

**VÁLYÚBAN ÁRAMLÓ VÍZ ÁRAMLÁSI VISZONYAINAK  
MODELLEZÉSE SZÁMÍTÓGÉPES SZIMULÁCIÓVAL**

**MODELLING OF WATER FLOW CONDITIONS IN CHANNELS  
WITH COMPUTER SIMULATION**

MITRE ZOLTÁN

NYME Matematika és Fizikai Intézet 9700 Szombathely, Károlyi Gáspár  
tér 4. mitre.zoltan@nyme.hu

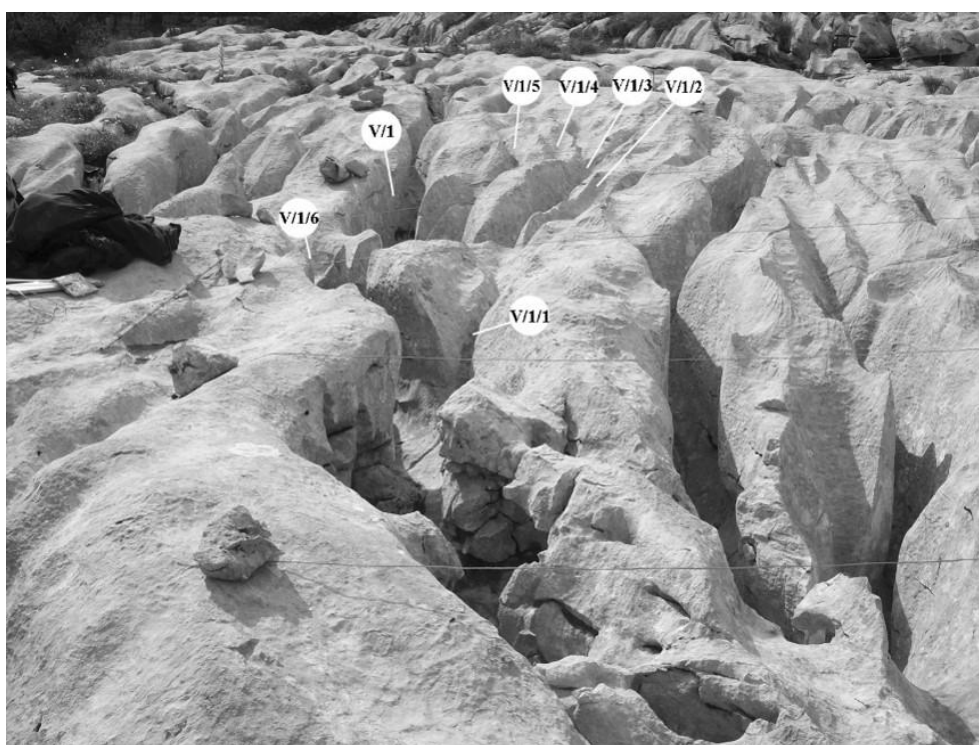
*Abstract: In the paper we present a special analysis of water flow in channels by Computer Fluid Dynamics (CFD) algorithm, using computer simulation and data process. We have two large datasets, about channel systems from karst area and turbulence length data from laboratory measurements. We made a comparison between these two datasets, took a special attention to the growths in cross sections of the main channels at the junction point of side channel, where we presumed, that the turbulence length has a significant effect. The result showed, that the length of the turbulent zone in the main channels at the connecting points of the tributary channels as a function of the slope angle in the experimental artificial channels varies on the same way like the length of the wider cross-sections at the main channels from karst areas close to the connecting points of the tributary channels. Regarding the junction angle at the connecting points of tributary channels, we did not find any relation between these two datasets. To understand this phenomena we made four digital models of channel systems by AutoCAD software and put them into virtual environment of CFD software algorithm. We examined the velocity of the water flow, before and after the junction of the side channel, the turbulence intensity and vorticity. Vorticity appears in case of high turbulence intensity. The first two digital models are simple main channels with a junctional side channel at an angle of 30°. In the first (1) model the depth of the side channel is equal to that of the main channel, so no junction height is present. In the second model (2), the side channel has a junction height of 20 centimetres. We recognized, that there is local vorticity in junction point at the (2) model, so it has an effect to the width of the main channel. In the (1) model vorticity appears many places after the junction point, and it has high intensity at the bottom of the bed of the main channel, so it has an effect on the depth of the main channel. We found evidence to these processes at the channels from karst area. In the (3) model we made a special digital model of channel system with side channels with junction angle between 10° and 90°, with an increase of 10° per channel from the top of the channel system. The results shows at 15° slope angle, that velocity of the flow, turbulence intensity increases at the bottom of the main channel. Vorticity also appears, especially at the junction points of the side channels in the main channel, where junction angle is higher, junction cross section is smaller. At these points we experience local velocity growths in the main channel, due to the narrow space for water flow due to the vortex. At slope angle 50° we experience lower turbulence intensity value, due to the higher speed at the bottom section of the main channel. The experiment (4) we put a kamenitza into the channel system, and we experienced lower turbulence intensity, especially in side channel. That is why we presumed, that in karst areas, channel systems with kamenitza have side channels with smaller cross sectional values, than the ones without kamenitza. We made a comparison between 10 pieces of channel systems with and 17 pieces of channel systems without kamenitza, and we found that our hypothesis is right.*

## **1. Bevezetés**

Digitális áramlási kísérletek adatainak felhasználásával a természetben végbemenő vízáramlási viszonyokhoz nyerhetünk adatokat, abból a célból,

hogy a vályúkarrok morfológiai sajátosságait az áramlási sajátosságok figyelembevételével értelmezzük.

Az informatika fejlődése utat nyit ahhoz, hogy a valóságos környezetet jól megközelítő digitális modelleket készítsünk természeti folyamatokról a virtuális térben. Az egyre inkább elérhető nagyteljesítményű számítási kapacitással olyan nagy pontosságú szimulációk lefuttatására van lehetőség, amelyek - megfelelő informatikai erőforrással a háttérben - viszonylag rövid idő alatt adnak a kutatás számára hasznos eredményeket.



1. ábra: Az V.1. jelzésű vályúrendszer szelvényenkénti felmérése. A vályúk szélesség, mélység adatait egymástól 10 centiméterre lévő szelvények mentén rögzítettük.

Fig. 1.: The section by section measurement of channel system V.1. We recorded the width and depth data of the channels by sections in every 10 cm.

A legbonyolultabb problémakörbe tartozik az áramlások részletes vizsgálata, amely jelentős szerepet játszik a karszterületek kisméretű oldódásos formáiba tartozó rinnenkarok (vályúk) fejlődésében. A vályúkarrok lejtésirányban kifejlődött lefolyástalan zárt barázdák (BÖGLI 1976, FORD – WILLIAMS 2007, VERESS 2009, VERESS 2010). A vályúk lehetnek A és B típusúak. Előzőek kisméretűek és kicsi keresztmetszet területűek, kereszt-

metszetük inkább „V” alakú (KOZMA – MITRE 2012). Utóbbiak nagyméretűek és „U” keresztmetszet alakúak (VERESS *et. al.* 2009, VERESS *et. al.* 2010). Kis dőlésű lejtőkön a vályúk gyakran vályúrendszereket alkotnak (1. ábra). A vályúrendszerek fő- és ezekhez csatlakozó mellékvályúkból épülnek fel.

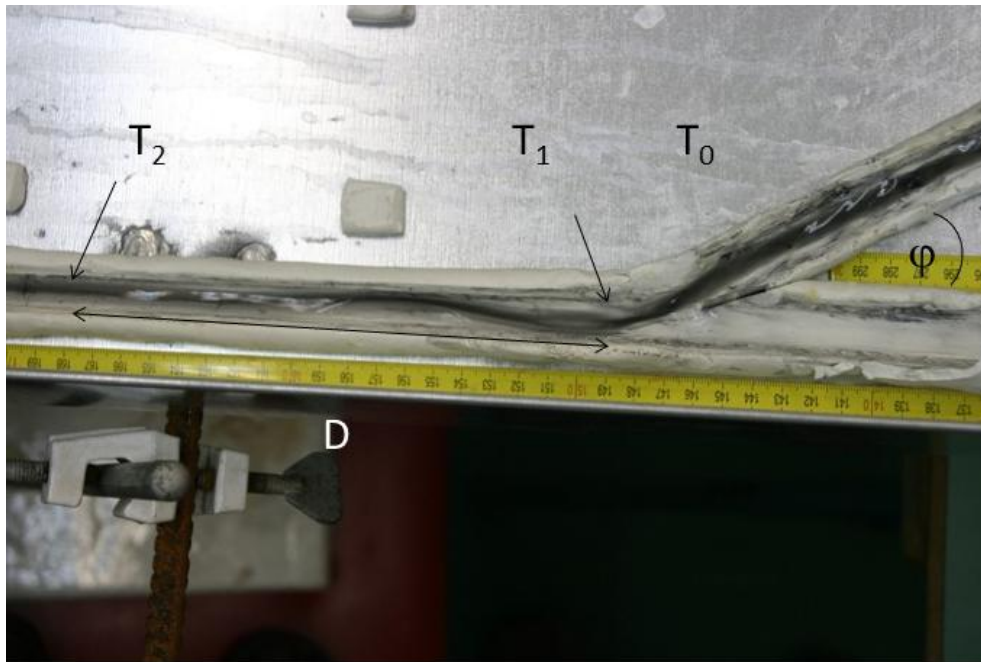
Korábbi munkánkban (MITRE *et. al.* 2014, VERESS *et. al.* 2009, VERESS *et. al.* 2010) a vályúrendszerek részletes vizsgálatai után azt a megállapítást tettük, hogy a fővályúban folyó vízben a becsatlakozási helyeknél és ezek alatt egy bizonyos távolságig turbulens áramlás zajlik, amely a becsatlakozási helyek közelében lokális kiszélesedéseket hoz létre, ugyanis a turbulens zóna aktívabb oldódást eredményez a vályúrendszerekben, főleg ott, ahol az örvényesség megjelenik.

A becsatlakozási helyek morfológiai vizsgálata során, a terepen kialakult kiszélesedési formák, valamint a laboratóriumban direkt módon megfigyelt turbulens áramlási szakaszok méreteit részletesen megvizsgáltuk. A terepen mért első, nagy pontosságú adatok elemzése során már jóval korábban vizsgáltuk a becsatlakozási helyeknél előforduló kiszélesedéseket (VERESS *et. al.* 2007, VERESS *et. al.* 2009, VERESS *et. al.* 2010), ennek megfelelően a későbbi adatgyűjtésnél (VERESS *et. al.* 2011, VERESS *et. al.* 2013, VERESS *et. al.* 2015) különös figyelmet szenteltünk e helyeknek. A laboratóriumi mérések során (DEÁK *et. al.* 2012, VERESS *et. al.* 2013) részletesen megfigyeltük a turbulens zónák hosszát, ennek méreteit különféle becsatlakozási és lejtőszög variációk esetén mértük meg, ezzel egy komplett adatbázist sikerült létrehozni (2. ábra).

E vizsgálat során nyert adatokat összevetettük a terepen tapasztalt kiszélesedés adataival. A lejtőszög változásával hasonlóan változott a tényleges vályú kiszélesedés hossza és a laboratóriumban létrehozott vályúban a turbulens szakasz hossza. Szintén megállapításra került, hogy a mellékvályú becsatlakozási szöge és a laboratóriumban mért turbulens szakasz hossza között nem mutatható ki összefüggés (MITRE 2014).

Feltételezésünk szerint az örvénylés jellege, a 3 dimenziós csavart örvénylés és a turbulencia hidrodinamikai tulajdonságai jelentős szerepet játszanak az oldódás helyének és mértékének alakulásában, ebből adódóan tapasztalható az a kaotikus eloszlás, amivel a becsatlakozási szögek és a kialakuló turbulens szakasz hosszak közti kapcsolat vizsgálata során szembesültünk. Az áramlási viszonyok vizsgálatához számítógépes szimulációt alkalmaztunk, amely paramétereit kutatási anyagunkhoz igazítottuk, ezáltal lehetőségünk adódott a valósághoz teljesen hasonló virtuális környezet létrehozására. A pontos számítógépes modell lehetőséget ad számunkra, hogy részletesen nyomon tudjuk követni az áramlásokat a kialakuló turbulens

szakaszok hosszának és helyének kialakulását, ezáltal további adatokat kaphatunk a vályú kiszélesedés és a turbulens (örvényes) szakasz hossza közti kapcsolatról.



2. ábra: A laboratóriumi modellkísérlet során mért értékek.  $T_0$  a vályúk találkozási pontja,  $T_1$  a folyadékok keveredésének kezdete,  $T_2$  a keveredés befejeződése,  $D$  a keveredési szakasz,  $\varphi$  a becsatlakozási szög. (DEÁK et. al. 2012)

Fig. 2.: Measured data during experiments in laboratory model.  $T_0$ : Junction point of channels,  $T_1$ : starting point of mixing of fluid,  $T_2$ : ending point of fluid mixture,  $D$ : mixture section,  $\varphi$ : junction angle.

## 2. Módszer

### 2.1. Számítógépes szimulációk alkalmazása

A mérnöki és ehhez kapcsolódó alkalmazott kutatási területeken manapság egyre inkább elfogadottá vált a digitális prototípus tesztelése virtuális környezetben. Az ipari cégek számára a digitális tesztelés költségkímélő, hiszen a valós prototípust nem szükséges felépíteni, a digitális modellen rövid idő alatt számos teszt lefuttatható és az észlelt hiba javítása vagy fejlesztési lehetőség azonnal kivitelezhető, azonnal új teszt is lefuttatható, ezzel jelentős időt takarítanak meg.

A mérnöki tervezéshez elterjedt a Computer-aided Design (CAD) alapú tervezési környezet, az ebben készült digitális munkadarabok – többek

között – a valóságot kiválóan modellező áramlási szoftverekkel – ún. Computational Fluid Dynamics (CFD) szoftverekkel – tesztelhetőek. A mérnöki tervezésnél nagy kihívást jelent a minél hatékonyabb termék kivitelezés, ennél fogva a CFD szoftverek fejlesztése terén az egyes szoftvergyártó cégek között határozott piaci verseny alakult ki, így törekednek arra, hogy a virtuális környezetben végzett számítások és fizikai törvényszerűségek összhangban legyenek, ezáltal minél jobban azonosuljanak a valóságban tapasztalt fizikai környezethez. A sokprocesszoros számítógépfürt (angol nevén cluster) lehetőségeit kihasználó párhuzamosított számítási lehetőség jelentősen meggyorsítja a szimulációk lefutását, hiszen az egyes számításokat ezek a szoftverek több számítógépre (és processzor magra) osztják ki, így az erőforrásokat a legjobban próbálják kihasználni. A szoftvergyártók igyekeznek minél hatékonyabb algoritmusokat készíteni, hiszen a részecske szintű számításokhoz (főleg nagyméretű prototípus esetén) jelentős számítási kapacitás szükséges. A digitális prototípus vizsgálat áramlási környezetben nagyon fontos az építőipar, autóipar, hajógyártás, repülőgépgyártás és egyéb gépgyártás számára is.

Úgy véltük, hogy a világcégek (Boeing, General Motors, Toyota, stb.) referenciáival rendelkező CFD szoftverek garanciát nyújtanak arra, hogy az abban lefuttatott áramlási szimulációk a valósággal nagyon jelentős egyezést mutatnak, így azok az általunk felvetett problémakör vizsgálatához megfelelő környezetet nyújtanak. Szintén fontos volt a megfelelő szoftverek kiválasztásában, hogy az egyszerűsítéseket és átlagolásokat ne tegyenek, hanem kifejezetten részecske alapú modellezés történjen. Ezzel is elérve a valósághoz kiválóan idomuló jelenségek szimulálását.

A virtuális környezetben tapasztalt áramlási tulajdonságok ismeretében következtetünk a tényleges vályúk morfológiájára, ezáltal várhatóan a vályúfejlődés menetét tudjuk pontosítani.

## ***2.2. Vályúrendszerekben folyó áramlás vizsgálata CFD eljárással***

### ***2.2.1. Bemeneti és kimeneti adatok***

A CFD algoritmusokat kezelő szoftverek kiválasztása után megterveztük az egyes vályúrendszereket 3 dimenzióban, AutoCAD szoftver segítségével. Miután a terepi vizsgálatok a vályúrendszerekre irányultak, a szimuláció során méretben is ezekhez hasonló digitális modellt hoztunk létre.

A CFD szimuláció lefuttatása előtt először bemeneti adatokat kell meghatározni. Ezek az áramló közeg fizikai paraméterei és ehhez kapcsolódó fizikai törvényszerűségek, amelyeket manuálisan állítunk be és különféle

módon tudjuk változtatni. A szimulációnk esetében ilyen paraméterek többek között a folyadék sűrűsége, hőmérséklete, viszkozitása, az áramlás kezdősebessége és a gravitációs gyorsulás vektor komponensei az adott vizsgálat lejtőszögéhez meghatározva. Ezt követően a virtuális környezetet jellemző adatokat kell megadni, mint az áramló folyadékoszlop magassága, áramlási csatorna hossza, szélessége, magassága, továbbá a szimuláció milyen hosszú időszakot öleljen fel.

A kimeneti adatok szintén fizikai paraméterek, illetve áramlástanban használatos mennyiségek. A szoftver által számított adatokat vektorokkal, valamint az áramlást az  $x, y, z$  tengelyek mentén, egy metsző síkfelületen is vizsgálni tudjuk. A vektorok főként az áramlás irányára valamint annak változásaira adnak részletes információt. Kiértékeléshez és ebből adatbázis kialakításához alkalmasabb a metsző síkfelületek használata, ahol a program egy kiértékelésre alkalmas színes jelkulcsot használ, amellyel az értékek az áramlás bármely helyén jól meghatározhatók.

A következőkben azt a három mennyiséget ismertetjük röviden, amelyeket digitális modellkísérletünk során is rögzítettünk és tanulmányunk későbbi fejezeteiben is használunk, de természetesen számos további adat vizsgálatára is van lehetőség (pl. statikus nyomás, teljes nyomás, stb.).

### 2.2.2. Áramlás sebessége

Az áramlás sebessége a vízrészecskék sebességét jelenti, vagyis az áramlási tér egy tetszőleges  $\mathbf{r}(x, y, z)$  pontjában  $t$  időpillanatban a folyadékrészecske az  $\underline{U}$  sebességvektora, vagyis a  $\underline{U} = \underline{U}(\mathbf{r}, t) = \underline{U}(x, y, z, t)$  függvény, amely a tér minden pontjához hozzárendel egy vektort, vagyis vektorteret definiál. Ezen a módon jellemzett teret sebességtérnek is nevezik. A kimeneti adatokban az egyes megadott síkok mentén ez a sebességtér vizsgálható, a CFD szimuláció során a sebességvektorok irányát adott részletességgel rögzíteni lehet.

### 2.2.3. Turbulencia intenzitása

A turbulencia esetén az áramló közeg fizikai jellemzői (nyomás, sebesség) gyorsan kaotikusan változnak, rendszertelenül ingadoznak. A turbulens áramlás során nagyságrendekkel több anyag kerül az oldatba, mint lamináris áramlás esetén (SLABE 1995).

Az egyes irányokban vett turbulencia intenzitás egy hányados, amely a turbulens áramlásra jellemző sebesség szóródásának és az áramlás átlagsebességének a hányadosa,

$$I = \frac{u'}{U}$$

ahol  $I$  jelöli a turbulencia intenzitását,  $U$  az áramlás átlagos sebességét a mérési pontban,  $u'$  pedig a négyzetes középértékét a turbulens áramlás miatt létrejött sebesség szóródásnak. Az  $u'$  értékét az

$$u' = \sqrt{\frac{1}{3}(u_x'^2 + u_y'^2 + u_z'^2)} = \sqrt{\frac{2}{3}k}$$

összefüggéssel lehet kiszámítani, ahol  $k$  a turbulens kinetikus energia. Az  $U$  átlagos sebesség az átlagsebesség vektor komponenseiből számítható az

$$U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2 + U_z^2}$$

összefüggés segítségével. Az áramlás, ha lamináris, akkor az  $I$  hányados nagyon kicsi, turbulens áramlás esetén pedig nagy. Az  $U$  sebesség növekedésével az  $I$  értéke csökken, az  $u'$  értékének növekedése nagyobb turbulencia szintet jelöl.

#### 2.2.4. Örvényesség

A turbulens áramlások látványos megnyilvánulása, hogy az áramlási térben örvénylések jelennek meg. Az örvényesség a szimulációs vizsgálatokban a

$$\omega = |\nabla \times \underline{U}|$$

összefüggéssel kerül meghatározásra, amely az áramlás sebességének a modulusa, mértékegysége 1/s. Egy metsző sík mentén 2D-ben az  $\omega$ -nak csak  $z$  irányú komponense van, így az felírható a

$$\omega = \text{rot}\underline{U} = \nabla \times \underline{U} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}\right) \times (U_x, U_y) = \frac{\partial U_y}{\partial x} - \frac{\partial U_x}{\partial y}$$

összefüggéssel. Az összefüggésben a *rot* jelölés a vektormező rotációját jelenti,  $\nabla$  jelölés a *nabla operátor*, egy matematikai operátor, amely az általa képviselt összefüggést egyetlen jelöléssel helyettesíti, az  $\underline{U}$  pedig az áramlási tér sebességvektora.

### 2.2.5. Modellek létrehozása

A terepi adatokat alapul véve olyan digitális vályúmodelleket hoztunk létre, amelyek méretükben a valósággal jó egyezést mutatnak. Az alább felsorolt modellekben végeztük el a kísérleteket, a modellek számozása egyben a kísérletek sorrendjét is kifejezik (és ezekre a számokra tanulmányunk későbbi fejezeteiben is hivatkozni fogunk):

(1) A becsatlakozási helyek közelében létrejövő áramlási viszonyok vizsgálatához először egy 50 cm széles és 40 cm mély fővályút és abba egy  $30^\circ$ -ban becsatlakozó, 30 centiméter széles, 40 centiméter mély, nem függő mellékvályút terveztünk. A digitális terepfelület hossza 5 méter, szélessége 3 méter.

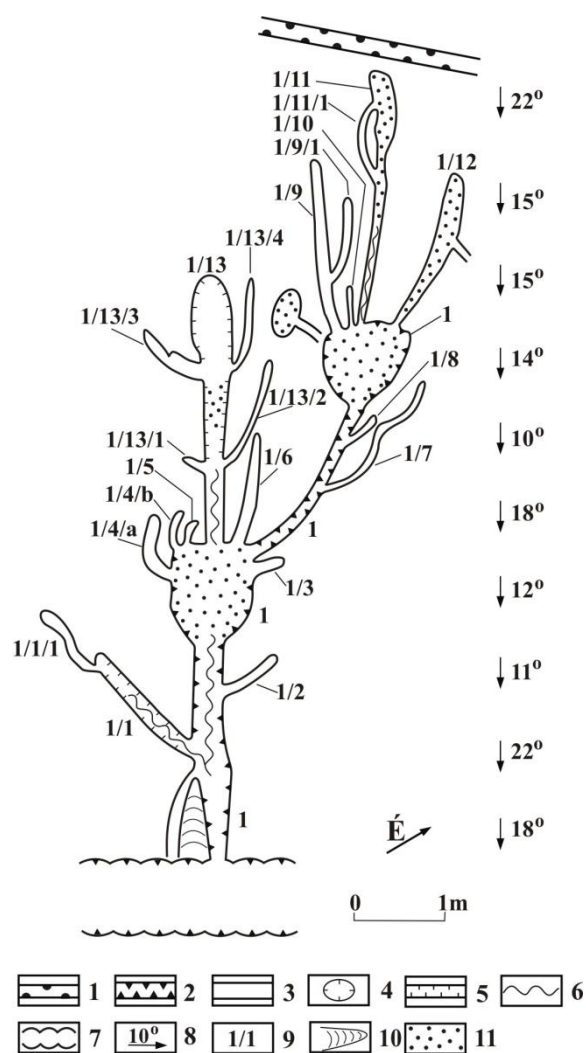
(2) Az (1) modellt módosítottuk úgy, hogy a mellékvályú 20 centiméter függésben csatlakozzon be a fővályúba, vagyis annak szélessége 30 cm, mélysége 20 cm lett. Minden más paraméter változatlan maradt.

(3) Létrehoztunk egy vályúrendszert oly módon, hogy annak fővályúja 50 centiméter széles és 40 centiméter mély, abba  $10^\circ$ - $90^\circ$  között,  $10^\circ$ -os becsatlakozási szög emelkedéssel csatlakoznak be mellékvályúk a digitális modell felső szélétől lefelé haladva különböző távolságokban; ez 9 darab mellékvályút jelent. A vályúrendszert tartalmazó felszín 15 méter hosszú és 10 méter széles. A vályúrendszerrel azt kívántuk vizsgálni, hogy a különböző lejtőszögeknél a turbulens szakaszok hossza és az örvénylés mérete, intenzitása milyen módon változik. Szintén vizsgálni kívántuk az egyes becsatlakozási szögek hatására létrejövő hidrodinamikai jelenségeket.

(4) A (3) vályúrendszerben elhelyeztünk egy madáritatót, amelybe két mellékvályút 20 cm-es függéssel csatlakoztattunk be, minden más paraméter változatlan maradt. A madáritató viszonylag nagyobb átmérőjű nem túlságosan mély karos forma, vályúban is előfordul (3. ábra). Digitális modellünkben a madáritató 1,5 méter hosszú és 1 méter széles. A madáritató közbeiktatásával azt kívántuk vizsgálni, hogy ilyen forma megléte esetén hogyan változnak az áramlási viszonyok.

A megtervezett modellvályúkon a digitális szimulációkban variáltuk a kezdősebességeket, a fizikai paramétereket, a lejtőszög szerinti gyorsulás értékeket. Az egyes szimulációk adatait TIFF (veszteségmentes) formátumban, jelkulcsos grafikával a CFD programból archiváltuk, amely értékeit elemző algoritmussal Wolfram Research Mathematica szoftver segítségével kiértékeljük és térben ábrázoltuk a jobb megérthetőség illetve a jelenség szemléletesebb ábrázolása, megértése, vizsgálata céljából.





3. ábra: A XXVII-es jelzéssel ellátott vályúrendszer, a jól elkülönülő két madáritatóval. (VERESS et. al. 2013)  
 Jelmagyarázat: 1. hasadék, 2. fő B típusú vályú, 3. A típusú vályú, 4. talpi madáritató, 5. B típusú mellékvályú, 6. meanderező belső vályú (III típusú), 7. kürtőkből összenőtt hasadék, 8. lejtőszög és a lejtő dőlésiránya, 9. vályú azonosító jele, 10. vályúközi hát, 11. talaj

Fig. 3.: The channel system XXVII, with two well separated kamenitza.  
 Jelmagyarázat: 1. grike, 2. type B main channel, 3. type A channel, 4. kamenitza on the floor, 5. type B tributary channel, 6. meandering internal channel (type III), 7. grike developed from coalesced pits, 8. slope angle and dip direction of the slope, 9. channel identification mark, 10. ridge between channels, 11. soil

A jelentős méretű adathalmaz (kísérletenként nagyjából 10 millió adat) kezeléséhez és feldolgozásához speciális algoritmusokat fejlesztettünk ki, a feldolgozást segítették a Wolfram környezet által kínált, jól optimalizált programozási megoldások.

### 3. Eredmények

#### 3.1. A szimulációk során megfigyelt jelenségek

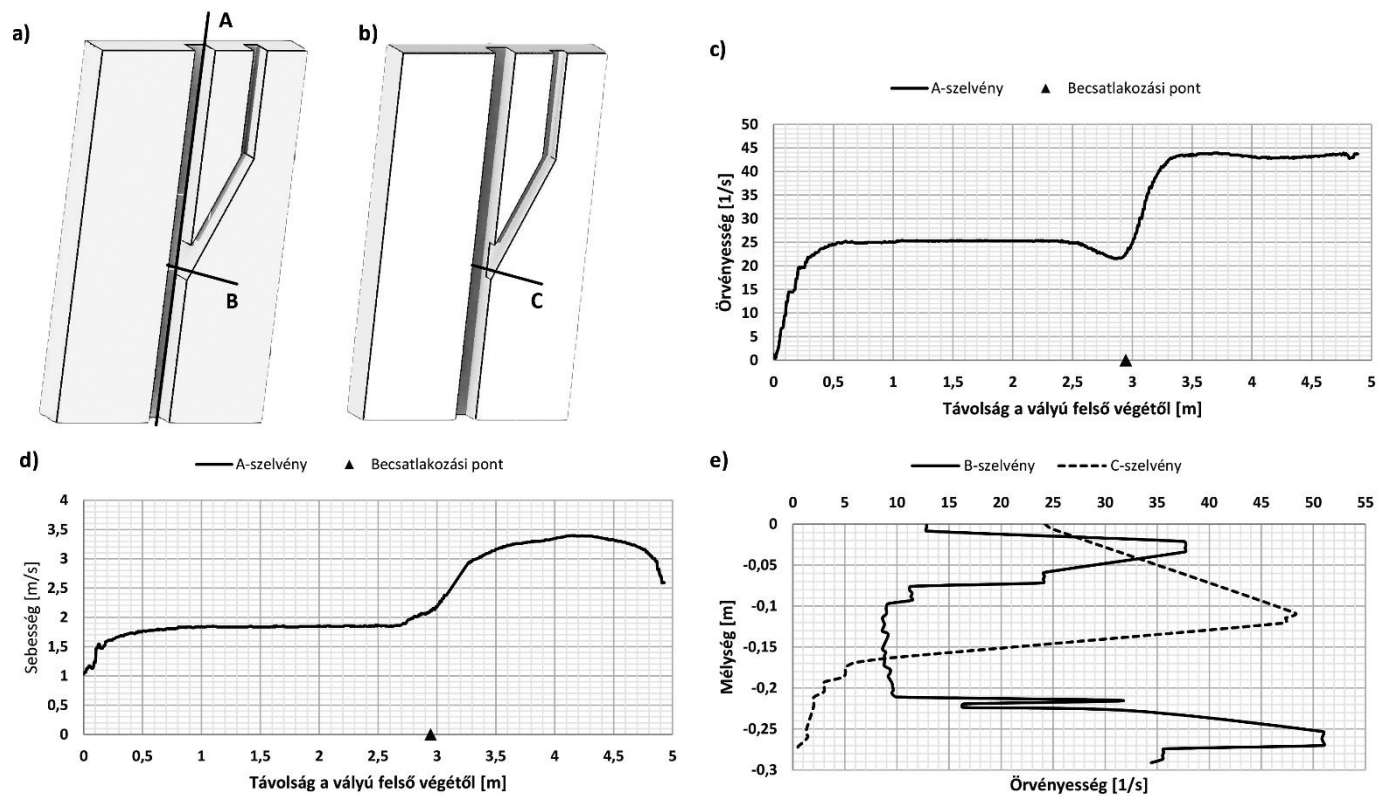
##### 3.1.1. Szimulációk egy mellékvályús modellen

Az egy mellékvályús modellekkel végzett digitális kísérletekben kifejezetten arra voltunk kíváncsiak, hogy a mellékvályú becsatlakozási helyénél a fővályúba és annak közelében milyen áramlási jelenségek valamint sebességváltozások jönnek létre. A vizsgálat kiértékelését az áramlás irányát jelző vektorok nagyban segítették, ezt követően terveztük meg az adatgyűjtés módját, az ehhez szükséges áramlást metsző síkok helyzetét.

Az (1) modellkísérlet során megállapítottuk, hogy a becsatlakozást követően a víz áramlási sebessége ugrásszerűen megnövekszik. A turbulencia intenzitás vizsgálata során megfigyeltük, hogy a mellékvályúban, annak becsatlakozása előtt, a turbulencia intenzitása már megnövekszik. Ebből arra következtetünk, hogy a becsatlakozó mellékvályú alsó szakaszán nagyobb mértékű oldódás lehet jelen, amely a becsatlakozás előtti keresztmetszet alakulására hatással bírhat (4. ábra).

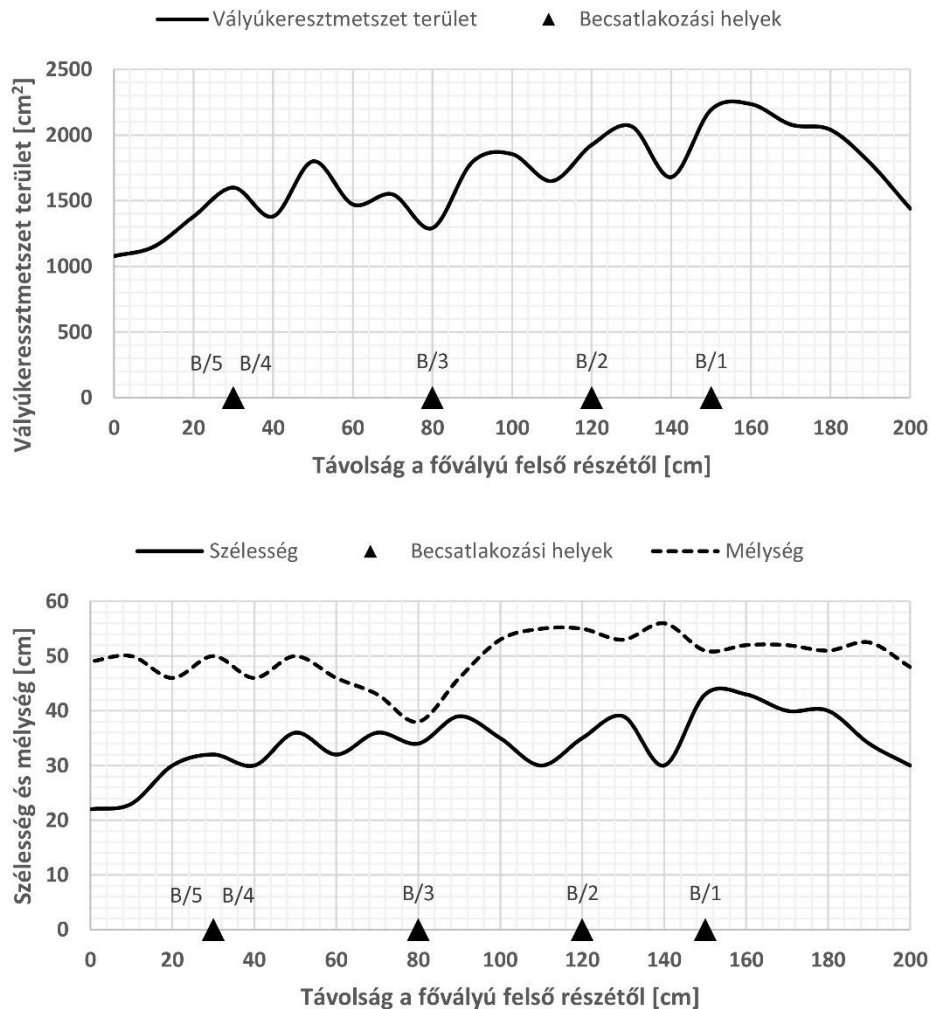
A fővályúban a jelentős mértékű turbulencia intenzitás a becsatlakozást követően hosszabb szakaszon észlelhető, sőt a mellékvályú becsatlakozási helye felett is már megjelenik egy viszonylag rövidebb szakaszon. Ebből arra következtetünk, hogy a fővályúban a mellékvályú becsatlakozása előtt már meg kell jelennie egy keresztmetszet növekedésnek (5. ábra).

Az örvényesség markánsan kifejlődik a fővályúban a mellékvályú becsatlakozásánál és az után. Oldalirányból elmetszve az áramlást az  $y, z$  tengelyekkel párhuzamos síkkal az örvények függőleges metszetéről kapunk információkat. Megfigyelhető, hogy az örvények az (1) esetben a becsatlakozás után két szinten jelennek meg hosszan, a vízfolyás tetején és az alján, a becsatlakozásnál pedig egy rövidebb szakaszon az egész vízoszlopot átfoogó nagyméretű örvényesség jelenik meg, amely a becsatlakozási helyet elhagyva megszűnik. Ez a lokális nagyméretű örvényesség a vízoszlop tetején illetve alján intenzívebb (4. ábra). A tapasztalt jelenségekből arra lehet következtetni, hogy függés nélküli mellékvályúk esetén a vályú alján is jelentős oldás jelenik meg, akár hosszan is, amely inkább a vályú mélyítésében játszik szerepet.



4. ábra: a) Fővályú és mellékvályú azonos mélységgel. b) Fővályú és 20 centis függéssel becsatlakozó mellékvályú. c) Örvényesség változása az A jelű szelvény mentén. d) Áramlási sebesség változása az A jelű szelvény mentén. e) Örvényesség a B és a C jelű szelvény mentén.

Fig. 4.: a) Main channel and side channel with equal depth. b) Main channel and side channel joined with 20 cm height. c) Change of vorticity along section A. d) Change of velocity of flow along section A. e) Vorticity along sections B and C.



5. ábra: Az (1) és (2) vályúmodellben tapasztalt jelenségek a B jelzésű vályúban. Az egyes becsatlakozó mellékvályúk kis mélységűek, inkább a kiszélesedésre hatnak. A B/3 jelzésű mellékvályú mélyebb, sokkal kisebb a függése, a kimélyítés hosszabban megjelenik. Megfigyelhető a mellékvályú keresztmetszet növekedése már becsatlakozás előtt, ami a becsatlakozás előtt megjelenő turbulencia okára vezethető vissza.

Fig. 5.: The experienced phenomena in (1) and (2) digital channel system model in the channel system B. The side channels are small sized and they have effect on the local width of the main channel. The side channel B/3 has larger depth, that is why its junction height is small, so it has an effect to the depth of main channel from its junction point. We can notice the increase of the cross section of the main channel before the junction point, caused by the increased turbulence intensity at this section.

A (2) kísérletben az (1) modellkísérlettel ellentétben a függő mellékvályú becsatlakozás esetén jóval inkább a vízoszlop felső részén és még inkább lokálisan, a becsatlakozásnál jól elkülöníthető helyen jön létre örvénylés, amely a becsatlakozás helyétől tovább már nem fordul elő. Ezért a

függő mellékvályú esetén feltételezzük, hogy rövidebb és markáns kiszélesedések alakulnak ki, mivel az örvénylés inkább a vályú keresztmetszete szerint annak a felső részén, annak szélesítésére hathat. Az áramlás sebessége és turbulencia intenzitása a (2) esetben is ugyanúgy jelenik meg a mellékvályúban és a fővályúban, mint az (1) kísérlet esetén, azonban ennek értékei elmaradnak az (1) kísérlet során tapasztaltaktól.

Az 5. ábrán a B jelzéssel ellátott terepi vályúrendszer adatait mutatjuk be, amely mérete a digitális kísérletünkben kialakított vályú méreteivel hasonló. A fővályú átlagos szélessége és mélysége 35-50 centiméter, a fővályúba érkező mellékvályúk elegendő távolságra vannak ahhoz, hogy az egyes jelenségeket megfigyelhessük.

Megfigyelhető, hogy a becsatlakozások előtt már megjelenik a keresztmetszet növekedése a fővályúban, amely alátámasztja az (1) és (2) kísérletnél megfigyeltet, vagyis azt, hogy a turbulencia intenzitás növekedése már a becsatlakozás előtt megjelenik a fővályúban is. Az, hogy ez a keresztmetszet növekedés a vályú szélesedése vagy mélyedése miatt történik a becsatlakozások morfológiai tulajdonságától függenek. A mellékvályúk (amennyiben más tényezők nem hatnak) a fővályú felé haladva átlagosan szélesednek, amely a mellékvályúban is megjelenő turbulenciának tudható be. A megfigyelt jelenség tehát összhangban van a terepi adatokkal.

A B jelzésű vályúrendszer fővályújába kis függéssel csatlakozik be a B/3 jelzésű mellékvályú. Látható, hogy ennek hatása (a többivel ellentétben) inkább a mélyítésre, mintsem a szélesítésre fordítódik. Ez megerősíti az (1) kísérletben tett felvetésünket.

Az említett B/3 mellékvályún kívül a többi mellékvályú (B/1, B/2, B/4, B/5) nagy függéssel csatlakozik be a fővályúba. Ezek értékei 35-50 centiméter közé esnek. Megfigyelhetjük, hogy ezek a mellékvályúk a mélységre nincsenek hatással, inkább lokális szélesedést okoznak. Ez ugyancsak alátámasztja a digitális modell kísérletünk eredményeit.

### *3.1.2. Szimulációk vályúrendszereken*

Az egy mellékvályús modellkísérleteket követően a (3) modellkísérletben a lejtőszögek változtatásával a különféle becsatlakozási szögekkel érkező mellékvályúk esetén az áramlási tulajdonságokat és örvényességet kívántuk vizsgálni, különösképpen a becsatlakozási helyeken. Kíváncsiak voltunk arra is, hogy az egyes mellékvályúk az alattuk becsatlakozó mellékvályúkra milyen hatással bírnak.

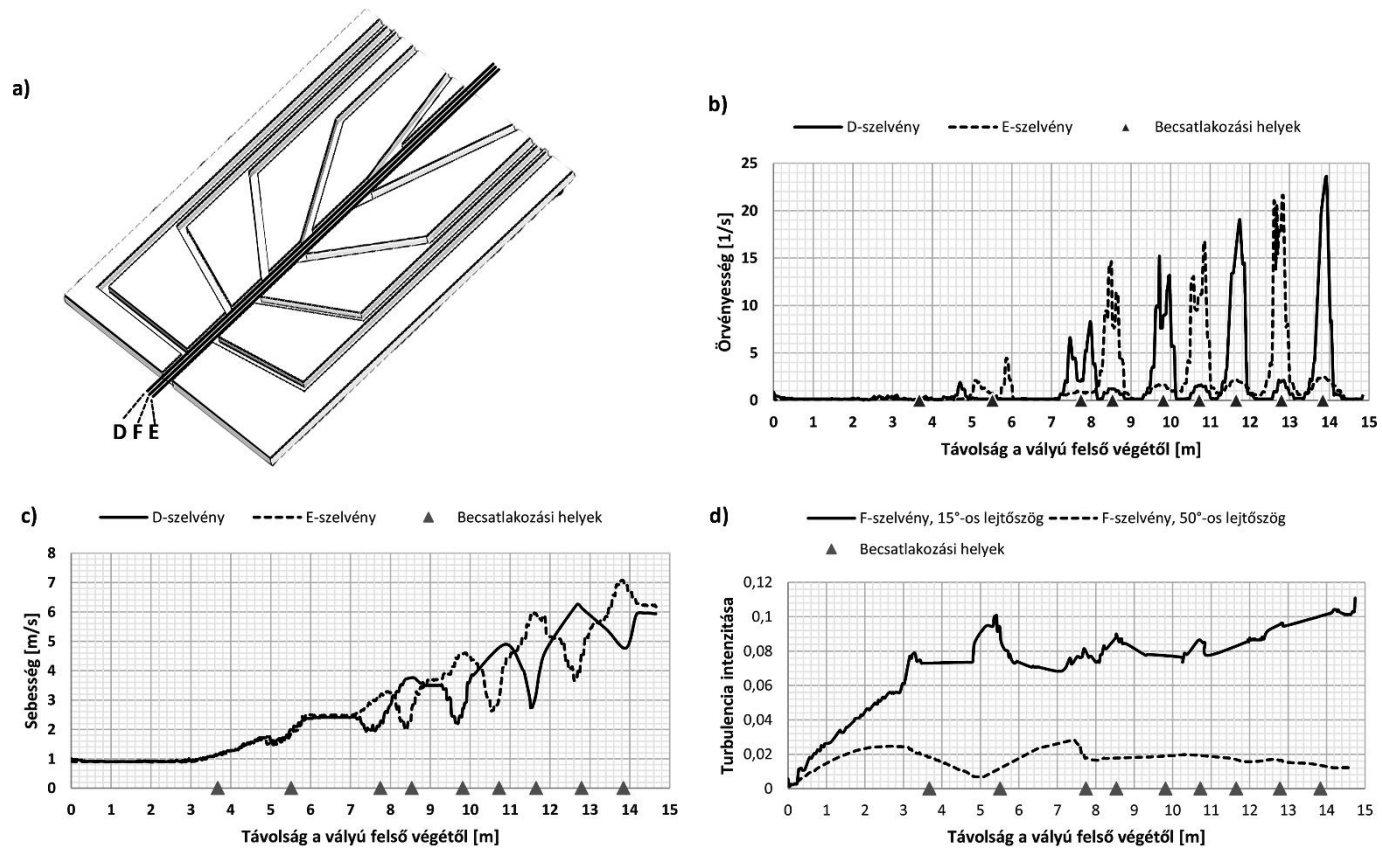
E kísérlettel a korábbi terepi és laboratóriumi vizsgálataink eredményei során felvetett további kérdések kapcsán kívántunk olyan jelenségekre

rátalálni, amely e problémakört előidéző hidrodinamikai jelenségeket vizsgálhatóvá teszi (MITRE *et. al.* 2014). A kísérlet során, a lejtőszöget fokozatosan emelve  $5^\circ$ -ról  $60^\circ$ -ig, minden esetben megfigyelhető az örvényesség létrejötte a becsatlakozási helyek közvetlen közelében a fővályúban, valamint a már megfigyelt turbulencia intenzitásának emelkedése a fővályúban és a mellékvályúban a becsatlakozás helye előtt. A sebesség értékek tekintetében – minden vizsgált esetben – a fővályú folyásirányban haladva, a vályúrendszer tetejétől az aljáig a sebesség növekszik. Ez a sebességnövekedés a fővályúban a vályúrendszer alján a legnagyobb.

Lokális sebességnövekedést is tapasztalunk, főként a nagy becsatlakozási szöggel rendelkező mellékvályúk becsatlakozási pontjainál. Mindezt azzal magyarázzuk, hogy a mellékvályúból beáramló víz, különösen, ha a mellékvályú becsatlakozási szöge nagy, leszűkíti a fővályúban áramló vízág keresztmetszetét, ami az áramlási sebesség növekedését és így a turbulens áramlás kialakulását eredményezi. Az örvénylő szakaszt elhagyva ez a sebesség lokálisan újra csökken, az áramlás ismét a teljes fővályú szélességében zajlik, és rövid lokális csökkenő szakasz után az áramlási sebesség ismét növekedni kezd. A kiértékelt adatok alapján a lokális sebességnövekedés akár többszöröse is lehet a becsatlakozás felett mérhető sebességnek (6. ábra).

A víz a becsatlakozási helyeknél kialakuló örvények közepén, bizonyos helyeken 20 teljes körbefordulást is végezhet egy másodpercen belül. Az örvények tipikusan ott jelennek meg, ahol a becsatlakozó mellékvályú becsatlakozó keresztmetszete a fővályúhoz képest nem túlságosan nagy. Ez modellünkben főként a nagyobb becsatlakozási szögek esetén jellemző. Mivel a mellékvályú szögének a változása miatt nő a kaotikusságra az esély, így nem, vagy jelenleg nem ítéltető meg, hogy ennek változásától hogyan függ a kiszélesedés mérete.

Határozottan megállapítható, hogy a lejtőszög emelkedésével a turbulencia intenzitásának értéke csökken. 15 fok és 50 fok dőlésszögeket összehasonlítva például az 50 fokos lejtőszögnél a kisebb lejtőszögnél tapasztalt értéknek nagyjából fele a turbulencia intenzitása a vályúrendszer alsó részén. A turbulencia intenzitásának formulája alapján ez nem jelenti azt, hogy az áramlás kevésbé turbulens, hanem inkább a vízáramlás sebessége nő meg a vályúrendszer alján a nagyobb dőlésszög miatt. Végül megjegyezzük, hogy a turbulencia intenzitás értéke a fővályú vályú alsó része felé haladva – kis dőlésszögnél – emelkedő tendenciát mutat (6. ábra).



6. ábra: a) A megtervezett digitális vályúrendszer a vizsgálathoz felvett szelvényekkel. b) Az örvényesség megjelenése a D és E szelvények mentén. c) A sebességértékek változása a D és E szelvények mentén. d) Turbulencia intenzitása az F szelvény mentén a vályúrendszer 15°-os és 50°-os dőlésszöge esetén.

Fig. 6.: a) Designed digital channel system with the sections for examinations. b) Vorticity values along sections D and E. c) Changing of velocity values of the flow along sections D and E. d) Turbulence intensity along section F in case of 15° and 50° slope angle in the channel system.

A (4)-es számú vályúrendszerrel a madáritatóval rendelkező vályúrendszeren futtattuk a digitális kísérletet, a lejtőszög értéke  $15^\circ$  volt. A szimulációk futtatása során határozottan kimutatható volt, hogy a turbulencia intenzitása a (3) kísérletnél tapasztalt kaotikus változások helyett határozott és kiegyensúlyozottabb módon jelenik meg a vályúrendszerben és egyben kisebb értéket vett fel. A madáritató területén, különösképpen a mellékvályú-becsatlakozási helyek mellett, enyhén megemelkedik sőt gyenge örvénylés is létrejön, azonban a madáritató feletti részen alacsony az értéke, illetve a madáritató alatti fővályú szakaszon a lokális ingadozások ellenére csökkenő értéket vesz fel a vályú alsó vége felé haladva (7. ábra). A (4) kísérletben sokkal kevésbé jelenik meg a (3) modellkísérletben mért értékekhez képest a turbulens zóna a mellékvályúban, a kísérletek során nagyon kis értéket vett fel.

### 3.2. Szimulációs eredmények alapján madáritatóval rendelkező tényleges vályúrendszerek vizsgálata

A (4) kísérletnél megfigyeltük, a madáritató jelenléte a vályúrendszerben kiegyensúlyozottabb áramlási viszonyok létrejöttét eredményezi. Feltételeztük, hogy a madáritatóval rendelkező vályúk esetén az oldódás lassabb a mellékvályúban a kisebb turbulens áramlás miatt. Ezért a madáritátós vályúrendszerek esetében a fővályúk keresztmetszetéhez képest jóval kisebb keresztmetszetű mellékvályúk jönnek létre, mint a madáritató nélküli vályúrendszerek esetében.

A terep mérésekből rendelkezésünkre álló vályúrendszeradatbázisunkban 27 darab olyan vályúrendszert tudtunk kiválasztani, amelyek mind a fővályú, mind a mellékvályú esetére részletes méretadatokat tartalmaznak. Ezen kiválasztott vályúrendszerek közül 17 darab vályúrendszer nem tartalmaz madáritatót, 10 darab vályúrendszer viszont igen.

A vizsgálathoz meghatároztuk az egyes mellékvályúk átlagos keresztmetszeteinek arányát a fővályú átlagos keresztmetszetéhez viszonyítva. Az első lépésben a vályúk keresztmetszetét vizsgálatainkban megszokott módon határoztuk meg (VERESS *et. al.* 2010), vagyis

- V alakú (A típusú) vályú esetén:  $F = \frac{1}{2} a \cdot b$ ,
- U alakú (B típusú) vályú esetén:  $F = a \cdot b$ ,

ahol  $F$  a vályú keresztmetszet területe,  $a$  a vályú szélessége,  $b$  a vályú mélysége egy adott szelvény mentén. Vizsgálatainkban a fővályúk egyes szelvények mentén számított keresztmetszet-területét  $F_f$ -el, a mellékvályúkéét pedig  $F_m$ -mel jelöltük.



Ezt követően képeztük az átlagos keresztmetszet területeket a fővályúk esetén a  $T_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{f i}$ , mellékvályúk esetén a  $T_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{m i}$ , összefüggéssel, ahol  $n$  az adott fő- illetve mellékvályún felvett szelvények darabszáma, amely szelvények mentén számítottuk az egyes keresztmetszet területeket. Ezeket a szelvényeket a vizsgált vályúrendszereken 10 cm sűrűséggel vettük fel, ami megbízható pontosságú adatot szolgáltat a vályúrendszer keresztmetszet értékeinek alakulásáról, ezáltal pontosabb átlagértéket is kapunk. A vizsgálathoz a számított  $T_f$  és  $T_m$  értékek hányadosát képezzük:

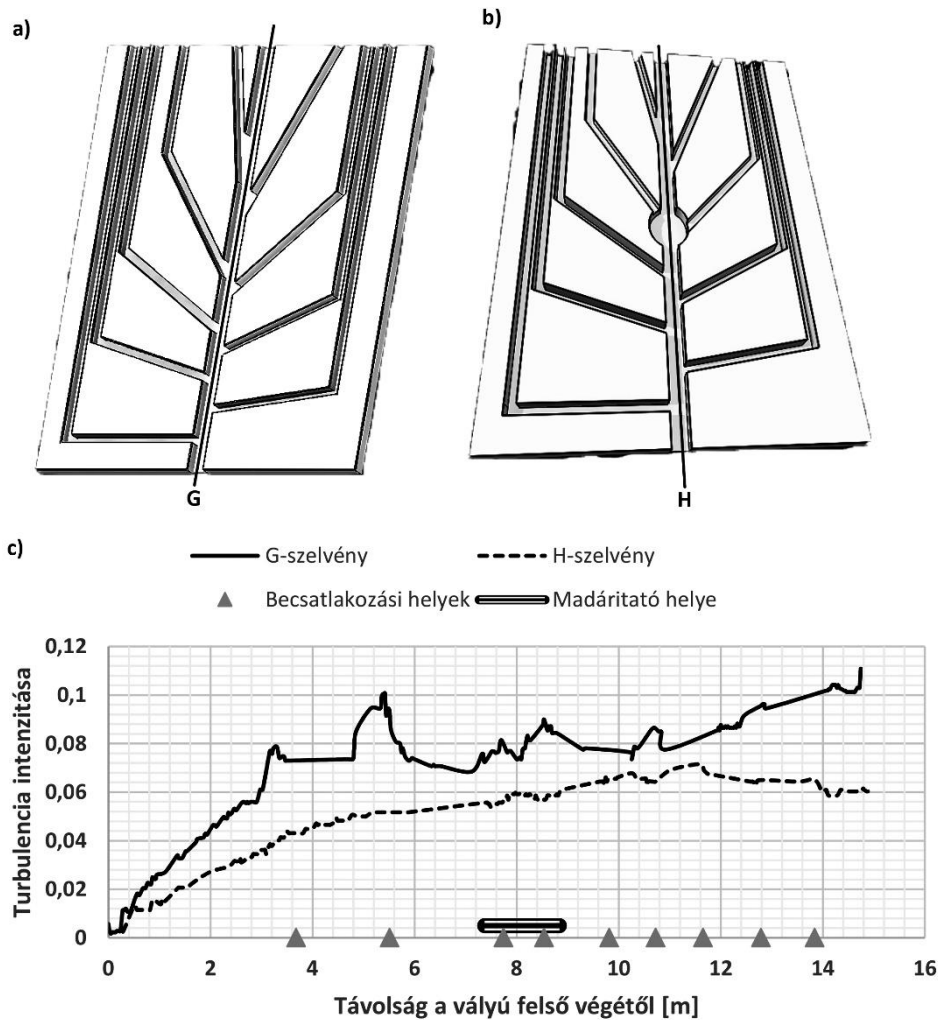
$$E = \frac{T_m}{T_f}$$

ahol az  $E$  hányados kifejezi a mellékvályúk átlagos keresztmetszet területének nagyságát a fővályú átlagos keresztmetszet területéhez képest. Ez az érték minél nagyobb, annál nagyobb keresztmetszetű mellékvályúk csatlakoznak be a fővályúba, az érték csökkenése a mellékvályúk méretének csökkenését jelenti a fővályú méretéhez képest. Az egyes vályúrendszerek számított adatait az *I. táblázat* foglalja össze.

*I. táblázat*  
Table I

*A vizsgált vályúrendszerek adatai*  
Data of the examined channel systems

Madáritatóval rendelkező vályúrendszerek				Madáritató nélküli vályúrendszerek			
Vályú jelzése	$T_f$ (cm <sup>2</sup> )	$T_m$ (cm <sup>2</sup> )	E	Vályú jelzése	$T_f$ (cm <sup>2</sup> )	$T_m$ (cm <sup>2</sup> )	E
IV.2.	360,3	21,8	0,06	III.1.	326,4	64,8	0,20
IV.3.	298,3	51,8	0,17	IV.1.	491,5	38,5	0,08
IV.4.	658,6	275,2	0,42	IV.5.	517,6	176,0	0,34
V.1.	1414,8	178,5	0,13	V.3.	2283,0	446,7	0,20
V.2.	1073,2	66,4	0,06	VII.1.	806,9	172,5	0,21
V.4.	1929,4	284,4	0,15	XXVI	713,3	134,2	0,19
VI.1.	2166,3	143,7	0,07	3	712,1	282,1	0,40
VI.2.	1631,2	199,4	0,12	4	370,5	199,4	0,54
XXVII	1277,2	135,7	0,11	B	1687,9	156,9	0,09
D	1084,9	168,3	0,15	C	237,2	69,3	0,29
				E	741,5	285,1	0,38
				F	83,7	22,0	0,26
				G	164,5	21,8	0,13
				H	147,8	58,1	0,39
				I	630,1	34,6	0,05
				J	28,7	23,2	0,81
				K	34,7	14,4	0,41



7. ábra: c) Turbulencia intenzitás értéke fővályúban a) madáritató nélküli vályúrendszerben G szelvény mentén és b) madáritatós vályúrendszerekben H szelvény mentén.

Fig. 7.: c) Turbulence intensity in the main channel of channel system, in case of system a) without kamenitza along section G, and b) with kamenitza along section H.

Hipotézisünk tehát az, hogy a nagyobb  $E$  hányados a madáritató nélküli vályúkra jellemző a kisebb  $E$  hányados pedig a madáritatóval rendelkező vályúkra.

A madáritató nélküli vályúrendszerekben az  $E$  érték jelentős intervallumban ingadozik, de átlagértéke nagyobb, mint a madáritatós vályúk esetében. Szintén érdemes megfigyelni, hogy bizonyos kisebb abszolút mé-

retű vályúrendszereknél (pl. a  $J$  rendszer) a mellékvályú és a fővályú méretkülönbsége jelentősen kisebb, mint a nagyobb méretű, kifejlett vályúrendszerek esetén.

Hipotézisünket kétmintás  $t$ -próbával ellenőrizzük, amely vizsgálat-hoz a szignifikancia szintet a megszokott  $\alpha=0,05$ -nek vesszük. A hipotézis ellenőrzésére a statisztikai és táblázatkezelő számítógépes programokban könnyen kiszámítható  $p$  értéket határozzuk meg, amely lényegében annak a valószínűségi értéke, hogy a kétmintás  $t$ -próba során kiszámolt további  $t$  értékek legalább olyan messze vannak 0-tól, mint a jelenlegi adataink alapján megfigyelt  $t$  érték.

A két adatsor alapján meghatároztuk a  $p$  értéket,  $p=0,014$ , azaz  $p < \alpha$ , tehát szignifikánsan különbözőnek vehetjük a két csoport adatait, amely azt jelenti, hogy lényeges eltérés van a madáritatóval rendelkező és a madáritató nélküli vályúrendszerek mellékvályú méreteit tekintve a fővályúhoz viszonyítva.

Megállapításukat ellenőrizzük a kétmintás  $t$ -próba hagyományos számítási eljárásával, ahol 95%-os valószínűség szintjén meghatározzuk először a  $t_{kr}$  kritikus értéket majd a  $|t_{sz}|$  számított értéket és e két érték viszonya alapján döntünk hipotézisünk helyességéről. Számításaink alapján a  $|t_{sz}|= 2,64$ ,  $t_{kr}=2,09$ , vagyis a  $|t_{sz}| > t_{kr}$ , tehát a két adatsor szignifikánsan különbözőnek számít.

Vizsgálatunk alapján megállapítható, hogy a madáritatóval rendelkező vályúrendszereknél a fővályú méretéhez képest jelentősen kisebb mellékvályúk csatlakoznak be, mint a madáritató nélküli vályúrendszerek esetében. Megállapítható, hogy madáritátós vályúrendszerek esetében kb. 1/10- és 1/6-a közé esik a mellékvályú relatív mérete a fővályúhoz képest. A madáritató nélküli vályúrendszerekben pedig a fővályúba az előzővel ellentétben viszonylag nagyobb relatív méretű mellékvályúk csatlakoznak be. Ezek mérete átlagosan a fővályú méretének 1/3-a, sőt akár 1/2-e, esetleg ennél nagyobb is lehet. Megfigyelhető, hogy a viszonylag kisebb abszolút méretű vályúrendszerek esetén (például  $J$  és  $K$  jelzésű vályúrendszerek) a madáritató nélküli esetben a mellékvályú és a fővályú méreteltérése jelentősen kisebb.

#### 4. Következtetés

Vizsgálatunk során a vályúrendszerekben áramló víz hidrodinamikai tulajdonságainak modellezéséhez számítógépes szimulációt alkalmaztunk, CFD szoftver segítségével. Célunk az volt, hogy a turbulens áramlás és az örvénylések létrejöttével a vályúfejlődés folyamatát lemodellezzük és a számí-

tógépes szimulációk eredményei alapján a terepi vályúk néhány morfológiai sajátosságait értelmezzük.

A turbulens áramlást vizsgálataink szerint az okozza, hogy a mellékvályúknál beáramló víztöbblet összeszűkíti a fővályú vizágát.

A függő mellékvályúknál nagy méretű vályúkiszélesedés a fővályúban azért jöhet létre, mert vizsgálataink szerint lokális, de erőteljes örvénylés alakul ki a becsatlakozásnál, míg a nem függő mellékvályúnál bár létrejöhet kiszélesedés, de sokkal kevésbé különül el a fővályú többi részétől a méretét tekintve, mivel az örvénylés a fővályúban kiterjedtebb szakaszon jön létre. Ez utóbbi esetben a mélyülés jelentősebb, miután az örvénylés nem csak kiterjedtebb, hanem nagyobb mélységben is végbemegy.

A madáritató vályúrendszerek fővályúiban kialakult madáritatókhoz valamint a fővályúba becsatlakozó mellékvályúk kisebb keresztmetszetűek, vizsgálataink szerint, mint a nem madáritató vályúrendszerek mellékvályúi. Mindez azzal magyarázható, hogy a mellékvályúban nem lép fel turbulens áramlás és örvényesség. Ennek valószínű az az oka, hogy a nagy kiterjedésű madáritatóban nem szűkül össze az áramlás, mivel a mellékvályúból érkező bepótlás során kialakuló örvény gyengén fejlett. De a madáritató vize azért sem szűkül, mert a vízbepótlás esetén a madáritató vize túlfolyik.

A kísérleteket a terepen felmért vályúrendszerek digitális megfelelőjében kívánjuk folytatni, amely forma a valósággal teljesen megegyező környezetet kínál. Azt követően többváltozós analízissel kívánjuk a problémakört elemezni, ez alapján reményeink szerint a terepen mért vályúadatok adatbázisában további morfológiai tulajdonságok vizsgálatával újabb összefüggésekre deríthetünk fényt.

## **IRODALOM**

*BÖGLI, A. (1976): Die Wichtigsten Karrenformen der Kalkalpen – In: Karst Processes and Relevant Landforms. ISU Commission on Karst Denudation, Ljubjana pp. 141-149.*

*DEÁK GY. – SAMU SZ. – PÉNTÉK K. – MITRE Z. – VERESS M. (2012): Vízáramlási modellkísérletek vályúrendszereken – Karsztfejlődés XVII. pp. 155-163.*

*FORD, D. C. – WILLIAMS, P. W. (2007): Karst Hydrogeology and Geomorphology – John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, 561 p.*

*KOZMA K. – MITRE Z. (2012): Variations of type A channels in Totes Gebirge – Zeitschrift für Geomorphologie 56(Suppl. 2.) pp. 37-46.*

*SLABE T. (1995): Cave Rocky Relief – Znaustvenaraziskovalni Center SAZU, Ljubljana, 128 p.*

*VERESS M. – PÉNTEK K. – CZÖPEK I. – ZENTAI Z. – DEÁK GY. – MITRE Z.* (2007): Adatok a Totes Gebirgei lejtők karrosodásához – Karsztfejlődés XII. Szombathely, 2007. pp. 137-152.

*VERESS M.* (2009): Rinnenkarren – In: Angel Ginés, Martin Knez, Tadej Slabe, Wolfgang Dreybrodt (szerk.) Karst rock features: Karren sculpturing. Ljubljana: ZRC SAZU. pp. 211-222.

*VERESS M. – ZENTAI Z. – PÉNTEK K. – EŐRY M. – MITRE Z.* (2009): Vályúfejlődés csupasz lejtőkön – Karsztfejlődés 14. pp. 139-159.

*VERESS M.* (2010): Karst environments: Karren formation in high mountains – Hannover: Springer Netherlands, 230 p. DOI: 10.1007/978-90-481-3550-9

*VERESS M. – PÉNTEK K. – ZENTAI Z. – MITRE Z.* (2010): Vízágas vályúkarrok fejlődési típusai – Karsztfejlődés XV. pp. 61-84.

*VERESS M. – ZENTAI Z. – PÉNTEK K. – MITRE Z.* (2011): Rinnenkarr rendszerek fejlődése – Karsztfejlődés XVI. pp. 71-85.

*VERESS M. – ZENTAI Z. – PÉNTEK K. – MITRE Z. – DEÁK GY. – SAMU SZ.* (2012): Vályúrendszerek fővályúinak fejlődése – Karst Development / Karsztfejlődés XVII. pp. 131-154.

*VERESS M. – ZENTAI Z. – PÉNTEK K. – MITRE Z. – DEÁK GY. – SAMU SZ.* (2013): Flow dynamics and shape of rinnenkarren systems. Geomorphology 198. pp. 115–127.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.05.019>

*VERESS M. – SAMU SZ. – MITRE Z.* (2015): The effect of slope angle on the development of type a and type b channels of rinnenkarren with field and laboratory measurements. Geomorphology 228. pp. 60–70.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.08.014>