



**MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI
EGYETEM**

**Rövididejű nagycsapadékok
vizsgálata történeti és mért
adatok alapján**

DOI: 10.54598/002410

**Rácz Tibor
GÖDÖLLŐ
2021**

A doktori iskola megnevezése:

Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Környezettudományi Doktori Iskola

Tudományága:

Környezettudományok

Vezetője:

Csákiné Dr. Micheli Erika
egyetemi tanár, DSc, az MTA levelező tagja

MATE Környezettudományi Kar, Környezettudományi Intézet
2100 Gödöllő, Páter Károly utca 1.

Témavezető:

Szalai Sándor
oktatói/kutatói besorolás: egyetemi docens
tudományos fokozat: PhD
MATE Környezettudományi Kar, Környezettudományi Intézet
2100 Gödöllő, Páter Károly utca 1.

Az iskolavezető jóváhagyása

A témavezető jóváhagyása

W. S.

TARTALOMJEGYZÉK

1. A munka előzményei, célkitűzések	4
1.2. A kutatás célja	6
2. Anyag és módszer	7
3. Az Eredmények	11
3.1. Tézisek	11
3.2. Új tudományos eredmények	12
3.3. További tudományos eredmények	14
4. Következtetések és javaslatok	16
5. A szerző értekezés témaköréhez kapcsolódó (és részben az értekezésben idézett) publikációi	18

1. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK

Sajátos kettősség az, hogy a víz, amely az egyén és társadalom létehez alapvetően szükséges elem, egyszersmind számos veszély és kár forrása lehet. A társadalom által épített, működtetett javak, mérnöki létesítmények, eszközök, erőforrások, vagy éppen a termelést biztosító épített vagy természeti környezet csapadékok elleni védelme, a vízszerezés lehetőségének biztosítása mellett, folyamatos feladatot jelentett az emberiségnek, története minden korában.

A csapadékok a legkülönbözőbb módon tehetnek kárt az ember környezetében, így a javak elöntése révén anyagukban, szerkezetükben okozhatnak pusztítást, ezzel a termelés eredményét, vagy a termelést szolgáló eszközrendszert, infrastruktúrát károsítják vagy semmisíthetik meg.

A javakra és a vízelvezető rendszerekre az egyik legnagyobb veszélyt a rövididejű nagycsapadékok jelentik. E jelenségkör vizsgálata az 1800-as évek utolsó negyedétől számos kutatás témája világszerte. A dolgozat a folyékony csapadékokkal foglalkozik és azon belül is az intenzív nagycsapadékokkal, azok mérésével, és a mérésekkel kapcsolatos egyes hibajelenségek bemutatásával, javításával és a javítás csapadékintenzitás görbékre gyakorolt hatásának vizsgálatával.

A rövididejű nagycsapadékok hatása túlmutat a mérnöki (vízmérnöki) szakterületen, és például a környezetgazdálkodási és mezőgazdasági szempontból is releváns kérdés. A kutatás eredménye elsősorban a vízkár megelőzésben és elhárításban nyújthat segítséget a mérnöknek. Az eredmények relevanciája a mezőgazdaságban a lefolyással kapcsolatos eróziós jelenségeken túl a csepperózió kérdésében jelenik meg. A heves nagycsapadékok során nagyobb átmérőjű csapadékcseppek hullanak, amelyek a talajszemcsék szerkezetét a becsapódásuk erejénél fogva hatékonyan rombolják, majd a gyorsan kialakuló felszíni lefolyás révén a leöblítéses, majd árkos erózió során a talajt elszállítják, és más helyeken áthalmozva lerakják. Mind az erózió, mind a hordaléklerakás a természeti, mezőgazdasági vagy települési környezet károsodását okozza.

A téma kutatása a globális felmelegedés és klímaváltozás miatt is előtérbe került. Az elmúlt években általános véleménnyé vált az, hogy a vízelvezető rendszerek méretezéséhez használt intenzitás-tartósság-gyakoriság (továbbiakban IDF) görbék elavultak, mivel a klímaváltozás egyik hatásaként a csapadékoság megváltozott, és a csapadékok intenzívebbé váltak. Az éghajlati projekciók egyik általánosan visszatérő eleme az, hogy a hazai nagycsapadékok legnagyobb intenzitásai is nőnek az előttünk álló évtizedekben, hasonlóan a világ nagy részéhez. Számos publikáció számol be

a legnagyobb napi csapadékösszeg éves maximumainak növekedéséről, és a klímamodellekből levezetett klímaváltozási projekciók közül több is a rövid idejű nagycsapadékok gyakoribb előfordulását és a nagycsapadékok intenzitás maximumainak növekedését mutatja. A klímaprojekciók elkészítéséhez, valamint a projekciók alapján becsült változások vizsgálatához elengedhetetlenek a referencia adatok. A referenciaadatok szükségszerűen a múltban mért csapadékatatok, részben ezen adatokra alapulnak a jövőre vonatkozó klímamodellek is.

A referenciaadatok körében érdemes különbséget tenni a történeti és a jelenkori adatok között, elsősorban a mérésben, az adatrögzítés módjában és tárolásában, feldolgozásában mutatkozó különbségek miatt. A dolgozatban a történeti adatok megnevezés alatt az analóg mérőeszközökről táblázatos formában legyűjtött, jellemzően kivonatos, a legnagyobb értékekre vonatkozó adatokat, valamint a digitális mérés első időszakában hosszú mérési periódussal rögzített adatokat értem. A jelenkori adatok megnevezés alá a napjainkban használatos, jellemzően egyperces mérési periódussal rögzített, vagy ilyen módon digitalizált csapadékatatok sorolom.

A csapadékmérés megbízhatóságával és pontosságával kapcsolatban a mai napig számos lényeges kérdésben bizonytalanság tapasztalható, és ez a csapadékintenzitás adatok megbízhatóságára is kihat. Megfelelő pontosságú csapadék és csapadékintenzitás adatok nélkül a csapadékviszonyokban megfigyelhető változásról nehezen lehet megalapozott véleményt kialakítani, ez önmagában indokolja a jelenkori mérések pontosságának növelését, és emellett az archív (történeti) csapadékatatok utólagos ellenőrzését, esetleges javítását és újólagos feldolgozását is.

A mérések gerincét az elmúlt másfélszáz évben a súly- vagy térfogatmérés elven alapuló mérési technikák képezik. A dolgozatban a magyarországi gyakorlatban két elterjedt eljárást vizsgáltam, így a szifonos ürítésű úszós csapadékíró (SRW) és a billenőkanalas csapadékmérő (TBG) hibajelenségeit és adatait.

A hibajelenségek három nagy csoportba sorolhatók, egyrészt a mérés külső körülményei (szél hatása elsősorban) miatt a mérőt „elkerülő”, vagy abból az légörvények által kifújtt csapadék miatti hibák, a mérőműszer kialakítása miatt a mérés közben kialakuló hibák, valamint az adatfeldolgozási eljárások során keletkező hibák osztályába.

A dolgozat mindhárom hibaosztállyal foglalkozik, fókuszát elsődlegesen az egyes mérési szisztematikus hibákra és ezek történeti adatokra vonatkozó utólagos javítására helyezve.

A csapadékadatok korrekciója kihat a csapadékok intenzitás-tartósságyakorosság (Intensity-Duration-Frequency, IDF) görbékre is. A dolgozatban egy esettanulmányban bemutatásra kerül a korrekciók hatása a Budapest Belterület csapadékmérő Hellmann-Fuess csapadékiróval és Lambrecht billenőkanalas csapadékmérővel mért történeti adataira.

1.2. A KUTATÁS CÉLJA

A dolgozatban összefoglalt kutatás célkitűzései a következők voltak:

A. A szintmérős szifonos ürítésű csapadékmérők alkalmazásának hibái és azok hatása a csapadékindenzitás mérésére, módszer fejlesztése a szisztematikus mérési hiba kijavítására a feldolgozott, történeti csapadékadatokban. A szintméréses alapon működő szifonos csapadékmérők számos típusa volt használatban világszerte, így Magyarországon is. A Meteorológiai Világszervezet (továbbiakban WMO – World Meteorological Organization) a csapadékmérés, valamint csapadékindenzitás mérés pontossági kérdéseinek vizsgálatára mérési kampányokat szervezett, amelyek a jelenleg használatos műszertípusokra vonatkozó kérdéseket igyekeztek tisztázni. Ebben a körben vizsgálták a TBG mérőket, ám az SRW berendezések ellenőrzésére még nem került sor. A kutatás célja a szintmérés elvén működő eszközök mérési hibáinak definiálása (szél okozta alulmérés, kifröccsenés, párolgás, benedvesítés stb. miatti veszteségek), és hatásuk becslése a csapadékindenzitás meghatározásában. Az SRW mérők legfontosabb szisztematikus hibája az, hogy a mérőtartály szifonos leürítése idején a csapadék mérése szünetel néhány másodpercig. A hiba korrekciójára a regisztrációs szalag adatai alapján lehetőséget biztosít Luyckx és Berlamont eljárása. A történeti adatok számottevő része már azonban csak kivonatolt formában található meg, így ezek javítására az említett módszer nem alkalmazható. Az ilyen feldolgozott csapadékadatok javítására eljárás fejlesztése szükséges, amely révén szisztematikus hiba miatti alulmérés kijavítható.

B. A billenőkanalas csapadékmérők szisztematikus hibájának korrekciójával kapcsolatos pontossági kérdés vizsgálata; kiegészítő korrekciós eljárás fejlesztése. A TBG mérőkkel mért történeti csapadékadatok rendszerint több perces (jellemzően 10 perces) mérési periódussal lettek rögzítve. A műszerekre az utóbbi években korrekciós képleteket fejlesztettek, ám azok csak az egyperces adatok esetén

alkalmazhatók. Ezek az eljárások nem használhatók fel közvetlenül a hosszabb időszakoként összegzett adatok esetében, a korrekciós eljárások nemlineáris jellege miatt, így kiegészítő korrekció alkalmazása szükséges a hosszabb mérési periódusú adatok esetében, amely a csapadékadatok adatformátumához igazodó javítását teszi lehetővé.

C. Adatfeldolgozási hibák hatásának kimutatása a történeti csapadékadatokban. A csapadékinzenzítés mérése csak a legutóbbi időben történik egyperces mérési periódussal, azt megelőzően 10 perces, vagy hosszabb csapadékösszeg rögzítésére került sor, állandó mérési periódus alkalmazásával. Minthogy a mérési periódus kezdete és a csapadék kezdete nem feltétlenül esik egy időpontba, a csapadék mérésében hiba keletkezhet azáltal, hogy a csapadékcúcs kimérése esetleges lesz. E hiba mértéke befolyásolja a csapadékinzenzítés-gyakoriság-tartósság görbéket is, így a hiba a korábbi görbékben megjelenik. Az így keletkező hiba jellegét és mértékét vizsgálni szükséges. Hasonlóan lényeges az IDF összefüggések közelítésével kialakuló hiba mértéke is. A kutatási cél e hatások tanulmányozása és hatásuk becslése az IDF összefüggésekben.

D. A Budapest Belterület mérőállomás csapadékinzenzítés adatainak javítása a fejlesztett eljárásokkal, valamint a javítás hatásának vizsgálata a csapadékmaximum görbékben (esettanulmány). A mérőállomáson ismert típusú és műszaki paraméterű szintmérési elven működő SRW, majd TBG csapadékmérők adatait rögzítették. Az A. és B. pontban körülírt, e kutatás körében fejlesztett korrekciós eljárásokkal elvégzett javítás hatásának vizsgálatára kerül sor a kutatáshoz megkapott történeti csapadék adatsoron. A vizsgálat alapján meghatározható a javítás hatásának nagyságrendje. Mérlegelhetők egyéb olyan hatások is, amelyek a mért adatok pontosságát befolyásolják, így például a gyakorlati célra használt IDF görbék hatványfüggvényes közelítés miatt bekövetkező torzítás. A kutatás negyedik célja ennek meghatározása.

2. ANYAG ÉS MÓDSZER

Az SRW csapadékmérő mérési hibáinak vizsgálata során Sevruk által használt koncepció felhasználásával indultam el, aki a hagyományos csapadékmérők hibajelenségeit vizsgálta és a korrekciók használatos eljárásait értékelte 1982-ben. Ezt a megközelítést az tette lehetővé, hogy a mérés számos eleme, illetve

körülménye, ennél fogva a hibák jellege is azonos vagy nagyon hasonló a hagyományos mérők és az SRW berendezések esetében.

Az SRW mérők szél hatása miatt kialakuló pontatlanságának kérdését ugyancsak a hagyományos mérők esetében végzett kutatásokra, illetve eredményekre visszavezetve vizsgáltam. A vizsgálat során a hagyományos és az SRW berendezés körüli áramlási viszonyok összehasonlításával kerestem választ arra, hogy mennyiben térhet el a két mérőtípus szél miatt kialakuló mérési hibája. 1999-ben és 2000-ben Nešpor és munkatársai, valamint Habib és munkatársai készítettek áramlástan vizsgálatokat a hagyományos Hellmann csapadékmérőkre. SimFlow szoftver alkalmazásával a hagyományos mérő és az SRW numerikus modelljét elkészítve mód nyílt a két mérő körüli áramkép nagyságrendi összehasonlítására, ezzel az SRW eszköz esetében a mérési hiba várható mértékének becslésre, a hagyományos mérőhöz viszonyítva.

Az SRW eszközök legjelentősebb szisztematikus hibáját az okozza, hogy a mérő leürítése közben a csapadékmennyiség rajzolása, mérése szünetel. A csapadék intenzitására ugyanakkor lehet következtetni a leürítés időtartamából. Amennyiben eső esik a leürítés közben, a leürítési fázis hosszabb, és ez összefügg a csapadék intenzitásával. Luyckx és Berlamont erre alapozva a regisztrációs szalag alapján elvégezhető korrekcióra eljárást készített. A kivonatolt adatok javítására ez az eljárás önmagában nem alkalmas, de megfelelő megfontolások alapján a regisztrált csapadékösszegek és a vonatkozó időtartam alapján becsülhető a leürítések száma, ebből meghatározható a nem mért csapadékmennyiség, és ennek alapján korrigálható a csapadékintenzitás.

A TBG eszközök esetében a legjelentősebb szisztematikus hibát a billenőkánál ürítése során, és egyéb körülmények miatt nem mért csapadék okozza. Vuerich és munkatársai, valamint Lanza és munkatársai a 2004-2009 időszakban a WMO megbízásából számos műszerre végeztek laboratóriumi és terepi méréseket és összehasonlításokat, amely alapján hatványfüggvény alakú korrekciós képletet szerkesztettek, meghatározva számos gyártmány korrekciós paramétereit is. Eljárásuk az egyperces adatgyűjtési periódus alkalmazására alapult, mert a mérések során napjainkban ezt a mérési gyakoriságot használják. A történeti TBG adatok hosszabb mérési periódussal gyűjtött adatainak korrigálására ez a képlet önmagában nem ad pontos eredményt a korrekciós képlet nemlinearitása miatt. A korrekciós képlet javítható egy kiegészítő korrekcióval, amelyet matematikai és statisztikai megfontolások alapján le lehet vezetni.

Az SRW és TBG korrekciók hatásának kimutatására a Budapest Belterület csapadékintenzitás adatainak vizsgálatára került sor. A korrekciókat követően a szükséges statisztikai vizsgálatok után IDF görbéket állítottam elő.

Az állandó mérési periódussal észlelt csapadékadatok vonatkozásában az adatfeldolgozás során torzítás, alulbecslés keletkezik. A torzítás mértékének becslésére egyperces adatokon összehasonlító vizsgálat végezhető. A vizsgálat során egy egyperces mérési periódussal észlelt csapadék idősoron hosszú mérési periódussal szimulált mérési idősor realizációk állíthatók elő, amelyből a csapadékeseményen belüli időintervallum csapadékintenzitásai számolhatók. Az időintervallumok idősor realizációnkénti legnagyobb intenzitásai az egyes mérési periódusok esetén többnyire különböznek. Ezek a maximum értékek felülről és alulról is korlátosak, egy sávban helyezkednek el. A valóságban a mérés során csak az egyik idősor realizációt lehet kimérni, ez bármelyik realizáció lehet, mégpedig egyforma valószínűséggel. A szimulációban emiatt becslésként feltehető, hogy az idősorban található „maximum” értéke a realizációk legnagyobb és legkisebb maximumának átlaga környezetében lesz. Ez az érték egyben az alulmérés mértékének becslése is, tekintve, hogy az idősor realizációk között található legnagyobb maximum egyben a ténylegesen kimérhető (egyperces) maximummal egyenlő.

Az IDF görbék alapvetően nem zárt alakban felírható függvények, hanem valószínűségszámítási alapon, statisztikai elemzés alapján előállított adatsorok. Előállításuk végén sok esetben a felhasználhatóság egyszerűsítése érdekében – a magyar gyakorlatban mindenképp – hatványfüggvénnyel szokás közelíteni. A közelítésből fakadó hiba a valószínűségi alapon számolt IDF értékek és a közelítő függvény összehasonlításával elvégezhető.

A kutatás során elért elméleti eredményeket az OMSZ részéről rendelkezésre bocsájtott adatok feldolgozása (korrekciója) során felhasználtam, és a megfelelő diszkusszió megtételére a következtetések levonására mód nyílt. Ezeket az adatokat az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) gyűjtötte a Budapest Belterület meteorológiai állomáson, az 1915 és 2018 közötti időszakban.

Az 1915-1992 időszakra az adatokat Hellmann-Fuess típusú SRW, az 1998-2018 időszakban pedig Lambrecht 15188 típusú TBG mérőkkel gyűjtötték.

A vizsgálat során egy extrém nagycsapadék egyperces mérési idősorát is felhasználtam, amelyet a németországi Abtsgmünd-Untergröningen meteorológiai állomás csapadékmérőjén 2018. június 11-én észleltek. Ezt az idősort a Német Meteorológiai Szolgálat (Deutsche Wetterdienst) adatbázisából töltöttem le.

A kutatáshoz további adatforrást a műszerekre vonatkozó műszaki paraméterek jelentettek. A forrásokat a dolgozatban hivatkoztam.

A csapadékadatok inhomogenitására lehetett számítani, amellyel az adatfeldolgozás során foglalkozni kellett. Ennek számos oka volt, így például az, hogy az adatok nem képeztek folytonos adatsort, számos év adatai hiányoztak, a csapadékmérők környezete a 30-as évektől 4-5 emeletes épületekkel beépült, és a mérők helye is változott stb. A homogenitás vizsgálatát Pettitt, Neumann, valamint Kruskal Wallis H teszttel végeztem el. Az első két teszt a teljes, időrendbe állított adatsor vizsgálatára adott lehetőséget, míg a harmadik adathiányok és eltérő mérési feltételek miatt megkülönböztetett négy részidőszak adatainak összehasonlító elemzésére volt alkalmas.

3. AZ EREDMÉNYEK

3.1. TÉZISEK

Tézis 1. Igazoltam, hogy a billenőkanalas csapadékmérők rövid mérési periódusban meghatározott hatványfüggvény alapú korrekciós összefüggését azon műszerek esetében indokolt használni, amelyeknél a hatványkitevő értéke 1,10-et meghaladja. Ebben az esetben a kiegészítő korrekció mértéke 2%-nál magasabb.

Tézis 2. Eljárást fejlesztettem a szifonos csapadékmérők történeti adatainak javítására a szifonozás miatti szisztematikus mérési hiba kiküszöbölésére azon esetekre, amikor csak a csapadékindenzitások és azok értelmezési intervalluma áll rendelkezésre, a csapadékmérő szalagja már nem.

Tézis 3. Igazoltam a sokperces időtartamú mintázási periódussal előállított adatsorok esetében azt, hogy a csapadékesemények legnagyobb intenzitású időszakát jellemző egyperces maximális csapadékindenzitás kimutatásának valószínűsége a mérési időszak percben mért időtartam mérőszámának reciproka.

Tézis 4. A 10 perces állandó mérési periódussal felvett csapadékadatok alkalmazásával a legnagyobb csapadékindenzitások kimutatásában 3-7% alulmérés is mutatkozhat a mintavételre vonatkozó törvényszerűségek miatt.

Tézis 5. Numerikus aerodinamikai vizsgálattal igazoltam, hogy a Hellmann csapadékmérő környezetében a szélsősebesség-mező a hagyományos Hellmann típusú csapadékmérőnél észlelnél nagyobb mértékben torzulhat, így a csapadékmérők esetében a szél hatására bekövetkező mérési hiba nagyobb mértékű lehet, mint a hagyományos mérőknél, amennyiben a méréseket szélvédő gallér nélkül végezték.

Tézis 6. Igazoltam, hogy a Budapest Belterület csapadékmérő állomás SRW és TBG berendezésekkel mért éves legnagyobb csapadékindenzitás adatai a szisztematikus hibák javítása után homogének és azonos valószínűségi eloszlással modellezhetők.

Tézis 7. Kimutattam a Budapest Belterület csapadékmérő állomás éves legnagyobb csapadékindenzitás adatai alapján, hogy a szifonos és billenőkanalas műszerekkel folytatott mérések a készülékek szisztematikus hibáinak javítására kidolgozott eljárások alkalmazása a 10 perces tartósságnál 5-8%-kal, 20 és 30 percenél 2-6%-kal magasabb csapadékindenzitásokat eredményeznek a korrekció nélküli értékekhez képest.

3.2. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

Az SRW mérők feldolgozott adatainak utólagos korrekciója a mérő leürítése során keletkező hiba javítására.

A kutatás során eljárást fejlesztettem az SRW mérők feldolgozott adatainak szifonos leürítés miatti hibájának korrekciójára, amely az emiatt kialakuló alulmérés javítására alkalmas. Az eljárás előnye az, hogy a már csak kivonatos állapotban fellelhető adatokból is képes kiküszöbölni a berendezés szisztematikus hibájából adódó alulmérést. Mivel a hiba miatti alulmérés a csapadékintenzitással arányos, így javítás nélkül, a magasabb intenzitások esetén jelentősebb hiba került a nyilvántartott adatokba, amelyek átöröklődhettek az IDF görbékbe is. A javított adattal a valóságban hullott csapadék intenzitásáról bizonyosabb képet kaphatunk. Az eljárást általánosított, paraméteres alakban állítottam elő, így bármely szifonos csapadékíró berendezésből származó adat javítására alkalmas, amennyiben az adott műszer korrekcióhoz szükséges műszaki paraméterei rendelkezésre állnak. Mivel az elmúlt évszázad jelentős részében ezek a mérők szolgáltatták az adatok jelentős részét világszerte, az adatok javítása lényeges kérdés Magyarország határain túl is.

Magyarországon jellemzően a Hellmann-Fuess csapadékírók voltak használatban, amelyek paraméterei alapján az Országos Meteorológiai Szolgálattól kapott csapadékadatokon korrekció hajtottam végre. A vizsgálat eredményét az 1. Táblázat mutatja.

1. Táblázat. A korrekciós szorzó értéke Hellmann-Fuess csapadékíró adataira, a Budapest-Belterület csapadékmérő 5, 10, 20, 30, 60 perces intervallumokra számolt maximális csapadékintenzitásai

Visszatérési idő	5 perc	10 perc	20 perc	30 perc	60 perc
1 év	1,00	1,00	1,00	1,01	1,01
2 év	1,06	1,03	1,02	1,03	1,03
10 év	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05
100 év	1,21	1,13	1,10	1,13	1,13

A korrekciós szorzók alapján megállapítható, hogy a maximális csapadékintenzitásokban a 10 éves átlagos előfordulási gyakoriságnál ritkább, azaz a gyakorlati felhasználás szempontjából leginkább lényeges extrém csapadékok esetében a korrekció az 5%-ot is meghaladja. A korrekció a 100 éves átlagos előfordulásnál ritkább adatok esetében 10-13% mértékű volt.

A TBG csapadékmérők szisztematikus hibáját javító képlet kiegészítő korrekciója hosszú mintázási periódusban gyűjtött (vagy tárolt) csapadékadatokra.

A kutatás során a TBG csapadékmérők adatainak korrekcióját kiegészítő korrekciót fejlesztettem, amely révén az egyperces mérési periódusú adatok alapján kifejlesztett, a WMO 2009-es kampánya nyomán javasolt korrekciója a hosszabb mérési periódusban rögzített adatok esetére is alkalmazható.

A TBG mérők szisztematikus hibája a mérő kanálában összegyűjtött víz kifröccsenése miatti veszteségből, a kanál leürítése közben lefolyó nem mért csapadék mennyiségéből, és további szerkezeti kialakítással összefüggő hibákból tevődik össze. A szakirodalomban a hiba javítására gyakran hatványfüggvényt alkalmaznak. A javítást arra a mintázási periódussal felvett adatsorra lehet megfelelőképp használni, amelyre a javító képletet kifejlesztették. Amennyiben a nyers adatokat más mérési periódussal rögzítették, a javítás a nemlineáris jellege miatt, alulbecslés marad az adatokban. Amennyiben ilyen méréseket kell korrigálni, a hatványfüggvényes korrekció csak kiegészítő korrekcióval alkalmazható. A kutatásom során ezt a kiegészítő korrekciós tényezőt vezettem le, és a levezetés alapján a kiegészítő korrekció mértékét, valamint alkalmazási korlátait vizsgáltam. Gyakorlati használatra egy általánosan használható érték meghatározása szükséges statisztikai alapon, mivel a valós adatok nem állnak rendelkezésre a korrekciós függvények meghatározásánál használt egyperces mintázással. A jellemző érték a jelen egyperces mérésekből vezethető le földrajzi régiókra.

A kiegészítő korrekció olyan műszerek esetében javasolt, amelynek szisztematikus hibája a magasabb csapadékkintenzitások mérése során számottevő, és emiatt az egyperces korrekciós összefüggés hatványkitevője az 1,10 érték körüli, vagy annál nagyobb. Kisebb kitevő esetén csak a hosszú mérési idők mellett van jelentősége a kiegészítő korrekció alkalmazásának. A levezetés paraméteres formájú, így ismert korrekciós összefüggéssel rendelkező csapadékmérő berendezéshez alkalmazható. Minthogy az ENSZ Meteorológiai Világszervezetének ajánlása szerint a méréseket sok esetben továbbra is tíz perces adatokban közlik, a javításnak jelentősége lehet a jelenkori mérések korrekciója során is.

Az eljárás egyébként minden olyan – nem feltétlen meteorológiai – mérési eljárásra alkalmazható, amelyben hatványfüggvény alakú korrekciós formulával kellene a korrekciós függvény előállításakor használt adatokhoz képest eltérő mérési periódusú adatokat javítani.

3.3. TOVÁBBI TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

A Budapest Belterület csapadékmérő állomás legnagyobb éves csapadékintenzitás adataiban nem látszik szignifikáns változás.

A csapadékmérő állomás adatainak vizsgálata során az egyes részidőszakok egyöntetűségének vizsgálatát végeztem el. Ennek kapcsán a részadatsorok közép- és szélsőértékeinek trendmentességét tapasztaltam. Mindez arra utal, hogy a 100 éves időtávot átfogó adatok e meteorológiai állomás esetében nem mutatnak változást az éves legnagyobb csapadékintenzitás vonatkozásában. A tapasztalt trendmentesség – az állomás esetében – ellentmond annak a gyakorta általánosságban hangoztatott állításnak, hogy a csapadékintenzitások maximuma a klímaváltozás következtében emelkedik. A szignifikáns trend hiányára magyarázat lehet az állomás földrajzi elhelyezkedése. Egy másik lehetséges magyarázat az, hogy Budapest viszonylag távol helyezkedik el a tengerektől és a nedves levegőből javarészt kihullik a csapadék azon az ezer kilométeres úton, amelyen – alapvetően a mediterrán térségből – Budapest környezetébe ér. Az ide érkező nedves levegő így természetesen okozhat jelentős zivatarokat, de az extrém magas intenzitások zivataron belüli tartósságában már nem mutatkozik változás. Ezt a feltételezést a mediterrán légtömegek szokásos útvonala mentén elhelyezkedő csapadékmérők történeti csapadékintenzitás adatainak elemzésével lehetne igazolni, vagy cáfolni. Ez az eredmény tehát további kutatás tárgya lehet.

Egyébként, az eredmény nincs ellentétben a hazai klímakutatás eredményeivel, amelyek a csapadékos napok számának csökkenését, és ezzel párhuzamosan a csapadékos napokra vetített átlagos napi csapadékintenzitás emelkedését mutatják ki. Belátható, hogy csapadékos napokra vonatkoztatott átlagintenzitás nem ad információt a lehetséges legnagyobb, vagy az alacsony meghaladási valószínűséggel jellemezhető, ritkán előforduló csúcsintenzitások változására.

A 10 perces, állandó periódusú adatgyűjtéssel rögzített csapadékadatok alapján előállított IDF görbék alulbecslést tartalmazhatnak az adatfeldolgozásból fakadóan, amelynek középértéke 3-7% közé esik a 10-30 perces tartósságokra.

A hosszú mérési periódussal felvett csapadékadatok esetében megállapítható, hogy a mért adatsor a mérési periódusnál gyorsabb változásokat nem tudja megfelelő pontossággal leírni. Ez a tulajdonság hasonlít a Shannon és Nyquist által a periodikus jelek mérésével kapcsolatban kidolgozott és bizonyított mintavételezési törvényben leírtakra. Noha egy zápor során észlelhető csapadékintenzitás idősor aperiodikus, a fluktuációinak közelítése során a periodikus függvények közelítésének problémáihoz hasonló torzítások

figyelhető meg. Amennyiben a csapadékot (csapadékintenzitást) percben kvantált jelsorozatnak tételezzük fel, akkor egy n perc hosszúságú mérési periódust n -féleképp lehet megmérni. Például 10 perces mérési periódussal 10 féle mérés realizálható. A különböző lehetséges realizációk eltérő maximum értékeket szolgáltatnak, amelyek közül a valóságban kimért realizáció véletlenszerűen csak az egyik lehet, és korántsem biztos, hogy valóban a kimérhető legnagyobb értéket reprezentálja. Ez utóbbi körülmény biztosítja azt, hogy az így mért adatok a tényleges maximumnál az esetek többségében kisebbek legyenek. A hiba tartományát egy extrém csapadék idősorán vizsgáltam és a szélsőértékeket a 2. táblázatban mutatom be.

2. Táblázat. Legnagyobb és legkisebb csapadékintenzitások eltérő mérési periódusok esetén

Mérési periódus	Intervallum	Min. intenzitás	Max. intenzitás	Min/Max szélessége
ötperces	5	123.12	128.64	4%
	10	119.46	123.06	3%
	20	105.09	110.94	5%
	30	85.02	86.78	2%
	60	48.77	48.84	0%
tízperces	10	110.58	123.06	10%
	20	94.83	110.94	15%
	30	80.90	86.78	7%
	60	48.47	48.84	1%
húszperces	20	69.03	110.94	38%
	60	47.26	48.84	3%
harmincperces	20	69.03	110.94	38%
	60	47.26	48.84	3%

Amint a 2. Táblázat mutatja, a maximum és minimum adatok tartománya 7-15% szélességű. Az eltérések középértékét a számtani középben feltételezve, a 10 perces mérési periódus esetén az eltérés a 3-7% sávban a tényleges perces maximum alatt található, azaz alulmérést tartalmaz. Ez az IDF görbékbe is bekerül.

Belátható, hogy az eltérés mértéke az intenzitás változásának fluktuációjától függ, így kevésbé változékony csapadék esetén az alulmérés kisebb mértékű. Ugyanakkor, az extrém csapadékokra éppen az intenzitás jelentős változása jellemző.

4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A disszertációban feldolgozott téma és esettanulmány alapján a főbb következtetések a következők.

A csapadékintenzitás mérésének pontatlanságai miatt számottevő hiba kerül a gyakorlati felhasználás szempontjából lényeges csapadékintenzitás függvényekbe. A hibák három típusba sorolhatók, részben a hagyományos csapadékmérés körülményeivel azonosak, részben pedig a mérők szerkezeti kialakításából, technikájából következnek, részben pedig az adatok feldolgozási módszereiből következnek.

A csapadékintenzitás meghatározásának a mérés körülményeire visszavezethető hibái a hagyományos csapadékmérőkhöz hasonlóan elsősorban a szél zavaró hatására vezethetők vissza. E hiba kiküszöbölése vagy utólagos korrekciója egyelőre megoldatlan a nagy időbeni részletezettségű csapadék és csapadékintenzitás adatok vonatkozásában, az SRW és TBG mérők esetében. A kérdés megoldása a mérők mérési folyamatának aerodinamikai modellezése, valamint a csapadékméréssel párhuzamos szélméréssel, vagy a szél és csapadék feltételes előfordulásának statisztikai vizsgálata révén érhető majd el.

A csapadékintenzitás mérésének méréstechnológiából következő szisztematikus hibái csak a mérőberendezésektől függenek, így kijavításuk egyszerűbben biztosítható. A témában már folytak és folynak kutatások. E kutatások eredményei alapján a disszertációban elsősorban a korábban dokumentált mérések utólagos javítására vonatkozó eljárásokat fejlesztettem mind az SRW mind a TBG műszerekhez. A korrigált csapadékintenzitás adatokban jelentős mértékű 5-10% növekedés is megfigyelhető, elsősorban az extrém intenzitások esetében.

A hosszú mérési periódussal végzett mérések miatt is kerülhetnek bizonytalanságok az adatbázisokba, amelyek alulmérést eredményeznek. A bizonytalanságot a legkisebb és legnagyobb értékek átlagával becslve a 10 perces mérési periódus esetében 3-7% alulmérés mutatható ki a rövid 10-30 perces tartósságokra.

A hibák műszertípusonként összegződhetnek. Az SRW műszernél a szisztematikus hiba a szél miatti hibával, a TBG berendezés esetén a szisztematikus hiba a szél miatti és a hosszú periódus miatti hibával összeadódhat.

A kimutatott alulmérések az IDF összefüggésekbe átöröklődnek, ezeknek javítása indokolt. Az IDF adatok javítása két lényeges területen fejthet ki hatást. A klímaadatok referenciájának módosulása révén pontosabb képet

lehet a változások mértékéről, valamint a korábban épült infrastrukturális hálózatok teljesítőkéességének ártértékelése területén, amely a fejlesztési igények pontosabb meghatározásában nyilvánulhat meg.

A kutatás eredményei alapján a következő javaslatokat fogalmaztam meg.

- A. A csapadékmérők szél okozta mérési hibájának elemzésére a napon belüli csapadék esetének vizsgálata szükséges, ami a csapadék és szélstatistika együttes vizsgálatát igényli, amely alapja lehet a történeti csapadékadatok statisztikai alapú korrekciójának
- B. A szél miatti mérési hiba kimutatásához szükséges a berendezések áramlástan vizsgálat, amely során a régebben használt csapadékmérők mérési hibáját is becsülni lehet, hasonlóan néhány ilyen irányú vizsgálathoz, egyes készülékekre vonatkozóan; ez ugyancsak lényeges a statisztikai alapú korrekció végrehajtásához.
- C. A korai csapadékmérési adatok szisztematikus hibáktól való mentesítése szükséges, amely révén a múltbéli adatok revíziója megtörténhet, és ennek révén a klímatörténeti adatok korrekciójára sor kerülhet.

5. A SZERZŐ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ (ÉS RÉSZBEN AZ ÉRTEKEZÉSBEN IDÉZETT) PUBLIKÁCIÓI

1. **RÁCZ Tibor**, BANA Zsolt, SZÉKELY Árpád, Dr. SZILÁGYI Mihály „*Csapadékmérő hálózat fejlesztése Budapesten*”, Konferencia előadás és dolgozat, A Magyar Hidrológiai Társaság XXX. Vándorgyűlése, Kaposvár, 2012. 07.04-06.
2. **RÁCZ Tibor**, BANA Zsolt, SZÉKELY Árpád, TÓTH Katalin: „*A Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. csapadékmérő rendszere, a 2014. év május-szeptember időszak csapadékviszonyai a főváros területén*” Konferencia előadás és dolgozat, A Magyar Hidrológiai Társaság XXXIII. Vándorgyűlése, 2015. 07.01-03. Szombathely, ISBN 978-963-8172-34-1
3. **RÁCZ Tibor**: „*Három budapesti felhőszakadás 2015-ben: június 9., július 8. és augusztus 17*” Konferencia előadás és dolgozat, A Magyar Hidrológiai Társaság XXXIV. Vándorgyűlése, Debrecen, 2016.07.06-2016.07.08. (ISBN:978-963-8172-35-8)
4. **RÁCZ Tibor**: “*Közeli csapadékmérők rövid adatsorainak alkalmazása egy területet jellemző csapadékviszonyainak leírására. Példa az 1956.07.01-1967.03.31 közötti budapesti csapadékadatok felhasználásával*” Konferencia előadás és dolgozat, A Magyar Hidrológiai Társaság XXXVI. Vándorgyűlése, Gyula, 2018.07.04-06., ISBN 978-963-8172-39, 2017
5. **RÁCZ Tibor**: „*A 2017. május 23-i és az azt megelőző 2015. évi három budapesti felhőszakadás jellemzői*” Konferencia előadás és dolgozat, Országos Települési Csapadékvíz-gazdálkodási Konferencia, 2017 Baja, ISBN 978-615-5845-21-5, ISBN: 9786155845222, 194-213p
6. Oszoly Tamás, Gerőfi-Gerhardt András, Pálvölgyi-Buczynska Ilona, **RÁCZ Tibor**, Barabás Győző: „*Gondolatok a települési csapadékvíz gazdálkodáshoz*” Vízű Panoráma, 2019., XXVII/3. 5-13p
7. **RÁCZ Tibor**: „*Mekkora lehet a legnagyobb budapesti csapadékösszeg?*” Vízű Panoráma, 2019., XXVII/3. 17-22p
8. **RÁCZ Tibor**: “*A mintavétel és adatfeldolgozás szerepe a csapadékmaximum függvények megbízhatóságában és alkalmazhatóságában*” Hidrológiai Közlöny, Vol 100. No 4., 2020, pp. 52-59. HU ISSN 0018-1323

9. **RÁCZ** Tibor: „*On the correction of processed archive rainfall data siphoned rainfall writers*” *Időjárás*, vol. 125, No.3. pp. 513–519.
10. **RÁCZ** Tibor: „*Application of correction procedures for some systematic measurement errors to rainfall intensity data of a rain gauge in Budapest*”, *Periodica Politechnica Civil Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.3311/PPci.17731>.
11. **RÁCZ** Tibor: „*On the correction of multiple minute sampling rainfall data of tipping bucket rainfall recorders*” *Időjárás*, *Időjárás*, Accepted for publication.