

Sebesség alapú számítási módszer adaptálása hazai kisvízgyűjtőkön az összegyülekezési idő számítására

Nagy Eszter Dóra*

*Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék
(e-mail: nagy.eszter@emk.bme.hu)

DOI:10.59258/hk.13170



Kivonat

Az összegyülekezési idő számszerűsítésére szükség lehet különböző hidrológiai számítások esetén úgymint a racionális módszer alkalmazásakor, vagy csapadék-lefolyás modellezés esetén. Értékének közvetlen megfigyelésére nincs lehetőség, ezért kell különböző eljárások segítségével, közvetett módon számítani. Korábbi vizsgálataim során számos hazai vízgyűjtőre előállítottam esemény alapon, csapadék-lefolyás idősorokból az összegyülekezési idő értékeit, ami jó alapot szolgáltat a hidraulikai alapon számított értékek igazolására. Fontos lenne egy olyan, hidraulikai alapon nyugvó számítási módszertan felderítése, ami nem igényli a csapadék és vízhozam idősorok ismeretét, így a nem mért vízgyűjtőkre is alkalmazható. A közleményben egy olyan, már létező módszertant alkalmazok és mutatok be, ami az áramlási sebesség alapján közelíti az összegyülekezési idő értékét. Érzékenységvizsgálatot követően a korábban csapadék-lefolyás idősorokból számított értékekkel is összevetem a kapott eredményeket hat magyarországi kisvízgyűjtőre. A bemutatott módszer a kapott eredmények alapján nem alkalmas az összegyülekezési idő számítására, aminek lehetséges okai szintén tárgyalásra kerülnek.

Kulcsszavak

Összegyülekezési idő, áramlási sebesség, Manning, racionális módszer, vízgyűjtő, hidrológia.

Applicability of a velocity-based approach for time of concentration estimation in Hungarian catchments

Abstract

The estimation of time of concentration is required for several hydrologic calculations, such as the application of the rational method or rainfall-runoff modeling. Direct measurement of its value is not possible. Therefore, indirect estimation procedures need to be applied. In a previous research, I estimated time of concentration using observed rainfall and runoff time series for several Hungarian catchments. These values provide a sound basis for comparative studies. It would be of great value if a physically-based method, relying solely on hydraulic parameters, would be proven applicable for time of concentration estimation in ungauged basins. I applied an existing velocity-based approach for six Hungarian catchments and compared the result with the values derived in previous studies using rainfall-runoff data. The presented method could not produce similar values to the latter. Therefore, it is not applicable to estimate time of concentration in ungauged catchments. The reasons behind the presented method's dysfunctionality are also discussed.

Keywords

Time of concentration, velocity, Manning, rational method, catchment, hydrology.

BEVEZETÉS

Az összegyülekezési idő fogalma, illetve annak használata a racionális módszerrel egyidős, így története legalább 150 évre vezethető vissza (Beven 2020). Ennek ellenére napjainkban is élénk kutatási tevékenység övezi ezt a hidrológiai jellemzőt nemzetközi és hazai viszonylatban is (Grimaldi és társai 2012, Michailidi és társai 2018, Beven 2020, Nagy és társai 2021, Nagy és társai 2022). Meghatározásával és értelmezésével kapcsolatban alapvető, koncepcionális szintű problémák vetődnek fel a mai napig (Beven 2020). Az összegyülekezési idő meghatározása a vízgyűjtők csapadékra adott válaszában számszerűsítésekor fontos szerepet játszik. A racionális módszer mellett különböző csapadék-lefolyás modellek is alkalmazzák az egységárhullámkép módszeren (Kontur és társai 2003) keresztül. Értéke alapvetően befolyásolja az adott csapadék hatására kialakuló, modellezett árhullám alakját és tetőző vízhozamát is.

Az összegyülekezési idő csak az egyik a vízgyűjtők válaszüzenetét számszerűsítő paraméterek közül. A vízgyűjtők válaszüzenete kifejezhető továbbá az egyensúly beálltáig eltelt idővel, az árhullám késleltetési idővel, valamint a tetőzésig eltelt idővel is. Beven (2020) részletesen ismerteti,

hogy az összegyülekezési idő és az egyensúly beálltáig eltelt idő közötti számottevő különbség az, hogy előbbit az áramlási sebesség, míg utóbbit a hullámterjedési sebesség alapján számítjuk. Ebből adódóan az összegyülekezési idő jellemzően hosszabb, mint az egyensúly beálltáig eltelt idő. Ebben a közleményben azért tárgyalom kifejezetten az összegyülekezési idő számítását, mert az alkalmazott módszer kimondottan az áramlási sebességre alapoz, így az összegyülekezési időt adja eredményül.

Az összegyülekezési idő becsülésére számos megközelítés létezik, azonban nincs általánosan elfogadott módszertan. Értékének meghatározása történhet a) mérésen keresztül, b) fizikai alapon és c) félempirikus/empirikus módszerekkel (Nagy és Szilágyi 2021). Mérésnek tekintjük a laboratóriumban, kisminta modelleken, illetve a valódi vízgyűjtőkön, jelzőanyag felhasználásával végzett kísérleteket. Ezen módszerek hátránya, hogy költségesek, illetve a kisminta modelleken végzett kísérletek eredményei nehezen ültethetők át a valódi vízgyűjtőkre (Gaál és társai 2012). Ugyan közvetett módon, de mérésnek tekinthetjük a vízgyűjtőn rögzített csapadék, illetve a vízhozam idősorokból levezetett értékeket is. A fizikai (avagy hidraulikai)

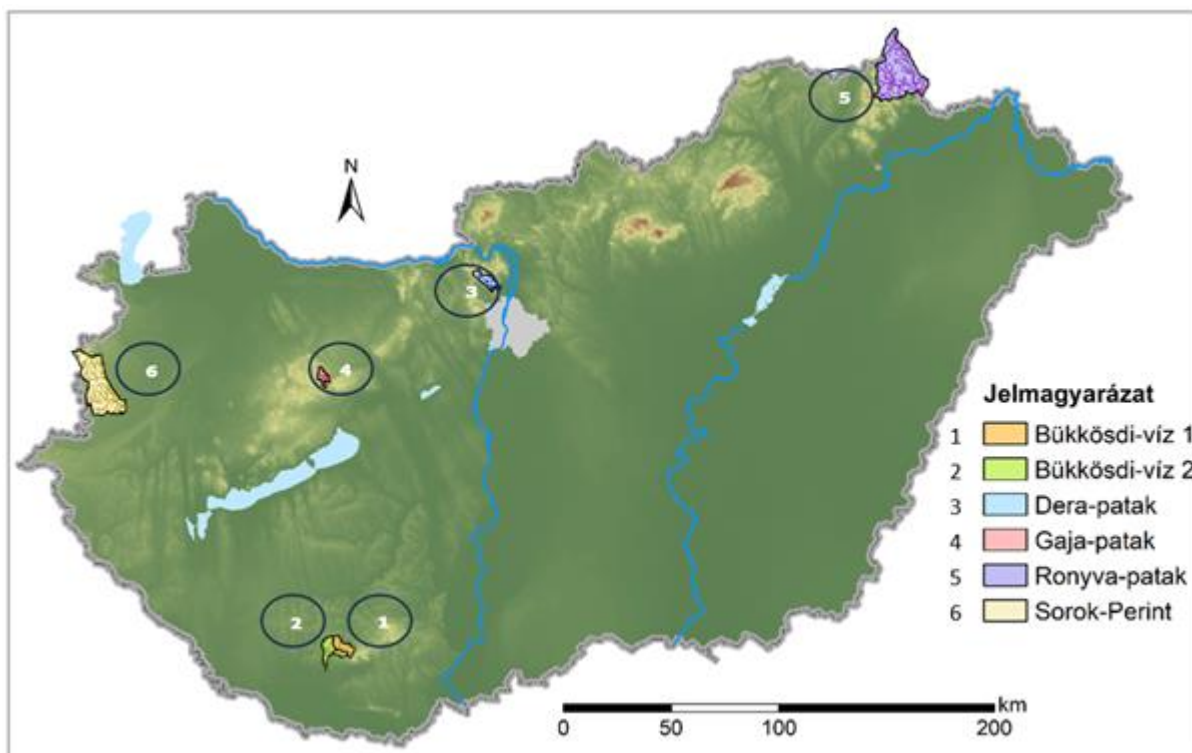
alapon történő számítás esetén fontos megkülönböztetni, hogy a felhasznált alapegyenletek az áramlási sebességet vagy a hullámterjedési sebességet veszik alapul. Számos empiria, illetve félempíria lelhető fel a szakirodalomban, és az ilyen összefüggések becslési pontosságát összehasonlító tanulmányok száma is jelentős (Almeida és társai 2014, Nagy és társai 2016, Salimi és társai 2017, Azasian 2018, Ravazzani és társai 2019). A félempirikus összefüggések leggyakrabban a Chézy összefüggés módosításából születnek, míg az empirikus összefüggéseket tisztán statisztikai alapon állítják elő. Korábbi kutatásaimban részletesen foglalkoztam az empirikus összefüggések, valamint a csapadék, illetve vízhozam idősorokból történő meghatározás vizsgálatával (Nagy 2022).

Jelen közleményben a fizikai alapú megközelítés egy alkalmazására hozok példát, megelőző munkám kiegészítéseként. A bemutatott vizsgálatok fő célja, hogy összehasonlítsa a fizikai alapon számított összegyülekezési idő értékét (a továbbiakban: sebesség alapú módszer) a csapadék-lefolyás idősorokból kapott értékekkel (a továbbiakban: idősor alapú módszer). Az idősor alapú módszerrel korábban már előállítottam számos hazai vízgyűjtő csapadék-lefolyás eseményeire az összegyülekezési idő megfigyelt értékét (Nagy és Szilágyi 2021). A sebesség alapú

módszer azonban újonnan került alkalmazásra. A Michailidi és társai (2018) által alkalmazott módszertant véve alapul az áramlási sebességre alapozva is számítottam a válaszidő értékét. Ennek a módszernek az előnye, hogy csupán morfológiai és hidraulikai jellemzők felhasználásával – mért csapadék és vízhozam nélkül is – számítani tudjuk az összegyülekezési idő értékét. Kérdés azonban, hogy az így kapott értékek egyeznek-e a mért vízgyűjtőkön, az idősor alapú módszerrel kapott, megfigyelt értékekkel? A sebesség alapú módszer érzékenységvizsgálatát követően összehasonlítottam a két eljárással kapott értékeket, amiből látható volt, hogy a két módszer jelentősen eltérő eredményre vezet. Ebből adódóan a módszer önmagában alkalmatlan a nem mért vízgyűjtők összegyülekezési idejének becslésére.

VIZSGÁLT VÍZGYŰJTŐK

A korábbi vizsgálatok során összesen 61 hazai kisvízgyűjtőt vizsgáltam. Ezek közül választottam ki hat olyan vízgyűjtőt, melyek változatos tulajdonságokkal rendelkeznek morfológiájukat (beleértve méretüket, alakjukat és esésüket), antropogénitásukat és földrajzi elhelyezkedésüket tekintve is. A választott vízgyűjtők méretét és földrajzi helyzetét az 1. ábra szemlélteti, míg néhány fontosabb tulajdonságukat az 1. táblázat tartalmazza.



1. ábra. A vizsgált vízgyűjtők földrajzi elhelyezkedése
Figure 1. Location of the study catchments

1. táblázat. A vizsgált vízgyűjtők jellemzői: terület, maximális szintkülönbség, leghosszabb lefolyási úthossz, domináns talajképző kőzet, és a területhasználat megoszlása

Table 1. Properties of the study catchments: catchment area, maximum difference in elevation, length of the longest flowpath, dominant soil parent material, land use ratios

Vízfolyás neve	Kifolyási szelvény helye	Vízgyűjtő terület	Maximális szintkülönbség	Leghosszabb lefolyási úthossz	Domináns talajképző kőzet	Területhasználat: település/erdős/mezőgazdasági
		km ²	m	km		%
Bükkösdi-víz	Hetvenhely	46,1	402	15,3	Lössös üledékek	1,28/55,6/43,12
Bükkösdi-víz	Szentlőrinc	112	444	28,8	Lössös üledékek	0,849/36,5/62,6
Dera-patak	Pomáz	49,7	638	20,4	Andezit, bazalt, riolit	11,2/57,9/30,9
Gaja-patak	Bakonyháza	28,5	214	10,4	Lössös üledékek	0,456/25,3/74,3
Ronyva-patak	Sátoraljaújhely	451	792	42,1	Galciális és alluviális üledékek	2,89/16,8/80,4
Sorok-Perint	Szombathely	354	170	50,1	Harmadkori és idősebb üledékek	2,82/3,30/93,9

A választott vízfolyások a Bükkösdi-víz két különböző szelvényben (Hetvenhely és Szentlőrinc), valamint a Dera-, Gaja-, Ronyva-patakok és a Sorok-Perint. Ezen vízfolyások (az 1. táblázatban feltüntetett kifolyási szelvényekhez tartozó) vízgyűjtő területei 28,5-451 km²-es mérettartományban mozognak. A maximális szintkülönbség a vízgyűjtőkön belül 170-638 m között változik, míg a leghosszabb lefolyási úthossz 10,4-50,1 km. A vizsgált vízfolyások vízgyűjtő területén különböző a domináns (azaz legnagyobb arányban jelenlévő) talajképző kőzet, illetve a különböző (erdős, mezőgazdasági és települési) területhasználatok aránya is változó. A választott vízgyűjtők változatlansága a kapott eredmények reprezentativitását hivatott növelni. A korábban vizsgált vízgyűjtők közül azért vizsgáltam csupán hat vízgyűjtőt, mert az új módszer alkalmazásához szükséges paraméterek felvétele időigényes, a módszert elsőként a vízgyűjtők egy részhez tartottam célszerűnek tesztelni.

MÓDSZERTAN

A sebesség alapú módszer a leghosszabb lefolyási úthossz mentén kialakult áramlási sebesség alapján becsli az összegyűlekezési idő értékét, tetszőleges lefolyásképző csapadék esetén. A módszernek megfelelően fel kell osztani a vizsgált vízgyűjtő leghosszabb lefolyási úthosszát a nagyobb mellékvízfolyások mentén. Az így kapott részvízgyűjtők, illetve vízfolyásszakaszok tulajdonságait felhasználva aztán számítható az összegyűlekezés ideje a racionális módszerre, a Manning összefüggésre és az úgynevezett NRCS (National Research Conservation Service) módszerre (NRCS 2010) alapozva.

Az NRCS módszer az Egyesült Államokban fejlesztett és szabványosan használt módszer, ami a magyar műszaki gyakorlatban is meghonosodott (*Környezetvédelmi és Vízgazdálkodási Minisztérium 1988*). Ezen eljárás szerint a vízgyűjtő legfelső szakaszán sekély, koncentrált áramlás formájában történik az összegyűlekezés, ami a következő egyenlettel írható le:

$$t_1 = \frac{L_1}{V_1} = \frac{L_1}{k\sqrt{S_1}} \quad (1)$$

ahol t_1 (s) a legfelső vízgyűjtő összegyűlekezési ideje, V_1 (m/s) a felszíni összegyűlekezéshez tartozó áramlási sebesség, L_1 (m) a lefolyás hossza, S_1 (m/m) az átlagos esés a lefolyási hossz mentén, és k (m/s) a vízgyűjtő érdessége. A lefolyási hossz a leghosszabb lefolyási útvonal azon szakasza, mely a vízgyűjtő mederhálózatának legfelső, azaz kezdőpontjait tart. Az átlagos esés ezen szakasz kezdő és végpontjai között a szintkülönbség és L_0 hossza alapján számítható. A vízgyűjtő érdessége a területhasználat alapján vehető fel.

A legfelső vízgyűjtőt követően már mederbeli lefolyás (avagy összegyűlekezés) feltételezhető, így a Manning összefüggésből számítható az áramlási sebesség, valamint az összegyűlekezés ideje az egyes mederszakaszokon. A Manning összefüggés alkalmazásához azonban szükség van az adott szakasz vízhozamára is, ennek számításához szükséges alkalmazni a racionális módszert. Fontos kiemelni, hogy – a hazai gyakorlatól eltérően – a racionális módszer eredeti formájában a vízgyűjtőt érő csapadékmagasságot tekinti állandónak (*Grimaldi és társai 2012*), nem a csapadék intenzitást. Tehát $Q = C \cdot P/T_c \cdot A$, ahol Q (m³/s) a vízhozam, C (-) a lefolyási tényező, P (m) a teljes csapadék, T_c (hr) az összegyűlekezési idő és A (m²) a vízgyűjtő terület. A lefolyásképző csapadék [$P_e = C \cdot P$ (m)] nagyságát felvéve, tetszőleges csomópontra a következőképpen írhatjuk fel a vízhozam képletét a racionális módszer alapján:

$$Q_i = \frac{P_e \sum_{i=1}^N A_i}{\sum_{i=1}^N t_i} \quad (2)$$

ahol Q_i (m³/s) az i -edik csomópontba érkező vízhozam, N a csomópontok, illetve részvízgyűjtők száma, A_i (m²) az i -edik részvízgyűjtő területe, és t_i (s) a mederbeli lefolyás ideje az i -edik vízfolyásszakaszon. Utóbbi a Manning képletből számított sebesség alapján számítható:

$$t_i = \frac{L_i}{V_i} = \frac{n_i L_i}{R_i^{2/3} J_i^{1/2}} \quad (3)$$

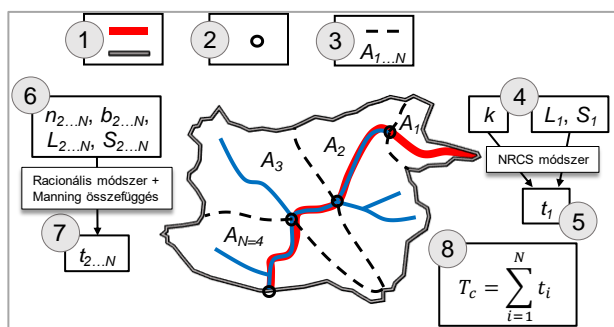
ahol L_i (m) az i -edik vízfolyásszakasz hossza, V_i (m/s) az i -edik vízfolyásszakaszon az áramlási sebesség, n_i (s/m^{1/3}) az i -edik szakaszon a meder érdessége, R_i (m) az i -edik vízfolyásszakasz hidraulikus sugara és J_i (m/m) az i -edik vízfolyásszakasz átlagos esése. A hidraulikus sugarat egyszerűsítve téglalap szelvénnel közelíthetjük. Ezzel a feltevéssel élve a hozam a következő összefüggéssel számítható:

$$Q_i = \frac{J_i^{1/3} b_i^{5/3} y_i^{5/3}}{(b_i + 2y_i)^{2/3}} \quad (4)$$

ahol b_i (m) a meder szélessége az i -edik szakaszon és y_i (m) az áramlási mélység az i -edik mederszakaszon. Utóbbi iteratív módon számolható a vízhozam és az ismert hidraulikai paraméterek felhasználásával, ezt követően már számítható a (3) összefüggés alapján az i -edik szakaszhoz tartozó mederbeli lefolyás ideje.

Egy vízgyűjtő terület összegyülekezési idejének meghatározásához a fent ismertetett számítási eljárás szerint a következő lépéseket szükséges végrehajtani:

1. Vízgyűjtő terület lehatárolása és a (geometriailag) leghosszabb lefolyási úthossz meghatározása.
2. A vízgyűjtő terület és a leghosszabb lefolyási úthossz felosztása a nagyobb mellékvízfolyások mentén.
3. Részvízgyűjtők területeinek meghatározása.
4. Legfelső vízgyűjtő érdességének felvétele a terület-használat alapján és a meder kezdetéig (első töréspontig) tartó lefolyási hossz és az esés meghatározása.
5. Összegyülekezési idő számítása az NRCS módszerrel a legfelső vízgyűjtőre.
6. A mederbeli lefolyás hidraulikai paramétereinek (hossz, esés, érdesség, mederszélesség) meghatározása.
7. Az összegyülekezési idő számítása minden vízfolyásszakaszra a racionális módszer és a Manning összefüggés alapján.
8. A teljes vízgyűjtő összegyülekezési idejének meghatározása a legfelső vízgyűjtőhöz és a mederszakaszokhoz tartozó időtartamok összegzésével, azaz $T_c = \sum_{i=1}^N t_i$.



2. ábra. A sebesség alapú módszer számítási lépéseinek sematikus ábrázolása

Figure 2. Scheme of the velocity-based method's calculation steps

A vizsgált vízgyűjtők területét és a leghosszabb lefolyási úthosszt az ArcGIS térinformatikai szoftver ArcHydroTools eszközrendszerével határoztam meg az

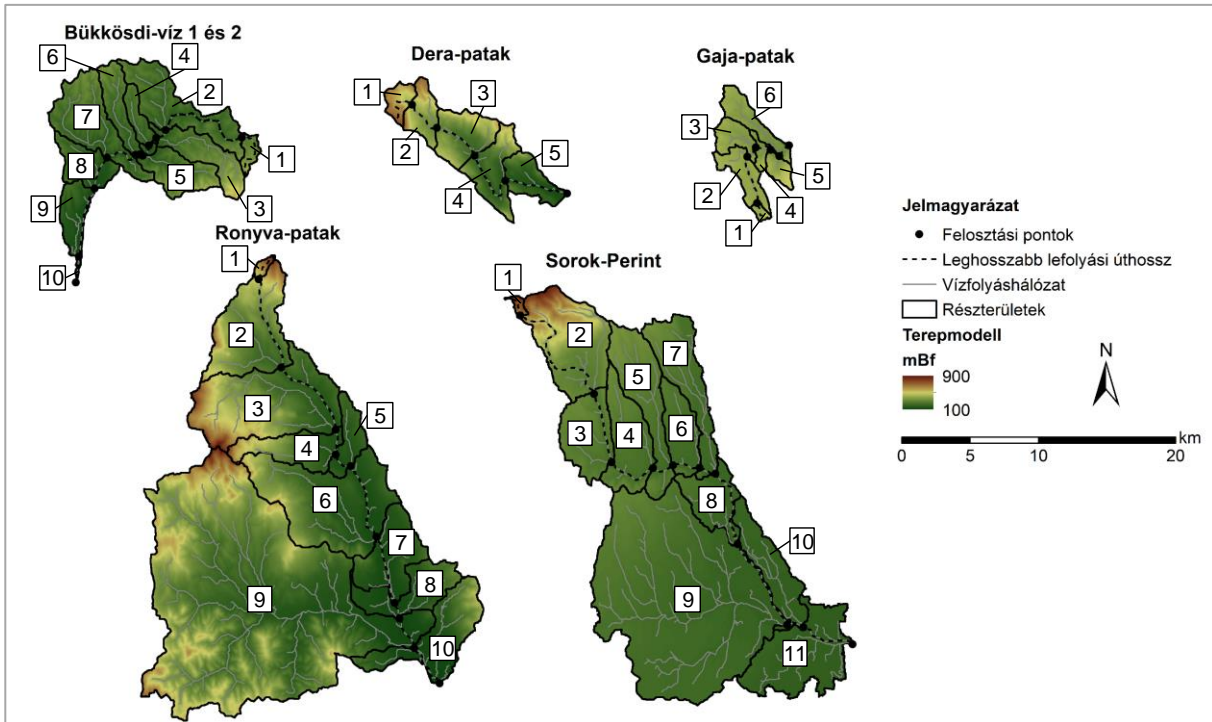
EU-DEM terepmodell alapján (*EU-DEM*). A leghosszabb lefolyási úthossz felosztása szubjektív módon történt, mert ehhez nem áll rendelkezésre objektív eljárás. A mederbeli lefolyás kezdőpontját digitalizált mederhálózati térkép alapján vettem fel. A legfelső vízgyűjtő terület érdességét a Corine területhasználati térkép (*Corine Land Cover*) és szakirodalmi ajánlások (*Haan és társai 1994, Michailidi és társai 2018*) felhasználásával tudtam meghatározni. A mederszakaszok hosszát és esését (utóbbit a szakaszok kezdő- és végpontja közötti szintkülönbség és a hossz alapján) a terepmodell alapján definiáltam. A mederszakaszok szélességét és érdességét műholdfelvételek, helyszíni szemle és tapasztalati adatok alapján határoztam meg. Így utóbbi két paraméter értéke tekinthető a legbizonytalanabbnak. Az összegyülekezési idő számítása végül MATLAB környezetben történt, egy erre a célra megírt algoritmus segítségével.

Mint a módszertan ismertetéséből is látható, számos paraméter meghatározását jelentős bizonytalanság terhelheti. Ennek hatását a számított összegyülekezési időre érzékenységvizsgálaton keresztül számszerűsítettem. A paramétereket három kategóriába soroltam. A vízgyűjtők területe, a lefolyási hosszak és az esés a megbízhatóan felvehető paraméterek közé, az érdességek (legfelső részvízgyűjtő és mederszakaszok) a bizonytalan paraméterek közé, míg a mederszélesség a nagyon bizonytalan paraméterek közé tartozott. Ezen kategóriákra rendre maximum abszolút 10%, 20%, illetve 50% becslési pontatlanságot tételiztem fel, majd Monte-Carlo megközelítést alkalmazva nagy számban (egymillió kombinációt előállítva) véletlenszerűen hibával terheltem az összes paraméter értékét. A véletlenszerűen felvett hiba értéke egyenletes eloszlást követett. Minden ilyen hibával terhelt paraméterkombinációra számítottam az összegyülekezési idő értékét, így alkotva képet a módszer érzékenységéről.

A vizsgálatok legfontosabb pontja az, hogy a kapott eredmények összehasonlíthatók a korábban, idősor alapú módszerrel meghatározott értékekkel. Az összegyülekezési idő értéke ebben az esetben árhullámonként, egy-egy eseményre, a mért csapadék és vízhozam idősorok alapján került számításra. A figyelembe veendő időtartam a lefolyásképző csapadék és a felszíni lefolyás vége (avagy az árhullám apadó ágának inflexiós pontja) között eltelt időtartam. Ezen értékek előállításának pontos menete egy korábbi közleményben (*Nagy és Szilágyi 2021*) ismertetésre került. Az összehasonlítás végzéséhez az egyes eseményeknél számított átlagos lefolyásképző csapadékot felhasználva számítottam az új módszerrel az összegyülekezési idő értékét.

EREDMÉNYEK

A vízgyűjtő lehatárolás és felosztás eredményeként kapott részterületeket és szakaszokat a 3. ábra szemlélteti, a fent ismertetett módon meghatározott paramétereket pedig a 2. táblázat tartalmazza számszerűen. A legfelső vízgyűjtők érdessége a nagyon hasonló, mezőgazdasági-erdős vegyes területhasználat miatt minden esetben 1,7 m/s. Az érdességi együttható értékét 0,025 és 0,05 s/m^{1/3} között vettem fel, míg a mederszélesség egy métertől maximum négy méterig növekszik az alvíz felé haladva.



3. ábra. Vizsgált vízgyűjtők felosztása a nagyobb mellékvízfolyások mentén.
Figure 3. Sub-reaches and sub-catchments corresponding to the defined split points

2. táblázat. A Michailidi-féle módszertan alkalmazásához szükséges hidraulikai paraméterek
Table 2. Hydraulic parameters derived to apply Michailidi's method

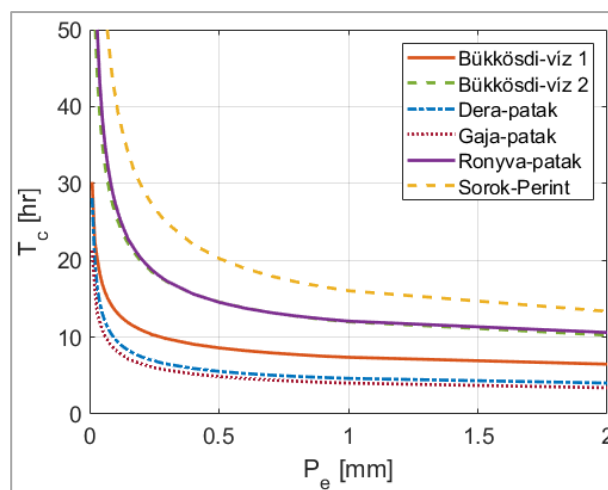
Rész-terület	A_i (km ²)	L_i (km)	J_i (m/m)	n_i (s/m ^{1/3})	b_i (m)
Bükkösi-víz 1					
1	5,05	1,01	0,1830	0,025	1
2	0,836	0,822	0,0840	0,03	2
3	23,4	1,06	0,0026	0,03	2
4	2,78	8,04	0,0006	0,04	2
5	13,9	4,32	0,0012	0,04	2
Bükkösi-víz 2					
1	2,78	1,99	0,0931	0,025	1
2	23,4	5,48	0,0126	0,03	2
3	13,9	2,64	0,0011	0,03	2
4	5,05	2,79	0,0018	0,04	2
5	13,8	0,352	0,0142	0,04	2
6	9,78	1,33	0,0006	0,04	2
7	23,4	0,822	0,0131	0,04	2
8	10,4	1,06	0,0104	0,05	3
9	8,91	8,04	0,0020	0,05	3
10	0,409	4,32	0,0005	0,05	4
Dera-patak					
1	4,46	5,23	0,0643	0,025	1
2	7,92	5,45	0,0163	0,03	2
3	14,0	3,91	0,0274	0,03	2
4	13,7	2,85	0,0166	0,04	2
5	9,65	2,93	0,0131	0,04	2
Ronyva-patak					
1	1,34	4,39	0,0829	0,025	1
2	33,4	2,65	0,1101	0,03	2
3	52,1	1,28	0,0343	0,03	2
4	15,3	5,53	0,0015	0,04	2
5	8,87	6,67	0,0005	0,04	2
6	53,0	1,64	0,0082	0,04	2
7	20,7	2,29	0,0035	0,04	2
8	17,5	7,27	0,0002	0,05	3
9	224	7,73	0,0004	0,05	3
10	25,3	2,61	0,0027	0,05	4
Sorok-Perint					
1	1,10	4,39	0,0522	0,025	1
2	34,5	1,52	0,2389	0,03	2
3	19,7	8,16	0,0033	0,03	2
4	21,3	6,82	0,0021	0,04	2
5	25,6	1,45	0,0036	0,04	2
6	14,0	2,19	0,0028	0,05	2
7	23,7	1,79	0,0018	0,04	2
8	14,8	4,18	0,0030	0,05	3
9	147	5,64	0,0023	0,05	3
10	18,6	11,6	0,0002	0,05	4
11	34,2	2,33	0,0020	0,05	4

Gaja-patak					
1	1,07	1,25	0,0775	0,025	1
2	7,84	0,916	0,0327	0,03	2
3	5,96	1,32	0,0234	0,03	2
4	2,06	1,14	0,0121	0,04	2
5	3,49	3,90	0,0035	0,04	2
6	8,08	1,90	0,0068	0,04	2

A sebesség alapú módszer alkalmazása révén előállítható a lefolyásképző csapadék és az összegyülekezési idő összefüggése minden vízgyűjtőre (4. ábra). A leghosszabb összegyülekezési idők a Sorok-Perint, míg a legrövidebbek a Gaja-patak esetén adódtak. A Bükkösi-víz szentlőrinci szelvényében és a Ronyva-patakon szinte azonos eredményeket adott a módszer. Látható, hogy a görbék meredeksége a lefolyásképző csapadék növekedésével drasztikusan csökken, a közel konstans összegyülekezési idő más-más lefolyásképző csapadék esetén alakul ki. Az is megfigyelhető, hogy nem a legnagyobb területű vízgyűjtő esetén adódik a leghosszabb összegyülekezési idő, ami a maximális szintkülönbség (ebből adódóan az esés) számotvető különbségével (lásd 1. táblázat) magyarázható.

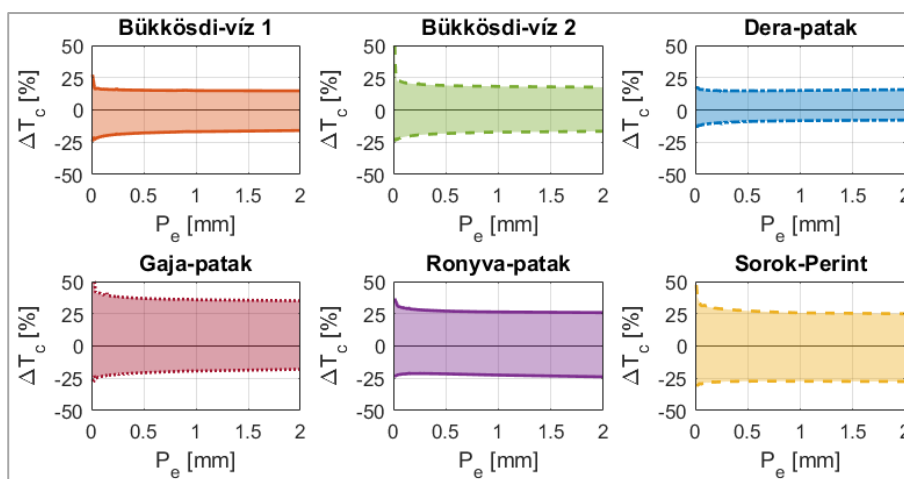
Az érzékenységvizsgálat eredményeként minden lefolyásképző csapadék és minden vízgyűjtő esetén előállt az összegyülekezési idők eloszlása a perturbált paramétereknek megfelelően. Az 5. ábrán ezen értékkészletek tizedik és kilencvenedik percentilise alapján meghatározott relatív változást [ΔT_c (%)] tüntettem fel minden vízgyűjtőre. A legkisebb hibásáv a Dera-patakon adódott, míg a legnagyobb a Gaja-patakon. A szimmetrikus perturbáció ellenére a relatív hiba sávja nem minden esetben szimmetrikus, a Dera- és Gaja-patakok esetében közel kétszer akkora

hiba alakulhat ki pozitív, mint negatív irányban. A hibásáv szélessége csak a nagyon kicsiny lefolyásképző csapadékok esetén ugrik meg drasztikusan, 0,1 mm felett közel konstansnak tekinthető.



4. ábra. Lefolyásképző csapadék (P_e) és a számított összegyülekezési idő (T_c) összefüggése

Figure 4. Relationship between the effective precipitation (P_e) and the calculated time of concentration (T_c)

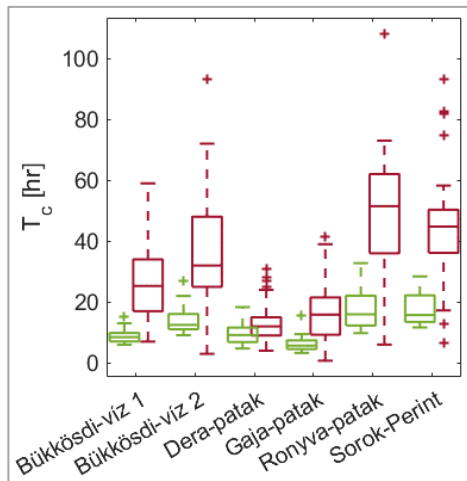


5. ábra. Az érzékenységvizsgálat eredményeként adódó relatív változás az összegyülekezési idő értékében, ahol a feltüntetett sávok alsó és felső határát a tizedik és kilencvenedik percentilisekhez tartozó értékek jelölik ki

Figure 5. The relative change in the value of time of concentration yielded by the sensitivity analysis, where the boundaries are given by the 10th and 90th percentiles

Az idősor alapú módszerrel kapott eredményeket és a sebesség alapú módszerrel kapott értékeket a 6. ábra szemlélteti. A sebesség alapú módszerrel kapott értékek mediánja egyedül a Dera-patak esetén ad jó közelítést az idősor alapú módszerrel kapott értékek medi-

ánjára. Az értékkészlet szórása minden vízgyűjtő esetén jelentősen nagyobb az idősor alapú módszert alkalmazva, mint a sebesség alapú eljárás esetén. Utóbbi módszer minden esetben rövidebb összegyülekezési időt ad eredményül.



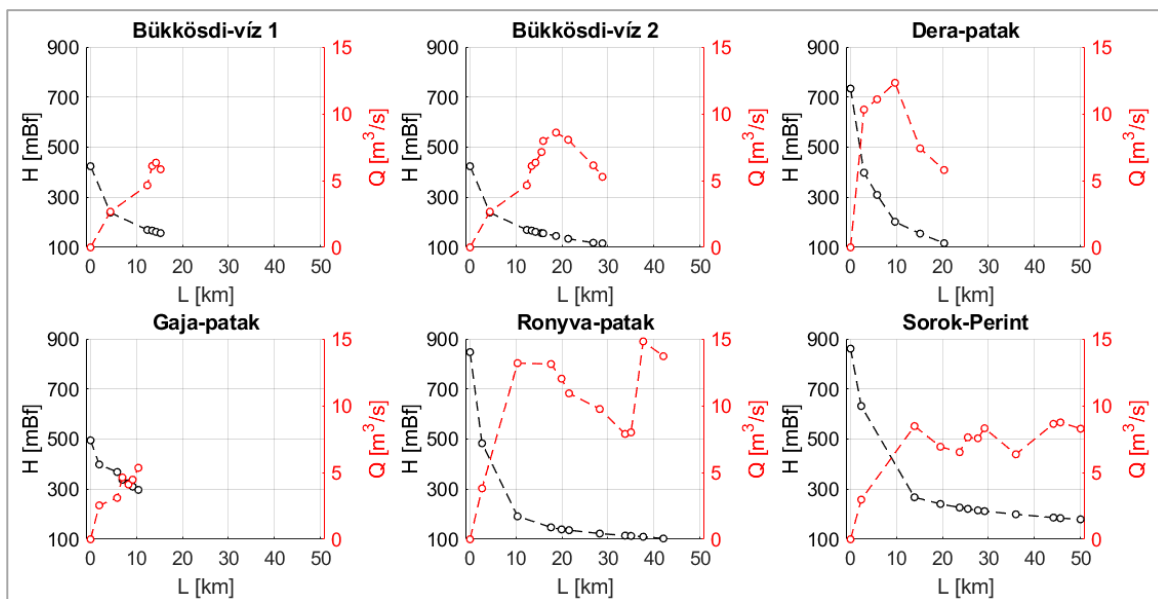
6. ábra. A sebesség alapú módszerrel (zöld, balra), valamint az idősor alapú módszer segítségével (bordó, jobbra) számolt összegyülekezési idők értékeinek dobozdiagramjai
Figure 6. Boxplots of the time of concentration values calculated based on flow velocity (green, left) and using observed precipitation and runoff time series (red, right)

DISZKUSSZIÓ

A sebesség alapú módszer alkalmazása kapcsán több probléma is felvetődött. Az első, gyakorlati jellegű észrevétel az, hogy az eljárás alkalmazása nagyszámú (több tucat)

vízgyűjtőn körülményes, ugyanis minden vízgyűjtőre elő kell állítani a lehatárolt vízgyűjtőt, majd a vízgyűjtő felosztását. Ezt követően pedig a legpontosabb eredmény elérése érdekében célszerű volna helyszíni bejárást követően meghatározni a mederszélességet és felvenni az érdességet. Emellett fontos megjegyezni, hogy az érdesség egy szeri meghatározása nem feltétlen elegendő, hiszen annak évszakos változása jelentős lehet.

Érdekes aspektusa továbbá a módszernek, hogy jellemből adódóan nem eredményez növekvő vízhozam értékeket a vízfolyás mentén. Ez annak tudható be, hogy az egyes szelvények (illetve vízfolyásszakaszok) hozamai a racionális módszer alapján, a (2) összefüggéssel kerülnek számításra. Egy milliméteres lefolyásképző csapadékot feltételezve a 7. ábrán látható vízhozam profilokat kapjuk az egyes vízgyűjtőkre. Minden vízfolyás esetén tapasztalható vízhozamcsökkenés a vízgyűjtő terület növekedésével. A vízhozam csökkenése alvízi irányba haladva önmagában nem elfogadhatatlan jelenség, azonban például a Ronyva-patakra adódó profil meglehetősen szokatlan és hidrológiai értelemben nem indokolt, kifejezetten annak tükrében, hogy az alkalmazott eljárás semmilyen vízkivétel vagy felszín alatti folyamatot nem vesz figyelembe. Ennek fényében kérdéses, hogy az összegyülekezési időt vajon mennyire reálisan adja vissza a módszer.



7. ábra. A meder, illetve a módszer során számított vízhozamok hossz-szelvényei $i_e = 1 \text{ mm}$ esetén
Figure 7. Longitudinal elevation and discharge profiles when effective precipitation is 1 mm

Hidraulikai szempontból két aspektus emelhető ki. Az első, hogy a Manning összefüggés alkalmazásakor prizmatikus medret feltételezünk, azonban a leghosszabb lefolyási úthossz felosztásakor kapott szakaszokon nem feltétlenül állandó a medergeometria. A másik probléma magával a leghosszabb lefolyási úthosszal kapcsolatos. A terepmodell alapján a geometriai értelemben vett leghosszabb utat tudjuk meghatározni, azonban ez nem feltétlenül egyezik a hidraulikai értelemben leghosszabb úthosszal. Utóbbi csak úgy található meg ha különböző (hidraulikai szempontból hosszabbnak feltételezett) útvonalak mentén is alkalmazzuk az eljárást, ami időigényes feladat.

A kapott lefolyásképző csapadék-összegyülekezési idő görbék jól szemléltetik a különböző paraméterek fontosságát, hiszen nem a legnagyobb területű vízgyűjtőre adódtak a leghosszabb összegyülekezési idők. Az esés jelentősen befolyásolja az áramlási sebességet, így az összegyülekezési idejét is. Ezzel magyarázható, hogy a lényegesen nagyobb területű és esésű Ronyva-patak görbéje szinte egybeesik a nála sokkal kisebb, de lankásabb Bükkösd-víz görbéjével.

Az érzékenységvizsgálat alapján kijelenthető, hogy a hidraulikai paraméterek meghatározásakor nem véthetünk

olyan nagyságrendű hibát, ami nagyobb lenne, mint a csapadék-lefolyás események vizsgálatok kapott értékek szórása. A becslési hibák halmozásával sem haladta meg jelentősen a relatív hiba abszolút értéke a 25%-ot. Jelen vizsgálatok során nem tértem ki a vízgyűjtő felosztásából adódó bizonytalanságra, ami alapvetően akkor jelentős, ha túl kevés csomópontot veszünk fel (*Michailidi és társai 2018*). Az általam meghatározott csomópontok száma (a vízgyűjtők méretéhez viszonyítva) jól egyezett a *Michailidi és társai* (által felvett csomópontok számával).

Az idősor alapú módszerrel kapott értékekkel nem mutattak jó egyezést a sebesség alapú módszerrel kapott értékek. Előbbiek megbízhatósága már korábban bizonyításra került (*Nagy és társai 2022*), ezért a Michailidi-által javasolt sebesség alapú eljárást tartom alkalmatlannak az összegyülekezési idő becslésére. Emellett szól továbbá, hogy a módszertan részben a racionális módszerre alapoz, melynek egyik feltételezése, hogy a vízgyűjtőt időben és térben homogén, az összegyülekezési idővel azonos (vagy hosszabb) időtartamú csapadék éri. Ez a feltételezés egy bizonyos vízgyűjtő méretig megállja a helyét, azonban a vizsgáltak között 224 km²-es részvízgyűjtő terület is szerepel (lásd Ronyva-patak, 2. táblázat), amire már nem érvényes ez a feltételezés.

A módszertan továbbfejlesztéseként érdemes lenne vizsgálni, hogy jobb eredményt kapunk-e, amennyiben a vízhozamokat realisabban vesszük fel. Ez jelentheti a nagyobb vízgyűjtők további felbontását kisebb részvízgyűjtőkre, vagy akár a racionális módszer leváltását egy aktuális, empirikus módszerre (*Koris 2021*). A fejlesztés azonban nem garantálja az eredmények javulását, és a módszertan munkagényességét is csak tovább növelné. A nem mért vízgyűjtők összegyülekezési idejének hidraulikai alapon történő becslésére tehát érdemes további módszereket vizsgálni a jövőben.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A közlemény a Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-4-I-BME-39 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

IRODALOMJEGYZÉK

Almeida, I.K., Almeida, A.K., Anache, J.A.A., Steffen, J.L., Sobrinho, T.A. (2014). Estimation on time of concentration of overland flow in watersheds: a review. *Geociências (São Paulo)* 33(4). pp. 661-671.

Azizian, A. (2018). Uncertainty Analysis of Time of Concentration Equations based on First-Order-Analysis (FOA) Method. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(1). pp. 327-341. <https://doi.org/10.3844/ajeassp.2018.327.341>

Beven, K.J. (2020). A history of the concept of time of concentration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24. pp. 2655-2670.

Corine Land Cover: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc2018?tab=download>

EU-DEM: <https://land.copernicus.eu/imagery-%20in-situ/eu-dem/eu-dem-v1.1>

Gaál, L., Szolgay, J., Kohnová, S., Parajka, J., Merz, R., Viglione, A., Blöschl, G. (2012). Flood timescales: Understanding the interplay of climate and catchment processes through comparative hydrology. *Water Resources Research*, 48(4). <https://doi.org/10.1029/2011WR011509>

Grimaldi, S., Petroselli, A., Tauro, F., Porfiri, M. (2012). Time of concentration: a paradox in modern hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 57(2). pp. 217-228.

Grimaldi, S., Petroselli, A. (2015). Do we still need the Rational Formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins. *Hydrological Sciences Journal*, 60. pp. 67-77. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.880546>

Haan, C.T., Barfield, B.J., Hayes, J.C. (1994). Design hydrology and sedimentology for small catchments. London: Academic Press.

Kontur I., Koris K., Winter J. (2003). Hidrológiai Számítások. 3. kiadás, Linográf Kft., Gödöllő.

Koris K. (2021). Magyarország kisvízfolyásainak árvizei. Országos Vízügyi Főigazgatóság, Budapest.

Környezetvédelmi és Vízgazdálkodási Minisztérium (1988). Belterületi vízrendezés, csapadékvízvezető hálózat, MI-10-455/2-1988.

Michailidi, E.M., Antoniadis, S., Koukouvinos, A., Bacchi, B., Efstratiadis, A. (2018). Timing the time of concentration: shedding light on a paradox. *Hydrological Sciences Journal*, 63(5). pp. 721-740.

Nagy E.D., Torma P., Bene K. (2016). Comparing methods for computing the time of concentration in a medium-sized Hungarian catchment. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 24(4). pp. 8-14. <https://doi.org/10.1515/sjce-2016-0017>

Nagy E.D., Szilágyi J., Torma P. (2021). Assessment of dimension-reduction and grouping methods for catchment response time estimation in Hungary. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 38. <http://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100971>

Nagy E.D., Szilágyi J. (2021). Összegyülekezési idő meghatározása mért idősorok és empirikus módszerek segítségével. *Hidrológiai Közöny*, 101(1). pp. 19-32.

Nagy E.D., Szilágyi J., Torma P. (2022). Estimation of catchment response time using a new automated event-based approach. *Journal of Hydrology*, 128355. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128355>

Nagy E.D. (2022). Response time estimation in small and medium-sized catchments of Hungary, Budapest, PhD értekezés.

NRCS (National Research Conservation Service) (2010). Time of concentration. In: National engineering handbook, Part 630 hydrology, chapter 15. Washington, DC: US Department

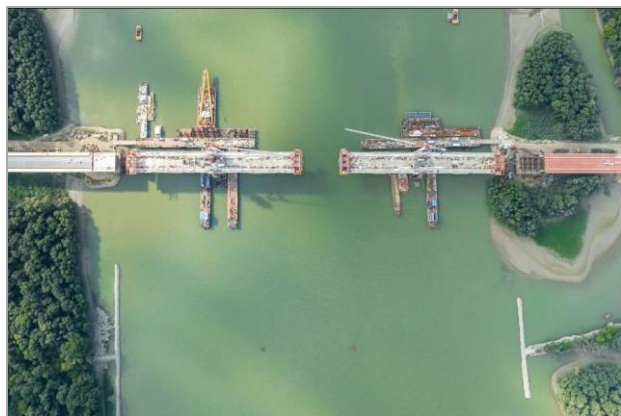
Ravazzani, G., Boscarello, L., Cislighi, A., Mancini, M. (2019). Review of Time-of-Concentration Equations and a New Proposal in Italy. *Journal of Hydrologic Engineering*, 24(10). pp. 1-11.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001818](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001818)

Salimi, E.T., Nohegar, A., Malekian, A., Hoseini, M., Holisaz, A. (2017). Estimating time of concentration in large watersheds. *Paddy Water Environ* 15(1). pp. 123-132.
<https://doi.org/10.1007/s10333-016-0534-2>

A SZERZŐ



NAGY ESZTER DÓRA okleveles infrastruktúra-építőmérnök (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2017), 2023-ban szerzett PhD fokozatot a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen a földtudományok területén, építőmérnöki tudományágból. 2022 óta főállású oktató, jelenleg a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékén adjunktus. Túlnyomórészt hidrológiával, vízkészlet-gazdálkodással kapcsolatos tárgyakat oktat, fő kutatási területe a kisvízgyűjtők hidrológiája és a csapadék-lefolyás modellezés. 2016 óta a Magyar Hidrológiai Társaság tagja



Már összeért a Kalocsánál épülő új Duna-híd a folyó felett. Hatalmas változást hoz a közlekedésben a Kalocsánál vilámtempóban épülő új Duna-híd, amely szám szerint a huszadik dunai átkelő lesz. A Paks és Kalocsa között épülő híd hetven kilométeres kerülőutat rövidít le, mely várhatóan 2024 nyarára készülhet el a Duna Aszfalt Zrt. kivitelezésében. Az építkezés még 2021 februárjában indult és klasszikus óriásprojektről van szó: a híd 946 méter hosszú és hozzá kapcsolódóan jelentős úthálózatot is kiépítenek. (www.travelo.hu)