

Hidrológiai modellek alkalmazása az agrár-környezetvédelemben nemzetközi és hazai tapasztalatok alapján

Juhász Csaba – Pregun Csaba

Debreceni Egyetem Mezőgazdaság-, Élelmiszertudományi és Környezetgazdálkodási Kar,
Víz- és Környezetgazdálkodási Intézet, Debrecen
juhasz@agr.unideb.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A vízfolyások ökológiai szempontú szabályozása megkívánja a komplex hidrológiai-térinformatikai modellek alkalmazását. A HEC-RAS és a MIKE11 programok a vízfolyások geometriai adatainak és a meder ellenállásának felhasználásával számítják ki a lefolyás hidraulikai jellemzőit. Az alkalmazások néhány lehetőségének bemutatása az erősen szabályozott Berettyó folyó példáján keresztül történt. A folyó a lejtés/Froude szám, valamint a mélység/szélesség arány viszonyát felhasználó Parker-féle osztályozási rendszer szerint a kanyarulatok kategóriába tartozik. A Rosgen-féle folyógeomorfológiai rendszer alapján a négy meghatározó tényezőből három (bevésség, vízszintesítés, szélesség-mélység arány) szintén a közepes, vagy fejlett kanyarulatosságra utal, míg a művi mederhidraulikai beavatkozások a szinuszitás (kanyarulatosság) szempontjából közel egyenes jellegű medret hoztak létre. A mértékadó vízhozam áramlási jellegei a modellezett Froude és Reynolds szám alapján lettek meghatározva. A megváltozott vonalvezetéssel az áramlási viszonyok is az ökológiailag gyengébb lamináris jelleg felé tolódtak el. Az eredmények alapján a folyó rehabilitációja mind hidromorfológiai, mind ökohidrológiai szempontból indokolt.

Kulcsszavak: HEC-RAS, MIKE11, folyógeomorfológia, ökohidrológia, Froude és Reynolds szám, vízfolyások rehabilitációja

SUMMARY

The ecological restoration of surface water flows requires the use of complex GIS and hydrological models. The HEC-RAS and MIKE11 programs calculate the hydraulic characteristics of runoff using the geometry and bed resistance the of flows. The presentation of some possible applications made through an example of the Berettyó, which is an extremely regulated river. The river belongs to the meandering category by Parker's classification system, which uses the relationship of the slope-Froude number and the depth-width ratio. Three coefficient of the four determining factor (entrenchment ratio, slope of water level, width-depth ratio) also indicates a mediocre to high sinuosity, while the river regulations established nearly straight bed-line. The standard water flow rates and characteristics have been determined based on the modeled Froude and Reynolds numbers. The flow conditions shifted to the laminar type by the changed line drawing which is ecologically lower status. Based on the results the morphological and ecohydrological river rehabilitation is appropriate.

Keywords: HEC-RAS, MIKE11, river geomorphology, ecohydrology, Froude and Reynolds numbers, rehabilitation of watercourses

BEVEZETÉS

A természetvédelem, a vízgazdálkodás és a gazdaság kapcsolatrendszerében leggyakrabban a folyósabályozások a legélesebb konfliktusforrások. A Föld északi egyharmadára (Észak-Amerika, Mexikó, Európa és a volt Szovjetunió) vonatkozó összefoglaló tanulmány szerint az ide tartozó 139 legnagyobb folyórendszer nagy vagy közepes mértékű hidrotechnikai beavatkozásokon esett át (Dynesius és Nilsson, 1994). A vízfolyások vonalvezetésébe való túlzott hidrotechnikai beavatkozások kedvezőtlenül hatottak a vizek és a vízgyűjtők környezeti állapotára. Az eredményes folyó-ökológiai beavatkozások feltétele a problémák komplexitásának és a bizonytalanságoknak a feltárása, az elméleti háttér és a mérési és skálázási módszerek fejlesztése, a legmegfelelőbb változók körének kiválogatása, a tudományos eredmények gyakorlati alkalmazása, a társadalmi és gazdasági szempontok figyelembe vétele (Wohl et al., 2005).

Az EU Víz-Keretirányelv meghatároz bizonyos folyóminősítési kategóriákat egy folyó típusba sorolásához (1. táblázat), de ezek az ismérvek nem nyújtanak elegendő információt a vízfolyások ökológiai jellegéről. Egy vízfolyás megfelelő kezeléséhez ismerni kell annak folyógeomorfológiai, dinamikus hidraulikai és ökohidrológiai karakterét. Az ökológiai alapú, gyakor-

lati vízgyűjtő-gazdálkodási tervezések számára tehát fontos az olyan hidrológiai modellek alkalmazása, amelyek e nagyszámú releváns, térben és időben egyaránt változatos környezeti faktort egységes rendszerben képesek tárolni, elemezni, kezelni és megjeleníteni. Jelen munka a vízfolyások osztályozásának főbb módszereit, az ebben legjobban bevált hidraulikai programokat, és alkalmazásuk néhány lehetőségét mutatja be a vízfolyások rehabilitációját célzó vízgazdálkodási és agrár-környezetgazdálkodási tevékenységeken belül.

A morfológiai, hidrológiai, ökológiai jellegeket számos független változó befolyásolja, amelyek térben és időben heterogének, sokszor nem számszerűsíthetőek és skálázhatóak, a válaszreakciók nehezen értelmezhetőek, vagy a válaszdő túl hosszú, valamint az eltérő vízigények és vízhasználatok gazdasági és társadalmi érdekellentéteket alakítanak ki (Shields et al., 2003). A felszíni vízfolyások térben és időben dinamikusan strukturált hidromorfológiai rendszerek, ahol valamennyi dimenzióknak kiemelt szerepe van. A folyómedrek komplex, változatos geomorfológiai mintázata jelentősen megnehezíti a feladatokat (Larned et al., 2011). A strukturális mutatókat, a mozaikosságot, vízszintes, függőleges és hosszanti zonalitást, valamint ezek térbeli és időbeli változásait modellezve használható adatbázisokhoz jutunk (Bockelmann et al., 2004; Pregun et al., 2008; Pregun, 2009).

Az EU Víz-Keretirányelv folyóminősítési kategóriái

A rendszer: Ökorégiók(1)		B rendszer: Alternatív jellemzés(2)		
Osztályozás szempontja(3)				
Magasság (mBf)(4)	Vízgyűjtő terület(5)	Geológia(6)	A folyó vagy egy folyószakasz ökohidrológiai jellemzőit meghatározó fizikai és kémiai tényezők(7)	
1. Magas(8): >800 m	1. Kicsi(11): 10–100 km ²	1. Meszes(15) 2. Szilikát(16)	Kötelező(18) 1. Tengersiz feletti magasság(19) 2. Földrajzi szélesség(20) 3. Földrajzi hosszúság(21) 4. Geológia(22) 5. Méret(23)	Szabadon választott(24) 1. Távolság a folyó forrásától(25) 2. Áramlási energia(26) 3. Közepes vízszélesség(27) 4. Közepes vízmélység(28) 5. A vízfelszín közepes esése(29) 6. A főmeder formája és alakja(30) 7. Vízhözam-kategória(31) 8. A folyó völgy alakja(32) 9. Hordalékszállítás(33) 10. Savközömbösítő kapacitás(34) 11. Az altalaj összetétele(35) 12. Klorid(36) 13. Hőmérséklet(37) 14. Csapadék(38)
2. Közepes(9): 200–800 m	2. Közepes(12): 100–1 000 km ²	3. Szerves(17)		
3. Mély(10): <200 m	3. Nagy(13): 1000–10000 km ² 4. Igen nagy(14): >10 000 km ²			

Forrás: Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of The Council

Table 1: The river classification categories of the EU Water Framework Directive

System A: Ecoregions(1), System B: Alternative characterization(2), Classification criterion(3), Height (Baltic Sea Level)(4), Watershed area(5), Geology(6), Physical and chemical factors that determine the characteristics of the river and hence the biological population structure and composition(7), High(8), Middle(9), Low(10), Small(11), Middle(12), Large(13), Very large(14), Calcareous(15), Siliceous(16), Organic(17), Obligatory factors(18), Altitude(19), Latitude(20), Longitude(21), Geology(22), Size(23), Optional factors(24), Distance from the source of the river(25), Energy flow(26), Mean water width(27), Mean water depth(28), Average slope in water level(29), Form and shape of main channel(30), River discharge(flow) category(31), Valley shape(32), Sediment(33), Acid neutralizing capacity(34), Composition of the subsoil(35), Chloride(37), Temperature(37), Precipitation(38), Source: Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of The Council

A klasszikus rheológiai kutatásokban folyómorfológiai szempontból a következő független változókat tekintették a legjelentősebbnek (Schumm, 1969, 1973, 1977, 1985; West, 1978; Richards, 1982; Knighton, 1987, 1998; Nanson és Knighton, 1996) a meder, ill. a vízszint esése, a vízjárás, a szállított hordalék mennyisége, a szállított hordalék minősége, a meder és a part anyaga, a vízi és partmenti vegetáció, az emberi beavatkozások. A geomorfológiai jellemzésben elsősorban a vízszállítás és a geometriai tényezők alapján határozták meg a különböző medertípusokat és azok ökohidrológiai viszonyait. Leopold és Wolman (1957) az egyenes, meanderező és fonatos típust különítették el, a vízhozam és a lejtés alapján. Parker (1976) ugyanezt az osztályozást alkalmazta, a lejtés/Froude szám hányadosa (S/F_n), valamint a mélység/szélesség (D/W) arány viszonya alapján. Több kutatás eredményeire támaszkodva megállapította, hogy az $S/F_n < D/W$ reláció meanderező, a $D/W < S/F_n$ fonatos medermintázatot hoz létre. Ezek a kapcsolatok alátámasztják azt a jelenséget, hogy míg a kanyargó vízfolyások általában kis esésűek és a medrük viszonylag keskeny, ezzel szemben a fonatos mintázat általában meredek lejtőkön, széles mederrel alakul ki. Montgomery és Buffington (1993) a kisebb vízfolyások esetében jól használható osztályozási rendszert állított elő, de ez főleg hegyvidéki folyókra alkalmazható, az alföldi vízfolyásokra nem tartalmaz alosztályokat. Átfogó, és igen részletes a Rosgen (1994, 1997) által kidolgozott módszer, amely hétféle jellemző medermintázatot állapít meg a bevéso-

dési arány, a szélesség-mélység arány, a kanyarulatosság, a lejtés, és az üledék szemcsemérete alapján. A folyórehabilitációs tevékenységekben gyakran alkalmazott minősítési rendszer, amelyet azonban több kritika ért, mivel alkalmazása gyakran instabil mederformát és vonalvezetést eredményezett. A meder leírására eredményesen, távlati elemzésre és előrejelzésre csak feltételesen alkalmazható (Simon et al., 2007).

A HEC-RAS és a MIKE 11 általános, egydimenziós, keresztmetszet-integrált hidraulikai programok. A nyílt felszínű természetes és mesterséges vízfolyások hidrológiai és medermorfológiai modellezésére lettek kifejlesztve, időben állandó (permanens v. stacionárius) és időben változó (nem permanens v. instacionárius) áramlások esetében egyaránt.

Mindkét program modern grafikus felhasználói felülettel rendelkezik, amelyek megkönnyítik a grafikus és numerikus modellalkotást, valamint az eredmények értelmezését. Képesek szabálytalan távolságban elhelyezkedő természetes keresztmetszetek modellezésére is. A programok kompetensek az általánosan használatos térinformatikai csomagokkal, így biztosított az adatátvitel a terepfelzárni geometriai adatok és a hullámtéri vízmagasságok számításában. A számított hidraulikai tényezők a vízhozam és vízállás adatok, valamint a medergeometria, mint független változók függvényében kerülnek modellezésre. A hullámtéri műtárgyakon (pl. a hidakon és átereszekon) való áthaladás során fellépő energiaveszteségeket a sebességmagasság farvizen mért csökkenéséből számítják ki. A hid-

raulikus belső határok, mint például a gátstruktúrák, hasonlóan kerülnek kiszámításra a szimuláció során.

A HEC-RAS program számítási alrendszere az amerikai hadsereg Corps of Engineer (USACE) modelljén alapul. A program a tömeg-megmaradási és az impulzus-megmaradási tételeken alapuló linearizált egyenletrendszert old meg, a numerikus implicit véges differenciák módszerével, a Preissman-féle másodrendű bokszséma alapján. A program minden időlépésben generál egy szimultán egyenletrendszert (az intervallumon belüli iterációkkal) ezeket egy a mátrix rendszerben tárolja. A keresztmetszetben adott vízmagasság esetében külön modellezi a főmederben, valamint a jobb és bal parti hullámtérben fennálló hidraulikai viszonyokat. Minden keresztszelvényre kiszámítja és tárolja a rá jellemző numerikus összefüggésrendszert, amelynek független változó a vízhozam, és bizonyos esetekben a vízállás. Az adott keresztszelvény esetében a változások időintervallumait és a beviteli adatokat a felhasználó határozza meg, így mód van valós idejű és előrejelzési szimulációkra egyaránt. A meder hidraulikus ellenállásának kiszámítása a súrlódási energiavesztésekből történik, az empirikus Manning-egyenlet alapján (Manning, 1890; Chow, 1959). A Manning-féle mederérdesség (n) mederbeli változásai többféle módon megjeleníthetők a modellben (Brunner, 2010). A programot széles körben alkalmazzák a folyó kutatás és gazdálkodás elméletében és gyakorlatában egyaránt (Downs és Thorne, 2000; Moutona et al., 2007). A modell pontosságának ellenőrzése a vízmércéken mért valós idejű és a modellezett vízállás adatsorok összehasonlító elemzésével történt. Az erős regressziós összefüggések ($R^2 > 0,9$) jelzik a modell megfelelő megbízhatóságát.

A MIKE 11 modellalkotása a folytonossági és a lendület-megmaradási egyenletek megoldásával történik, az Abbott és Ionescu (1967) által kifejlesztett implicit véges differencia séma alapján. A rendszer mindegyik (tehát kinematikai, diffúz, vagy dinamikai) Saint Venant egyenlet megoldására képes. A vízszint és az áramlás kiszámítása a kontinuitási tétel és az impulzus-megmaradási tétel alkalmazásával, a 6 pontos Abbott séma felhasználásával történik, minden időintervallumban. Alapértelmezésben az egyenletek alkalmazása két iterációban megy végbe. A tömeg-megmaradási egyenletek megoldása a vízszintet jelentő h -pontokra, az impulzus egyenlet megoldása a vízhozamot reprezentáló Q pontokra történik. Az első iteráció az előző időintervallumban kapott eredményekből indul ki, a második az első iteráció központi értékeit használja fel. Az iterációk számát a felhasználó meghatározhatja. A keresztszelvények területi és hosszirányú dimenziója könnyen meghatározható a felhasználói felületen keresztül. A vízszintek (h pontok) minden keresztszelvény estében kiszámításra kerülnek. Közöttük a program egyenletesen elhelyezkedő interpolált pontokat határoz meg, a felhasználó által megadott, maximális távolságokban. A centralizált áramlási értékek a szomszédos h -pontok közötti távolság felénél számított Q pontokra vonatkoznak. A HEC-RAS-hoz hasonlóan a hidraulikus ellenállás számítása a súrlódási veszteségeket empirikusan becsülő Manning vagy Chezy egyenleten alapul, a mederérdesség keresztszelvényi területen belüli változásai szintén figyelembe vehetők (Danish Hydraulic Institute, 2001).

ANYAG ÉS MÓDSZER

A Berettyó magyarországi szakaszának bemutatása

A Berettyó a VKI II. melléklete alapján síkvidéki, meszes hidrogeokémiai jellegű, közepes-finom mederanyagú, közepes vízgyűjtőjű (100–1000 km²) erősen módosított kis-közepes folyó (18. típus). A Duna vízrendszerén belül a Tisza folyórendszerének része. A Berettyó folyó medermorfológiai kialakulására a történelem előtti időkben elsősorban a felszíni és felszín közeli geológiai-geomorfológiai folyamatok hatottak. A folyóba kerülő szerves anyag biológiailag lebontható volt, a biológiai üledékek az éves ciklusokban nem a folyóban akkumulálódtak (Cummins, 1975). A folyó teljes hossza eredetileg 364 km volt, jelenleg 198 km, ebből a tanulmányozott magyarországi szakasz 75 km.

A jelenben a folyó síkvidéki része a kanyarulatok levágásával és töltésekkel szabályozott vízfolyás, az alsó kb. 34 km-es szakasz mesterséges mederben folyik, az eredeti vonalvezetéstől teljesen elterelve. A folyó hullámtérében kedvezőtlen környezeti viszonyok alakultak ki. A hidrotechnikai beavatkozások miatt több szakaszán mesterséges csatornára emlékeztet, vízjárása szélsőséges, és fokozottan ki van téve a vízgyűjtőn előforduló diffúz és pontszerű szennyező források hatásainak és a határon túlról érkező terheléseknek egyaránt. A vízi és a kísérő vizes élőhelyek degradálódtak, a biodiverzitás lecsökkent (Pregun és Tamás, 2005; Pregun, 2009).

A medermorfológiai típus meghatározása Rosgen és Parker módszerével

A Rosgen-féle folyóosztályozás hétféle jellemző medermintázatot állapít meg a bevésődési arány, a szélesség-mélység arány, a kanyarulatosság, a lejtés, és az üledék szemcsemérete alapján.

Bevésődési arány: (Entrenchment Ratio, Incision, ER) a középvízi meder maximális magasságának kétszereséhez tartozó víztükörszélesség (Flood-Prone Width – FPW) elosztva a középvízi meder partéleinek távolságával (Bankfull Width – BW). Ennek alapján ha $ER < 1,4$ erősen bevésődött, ha $1,4 < ER < 2,2$ közepesen bevésődött, ha $ER > 2,2$ akkor kis mértékben bevágódott mederről beszélünk. Az ordinális skálaosztás érdekében ez a kategorizálás megváltoztatásra került, az alig bevésődött az 1, a közepesen bevágódott a 2, a kettő közötti átmenet az 1,5 értéket kapta. A vizsgált folyószakasz esetében további beosztásokra nincs szükség, de a skálázás folytatható az igények szerint (2,5 átmeneti, 3: erősen bevágódott meder)

A szélesség-mélység arány: (Width/Depth Ratio) Ha $W/D < 12$ alacsony, $12 < W/D < 40$ közepes, ha $W/D > 40$ akkor magas értékről beszélünk.

Kanyarulatosság (Sinuosity): A mederhossz osztva a folyó völgy (légvonalban mért) hosszával. (Alacsony $\sim < 1,2$; 1,2 < Közepes $\sim < 1,5$); Magas $\sim > 1,5$.

A vízszint (és az energiavonal) esése: A helyzeti, a nyomási, és a mozgási energia egységnyi hosszra vonatkozó változása. Az energiavonal esése geometriailag megfelel a vízfelszín esésének. A Rosgen-féle rendszer 5 osztályának határai: $S < 0,001$; $0,001 < S < 0,02$; $0,02 < S < 0,039$; $0,04 < S < 0,099$; $S > 0,1$.

Parker módszere azon alapul, hogy a mélység-szélesség arányt (D/W), mint leszámaztatott, dimenzió nélküli medergeometriai tényezőt független változóként összeveti egy leszámaztatott hidrodinamikai állapotjelzővel, amelyet a vízszint esésének és a Froude-számnak a hányadosából képez (S/Fr). Mivel az esés (az egységnyi útszakaszra eső szintkülönbség) a lefolyás fő kiváltó oka, a Froude-szám a víz mozgását befolyásoló tehetetlenségi és gyorsító erők viszonyát írja le, ez a tényező a közöttük fennálló oksági viszonyokat reprezentálja. Logaritmikus koordináta-rendszerben ábrázolva D/W (X tengely) és a S/Fr (Y tengely) arányok viszonyát, a különböző vízfolyástípusok (fonatos, meanderező, egyenes) elkülöníthetők egymástól. A besorolás módszerét az 1. ábra szemlélteti.

A vízfolyás és az áramlások típusa

A vízmozgások hidraulikai jellegének meghatározása a Froude-szám és Reynolds-szám alapján történik (2. táblázat).

1. ábra: A keresztmetszvényekkel reprezentált folyószakaszok típusai a Parker-féle folyóosztályozási rendszer alapján

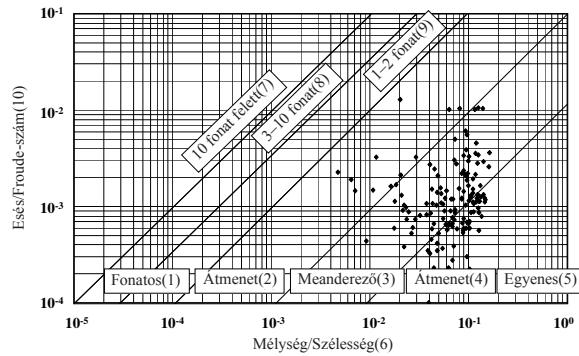


Figure 1: The types of the river sections represented by cross sections, based on Parker's river classification system Braided(1), Transition(2), Meandering(3), Transition(4), Straight(5), Depth/Width(6), Over 10 braids(7), 3–10 braids(8), 1–2 braids(9), Slope/Froude-number(10)

2. táblázat

A vízfolyások tipizálása a Froude-szám és a Reynolds-szám alapján

Folyástípus(1)	Froude-szám (Fr)(4)	Áramlás-típus(5)	Reynolds-szám (Re)(9)
Rohanó(2)	$Fr > 1$		
Áramló(3)	$Fr < 1$	erős turbulens(6)	$Re > 2000$
	$Fr < 1$	gyenge turbulens(7)	$Re 580-2000$
	$Fr < 1$	lamináris(8)	$Re < 580$

Table 2: The watercourses flow typology based on the Froude number and the Reynolds number Type of flow(1), Supercritical(2), Subcritical(3), Froude-number(4), Type of current(5), Highly turbulent(6), Low turbulent(7), Laminar(8), Reynolds-number(9)

Froude-szám (Fr): A tehetetlenségi erők és a gyorsulási erők viszonya a folyadékban. Jelentősége: A hidrológiai rendszerekben lejátszóó jelenségek homológ mennyiségei közötti kapcsolatok kifejezése, a folyástípus jellegének megállapítása. Két áramlás akkor hasonló, ha a kialakuló tehetetlenségi erők és a nehézségi erők aránya azonos. A Froude számnak olyan áramlásoknál van jelentősége, melyeknél a folyadék súlyának jelentős szerepe van. Osztályozás a Fr-szám alapján: $Fr < 1$ áramló, $Fr = 1$ kritikus (átmeneti), $Fr > 1$ rohanó mozgásállapotú víz.

Reynolds-szám (Re): A tehetetlenségi erők és a viszkozus (belső súrlódási) erők aránya a folyadékban. Jelentősége: Ha $Re < Re_{krit}$, az áramlás lamináris, ha $Re > Re_{krit}$, az áramlás turbulens. Lamináris áramlás: az áramló közegben fellépő súrlódási erők nagyobbak a tehetetlenségi erőknél. Turbulens áramlás: a tehetetlenségi erők nagyobbak a súrlódási erőknél. ($Re_{krit} = 580$ szabad felszínű vízfolyásokra). Mivel a folyadékok belső súrlódása függ a hőmérséklettől, a 20 °C-hoz tartozó dinamikai viszkozitás szerepel a számításokban.

Terepi mérések

A Berettyó medermodelljének elkészítéséhez a keresztmetszvények felvételezése kb. 500 méterenként történt. A bal és jobb parti végpontok (LOB, ROB) X koordinátái és a keresztmetszvények fősodorban mért

pontos távolságának a hosszanti Z koordinátái az alkalmazott WGS-84 referencia rendszerből EOVS rendszerbe lettek átranzszformálva. Az Y (magassági) koordináták alapértéke a Balti tenger feletti magasság (mBf). A koordináta-meghatározások a mérés pontosságának növelése érdekében szimultán módon, egy bázis (egy pontra állítható, stabil antennás terepi adatgyűjtő) és egy mozgó (rover) DGPS műszerrel történtek, így elérhető a 0,1 m pontosság. A főmeder partéleinek meghatározása és a Manning-féle mederérdességi viszonyok felmérése terepi bejárások során történtek.

EREDMÉNYEK

A meder geomorfológiai jellemzői

A vizsgált szakaszok a Parker (1976) féle kategorizálás alapján, amely a mélység/szélesség (X tengely) és a lejtés/Froude szám (Y tengely) alapján különíti el a fonatos, a meanderező és az egyenes folyókat, döntően a meanderező kategóriába, és részben az ezzel határos átmeneti zónákba tartoznak (1. ábra).

A Rosgen-féle folyómorfológiai osztályozás alapján a Berettyó magyarországi szakaszának hidrogeomorfológiai jellemvonásai a bevésődési arány, a szélesség-mélység arány, a kanyarulatosság és a vízszintes szerinti a következők (3. táblázat).

A Berettyó esetében előforduló természetes medertípusok (E5 és C5) Rosgen rendszere szerint

Bevésődés(1)		Enyhén bevágódott (R>2,2)(13)				
Szélesség/mélység(2)		Alacsony (<12)(14)		Közepes-magas (40–12)(16)		
Kanyargósság (Sin.)(3)		Magas (>1,5)(15)		Közepes (1,5–1,2)(17)		
A vízfolyás típusa(4)		E		C		
Vízszintesítés(5)		0,02–0,039		0,02–0,039		
		<0,02		0,001–0,02		
				<0,001		
Mederanyag(6)	1 – fekkőzet(7)	-	-	C1b	C1	C1c
	2 – sziklás(8)	-	-	C2b	C2	C2c
	3 – köves(9)	E3b	E3	C3b	C3	C3c
	4 – kavics(10)	E4b	E4	C4b	C4	C4c
	5 – homok(11)	E5b	E5	C5b	C5	C5c
	6 – iszap, ill. agyag(12)	E6b	E6	C6b	C6	C6c

Table 3: The natural riverbed types of Berettyó, by Rosgen system (E5 and C5)

Entrenchment ratio(1), Width-depth ratio(2), Sinuosity(3), Stream type(4), Slope(5), Bed materia(6), Bedrock(7), Boulders(8), Cobble(9), Gravel(10), Sand(11), Silt/clay(12), Slightly entrenched(13), Low(14), High(15), Moderate to high(16), Moderate(17)

1. Bevésődési arány, első minősítési szint: A bevésődési arány szerint 98 keresztiszelvény (65,5%) alig bevésődött, 28 (18,9%) közepesen bevésődött, 23 (15,5%) a kettő közötti átmeneti tartományba tartozik.
2. Szélesség-mélység arány, második minősítési szint: A szélesség-mélység arány 61,5%-ban (91 szakasz) alacsony ($W/D < 12$), 37%-ban közepes ($12 < W/D < 40$), 1,5% (két szakasz) esetében magas (> 40). Ezen adatok alapján a B (mérsékelt kanyarulat), C (erősen meanderező), és az E (átmeneti) természetes folyókatéóriák jöhetnek számításba.
3. Kanyarulatosság, harmadik minősítési szint: a szabályozások miatt a vízfolyás döntően egyenes vonalvezetésű ($Sinuosity < 1,2$).
4. Vízfelszín lejtése, negyedik minősítési szint: A lejtés két szakasz esetén megközelíti a 0,01 értéket, a többi 146 szakaszban 0,001 alatt marad. Ez kizárja a mérsékelt meanderező (B) folyótípust, mivel ennek jellemző esése 2–4% közé esik.
5. Az üledék szemcsemérete, ötödik minősítési szint: Mivel a Berettyó a vizsgált szakaszon a homokos aljzatú típusba tartozik, további rangsorolás nem szükséges.

Az áramlás jellege

A vízmozgások az átlagos és a mederkitöltő vízhozamok esetében valamennyi keresztiszelvényben a subkritikus, áramló állapotba tartoznak. Az áramlás jellege szerint a 148 keresztiszelvényből 44 (~30%) tekinthető lamináris áramlásúnak ($Re < 500$), 104 keresztiszelvény (~70%) gyengén turbulensnek ($500 < Re < 2000$). Mindazonáltal az alsó, mesterséges meder és a felső részben kiegyenesített folyószakasz elkülönül egymástól az áramlási viszonyok tekintetében. A csak szabályozáson átesett felső szakaszon a Froude-szám-sebesség,

és a Reynolds-szám-sebesség regressziós összefüggése jóval erősebb ($R^2 = 0,92$ és $R^2 = 0,77$), mint a teljesen megváltoztatott alsó szakaszon ($R^2 = 0,79$ és $R^2 = 0,64$). A lamináris és gyengén turbulens áramlású szakaszok aránya a felső szakaszon 26–74%, az alsó szakaszon 34–66%.

ÉRTÉKELÉS, KÖVETKEZTETÉS

A szabályozott vízfolyások környezetbe illesztésének és rehabilitációjának kezdeti lépése azoknak a szükséges és elégséges paramétereknek a megállapítása, amelyek meghatározzák a vízfolyás ökológiai, hidrológiai és medermorfológiai karakterét minőségi és mennyiségi értelemben egyaránt. Hidrogeográfiai szempontból a tájon a kanyarulat, meanderező, vályú alakú folyómeder és a kanyargó folyóvölgy jellemző 1,2 alatti kanyarulatossági értékekkel ($Sinuosity > 1,2$).

A Rosgen féle osztályozási rendszer szerint a folyó a bevésődése és szélesség-mélység aránya alapján meanderező típusú, az egyes szakaszok lejtése alapján a közepesen és az erősen meanderező közötti átmeneti (C) és az erősen meanderező (E) kategóriába tartozik, amelyekre az 1,5-nél nagyobb átlagos kanyarulatosság ($Sinuosity$) lenne jellemző. A vízfolyás kanyarulatosságának értékei ellentmondanak az előbbi következtetéseknek, mivel ezek szerint a folyó az egyenes kategóriába tartozik.

A mesterséges mederben a gyakran előforduló lamináris áramlási viszonyok nem kedvezőek a víz átkeveredése, és ezzel a gázcserre és az aerob lebomlási folyamatok, a folyó öntisztulása szempontjából.

Ezek az eredmények azt jelzik, hogy a folyó-rehabilitáció során a medermorfológiai és hidraulikai viszonyok környezetbe illeszkedő szabályozását mindenképpen szükséges elvégezni.

IRODALOM

Abbott, M. B.–Ionescu, F. (1967): On the numerical computation of nearly-horizontal flows, Journal of Hydraulic Research. 5: 97–117.

Bockelmann, B. N.–Fenrich, E. K.–Lin, B.–Falconer, R. A. (2004): Development of an ecohydraulics model for stream and river restoration. Ecological Engineering. 22: 227–235.

- Brunner, G. W. (2010): HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual. Version 4.1. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center (HEC). Davis, CA. 95616–4687.
- Chow, V. T. (1959): *Open-channel Hydraulics*. McGraw-Hill. New York. 680–684.
- Cummins, K. W. (1975): *The Ecology of Running Waters: Theory and Practice*. Sandusky River Basin Symposium. 277–293.
- Danish Hydraulic Institute (2001): MIKE 11 Reference manual. Appendix A. Scientific background. Danish Hydraulic Institute.
- Downs, P. W.–Thorne, C. R. (2000): Rehabilitation of a lowland river: Reconciling flood defence with habitat diversity and geomorphological sustainability. *Journal of Environmental Management*. 58: 249–268.
- Dynesius, M.–Nilsson, Ch. (1994): *Fragmentation and Flow Regulation of River Systems in the Northern Third of the World*. Science. 266: 753–762.
- Knighton, A. D. (1987): River channel adjustment – the downstream dimension. [In: Richards, K. S. (ed.) *River channels: environment and process*.] Blackwell. Oxford. 95–128.
- Knighton, D. (1998): *Fluvial Form and Processes, a new perspective*. Arnold. London. 187–242.
- Larned, S. T.–Schmidt, J.–Datry, T.–Konrad, C. P.–Dumas, J. K.–Dietrich, J. C. (2011): Longitudinal river ecohydrology: flow variation down the lengths of alluvial rivers. *Ecohydrology*. 4. 4: 532–548.
- Leopold, L. B.–Wolman, M. G. (1957): River channel patterns: braided, meandering, and straight. *US Geol. Survey Prof. Paper* 282.
- Manning, R. (1890): *Flow of Water in Open Channels and Pipes*. Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland. 20.
- Montgomery, D. R.–Buffington J. M. (1993): Channel Classification. Prediction of Channel Response, and Assessment of Channel Condition. Report TFW-SI-110-93-002. SHAMW committee of the Washington State Timber/Fish/Wildlife Agreement.
- Moutona, A. M.–Schneiderb, M.–Depestelea, J.–Goethalsa, P. L. M.–De Pauwa, N. (2007): Fish habitat modelling as a tool for river management. *Ecological Engineering*. 29: 305–315.
- Nanson, G. C.–Knighton, A. D. (1996): Anabranching rivers: their cause, characteristics and classification. *Earth Surface Processes and Landforms*. 21: 217–239.
- Parker, G. (1976): On the cause and characteristic scales of meandering and braiding in rivers. *Journal of Fluid Mechanics*. 76: 457–480.
- Pregun Cs.–Tamás J. (2005): Hidrológiai paraméterek hatása a Berettyó biodiverzitására. *Acta Agraria Debreceniensis*. Debreceni Egyetem. 16: 215–229.
- Pregun Cs. (2009): Felszíni vízfolyások digitális hidrológiai modellezésének alkalmazása a vízminősítésben. *Hidrológiai Közöny*. 89. 1: 9–21.
- Pregun, Cs.–Tamás, J.–Juhász, Cs. (2008): Application of Hydrological Modeling and Hydroecological Indication Methods in Agri-environmental Protection. *Cereal Res. Commun.* 36: 1395–1399.
- Richards, K. (1982): *Rivers, form and process in alluvial channels*. Methuen. New York.
- Rosgen, D. L. (1994): A Classification of Natural Rivers”. *Catena*. 22: 169–199.
- Rosgen, D. L. (1997): A geomorphological approach to restoration of incised rivers. [In: Wang, S. S. Y. et al. (eds.) *Proceedings of the Conference on Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision*.] ISBN 0-937099-05-8.
- Schumm, S. A. (1969): River Metamorphosis. *Journal of Hydraulic Division, American Society of Civil Engineers*. 95: 255–273.
- Schumm, S. A. (1973): *River Morphology*. Benchmark Papers in Geology. Dowden, Hutchinson and Ross. Stroudsburg, PA. 429.
- Schumm, S. A. (1977): *The Fluvial System*. Wiley Interscience. New York. 338.
- Schumm, S. A. (1985) *Patterns of Alluvial Rivers*. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 13: 5–27.
- Shields, F. D.–Cooper Jr., C. M.–Knight, S. S.–Moore, M. T. (2003): Stream corridor restoration research: a long and winding road. *Ecological Engineering*. 20: 441–454.
- Simon, A.–Doyle, M.–Kondolf, M.–Shields, F. D. Jr.–Rhoads, B.–McPhillips, M. (2007): Critical Evaluation of How the Rosgen Classification and Associated “Natural Channel Design” Methods Fail to Integrate and Quantify Fluvial Processes and Channel Response. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*. 43. 5: 1117–1131.
- West, E. A. (1978): *The Equilibrium of Natural Streams*. University of East England. Norwich. 72–90.
- Wohl, E.–Angermeier, P. L.–Bledsoe, B.–Kondolf, G. M.–MacDonnell, L.–Merritt, D. M.–Palmer, M. A.–Poff, N. L.–Tarboton, D. (2005): River restoration. *Water Resour. Res.* 41.