

Történeti csapadékatatok egyes szisztematikus hibáinak újabb javítási lehetőségei

Rácz Tibor*

* Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Környezettudományi Intézet, Vízgazdálkodási és Klímaadaptációs Tanszék, egyetemi adjunktus (E-mail: RaczTiborFerenc@uni-mate.hu, raczt167@gmail.com)

DOI:10.59258/HK.11448



Kivonat

A folyékony csapadék mérése és az adatok feldolgozása, mint minden adattal foglalkozó tevékenység, különböző hibáknak van kitéve. A hibák kijavítására az 1600-as évek óta törekednek, de az egy napnál lényegesen rövidebb mintavételi periódusú adatokhoz csak nemrégiben készültek korrekciós eljárások. Csapadékra vonatkozó ismereteink elsősorban történeti adatokon alapulnak. A történeti adatok alatt itt az analóg adatrögzítő eszközökkel (csapadékirókkal) mért adatsorokat értjük, továbbá azokat a diszkrét adatokat, amelyek egy percnél lényegesen hosszabb mintavételnek megfelelően kerültek rögzítésre. Az ilyen jellegű adatokat jellemzően az 1990-es évekig szerezték be. Ma a csapadékinzítás meghatározásához csaknem mindig egyperces mintázást alkalmaznak, szinte kizárólag digitális formátumban, leegyszerűsítve az adatfeldolgozást. A történeti egy napon belüli adatokat általában nem korrigálták, így a mérési hibák a csapadékinzítás statisztikájában (IDF görbék) is megjelennek. A közlemény bemutatja a csapadékmérés és a csapadékinzítás mérés történetét, valamint a hibák megállapítására és kijavítására tett erőfeszítéseket. Bemutatunk néhány régebbi csapadékatatok rögzítő berendezéshez kifejlesztett adatkorrekciós eljárást, valamint a hosszabb mintavételi idővel kapott adatok kiegészítő korrekcióját. Rámutatunk az adatok hosszú mintavételi periódusból adódó problémájára is, becslve annak hatását. Elmondható, hogy mindezek a hibák alacsonyabb csapadékinzítást eredményeznek, mint ami a tényleges csapadékinzítés volt a mérési időszakokban. A pontatlan referenciaadatok akadályozzák a jelenségek megértését, valamint a klímaváltozással kapcsolatos feltételezések megfelelő igazolását. A bemutatott új eljárások a témában végzett doktori kutatás eredményeként születtek és megfelelő eszközt adnak még akkor is, ha annak egyes elemei tekintetében csak statisztikai becslés alkalmazása lehetséges az adatkorrekció végrehajtásához.

Kulcsszavak

Csapadékinzítés, történeti adatok, adatjavítás, adatfeldolgozás.

New ways of correcting certain kinds of systematic errors in historical rainfall intensity data

Abstract

Liquid precipitation measurement and data processing, like any other measurement, is subject of various errors. Efforts have been made to correct errors since the 1600s, but for sub-daily data, adjusting procedures have only recently been created. Our knowledge of precipitation statistics is primarily based on historical data. The concept of historical data covers datasets measured by analogous data recording devices, and those discrete data which were recorded in significantly longer than a one-minute sampling interval. These kinds of data were obtained approximately until the 1990s. Today, a one-minute sampling period is almost exclusively used, and the digital data format makes data processing significantly simpler. Generally, the historical sub-daily data were not corrected, so the measurement errors were inherited into the statistics of rainfall intensity (IDF curves). The article presents the history of rainfall measurement and rainfall intensity measurement, as well as efforts to determine and correct the measurement's errors. We also present some data adjusting procedures of systematic errors, developed for certain types of rainfall recorders, furthermore a complementary correction of data obtained with a longer sampling period. We also point out the problems arising from the sampling characteristics of the data, estimating its effect. All of these errors result in lower rainfall intensities than the actual rainfall had in the reality in the measurement periods. Inaccurate reference data hinder the accurate understanding of phenomena, as well as the proper verification of surmises related to some details of climate change process. The new procedures are the result of a doctoral research on the issue and provide a suitable tool, even if the application of statistical estimation becomes necessary for the implementation of data correction with respect to some of its elements.

Keywords

Rainfall intensity, historical data, data correction, data processing.

BEVEZETÉS

Sajátos kettősség az, hogy a víz, amely az egyén és társadalom léteéhez alapvetően szükséges elem, számos veszély és kár forrása is lehet. A károk jelentős része az intenzív csapadékokból ered. Az ebből kialakuló felszíni lefolyáshoz kapcsolhatók az elöntések, valamint az intenzív eróziós jelenségek, a felületi- és árkos erózió, valamint a csepperózió. A felületi- és árkos erózió során a víz előbb azzal okoz kárt, hogy magával sodorja a termőtalajt, majd azzal, hogy a földrajzi viszonyok szempontjából erre alkalmas helyen lerakja és áthalmazza (Butzer 1986, Kiss 2014), egyaránt károsítva termést és talajt (Stefanovits és társai 1999). A téma kapcsán rendre felmerül az ember okozta klímaváltozás miatt észlelhető változások kérdése. Ezzel

kapcsolatban az utóbbi időben elterjedt véleménnyé vált az, hogy a vízelvezető rendszerek méretezéséhez használt csapadékmaximum függvények elavultak, mivel a klímaváltozás egyik hatásaként a csapadékoság megváltozott és a csapadékok intenzívebbé váltak (Lakatos és társai 2021, 2022). Jellemzően visszatérő jövőkép, hogy az előttünk álló évtizedekben a hazai nagycsapadékok legnagyobb intenzitásai is nőnek, hasonlóan a világ nagy részéhez (IPCC 2014, MFGI 2016, Láng 2019, Myhre és társai 2019, EPA 2021). A legnagyobb napi csapadékösszeg éves maximumainak növekedésével számos tanulmány foglalkozik (Gleason és társai 2008) és több, a klímamodellekből levezetett klímaváltozási jövőkép is a rövid idejű nagycsapadékok nagyobb előfordulásával és növekvő intenzitással

maximumaival számol, még ha területi értelemben eltérő mértékben is (*Myhre és társai 2019*). Ezen eredmények értékelése feltételezi a megfelelő pontosságú, a múltban mért referenciaadatok elérhetőségét, mivel ezek nyújthatnak megfelelő összehasonlítási alapot a változás mértékének becsléséhez.

A referenciaadatok körében különös figyelmet érdemelnek a történeti adatok, elsősorban a jelenkori berendezésektől eltérő adatrögzítés, adattárolás, utófeldolgozás miatt. A történeti adatok csapadékirók szalagjai alapján, vagy később billenőkanalas berendezések hosszú mintázási periódusú adatai révén kerültek rögzítésre. Manapság az egyperces mérési, mintázási periódus szinte magától értetődő, amint ahogy a feldolgozást lényegesen leegyszerűsítő digitális formátum is.

A történeti adatok észlelése, rögzítése és feldolgozása, mint minden mérés esetében, bizonyos hibákkal terhelt. A hibák a csapadékintenzitás adatok megbízhatóságára is kihatnak, ami a történeti adatok referencia értéként való felhasználhatóságát árnyalja. Mindez felhívja a figyelmet arra, hogy szükséges lenne a történeti csapadékatatok utólagos ellenőrzése, javítása, akár ismételt feldolgozása. A csapadékintenzitások esetében ez alapvetően az intenzitás-tartósság-gyakoriság (Intensity-Duration-Frequency, a továbbiakban IDF) összefüggésekre vonatkozik, amelyeket a hazai gyakorlatban csapadékmaximum függvényként, illetve – vélhetően alaptalanul (*Rácz 2020a*) – Montanari-függvényként ismerünk.

A továbbiakban a közlemény a történeti csapadékatatok mérési hibáinak utólagos kiküszöbölhetőségével, valamint a hosszú mintázási periódusból adódó mérési és feldolgozási hibák hatásának becslésével foglalkozik. A vizsgált berendezések a szintmérési elven működő csapadékirók és a több perces mintázási periódussal (10 perccel regisztrált mérések) működő billenőkanalas műszerek voltak. A közlemény a 2022-ben nyílt vitára bocsájtott, és megvédett doktori disszertáció alapján készült (*Rácz 2021c*).

A CSAPADÉK ÉS A CSAPADÉKINTENZITÁS MÉRÉSE

Történeti áttekintés

A csapadék mérésének legegyszerűbb módja a lehullott csapadék súlyának (ill. tömegének) vagy a térfogatának mérése. Ezek az eljárások a legutóbbi időkig egyeduralmuk voltak. Ezen eljárások során a csapadékot össze kell gyűjteni, így az ilyen eljárásokat és eszközöket gyűjtéssel járó, a csapadékkal közvetlenül érintkező módszerként lehet megkülönböztetni az újabb mérési technológiáktól. A méréshez a legegyszerűbb esetben egy térfogattal arányosan skálázott mérőedény vagy egy mérleg szükséges. A csapadék intenzitásának meghatározásához a csapadékhullás idejének mérése és rögzítése is szükséges. A csapadék mennyiségét mindig valamilyen időegységhez kötve értelmezzük és kimondatlanul is időegységhez kötve mérjük, így napi, havi, éves és egyéb periódusokra vonatkozó csapadékokról, illetve azok származtatott mennyiségeiről, például átlagairól beszélünk. A csapadék intenzitása a Meteorológiai Világszervezet, azaz a World Meteorological Organization (WMO) definíciója szerint (*WMO 1992*) azon – egy perctől néhány tíz percig terjedő

– időegység alatt gyűjtött csapadékmennyiség, amelynek az a célja, hogy gyorsan alakuló hidrológiai jelenségekhez szolgáltatson alapadatot a jelenséghez illeszkedő idő nagyságrendjében, így például felhőszakadások hatására hirtelen néhány tíz perc leforgása alatt kialakuló árvizek megfelelő leírásához (*Vuerich és társai 2009*).

Csapadékmérésről a legkorábbi feljegyzések az ősi Kínából származnak mintegy 3100 évvel ezelőtről (*Liu 2001*). 2000-2400 éves emlékek maradtak Indiából és Palesztinából (*Kurytka 1953, NIH 1990, Strangeway 2010*). Európában a csapadékmérés kezdetei a jelenleg ismert dokumentumok szerint viszonylag későiek, az 1600-as évekre datálható és Benedetto Castelli nevéhez fűződik (*Kurytka 1953, Strangeway 2010*). Az óramechanizmusok pontosságának növekedésével mód nyílt az egy napon belüli csapadékösszegek mérésére is és a csapadékintenzitás észlelése (számítása) is lehetségessé vált. Az első ilyen mérőeszköz egyikét Christopher Wren szerkesztette 1662-ben, amely egy billenőkanalas berendezés volt (billenőkanalas berendezés: a továbbiakban az angol elnevezés rövidítésével TBG) (*Kurytka 1953*). A TBG mérési elve az, hogy a csapadékvíz egy olyan edénybe jut, amely megtelepedését követően instabil statikai állapotba kerül, kiborul, a víz kiömlik és ezután az edény üresen visszabillen a kezdeti helyzetébe. A mérés során a leürítések számát kell regisztrálni és az ismert térfogatú edény révén a csapadékmérés megtörténhet. A mai berendezések esetében két, szimmetrikusan elhelyezett kanalat alkalmaznak. Wren berendezése egy súllyal hajtott óraművel működtetett dobbal rendelkezett, amelyen egy papírszalagon szeg ütött lyukat az edény átfordulásakor. Az intenzitás meghatározható volt a lyukak távolságának mérése alapján (*Strangeway 2010*). A TBG berendezéseket különösen az 1900-as évek közepétől, mind a mai napig széleskörűen használják. A nagyteljesítményű, automatizálható digitális adatrögzítés megoldásával a TBG műszerek igen népszerűvé váltak használatuk egyszerűsége, az adatok kezelhetősége miatt (*Vasvári 2005*). A folyamat jól megfigyelhető a városi csapadékmérők számában, amelyek egyre kiterjedtebb csapadékeszlelő hálózatokká növekednek, sok esetben kis sorozatban legyártott készülékek alkalmazásával (*Knolmár 2012, Rácz és társai 2012*). Egy másik, széles körben használt berendezéstípusnál a gyűjtött víz mennyiség szintjének rajzolásával rögzítették a csapadékmennyiséget, közvetve a csapadékintenzitást. E műszertípus számos eltérő részletmegoldással készült (*Kurytka 1953*), itt a továbbiakban csak a szifonos leürítéssel működő berendezéssel foglalkozunk (szifonos leürítésű csapadékiró a továbbiakban SRW). Ilyen berendezések a mai napig működnek világszerte, ám a magyar gyakorlatban az 1800-as évek végétől használt Hellmann-Fuess csapadékirók alkalmazása az 1990-es évektől visszaszorult. A használatos csapadékirók közül megemlíthetjük még a súlymérési berendezést, amely a mai napig elterjedt és továbbfejlesztett megoldás. Amennyiben a szél torzító hatását sikerül kiküszöbölni, a többi eszköznél megbízhatóbb mérést tesznek lehetővé.

A földfelszíni, a víz gyűjtésével és mérésével működő berendezések jellegzetes mérési hibáira a modern mérések megkezdődését követően hamar rámutattak, és idővel a javításukra eljárásokat igyekeztek kidolgozni (*Kurytka*

1953, Sevrük 1982, Vuerich és társai 2009). Ilyen hibák a mérő benedvesítése miatt nem mért csapadék, az összegyűjtött csapadék párolgása (a napi vagy ritkább leolvadású készülékeknél), valamint a szél mérésre gyakorolt hatása. Ezt már az 1600-as évek utolsó negyede óta vizsgálják: 1686-ban Franciaországban Mariott dokumentáltan ilyen irányú mérést folytatott (Sevrük 1982). 1769-ben Heberdeen írta le a csapadékösszegek eltérését az egyazon helyen, de eltérő magasságban folytatott észlelései alapján (kertben, háztetőn, illetve toronyban) (Strangeway 2010). Az észlelt csapadék-különbségekre vonatkozó elmélete nem volt helytálló, csak 1861-ben, Jevons mutatta ki a szél szerepét egy egyszerű áramlási kísérletet is elvégezve (Jevons 1861, Sevrük 1982, Strangeway 2010). A szél hatásának csökkentésére hamarosan megoldások születtek, mint Nipher szélterelője 1878-ban (Kurytka 1953). Hasonló megoldásokat utóbb világszerte fejlesztettek. A szél okozta veszteség és a cseppméret eloszlás összefüggését Abbe és Bornstein mutatta ki 1880 és 1890 között (Kurytka 1953), igazolva ezzel azt is, hogy a különböző jellegű csapadékokban azonos szélsébség mellett is eltérhet a mérésben okozott hiba. Szél hatásától mentes referenciamérést végzett Koschmieder 1931-ben, amikor a mérőt egy gödörben helyezte el, amelyet a terepszinttel színelő ráccsal fedett és e rács szintjében volt a csapadékmérő tölcserének a pereme. Kísérlete során napi leolvasású Hellmann csapadékmérő mérési hibáit vizsgálva mutatta ki a mérési hiba (átlagos) mértékét (Koschmieder 1934). 1937-ben Mercanton szélcsatornás mérést végzett a munkatársaival, sok egyéb mellett a szél csapadékmérésre gyakorolt hatásának vizsgálatára, keresve továbbá az aerodinamikai szempontból legkisebb szél okozta zavarast biztosító „semleges alakú” csapadékmérőt, amelynek alkalmazásával a szél okozta hiba minimalizálható (Mercanton 1937). Allerup és Madsen az 1980-as években a hagyományos Hellmann csapadékmérőkkel, majd később egyéb típusokkal is a szél hatására vonatkozó kísérleteket folytatott (Allerup és Madsen 1980, 1986).

A perces nagyságrendű, rövid mintázási periódusú mérések hibáinak javítására az egynapos, vagy hosszabb időszakra vonatkozó, statisztikai alapon fejlesztett javító eljárások már nem alkalmazhatók. Az ilyen vizsgálatokhoz a pillanatnyi sebesség és pillanatnyi cseppeloszlás ismerete is szükséges lenne. A csapadékontenzitás és cseppméret eloszlás összefüggését az 1940-es éveket követő évtizedekben sokan kutatták (Laws és Parsons 1943, Marshall és Palmer 1948, Ulbrich 1983, Ulbrich és Atlas 1984, Williams és társai 2014), és egyre jobb összefüggéseket fejlesztettek a kapcsolat leírására. A szél miatti veszteség csapadéokra visszavezethető paraméterei megfelelő fizikai alátámasztást kaptak. Az 1950-es és az 1960-as években a csapadékmérők veszteségeinek kutatására számos szélcsatornás kísérletet folytattak (Warnick 1953, Serra 1958, Robinson és Rodda 1969, Green és Helliwell 1972).

A szél hatásának kutatását a számítástechnika áramlástan alkalmazásai, a mind fejlettebb szoftverek gyorsították fel az 1980-as évektől (számítástechnikai alkalmazások a továbbiakban: Computational Fluid Dynamics = CFD). A nyolcvanas években Folland készített két leegyszerűsített matematikai modellt (Folland 1988). Nešpor és

Sevrük az aerodinamikai hatás révén kialakuló alulmérést 3D numerikus modellezéssel vizsgálta (Nešpor és Sevrük 1999). Munkájuk nyomán Habib, Krajewsky, Nešpor és Kruger (Habib és társai 1999) korrekciós eljárást fejlesztett néhány mérőtípusra, amelyek veszteségeit eltérő időbeni felbontásokra vizsgálták. További fejlődést jelentett a CFD modellezésben a Reynolds-átlagolt Navier-Stokes (RANS) összefüggés, valamint a nagy örvényes szimulációs modell (Large Eddy Simulation, LES) alkalmazása (Constantinescu és társai 2007). A szélhatást csökkentő berendezések és a semleges alakú mérő kutatása irányában további háromdimenziós CFD vizsgálatok készültek (Colli és társai 2016a, Colli és társai 2016b, Colli és társai 2018). Cauteruccio és Lanza az esőcseppek mozgását a Lagrange-féle részecskemozgatási modell alkalmazásával és újra paraméterezésével vizsgálta egy hengeres alakú csapadékmérő, valamint az EML Kalyx semleges alakú mérő esetén (Cauteruccio és Lanza 2020, Cauteruccio és társai 2020, Cauteruccio és társai 2021).

A szélcsatornás és CFD modellezés szükségszerűen a vizsgált geometriájú mérőre, vagy szélhatást csökkentő berendezésre vonatkozik, mivel minden eltérő méretű mérő, illetve szélterelő eszköz egyedi sebességmező deformációt okoz. Ez az egyediség azt is jelenti, hogy a nem vizsgált berendezésekhez nincs korrekciós eljárás, így a korábbi évtizedekben használt csapadékirókról sem állnak rendelkezésre ilyen adatok. Mindez gyengíti a történeti csapadék, és elsősorban csapadékontenzitás adatok megfelelő referenciaként való alkalmazhatóságát. E kérdés fontosságára kvalitatív jellegű vizsgálat készült, amely a szél okozta mérési hibák hasonló nagyságrendjére utal a csapadékirók esetében is (Rácz 2021c).

Túl azon, hogy a szél okozta hibák kiküszöbölése terén a leírt elmaradások állnak fenn, a régi csapadékmérők szisztematikus mérési hibáinak javítása sem valósult meg, így például az SRW mérők esetében sem. Az SRW mérők a gyűjtött víz szintjének rögzítése elvén működő berendezések behatárolt adatrögzítést biztosító csoportjába tartoznak (Kurytka 1953). Az e csoportba tartozó műszerek hosszú, viszonylag keskeny papírszalagra rögzítik a tartály vízszintjét. Ahhoz, hogy a mérés folyamatos legyen, a papír felső szélére érő tollat vissza kellett juttatni a kiindulási helyzetbe. Ez mechanikai megoldással is megtörténhetett (folyamatos üzemű mérő), és oly módon is, hogy a mérőtartály leürítéséről gondoskodtak (közbenő leürítésű mérők), ha a vízszintje elérte a szalag felső szélét (Kurytka 1953). Az SRW berendezések esetében a leürítést szifon biztosítja. Mérési hibát okoz ugyanakkor, hogy a leürítés idején nincs mérés. A hiba annál nagyobb, mennél intenzívebb a mért csapadék. A hibát már korán észrevették. A hazai gyakorlatban Kallós foglalkozott a hiba javításával a regisztrátumok adatai alapján (Kallós 1955). Eljárásának alkalmazásáról forrás nem található. A problémát Luyckx és Berlamont vizsgálta elméleti, hidraulikai levezetéssel és laboratóriumi mérésekkel (Luyckx és Berlamont 2002). Mindkét eljárás csak teljes regisztrációs szalag elérhetősége esetén alkalmazható. Gyakran megtörténik ugyanakkor, hogy a szalag nem érhető el. Az ilyen, már feldolgozott adatok javítására a doktori kutatás során készült eljárás, amelynek áttekintő ismertetésére a következőkben kerül sor (Rácz 2021b, 2021d).

A történeti adatok előállításában jelentős szerepet játszott a már említett TBG berendezéscsalád. Az ilyen eszközök pontossági kérdéseit a XX. század utolsó harmadában többen is vizsgálták (Marsalek 1981, Adami és Da Deppo 1985, Niemczynowich 1986, Frankhauser 1997). A TBG műszerek specifikus hibája arra vezethető vissza, hogy a billenőkanál átfordulásakor a mérés átmenetileg szünetel, továbbá intenzív eső mérése során a kanálba érkező víz egy része kifröccsenhet. A korrekció hatványfüggvény alakban felírható, jól kezelhető, és a magas intenzitások tartományában kifejezetten jól illeszkedik. Csak az alacsony intenzitások esetén tapasztalható kisebb túlkorrekció (Marsalek 1981, Lanza és társai 2006). Az utóbbi évtizedekben az egyperces mintázási periódussal mérő berendezések vizsgálatára került sor (Luyckx és Berlamont 2001, Vuerich és társai 2009). A vizsgálatokat laboratóriumi és terepi körülmények között végezték, és a legtöbb elterjedten használt modell kalibrációs paramétereit leírták (Vuerich és társai 2009). A vizsgálatok során azon korszerű berendezéseket is ellenőrizték, amelyeket a gyártók közlése szerint automatikus korrekciót biztosító elektronikával látnak el (ezek a csapadékontenzitás függvényében a szisztematikus számítási hibát automatikusan kijavítják), és vizsgálták azokat a szoftveres javítóalgoritmusokat, amelyeket a gyártók adtak ki a felhasználóknak bizonyos műszerekhez, hogy az adatfeldolgozás kiegészítő lépéseként az adatkorrekció biztosítható legyen. Minthogy a korrekciót az egyperces adatokra végzik, ezek az említett megoldások (képletek, automatika és javítószoftver), a régebbi, hosszabb mintázási periódussal rendelkezésre álló nyers adat csak további kiegészítő korrekcióval végezhető el (Rácz 2022a). Ugyanez vonatkozik az egyperces mérésből előállított, de nem javított sokperces csapadékösszegekre is.

A történeti, (egy percnél) hosszabb mintázású csapadékadatok esetében további hibaforrást jelent az, hogy az adott mintavételi periódusra vonatkozatható csúcshintenzitás nem feltétlen állítható elő az adatsorból. Ez arra vezet, hogy a csapadékontenzitás összefüggések (IDF görbék) előállítása során a valóságosnál jellemzően alacsonyabb értékek kerülnek a statisztikába, így az IDF görbék értéke a ténylegesen bekövetkezett értékekből levezethető adatokhoz képest kisebb lesz.

Szifonos csapadékirók feldolgozott adatainak javítása

A szintmérési elven működő, szifonos leürítésű műszerek alkalmazása során keletkező hibák tekintetében a leglényegesebb elem a leürítés közben méretlenül maradó csapadék miatt tapasztalható alulmérés. Ezek korrekciójára léteznek eljárások arra az esetre, ha a regisztrációs szalagok rendelkezésre állnak. A történeti adatok egy jelentős körében a regisztrációs szalagok nem érhetők el. Ilyenkor a regisztrációs szalag alapján a csapadékmagasságból például mérési adatsor készült, amely már nem tartalmazza a leürítés időpontját, amely szükséges lenne a korrekcióhoz. Hasonló problémát jelent az az eset, amikor egy-egy csapadékból csak egyes időintervallumok legnagyobb csapa-

dékmagasságát jegyezték fel, és így a mérés közbeni leürítés időpontja ismeretlen. A hibát ezekben az esetekben tehát nem javították.

A szifonos csapadékirók (1. ábra) feldolgozott adatainak korrekciójához a doktori kutatás során készült eljárás (Rácz 2021b). A csapadékirók szalagjainak felhasználása a számítógépesítés előtti időszakban eléggé körülményes volt. A feldolgozást a legegyszerűbb módon, a legfontosabb adatok kinyerésére kellett korlátozni. Ennek módja az volt, hogy az SRW csapadékiró szalagján megkeresték a legintenzívebb 5, 10, 20, 30, 60 perces intenzitású intervallumot, amelyhez leolvasták a kezdeti és záró csapadékmagasságot, majd kiszámolták az adott időszakban hullott csapadékmagasságot. Ezt az adatot rögzítették adatlapokon, így a nyers adatot tartalmazó szalag és a kinyert adat útja elvált egymástól. Amennyiben a szifon működése közben nem rögzített csapadék miatti hibát a regisztrációs szalag alapján nem korrigálták, az adatlapokra hibával terhelt csapadékmagasság került. Mára az eredeti szalagok nem minden esetben érhetőek el. A hiba javítására készült az alábbi képlet – amelynek levezetése a disszertációban (Rácz 2021c), illetve egy még megjelenés alatt álló közleményben (Rácz 2021d) már ismertetésre került – a következő:

$$i_{corr} = \frac{\left(t + \text{int} \left(\frac{h_0 + t \cdot i_t}{h_s} \right) \left(\frac{t_{s,0}}{1 - \frac{A_f \cdot t}{q_s}} \right) \right)}{t} \cdot i_t \quad (1)$$

Az i_{corr} a javított csapadékontenzitás, i_t a nyers, mért csapadékontenzitás a t időhöz rendelve, amely az adatsorrá transzformált regisztrátum esetén mintavételi periódus, illetve a regisztrátumból kivonatolt intenzitások esetén a kivett adathoz tartozó idő. A h_0 a mérőben feltételezett kezdeti vízszint, amelynek legmegbízhatóbb becslése kezdeti vízszint egyenletes eloszlása miatt $\frac{h_s}{2}$, ahol a h_s a regisztrációs szalag szélessége, csapadékmagasságban kifejezve. A $t_{s,0}$ az az idő, amely a berendezés leürítéséhez szükséges amennyiben vízutánpótlódás nincs, az A_f érték a mérő gyűjtőfelülete, végül q_s a leürítés átlagos vízhozama. A képlet levezetése részletes közleményekben került ismertetésre (Rácz 2021b, 2021c, 2021d).

Vizsgálat készült tényleges adatok felhasználásával a Budapest Belterület meteorológiai állomás Hellmann-Fuess csapadékirókkal rögzített adatainak felhasználásával, amely részletesen szakmai közleményben és a disszertációban került megjelentetésre (Rácz 2021a, 2021c). A kutatás során kapott eredmények azt mutatják, hogy a maximális csapadékontenzitásokban a 10 éves átlagos előfordulási gyakoriság esetén a korrekció értéke az 5%-ot meghaladja, a 100 éves adatok esetében a gyakorlatban kevéssé használt 5 perces adat esetében 21%, a 10 percnél hosszabb időablakokra 10-13% volt. Az eredmények szerint tehát a rövidebb t időkre, és épp a műszaki szempontból lényegesen ritka (extrém) csapadékesemények adataiban található számottevő hiba, melyek korrekciója fontos lenne.



1. ábra. Hellmann-Fuess csapadékmérő

(Forrás: <https://www.th-friedrichs.de/assets/ProductPage/ProductDownload/E56.pdf>)

Figure 1. Rain Gauge by Hellmann

(Source: <https://www.th-friedrichs.de/assets/ProductPage/ProductDownload/E56.pdf>)

Billenőkanalas mérővel mért többperces csapadékösszegek (intenzitások) utólagos javítása

A korábbiakban említettük, hogy a TBG csapadékmérők (2. ábra) szisztematikus hibájának javítására az alábbi alakú hatványfüggvény alkalmazását javasolják (Vuerich és társai 2009):

$$i_c = a \cdot i_r^b \quad (2)$$

ahol i_c - a csapadékintenzitás javított (corrected) értéke, avagy kalibrálás esetén a referenciaként elfogadott intenzitás (a korrigálás itt azt jelenti, hogy a nyers, mért adatokat a laboratóriumi kalibrálás során előállított egyenlettel javítom, számolom), i_r - a mérőn mért adatokból javítás nélkül számolt „nyers” csapadékintenzitás, a, b - a műszer kalibrációs paraméterei.

Amennyiben a mérési adatok mintázási periódusának hossza eltér a korrekció meghatározása során használt egyperces mintázási periódustól, jellemzően hosszabb annál, az alap periódus korrigált intenzitásai alapján számolt csapadékösszeg nem egyezik meg az átlagos csapadékintenzitás korrigált átlagértékével számolt csapadékösszeggel. Korrekció nélkül a kétféle számolási eljárás eredményei természetesen megegyeznek. Ahhoz, hogy a korrigált esetben a két módon számolt térfogat – a valóságnak megfelelően – megegyezzen, kiegészítő korrekció alkalmazása szükséges (levezetést ld. Rác 2021c, 2022a).



2. ábra. Egy hagyományos kialakítású billenőkanalas csapadékmérő berendezés a szerkezet burkolatának és tölcserének eltávolításával

(<https://www.hyquestolutionsamerica.com/products/hardware/meteorology/tb3-tipping-bucket-rain-gauge>)

Figure 2. Tipping bucket rain gauge – removed enclosure and collector (<https://www.hyquestolutionsamerica.com/products/hardware/meteorology/tb3-tipping-bucket-rain-gauge>)

A valóságban a hosszabb periódus átlagos intenzitása ismert, így a korrekciót ennek javítására kell felírni. A javított csapadékinzintitás ennek alapján a következőképp írható (Rácz 2022a):

$$i_{c(B)} = \frac{\sum_{j=1}^n (c_j^b)}{n} \cdot a \cdot i_{m,t}^b = CF_t \cdot a \cdot i_{m,t}^b \quad (3)$$

A képlet tartalmazza az a és b , műszerre vonatkozó kalibrációs, avagy javító paramétereket, így megállapítható, hogy a javító formula a mérő paramétereitől és az n értéktől, valamint a $\sum_{j=1}^n (c_j^b)$ összegtől függ. Egy adott mérő esetén a hosszú mintázási időközű mérésnél ugyan a javító paraméterek, valamint az n szám ismert, de a c_j súlyszámok nem. A súlyszámokra vonatkozó megszorítások, illetve tulajdonságok részletezve a korrekciós tényezőt leíró közleményben találhatóak (Rácz 2022a). A CF_t érték további vizsgálata szükséges ahhoz, hogy a gyakorlatban alkalmazható legyen az eljárás. A korrekciós összefüggésből látható, hogy a javító tényező értékét a b hatványkitevő határozza meg. A szakirodalomban (Vuerich és társai 2009, Lanza és társai 2010) rendelkezésre álló, széles körben használt műszer típusokra vonatkozó képletek b paramétere 1,15-nél kisebb, így a CF_t korrekció lehetséges maximuma egyszerűen meghatározható. A vizsgált műszerek körében a legtöbb korrekciót igénylő berendezés esetén a korrekció mértéke az ötperces mintázás esetén 1-2%, a 10-30 perces esetén 1-3%, míg a 60 percesnél 2-7%. Mindezek alapján kijelenthető, hogy a korrekció kifejezetten a hosszabb mérési periódusok esetén lehet lényeges, és kifejezetten a nagy korrekciót igénylő műszerek esetében. A módszer alkalmazását a Budapest Belterület csapadékmérő állomás Lambrecht 15188 gyártmányú berendezéssel mért adatainak korrekciójáról szóló közlemény mutatja be (Rácz 2021a).

A vázolt korrekciós eljárás felhasználható lehet a meteorológiai mérések körén túl is, ahol hatványfüggvény alapú korrekciót alkalmaznának a korrekciós formula előállításától eltérő mintavételezési periódussal mért adatokra.

A mintavételezés sűrűségének hatása az IDF görbék reprezentativitására

A csapadékinzintitás mérése nagyobb léptékben részben analóg (folyamatos, pl. SRW mérők), részben periodikus mintavételezéssel (TBG berendezések) terjedt el. Az analóg mérés eredményeit az adatfeldolgozás során óhatatlanul kvantálni, diszkrétizálni szükséges, így az adatok periodikus vagy aperiodikus diszkrét állományként állnak rendelkezésre. Periodikus mintavételezés esetén egy folytonos függvényként értelmezhető jelenséget (pl. az időhöz egyértelműen hozzárendelt csapadékadatot) diszkrét függvényre transzformálunk (Kovács 2014). Alapvető kérdés az, hogy a mért adatokból visszaállítható-e a jelenséget leíró folytonos függvény, és ha igen, milyen feltételekkel. Erre a kérdésre válaszol a Shannon-Nyquist-féle mintavételezési tétel (Kovács 2014, Huba és Lipovszky 2014), amely néhány kikötés teljesülése esetén elégséges feltételt ad azon legnagyobb mintázási periódusra, amely esetén a folytonos függvény még visszaállítható a mérési adatokból.

A tétel szerint valamely körfrekvenciakorlátos függvény akkor állítható vissza hiba nélkül a mintáiból, ha a mintavételezés frekvenciája (periódusidejének reciproka) a frekvenciakorlát kétszeresét meghaladja. A csapadék vonatkozásában nehéz értelmezni a frekvenciakorlát mibenlétét, de a kérdést a mintavétel frekvenciája felől megközelítve érzékelhető, hogy egy bizonyos t mintavételezési idő mellett a $2t$ időt meghaladó periódusú jelenségek állíthatók helyre az adott mérés adataiból.

A különféle mintavételezési idők pontosságra gyakorolt hatása szemléltethető az egyperces mintavételezési sűrűséggel felvett (mért) adatsor felhasználásával. A szemléltetéshez egy sűrű mintázású adatsorból létrehozható több ritkább mintázású adatsor, és ezek vizsgálatával becsülhető az információ csökkenésének, szóródásának mértéke. Belátható, hogy a csapadék az adott mérési periódus kezdeti időpillanatához képest bármely más időpillanatban is kezdődhetett volna. Minden egyes eset új idősort szolgáltat, amelyek maximumai összehasonlíthatók. Ennek révén megállapítható az, hogy adott mintázási periódus mellett a mintavételezés során a maximumok mekkora tartományban szóródnak, illetve milyen valószínűséggel képesek a tényleges (esetünkben az egyperces mérésekből ismert) maximumot szolgáltatni.

A kérdés vizsgálatáról a doktori kutatás kapcsán jelent már meg közlemény (Rácz 2020b), amelynek megállapításai lényegesek a jelen tanulmány vonatkozásában. A kérdést Szentes László Olivér munkája vetette fel (Szentes 2018), amely egy csapadékiró és egy 10 perces mintavételezővel működő automata csapadékmérő adatait hasonlította össze. A gondolatának továbbfejlesztése alapján lefolytatott vizsgálatok is bemutatták, hogy az állandó időközű mintavételezéssel előállított adatsorok mennyire esetlegesen írják le a legnagyobb csapadékinzintitásokat (Rácz 2021a). A kérdés további vizsgálata során megállapítható volt, hogy a mérés kezdetének és a legnagyobb intenzitás csapadékon belüli helyzetének véletlen jellege miatt a kimérhető legnagyobb intenzitások egy számottevő szélességű sávban szóródnak, és a legnagyobb mérhető értéket csak kis valószínűséggel adja eredményül. A szóródás sávja egy adott igen heves zivatar adataiban a 10 perces mérési intervallumban a 10-30 perces adatokra 3-7% lehet. E hibák javítására egyelőre nincs a gyakorlatban eljárás.

ÖSSZEFOGLALÁS, JAVASLATOK

A közleményben látható, hogy a folyékony csapadék és csapadékinzintitás mérésevel kapcsolatban milyen, a méréssel összefüggő és az adatfeldolgozásból fakadó hibák fordulnak elő. A hibák kijavítására régóta törekednek ugyan, de számos kérdés vonatkozásában csak az utóbbi időben születtek korrekciós eljárások. Ezek alkalmazása a történeti adatokra vonatkozóan egyelőre nem történt meg, köztük az azokon alapuló statisztikák – így a csapadékinzintitás görbék is – jelentős hibával lehetnek terheltek. A dolgozatban összefoglalásra került néhány olyan eljárás, amely a szifonos ürítésű csapadékirók, valamint a hosszú mérési periódusú billenőkanalas mérők adatainak javításában nyújthat segítséget. Bemutattuk azt is, hogy milyen hibák öröklődnek a mintavételezés sajátosságai miatt a csapadékinzintitás statisztikákban. E hibák mindegyike ki-

sebb csapadékintenzitásokat eredményez, egymásra halmozódva a csapadékintenzitások a múlt időszakokra vonatkozóan alacsonyabbnak tűnnek a valóságban realizálódott értékhez képest. Mindez a jelenségek pontos megismerését, valamint a klímaváltozással kapcsolatos felvételek, vélelmek megfelelő igazolási lehetőségét bizonytalánítja el.

A kérdéssel kapcsolatban folytatott doktori kutatás eredményeképp fejlesztett eljárások megfelelő javítást biztosítanak. A kutatási eredmények alapján a következő javaslatok készültek az eddigi eredmények továbbfejlesztésére:

- A. A csapadékmérők szél okozta mérési hibájának elemzésére a napon belüli csapadékok vizsgálata szükséges, amelyhez a csapadék és szélstatistika együttes elemzése elengedhetetlen – ebben a tárgyban kutatási eredmények publikálása folyamatban van (Rácz 2022b).
- B. A szél miatti mérési hiba kimutatásához szükséges a berendezések áramlástanai vizsgálata, melynek során a régebben használt csapadékmérők mérési hibáját is becsülni lehet, hasonlóan néhány ilyen irányú vizsgálathoz, egyes készülékekre vonatkozóan.
- C. A korábbi csapadékmérési adatok szisztematikus hibáktól való mentesítése szükséges, amely révén a múltbéli adatok revíziója megtörténhet, és ennek révén a klímátörténeti adatok korrekciójára sor kerülhet.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A jelen közlemény és az annak alapjául szolgáló doktori disszertáció elkészítését jelentős mértékben elősegítette az Országos Meteorológiai Szolgálat a feldolgozásra alkalmas csapadékadatok biztosításával. A disszertáció dr. Szalai Sándor meteorológus, programozó matematikus, egyetemi docens vezetésével készült, aki 2022 júniusában elhunyt. Őrizze emlékét ez a közlemény!

IRODALOMJEGYZÉK

Adami, A., Da Deppo, L. (1985). On the systematic errors of tipping bucket recording rain gauges. In: Workshop on the Correction of Precipitation Measurements, Instruments and Observing Methods, Report No. 25 WMO, Zurich. pp. 27-30.

Allerup, P., Madsen, H. (1980). Accuracy of point precipitation measurement. In: Nordic Hydrology. 11. (2). pp. 57-70. doi:10.2166/nh.1980.0005

Allerup, P., Madsen, H. (1986). On the correction of liquid precipitation. In: Nordic Hydrology. 17. pp. 237-250. doi:10.2166/nh.1986.0016

Butzer, K.W. (1986). A földfelszín formakincse. Gondolat, Budapest.

Cauteruccio, A., Lanza, L.G. (2020). Parametrization of the collector efficiency of a cylindrical catching-type rain gauge based on rainfall intensity. Water, 2020. 12. p. 3431. doi:10.3390/w12123431

Cauteruccio, A., Colli, M., Freda, A., Stagnaro, M., Lanza, L.G. (2020). The role of free-stream turbulence in attenuating the wind updraft above the collector of precipitation gauges. Journal of Atmospheric and Oceanic

Technology, 37.1. pp. 103-113. doi:10.1175/JTECH-D-19-0089.1

Cauteruccio, A., Brambilla, E., Stagnaro, M., Lanza, L.G. (2021). Experimental evidence of the wind induced bias of precipitation gauges using particle image velocimetry and particle tracking in the wind tunnel. Journal of Hydrology, 600 (2021) 126690. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126690

Colli, M., Lanza, L., Rasmussen, R., Thériault, J.M. (2016a). The Collection Efficiency of Shielded and Unshielded Precipitation Gauges. Part I. CFD Aerflow modeling. Journal of Hydrometeorology, 17(1). pp. 231-243. doi:10.1175/JHM-D-15-0010.1

Colli, M., Lanza, L. (2016b). The Collection Efficiency of Shielded and Unshielded Precipitation Gauges. Part II: Modeling particle trajectories. Journal of Hydrometeorology. 16(1). pp. 245-255. doi:10.1175/JHM-D-15-0011.1

Colli, M., Pollock, M., Stagnaro, M., Lanza, L.G., Dutton, M., O'Connell E. (2018). A computational fluid-dynamic assessment of the improved performance of aerodynamic rain gauges. AGU Publications Water Resources Research. 54. pp. 779-796. doi:10.1175/JHM-D-15-0011.1

Constantinescu, G.S., Krajewski, W., Ozdemir, C.E., Tokay, T. (2007). Simulation of airflow around rain gauges: Comparison of LES with RANS models. Advances in Water Research, 31. pp. 43-58. doi:10.1016/j.advwatres.2006.02.011

EPA (Environmental Protection Agency) (2021). Climate change indicators: heavy precipitation. <https://www.epa.gov/climate-indicators/climate-change-indicators-heavy-precipitation> (Letöltés dátuma: 2021.09.04.)

Folland, C. (1988). Numerical models of the raingauge exposure problem, field experiments and an improved collector design. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 114. pp. 1485-1516. doi:10.1002/qj.49711448407

Frankhauser, R. (1997). Measurement properties of tipping bucket raingauges and their influence on urban runoff simulation. Water Science and Technology, 36(8-9). pp. 7-12. doi:10.2166/wst.1997.0636

Gleason, K., Lawrimore, J.H., Levinson, D.H., Karoly, R.T., Karoly, D.J. (2008). A Revised U.S. Climate Extremes index. Journal of Climate, 21(5). pp. 2124-2137. doi:10.1175/2007JCLI1883.1

Green, P.J., Helliwell, P.R. (1972). The effect of wind on the rainfall catch. In: Vol. II of Distribution of precipitation in mountainous areas. Geilo Symposium, Norway, 31 July - 5 August 1972, WMO/OMM No.326

Habib, E., Krajewski, W.F., Nešpor, V., Kruger, A. (1999). Numerical simulation studies of rain gage data correction due to wind effect. Journal of Geophysical Research, 104(D16). pp. 19723-19733. doi:10.1029/1999JD900228

- Huba A., Lipovszki Gy. (2014). Méréselmélet. Budapest. BME-MOGI. Forrás: <http://old.mogi.bme.hu/TA-MOP/mereselmélet/index.html>
- INTERGOVERNMENTAL PANEL OF CLIMATE CHANGE (IPCC) (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report Of the IPCC. In M. L. Pachauri R:K: (Szerk.), IPCC. pp. 1-31, Geneva, Switzerland.
- Jevons, W. S. (1861). On the defficiency of rain in an elevated rain-gauge, as caused by wind. The London Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. pp. 421-433. doi:10.1080/14786446108643180
- Kallós I. (1955). Ombrogrammok értékelése. Hidrológiai Közlöny, 35. évf. 7-8. sz. pp. 293-296.
- Kiss T. (2014). Geomorfológiai vizsgálati módszerek. JATEPress, Szeged ISBN 978-963-315-202-X.
- Knolmár, M. (2012). Cost effective rainfall monitoring., Book3, 1 pp. 183-190. Sofia, Bulgaria.
- Koschmieder, H. (1934). Methods and results of definite rain measurements. Monthly Weather Review, 62 (1). pp. 5-7. doi:10.1175/1520-0493(1934)62<5:MA-RODR>2.0.CO;2
- Kovács Gy. (2014). A jelfeldolgozás matematikai alapjai. Debrecen: Debreceni Egyetem Informatikai Kar. (Digitális egyetemi jegyzet). <http://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/handle/123456789/12316>
- Kurytka, J.C. (1953). Precipitation measurements study. Urbana, Illinois, USA: State of Illinois, State Water Survey Division, Dpt. of Education and Registration.
- Lakatos, M., Szentes, O., Cindrić Kalin, K., Nimac, I., Kozjek, K., Cheval, S., Dumitrescu, A., Iraşoc, A., Stepanek, P., Farda, A., Kajaba, P., Mikulová, K., Mihic, D., Petrovic, P., Chimani, B., Pritchard, D. (2021). Analysis of Sub-Daily Precipitation for the PannEx Region. Atmosphere 2021, 12, 838. doi:10.3390/atmos12070838
- Lakatos M., Bihari Z., Izsák B., Marton A., Szentes O. (2022). Megfigyelt éghajlati változások Magyarországon, Légkör, 66 (3). pp. 5-11.
- Laws, J.O., Parsons, D.A. (1943). The relation of raindrop size to intensity. Transactions, American Geophysical Union, 24(2) pp. 452-460. doi:10.1029/TR024i002p00452
- Láng I. (2019). Feladataink a települési csapadékvíz-gazdálkodás területén. In: Vízmű Panoráma, XXVII (3). pp. 2-4.
- Lanza, G.L., Vuerich, E., Gnecco, I. (2010). Analysis of highly accurate rain intensity measurements from a field test site. Advances in Geosciences, 25. pp. 37-44. doi:10.5194/adgeo-25-37-2010
- Lanza, G.L., Leroy, M., Alexandropoulos, C., Stagi, L., Wauben, W. (2006). WMO laboratory intercomparison of rainfall intensity gauges. Final report. World Meteorological Organisation. (Instruments and observing methods report No. 84), World Meteorological Organisation, Geneva.
- Liu, G. (2001). Hydrology in ancient time in China. In: Colloque International OH2 «Origines et Histoire de l'Hydrologie», Dijon, 9-11 Mai 2001. Université de Bourgogne. Dijon
- Luyckx, G., Berlamont, J. (2001). Simplified method to correct rainfall measurements from tipping bucket rain gauges. Specialty Symposium on Urban Drainage Modeling at the World Water and Environmental Resources Congress 2001, May 20-24, 2001 Orlando, Florida, United States. pp. 767-776. doi:10.1061/40583(275)72
- Luyckx, G., Berlamont, J. (2002). Accuracy of siphoning rain gauges. Ninth International Conference on Urban Drainage (9ICUD), September 8-13, 2002, Portland, Oregon, United States. pp. 1-12. doi:10.1061/40644(2002)251
- Marsalek, J. (1981). Calibration of tipping bucket rain gauge. Journal of Hydrology, 53(3-4). pp. 343-354. doi:10.1016/0022-1694(81)90010-X
- Marshall, J. S., Palmer, W. McK. (1948). The distribution of raindrops with size. Journal of Meteorology, 5. pp. 165-166. doi:10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2
- Mercanton, P.L. (1937). La Météorologie. pp. 136-139.
- MFGI (2016). Éghajlatváltozás és alkalmazkodás - A Nemzeti Éghajlatváltozási Térinformatikai Rendszer (NATÉR) kialakítása. (Magyar Földtani és Geofizikai Intézet) Budapest.
- Myhre, G., Alterskjær, K., Stjern, C.W., Hodnebrog, Ø., Marelle, L., Samset, B.H., Sillmann, J., Schaller, N., Fischer, E., Schulz, M., Stohl, A. (2019). Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. Scientific Reports 9, 16063. doi:10.1038/s41598-019-52277-4
- NIH (1990). Hydrology in the ancient India. (Szerk.: S. T. M.,) NIH=National Institute of Hydrology, Roorkee - India, Uttharapradesh.
- Nešpor, V., Sevruk, B. (1999). Estimation of wind induced error of rainfall gauge measurements using numerical simulation. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 16. pp. 450-464. doi:10.1175/1520-0426(1999)016<0450:EOWIEO>2.0.CO;2
- Niemczynowich, J. (1986). The dynamic calibration of tipping bucket raingauges. Nordic Hydrology, 17. pp. 203-214. doi:10.2166/nh.1986.0013
- Rác T., Bana Zs., Székely Á, Szilágyi M. (2012). Csapadékmérő hálózat fejlesztése Budapesten. In K. Z. Szilávik L. (Szerk.), XXX. Országos Vándorgyűlés, Magyar Hidrológiai Társaság. pp. 994-1002.
- Rác T. (2020a). IDF görbe vagy Montanari-féle csapadékmaximum-függvény? A magyar elnevezés története. in: Vízmű Panoráma, XXVIII (3). pp. 24-28.
- Rác T. (2020b). A mintavétel és az adatfeldolgozás szerepe a csapadékmaximum függvények megbízhatóságában és összehasonlíthatóságában. Hidrológiai Közlöny, 100. évf. 4. sz. pp. 52-59.

Rácz T. (2021a). Application of correction procedures for some systematic measurement errors to rainfall intensity data of a rain gauge in Budapest. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(4). pp. 1025-1035. doi:10.3311/PPci.17731

Rácz T. (2021b). On the correction of processed archive rainfall data of siphoned rainfall. *Időjárás*, 125(3). pp. 513-519. doi:10.28974/idojaras.2021.3.9

Rácz T. (2021c). Történeti és jelenkori csapadékadatok vizsgálata. Doktori disszertáció, Gödöllő, MATE Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, https://uni-mate.hu/documents/20123/336900/Racz_Tibor_ertekezes.pdf/5371f63a-1453-b4a7-42eb-91a8b07dd93e?t=1652702740962

Rácz T. (2021d). Hellmann-Fuess csapadékirók szisztematikus hibájának korrekciója a feldolgozott záporadatokban. III. Országos Települési Csapadékvíz-gazdálkodási Konferencia 2021. november 10., Elbírálás alatt.

Rácz T. (2022a). On the correction of multiple minute sampling rainfall data of tipping bucket rainfall recorders. *Időjárás*, 126(2). pp. 285-295. doi:10.28974/idojaras.2022.2.7

Rácz T. (2022b). Wind speed estimation for the correction of wind-caused errors in historical precipitation data. *Időjárás*, (In press).

Robinson, A.C., Rodda, J.C. (1969). Rain, wind and the aerodynamic characteristics of rain gauges. *Meteorological Magazine*, 98. pp. 113-120.

Serra, L. (1958). Possibilités d'amélioration des mesures de précipitations. In: Publ. No. 43 U.G.G.I. Ass. Int. Hydrol. Sc. Gen. Ass. Toronto. pp. 535-545.

Sevruk, B. (1982). Methods of correction for systematic error in precipitation measurement for operational use. (Operational Hydrology Report No. 21) World Meteorological Organisation, Geneva.

Stefanovits P., Filep Gy., Füleki Gy. (1999). Talajtan. Mezőgazda Kiadó, Budapest. p. 470.

Strangeway, I. (2010). History of rain gauges. *Weather*, 65(5). pp. 133-138. doi:10.1002/wea.726

Szentes L.O. (2018). A rövid idejű intenzív csapadékok statisztikai vizsgálata. Diplomamunka. Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék. p. 85. https://nimbuser.elte.hu/tanszek/docs/MSc/2018_2/Szentes_Laszlo_Oliver_2018.pdf

Ulbrich, C.W. (1983). Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22. pp. 1764-1775. doi:10.1175/1520-0450(1983)022<1764:NVI-TAF>2.0.CO;2

Ulbrich, C.W., Atlas, D. (1984). Assessment of the contribution of differential polarization to improved rainfall measurements. *Radio Science*, 19(1). pp. 49-57. doi:10.1029/RS019i001p00049

Vasvári V. (2005). Calibration of tipping bucket rain gauges in the Graz urban research area. *Atmospheric Research*, 77 (1-4). pp. 18-28. doi:10.1016/j.atmosres.2004.12.012

Vuerich, E., Monesi, C., Lanza L.G., Stagi, L., Lanziger E. (2009). WMO field intercomparison of rainfall intensity gauges. World Meteorological Organisation. (Instruments and observing methods report No. 99), World Meteorological Organisation, Geneva.

Warnick, C.C. (1953). Experiments with windshields for precipitation gages. In: *Transactions, American Geophysical Union*, 34(3). pp. 379-388. doi:10.1029/TR034i003p00379

Williams, C.R., Bringi, V.N., Carey, L.D., Chandrasekar, V., Gatlin, P.N., Haddad, Z.S., Meneghini, R., Joseph Munchak, S., Nesbitt, S.W., Petersen, W.A., Tanelli, S., Tokay, A., Wilson, A., Wolff, D.B. (2014). Describing the Shape of Raindrop Size Distributions Using Uncorrelated Raindrop Mass Spectrum Parameters, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(5). pp. 1282-1296. doi:10.1175/JAMC-D-13-076.1

WMO (1992). International Meteorological Vocabulary WMO/OMM/BMO - No. 182, Geneva, Switzerland.

A SZERZŐ



RÁCZ TIBOR 1991-ben okl. építőmérnökként végzett a BME Építőmérnöki Karán, vízépitőmérnöki szakirányon. 2022-ben a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetemen PhD fokozatot szerzett. 1991 és 2005 között tervezőként dolgozott mérnöki irodáknál és saját vállalkozásában. 2005-től 2019 végéig a Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. Ár- és Belvízvédelmi Osztályán dolgozott, 13 éven át annak vezetője volt. 2020-ban a Ramboll Studio Dreiseitl pekingi irodájában senior vízépitő mérnök. 2022-től egyetemi adjunktus a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Környezettudományi Intézetében a Vízgazdálkodási és Klímaadaptációs Tanszéken. A Magyar Hidrológiai Társaság Vízépitési Szakosztályának elnöke, a Társaság titkára.