

KARROS FŐVÁLYÚBAN LÉTREJÖVŐ ÁRAMLÁSOK SZIMULÁCIÓS VIZSGÁLATA

SIMULATED EXAMINATION OF FLOW IN THE MAIN CHANNELS OF KARREN SYSTEMS

MITRE ZOLTÁN

ELTE SEK Földrajzi- és Földtudományi Intézet, Földrajzi Tanszék
9700 Szombathely, Károlyi Gáspár tér 4. mitre.zoltan@sek.elte.hu

Abstract: In the paper we present a special analysis of the water flow in the main channels of karren systems, with special consideration to the vorticity and velocity in flow at the connecting points of the tributary channels. We made a digital channel system model with an 11 meters long main channel and 9 tributary channels joined into it, with different junction angles from 10° to 90°. We used CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation algorithm to simulate the water flow, and collected data about the vorticity and velocity with a resolution of 1 cm³ from the main channel. We made the simulations with slope angles from 5° till 45° with a step of 5°. We calculated the average values of these data in every cross sections situated 1 cm from each other along the main channel of the channel system. We took a special attention to the local maximum values of these data, relatively to the local minimum values. We represented these maximum values with column diagram in special junction angle groups, where we could examine the tendency of values in case of every slope angles at every junction angles. We also had the ability to examine the tendency of values at the same slope angles at different junction angles. Based on these analyses we can see, that at the velocity of flow there are local minimum values before and local maximum values right after the joining points. Then the water flow has a reduced speed, especially right before the next joining points. Vorticity has the same tendency, at the joining points it has local maximum values and then it reduces till the next joining point, reach the local minimum value right before it. Value of vorticity can represent the solution in the main channels of karren systems. The more the value of it (number of rotation in 1 second), the more the solution happens in the main channel due to the destruction of border layers at the wall of main channel by the vorticity. When we increase the slope angle, the value of vorticity has higher values, but turbulence waterflow happens on shorter section. So, the higher the slope angle, the less the length of turbulence zone; this is the same, what we experienced in laboratory experiment and data collected from karst environment. The anomalies at the junction angles of 20°, 70°, 80° both in speed and vorticity has special reason, it needs further examinations.

Keywords: rimmenkarr, main channel, solution, turbulence, simulation, vorticity, channel system

1. Bevezetés

A vályúrendszerek fővályúiban, ahol azokhoz mellékvályúk csatlakoznak, lokális kiszélesedések alakulnak ki, amelyek létrejöttét a becsatlakozásnál képződő örvények által kiváltott megnövekedett oldó hatással magyarázzák (VERESS *et. al.* 2013). E tanulmány célja, hogy számítógépes szimuláció eredményei alapján tanulmányozza a fővályúban létrejövő örvénylést és áramlási sebesség változást különböző lejtő és becsatlakozási szögek esetén és így a vályú kiszélesedések értelmezéséhez adatokat szolgáltatson.

A karrok egyik változatát képviselik a vályúkarrok (rinnenkarrok). A vályúkarrok morfológiailag összetett képződmények (BÖGLI 1976, FORD, WILLIAMS 2007): a vályún helyenként lokális kiszélesedések fordulnak elő (VERESS 2009, VERESS 2010, VERESS et. al. 2013). A vályúkarrok lehetnek A és B típusúak (VERESS et. al. 2015). Előzőek kisméretűek és kicsi keresztmetszet területűek, keresztmetszetük inkább „V” alakú (KOZMA, MITRE 2012). A B típusú vályúk nagy keresztmetszet területűek és a keresztmetszetük „U” alakú. A vályúk képezhetnek vályúrendszereket, amikor a rendszer fővályújába mellékvályúk kapcsolódnak. A fővályúban ott, ahol azokhoz mellékvályúk kapcsolódnak lokális kiszélesedések alakulnak ki (VERESS et. al. 2013). A lokális kiszélesedéseknél a fővályú szélessége több dm-rel haladhatja meg ezen szakasz feletti és alatti szélességet. De nőhet e szakaszon a vályú mélysége is (MITRE 2016). A vizsgálatunk tárgyát képező fővályúk a B típusba tartoznak a mellékvályúktól eltérően nagyméretűek és „U” keresztmetszet alakúak (VERESS et. al. 2009, VERESS et. al. 2010). SZUNYOGH (1995) szerint azonban a vályúalak fél ellipszis is lehet. Bármely alakkal is közelítjük, a vályúoldalak felső részei párhuzamosnak tekinthetők egymással (SZUNYOGH 1995, VERESS et. al. 2012).

Az utóbbi években modellkísérletek és részletes terepi mérések adatainak a felhasználásával a vályú morfológiája és az áramlási viszonyok közötti kapcsolat megismerésére irányuló vizsgálatok történtek. Azonban a laboratóriumi kísérletek nagyon időigényesek, továbbá ezek során viszonylag kevés morfológiára hatást alakító paraméter vizsgálható. A terepen az áramlási viszonyok tanulmányozásának kicsi az esélye. A vályúban vagy a vályúmentes térszínen a vízágak kialakulására és így az általuk kifejtett hatások vizsgálatára csak hóolvadáskor lehet számítani (VERESS et. al. 2011). Ekkor viszont e helyek nehezen, vagy egyáltalán nem közelíthetők meg a vastag hótakaró miatt, és csak utólag, a morfometriai paraméterek alapján tudunk következtetni az áramlás jellegére.

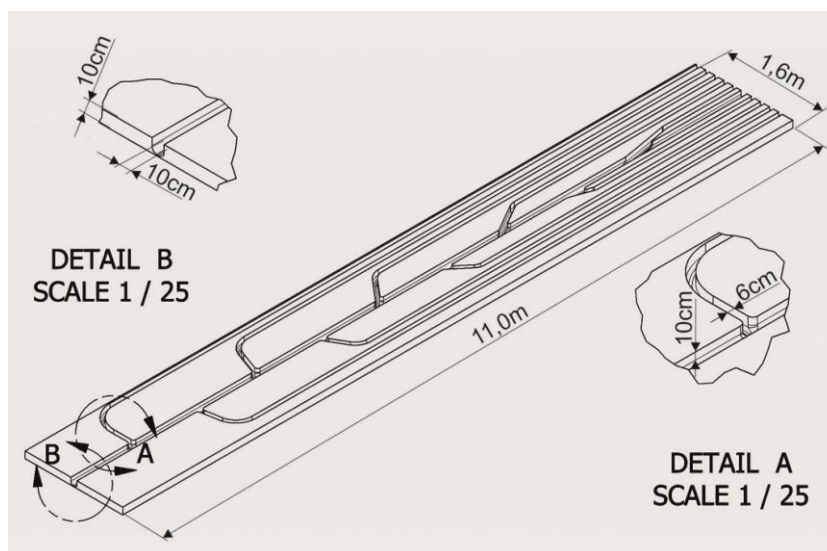
A vályúkarrok sajátosságainak vizsgálata céljából számos terepi felmérés (VERESS et. al. 2011, 2012) továbbá laboratóriumi kísérlet (DEÁK et. al. 2012) történt. Az említett okok miatt célszerű a vályúrendszerek és morfológiájuk fejlődését virtuális modellel vizsgálni (MITRE 2016). Digitális áramlási kísérletek adatainak felhasználásával a természetben végbemenő vízáramlási viszonyokhoz nyerhetünk információkat. Ezáltal a vályúkarrok morfológiai sajátosságait, fejlődését az áramlási sajátosságok figyelembevételével értelmezhetjük.

A korábban vizsgált terepi és laboratóriumi mérési adatok értékelése (MITRE, PÉNTEK 2014) valamint a tapasztalt jelenségek magyarázatának vizsgálatára alkalmazott Computational Fluid Dynamics (CFD) számítógé-

pes algoritmus megoldás (MITRE 2016) eredményei rámutattak arra, hogy a lejtőszöget változtatva az örvénylési szakasz hossza változik, azonban a becsatlakozási szögeket változtatva nem mutatható ki tendencia. Feltételezzük, hogy olyan áramlási jelenségek lehetnek jelen a becsatlakozásoknál, amelyek kialakulása klasszikus fizikai, hidrodinamikai törvényszerűségekkel nehezen vagy egyáltalán nem írhatóak le, azonban a részecske szintű áramlási mozgást szimuláló számítógépes programok segítségével kialakulásuk és jellegük jól vizsgálható (MITRE, PÉNTEK 2014, MITRE 2016).

2. Módszer

Ahhoz, hogy a terepen fejlődő vályúkarroknál létrejövő áramlási tulajdonságokat lemodellezzük, nélkülözhetetlen méretben és alakban a valósághoz hasonló vályúrendszert létrehozni. Az áramlás megismeréséhez két paramétert kívántunk vizsgálni, az örvényességet (létrejövő örvények átlagos fordulatszámát egy másodperc alatt), valamint az áramlási sebességet. A modellvályú felső pereménél, a kiindulási áramlási sebességet 1 m/s-nak választottuk.



1. ábra: A digitális modellvályú-rendszer műszaki rajza Autodesk Inventor szoftverben.
Fig. 1.: Technical drawing of the channel system model with Autodesk Inventor software.

A modell vályúrendszerben a fővályú szélességét és mélységét 10-10 centiméternek választottuk, alakját „U” alakra finomítottuk, a vízkitöltést pedig 9 centiméterben határoztuk meg. A becsatlakozó mellékvályút az egy-

szerűség kedvéért szintén 10 cm mélynek választottuk, azonban szélességét 6 cm-ben határoztuk meg. A modellben az egyes találkozási pontok és sarkok élét a valóságnak megfelelően lekerekítettük (*1. ábra*).

A vályúrendszer fővályújának hosszúsága 11 méter. A fővályúba 1 méteres szakaszonként csatlakoznak be a mellékvályúk úgy, hogy fentről lefelé haladva, becsatlakozásokként 10° -ot emelkedik azok becsatlakozási szöge 10° -tól 90° -ig. Ennélfogva 9 mellékvályú csatlakozik a fővályúba. A digitális modellkísérlet során a hordozó lejtő szögét 5° -os lépésekkel 5 - 45° között változtattuk. A modellkísérletet a korábbiakkal azonos CFD számítógépes algoritmussal, szoftverkörnyezettel végeztük (*MITRE 2016*), a kimeneti adatoknál viszont a víztest áramlási tulajdonságait leíró értékek 1 cm^3 -re vonatkoztatott átlagait rögzítettük. Ennek több oka is volt, részben a számítási művelet időhosszána optimalizálása a számítógépfűtőn, részben az adatok mennyiségének csökkentése és ezáltal a feldolgozás gyorsítása.

A kapott értékeket egymástól 1 cm-re elhelyezkedő keresztmetszet-szelvények mentén vizsgáltuk x,y,z irányban, így pontos képet kaphattunk az áramlás jellegének alakulásáról a meder teljes szélességében. A létrejövő áramlási jelenségek nem mutattak jellegüket tekintve eltérést a korábbiakban megállapítottaktól (*MITRE 2016*), annak ellenére se, hogy a jelenlegi vályúrendszer kialakítása más, kisebb, finomabb, valósághoz közelebb. A vizsgálathoz a kapott értékeket a fővályú teljes keresztmetszete mentén 1 cm-es szelvényenként átlagoltuk, ezáltal az adott szelvényt közrefogó térfogat egészére jellemző átlagos áramlási sebesség és örvényesség-értékeket kaptunk.

Először megvizsgáltuk azt, hogy a fővályú teljes hosszában az örvényesség és a sebesség értékei miként változnak, hol alakulnak ki lokális minimum és lokális maximum helyek. Külön megnéztük ezen értékek egymáshoz való relatív eltérését (a lokális maximumokhoz képesti maximális eltérés). További vizsgálat tárgyát képezte a különböző lejtőszögek esetén az adott becsatlakozási szögnél miként változik az örvénylés és a sebesség értéke.

Ezt követően az örvényesség majd az áramlási sebesség az adott becsatlakozás előtti minimum értékhez viszonyított lokális maximumainak (relatív) értékeit ábrázoltuk. A kapott adatok kiértékeléséhez oszlopdiagramokat készítettünk, grafikonok vízszintes tengelyén a becsatlakozási szögeket ábrázoltuk, mint csoportot és minden becsatlakozási szög-csoportban elhelyeztük balról jobbra 5° -tól 45° -ig haladva az egyes lejtőszögek esetén mért lokális örvényesség- és sebesség-maximum értéket (tehát egy csoporthoz a különböző hordozó lejtőszögeknél keletkező lokális relatív értékek tartoznak). Lényegében az egyes becsatlakozási szög csoportokban a lejtő-

szög változtatásával az ott létrejövő maximum értékek alakulása tanulmányozható. Az egyes becsatlakozási szög csoportokban az azonos lejtőszög értékeire vonatkozó oszlopokat végigkövetve a becsatlakozási szög szerinti alakulása vizsgálható az egyes maximum értékeknek.

3. Eredmények

3.1. Örvényesség alakulása

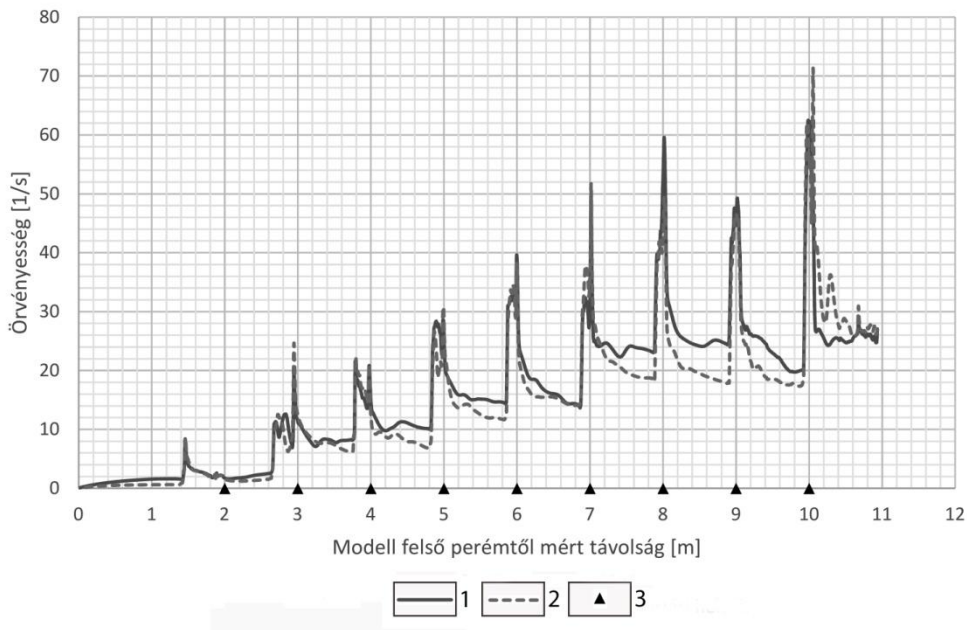
Az egyes lejtőszögek hatására létrejövő örvényesség átlagos értéke a modellvályú felső peremétől az első becsatlakozásig távolodva emelkedést mutat. Ez az emelkedés természetes, hiszen az áramlás sebességének növekedése miatt, a vízrézecskek és a vályú fala közötti kölcsönhatás révén, annak mentén apró örvények jönnek létre. A modellvályú felső peremétől az első becsatlakozásig (ez 2 méter) – amely 10° -os becsatlakozási szöggel érkezik a fővályúba – a zavartalan áramlásban létrejövő örvényesség alakulása, emelkedésének tendenciája vizsgálható.

Ezt az örvényesség emelkedést a becsatlakozó első mellékvályú oly módon változtatja meg, hogy a becsatlakozás előtt az örvényesség értékének az emelkedése megszűnik, stagnál. Főként az alacsonyabb dőlésszögű lejtők esetén nagyon enyhén lecsökken. Az örvényesség értékének ilyen jellegű megváltozása a becsatlakozás előtt már 40 cm-rel kimutatható. Oka valószínűleg a mellékvályúból beérkező víznek a fővályúban lévő víz áramlását gátoló hatása és így lokális sebességcsökkenés, amely az örvényességre is csökkentő hatással van.

A 2. ábrán megfigyelhető, hogy az egyes becsatlakozási helyek előtt az örvényesség minden esetben lecsökken majd a becsatlakozások helyeinél jól elkülöníthető lokális maximumok jönnek létre. Ez a jelenség minden egyes hordozó lejtő dőlésszögnél megmutatkozik. Szintén észlelhető, hogy az örvényesség értékei annak ellenére, hogy a becsatlakozási pontok felé lokálisan csökkennek, a teljes vályúrendszer tekintve viszont fokozatosan emelkednek, az egyenlő szakaszonként becsatlakozó mellékvályúk hatására.

A lokális kiszélesedések tágassága, vagyis az a szakasz hossz a fővályú mentén, amelyen az örvényes szakasz (a terepen pedig a lokális kiszélesedés) jól elkülönül a fővályú más részeitől, a lejtőszög emelkedésével csökkenést mutat. Ez a jelenség az 5° -os és 40° -os lejtőszög összevetése esetén szintén megfigyelhető a 2. ábrán. Az adatok alapján úgy véljük, a lejtőszög hatással lehet a lokális kiszélesedés méretére: nagyobb lejtőszögnél a lokális kiszélesedés kisebb lesz. A tendenciának csupán a 90° -os becsatlakozásnál lévő értékek mondanak ellent, ez alatti becsatlakozás mentes

szakaszon - a később tárgyalt – jelentős sebességnövekedés miatt az örvényesség a vályú alján a nagyobb lejtőszögek esetén, hosszabb szakaszon jelenhet meg.



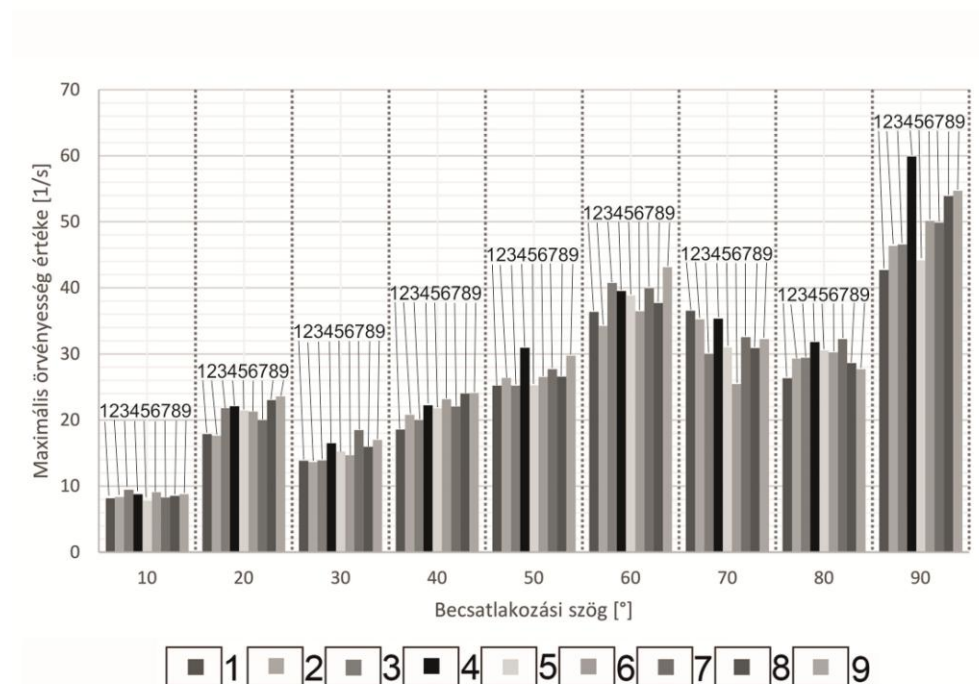
2. ábra: Örvényesség értékei a fővályú teljes hosszában.
 Jelmagyarázat: 1. 5°-os lejtődőlés, 2. 40°-os lejtődőlés, 3. becsatlakozási helyek.
 Fig. 2.: Values of vorticity along the main channel.
 Legend: 1. slope angle 5°, 2. slope angle 40°, 3. joining points.

A 3. ábrán a lokális örvényességi maximumok relatív értékeit ábrázoltuk. Megfigyelhető, hogy a lejtőszög emelkedésével, különösen a 10-60°-os, valamint a 90°-os becsatlakozási helyeknél, az örvényesség-maximum értékek egymáshoz hasonló, emelkedő tendenciát mutatnak.

Fontos megjegyezni, hogy a 70° és 80°-os becsatlakozásoknál a lokális maximum értékek szabályos változása megtörik. A 70°-os becsatlakozásnál a hordozó lejtőszög változtatásával az örvényesség maximális értékei nem emelkednek, hanem csökkennek, a 80°-os becsatlakozás esetén pedig egy nagy szórású, tendenciát nem mutató változás figyelhető meg. Hozzáteesszük, hogy ez a változás az örvényességi szakasz hosszára nincs hatással, a 2. ábrán is láthatjuk, hogy a korábban megállapított, szakaszcsökkenés jelentkezik a nagyobb lejtőszög értéknél. Szintén megfigyelhető, hogy a 20°-os becsatlakozási csoporthoz tartozó relatív örvényesség-maximum

értékek jóval nagyobbak, mint a 10° és 30°-os csoport esetén, tendenciájuk a lejtőszög növelésével azonban továbbra is emelkedő.

A 30°-os becsatlakozási szögtől egészen a 60°-os csoportig a lokális maximum értékek emelkednek, majd a 70-80°-os csoport értékei elmaradnak ettől. A 90°-os csoport értékei jelentősen kiemelkednek a 80°-nál tapasztalt értékektől, sőt, úgy tűnik, ezen értékek szinte ráillenek azon lineáris tendenciára, amit a 10°, 30°-60° közötti értékek mutatnak.



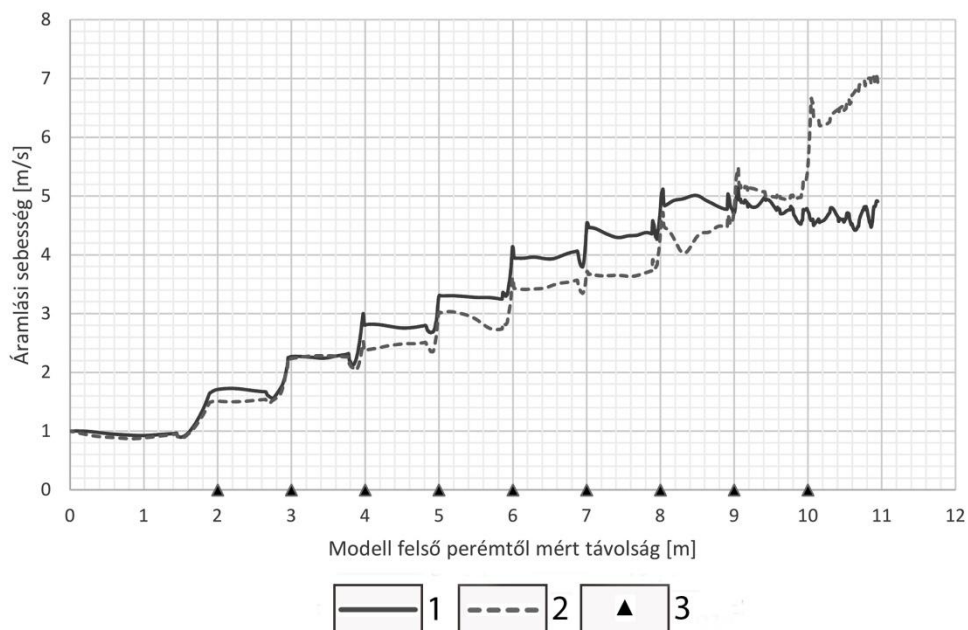
3. ábra: Maximális örvényesség értékei az egyes becsatlakozási szögeknél, különböző lejtőszögek esetén.
Jelmagyarázat: 1. 5°-os lejtődőlés, 2. 10°-os lejtődőlés, 3. 15°-os lejtődőlés, 4. 20°-os lejtődőlés, 5. 25°-os lejtődőlés, 6. 30°-os lejtődőlés, 7. 35°-os lejtődőlés, 8. 40°-os lejtődőlés, 9. 45°-os lejtődőlés.

Fig. 3.: The highest values of vorticity at joining angles in case of different slope angles.
Legend: 1. slope angle 5°, 2. slope angle 10°, 3. slope angle 15°, 4. slope angle 20°, 5. slope angle 25°, 6. slope angle 30°, 7. slope angle 35°, 8. slope angle 40°, 9. slope angle 45°.

Tehát, a becsatlakozási szögeket tekintve megállapítható, hogy a 20°-os becsatlakozási szögnél az örvényesség-maximum értéke kiugróan nagy, a 70-80°-os becsatlakozási szögnél pedig ennél kisebb. A 20°-os hordozó lejtőszögnél a 90°-os becsatlakozási szögnél létrejövő lokális maximum kiemelkedő értékű, amely még a 45°-os lejtőszögnél létrejövő lokális maximumnál is nagyobb.

3.2. Áramlási sebesség alakulása

A fővályúban lévő víz áramlási sebességének alakulását a 4. ábrán követhetjük nyomon. Itt is az 5° és 40° -os lejtőszög hatására létrejövő sebességváltozásokat mutatjuk be. A sebesség növekedése lépcsőzetes, de egyenletes, a modellvályú peremétől egyre távolodva egyre nagyobb. Az áramlás sebességét a gravitációs gyorsulás fokozza.



4. ábra: Az áramlási sebesség értékeinek alakulása, a fővályú teljes hosszán.
Jelmagyarázat: 1. 5° -os lejtődőlés, 2. 40° -os lejtődőlés, 3. becsatlakozási helyek.

Fig. 4.: Values of flow speed along the main channel.

Legend: 1. slope angle 5° , 2. slope angle 40° , 3. joining points.

Az egyes becsatlakozási helyeknél a sebességnek lokális maximumai figyelhetők meg, amelyet egy lokális minimum előz meg. Minden esetben megfigyelhető, hogy a becsatlakozás előtt lecsökken a sebesség. Mindezt azzal magyarázzuk, hogy a mellékvályúból beáramló víz, mint említettük, különösen, ha a mellékvályú becsatlakozási szöge nagy, gátolja a fővályúban mozgó vízág áramlását. Azonban a becsatlakozásnál a fővályúban áramló víz keresztmetszete csökken a mellékvályúnál beérkező víz miatt, ami egyúttal hozamnövekedést is okoz. Ezek az áramlási sebesség növekedését okozzák, ami a turbulens áramlás kialakulását segíti elő, amelyben örvények jönnek létre (ezt megfigyelhetjük a 2. ábrán). Ennek tudható be az

örvényesség lokális, jelentős megnövekedése. Az örvénylő szakaszt elhagyva a sebesség lokálisan újra csökken, az áramlás ismét a teljes fővályú szélességében zajlik, és rövid lokális csökkenő szakasz után az áramlási sebesség ismét enyhén növekedni kezd (MITRE 2016).

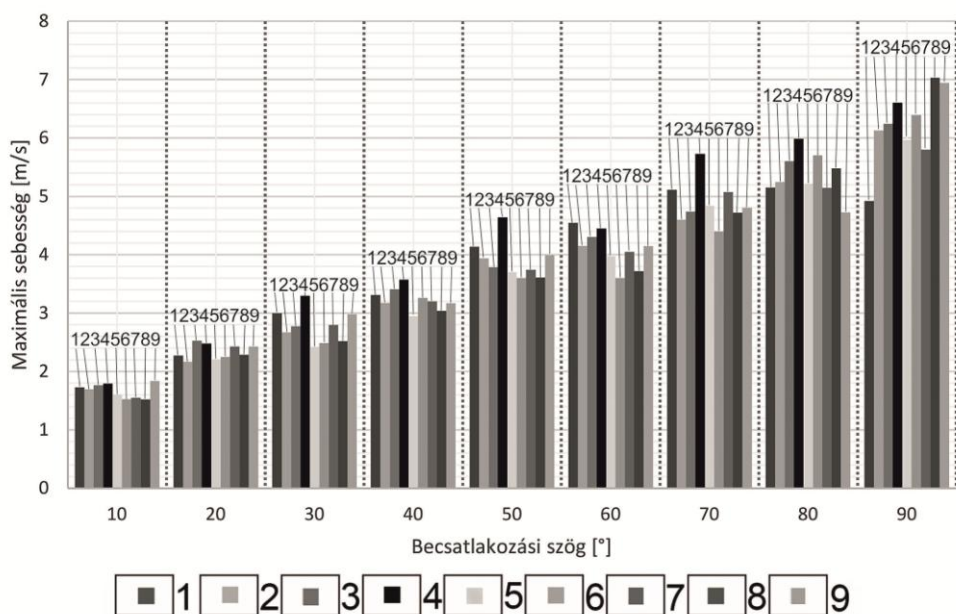
Érdemes kiemelni, hogy az áramlási sebességek a lejtőszög változtatásával nem nagyon térnek el egymástól és az a várt tendencia sem jelentkezik, nevezetesen, hogy nagyobb lejtőszög esetén a vályú mentén haladva nagyobb sebességértékek jönnek létre. A 4. ábrán is látható, hogy a 40°-os hordozó lejtő dőlésszög esetén az áramlási sebességek változása mérsékeltebb, mint az 5°-os dőlésszög esetén. Úgy tűnik, hogy a nagyobb dőlésű hordozó lejtő vályúinál a sebességek abszolút értékei kisebbek, mint a kisebb dőlésű hordozó lejtő vályúiban. Ez a tendencia az utolsó, 90°-os mellékvályú becsatlakozásnál fordul meg, amely helyet elhagyva a sebesség értékek felcserélődnek. Ennél a pontnál a meredekebb lejtésnél jelentős sebességnövekedés jön létre, amely az örvényesség alakulására a korábban tárgyalt hatással van.

Ezt mi úgy értelmezzük, hogy nagyobb lejtőszögnél, ahol nagyobb benne az áramlási sebesség a beáramló víz fékező hatása jobban érvényesül, azonban a 90°-os becsatlakozást elhagyva több becsatlakozási hely nem lévén, a víz mindenféle gátló hatás nélkül haladhat a fővályúban. Viszont, mivel a nagyobb lejtőszögnél folyásirányban a gravitációs gyorsulás nagyobb mértékben hat az áramlásra, értelemszerű az áramlás sebességének jelentős növekedése a modellvályúrendszer alján.

Az 5. ábrán a mellékvályúk becsatlakozási szögeit szintén csoportokba rendeztük és e csoportokban a különböző hordozó lejtő szögeknél mért áramlási sebességek lokális maximum értékei láthatóak. Ezek az értékek szintén relatív értékek, tehát a becsatlakozás előtti minimum értékhez vannak viszonyítva. Megfigyelhető, ha egy adott lejtőszöghöz tartozó oszlopot minden csoportban kiválasztunk, akkor a becsatlakozási szög emelkedésével szinte lineáris függvény mentén változik a sebesség maximális értéke.

Az egyes becsatlakozási csoportokban a hordozó lejtő szögének változásával viszont nem egyértelműen meghatározható sebesség-maximum tendenciák alakulnak ki. Észlelhető, hogy a hordozó lejtő szögének növekedésével a 20°-os lejtőszögnél a lokális maximum sebesség értéke kiugróan megnövekszik. Szintén érdemes megfigyelni, hogy a 80-90°-os becsatlakozási szögeket kivéve, hordozó lejtő szögének növekedésével a relatív lokális sebességmaximum értékek inkább csökkennek, majd a 20°-os dőlésszögnél hirtelen emelkedés jön létre. Az ezt meghaladó hordozó lejtő dőlésszögnél lokális maximumok ismét csökkennek. Ez – nem minden csoportnál egyér-

telműen - a legnagyobb 35-45°-os hordozó lejtő dőlésszögek körül kezd el ismét növekedni. A növekedés határozottan a 90°-os becsatlakozásnál mutatható ki.



5. ábra: Maximális sebességek értékei az egyes becsatlakozási szögeknél, különböző lejtőszögek esetén.
 Jelmagyarázat: 1. 5°-os lejtődőlés, 2. 10°-os lejtődőlés, 3. 15°-os lejtődőlés, 4. 20°-os lejtődőlés, 5. 25°-os lejtődőlés, 6. 30°-os lejtődőlés, 7. 35°-os lejtődőlés, 8. 40°-os lejtődőlés, 9. 45°-os lejtődőlés.
 Fig. 5.: The highest values of flow at joining angles in case of different slope angles.
 Legend: 1. slope angle 5°, 2. slope angle 10°, 3. slope angle 15°, 4. slope angle 20°, 5. slope angle 25°, 6. slope angle 30°, 7. slope angle 35°, 8. slope angle 40°, 9. slope angle 45°.

4. Következtetés

A számítógépes szimuláció megerősíti, hogy a mellékvályú becsatlakozásoknál turbulencia, örvénylés alakul ki. Az örvényesség ezeken a helyeken lokális maximumot ér el. Az örvényesség-maximum értékek (mind abszolút, mind relatív értelemben is) a hordozó lejtő szögének növelésével növekednek, azonban a 70-80°-os becsatlakozási szögnél csökken. A mellékvályú becsatlakozási szöge hat a fővályúban létrejövő örvénylésre és az örvényes szakasz hosszára is.

A digitális modellen a hordozó lejtő dőlésének csökkenésével nő az örvénylés hossza. Ez összhangban van a terepi adatokkal, miszerint meredekebb lejtőn rövidebbek a lokális kiszélesedések. Ezért modellünk közvetetten bizonyítja, hogy a lokális kiszélesedésekért az örvények felelősek. Az örvényesség minél nagyobb, ezáltal minél több és minél nagyobb sebességű

örvények alakulnak ki, annál nagyobb oldódás jön létre, mivel a turbulencia „összetöri” a vályúrendszer falát határoló vékony határréteget, a kialakuló új határrétegek a kalciumion koncentrációja kicsi, oda ionok léphetnek be a közet felszínéről ezáltal aktívabb oldódás jön létre (VERESS 2004). A nagyobb átlagos örvényesség nyomán rövidebb örvénylési szakaszok jönnek létre. A rövidebb örvényeknél az örvényesség és így az oldódás intenzívebb lesz. Ezért a lokális kiszélesedések szélesebbek lesznek, viszont rövidebb szakaszon jelenik meg.

Továbbra sem egyértelmű, hogy pontosan milyen fizikai okai vannak a relatív örvényesség- és sebesség-maximum lokális növekedéseknek például a 20°-os becsatlakozási szögnél, illetve az örvényesség-maximum alacsonyabb értékeinek a 70-80°-os becsatlakozási szögnél. Annyi megállapítást nyert, hogy az örvénylési szakasz hossza egyértelmű tendenciát mutat a lejtőszög változtatásával, azonban az örvényesség maximum értékei nem hozhatók teljesen összhangba ennek tendenciájával. Ez további vizsgálatot igényel.

IRODALOM

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

DEÁK GY., SAMU SZ., PÉNTEK K., MITRE Z., VERESS M. (2012): Víz-áramlási 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.

MITRE Z., PÉNTEK K. (2014): Karros vályúk morfológiai vizsgálata a mellék-vályú becsatlakozási helyek közelében – Karsztfejlődés XIX. pp. 173-184.

MITRE Z. (2016): Vályúban áramló víz áramlási viszonyainak modellezése számítógépes szimulációval – Karsztfejlődés XXI. pp. 75-95. DOI: 10.17701/16.75-95

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

SZUNYOGH G. (1995): Karsvályúk vízszállító-képességének elméleti meghatározása – Karsztfejlődés I. pp. 133-144.

- VERESS M.* (2004): A karszt – BDF Természetföldrajzi Tanszék, Szombathely. 215 p.
- 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.* (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., CZÖPEK I., ZENTAI Z., DEÁK GY., MITRE Z.* (2007): Adatok a Totes Gebirgei lejtők karrosodásához – Karsztfejlődés XII. pp. 137-152.
- VERESS M., PÉNTEK K., ZENTAI Z., MITRE Z.* (2010): Vízágas vályúkarrok fejlődési típusai – Karsztfejlődés XV pp. 61-84.
- 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 (2015) 60–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.08.014>
- VERESS M., SAMU SZ., SZÉLES GY., DÖBRÖNTEI L., ZENTAI Z., MITRE Z.* (2015): Vályúrendszerek fejlődése – Karsztfejlődés XX. pp. 101-124. DOI: 10.17701/15.101-124
- VERESS M., ZENTAI Z., PÉNTEK K., EÖRY M., MITRE Z.* (2009): Vályúfejlődés csupasz lejtőkön – Karsztfejlődés XIV pp. 139-159.
- 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 – 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>