

# III. Országos Települési Csapadékvíz-gazdálkodási Konferencia 2021

## Tanulmányok

Szerkesztette  
Bíró Tibor



**LUDOVIKA**  
EGYETEMI KIADÓ

# Tartalom

<i>A tanulmánykötet szerzői</i>	7
<i>A szerkesztő előszava</i>	9
I. rész – Az integrált települési vízgazdálkodás témakörében elhangzott előadások publikációi	11
Balatonyi László – Hegyi Zoltán: A közút forgalma által okozott szennyeződések terjedésének vizsgálata a közúti csapadékvíz-elvezetésben	13
II. rész – A kutatás, innováció és legjobb gyakorlat témakörében elhangzott előadások publikációi	23
Bana Zsolt – Balogh Balázs – Rác Tibor: Neurálishálózat-alapú vízállás-előrejelző modellek a budapesti kisvízfolyásokon	25
Kozák Péter: Csapadékvíz-gazdálkodási kérdések az Alsó-Tisza vízgyűjtőjén	45
III. rész – A stratégia, gazdaságpolitika és oktatás témakörében elhangzott előadások publikációi	63
Máthé Katalin: A kulcsvonalmódszer alkalmazása vonal menti struktúrák létesítésére	65
IV. rész – A település- és lakosságvédelem témakörében elhangzott előadások publikációi	83
Hábermayer Tamás: Az éghajlatváltozás jövőbeli hatásai a települési csapadékvízre – tudatos tervezés a rendkívüli események elhárítása kapcsán	85
Márton Attila: A Szuha-pataki árvízcsúcscsökkentő tározó hatásának elemzése Ecseg település villámárvizekkel szemben való védettségére	93
Bene Viktória – Cimer Zsolt: Csapadékvíz-gazdálkodás kontra veszélyhelyzet kialakulása a veszélyes ipari üzemekben	105
V. rész – Az infrastruktúra-gazdálkodás, -üzemeltetés témakörében elhangzott előadások publikációi	113
Nagy Zoltán András: Kibertámadások víziközművek ellen	115
Hetsi Zsolt – Mrekva László: Szélsőséges csapadék kezelése a mezőgazdasági gyakorlatban	127
VI. rész – Az előrejelzés, méretezés és tervezés témakörében elhangzott előadások publikációi	137
Rác Tibor: Hellmann–Fuess-csapadékirók szisztematikus hibájának korrekciója a feldolgozott záporadatokban	139

## A tanulmánykötet szerzői

*Balatonyi László:* osztályvezető, Települési Vízgazdálkodási Osztály, Országos Vízügyi Főigazgatóság; adjunktus, NKE Víztudományi Kar Víz- és Környezetbiztonsági Tanszék

*Balogh Balázs:* okleveles építőmérnök, FCSM

*Bana Zsolt:* okleveles térképész

*Bene Viktória:* PhD-hallgató, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Katonai Műszaki Doktori Iskola; Honvédelmi Minisztérium Hatósági Főosztály

*Cimer Zsolt:* egyetemi docens, oktatási dékánhelyettes, tanszékvezető, NKE Víztudományi Kar Víz- és Környezetbiztonsági Tanszék

*Hábermayer Tamás:* tűzoltó ezredes, megyei igazgatóhelyettes, Tolna Megyei Katasztrófavédelmi Igazgatóság

*Hegyi Zoltán:* környezetvédelmi albizottság-vezető, MAÚT; ügyvezető igazgató, VIKÖTI Kft; vezető tervező

*Hetesi Zsolt:* egyetemi docens, NKE Víztudományi Kar, Víz- és Környezetbiztonsági Tanszék

*Kozák Péter:* okleveles építőmérnök, igazgató, Alsó-Tisza-vidéki Vízügyi Igazgatóság

*Márton Attila:* okleveles építőmérnök, csoportvezető, Közép-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság Vízyűjtő-gazdálkodási Csoport

*Máthé Katalin:* tudományos munkatárs, NKE Víztudományi Kar Víz- és Környezetbiztonsági Tanszék

*Mrekva László:* mesteroktató, NKE Víztudományi Kar, Víz- és Környezetbiztonsági Tanszék

*Nagy Zoltán András:* egyetemi docens, NKE Rendészettudományi Kar Bűnügyi, Gazdaságvédelmi és Kiberbűnözés Elleni Tanszék

*Rácz Tibor:* okleveles építőmérnök, PhD-hallgató

Bana Zsolt – Balogh Balázs – Rác Tibor

## Neurálishálózat-alapú vízállás-előrejelző modellek a budapesti kisvízfolyásokon

### Bevezetés

Az utóbbi évtizedekben tapasztalt globális klímaváltozással kapcsolatos várakozások általában a rövid idejű nagycsapadékok gyakoriságának és intenzitásának növekedésével számolnak, lásd például [1]. Sajnos közhelyszerűvé vált, hogy a kisvízfolyások vízgyűjtő területének beépítése miatt a lefolyási tényező értéke kedvezőtlen irányban változik [2] [3]. Ezek a változások a városi kisvízfolyások esetében növelik az elöntések kockázatát a konvektív csapadékesemények során hirtelen kialakuló árvizekkel. Ehhez járul hozzá az is, hogy a vízfolyások medrének környezete jellemzően intenzív beépítés célterülete, így a vízlevezető képesség növelése, különösen az egyidejűleg megjelenő ökológiai szempontok figyelembevételével, egyre körülményesebb feladat. Mindezen káros folyamatok mellett az esetek többségében a vízfolyások hidrológiai jellemzői feltáratlanok, az átfogó vízgyűjtő-modellezésre kevés lehetőség nyílik.

A jelentősebb budapesti kisvízfolyások üzemeltetésének feladatát a Fővárosi Önkormányzat megbízásából a Fővárosi Csatornázási Művek Zrt. (FCSM) látja el. Az FCSM üzemeltetésébe tartozó vízfolyások egy része heves lefolyási viszonyokkal jellemezhető, és ezeken a nagycsapadékok idején gyakran alakul ki elöntésveszélyes helyzet. A budapesti záporok és zivatarok hidrológiai jellegzetességeinek megismerése érdekében az FCSM 2007-től csapadékmérő hálózat fejlesztésébe kezdett, amely átlagosan 3 km élhosszúságú háromszögekkel képes lefedni a város és egyes kapcsolódó vízgyűjtők területét [4]. 2010. május 30-án a dél-budai Hosszúréti-patakon egy extrém zivatart követően addig soha nem látott árvíz vonult le, amely Budafokon kisebb elöntéseket okozott, és egy ipari ingatlan elöntése révén több száz liternyi motorolaj bemosódásával jelentős szennyezést idézett elő. Az árvizet követően született meg az elhatározás a vízfolyások hidrológiai adatainak gyűjtésére, amely elsősorban a Hosszúréti-patak és később a Határ-árok, majd további vízfolyások folyamatos vízszintészlelését alapozta meg. A vízszintészlelés mellett alkalmi (nagyvízi) vízhozammérés

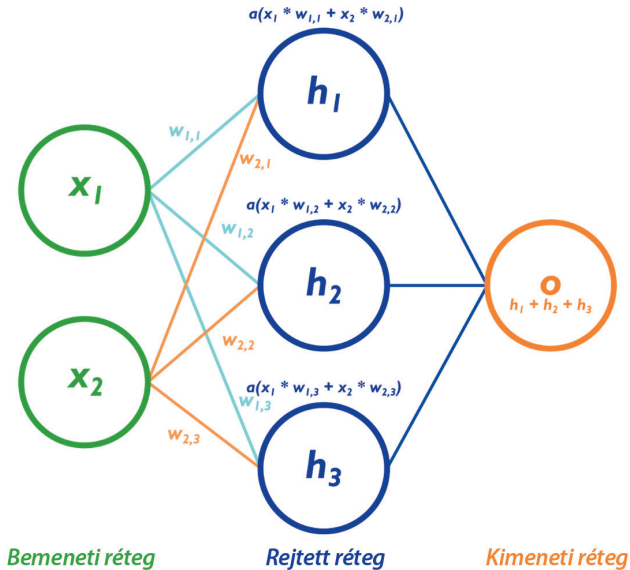
is történt, amelynek során elkészülhetett például a Hosszúréti-patak árvízi vízhozamgörbéje [5]. A vízfolyásokról immár többévtényi időszakból néhány perces mérési periódussal felvett vízszintadat áll rendelkezésre. A kialakított csapadékmérő hálózaton egyperces mérési periódussal rögzített csapadékadatok gyűjtése folyik, ami a legtöbb mérőn ugyancsak 8-10 éve folyamatosan zajlik. Az ilyen méretű adatbázisok a leíró jellegű hidrológiai adatok biztosításán túl már lehetőséget adnak a csapadékadatok és a vízgyűjtőn kialakuló nagyvízi lefolyás közötti kapcsolatok feltárására. A lefolyási modellek számos típusa szóba kerülhet az ilyen összefüggések feltárására. Ezek közül a lefolyás elemeinek hidraulikai vagy a vízmérlegre gyakorolt hatását figyelembe vevő modellek alkalmazása csak további jelentős mennyiségű adat gyűjtése esetén valósítható meg, amire üzemi körülmények között az FCSM-ben nem lett volna lehetőség. Ugyanakkor az adattudomány fejlődése révén elérhetővé váltak olyan „black box” jellegű eljárások, amelyek a lefolyás folyamatának bármiféle – a matematikai megfontolásokon túlmenő – ismerete nélkül is a nagyvizek előrejelzésével kecsegtettek. Amennyiben ilyen modellt áll rendelkezésre, a gyorsan kialakuló árvíz megérkezése előtt nowcasting jellegű, igen rövid időtávú előrejelzés készíthető, amely bizonyos körben védekezésre is lehetőséget adhat, de elsősorban az emberélet védelmét szolgáló figyelmeztető, korai veszélyjelző jelzésként használható. Az ötlet felvetését követően kialakították a matematikai modellt, amely 2018 óta nagy pontosságú előrejelzések biztosítását teszi lehetővé közel valós időben, a csapadékesemény alakulásának függvényében. Cikkünk az alkalmazott eljárást, a helyszíneket, az infrastruktúrát, valamint a tapasztalatokat mutatja be.

## **A vízállás-előrejelző modellezés módszere**

A vízállás-előrejelzés neurális hálózat-alapú előrejelző modellezés segítségével valósult meg.

### *A neurális hálózat-alapú modellezés áttekintő ismertetése*

A mesterséges neurális hálózatok olyan gépi tanulási algoritmusok, amelyek segítségével jól közelíthetők két adathalmaz között fennálló komplex, nemlineáris függvénykapcsolatok. Az 1. ábra egy egyszerű neurális hálózat felépítését mutatja.



1. ábra: A neurális hálózatok általános felépítése Mehlig nyomán [7] (a szerzők szerkesztése)

Ahogy az ábrán is látszik, a neurális hálózatok három fő részből állnak, amelyek a következők:

- bemeneti változók ( $x_1, x_2$ );
- rejtett réteg vagy rétegek a számítási neuronokkal ( $h_1, h_2, h_3$ ) és súlyokkal ( $w_{1,1} \dots w_{2,3}$ );
- kimeneti réteg a kimeneti neuronnal ( $o$ ) vagy neuronokkal.

Mély neurális hálózatok esetében a modellnek több rejtett rétege is van, illetve a megoldani kívánt probléma felépítésétől függően több kimeneti neuron is lehetséges a kimeneti rétegen. A rejtett rétegben lévő neuronok az összes bemeneti változó vagy az előző rétegben lévő összes neuron kimenetének súlyozott összegét állítják elő, majd egy nemlineáris transzformációt hajtanak végre rajta az úgynevezett aktivációs függvényel.

Ahogy a többi gépi tanulási módszernél, a neurális hálózatok esetében is az első lépés a modell tanítása. Ekkor megadjuk a modellnek a bemeneti változókat és az ezekhez tartozó célváltozókat (például esetünkben a bemeneti változók

a csapadékatatok lesznek, a célváltozó valamely, a csapadék hatására kialakult „jövőbeni” vízállás értéke), a modell pedig különféle algoritmusok használatával (például hiba-visszaterjesztés) meghatározza a súlyok optimális értékét, és így minimalizálja a kimeneti változó és a célváltozó eltérését. Utóbbi különbség meghatározására többféle hibafüggvény is használható, például az átlagos négyzetgyökös középhiba (*Root Mean Squared Error* – RMSE). A folyamat eredményeképp a bemeneti réteg elemei és a kimeneti réteg neuronjai között összetett nemlineáris regressziós összefüggés „jön létre”. Az így „betanított” neurális hálózatba már betáplálhatók új adatok, és képes lesz ezekből ismeretlen célváltozók kiszámítására (predikciójára) [6] [7].

Az elmúlt 10-15 évben széles körben elérhetővé váltak a nagy számítási kapacitású processzorok és videókártyák, valamint lehetővé vált nagy adathalmazok összegyűjtése és tárolása. Többek között ez a fejlődés tette lehetővé a neurális hálózatok gyakorlati alkalmazását, és mára ezeknek az algoritmusoknak a különböző programozási nyelvekben létrehozott implementációi bárki számára elérhetők.

### *Az FCSM által mért és a modellben felhasznált adatok*

A 2000-es évek első évtizedében tapasztalt jelentős kárt okozó nagycsapadékok kapcsán az FCSM-nél felismerték, hogy nincsenek elég pontos, elég nagy felbontású csapadékatatok az üzemeltetési területén, így a zivatarok során a városi vízelvezető rendszereken levonuló árhullámok jellegzetességei ismeretlenek voltak. A hiány pótlására, tekintettel a megfelelő időbeli és térbeli felbontású adatok beszerzésének nehézségeire, az FCSM saját csapadékmérő hálózatot épített ki. A kisvízfolyásokról sem álltak rendelkezésre megfelelő adatok, ezért egyes patakokon vízszintmérők kihelyezésére került sor.

A csapadékmérő hálózat kiépítése 2007-ben kezdődött, és 2013-ban érte el a mai kiterjedését. A Budapestet és az agglomeráció egy részét lefedő hálózatban jelenleg 56 darab, kis sorozatban legyártott billenőkanalas csapadékmérő működik. A 2. ábrán a Lőrinci úton kihelyezett csapadékmérő állomás látható. A berendezések a jelen kiépítésben autonóm energiaellátással (napelem + akkumulátor) működnek, és telefonos adatkommunikációval juttatják el az adatokat a központi szerverre. A berendezések 0,2 mm elvi mérési pontossággal

jellemezhetőek, és perces összegzésű billenésadatokat továbbítanak a központi szerverre, ahol mm-es csapadékadatokká konvertálják át a beérkező adatokat. Az adatok továbbítása alapértelmezésben naponta háromszor történik meg, ám ha a billenések száma meghalad egy beállítható küszöbértéket, tízperces ciklus-idejű adattovábbítás is előfordulhat.



2. ábra: Egy FCSM-csapadékmérő jellemző elrendezése (Lőrinci út) (FCSM Árvízvédelmi Osztály felvétele)

Kisvízfolyásokon 2013-ban a Hosszúréti-patakon (a Horogszegi határsornál), 2017 végén pedig a Határ-árkon (a Károly Iréneusz József utcánál) és az Aranyhegyi-patakon (a Pomázi útnál) üzemeltek be vízszintérzékelő műszert. Az ultrahangos vízszintmérő műszerek NIVUS NivuLog Easy típusúak. A vízszinteket hatpercenként, illetve intenzív vízállás-emelkedés és magas vízállás esetén kétpercenként rögzítik. A műszerek az adatokat tizenöt percenként továbbítják a központi szerverre. A mérések sűrűsége az igen intenzív vízszintemelkedések miatt indokolt. A kihelyezett műszerek mérési tartománya:

- Aranyhegyi-patak: 0–264 cm;
- Határ-árok: 0–273 cm;
- Hosszúréti-patak: 0–255 cm.

A 3. és 4. ábrákon a Határ-árkon kihelyezett vízszintészlelő berendezés látható.



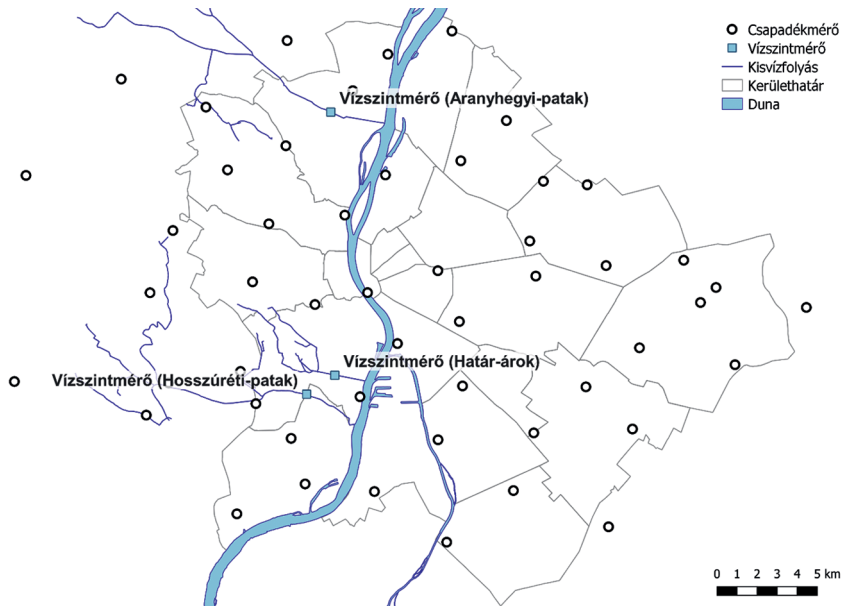


3. ábra: A Határ-árkon kihelyezett vízszintészlelő berendezés hídra szerelt mérődoboz (FCSM Árvízvédelmi Osztály felvétele)



4. ábra: A Határ-árkonnál alkalmazott mérődoboz belső kialakítása (FCSM Árvízvédelmi Osztály felvétele)

A neurális hálózat alapján működő előrejelző modell betanításához szükséges adatokat a csapadékmérők és a vízszintmérők sokéves mérési időszakuk során keletkezett adatbázis biztosította. Az 5. ábra a csapadékmérő hálózat kiépített-ségét és a kisvízfolyásokra kihelyezett műszerek elhelyezkedését mutatja.



5. ábra: A budapesti csapadékmérő hálózat, valamint a három mért vízfolyás nyomvonala a vízszintmérők feltüntetésével (FCSM Árvízvédelmi Osztály)

### A mérési adatok feldolgoása

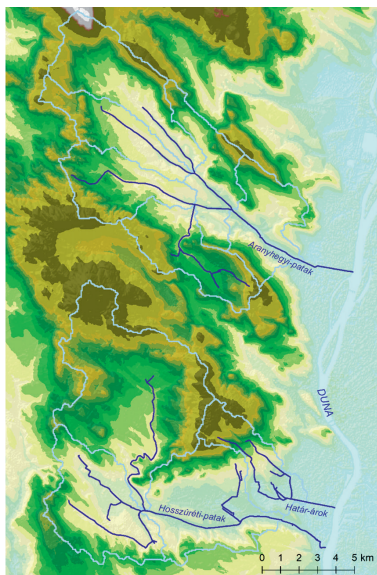
A mért csapadékadatok minőségbiztosítását operátor végzi. A beérkező adatok áttekintésével a gyanús adatokat megjelölik, az esetleges hibákat javítják. Ilyen hibák lehetnek a téves bejelzések, amelyek például egyes esetekben a mérő rezgése miatt, szél hatására alakultak ki, vagy karbantartás során a mérő működőképességének ellenőrzése miatt keletkezhetnek nem valós csapadékadatok. További hamis adat lehet az „idegen víz” megjelenése, amely az aktuális csapadékhelyzet ismeretében szűrhető. Ilyen esetekben az adat megjelölve a további feldolgoásból kizárható, mindamellett az archivált állapotban fellelhető és újra felülvizsgálható.

A beérkező vízállásadatokat vizuális ellenőrzéssel szűrjük. Fizikai értelemben nem valószínű adatok (például hirtelen ugrás, egy adatra korlátozódó kiugró érték stb.) ebben az esetben is törölhetők, és vagy adathiányként (elsősorban

hosszabb hibás mérési időszak esetén), vagy interpolálás révén javítva jelennek meg a feldolgozásra előkészített adatbázisban.

A modellek felépítéséhez szükséges volt a csapadék- és vízállásadatsorok szűrése (a megfelelő mérőállomások leválogatása) és a műszerek által mért adatok transzformációja, hogy a modell által használható bemeneti és kimeneti változók álljanak rendelkezésre.

Első lépésként meg kellett határozni a vízgyűjtőkre hatással lévő csapadék-mérő állomásokat, ehhez először a vízszintmérők feletti vízgyűjtőket kellett lehatárolni. Alapadatként ehhez az STRM domborzatmodellt és az FCSM budapesti kisvízfolyásokra vonatkozó térinformatikai adatbázisát használták fel. A mederhálózat valós futásával javított domborzatmodell 1 ívmásodperces felbontása (kb. 30 m × 30 m) elégségesnek bizonyult a vízgyűjtők kellően pontos meghatározásához. A Határ-árok esetében egy összefüggő, az Aranyhegyi-pataknál és a Hosszúréti-pataknál pedig egy három, illetve hat részvízgyűjtőre bontott vízgyűjtőt határoltak le. A 6. ábrán a három kisvízfolyás vízrendszere, valamint a vízgyűjtő terület domborzati viszonyai láthatók.



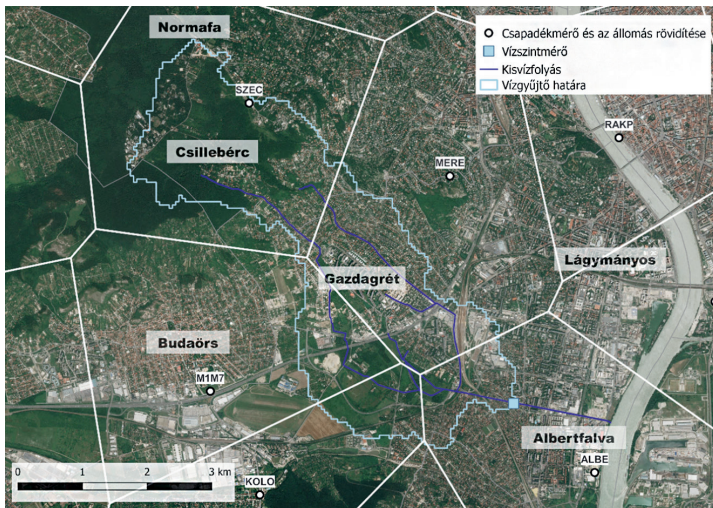
6. ábra: A három kisvízfolyás vízgyűjtője és a vízgyűjtő domborzati viszonyai (FCSM Árvízvédelmi Osztály)

A modellek építése során fontos szempont volt, hogy az algoritmus működése független legyen a csapadékmérő hálózat változásaitól (mérőhelyek megszűnése, újak létrehozása). Ennek érdekében a térben pontszerűnek tekinthető csapadékmérők méréseit Voronoi-sokszögek segítségével átlagolták a vízgyűjtőre [8] [9]. Minden olyan csapadékmérőt, amelynek a köré írt sokszöge metszi a vízfolyás vízgyűjtőjét, a patak vízjárására hatással lévő mérőnek tekintettünk, és az e mérőről beérkező csapadékadatok területarányosan szerepelnek a perces csapadéktömeg-becslésben. A Voronoi-sokszög területén a csapadék térbeli eloszlását eléggé bizonytalanul lehetne becsülni, tekintettel az intenzív nagy-csapadékok térbeli eloszlásának igen egyenetlen jellegére. A mérők pillanatnyi adatait az előbbiek miatt a legegyszerűbb közelítéssel a Voronoi-sokszögon egyenletes értékkel vettük figyelembe, így a továbbiakban a lehullott csapadékmennyiségre csak becslésként hivatkozunk. Például amennyiben a Határ-árokra hatással lévő csapadékmérőről az 1. táblázatban lévő adatok érkeztek 2021. augusztus 31. 12 órakor, akkor a csapadékbecslés a következő képlet alapján történik:  $(1,4 \cdot 5) + (1,2 \cdot 10) + (1,8 \cdot 3) + (4,1 \cdot 2) + (5,7 \cdot 14)$ . Miután a modell nem fizikai lefolyásmodell, a mértékegységek harmonizációja nem szükséges.

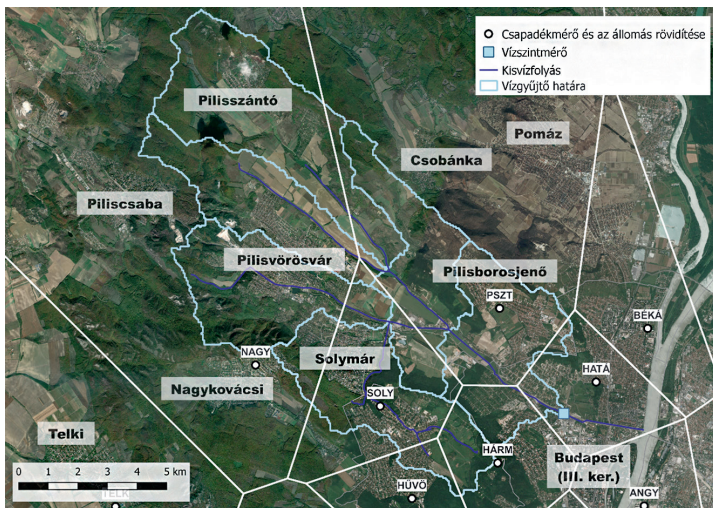
1. táblázat: Csapadékbecslés-példa (a szerzők szerkesztése)

Dátum	Mérőhely kódja	A Voronoi-sokszög és a vízgyűjtő metszete (km <sup>2</sup> )	Csapadék (mm)
2021. 08. 31. 12:00:00	ALBE	1,4	5
2021. 08. 31. 12:00:00	KOLO	1,2	10
2021. 08. 31. 12:00:00	MIM7	1,8	3
2021. 08. 31. 12:00:00	MERE	4,1	2
2021. 08. 31. 12:00:00	SZEC	5,7	14

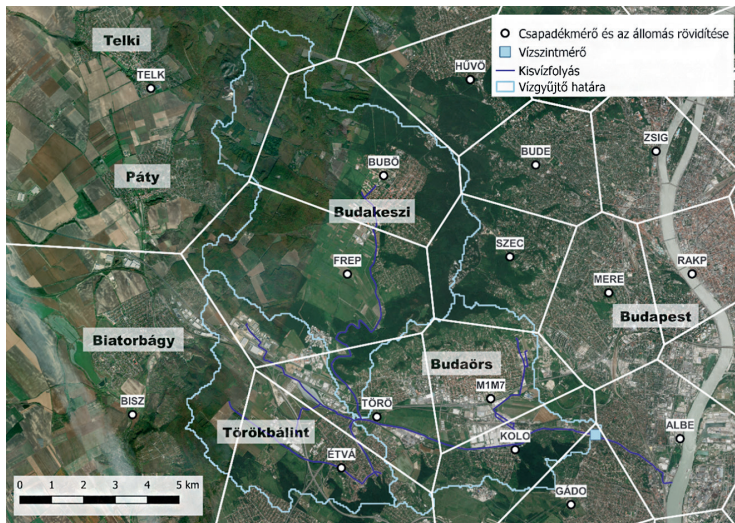
Miután a tapasztalatok alapján az így számolt becslés megfelelő volt a modellek számára, más, bonyolultabb és nagyobb számításigényű interpolációs módszert nem próbáltunk ki. A 7–9. ábrák a vízgyűjtőket és a Voronoi-hálózatokat mutatják.



7. ábra: A Határ-árok vízgyűjtő területe a vízsztmérő feletti szelvényben és a csapadékmérők Voronoi-poligonjai (műholdkép: bing.com)



8. ábra: Az Aranyhegyi-patak vízgyűjtő területe a vízsztmérő feletti szelvényben és a csapadékmérők Voronoi-poligonjai (műholdkép: bing.com)



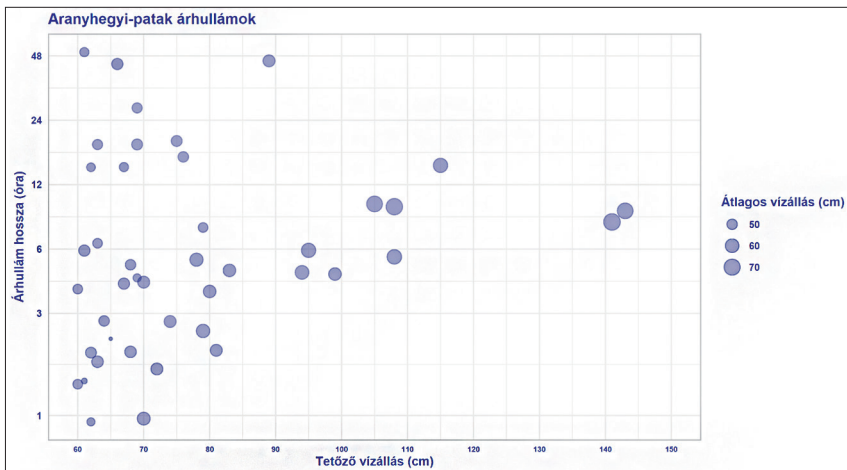
9. ábra: A Hosszúréti-patak vízgyűjtő területe a vízsztmérő feletti szelvényben és a csapadékmérők Voronoi-poligonjai (műholdkép: bing.com)

A modellek elsődleges célja a jelentős árhullámok minél pontosabb előrejelzése, így célszerűen az árhullámokat okozó meteorológiai és vízjárási időszakok adatait használtuk fel. Ezért tehát a következő lépés az árhullámos időszakok adatainak legyűjtése volt. A legyűjtésre kijelölt vízjárási helyzetek definiálására mindhárom patak esetében egyedi szempontok szerint, az üzemeltetési tapasztalatok alapján került sor. Az egyes patakoknál alkalmazott szabályokat a 2. táblázat tartalmazza.

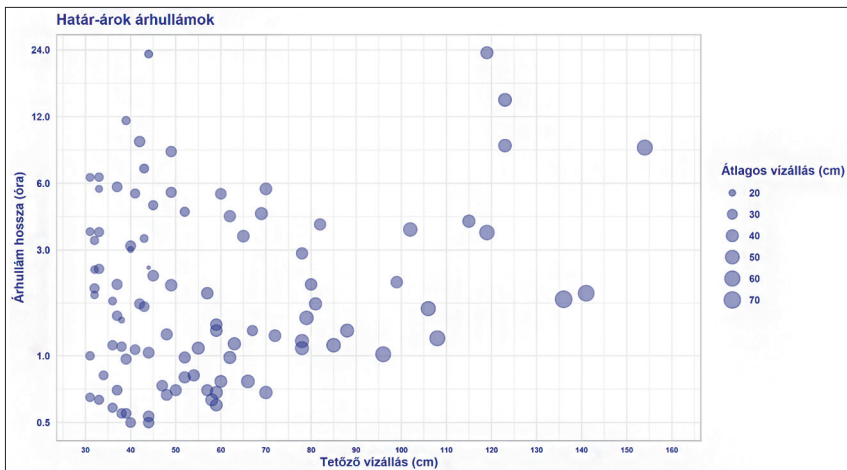
2. táblázat: Árhullám-definíciók (a szerzők szerkesztése)

Kisvízfolyás	A modell tanításához használt időszak	Magas vízállás definíciója	Árhullám definíciója	A modellben használt árhullámok száma	Legnagyobb mért vízállás
Aranyhegyi-patak	2017. december 15. – 2021. augusztus 17.	A patak vízszintje tartósan 40 cm felett tartózkodott, két óránál hosszabb időre nem csökkent ezen érték alá.	Azon magas vízállásos időszakok, ahol a tetőzés legalább 60 cm-es, és fél óránál hosszabb időtartamúak.	43	143 cm
Határ-árok	2017. december 15. – 2021. augusztus 17.	A patak vízszintje tartósan 20 cm felett tartózkodott, két óránál hosszabb időre nem csökkent ezen érték alá.	Azon magas vízállásos időszakok, ahol a tetőzés legalább 30 cm-es, és fél óránál hosszabb időtartamúak.	97	154 cm
Hosszúréti-patak	2013. május 3. – 2018. szeptember 5.	A patak vízszintje tartósan 25 cm felett tartózkodott, két óránál hosszabb időre nem csökkent ezen érték alá.	Pontos definíció nélkül, szemrevételezés után válogatták ki.	100	194 cm

A Hosszúréti-pataknál az adatfeldolgozás fontos lépése volt a fals adatok kiszűrése, amikor úgy keletkezett árhullám a patakon, hogy nem volt csapadékeseemény. Ennek oka tározók, tavak, medencék ürítésére vezethető vissza. Sajnos a nyilvánvalóan mesterséges eredetű vízeresztések eredetét nem sikerült igazolhatóan felderíteni. A 2. táblázatban a Hosszúréti-pataknál az árhullámok számát már ezen időszakok kihagyásával tüntettük fel. A Határ-árok és az Aranyhegyi-patak esetében erre a lépésre nem volt szükség, ilyen jellegű hatással nem találkoztunk. A 10–12. ábrák a modellek építése során használt árhullámok főbb jellemzőit mutatják.

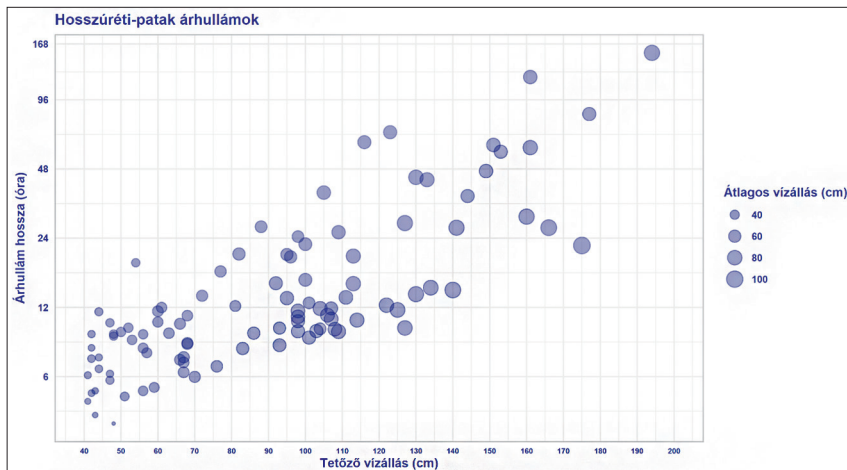


10. ábra: Összesítő grafikon az Aranyhegyi-patakon levonult árhullámokról 2017. december 15. és 2021. augusztus 17. között (a szerzők szerkesztése)



11. ábra: Összesítő grafikon a Határ-árkon levonult árhullámokról 2017. december 15. és 2021. augusztus 17. között (a szerzők szerkesztése)





12. ábra: Összesítő grafikon a Hosszúréti-patakon levonult árhullámokról 2013. május 3. és 2018. szeptember 5. között (a szerzők szerkesztése)

### *Az előrejelzéshez használt modell felépítése*

A modellek építése az R programozási nyelv „caret” könyvtára felhasználásával történt, a neurális hálózat tanítására az „mxnet” könyvtár implementációjával. A modellek bemeneti változói a Voronoi-hálózatok segítségével a vízgyűjtőn vagy részvízgyűjtőkön becsült csapadékok különböző időbeni felbontásban, illetve az aktuális vízállás és az ezt tíz perccel megelőző vízállás különbsége. A 3. táblázat mutatja az egyes kisvízfolyásokon működő modellek főbb paramétereit.

A kezdeti előrejelző rendszert úgy hozták létre, hogy külön modellek épültek a 30, 60, 90 stb. perccel későbbi vízállások előrejelzésére. Ennek nagy hátránya volt, hogy bár a modelleket jellemző statisztikai mérőszámok külön-külön megfelelőnek tűntek, ám miután az algoritmusok függetlenek voltak egymástól, sokszor egymásnak ellentmondó, így az operatív munkában nem használható előrejelzéseket adtak. Ennek kiküszöbölésére a jelenleg használt előrejelző rendszerben a modellek célváltozója egységesen az aktuális vízállást 10 perccel követő vízállás lett. Ezt felhasználva az előrejelzés úgy készül a következő hat órára, hogy a 10 perces előrejelzés vízállását felhasználva előrejelzés készül

20 perccel későbbre, ezt felhasználva 30 perccel későbbre stb. Így mindig konzekvens, az aktuális pillanatban rendelkezésre álló csapadékatatoknak megfelelő előrejelzést kapunk.

3. táblázat: Főbb modellparaméterek (a szerzők szerkesztése)

Kisvízfolyás	Vízgyűjtők	Bemeneti változók		Kimeneti változó	Neurális háló felépítése	R <sup>2</sup>
		Csapadék	Vízállás			
Aranyhegyi-patak	6 rész-vízgyűjtő	Előző 6 óra csapadécai 15 perces bontásban	Az aktuális vízállás és a 10 perccel korábbi vízállás különbsége	Az aktuális vízállást 10 perccel követő vízállás	3 rejtett réteg (256, 128, 64 neuron)	0,89
Határ-árok	1 vízgyűjtő	Előző 3 óra csapadécai 5 perces bontásban	Az aktuális vízállás és a 10 perccel korábbi vízállás különbsége	Az aktuális vízállást 10 perccel követő vízállás	3 rejtett réteg (256, 128, 64 neuron)	0,80
Hosszúréti-patak	3 rész-vízgyűjtő	Előző 12 óra csapadécai 1 órás bontásban	Az aktuális vízállás és a 10 perccel korábbi vízállás különbsége	Az aktuális vízállást 10 perccel követő vízállás	1 rejtett réteg (32 neuron)	0,73

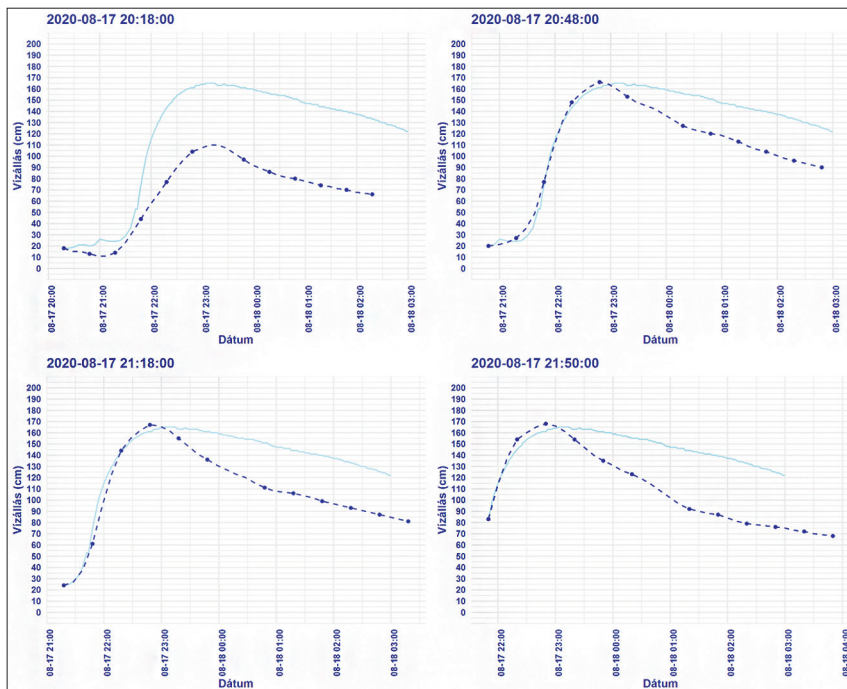
## Eredmények

Az eredmények ismeretében az FCSM a modelleket éles rendszerbe helyezte, és mindhárom pataknál előrejelző rendszer működik. Amennyiben a vízgyűjtőn csapadékesemény történik, a rendszer megjeleníti az előrejelzést a patakok monitoringrendszerén, valamint az előrejelzéseket és a felhasznált bemeneti változókat tárolják későbbi elemzés céljára. Az időelőnyök igen rövidek, a Határ-árok esetében egyes esetekben a csapadékesemény kezdete után már 30-60 perccel megtörténik a tetőzés, míg a másik két vízfolyásnál ez általában 60 perctől pár óráig terjedhet. Ezen adottság miatt a beavatkozási lehetőségek szűkösek, de értesítések kiadására, veszélyhelyzet elhárítására megfelelő a rendszer.

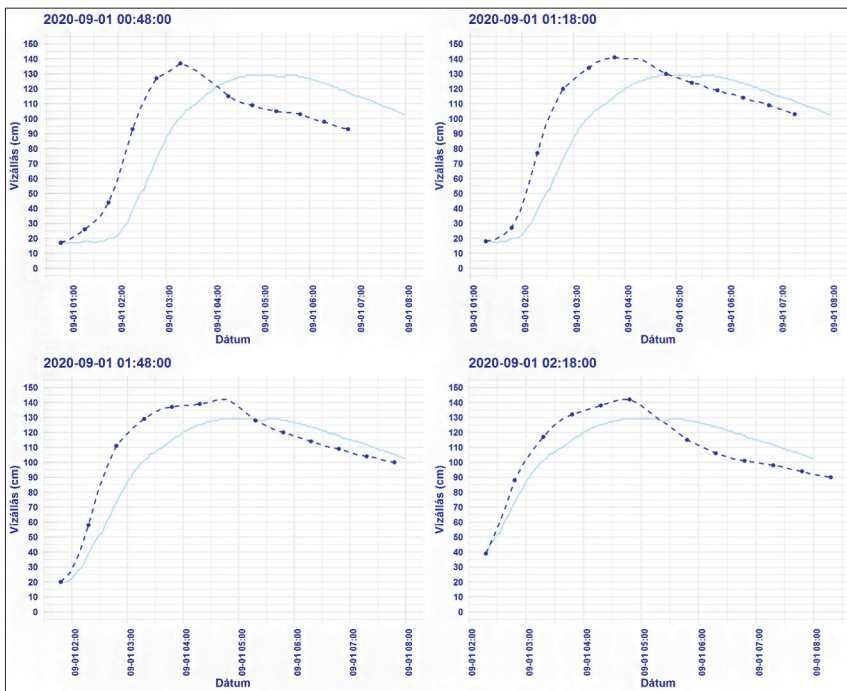
A Hosszúréti-patak esetében az elmúlt három év árhullámai alapján a modell nagy megbízhatósággal működik, a valósághoz közel határozta meg az árhullámok felfutását, és a tetőzés becslése ±15 cm-es pontosságú volt. A tetőzés utáni lefutás előrejelzésében nagyobb pontatlanságok tapasztalhatók, illetve magas

vízállásos stagnálás esetén folyamatos csökkenést jelez előre a modell. A 13. és 14. ábra két árhullám négy időpillanatban készített előrejelzéseit mutatja. A vízkárelhárítási szempontból elsődleges fontosságú tetőző vízállás előrejelzése igen jó közelítéssel valósult meg az alkalmazott eljárás segítségével.

A két ábrán megfigyelhető az is, hogy az előrejelzés pontossága a csapadék- adatok beérkezése során időben hogyan fejlődik. A 13. ábrán az árhullám megindulása előtt kb. egy órával az árhullám csúcsára még 80 cm-es hibával készül előrejelzés, fél órával később az árhullám csúcsa már 10 cm nagyságrendben helyes adatot szolgáltat. Fontos látni azt, hogy az árhullám tényleges kialakulása a valós vízállásokban csak fél órával később indul meg, és a tetőzésre mintegy két órával később kerül sor.



13. ábra: A 2020. augusztus 17-én levont árhullám során készített vízállás-előrejelzések (sötétkék szaggatott vonal) és a vízmércén mért valós vízállások (világoskék vonal) (a szerzők szerkesztése)



14. ábra: A 2020. szeptember 1-jén levonult árhullám során készített vízállás-előrejelzések (sötét-kék szaggatott vonal) és a vízmércén mért vízállások (világoskék vonal) (a szerzők szerkesztése)

A csapadékmérő hálózat kiépítésénél Budapest közigazgatási területének megfelelő lefedése mellett elsődleges cél volt, hogy nagy részletességgel tudjuk rögzíteni a Hosszúréti-patak vízgyűjtőjén átvonult csapadékokat, így a modell sok évre visszamenő és pontos adatokkal tud dolgozni.

Az Aranyhegyi-patak és a Határ-árok esetében az üzembe helyezés óta nem történt jelentős csapadéktevékenység, így itt csak a modell építéséhez használt adatokon végzett tesztekre tudunk támaszkodni az éles üzemben várható pontosság becsléséhez. Ennek meghatározásához minden árhullám esetében külön modellt tanítottak be az éles üzemben lévő modell paramétereivel, de az adott árhullám adatainak kihagyásával. Az így kapott modellt alkalmazva az árhullámon elfogulatlan képet kaphattunk, hogy hogyan viselkedik az algoritmus

ismeretlen adatokkal találkozva, mennyire jól másolja az adott vízfolyás általános lefolyási viszonyait.

Ennek alapján a Határ-árok esetében a Hosszúréti-patakhoz hasonló pontosságú előrejelzések várhatóak. Az árhullámok 80%-ában a tetőzés magasságát 15 cm-es pontossággal becsülte a modell, és jól közelíti a tetőzés időpontját, valamint az árhullám fel- és lefutását. A kicsi, alig 14 km<sup>2</sup>-es vízgyűjtő terület működésének megtanulásához a rendelkezésre álló 3,5 év adatai elegendőnek bizonyultak. A pontosságot segíti a csapadékmérőkkel való részletes lefedettség, a csapadékbecslés nagy pontossággal elvégezhető.

Az Aranyhegyi-pataknál ennél rosszabb eredményt kaptunk, csak 60%-ban marad a tetőzés magasságának becslése a 15 cm-es tartományban, valamint a tetőzés időpontjának és az árhullám fel-, illetve lefutásának előrejelzése még bizonytalan. Ennek fő okai, hogy a vízgyűjtő nagy (114 km<sup>2</sup>) és komplex (hat részvízgyűjtőre kellett osztani a legjobb eredmények eléréséhez), illetve csapadékmérővel rosszul lefedett. A csapadékbecslés számítása nagy részben négy mérő alapján történik, míg a jóval kisebb vízgyűjtőjű Határ-ároknál öt mérő van. Emellett kevés árhullámról áll rendelkezésre adat a vízgyűjtő bonyolult viszonyainak megtanulásához.

## **Összefoglalás, javaslatok**

A többéves csapadék- és vízállásidősoroknak köszönhetően lehetővé vált egy neurális hálón alapuló vízállás-előrejelző rendszer kiépítése az FCSM-nél. Az előrejelző rendszer a tapasztalatok szerint a Hosszúréti-patak esetében megfelelően működik. A Határ-árkon az igen gyors lefutású árvizek miatt csak a korai figyelmeztetés valósulhat meg. Az Aranyhegyi-patak esetében a vízgyűjtő terület nagysága és a viszonylag kevés csapadékvízmérő berendezés miatt az előrejelzés egyelőre bizonytalan. Az Aranyhegyi-patak vízgyűjtő területén további csapadékvízmérő állomásokat kell kihelyezni, hogy a terület lefedése és ezzel az előrejelző modell adatellátása javuljon.

Az előrejelzések pontossága a modellek rendszeres, új adatokat is tartalmazó újratanításával folyamatosan javítható. A modellek önálló automatikus újratanulása bár technikailag megoldható lenne, bevezetését két okból nem tervezük. Egyrészt nagy erőforrásigénye miatt nem szeretnénk ezt az éles rendszeren futtatni, másrészt a bemeneti adatok kézi, szakértői ellenőrzése továbbra is szükséges a tanítás előtt.

A továbbfejlesztés egyik lehetősége az SMS-alapú jelzőrendszer kiépítése, amely alkalmazásával egy adott (beállított) vízállás-küszöbérték meghaladása után a rendszer automatikus üzenetet küld az érintetteknek, hogy a szükséges intézkedéseket elvégezhessék.

További fejlesztési lehetőséget jelent a rendszer kiépítése a főváros többi vízfolyásán, vagy akár a csapadékvíz elvezetésében használt csatornahálózaton. Ennek adatait felhasználva hasonló előrejelző rendszer felállítására van lehetőség, a betanításhoz elegendő mennyiségű adat begyűjtését követően.

A csapadékmérők adatai alapján végzett vízállás-előrejelzés alkalmazható vízfolyások, de akár csatornák korai (néhány órás), nowcasting jellegű figyelmeztető rendszerének kialakítására. Az operatív alkalmazásra csak azokban az esetekben kerülhet hatékonyan sor, ahol a reakcióidő erre lehetőséget ad.

## Felhasznált irodalom

1. Watson RT, Core Writing Team, editors. Climate change 2001: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the third assessment report of the IPCC [Internet]. Cambridge: Cambridge University Press; 2001 [cited 2021 Nov 12]. 408 p. Available from: [www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR\\_TAR\\_full\\_report.pdf](http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_TAR_full_report.pdf)
2. Bartholy J, Pongrácz R. Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. Glob Planet Change [Internet]. 2007 May [cited 2021 Nov 12];57(1):83–95. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.002>
3. Chen Y, Xu Y, Yin Y. Impacts of land use change scenarios on storm-runoff generation in Xitiaoxi basin. Quat Int [Internet]. 2009 Oct [cited 2021 Nov 12];208(1–2):121–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2008.12.014>
4. Rácz T, Bana Zs, Székely Á, Szilágyi M. Csapadékmérő hálózat fejlesztése Budapesten. Konferencia-előadás és dolgozat. Magyar Hidrológiai Társaság XXX. Vándorgyűlése, Kaposvár, 2012. július 4–6.
5. Rácz T. Adalékok a Hosszúréti-patak vízjárásához. Konferencia-előadás és dolgozat. Magyar Hidrológiai Társaság XXXIV Vándorgyűlése, Debrecen, 2016. július 6–8.
6. Bailer-Jones CAL, Gupta R, Singh HP. An introduction to artificial neural networks. In: Gupta R, Singh HP, Bailer-Jones CAL, editors. Automated data analysis in astronomy. New Delhi, India: Narosa Publishing House; 2001. p. 51–68.

7. Mehlig B. Machine learning with neural networks. An introduction for scientists and engineers [Internet]. Cambridge: Cambridge University Press; 2021 [cited 2021 Nov 12]. 260 p. DOI: <https://doi.org/10.1017/9781108860604>
8. Liebling TM, Pournin L. Voronoi diagrams and Delaunay triangulations: Ubiquitous siamese twins. Documenta Mathematica. 2012 Jan;18(ISMP):419–431.
9. Di ZW, Maggioni V, Mei Y, Vazquez M, Houser P, Emelianenko M. Centroidal Voronoi tessellation based methods for optimal rain gauge location prediction. J Hydrol. 2020 May;584:124651.