnak elő, mint a regionális átlagokban. Egyedi idősorokra az ACMANT és CLIMATOL módszerek, regionális átlag trendekre pedig az ACMANT és PHA módszerek adták a legjobb eredményeket. Az aktuális MASH útmutató alapján tesztelt MASH automatikus verzióban a havi és évi értékek homogenizálása nem volt megfelelően összehangolva, és nem tudjuk, hogy ez milyen mértékben befolyásolta a MASH kicsit szerényebb eredményeit. MULTITEST megmutatta a PHA hatékonyságát a regionális átlag trendek javításában. Ez a HOME tesztekben nem mutatkozott, mert ott a kis számú éghajlati régiók (15) többsége (9) egyenként mindössze 5 idősort tartalmaztak. A MULTITEST adatbázisait és az értékelési szempontokat egyenként vizsgálva, legtöbbször az ACMANT módszer adta a legpontosabb eredményt, máskor pedig az ACMANT a technikailag azonos eredményt adó legpontosabb módszerek egyike volt. Egyetlen, jóllehet gyakorlati szempontból fontos kivétel azonban előfordult: amikor azonos típusú technikai változás rövid időszakon belül több idősort is befolyásol, azonos irányú inhomogenitásokat okozva az egyes idősorokban, a regionális trendek reprodukálásában a PHA módszer szignifikánsan eredményesebb volt, mint ACMANT. Ezt a PHA módszer részét képező páronkénti idősor összehasonlítás hasznossága magyarázza.

Lindau & Venema (2018) elméleti tanulmányban vizsgálták az ANOVA korrekciós módszer alkalmazása esetén maradó átlagos trend hibákat. Megállapították, hogy ugyan pontos töréspont detektálás esetén is van maradék hiba, de ilyenkor viszonylag nagy regionális átlagú inhomogenitásokat is nagy pontossággal korrigál az ANOVA módszer. A töréspont detektálásban azonban gyakoriak a pontatlanságok, tehát az ANOVA modellt általában pontatlan töréspont pozíciók megadásával használjuk. Ezek a pontatlanságok növelik a maradék trend hibát, és amennyiben az egyes idősorokat azonos típusú inhomogenitások befolyásolják, a regionális trend differenciák egy hányada korrigálatlan marad. Ez utóbbit láthattuk a MULTITEST eredményein is.

Az ACMANT módszer negyedik verziója (ACMANTv4, Domonkos, 2022) 2018 végére készült el, de a MULTITEST már kicsit korábban tesztelni tudta ezt a verziót is, mivel a havi idősorokat homogenizáló programok előbb elkészültek, mint a teljes szoftver csomag. Az ACMANTv4 már számos éghajlati elem homogenizálására alkalmas, és képes akár 5000 idősor automatikus homogenizálására oly módon, hogy a közel azonos éghajlatú régiókat is maga a szoftver szerkeszti (hasonlóra a PHA és CLIMATOL módszerek is képesek). Az ACMANTv4 már tartalmazza az ensemble homogenizálást és a súlyozott ANOVA modell alapján történő inhomogenitás korrigálást is.

2018-ban Guijarro napi felbontású teszt adatbázisokat készített több éghajlati elemre (*Guijarro et al., 2019*). Az INDECIS európai projekten belül egy részfeladat volt az európai napi idősorok homogenizálása, különös tekintettel az extrém tartományba eső értékek pontosságára, mivel a projekt célkitűzése az extrém éghajlati jelenségek trendjének és változékonyságának az elemzése volt. A nagy méretű teszt adatbázis szimulált svédországi és szlovéniai adathálózatokat tartalmaz 9 fontos éghajlati elemre (minimum és maximum hőmérséklet, csapadékmennyiség, légnedvesség, szélesebbesség, légnyomás, napfénytartam, borultság és hóvastagság). Az adatbázissal az adathiányok és az inhomogenitástól eltérő típusú adatminőség problémák hatásai is tesztelhetők. Az INDECIS adatbázisnak azonban van



két gyengesége: az egyik, hogy a reális idősorok megközelítése több szempontból is túl egyszerűsített, ebből a szempontból nem éri el a *Willett et al. (2014)* adatbázis minőségét. A másik gyengeség pedig az, hogy a statisztikailag független éghajlati régiók száma 2, tehát a regionális átlagok rekonstruálásának a pontossága ezzel az adatbázissal nem értékelhető. Ezeket a gyengeségeket azért említjük, mert a teszt adatbázisok a mérőműszerek etalonjához hasonló szerepben működnek, tehát esetleges minőségi problémáik erőteljesen ronthatják az értéküket. Az természetes, hogy a regionális átlagok tesztelésére alkalmas méretű adatbázisokat nem minden esetben lehet létrehozni vagy használni, a számítások időigénye és tárhelyigénye miatt olykor ésszerű kompromisszumokat kell kötni. Más a helyzet a reális idősorok statisztikai tulajdonságainak megközelítésével, ebben mindig törekedni kell az optimálist megközelítő megoldások alkalmazására.

A 2019-ben elvégzett INDECIS tesztekben az ACMANTv4, a CLIMATOL és egy kevésbé ismert homogenizáló módszer vettek részt. ACMANT és CLIMATOL egymáshoz hasonló pontosságot produkáltak mind az átlagos értékek, mind pedig az extrém tartományok éghajlati jellemzőinek reprodukálásában, és mindkét módszer eredményei jobbak voltak, mint a harmadikként tesztelt módszeré.

Lindau & Venema (2019) a többszörös töréspontok hatását vizsgálták a felhalmozott inhomogenitás mértékekre. Elméleti megfontolások, szimulált és valós hőmérséklet adatbázisok együttes vizsgálata alapján megállapították, hogy az egymást követő töréspontokhoz tartozó inhomogenitások gyakrabban okoznak fokozott mértékű inhomogenitást az USA hőmérséklet idősoraiban, mint a Németországban feljegyzett hőmérséklet idősorokban. *Lindau & Venema (2019)* vizsgálatai a kicsi és emiatt közvetlenül nem detektálható inhomogenitások gyakoriságára is becslést adtak. Az ilyen típusú vizsgálatok igen hasznosak a reális adatokat jól közelítő teszt adatbázisok létrehozásához.

A detektált töréspontok számának és pozíciójuknak bizonytalanságát vizsgálták *Coll et al. (2020)* és *O'Neill et al. (2022)* valós éghajlati megfigyeléseken alapuló adatbázisokban. *Coll et al. (2020)* az ír szigetek sűrű megfigyelőhálózatából származó havi csapadék idősorok ACMANT és CLIMATOL módszerekkel detektált töréspontjait a felhasznált sorok számának variálásával vizsgálta. Az eredmények azt mutatták, hogy a detektált töréspontok száma és pozíciójuk néha gyökeresen megváltozik a figyelembe vett szomszéd idősorok összetételének változása miatt. *O'Neill et al. (2022)* tanulmányában egy folyamatosan fejlesztett globális hőmérséklet adatbázis (Global Historical Climate Network) nagy számú verziójának vizsgálata a PHA töréspont detektáló módszerrel az előbbi következtetést erősítette. *Coll et al. (2020)* elemezték, hogy a jelenség bizonyos mértékig természetes velejárója a statisztikus homogenizálásnak, mivel előfordul, hogy nagy mértékben különböző töréspont kombinációk használata csak kis különbségeket okoz az inhomogenitások korrigálásában. Ezt *O'Neill et al. (2022)* példával illusztrálták, és hozzátették, hogy a homogenizált trendek bizonytalanságának további csökkentése a meta-adatok szélesebb körű használatát igényli.

Több éves csúszással, de 2020-ban megjelent a WMO TT-HOM (World Meteorological Organization Task Team on Homogenization) homogenizálási útmutatója (*Venema et al., 2020*). Az útmutató áttekinti az éghajlati idősorok homogenizálásával kapcsolatos aktuális ismereteket, és hangsúlyozza a feladat típusának megfelelő homogenizáló módszerek alkalmazásának fontosságát. Felhívja a figyelmet a megfelelő matematikai módszerek, köztük külön is az ANOVA korrekciós módszer alkalmazásának fontosságára, valamint a meta-adatok használatának szükségességére. Érdekes, hogy több mint 20 évvel első publikálása után, az ANOVA korrekciós modell hasznosságát még mindig hangsúlyozni kell, mivel alkalmazása nagyon gyakran hiányzik a használatban lévő homogenizáló módszerekből. Ez egyik jele annak, hogy a gyakorlati homogenizálás fejlődése



időbeli késleltetéssel, olykor megtorpanásokkal vagy szükségtelen kitérésekkel követi csak az elméleti tudás fejlődését. Ha viszont az elmúlt negyedszázad gyakorlati homogenizálásában bekövetkezett változások egészét tekintjük, akkor megállapítható, hogy abban is gyors és jelentős mértékű a fejlődés.

Domonkos (2021a) a páronkénti idősor összehasonlítás és szerkesztett referencia idősor alkalmazás olyan kombinálását mutatta be, amely a két eltérő idősor összehasonlítási módszer előnyös tulajdonságait egyesíti. A kombináció első lépése a PHA módszerből adaptált töréspont detektálás, majd e töréspontokat kötelezőnek tekintve további töréspontok detektálhatók szerkesztett referencia idősorral a kombináció második lépésében.

Joelsson et al. (2021) a HOMER módszeren alapuló új, automatikus homogenizáló módszert mutattak be. A szerzők szerint a fejlesztés egyetlen célja a HOMER automatizálása volt, de az új módszer legalább két más fontos dologban is különbözik a HOMER-től: az új módszerrel napi adatok közvetlenül homogenizálhatók, és a joint segmentation eljárás különbség idősorokon kerül alkalmazásra. Ez utóbbi alapul szolgálhat a HOMER korábban említett hibájának a kijavításához. *Joelsson et al. (2021)* az INDECIS adatbázison tesztelték újonnan fejlesztett módszerüket, és azt állapították meg, hogy annak pontossága nagyjából azonos az ACMANT és CLIAMTOL módszerek pontosságával.

2021 végén Domonkos bejelentette az ACMANTv5 szoftver csomag hozzáférhetőségét (*Domonkos, 2021b*). Az ACMANTv5 tartalmazza a kombinált idősor összehasonlítás módszerét, és első ízben az ACMANT történetében meta-adatok automatikus felhasználására is képes. Az ACMANTv5 módszer felhasználói jogot ad bizonyos opciók és paraméterek választására, valamint meghatározott típusú beavatkozásokra a homogenizálás folyamatában. Eltérően a homogenizáló szoftverek többségétől, ez a szoftver nem ingyenes, mivel magánerőből végeztem a fejlesztést.

Az új kutatási eredmények felsorolásának a végére értünk. A hosszú listát tekintve úgy tűnhet, hogy már mindent megoldottunk, pedig koránt sincs így. Nem tudjuk például, hogy mely távolságig vagy korreláció határig szabad szomszéd idősorokat felhasználni, mi az optimális modellje a szélsőbesség inhomogenitásainak (mert azok általában sem a hőmérséklet sem a csapadékmennyiség inhomogenitások modelljeivel nem jól egyeznek), és egyelőre nagyon csekély az igazolt tudásanyag a valószínűségi eloszlások homogenizálása terén. Ami leginkább hiányzik az előrelépéshez, az a több, változatosabb, és a reális megfigyelési adatbázisokat hűen reprodukáló teszt adatbázisok létrehozása és hozzáférhetősége. Az eddigi legnagyobb és legváltozatosabb összetételű MULTITEST adatbázis kizárólag közepes földrajzi szélességekre vonatkozó havi hőmérsékleti mezőket és három önkényesen választott éghajlati régióra vonatkozó havi csapadékmezőket szimulált, tehát a többi éghajlati elemre, illetve földrajzi régiókra vonatkozóan a MULTITEST adatbázissal összevethető fejlettségű teszt adatbázisok egyelőre nincsenek. Maguk a szimulációs módszerek is további fejlesztést kívánnak, és azt gondolom, hogy teszt adatbázis fejlesztésekben csak akkor lesz jelentős előrehaladás, ha a kutatási terület kielégítő nagyságrendű célzott támogatást kap.

A homogenizáló módszerek és hatékonyság tesztelési módszerek fejlesztése azonban nemcsak finansziális kérdés, hanem szemléleti változást is igényel. A homogenizálás számos vonatkozása még mindig csak egy szűk körben ismert probléma, és gyakran megtörténik, hogy éghajlattal foglalkozó szakemberek büszkék arra, ha „háziag barkácsolt” módszereket használnak, akár tudják vele követni a nemzetközi színvonalat, akár nem. Ugyanezt nem tesszük meteorológiai műszereinkkel, hanem standard hitelesítésnek vetjük alá azokat. Gyakran nem is gondolunk rá, hogy a mérés és statisztikai módszerek alkalmazásának közös a célja: a jelenkori éghajlat lehető legpontosabb megismerése.



Felmerülhet a kérdés, hogy ha az ACTMANTv5 szoftverem nem nyílt elérésű, akkor hiába esetlegesen jobb, mint más szoftverek, nem fog jelentős mértékben terjedni a használata, mert a felhasználók többsége nem tud vagy nem akar fizetni érte. Ha pedig így lesz, akkor hiába vannak a szoftveremnek jó tulajdonságai, az anyagi megkötöttség révén esetleg magam is akadályozom a tudományos eredmények terjedését. Én azonban nem hiszem, hogy a tudományos közösséget jelentékeny hátrány érhetné emiatt. Az ACTMANTv5 szoftver tartalma részletesen le van írva szabadon hozzáférhető publikációkban, titkos recept nincs. Ami magát a szoftvert illeti, természetesen minden szakács annak örül, ha megeszik a főztjét. Vacsorát azonban csak annak tálalunk fel aki fogyasztani akar belőle, és a számlát is hajlandó kifizetni. Az idő múlásával nyilván lesznek jobb szoftverek, mint az ACTMANTv5, ugyanis ezen a területen még mindig igen gyors a fejlődés. Magam, amióta homogenizálással foglalkozom, minden évben tanultam róla új dolgokat.

Záró gondolatok

Az éghajlati idősorok homogenizálása egy sajátos tudományos probléma, amelynek megoldásához mind éghajlattudományi, mind pedig matematikai statisztikai ismeretek szükségesek. A gyakorlatban felmerülő homogenizálási feladatok nem egyformák, és a szakemberek is csak lépésről lépésre tanulják meg, hogy az egyes feladattípusok számára milyen homogenizálási eljárások biztosítják a természetes éghajlati trendek és éghajlati változékonyság lehető legpontosabb rekonstrukcióját. E tanulmányban az elmúlt negyedszázadban bekövetkezett módszertani fejlődést tekintettük át, és reméljük hogy ez, potenciális hasznán túl intellektuális élményt is nyújtott. A tanulmány végéhez közeledve néhány gondolat erejéig kitérünk a magyar szakemberek szerepére a nemzetközi élvonalba tartozó módszer fejlesztő tevékenységben, amely a magyarság arányához mérten rendkívülinek mondható.

1996-ban Budapesten kezdődött az a WMO által támogatott szeminárium sorozat, amelyen a világ élvonalába tartozó szakemberek átlag három évente teszik közzé és vitatják meg az aktuálisan elért kutatási eredményeiket. A kezdeti szervező munkában Szalai Sándornak és Szentimrey Tamásnak, az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársainak volt kiemelkedő szerepük. Később, Lakatos Mónika és más, fiatalabb kollégák is részt vettek a szeminárium sorozat szervezésében, amely 2020-ban már a tizedik rendezvényéhez érkezett. A magyar kutatók kiemelkedő szerepét nemzetközi projektek, konferencia szereplések és rangos szakmai publikációk alkalmával is elismerték. A legjelentősebb eredmények közé tartozik a Szentimrey Tamás által kifejlesztett MASH homogenizáló módszer, amely az ezredforduló környékén és a rákövetkező évtizedben az egyike volt a világ két akkori legpontosabb homogenizáló módszerének. Néhány évvel később pedig a szerző által kifejlesztett ACTMANT homogenizáló módszer minden más módszernél hatékonyabbnak bizonyult a MULTITEST módszer összehasonlító tesztek alkalmával, és valószínű, hogy ma a világ legpontosabb homogenizáló módszere olyan feladatokban, amelyek megoldásához automatikus homogenizálás az előnyös.

Mi, akiknek abban a szerencsében volt részünk, hogy bekapcsolódhattunk a világ élvonalába tartozó módszer fejlesztési munkákba, hálával tartozunk a magyar felsőoktatás kimagasló színvonaláért és egykori kitűnő tanárainknak.



IRODALOM

- Alexandersson, H. & Moberg, A. (1997): *Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends*. International Journal of Climatology, 17, 25–34.
- Alexandersson, H. (1986): *A homogeneity test applied to precipitation data*. Journal of Climatology, 6, 661–675.
- Auer, I., Böhm, R., Jurković, A., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Brazdil, R., Bochnicek, O., Cegnar, T., Gajić-Čapka, M., Zaninović, K., Majstorović, Ž., Szalai, S., Szentimrey, T. & Mercalli, L. (2005): *A new instrumental precipitation dataset for the Greater Alpine Region for the period 1800–2002*. International Journal of Climatology, 25, 139–166.
- Azorin-Molina, C., Vicente-Serrano, S.M., McVicar, T., Jerez, S., Sanchez-Lorenzo, A., López-Moreno, J.I., Revuelto, J., Trigo, R.M., Lopez-Bustins, J.A. & Santo Coelho, M.F.E. (2014): *Homogenization and assessment of observed near-surface wind speed trends over Spain and Portugal, 1961–2011*. Journal of Climate, 27, 3692–3712.
- Caussinus, H. & Lyazrhi, F. (1997): *Choosing a linear model with a random number of change-points and outliers*. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 49(4), 761–775.
- Caussinus, H. & Mestre, O. (1996): *New mathematical tools and methodologies for relative homogeneity testing*. In First Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data (ed. Szalai, S.), 63–82. Hungarian Meteorological Service, Budapest.
- Caussinus, H. & Mestre, O. (2004): *Detection and correction of artificial shifts in climate series*. Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics), 53, 405–425.
- Chan, R. & Feng, Y. (2019): *The RHtests homogenization package*. <https://github.com/ECCC-CDAS/RHtests>
- Chimani, B., Venema, V., Lexer, A., Andre, K., Auer, I. & Nemec, J. (2018): *Inter-comparison of methods to homogenize daily relative humidity*. International Journal of Climatology, 38, 3106–3122.
- Coll, J., Domonkos, P., Guijarro, J.A., Curley, M., Rustemeier, E., Aguilar, E., Walsh, S. & Sweeney, J. (2020): *Application of homogenization methods for Ireland's monthly*



- precipitation records: comparison of break detection results*. International Journal of Climatology, 40, 6169–6188.
- Della-Marta, P.M. & Wanner, H. (2006): *A method of homogenizing the extremes and mean of daily temperature measurements*. Journal of Climate, 19, 4179–4197.
- Domonkos P., Guijarro J. A., Venema V., Brunet M., and Sigró J., 2021: *Efficiency of time series homogenization: method comparison with 12 monthly temperature test datasets*. Journal of Climate, 34, 2877–2891.
- Domonkos, P. & Coll, J. (2017a): *Homogenisation of temperature and precipitation time series with ACMANT3: Method description and efficiency tests*. International Journal of Climatology, 37, 1910–1921.
- Domonkos, P. & Coll, J. (2017b): *Time series homogenisation of large observational datasets: The impact of the number of partner series on the efficiency*. Climate Research. 74, 31–42.
- Domonkos, P. (2008): *Testing of homogenisation methods: purposes, tools and problems of implementation*. In Proceedings of the 5th Seminar for Homogenisation and Quality Control in Climatological Databases (eds. Lakatos, M., Szentimrey, T., Bihari, Z. & Szalai, S.) WMO-WCDMP, 71, 126–145, Geneva, Switzerland.
- Domonkos, P. (2011): *Efficiency evaluation for detecting inhomogeneities by objective homogenisation methods*. Theoretical and Applied Climatology, 105, 455–467.
- Domonkos, P. (2015): *Homogenization of precipitation time series with ACMANT*. Theoretical and Applied Climatology, 122, 303–314.
- Domonkos, P. (2021a): *Combination of using pairwise comparisons and composite reference series: a new approach in the homogenization of climatic time series with ACMANT*. In Atmosphere special issue: Application of homogenization methods for climate records (ed. Domonkos, P.), 12(9), 1–17.
- Domonkos, P. (2021b): *Homogenization software Acmantv5 – Making climate trend assessments more reliable*.
<https://www.acmant.eu>
- Domonkos, P. (2022): *ACMANTv4: Scientific content and operation of the software*.
https://github.com/dpeterfree/ACMANT/blob/ACMANTv4.4/ACMANTv4_description.pdf



- Easterling, D.R. & Peterson, T.C. (1995): *A new method for detecting undocumented discontinuities in climatological time series*. International Journal of Climatology, 15, 369–377.
- Gubler, S., Hunziker, S., Begert, M., Croci-Maspoli, M., Konzelmann, T., Brönnimann, S., Schwierz, C., Oria, C. & Rosas, G. (2017): *The influence of station density on climate data homogenization*. International Journal of Climatology, 37, 4670–4683.
- Guijarro J. A., Aguilar E., Domonkos P., Sigró, J., Štěpánek, P., Venema, V. & Zahradníček, P. (2019): *Benchmarking results of the homogenization of daily Essential Climatic Variables within the INDECIS project*.
<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2019/EGU2019-10896-1.pdf>
- Guijarro, J.A. (2011): *Influence of network density on homogenization performance*. In Seventh Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases (eds. Lakatos, M., Szentimrey, T. & Vincze, E.), WMO-WCDMP 78, 11–18, Geneva, Switzerland.
- Guijarro, J.A. (2018): *Homogenization of climatic series with Climatol*.
http://www.climatol.eu/homog_climatol-en.pdf
- Guijarro, J.A. (2018): *Homogenization of climatic series with Climatol*.
http://www.climatol.eu/homog_climatol-en.pdf
- Guijarro, J.A., López, J.A., Aguilar, E., Domonkos, P., Venema, V., Sigró, J. & Brunet, M. (2017): *Comparison of homogenization packages applied to monthly series of temperature and precipitation: The MULTITEST project*. In Ninth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases (eds. Szentimrey T., Lakatos M. and Hoffmann L.), WMO-WCDMP 85, 46–62, Geneva, Switzerland.
- Haimberger L., 2007: *Homogenization of radiosonde temperature time series using innovation statistics*. Journal of Climate, 20, 1377–1403.
- Haimberger, L., Tavolato, C. & Sperka, S. (2012): *Homogenization of the global radiosonde temperature dataset through combined comparison with reanalysis background series and neighboring stations*. Journal of Climate, 25, 8108–8131.
- Joelsson, L.M.T., Sturm, C., Södling, J., Engström, E. & Kjellström, E. (2021): *Automation and evaluation of the interactive homogenization tool HOMER*. International Journal of Climatology, 1–20.



- Killick, R.E. (2016): *Benchmarking the performance of homogenisation algorithms on daily temperature data*. PhD thesis, University of Exeter, United Kingdom.
- Killick, R.E., Jolliffe, I.T. & Willett, K.M. (2021): *Benchmarking the performance of homogenisation algorithms on synthetic daily temperature data*. International Journal of Climatology, 1–19.
- Lindau, R. & Venema, V. (2018): *On the reduction of trend errors by the ANOVA joint correction scheme used in homogenization of climate station records*. International Journal of Climatology, 38, 5255–5271.
- Lindau, R. & Venema, V. (2019): *A new method to study inhomogeneities in climate records: Brownian motion or random deviations?* International Journal of Climatology, 39, 4769–4783.
- McCarthy, M.P., Titchner, H.A., Thorne, P.W., Tet, S.F.B., Haimberger, L. & Parker, D.E. (2008): *Assessing bias and uncertainty in the HadAT-adjusted radiosonde climate record*. Journal of Climate, 21, 817–832.
- Menne, M.J. & Williams, C.N. (2009): *Homogenization of temperature series via pairwise comparisons*. Journal of Climate, 22, 1700–1717.
- Mestre, O., Domonkos, P., Picard, F., Auer, I., Robin, S., Lebarbier, E., Boehm, R., Aguilar, E., Guijarro, J.A., Vertachnik, G., Klančar, M., Dubuisson, B. & Stepanek, P. (2013): *HOMER: homogenization software in R – methods and applications*. Időjárás, 117, 47–67.
- Mestre, O., Gruber, C., Prieur, C., Caussinus, H. & Jourdain, S. (2011): *SPLIDHOM: a method for homogenization of daily temperature observations*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 50, 2343–2358.
- Moberg, A. & Alexandersson, H. (1997): *Homogenization of Swedish temperature data. Part II: Homogenized gridded air temperature compared with a subset of global gridded air temperature since 1861*. International Journal of Climatology, 17, 35–54.
- Nguyen, K.N., Quarello, A., Bock, O. & Lebarbier, E. (2021): *Sensitivity of change-point detection and trend estimates to GNSS IWW time series properties*. In Atmosphere special issue: Application of homogenization methods for climate records (ed. Domonkos, P.), 12(9), 1–32.
- O'Neill, P., Connolly, R., Connolly, M., Soon, W., Chimani, B., Crok, M., de Vos, R., Harde, H., Kajaba, P., Nojarov, P., Przybylak, R., Rasol, D., Skrynyk, O., Skrynyk, O.,



- Štěpánek, P., Wypych, A. & Zahradníček, P. (2022): *Evaluation of the homogenization adjustments applied to European temperature records in the Global Historical Climatology Network Dataset*. In Atmosphere special issue: Application of homogenization methods for climate records (ed. Domonkos, P.), 13(2), 285, 1–21.
- Picard, F., Lebarbier, E., Hoebeke, M., Rigail, G., Thiam, B. & Robin, S. (2011): *Joint segmentation, calling, and normalization of multiple CGH profiles*. Biostatistics, 12, 413–428.
- Rustemeier, E., Kapala, A., Meyer-Christoffer, A., Finger, P., Schneider, U., Venema, V., Ziese, M., Simmer, C. & Becker, A. (2017): *AHOPS Europe – a gridded precipitation data set from European homogenized time series*. In Ninth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases (eds. Szentimrey, T., Lakatos, M. & Hoffmann, L.), WMO-WCDMP 85, 88–101, Geneva, Switzerland.
- Szentimrey, T. (1996): *Statistical procedure for joint homogenization of climatic time series*. In First Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data (ed. Szalai, S.), 47–62. Hungarian Meteorological Service, Budapest.
- Szentimrey, T. (1999): *Multiple Analysis of Series for Homogenization (MASH)*. In Second Seminar for Homogenization of Surface Climatological Data (eds. Szalai, S., Szentimrey, T. & Szinell, Cs.). WMO-WCDMP 41, 27–46, Geneva, Switzerland.
- Szentimrey, T. (201): *Methodological questions of series comparison*. In Sixth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases (eds. Lakatos, M., Szentimrey, T., Bihari, Z. & Szalai, S.). WMO-WCDMP 76, 1–7, Geneva, Switzerland.
- Trewin, B. (2013): *A daily homogenized temperature data set for Australia*. International Journal of Climatology, 33, 1510–1529.
- Venema, V., Mestre, O., Aguilar, E., Auer, I., Guijarro, J.A., Domonkos, P., Vertacnik, G., Szentimrey, T., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Viarre, J., Müller-Westermeier, G., Lakatos, M., Williams, C.N., Menne, M.J., Lindau, R., Rasol, D., Rustemeier, E., Kolokythas, K., Marinova, T., Andresen, L., Acquafredda, F., Fratianni, S., Cheval, S., Klancar, M., Brunetti, M., Gruber, C., Prohom Duran, M., Likso, T., Esteban, P. & Brandsma, T. (2012): *Benchmarking monthly homogenization algorithms*. Climate of the Past, 8, 89–115.



- Venema, V., Trewin, B., Wang, X.L., Szentimrey, T., Lakatos, M., Aguilar, E., Auer, I., Guijarro, J.A., Menne, M., Oria, C., Louamba, W.S.R.L., Rasul, G. (2020): *Guidelines on homogenization*. WMO-No. 1245, Geneva, Switzerland.
- Vincent, L.A. (1998): *A technique for the identification of inhomogeneities in Canadian temperature series*. Journal of Climate, 11, 1094–1104.
- Vincent, L.A., Zhang, X., Bonsal, B.R. & Hogg, W.D. (2002): *Homogenization of daily temperatures over Canada*. Journal of Climate, 15, 1322–1334.
- Willett, K.M., Williams, C.N., Jolliffe, I., Lund, R., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Vincent, L.A., Easterbrook, S., Venema, V.K.C., Berry, D., Warren, R.E., Lopardo, G., Auchmann, R., Aguilar, E., Menne, M.J., Gallagher, C., Hausfather, Z., Thorarinsdottir, T. & Thorne, P.W. (2014): *A framework for benchmarking of homogenisation algorithm performance on the global scale*. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 3, 187–200.



