



Получена: 18.03.2018 г.

Приета: 22.10.2018 г.

## ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ХИДРАВЛИЧНИТЕ СЪПРОТИВЛЕНИЯ И РЕЖИМИТЕ НА ТЕЧЕНИЕТО ПРИ КАМЕННА РАМПА ОТ БАСЕЙНОВО-КАСКАДЕН ТИП

Й. Добрев<sup>1</sup>

*Ключови думи:* каменни рампи, физическо хидравлично моделиране, 3D числено моделиране

### РЕЗЮМЕ

В настоящото изследване е разгледана каменна рампа от басейново-каскаден тип, при която напречно на течението разположени валуни погасяват кинетичната енергия като същевременно създават благоприятни условия за извършване на миграционни придвижвания. С помощта на хибриден модел, състоящ се от физически експеримент в лабораторни условия и числен 3D модел, е определена дълбочината на течението в 10 профила. Установени са три основни хидравлични режима, в зависимост от специфичното водно количество  $q$ . При достатъчно голяма стойност на  $q$  в зоната на рампата се установява равномерен режим, за който е определено изменението на съпротивлението, представено от коефициента на Darcy – Weisbach, в зависимост от степента на потопеност на валуните. Получените резултати са сравнени с резултатите, получени от известни емпирични зависимости.

### 1. Въведение

Изграждането на напречни прегради в реките в много от случаите води до фрагментация на екосистемата и нарушава непрекъснатостта на речния континуум [1]. Модифицираните хидравлични, хидроложки и хидроморфоложки параметри могат да доведат до появата на местна и глобална ерозия, намаляване на хетерогенността на

---

<sup>1</sup> Йонко Добрев, инж., кат. „Хидравлика и хидрология“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: yonkodobrev@gmail.com

речното течение, превръщането на течащите води в стоящи водни басейни, промяна във физико-химичните условия на хабитата и др. [2].

Екологичната непрекъснатост на реките е сред основните приоритети, записани в одобрената през 2000 г. Рамкова директива за водите (2000/60/ЕС) и е идентифицирана като основен елемент за постигането на „добър“ екологичен статус на водните тела [3]. В тази връзка възможна и все по-често използвана алтернатива за укрепване на речно корито срещу ерозия представляват каменните рампи. Те се изграждат като укрепен с едри камъни (валуни) речен участък с по-голям наклон на дъното от съществуващия. В този случай погасяване на кинетичната енергия на течението се осъществява постепенно в целия участък на рампата, а не само в един определен напречен профил, както е при праговете. Това създава значително по-добри предпоставки за свободно придвижване на речните организми.

Каменните рампи се разделят на два основни вида и няколко подвида, според структурата на рампата и разположението на валуните. Настоящото изследване се фокусира върху каменните рампи от басейново-каскаден тип, при които напречно разположени каменни прагове (ригели) образуват серия от каскадно разположени басейнови структури, осигуряващи подходящи скорости и дълбочини за извършване на миграционни придвижвания. Този тип съоръжения принадлежат към семейството на структурираните каменни рампи.

Хидравличните характеристики на течението при каменни рампи са повлияни основно от взаимодействието между големите надлъжни наклони, значителната грапавина на граничните повърхности и разнообразната в морфологично отношение структура на съоръжението [4]. Установено е, че няма универсална зависимост, определяща съпротивленията по дължина на открити течения с големи надлъжен наклон и грапавина [5].

Повечето зависимости определят влиянието на силите на хидравлично триене чрез коефициента на Darcy – Weisbach  $\lambda$  (1), като се приема, че равномерното течение в зоната на рампата е в бурно състояние [6].

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = \frac{v}{v_*} \quad (1)$$

В (1)  $v$  е средната скорост, а  $v_*$  е скоростта на тангенциалните напрежения, равна на произведението  $\sqrt{ghI}$ .

Влиянието на голямата хидравлична грапавина върху съпротивлението на течението е изследвано при наклони  $0,4\% < I < 4\%$ , като е предложена следната зависимост [7]:

$$\frac{v}{v_*} = 5,6 \log \left( \frac{h}{d_{84}} \right) + 4 \quad (2)$$

Уравнение (2) е резултат от полеви изследвания на 16 реки във Великобритания, включващи измерване и обработка на данни относно едрината на дънния материал ( $d_{50}$  и  $d_{84}$ ), водно количество  $Q$ , наклон  $I$ , площ на напречното сечение  $A$ , ширина на водната повърхност  $W$ , дълбочина  $h$  и степен на потопеност  $h/d_{84}$ .

Съпротивлението на структурирани и неструктурирани каменни рампи може да се определи от следната формула [8]:

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = \frac{v}{\sqrt{ghI}} = 3,5(1+\eta)^C I^{-0,17} \left( \frac{h}{d_{84}} \right)^{0,1} \quad (3)$$

където  $-1,6 > C > -3,0$  е параметър, който отчита вида на каменната рампа – структурирана или неструктурирана и  $\eta$  е плътността на разположение на валуните. Авторите установяват, че при структурираните рампи общото съпротивление е по-голямо, което води и до по-оптимално погасяване на кинетичната енергия.

След проведени физически моделни изследвания на каменна рампа с наклон от 2,4% до 8,8% е установена следната зависимост [8]:

$$\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{H}{d_{84}}, \eta, I, E\right). \quad (4)$$

В (4)  $E = D/D_{84}$  е отношението между диаметъра на валуните към характеристичния диаметър на материала под тях. При развит турбулентен режим, какъвто се наблюдава при каменните рампи, влиянието на числото на Рейнолдс върху  $\lambda$  може да се пренебрегне [7].

Формула (5) представлява модифициран вариант на уравнение (3), като диаметърът  $d_{84}$  е заменен с издадеността на валуните над основата на рампата  $P$  и някои от степенните показатели са променени [9].

$$\sqrt{\frac{8}{\lambda}} = 1,9(1+\eta)^{-0,5} I^{-0,21} \left(\frac{h}{P}\right)^{0,29}. \quad (5)$$

Уравнение (5) е получено при моделни изследвания на неструктурирана каменна рампа с деформируемо дъно, като се наблюдава добра корелация ( $R^2 = 0,87$ ) между измерените и изчислените резултати.

Представянето на коефициента на съпротивление  $\lambda$  като сума от съпротивлението от триене  $\lambda'$  и челно съпротивление  $\lambda''$  дава добри резултати при каменните рампи от каскаден тип. Редно е да се спомене, че в този случай челното съпротивление е доминиращо, особено при нарастване на дълбочината. Например при изследване на течение около единична гладка сфера е определено процентно съотношение 95% към 5% в полза на силите на челно съпротивление [10]. Коефициентът  $\lambda''$ , отразяващ челното съпротивление може да се намери от уравнение (6) в което  $C_W$  е коефициент,  $A_s$  е площта на хоризонталната проекция на валуните и  $a_x$  и  $a_y$  са разстоянията между валуните [11].

$$\lambda'' = C_W \frac{4A_s}{a_x a_y}. \quad (6)$$

При изследването на каскадни рампи  $a_y$  може да се замени с еквивалентния диаметър на валуните  $D$ , тъй като те се разполагат в непосредствена близост един до друг [12]. Коефициентът  $C_W$  зависи от редица параметри като форма и гладкост на обтекаемото тяло, степен на потопеност  $H/D$  и структура на течението, и за определянето му съществуват твърде малко литературни данни.

## 2. Изследване на хидравличните параметри на течението в зоната на каменна рампа от басейново-каскаден тип

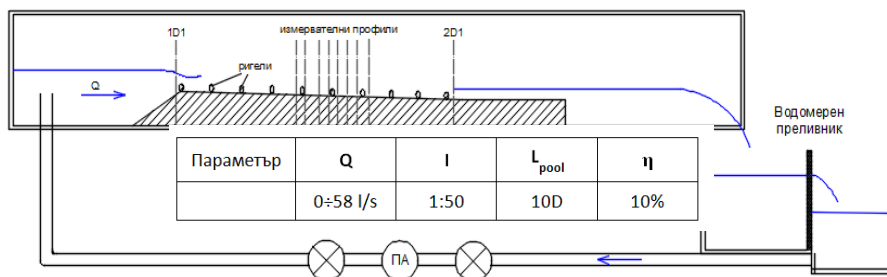
### 2.1. Физически модел

Физическият модел е построен в лабораторни условия. Изградена е каменна рампа с наклон 1:50 и дължина 5 m. Напречно на оста на рампата са разположени 13 ригела,

направени от камъни с еквивалентен диаметър  $D = 3,68$  cm (фиг. 1). Еквивалентният диаметър  $D$  представлява диаметър на сфера с обем, равен на обема на камъка. Останалите параметри, както и схематична постановка на модела, са показани във фиг. 2.

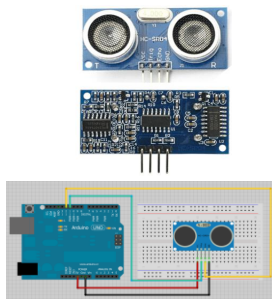


Фиг. 1. Физически модел на каменна рампа – общ изглед



Фиг. 2. Физически модел на каменна рампа – принципна схема

В общо десет профила е измерена дълбочината на течението при различни водни количества. Измервателната техника за тази цел представлява ултразвуков датчик модел HC – SR04 (фиг. 3) с работно разстояние от 2 до 400 cm, който отчита изменението на водното ниво през 2 s.



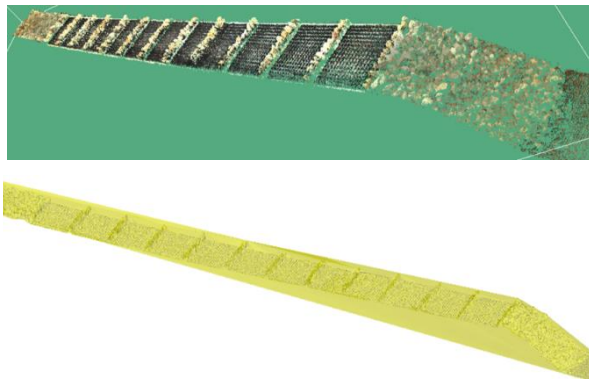
Фиг. 3. Ултразвуков сензор – инсталационна схема

## 2.2. 3D числен модел

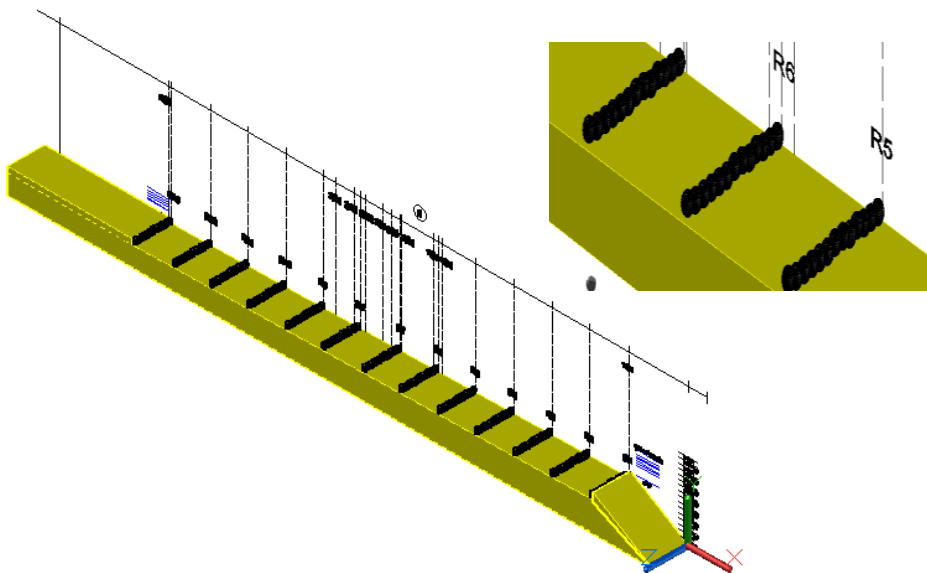
В рамките на изследването е направен и триизмерен числен модел на каменна рампа със същите геометрични характеристики, както при физическия модел. За целта е използван готовият софтуерен продукт Flow 3D, който решава основните диференциал-

ни уравнения на хидродинамиката с помощта на метода на крайните обеми. Построена е структурирана ортогонална мрежа, съставена от  $9 \times 10^5$  броя клетки, всяка с размер  $1 \times 1$  cm. Зададените начални гранични условия са водното ниво в началото и края на рампата, както и съответстващото му водно количество, като тези параметри са отчетени от физическия модел. Изчисленията са проведени за 60-секунден период или до достигане на стационарно течение.

Трудност при съставянето на модел на повърхнината на рампата представлява неправилната форма на всеки един камък, изграждащ ригелите. Първоначално с лазерен скенер е заснет физическият модел и геометрията му е възпроизведена като облак от точки (фиг. 4). Следващата стъпка е превръщането на множеството точки в стереолитографски файл, възпроизвеждащ повърхнината посредством мрежа от триъгълни елементи.



**Фиг. 4.** Модел на повърхнината на каменна рампа. От облак от точки към стереолитографски формат



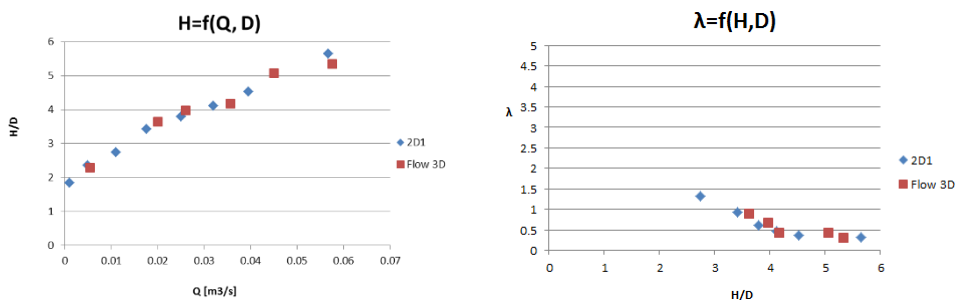
**Фиг. 5.** Идеализиран модел на повърхнината

В случая използването на стереолитографския файл в числения модел е неуспешно, вероятно поради недоброто качество на мрежата, дължащо се на ниската резолюция при лазерното сканиране.

Поради тази причина е приета идеализирана геометрия на камъните (фиг. 5), като от физическия модел са измерени дължините на трите оси на всеки един от тях и след статистическа обработка на данните са получени стойности за трите оси на идеализирания елемент, използван в числения модел.

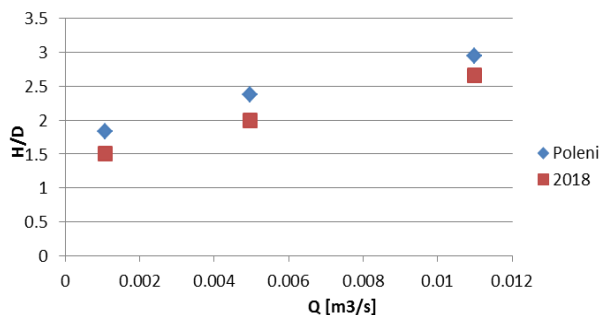
### 2.3. Анализ на резултатите

С цел сравнение на резултатите, получени от физическия и числения модел, са построени зависимостите  $H = f(Q, D)$  и  $\lambda = f(H, D)$  (фиг. 6). Коефициентът на Darcy – Weisbach е получен от уравнение (1), като средната скорост  $v$  е получена посредством уравнението за непрекъснатостта.

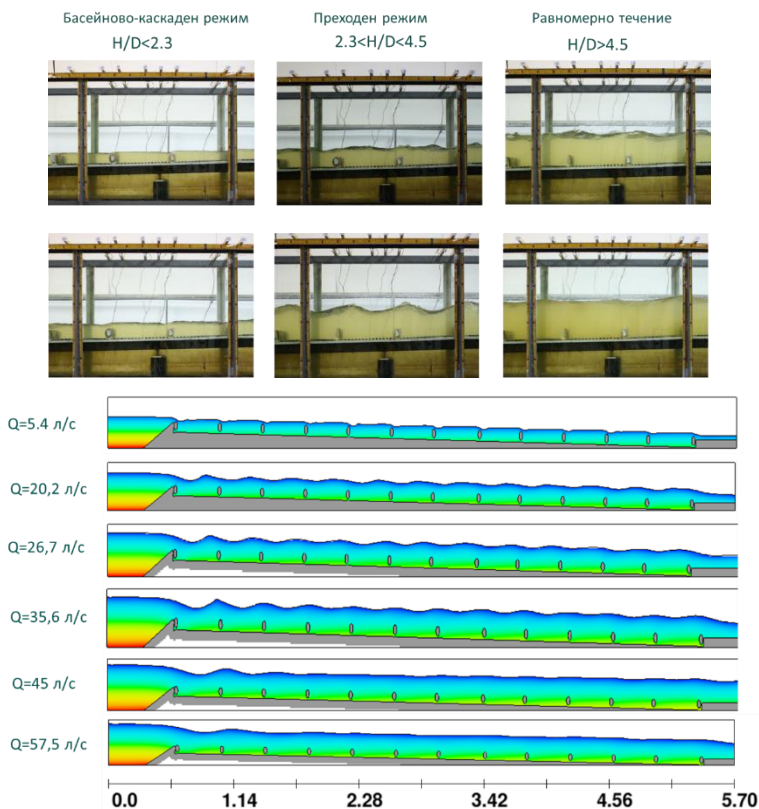


Фиг. 6. Сравнение на резултатите от физическия и числения модел

Изследвайки линията на свободната водна повърхност и при двата модела са установени три основни хидравлични режима в зависимост от специфичното водно количество  $q$  и съответно степента на потопеност на камъните  $H/D$  (фиг. 8). При специфично водно количество  $q = 20$  l/s.m и степен на потопеност  $< 2,3$  се наблюдава басейново-каскаден режим, при който е в сила уравнението на Poleni за преливник. Изчислените и измерените от физическия модел резултати са представени на фиг. 7. Поради това, че ригелите са изградени от естествен камък с неправилна форма, определянето на коефициента на водното количество във формулата на Poleni представлява съществена трудност.



Фиг. 7. Сравнение на изчислените и измерените резултати при басейново-каскаден режим



**Фиг. 8. Линия на свободната водна повърхност при различна степен на потопеност. Физически и числен модел**

И в двата модела при степен на потопеност  $2,3 < H/D < 4,5$  се наблюдава преходен режим със силно изразени надлъжни вълни и неустойчив характер. В литературата се наблюдава липса на изследвания на хидравличните характеристики на течението при преходния режим.

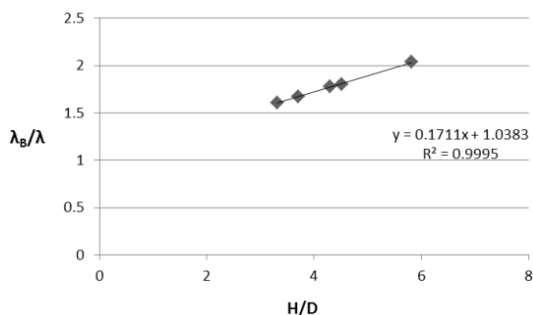
При специфично водно количество  $q > 101$  l/s.m и степен на потопеност  $> 4,5$  се установява равномерно течение, при което е валидно уравнение (1).

Важно е да се уточни, че при опитни постановки, за които е в сила  $B \approx H$ , следва да се отчете и влиянието на силите на хидравлично триене със стените на опитния канал върху общото съпротивление. За тази цел коефициентът  $\lambda$  е представен като съставен от коефициентите, отразяващи съпротивленията на стените и на дъното, съответно  $\lambda_w$  и  $\lambda_B$ . Често използван метод за тази цел се явява процедурата на Einstein – Johnson, при която  $\lambda_w$  може да се получи от някоя от известните теоретико – емпирични зависимости, например тази на Colebrook – White (7), а участието на съпротивлението на стените и дъното към общото съпротивление може да се получи от (8).

$$\sqrt{\frac{1}{\lambda_w}} = -2 \log \left( \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda_w}} \right). \quad (7)$$

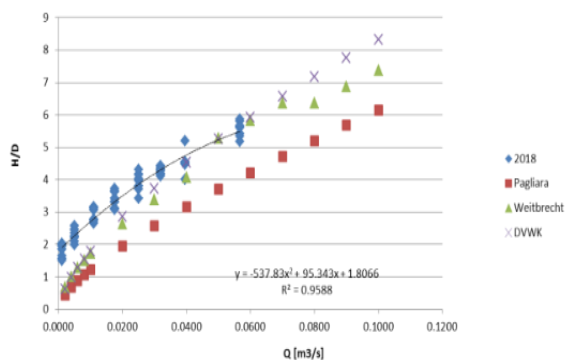
$$\lambda_B = \lambda + 2 \frac{H}{B} (\lambda - \lambda_w). \quad (8)$$

Следвайки тази процедура на фиг. 9 графично е представена линейната зависимост между коефициентите на Darcy – Weisbach  $\lambda_B$  и  $\lambda$  и степента на потопеност  $H/D$ .



Фиг. 9. Линейна зависимост между  $\lambda_B/\lambda$  и степента на потопеност

На фиг. 10 е направено сравнение на ключовите криви, получени от настоящото изследване и от уравнения (3), (5) и (6). От графичното представяне е видно, че при установено равномерно течение ( $H/D > 4$ ) уравнения (5) и (6) дават сходни резултати с тези от проведеното изследване. Важно е да се отбележи, че в уравнение (5) не е отчетено съпротивлението, породено от хидравличната грапавина на основата на рампата, върху която са разположени ригелите. Уравнение (5) е получено при моделно изследване на неструктурирани каменни рампи, при които валуните са разположени хаотично. Този тип съоръжения се характеризират с по-слабо погасяване на кинетичната енергия на течението, в сравнение със структурираните рампи. В разглеждания случай (5) дава по-скоро добри резултати при  $H/D > 4,5$ .



Фиг. 10. Сравнение на ключови криви от рода  $H/D = f(Q)$

## 2.4. Заключение

В много случаи хибридно моделиране, включващо физически и числен модел, представлява мощен инструмент за решаване на инженерни задачи в областта на хидродинамиката. Често численото моделиране предхожда физическото, като второто валиди-

ра резултатите от първото. В настоящото изследване е избран обратният подход, като данни от физическия модел са използвани за калибриране на числения.

Вследствие на направените изследвания могат да се изведат следните заключения:

- Съществуващите уравнения за определяне на общите хидравлични съпротивления при открити легла с големи надлъжен наклон и хидравлична градина имат теоретико-емпиричен и емпиричен характер, като използването им при различни гранични условия може да доведе до известни неточности.
- При каменни рампи от басейново-каскаден тип съществена част от общото съпротивление се дължи на силите на челно съпротивление.
- В зависимост от специфичното водно количество  $q$  ясно се открояват три хидравлични режима – басейново-каскаден, преходен и равномерен.
- Стойността на коефициента на Darcy – Weisbach намалява при увеличаване на специфичното водно количество.
- Работата с идеализиран модел на повърхнината в числения модел дава сходни резултати с тези, получени от физическия. Най-голяма точност може да се постигне при заснемане на физическия модел с лазерен скенер с достатъчна резолюция или по фотограметричен способ.
- Направеното сравнение с някои от съществуващите зависимости показва добра сходимост при високи стойности на  $q$  и разхождение при малки водни количества.
- Необходимо е потвърждаването на направените заключения при различни надлъжен наклон на рампата, размер на валуните и разстояние между ригелите.

## Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор Д-104/2017 е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Jungwirth, M.* Fish migration and fish bypasses. Fishing News Books, 1998, ISBN 0852382537, 9780852382530.

2. *Узунова, Е., Кисляков, Д., Цонев, Р., Василев, В., Тодоров, Д.* Доклад за оценка на комбинирано въздействие от водноелектрически централи върху речните екосистеми, 2016.

3. *Cassan, L., et al.* Hydraulic Resistance of Emergent Macroroughness at Large Froude Numbers: Design of Nature-Like Fishpasses. // Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140, 1-9.

4. *Tamagni, S., Weitbrecht, V., Boes, R.* Design of unstructured block ramps: A state-of-the-art review. Bundesanstalt für Wasserbau, 2010, ISBN 978-3-939230-00-7.

5. *Abrele, J., Smart, G.* The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. Journal of Hydraulic Research, 2003, 41(3), 259-269.

6. *Aberle, J.* Hydraulik von Blockrampen. Blockrampen – Anforderungen und Bauweisen // VAW-Mitteilung 201, 2007, 137-150.
7. *Bathurst, J.* Flow resistance estimation in mountain rivers. // Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 111(4), 625-643.
8. *Pagliara, S., Chiavaccini, P.* Flow resistance of rock chutes with protruding boulders. // Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(6), 545-552.
9. *Weitbrecht, Tamagni & Boes.* Stability of Unstructured Block Ramps. // Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 143(4), 1-9.
10. *Potter, M. C., Wiggert, D. C.* Mechanics of fluids. Cengage Learning, 2010, ISBN 1305887697, 9781305887695.
11. *DVWK.* DVWK – Merkblatt 232/1996: Fischaufstiegsanlagen – Bemessung, Gestaltung, Funktionskontrolle, 1996.
12. *Ullmann, M. et al.* Modelversuch Aufgelöste Rampen, Ökologie und Hydraulik-Endbericht. Amt der Oö Landesregierung/Oberflächengewässerwirtschaft, 2009.

## **HYDRAULIC RESISTANCE AND FLOW REGIME DETERMINATION OF A STEP-POOL ROCK RAMP**

**Y. Dobrev<sup>1</sup>**

*Keywords: step-pool rock ramps, physical modeling, 3D numerical modeling*

### **ABSTRACT**

In the present study, a step-pool rock ramp has been considered, where across the flow direction situated boulders are dissipating the kinetic energy while creating a good migration conditions for the fauna. Using a hybrid model consisting of a physical model in laboratory and a 3D numerical model, the flow depth is determined in 10 profiles. There are three basic hydraulic regimes, depending on the specific water discharge  $q$ . With a high value of  $q$  in the ramp zone, a uniform flow is established for which the resistance represented by the Darcy-Weisbach coefficient is determined, depending on the degree of submergence of the boulders. The results obtained are compared with the results obtained from known empirical equations.

---

<sup>1</sup> Yonko Dobrev, Eng., Dept. “Hydraulics and Hydrology”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: yonkodobrev@gmail.com