النمذجة العددية والفيزيائية في تشتيت طاقة جريان مسيل مائي بأستخدام صفوف متعددة لكتل المزلق

> محمد سعد الحمداني mohamed.enp102@student.uomosul.edu.iq

مينا أحمد الصواف <u>m.alsawaf@uomosul.edu.iq</u>

> زياد ايوب سليمان zyiad 2005@yahoo.com

جامعة الموصل - كلية الهندسة - قسم هندسة السدود والموارد المائية

تاريخ الاستلام: 19/6/2021

تاريخ القبول: 6/9/2021

## المستخلص:

لتعظيم تشتيت طاقة الجريان القادمة من المسيل المائي ولضمان حصول القفزة الهيدروليكية ضمن حوض اللسكون وبأقل طول ممكن ولمعرفة مدى صلاحية استخدام ديناميكيات الموائع الحسابية (Computational Fluid Dynamics CFD) في تمثيل خصائص الجريان المضطرب تم اجراء استخدام النمذجة المزدوجة الفيزيانية والعددية لتمثيل حالة الجريان، حيث استخدمت 5 نماذج تحوي على كتل مزلق بأنماط مختلفة من حيث عدد صفوف الكتل (M1,M2,M3,M4,USBRII) وتم استخدام 6 ميول للمزلق (1:1.6, 1:1.6, 1:1.6, 1:1.2, 1:1.6, 1:1.2)، وكان عمق الماء الذيلي 10 سم. في النمذجة الفيزيانية تم استخدام جميع النماذج وبميل 2:11 للمزلق فقط وتمت مقارنة نتائجه بالنمذجة العددية حيث ان كلا النموذجين كانا قادرين على تمثيل حالة الفيزيانية تم استخدام جميع النماذج وبميل 2:11 للمزلق فقط وتمت مقارنة نتائجه بالنمذجة العددية حيث ان كلا النموذجين كانا قادرين على تمثيل حالة الفيزيانية تم استخدام جميع النماذج وبميل 2:11 للمزلق فقط وتمت مقارنة نتائجه بالنمذجة العددية حيث ان كلا النموذجين كانا قادرين على تمثيل حالة وريان بنجاح من حيث شكل القفزة الهيدروليكية وارقام فرود وقيم السرعة، تم استخدام جميع النماذج وبميل 2:0. وريان بنجاح من حيث شكل القفزة الهيدروليكية وارقام فرود وقيم السرعة، تم استخدام جميع النماذج وريكي المادي الموذجين في النمزجة العددية. وتم المتخدام وريان بنجاح من حيث شكل القفزة الهيدروليكية وارقام فرود وقيم السرعة، تم استخدام جميع النماذج وريكافة ميول المزلق في النمذجة العددية. ويموذج الاضطراب (2-X هلم 2000)، واستخدم كذلك شبكة غير منتظمة. افضل نموذج لتشتيت طاقة جريان المسيل المائي بلغت % اربع صفوف من كتل المزلق ولميل مزلق 10:8. اما بالاعتماد على نسبة تقليل مسافة منطقة تدوير القفزة ونسبة تقليل مسافة الجريان فوق الحرج فقد بلغت %(17.8, 94.8) على المالي ولميل مزلق 10:10 ولمعق ماد قار وليعي ماله من الفزة ونسبة مولي مدافق المريان فوق

#### الكلمات الدالة:

تشتيت طاقة الجريان، كتل المزلق، المسيل المائي، النمذجة الفيزيائية، النمذجة العددية

This is an open access article under the CC BY 4.0 license (<u>http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</u>). https://rengj.mosuljournals.com

#### 1- المقدمة

المسيل المائي هو منشأ ملحق بالسد يعمل على توفير ممر امن للتصاريف العالية في اوقات الفيضان ويمكن اعتبار المسيل المائي أحد اهم المنشآت الهيدروليكية المسؤولة عن سلامة السد، وعادة يتم تسايط ضغوط وتصاريف عالية على هذه المنشآت الهيدروليكية. ان الطاقة المتولدة من عمود الماء تتحول الى طاقة فانضة حركية عند مرور ها على ارضية المنشا وقد تسبب فشل فيه، ولتجنب هذه المشكلة يتم استخدام مشتتات الطاقة. وتعتبر القفزة الهيدروليكية أحد طرق مشتتات طاقة الجريان. يتم محصر القفزة الهيدروليكية في أرضية مبطنة بالخرسانة تدعى بحوض التهدئة. أن انشاء ارضية مبطنة بالخرسانة بطول القفز الهيدروليكية قد يمتد الى مسافات طويلة وهذا سيؤدي الى تكاليف عالية، لهذا يتم تزويد حوض السكون بملاحق إضافية والتي تشمل (baffle blocks) والكتل الكابحة (baffle blocks) وعتبة النهاية (end sill) مالحق على نقصان طول حوض التهدئة بسبب زيادة تشتيت الطاقة في القفزة عن طريق الجريان المضطرب [5].

ولغرض ايجاد أمَنَّلُ سلوك هيدروليكي لملاحق حوض التهدئة سوف يتم التعامل في هذه الدراسة مع أنماط وتوزيعات مختلفة من كتل المزلق لإيجاد تأثيرها على تشتيت طاقة الجريان داخل حوض التهدئة وعلى خصائص القفزة الهيدروليكية لما يشكله من اهمية اقتصادية وهندسية من خلال تقليص طول الحوض وتأمين خصائص الجريان الثابتة في نهاية المنشآت الهيدروليكية

وتحويل حالة الجريان من فوق الحرج الى حالة الجريان تحت الحرج في المصب. وسوف نعتمد في هذه الدراسة على النموذج الفيزيائي والنموذج العددي باستخدام برامج المحاكاة.

تم اجراء العديد من الدر اســات التجريبية لاحواض التهدئة ومنها [16] لتحديد الخصائص المتقلبة للقفزة الهيدر وليكية ولمدى واسمع من أرقام فروود وخاصمة ما بين 3.8 إلى 8.5 وتم ايجاد تشابهاً لشكل السطح الحر. أجرى [14] در اسة مختبرية على حوض ثابت من النوع USBR III باستخدام البيانات التجريبية وتقنيات CFD، واختبروا أرقام فرود التي تتراوح من 3.1 إلى 9.5 واستخدم عدة نماذج للاضطراب واستنتج ان أفصل نموذج للاضمطراب كان RNG. قام الباحثان [13] و [10] بدراسة حوض التهدئة USBR II وأثبتت كفاءة هذا النوع في أغراض تشتيت الطاقة بالمقارنة مع التصميمات الأخرى وبسبب ادائه المميز فهو واسمه الاسمتخدام في جميع انحاء العالم. قام الباحثون [12] بجملة تغيرات على كتل المزلق (chute blocks) بابعاد مختلفة و على العتبة النهائية (end sill) بميل عكسمي مرة واخرى بعمل عتبات مدرجة في حوض ثابت USBR II لنموذج سـد. لتحسـين اداء الكتل حيث قاموا بعمل نموذج فيزيائي ونموذج عددي باستخدام نموذج الاضطراب (RNG & K-c)، اظهرت النتائج بأن ابعاد كتل المزلق بأرتفاع (1-1.5) م مع استخدام 3 عتبات بميل عكسي في نهاية الحوض تمثل الحالة المثالية لحوض السكون واستقرارية القفزة. قام الباحث [13] بعمل مقارنة لثلاث

نماذج للاضـــطراب لنموذج عددي لحوض التهدئة USBR II، أظهرت المقارنة ان نماذج الاض طراب الثلاثة كانت قادرة على إعادة در اسة الحالة بشكل موثوق من حيث المتغير ات المختارة. و على الرغم من التشابه بالأداء الكلي لنماذج الاضطراب الثلاثة، الا ان k = k RNG RNG اعطى نتائج أقرب من نتائج النموذجين. قام [11] بالتحقق من خصائص الجريان المضطرب في حوض التهدئة بأستخدام ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD) حيث ان النموذج العددي يهدف إلى التحقق من صحة النتائج بين النماذج العددية والفيزيائية المكتملة مسبقًا وكانت هناك مقاربة معقولة في خصائص الجريان بين الذماذج الفيزيائية والذماذج العددية من حيث الدقة في مخطط السطح الحر والسرعة. حيث وصلت الى 97% و 91% على التوالي. قام الباحث [1] بتقييم اداء القفزة الهيدروليكية بعمل جدران الحوض USBR II متقاربة بأربع زوايا مختلفة وذلك بعمل موديل فيزيائي وعددي ثم المقارنة بينهم، وتم استخدام حلين اثنين من خيارات النمذجة المضطربة وهما . RNG &  $k-\varepsilon$ بزاوية °12.5 يسبب اداء أفضل للقفزة الهيدر وليكية، كما بينت النتائج ان نموذج الاضطراب RNG أفضل من arepsilon = k في تمثيل الجريان باحواض السكون.

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تعظيم تشتيت طاقة جريان المسيل المائي وتعديل حوض التهدئة USBRII ليتم الغاء العتبة النهائية والحصول على نماذج متغيرة الميل ومتغيرة عدد صفوف كتل المزلق وبيان اثر هذه النماذج في تشتيت طاقة الجريان وتقليل طول الحوض. وكذلك دراسة خصائص الجريان المضطرب وميكانيكية القفزة الهيدروليكية ونوعها وموقع حدوثها وطولها وكفاءتها وتم تمثيل هذا كله بأستخدام النمذجة الفيزيائية والعددية لديناميكيات الموائع الحسابية (CFD).

## 2- النمذجة الفيزيائية والاعدادت المختبرية

تم تمثيل النماذج الفيزيائية وهي بعدد 10 من أصل 30 باستخدام القناة الموجودة في مختبر الهيدروليك التابع لقسم هندسة السدود والموارد المائية / جامعة الموصل. القناة تعمل بنظام تدوير المياه، و هي عبارة عن وحدة متكاملة مصنوعة من الألمنيوم والزجاج. أبعاد القناة هي 5.7 متر طولاً و12.5 متر عرضاً و0.46 متر عمقاً. اكبر تصريف لمضخة التدوير 30 لتر/ثا وتم استخدام مقياس العمق (point gauge) ومقياس بيتوت (pitot tube) لسرعة الجريان. الشكل 1 يوضح تفاصيل القناة.



شكل (1): منظور علوي وجانبي لشكل وابعاد القناة تضمنت التجارب المختبرية دراسة كل من النماذج USBRII ثم التعديل على النموذج USBRII وذلك باضافة صف مرة (M2) وصفين مرة اخرى (M3) وثلاث صفوف (M4) من كتل المزلق وازالة كتل نهاية العتبة وكذلك تم استخدام نموذج خالي من كتل المزلق (M1) وبميل للمزلق (1:1.2) فقط وبتصريف 29.97

لتر/ثا لجميع النماذج وبخمسة تصاريف مختلفة للنموذج M1 فقط وبعمق ماء ذيلي 10 سم لجميع النماذج، حيث كان عدد التجارب المختبرية 10 تجارب فقط. حيث تم تثبيت نموذج يتكون من مزلق مائل بداية القذاة ومتبوع بقناة مستطيلة تمند لحد اخر القناة وبعرض متساوي مع المزلق ولا يتجاوز 40 سم. الشكل (2) يوضح اشكال وتفاصيل النماذج المختبرية المستخدمة في هذه الدراسة.



شكل رقم (2) النماذج M1,M2,M3,M4,USBRII,M1 موضح فيها عدد صفوف وتوزيعات كتل المزلق

وفيما يخص النموذج USBRII فأن ارتفاع وعرض كتلة المزلق والمسافة بين كتلة واخرى مساوية لارتفاع الماء قبل القفزة الهيدروليكية (Y1)، اما فيما يخص كتل نهاية العتبة فأن ارتفاع وعرض الكتلة والمسافة بين كتلة واخرى تساوي 20% من ارتفاع الماء بعد القفزة الهيدروليكية (Y2)، اما فيما يخص النماذج الاخرى فأن المسافة بين صف واخر تساوي ارتفاع كتلة المزلق [15].

#### 3- النمذجة العددية والاعدادات العامة للبرنامج

تم عمل محاكاة للجريان في قناة مفتوحة باستخدام بر نامج FLOW 3D الذي تم اعتماده في هذه الدر اسة بسبب قدرة البر نامج على بناء شبكات غير منتظمة ضمن مجال الجريان وكل شبكة تكون بحجم مختلف عن الاخرى، وكذلك قدرة البر نامج على الاختيار التلقائي graphical post- الرسومية للعابية لهذه الدر اسة، بالاضافة الى processing والتي تعتبر مفيدة للغابية لهذه الدر اسة، بالاضافة الى قدرة البر نامج على وضع نماذج دقيقة للمشكلات التي تتضمن جريان سطحي حر. يعتمد 3D-FLOW على طريقة الحجم المحدود (FVM) Finite volume method (FVM) التي تصف حالة الجريان او بمعنى اخر وظيفة هذه الطريقة هي تحويل المعادلات التفاضلية الجزئية التي تصف حالة فيزيائية معينة الى معادلات جبرية يفهمها الحاسوب [6].

تم تنفيذ النموذج العددي ثلاثي الأبعاد للقفزة الهيدروليكية لكل من (M1,M2,M3,M4,USBRII) وبستة ميول مختلفة للمسيل المائي (1:0.8, 1:1.0,1:1.2, 1:1.4, 1:1.6, 1:1.8) وبارتفاع الماء الذيلي 10 سم لجميع الميول وبتصريف قدره 29.97 لتر/ثا.

فيما يخص معادلة الجريان والاعدادات العامة للبرنامج فان نتائج برنامج FLOW-3D تعتمد على دقة المعادلات التي تحكم الجريان، أي معادلة الاستمرارية ومعادلة Navier-Stokes (المعادلات 1 و 2) التي تصف حركة السوائل غير قابلة للانضغاط في شكلها العام [3].

$$\mu_t = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}$$

وفيما يخص نمذجة التهوية (Air Entrainment Modelling) تعتبر التهوية ظاهرة ذات أهمية قصوى في تصاريف المياه الهوائية تعتبر التهوية ظاهرة ذات أهمية قصوى في تصاريف المياه الهوائية شديدة الاضطر اب. تسبب الدوامات وتقلبات الأسطح الحرة الحابسة للهواء، وبالتالي تشكل فقاعات في جسم القفزة الهيدروليكية [10]. يتم نمذجة عملية سحب الهواء في FLOW-3D من خلال إنشاء توازن بين قوى التثبيت (الجاذبية والشد السطحي) وقوى عدم الاستقر ار (الطاقة الحركية المضطربة). هذا يسمح بتقدير مستمر لمعدل دخول الهواء إلى الجريان. في هذه الالية، يتم الحصول على حجم معدل الهواء المجوف (δν) من خلال معادلة 7 و 8 و 9 [10].

$$\partial V = k_{air} A_{S} \left[ \frac{2(P_{t} - P_{d})}{\rho} \right]^{1/2} \text{ if } P_{t} > P_{d}; \partial V = 0 \text{ if } P_{t} < P_{d} 7$$

$$P_t = \rho k \, ; P_d = \rho g L_T + \frac{\sigma}{L_T}$$

 $p_t$  وp هما على التوالي القوى المزعزعة للاستقرار والثبات  $L_T$  (MLT<sup>-2</sup>)،  $L_T$ : مقياس الطول المضطرب. مقياس الطول هذا هو تقريب لمقياس طول الاضطرابات [14].

g: الجاذبية الارضية وتكون عموديًا على السطح الحر (LT<sup>-2</sup>) ، σ: معامل الشد السطحي و <sub>Kair</sub> هو معامل التناسب الذي يجب معايرته بشكل خاص لكل حالة، على سبيل المثال مع بيانات النمذجة المادية. بشكل عام ، يتم قبول 0.5 كتخمين أولي لـــــــ<sub>Kair</sub>. [5]. *AS* : هي المساحة الحرة لكل خلية (L<sup>2</sup>).

اما فيما يخص تكوين الشبكة فقد تم أستخدام شبكة غير منتظمة سداسية السطوح مكعبة الشكل لدر اسبة كل من حوض التهدئة USBRII ونماذج اخرى من حوض التهدئة (M1,M2,M3,M4)، وبعد استخدام تحليل تقارب الشبكة لعدة احجام من خلايا التشبيك تبين ان أفضل النتائج كانت من خلال استخدام شبكة بحجمين من الخلايا، Non-) نفضل النتائج كانت من خلال استخدام شبكة بحجمين من الخلايا، الشبكة ذات حجم الخلية 0.5 cm بالنسبة للخلايا الخشنة (Non-الشبكة ذات حجم الخلية 0.5 cm بالنسبة للخلايا المعمة (refined block cell size M1, USBRII) و2000, ولكلا النموذجين 18,848,000) خلية أن الشبكة المختارة النماذج تحوي على (19,200,000) خلية المناطق ذات الخلايا صغيرة الحجم، الشكل (3).



الشكل(3): المقطع الطولي لحوض التهدئة USBR II يو ضح الحيز المكاني المتشابك وشروط الحدود (boundary condition)

# 4- التحقق (Validation):

يعد التحقق من البيانات العدّدية بمقارنتها مع البيانات المختبرية جانبًا مهمًا في أي در اسة من در اسات النمذجة العددية وذلك لتقييم النموذج

$$\nabla \overline{u} = 0$$
$$\frac{\partial \overline{u}}{\partial t} + (\overline{u} \cdot \nabla)\overline{u} = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nabla \cdot (v\nabla \overline{u}) + \overline{f_b}$$

حيث ان u: هي السرعة ( $LT^{-2}$ )، t: هو الزمن (T)، (T) الكثافة الكتلية ( $ML^{-3}$ )، p: الضحط ( $ML^{-1}T^{-2}$ )، V اللزوجة الحركية (الكيناماتيكية) للسوائل ( $L^{2}T^{-1}$ )،  $\overline{f}$ : حسابات fb لقوى الجسم (أي الجاذبية والشد السطحي). ومن المنهجيات المتبعة لحل معادلة نافيير -ستوكس في هذا البحث هي مته سطرينه لذا لمعادلات نافيير -ستوكس حكم - 2000 (

هي متوسيط رينو لدز لمعادلات نافيير-سيتوكس-Reynolds) (RANS) (averaged Navier–Stokes) . باعتباره النهج الاكثر انتشارا في المجالات الهندسية [3].

فيما يخص نمذجة السطح الحر (Free Surface Modelling) تشكل النمذجة الدقيقة للسطح الحر إحدى القضايا الرئيسية للسماح بالاستخدام العام لتقنيات CFD لتطبيقات الهندسة الهيدروليكية. في حالة التصاريف شديدة الاضطراب مع احتباس الهواء، مثل تلك التي تم تحليلها في البحث الحالي، [14][3]. برنامج FLOW-3D يعمل ضمن استر انتيجية لنمذجة وتتبع السطح الحر على طريقة حجم السوائل (VOF) (Volume of fluid) [6] من أجل تتبع تطور جزيئة السائل في جميع أنحاء المجال المتشابك، كما في المعادلة 3.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}F) = 0 \qquad 3$$

اما نموذج الاضطراب (Turbulence Modelling) والذي تم اختياره في هذا البحث ويعطي نتائج اكثر واقعية من بقبة النماذج هو menormalisation-group) RNG  $k-\varepsilon$  هذا النموذج طرقاً إحصائية لاشتقاق المعادلات المتوسطة لكميات الاضطراب التي يستخدمها نموذج z - k مما يُظهر قدرة أفضل على تمثيل التصاريف في الأشكال الهندسية المعقدة مع تأثيرات القص القوية [10]، علاوة على ذلك، وجد الباحثون أداء أفضل نموذج هو z - k المضطرب عند مقارنته بالآخرين [2]. في نموذج الاضطراب هذا الذي يحوي على معادلتين 4 و 5

: (K) لطاقة الاضطراب الحركية  

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad 4$$

لتبديد الطاقة (ع):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_i}{\sigma_s} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad 5$$

حيث xi : هي الإحداثيات في المحور (L) ،  $\mu$ : هي اللزوجة الديناميكية (ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>) هي اللزوجة الديناميكية المضطربة (ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>) و (ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>) و (ML<sup>-1</sup>T<sup>-1</sup>) و  $\mu$ : بالإضافة إلى ذلك، فإن وهي إنتاج الطاقة الحركية المضطربة. بالإضافة إلى ذلك، فإن  $\sigma_{e} = 1.00$  م $\sigma_{c} = 1.20$  ، هي ثوابت معلومة[10].  $\sigma_{k} = 1.00$   $\sigma_{c} = 1.30$   $C_{1c} = 1.44$   $C_{2c} = 1.92$  أخيرًا ، ووفقًا للباحث [3]، يمكن حساب العلاقة بين الطاقة الحركية المضطربة ومعامل

العددي والمعدلات والاعدادات العامة التي تصف الحالة الفيزيانية التي نحن بصدد ها، حيث تم مقارنة المخطط العام لسطح الماء ومخطط السرعة بين كل من البيانات الفيزيائية والعددية وللنماذج (M1,M2,M3,M4,USBRII) وبميل 1:1.2 للمزلق وبعمق ماء ذيلي 10سم وبتصاريف (M1,5.5, 11.5) للمزلق وبعمق ماء لتر/ث اللنموذج M1 وبتصريف 29.97 لتر/ث فقط للنماذج الفيزيائي والعددي مقاربة جدا، والشكل (4) يوضح عمليات المقارنة مخطط سطح الماء ومخططات السرعة لكل من البيانات العددية والفيزيائية وللنموذج SMI فقط ما بقية النماذج فقد تمت المقارنة بنفس الالية والجدول رقم (1) يوضح دقة البيانات العددية لمخطط سطح الماء ومخطط السرعة لكل من البيانات العددية



الشكل (4): المقارنة بين البيانات العددية والبيانات الفيزيائية لمخطط سطح الماء ومخطط السرعة للنموذج USBRII وبتصريف 29.97 لتر/ثا وبميل 1:1.2 للمزلق

جدول رقم (1): النسبة المئوية للدقة لمخطط سبطح الماء ومخطط السبر عة للبيانات العددية مقارنة بالبيانات المختبرية، ولحالة ميل المزلق 1:1.2 وللنماذج ادناه

	النموذج	Q (L/S)	دقة البيانات	دقة البيانات
			العددية	العددية
			لمخطط سطح	لمخطط
			الماء	السرعة
1	M1	11.50	97.2%	87.9%
2	M1	15.55	97.0%	86.2%
3	M1	21.64	97.3%	94.6%
4	M1	25.12	96.7%	95.6%
5	M1	29.97	94.8%	95.6%
6	M2	29.97	98.3%	90.8%
7	M3	29.97	96.5%	87.7%
8	M4	29.97	95.8%	90.5%
9	USBRII	29.97	96.1%	91.9%

## 5- النتائج والمناقشة:

1.3.5: نسبة الاعماق المتسلسلة :

فيما يتعلق بشكل السطح الحر للقفزة الهيدروليكية، كانت المعلومات الأولى التي تم تحليلها في النماذج العددية والفيزيائية هي نسبة الأعماق المتسلسلة (Y2,Y1). ومن ثم تمت مقارنة القيمة التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج FLOW-3D، مع القيمة التي تم الحصول عليها من النماذج الفيزيائية. اضافة لذلك، تمت مقارنة النتائج مع معادلة بيلانجر (معادلة رقم 10) [8].

$$y_2 / y_1 = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right)$$

وكذلك تمت مقارنة النتائج مع المعادلة التي اقترحها هاجر وبريمن (معادلة رقم 11) [7] والتي تعتمد على الحل النظري الذي قدمه بيلانجر، يفسر أيضًا تأثير احتكاك الجدار على نسبة الاعماق المتسلسلة للقفزة الهيدروليكية. وبالتالي، يؤخذ في الاعتبار تأثير رقم فرود للجريان، وايضا رقم رينولدز ونسبة العرض إلى الارتفاع.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \\ \cdot \left( 1 - 0.7 [(\log Re_1)^{-2.5}]^{\frac{F_1}{8}} \right) \\ \cdot \left( 1 - \frac{3.25y_1}{b^{F_1/7}} \cdot (\log Re_1)^{-3} \right)$$
11

حيث b عرض القفزة الهيدروليكية. تم إجراء المقارنة الموضحة في الجدول 2 من حيث الدقة، بالنظر إلى Ø كمتغير تم تحليله و Ø<sub>ref</sub> كقيمة مستخدمة للمقارنة، فإن المعادلة المستخدمة في البحث الحالي للحصول على النسبة المئوية للدقة كانت معادلة رقم 12

Accuracy = 
$$\left(1 - \frac{|\phi - \phi_{\text{ref}}|}{\phi_{\text{ref}}}\right) \cdot 100$$
 12

الجدول رقم 2: دقة نسبة الأعماق المتسلسلة (Y2/Y1) التي تم الحصول عليها باستخدام النماذج العددية عند مقارنتها بالنماذج الفيزيائية والمعادلات الرياضية.

	النموذج (Y2/Y1) for flow-3d	-3d	النسبة المئوية للدقة ل		
الميل V:H		(Y2/Y1) for flow	البيانات المختبرية	معادلة بيلانجر معادلة 10	هاجر ويريمين (معادلة 11)
	M1	7.960		94.50%	95.55%
	M2	4.760		91.92%	92.95%
1:0.8	M3	4.650		92.29%	93.31%
	M4	4.430		89.94%	90.94%
	USBR II	5.280		91.50%	92.51%
	M1	8.076		92.39%	91.18%
	M2	5.970		98.46%	97.33%
1:1	M3	5.538		99.87%	98.75%
	M4	5.315		98.60%	99.69%
	USBR II	6.780		99.45%	98.33%
	M1	7.647	98.91%	95.10%	93.93%
	M2	5.146	98.14%	98.03%	99.13%
1:1.2	M3	5.110	95.50%	99.68%	98.57%
	M4	5.105	97.98%	98.95%	99.72%
	USBR II	5.052	98.28%	99.17%	99.72%
1.1.4	M1	7.490		95.41%	96.47%
2.1.7	M2	5.595		95.15%	96.21%

	M3	5.130	 97.21%	98.29%
	M4	4.800	 95.42%	96.48%
	USBR II	5.700	 94.68%	95.73%
	M1	8.369	 97.72%	98.80%
	M2	5.843	 95.00%	96.07%
1:1.6	M3	5.180	 97.38%	98.47%
	M4	4.994	 98.30%	99.40%
	USBR II	5.848	 93.77%	94.82%
	M1	7.660	 94.10%	95.15%
	M2	6.369	 96.79%	97.86%
1:1.8	M3	5.333	 96.92%	98.01%
	M4	5.065	 97.55%	98.63%
	USBR II	6.830	 97.71%	98.79%

النموذج M1 قدم اعلى نسبة اعماق متسلسلة من بقية النماذج، وقدم النموذج M4 قل نسبة اعماق متسلسلة حيث بلغت نسبة التخفيض (10.22 , 54.3 , 10.22 ) لكل مسن USBRII,M4,M3,M2 على التوالي ولافضل ميل مزلق 10.8، كانت هذه القيم المنخفضة للنموذج M4 متوقعة لحوض ثابت تؤثر فيه ملحقات تبديد الطاقة على عمق الجريان فوق وتحت الحرج، فيه ملحقات تبديد الطاقة على عمق الجريان فوق وتحت الحرج، المروذج M1 لايحتوي على كتل المزلق ولهذا كانت نسبة الاعماق المتسلسلة اعلى ما يمكن، والنموذج M4 يحتوي على اربعة صفوف النموذج.

اما بالنسبة للنموذج USBRII فقد بلغت نسبة التخفيض المي ,6.25) (11.18, ولميول المزلق ,9.95, 8.4, 19.13, 7.91, 14.96) ولميول المزلق ,11.18) (11.2, 11.2, 11.0, 11.14, 11.12, 11.2, 11.08)

### 2.3.5: كفاءة تشتيت طاقة القفزة الهيدروليكية:

تعطي كفاءة تشـتيت طاقة القفزات الهيدروليكي (η) مقياساً لمقدار الطاقة المشـتتة في القفزة الهيدروليكية بسـبب عامل مؤثر. وبالتالي، فإنه يشـكل سـمة ذات أهمية قصـوى فيما يتعلق بأغراض سـلامة أحواض السـدود الكبيرة. تم حسـاب هذه الكفاءة للنماذج العددية والفيزيائية كما موضح في معادلة (13) وعلى النحو التالي:

$$\eta = \frac{H_{01} - H_{02}}{H_{01}}$$
 13

حيث H01 و H02 هما مقدار الطاقة المحددة في بداية القذرة الهيدروليكية ونهايتهاعلى التوالي. نظرًا لأن أعماق الجريان فوق الحرج وتحت الحرج تشارك بشكل مباشر في حساب الكفاءة، تم الحصول على قيم مختلفة للنموذج الفيزيائي والعددي، بالإضافة إلى ذلك، تم الحصول على كفاءة تشتيت طاقة القفزة الهيدروليكية من خلال التعبير الذي اقترحه هاجر [8]. معادلة (14) الجدول (3).

$$\eta = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{Fr_1}\right)^2$$
 14

جدول رقم (3) مقدار كفاءة تشــتيت طـاقة القفزة الهيدروليكية باســتخدام الذماذج العددية عند مقارنتها بالنموذج الفيزيائي لميل 1:1.2 والمعادلة النظرية ل [8] .

		كفاءة القفز ة	النسبة المئوية للدقة ل		
الميل V:H	النموذج	للبيانات	النتائج المفتندية	معادلة هاجر (بماداة برة	
• • • •		العدديه (Π)	المحتبري. %	(معادلة رقم 14)	
	M1	0.401		95.175	
	M2	0.461		98.561	
1:0.8	M3	0.503		98.753	
	M4	0.619		99.015	
	USBR II	0.442		97.835	
	M1	0.417		91.103	
	M2	0.480		99.127	
1:1	M3	0.523		99.326	
	M4	0.607		97.235	
	USBR II	0.450		97.897	
	M1	0.439	97.959	94.555	
	M2	0.463	95.928	91.253	
1:1.2	M3	0.542	95.133	95.122	
	M4	0.590	93.527	97.052	
	USBR II	0.523	94.676	89.024	
	M1	0.427		95.329	
	M2	0.478		94.255	
1:1.4	M3	0.523		99.294	
	M4	0.598		98.030	
	USBR II	0.463		93.125	
	M1	0.422		90.429	
	M2	0.478		87.295	
1:1.6	M3	0.543		96.037	
	M4	0.618		95.355	
	USBR II	0.464		95.538	
	M1	0.432		95.085	
	M2	0.471		93.580	
1:1.8	M3	0.563		95.711	
	M4	0.590		97.136	
	USBR II	0.459		95.336	

وضحت النتائج المعروضة في الجدول (3) أن كفاءة القفزة الهيدروليكية في احواض التهدئة التي تمت محاكاتها قلت عند وضع الكتل على المزلق (ملحقات تشتيت الطاقة) حيث انه عند النموذج M4 كانت كفاءة تشتيت الطاقة اقل من بقية النماذج M1,M2,M3,USBRII ولكافة ميول المزلق، اما بالنسبة لنموذج M3 فكانت كفاءة تشتيت الطاقة اقل من M1,M2,USBRII واعلى من M4 ولكافة ميول المزلق، اما بالنسبة للنموذج USBRII فكان

مقدار تشتيت الطاقة مقارب للنموذج M2 حيث كان مقدار تشتيت الطاقة له اعلى من M2,M3,M4 واقل من M1 وللميول الطاقة له اعلى من M2,M3,M4 واقل من M1 وللميول USBRII اقل منM2,M1 واعلى من، اما بالنسبة للنموذج M1 فقد كان مقدار تشتيت الطاقة اعلى من بقية النماذج الاخرى ولكافة الميول. حيث ان خصائص التصميم المحددة لحوض التهدئة تعكس مقدار حيث ان خصائص التصميم المحددة لحوض التهدئة تعكس مقدار فروود في هذه النماذج من (7.78,93) أظهرت هذه النتائج أنه على الرغم من أن تأثير ملحقات تشتيت الطاقة قلات من كفاءة القفزة الهيدروليكية في تشتيت الطاقة لان قبل وضح ملحقات تشتيت الطاقة كانت القفزة الهيدروليكية هي الوحيدة المسئولة عن تشتيت الطاقة وبعد وضع كتل المزلق قامت هذه الكتل بتقليل مقدار تشتيت الطاقة

على القفزة الهيدروليكية. ان قيم كفاءة القفزة الهيدروليكية في نموذج USBRII كانت مقاربة لما موجود عند الباحث [10]

### 3.3.5: طول مسافة تدوير القفزة الهيدروليكية :

وفقًا ل [8]، تحدد طول مسافة ألقفزة الهيدروليكية الحدود بين الجريان الخلفي والأمامي، بدءاً من قدم القفزة الهيدروليكية (Hydrulic jump toe) وتنتهي عند نقطة استقرار السطح. ومن ثم، فإن هذه المنطقة تضم أكبر تقلبات في السرعة والضعط، إلى جانب أكبر تشتيت للطاقة. لذلك، فإن التقدير الصحيح لطول تقلبات القفزة الهيدروليكية له أهمية قصوى عند تصميم منشات تشتيت الطاقة. لم يكن في الامكان تحديد طول منطقة تدوير القفزة الهيدروليكية مختبريا لعدم توفر اجهزة قياس مناسبة، لذلك تم الاعتماد على نتائج البيانات العددية من برنامج flow-3d ومقارنتها بالمعادلات الرياضية المقترحة من البحوث السابق.

حيث قدم [8] در اســة مفصــلة تتعلق بأطوال مســافة تدوير القفز ات الهيدروليكية واقترح هؤلاء الباحثون التعبير التالي لحســاب طول منطقة تدوير القفزة الهيدروليكية (معادلة رقم 15 و 16)

$$L_r = y_1 \left[ -12 + 160 \tanh\left(Fr_1 / 20\right) \right] \text{ for }^{y_1} / _b < 0.10$$

 $L_r = y_1 \left[ -12 + 100 \tanh \left( Fr_1 / 12.5 \right) \right]$  for  $0.10 < y_1 / b < 0.70$  16

اقترح [16] وصفا رياضيا بناءً على ملاحظاتهم للقفزات الهيدروليكية بقيمة فروود بين 1.5 و 8.5، حيث ان ارقام فروود في هذه الدراسة تراوحت بين (7.78-3.9).معادلة رقم 17

$$L_r = y_1 \Big[ 6 \Big( Fr_1 - 1 \Big) \Big]$$
 17

كانت القيم الناتجة عن طول مسافة تدوير القفزة الهيدروليكية لـ FLOW-3D والتعبيرات الرياضية باستخدام معادلة 2 و 3 على التوالي موضحة في الجدول رقم 4 (استخدمت معادلة 12 لحساب الدقة)

الجدول رقم 4. دقة طول اسطوانة القفزة الهيدروليكية التي تم الحصول عليها باستخدام النماذج العددية عند مقارنتها بالتعبيرات النظرية لكل من [16] .

		طول منطقة التدوير للبيانات العددية	النسبة المئوية للدقة ل		
الميل V:H	النموذج		معادلة رقم 15 او 16	معادلة رقم 17	

		(cm)		
	M1	86.00	93.21%	89.62%
	M2	78.38	97.78%	97.68%
1:0.8	M3	76.59	97.74%	97.63%
	M4	76.03	97.95%	97.86%
	USBR II	82.08	95.01%	94.46%
	M1	80.14	96.22%	89.52%
	M2	67.27	94.87%	94.28%
1:1	M3	66.62	95.35%	94.88%
	M4	65.98	95.58%	95.15%
	USBR II	69.53	94.02%	93.20%
	M1	73.85	93.66%	92.74%
	M2	71.74	95.83%	95.45%
1:1.2	M3	69.29	96.14%	95.81%
	M4	69.04	96.19%	95.87%
	USBR II	70.59	96.11%	95.78%
	M1	88.00	96.51%	80.76%
	M2	74.60	94.87%	94.28%
1:1.4	M3	70.13	95.78%	95.39%
	M4	69.88	96.26%	95.95%
	USBR II	75.28	94.69%	94.06%
	M1	90.52	95.10%	78.53%
	M2	78.00	94.55%	93.88%
1:1.6	M3	70.50	95.70%	95.30%
	M4	68.85	96.16%	95.84%
	USBR II	78.83	94.51%	93.84%
	M1	85.32	95.81%	89.35%
	M2	77.55	94.14%	93.36%
1:1.8	M3	74.53	95.40%	94.93%
	M4	71.85	95.93%	95.57%
	USBR II	78.24	93.84%	92.97%

إن تحديد مثل هذه الملامح معقد إلى حد كبير بالنسبة للنموذج. من ناحية أخرى أظهرت النماذج العددية قدرتها على توفير قيم معقولة لهذا الطول مقارنة بالتعبيرات الرياضية. حيث اوضح الجدول رقم 4 بان النموذج M4 انتج اقل طول لمنطقة التدوير مقارنة مع النماذج الاخرى وبكافة ميول المزلق اما النموذج M3 انتج طول للاسطوانة على من M4 واقل من بقية النماذج، اما بالنسبة للنموذج USBRII فكان مقدار طول مسافة التدوير مقاربة للنموذج M2 حيث كان مقدار فكان مقدار طول مسافة التدوير مقاربة للنموذج M1 حيث كان مقدار الطول له اعلى من M4,004 واقل من M1 وللميول النويرل USBRII اقل من M1 ما ير M1 ما بالنسبة للنموذج M1 فقط اعلى اكبر طول لمنطقة تدوير القفزة الميروليكية من بقية النماذج الاخرى ولكافة الميول.

#### 4.3.5: مخطط السرعة ورقم فرود:

تم إجراء تحليل لانماط السرعة فوق الحرجة وتحت الحرجة التي تم الحصول عليها من النماذج العددية وتم مقارنة توزيع السرع وارقام فرود لكافة النماذج M1,M2,M3,M4,USBRII وبمبولهم المختلفة 1:1.8 ; 1:1.6 ; 1:1.5 ; 1:1.6 ; 1:1.8 يوضح الشكل (5) مخطط توزيع السرعة ورقم فروود للميل 1:1.8 والشكل (6) للميل 1:1.6 .





شكل رقم (5) A: يوضح توزيع السرع لكافة النماذج وبميل 1:1.8 ، B: يوضح توزيع ارقام فرود لكافة النماذج وللميل 1:1.8





شكل رقم (6) A: يوضح توزيع السرع لكافة النماذج وبميل 1:1.6 ، 8: يوضح توزيع ارقام فرود لكافة النماذج وللميل 1:1.6

من الأشكال (5,6) وبقية النتائج غير المعروضة نلاحظ انه عند استخدام نموذج بدون ملحقات تبديد الطاقة ستكون المسافة التي يقطعها الجريان فوق الحرج هي اكبر في حالة عدم استخدامها في حوض التهدئة. الجدول التالي لتوضيح نسبة تقليل مسافة الجريان فوق الحرج لكافة الميول وللنماذج المختلفة وكما يلي:

الجدول رقم 5. نسبة تقليل مسافة الجريان فوق الحرج لكافة النماذج
التي تحتويُ على ملحقات تشتيت طاقة الجريان من النموذج الخاليّ
من ملحقات مشتتات الطاقة. كذلك للنماذج الاخرى و بكافة ميو ل

الميل V:H	النموذج	مسافة الجريان فوق الحرج من بداية حوض السكون	تغفيض النسبة المنوية لمسافة الجريان فوق الحرج
	M1	234.80	0%
	M2	52.60	77.59%
1:0.8	M3	42.90	81.72%
	M4	32.40	86.20%
	USBR II	62.60	73.33%
	M1	248.00	0%
	M2	57.30	76.89%
1:1	M3	42.20	82.98%
	M4	12.80	94.83%
	USBR II	62.90	74.63%
	M1	257.00	0%
	M2	72.40	71.82%
1:1.2	M3	40.20	84.35%
	M4	30.60	88.80%
	USBR II	59.30	76.92%
1.1 /	M1	235.40	0%
1:1.4	M2	55.40	76.46%

173

#### المصادر:

- H. Babaali, N. Soori, S. Soori, A. Mojtahedi, & Hamedi, A.2018. "Static Pressure Estimation on Converging USBR II Stilling Basin: Numerical Approach". *International Journal of Science and Engineering Investigations*, Vol.7, N, 89-97.
- [2] A. Bayón, and P. A. López-Jiménez, (2015).
   "Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM," *J. Hydroinformatics*, vol. 17, no. 4, pp. 662–678.
- [3] A. Bayon, D. Valero, R. García-Bartual, & P. A. López-Jiménez, (2016). Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump. *Environmental Modelling & Software*, 80, 322-335.
- [4] F. A. Bombardelli, I. Meireles, & J. Matos, (2011). Laboratory measurements and multiblock numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways. *Environmental Fluid Mechanics*, 11(3), 263-288..
- [5] T. M. Champagne, And B. D. Barkdoll, 2015. "Oscillating Hydraulic Jump in a Stilling Basin". World Environmental and Water Resources Congress: Floods, Droughts, and Ecosystems 2015, Texas, USA, pp. 1686-1695.
- [6] Flow Science Inc. (2017). Flow-3D User Manual. Flow Science Inc., Santa Fe, NM, United States of America.
- [7] W. H. Hager, and R. Bremen, (1989).
   "Classical hydraulic jump: sequent depths," *J. Hydraul. Res.*, vol. 27, no. 5, pp. 565–585.
- [8] W. H. Hager, (1992). Energy dissipators and hydraulic jump. Springer Science & Business Media, Dordrecht, The Netherlands.
- [9] P. Khadka, S. Bhattarai, B. N. S. Ghimire, and R. K. Regmi, 2020. "Numerical Analysis of Flow Through Stilling Basin Using CFD Model". *International Journal of Civil Engineering and Technology* (IJCIET) 11(2):62-71.
- [10] J. F. Macián-Pérez, R. García-Bartual, B. Huber, Bayon, A., and Vallés-Morán, F. J. 2020. "Analysis of the flow in a typified USBR II stilling basin through a numerical and physical modeling approach". *Water*, 12(1), 227. <u>https://doi:10.3390/w12010227</u>
- [11] R. Padulano, O. Fecarotta, G. Del Giudice, & A. Carravetta, (2017). Hydraulic design of a USBR Type II stilling basin. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 143(5), 04017001.
- [12] S. Soori, H. Babaali, & N.Soori, 2017."An Optimal Design of the Inlet and

	M3	40.40	82.80%
	M4	20.40	91.33%
	USBR II	71.40	69.66%
	M1	214.60	0%
	M2	64.60	69.89%
1:1.6	M3 41.60		80.60%
	M4	14.60	93.19%
	USBR II	71.60	66.63%
	M1	196.80	0%
	M2	65.80	66.50%
1:1.8	M3	43.80	77.74%
	M4	33.80	82.80%
	USBR II	74.80	61.99%

#### 6- الاستنتاجات::

لتعظيم تشتيت طاقة الجريان القادمة من المسيل المائي تم تمثيل خصائص الجريان المضطرب باستخدام النمذجة الفيزيائية والعددية حيث استخدم نموذج USBRII ونماذج اخرى تحوي على كتل مزلق بأنماط مختلفة وبستة ميول للمزلق. وضمن حدود هذه الدراسة تم استنتاج ما يلي:

1) قدم كل من النموذجين الفيزيائي والعددي والمعادلات الرياضية تمثيلا جيدا في تقدير نسبة الاعماق المتسلسلة ومسافة منطقة تدوير القفزة الهيدروليكية من النتائج يتبين بأن النموذج الخالي من كتل المزلق أعطى اعلى قيم للاعماق المتسلسلة ومسافة التدوير من بقية النماذج. والنموذج الحاوي على 4 صفوف اعطى اقل قيم. بينما كانت قيم النموذج الSBRII مقاربة للنموذج الحاوي على صفين من كتل المزلق ولكافة ميول المزلق.

2) كذلك اظهرت النتائج المأخوذة من النمذجة الفيزيائية والعددية بأن كفاءة القفزة الهيدر وليكية كانت بأعلى قيمة عند النموذج الحاوي على 4 صفوف من كتل المزلق وحيث كانت القيمة 61.9%، واقل قيمة عند النموذج الخالي من كتل المزلق بنسبة 40.1% بينما النموذجين USBRII والنموذج الحاوي على صفين من كتل المزلق اعطى قيم متقاربة %(44.2, 46.1) على التو الى.

3) فيما يخص مسافة تقليل الجريان فوق الحرج فقد اعطى النموذج M4 اعلى نسبة تقليل بلغت %94.83 عند ميل المزلق 1:1.0

(3) تراوحت نسبة الدقة عند مقارنة البيانات العددية مع الفيزيائية لمخطط سطح الماء بين %(97.3-94.8) ولمخطط السرعة (86.2-95.6) ولمختلف النماذج وهذا التقارب يعتبر جيد البيانات العددية.

4) افضل نموذج لتشتيت طاقة جريان المسيل المائي هو النموذج الحاوي على 4 صفوف من كذل المزلق ولكافة ميول المزلق، اما افضل ميل للمزلق فكان 1:0.8 بالاعتماد على نسبة الاعماق المتسلسلة (Y2/Y1) وكفاءة القفزة، اما بالاعتماد على مسافة منطقة تدوير القفزة ونسبة تقليل مسافة الجريان فوق الحرج فقد كان الميل 1:1.0 فقد اعطى اعلى نسبة تقليل لمسافة الجريان فوق الحرج واقل قيمة لطول منطقة التدوير.

OutletObstaclesatUSBRIIStillingBasin". InternationalJournalofScienceand Engineering Applications, 6(05)

- [13] F.Tajabadi, E. Jabbari, & H. Sarkardeh, (2017). Hydrodynamic analysis of flow in USBR stilling basin types I, II, III. *Journal of Dam and Hydroelectric Powerplant*, 4(13), 43-54. 1: experimental data for modelling performance assessment. *Water*, 11(1), 36, 1, p. 36.
- [14] D. Valero, N. Viti, & C. Gualtieri, (2019). Numerical simulation of hydraulic jumps. Part
- [15] R. S. Varshney, S. G. Gupta, and R. L. Gupta, 1979. "Theory & Design of Irrigation Structures". *new Chand & bros: Roorkee* (u.p.), India. Pp. 53-70.
- [16] H. Wang, & H. Chanson, (2015). Air entrainment and turbulent fluctuations in hydraulic jumps. Urban Water Journal, 12(6), 502-518.

# Numerical and Physical Modelling to Dissipate the Flow Energy of Spillway Using Multiple Rows of Chute Blocks

Mohamed Saad Alhmdany mohamed.enp102@student.uomosul.edu.iq Mena Ahmed Alsawaf m.alsawaf@uomosul.edu.iq

Zeyad Ayoob Sulaiman zyiad\_2005@yahoo.com

Dams and Water Resources Engineering Department, Collage of Engineering, University of Mosul

## ABSTRACT

Physical and Numerical models have been used to maximize the dissipation of flow energy of a sipllway, and to guarantee the occurring of hydraulic jump in the stilling basin in shorter length, and to find the right model to simulate turbulent flow properties using the techniques of Computational Fluid Dynamics (CFD). 5 models have been tested which they had different rows of chute blocks. For each, 6 slopes of chute were examined, 1:0.8, 1:1.0, 1:1.2, 1:1.4, 1:1.6, 1:1.8, with 10 cm of tail water. Physical models were emplemented to represent a sucssecfully models that compared with the theoretical model in a slope 1:1.2 for chute. Using the RNG & K- $\epsilon$  as a turbulent theoretical model and a non uniform distribution of the mesh led to sucssesfully simulating the stream lines, velosities and shape of hydraulic jumps and Froude numbers. Using four rows of choute blocks at the end of the chute near the edge is the best design to dissipate the energy, which was 61.9%, and for spillway slope of 1:0.8, while the percentage of energy dissipation that depending reducing the distance of the roller jump and reducing the distance of the supercritical flow was laid between (17.8, 94.8)%, respectively, when the spillway slope is 1:1.0.

#### Keywords

Flow energy dissipation, Chute blocks, spillway, phiscal model, Numerical model, CFD, FLOW-3D, USBRII