

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

مينا أحمد الصواف
m.alsawaf@uomosul.edu.iq

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

زياد ايوب سليمان
zyiad_2005@yahoo.com

جامعة الموصل - كلية الهندسة - قسم هندسة السدود والموارد المائية

تاريخ القبول: 6/9/2021

تاريخ الاستلام: 19/6/2021

المستخلص:

لتعظيم تشتيت طاقة الجريان القادمة من المسيل المائي ولضمان حصول القفزة الهيدروليكية ضمن حوض السكون وبأقل طول ممكن ولمعرفة مدى صلاحية استخدام ديناميكيات الموائع الحسابية (Computational Fluid Dynamics CFD) في تمثيل خصائص الجريان المضطرب تم إجراء استخدام النمذجة المزدوجة الفيزيائية والعددية لتمثيل حالة الجريان، حيث استخدمت 5 نماذج تحوي على كتل مزلق بأنماط مختلفة من حيث عدد صفوف الكتل (M1, M2, M3, M4, USBR II) وتم استخدام 6 ميول للمزلق (1:0.8, 1:1.0, 1:1.2, 1:1.4, 1:1.6, 1:1.8)، وكان عمق الماء الذليل 10 سم. في النمذجة الفيزيائية تم استخدام جميع النماذج وبميل 1:1.2 للمزلق فقط وتمت مقارنة نتائجه بالنمذجة العددية حيث ان كلا النموذجين كانا قادرين على تمثيل حالة الجريان بنجاح من حيث شكل القفزة الهيدروليكية وارقام فروود وقيم السرعة، تم استخدام جميع النماذج وبكافة ميول المزلق في النمذجة العددية. وتم استخدام نموذج الاضطراب (RNG & K-ε)، واستخدم كذلك شبكة غير منتظمة. افضل نموذج لتشتيت طاقة جريان المسيل المائي بلغت 61.9% للنموذج ذو اربع صفوف من كتل المزلق ولميل مزلق 1:0.8. اما بالاعتماد على نسبة تقليل مسافة منطقة تدوير القفزة ونسبة تقليل مسافة الجريان فوق الحرج فقد بلغت (17.8, 94.8%) على التوالي ولميل مزلق 1:1.0 ولمعمق ماء ذليل 10 سم.

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 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).
<https://renj.mosuljournals.com>

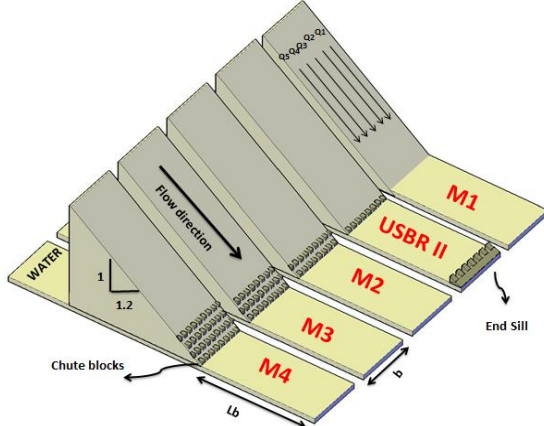
1- المقدمة

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 إجراء العديد من الدراسات التجريبية لخواص التهئة ومنها [16] لتحديد الخصائص المتقلبة للقفزة الهيدروليكية ولمدى واسع من أرقام فروود وخاصة ما بين 3.8 إلى 8.5 وتم إيجاد تشابهاً لشكل السطح الحرج. أجرى [14] دراسة مختبرية على حوض ثابت من النوع USBR III باستخدام البيانات التجريبية وتقنيات CFD، واختبروا أرقام فروود التي تتراوح من 3.1 إلى 9.5 واستخدم عدة نماذج للاضطراب واستنتج ان أفضل نموذج للاضطراب كان RNG. قام الباحثان [13] و [10] بدراسة حوض التهئة USBR II وأثبتت كفاءة هذا النوع في أغراض تشتيت الطاقة بالمقارنة مع التصميمات الأخرى وبسبب ادائه المميز فهو واسع الاستخدام في جميع انحاء العالم. قام الباحثون [12] بجملة تغييرات على كتل المزلق (chute blocks) بأبعاد مختلفة وعلى العتبة النهائية (end sill) بميل عكسي مرة واخرى بعمل عتبات مدرجة في حوض ثابت USBR II لنموذج سد. لتحسين أداء الكتل حيث قاموا بعمل نموذج فيزيائي ونموذج عددي باستخدام نموذج الاضطراب (RNG & K-ε)، اظهرت النتائج بأن ابعاد كتل المزلق بأرتفاع (1.5-1) م مع استخدام 3 عتبات بميل عكسي في نهاية الحوض تمثل الحالة المثالية لحوض السكون واستقرارية القفزة. قام الباحث [13] بعمل مقارنة لثلاث

المسيل المائي هو منشأ ملحق بالسد يعمل على توفير ممر امن للتصريف العالية في اوقات الفيضان ويمكن اعتبار المسيل المائي أحد اهم المنشآت الهيدروليكية المسؤولة عن سلامة السد، وعادة يتم تسليط ضغوط وتصريف عالية على هذه المنشآت الهيدروليكية. ان الطاقة المتولدة من عمود الماء تتحول الى طاقة فائضة حركية عند مرورها على ارضية المنشأ وقد تسبب فشل فيه، ولتجنب هذه المشكلة يتم استخدام مشبكات الطاقة. وتعتبر القفزة الهيدروليكية أحد طرق مشبكات طاقة الجريان. يتم حصر القفزة الهيدروليكية في أرضية مبطنة بالخرسانة تدعى بحوض التهئة. أن انشاء ارضية مبطنة بالخرسانة بطول القفزة الهيدروليكية قد يمتد الى مسافات طويلة وهذا سيؤدي الى تكاليف عالية، لهذا يتم تزويد حوض السكون بملاحق إضافية والتي تشمل كتل المزلق (chute blocks) والكتل الكابحة (baffle blocks) وعتبة النهاية (end sill) حيث تعمل هذه الملاحق على نقصان طول حوض التهئة بسبب زيادة تشتيت الطاقة في القفزة عن طريق الجريان المضطرب [5].

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

لتر/ثا لجميع النماذج وبخمس تصاريح 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 القناة ومتبوع بقناة مستطيلة تمتد لحد آخر القناة ويعرض متساوي مع المزلق ولا يتجاوز 40 سم. الشكل (2) يوضح أشكال وتفصيل النماذج المختبرية المستخدمة في هذه الدراسة.



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

وفيما يخص النموذج USBR II فإن ارتفاع وعرض كتلة المزلق والمسافة بين كتلة وأخرى مساوية لارتفاع الماء قبل القفزة الهيدروليكية (Y1)، أما فيما يخص كتلة نهاية العتبة فإن ارتفاع وعرض الكتلة والمسافة بين كتلة وأخرى تساوي 20% من ارتفاع الماء بعد القفزة الهيدروليكية (Y2)، أما فيما يخص النماذج الأخرى فإن المسافة بين صف وآخر تساوي ارتفاع كتلة المزلق [15].

3- النمذجة العددية والاعدادات العامة للبرنامج

تم عمل محاكاة للجريان في قناة مفتوحة باستخدام برنامج FLOW 3D الذي تم اعتماده في هذه الدراسة بسبب قدرة البرنامج على بناء شبكات غير منتظمة ضمن مجال الجريان وكل شبكة تكون بحجم مختلف عن الأخرى، وكذلك قدرة البرنامج على الاختيار التلقائي للخطوة الزمنية Δt ، والمعالجة الرسومية - graphical post-processing والتي تعتبر مفيدة للغاية لهذه الدراسة، بالإضافة إلى قدرة البرنامج على وضع نماذج دقيقة للمشكلات التي تتضمن جريان سطحي حر. يعتمد FLOW-3D على طريقة الحجم المحدود (FVM) Finite volume method لتحليل المعادلات التي تصف حالة الجريان أو بمعنى آخر وظيفة هذه الطريقة هي تحويل المعادلات التفاضلية الجزئية التي تصف حالة فيزيائية معينة إلى معادلات جبرية يفهمها الحاسوب [6].

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

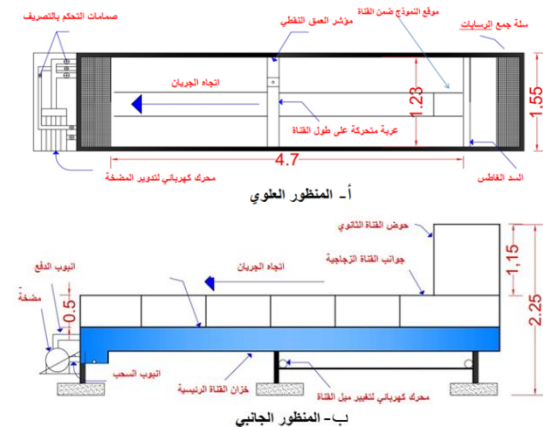
فيما يخص معادلة الجريان والاعدادات العامة للبرنامج فإن نتائج برنامج FLOW-3D تعتمد على دقة المعادلات التي تحكم الجريان، أي معادلة الاستمرارية ومعادلة Navier-Stokes (المعادلات 1 و 2) التي تصف حركة السوائل غير قابلة للانضغاط في شكلها العام [3].

نماذج للاضطراب لنموذج عددي لحوض التهدة USBR II، أظهرت المقارنة أن نماذج الاضطراب الثلاثة كانت قادرة على إعادة دراسة الحالة بشكل موثوق من حيث المتغيرات المختارة. وعلى الرغم من التشابه بالأداء الكلي لنماذج الاضطراب الثلاثة، إلا أن $k - \epsilon$ أعطى نتائج أقرب من نتائج النموذجين. قام [11] بالتحقق من خصائص الجريان المضطرب في حوض التهدة باستخدام ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD) حيث أن النموذج العددي يهدف إلى التحقق من صحة النتائج بين النماذج العددية والفيزيائية المكتملة مسبقاً وكانت هناك مقارنة معقولة في خصائص الجريان بين النماذج الفيزيائية والنماذج العددية من حيث الدقة في مخطط السطح الحر والسرعة. حيث وصلت إلى 97% و 91% على التوالي. قام الباحث [1] بتقييم أداء 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 $k - \epsilon$ و RNG. وأظهرت النتائج أن تقارب جدران الحوض بزاوية 12.5° يسبب أداء أفضل للقفزة الهيدروليكية، كما بينت النتائج أن نموذج الاضطراب RNG أفضل من $k - \epsilon$ في تمثيل الجريان بأحواض السكون.

الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تعظيم تشتيت طاقة جريان المسيل المائي وتعديل حوض التهدة USBR II ليتم الغاء العتبة النهائية والحصول على نماذج متغيرة الميل ومتغيرة عدد صفوف كتل المزلق وبيان أثر 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 باستخدام النمذجة الفيزيائية والعددية لديناميكيات الموائع الحسابية (CFD).

2- النمذجة الفيزيائية والاعدادات 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، وهي عبارة عن وحدة متكاملة مصنوعة من الألمنيوم والزجاج. أبعاد القناة هي 5.7 متر طولاً و 1.23 متر عرضاً و 0.46 متر عمقاً. أكبر تصريف لمضخة التدوير 30 لتر/ثا وتم استخدام مقياس العمق (point gauge) ومقياس بينوت (pitot tube) لسرعة الجريان. الشكل 1 يوضح تفاصيل القناة.



شكل (1): منظور علوي وجانبي لشكل وابعاد القناة

تضمنت التجارب المختبرية دراسة كل من النماذج USBR II ثم التعديل على النموذج USBR II وذلك بإضافة صف مرة (M2) و صفين مرة أخرى (M3) وثلاث صفوف (M4) من كتل المزلق وإزالة كتلة نهاية العتبة وكذلك تم استخدام نموذج خالي من كتل المزلق (M1) وبميل للمزلق (1:1.2) فقط وبتصريف 29.97

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

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

$$\delta v = k_{air} A_s \left[\frac{2(P_t - P_d)}{\rho} \right]^{1/2} \text{ if } P_t > P_d; \delta v = 0 \text{ if } P_t < P_d \quad 7$$

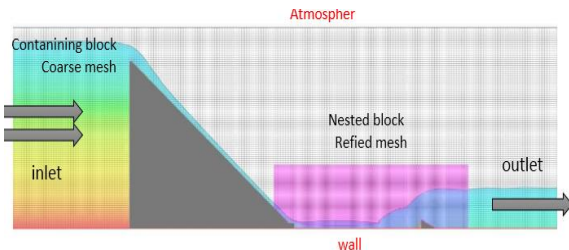
$$P_t = \rho k; P_d = \rho g L_T + \frac{\sigma}{L_T} \quad 8$$

$$L_T = \frac{c^{3/4} \cdot k^{3/2}}{\varepsilon} \quad 9$$

حيث ان :

P_t و P_d هما على التوالي القوى المزعة للاستقرار والثبات (MLT^{-2})، L_T : مقياس الطول المضطرب. مقياس الطول هذا هو تقريب لمقياس طول الاضطرابات [14].
 g : الجاذبية الارضية وتكون عمودياً على السطح الحر (LT^{-2})، σ : معامل الشد السطحي و K_{air} : 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 لـ K_{air} . [5]. AS : هي المساحة الحرة لكل خلية (L^2).

اما فيما يخص تكوين الشبكة فقد تم استخدام شبكة غير منتظمة سداسية السطوح مكعبة الشكل لدراسة كل من حوض التهنة USBR II ونماذج اخرى من حوض التهنة (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، الشبكة ذات حجم الخلية 0.5 cm بالنسبة للخلايا الخشنة (Non-refined block cell size) و 0.25 cm بالنسبة للخلايا المنعمة (Refined block cell size)، ولكلا النموذجين USBR II، M1. أن الشبكة المختارة للنماذج تحوي على (18,848,000) خلية للمناطق ذات الخلايا كبيرة الحجم و (19,200,000) خلية للمناطق ذات الخلايا صغيرة الحجم، الشكل (3).



الشكل (3): المقطع الطولي لحوض التهنة USBR II يوضح الحيز المكاني المتشابك وشروط الحدود (boundary condition)

4- التحقق (Validation):

يعد التحقق من البيانات العددية بمقارنتها مع البيانات المختبرية جانباً مهماً في أي دراسة من دراسات النمذجة العددية وذلك لتقييم النموذج

$$\nabla \bar{u} = 0$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot (\nu \nabla \bar{u}) + \bar{f}_b$$

حيث ان u : هي السرعة (LT^{-2})، t : هو الزمن (T)، ρ : الكثافة الكتلية (ML^{-3})، p : الضغط ($ML^{-1}T^{-2}$)، ν : اللزوجة الحركية (الكينماتيكية) للسوائل (L^2T^{-1})، حسابات f_b لقوى الجسم (أي الجاذبية والشد السطحي).

ومن المنهجيات المتبعة لحل معادلة نافير-ستوكس في هذا البحث هي متوسط رينولدز لمعادلات نافير-ستوكس-رينولدز (Reynolds-averaged Navier-Stokes) (RANS). باعتماره النهج الأكثر انتشاراً 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 التصارييف شديدة الاضطراب مع احتباس الهواء، مثل تلك التي تم تحليلها في البحث الحالي، [14] [3]. برنامج FLOW-3D يعمل ضمن استراتيجيات لنمذجة وتتبع السطح الحر على طريقة حجم السوائل (Volume of fluid) (VOF) [6] من أجل تتبع تطور جزيئة السائل في جميع أنحاء المجال المتشابك، كما في المعادلة 3.

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

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

طاقة الاضطراب الحركية (K):

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

لتبديد الطاقة (ε):

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

حيث x_i : هي الإحداثيات في المحور (L)، μ : هي اللزوجة الديناميكية ($ML^{-1}T^{-1}$)، μ_t : هي اللزوجة الديناميكية المضطربة ($ML^{-1}T^{-1}$) وهي إنتاج الطاقة الحركية المضطربة. بالإضافة إلى ذلك، فإن المصطلحات σ_k و σ_ε و $C_{1\varepsilon}$ و $C_{2\varepsilon}$ هي ثوابت معلومة [10].

$\sigma_k = 1.00$ $\sigma_\varepsilon = 1.30$ $C_{1\varepsilon} = 1.44$ $C_{2\varepsilon} = 1.92$ أخيراً، ووفقاً للباحث [3]، يمكن حساب العلاقة بين الطاقة الحركية المضطربة ومعدل تبديدها واللزوجة الديناميكية المضطربة بالمعامل $C_\mu = 0.085$ وكما موضح بالمعادلة رقم 6

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

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 الأعماق المتسلسلة للقفزة الهيدروليكية. وبالتالي، يؤخذ في الاعتبار تأثير رقم فرود للجريان، وإيضاً رقم رينولدز ونسبة العرض إلى الارتفاع.

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1 \right) \cdot \left(1 - 0.7 \left[(\log Re_1)^{-2.5} \right]^{\frac{F_1}{8}} \right) \cdot \left(1 - \frac{3.25y_1}{bF_1/7} \cdot (\log Re_1)^{-3} \right) \quad 11$$

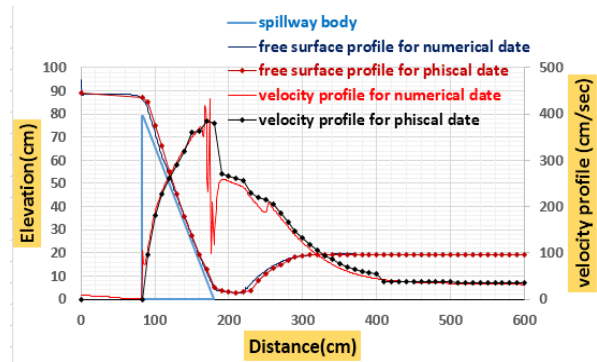
حيث b عرض القفزة الهيدروليكية. تم إجراء المقارنة الموضحة في الجدول 2 من حيث الدقة، بالنظر إلى ϕ كمتغير تم تحليله و ϕ_{ref} كقيمة مستخدمة للمقارنة، فإن المعادلة المستخدمة في البحث الحالي للحصول على النسبة المئوية للدقة كانت معادلة رقم 12

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

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

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

العددي والمعدلات والاعدادات العامة التي تصف الحالة الفيزيائية التي نحن بصددتها، حيث تم مقارنة المخطط العام لسطح الماء ومخطط السرعة بين كل من البيانات الفيزيائية والعددية والنماذج ذيلي 10 اسم وبتصارييف (M1, M2, M3, M4, USBRII) وبميل 1:1.2 للزلق وبعمق ماء لتر/ثا للنموذج M1 وبتصريف 29.97 لتر/ثا فقط للنماذج (M2, M3, M4, USBRII)، وكانت النتائج بين كل من النموذج الفيزيائي والعددي مقاربة جدا، والشكل (4) يوضح عمليات المقارنة لمخطط سطح الماء ومخططات السرعة لكل من البيانات العددية والفيزيائية والنموذج USBRII فقط. اما بقية النماذج فقد تمت المقارنة بنفس الالية والجدول رقم (1) يوضح دقة البيانات العددية لمخطط سطح الماء ومخطط السرعة.



الشكل (4): المقارنة بين البيانات العددية والبيانات الفيزيائية لمخطط سطح الماء ومخطط السرعة للنموذج USBRII وبتصريف 29.97 لتر/ثا وبميل 1:1.2 للزلق
جدول رقم (1): النسبة المئوية للدقة لمخطط سطح الماء ومخطط السرعة للبيانات العددية مقارنة بالبيانات المختبرية، ولحالة ميل الزلوق 1:1.2 والنماذج ادناه

رقم	النموذج	Q (L/S)	دقة البيانات العددية لمخطط سطح الماء	دقة البيانات العددية لمخطط 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	USBR II	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. إضافة لذلك، تمت مقارنة النتائج مع معادلة بيلانجر (معادلة رقم 10) [8].

جدول رقم (3) مقدار كفاءة تشتيت طاقة القفزة الهيدروليكية باستخدام النماذج العددية عند مقارنتها بالنموذج الفيزيائي لميل 1:1.2 والمعادلة النظرية ل [8] .

الميل V:H	النموذج	كفاءة القفزة للبيانات العددية (η)	النسبة المئوية للدقة ل	
			الناتج المختبرية %	معادلة هاجر (معادلة رقم 14)
1:0.8	M1	0.401	-----	95.175
	M2	0.461	-----	98.561
	M3	0.503	-----	98.753
	M4	0.619	-----	99.015
	USBR II	0.442	-----	97.835
1:1	M1	0.417	-----	91.103
	M2	0.480	-----	99.127
	M3	0.523	-----	99.326
	M4	0.607	-----	97.235
	USBR II	0.450	-----	97.897
1:1.2	M1	0.439	97.959	94.555
	M2	0.463	95.928	91.253
	M3	0.542	95.133	95.122
	M4	0.590	93.527	97.052
	USBR II	0.523	94.676	89.024
1:1.4	M1	0.427	-----	95.329
	M2	0.478	-----	94.255
	M3	0.523	-----	99.294
	M4	0.598	-----	98.030
	USBR II	0.463	-----	93.125
1:1.6	M1	0.422	-----	90.429
	M2	0.478	-----	87.295
	M3	0.543	-----	96.037
	M4	0.618	-----	95.355
	USBR II	0.464	-----	95.538
1:1.8	M1	0.432	-----	95.085
	M2	0.471	-----	93.580
	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 أحواض التهينة 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,USBR II ولكافة ميول المزلق، اما بالنسبة لنموذج M3 فكانت كفاءة تشتيت الطاقة اقل من M1,M2,USBR II واعلى من M4 ولكافة ميول المزلق، اما بالنسبة للنموذج USBR II فكان

	M3	5.130	-----	97.21%	98.29%
	M4	4.800	-----	95.42%	96.48%
	USBR II	5.700	-----	94.68%	95.73%
1:1.6	M1	8.369	-----	97.72%	98.80%
	M2	5.843	-----	95.00%	96.07%
	M3	5.180	-----	97.38%	98.47%
	M4	4.994	-----	98.30%	99.40%
	USBR II	5.848	-----	93.77%	94.82%
1:1.8	M1	7.660	-----	94.10%	95.15%
	M2	6.369	-----	96.79%	97.86%
	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 اقل نسبة اعماق متسلسلة حيث بلغت نسبة التخفيض % (10.22 , 54.3 , 25.4 , 14.96) لكل من M2,M3,M4,USBR II على التوالي ولافضل ميل مزلق 1:0.8، كانت هذه القيم المنخفضة للنموذج M4 متوقعة لحوض ثابت تؤثر فيه ملحقات تبديد الطاقة على عمق الجريان فوق وتحت الحرج، حيث كلما زادت عدد كتل المزلق قلت نسبة الاعماق المتسلسلة، ان النموذج M1 لا يحتوي على كتل المزلق ولهذا كانت نسبة الاعماق المتسلسلة اعلى ما يمكن، والنموذج M4 يحتوي على اربعة صفوف من كتل المزلق ولهذا كانت نسبة الاعماق المتسلسلة له اقل من بقية النماذج.

اما بالنسبة للنموذج USBR II فقد بلغت نسبة التخفيض الى (6.25, 14.96, 7.91, 19.13, 8.4, 9.95) ولميول المزلق (1:1.8, 1:1.6, 1:1.4, 1:1.2, 1:0.8) على التوالي.

2.3.5: كفاءة تشتيت طاقة القفزة الهيدروليكية:

تعطي كفاءة تشتيت طاقة القفزات الهيدروليكية (η) مقياساً لمقدار الطاقة المشتتة في القفزة الهيدروليكية بسبب عامل مؤثر. وبالتالي، فإنه يشكل سمة ذات أهمية قصوى فيما يتعلق بأغراض سلامة أحواض السدود الكبيرة. تم حساب هذه الكفاءة للنماذج العددية والفيزيائية كما موضح في معادلة (13) وعلى النحو التالي:

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

حيث H_{01} و H_{02} هما مقدار الطاقة المحددة في بداية القفزة الهيدروليكية ونهايتها على التوالي. نظراً 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).

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

		(cm)		
1:0.8	M1	86.00	93.21%	89.62%
	M2	78.38	97.78%	97.68%
	M3	76.59	97.74%	97.63%
	M4	76.03	97.95%	97.86%
	USBRII	82.08	95.01%	94.46%
1:1	M1	80.14	96.22%	89.52%
	M2	67.27	94.87%	94.28%
	M3	66.62	95.35%	94.88%
	M4	65.98	95.58%	95.15%
	USBRII	69.53	94.02%	93.20%
1:1.2	M1	73.85	93.66%	92.74%
	M2	71.74	95.83%	95.45%
	M3	69.29	96.14%	95.81%
	M4	69.04	96.19%	95.87%
	USBRII	70.59	96.11%	95.78%
1:1.4	M1	88.00	96.51%	80.76%
	M2	74.60	94.87%	94.28%
	M3	70.13	95.78%	95.39%
	M4	69.88	96.26%	95.95%
	USBRII	75.28	94.69%	94.06%
1:1.6	M1	90.52	95.10%	78.53%
	M2	78.00	94.55%	93.88%
	M3	70.50	95.70%	95.30%
	M4	68.85	96.16%	95.84%
	USBRII	78.83	94.51%	93.84%
1:1.8	M1	85.32	95.81%	89.35%
	M2	77.55	94.14%	93.36%
	M3	74.53	95.40%	94.93%
	M4	71.85	95.93%	95.57%
	USBRII	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 أوضح الجدول رقم 4 بان النموذج M4 أنتج أقل طول لمنطقة التدوير مقارنة مع النماذج الأخرى وبكافة ميول المزلق أما النموذج M3 أنتج طول للاسطوانة أعلى من M4 وأقل من بقية النماذج، أما بالنسبة للنموذج USBRII فكان مقدار طول مسافة التدوير مقارنة للنموذج M2 حيث كان مقدار الطول له أعلى من M2,M3,M4 وأقل من M1 وللميول 0.8,1,1.4,1.6,1.8 فقط أما في الميل 1.2 فكان طول منطقة التدوير USBRII أقل من M2,M1 وأعلى من M3,M4 أما بالنسبة للنموذج M1 فقط أعطى أكبر طول لمنطقة تدوير القفزة الهيدروليكية من بقية النماذج الأخرى ولكافة الميول.

مقدار تشتيت الطاقة مقارب للنموذج M2 حيث كان مقدار تشتيت الطاقة له أعلى من M2,M3,M4 وأقل من M1 وللميول 0.8,1,1.4,1.6,1.8 فقط أما في الميل 1.2 فكان تشتيت الطاقة ل USBRII أقل من M2,M1 وأعلى من، أما بالنسبة للنموذج M1 فقد كان مقدار تشتيت الطاقة أعلى من بقية النماذج الأخرى ولكافة الميول. حيث إن خصائص التصميم المحددة لحوض التهتة تعكس مقدار تحسين تشتيت الطاقة في القفزة الهيدروليكية. حيث تراوح رقم فروود في هذه النماذج من (3.9-7.78) أظهرت هذه النتائج أنه على الرغم من أن تأثير ملحقات تشتيت الطاقة قللت من كفاءة القفزة الهيدروليكية في تشتيت الطاقة لأن قبل وضح ملحقات تشتيت الطاقة كانت القفزة الهيدروليكية هي الوحيدة المسؤولة عن تشتيت الطاقة وبعد وضع كتل المزلق قامت هذه الكتل بتقليل مقدار تشتيت الطاقة على القفزة الهيدروليكية. إن قيم كفاءة القفزة الهيدروليكية في نموذج USBRII كانت مقاربة لما موجود عند الباحث [10]

3.3.5: طول مسافة تدوير القفزة الهيدروليكية :

وفقاً ل [8]، تحدد طول مسافة القفزة الهيدروليكية الحدود بين الجريان الخلفي والأمامي، بدءاً من قدم القفزة الهيدروليكية (Hydraulic jump toe) وتنتهي عند نقطة استقرار السطح. ومن ثم، فإن هذه المنطقة تضم أكبر تقلبات في السرعة والضغط، إلى جانب أكبر تشتيت للطاقة. لذلك، فإن التقدير الصحيح لطول تقلبات القفزة الهيدروليكية له أهمية قصوى عند تصميم منشآت تشتيت الطاقة. لم يكن في الإمكان تحديد طول منطقة تدوير القفزة الهيدروليكية مختبرياً لعدم توفر أجهزة قياس مناسبة، لذلك تم الاعتماد على نتائج البيانات العددية من برنامج flow-3d ومقارنتها بالمعادلات الرياضية المقترحة من البحوث السابقة. حيث قدم [8] دراسة مفصلة تتعلق بأطوال مسافة تدوير القفزات الهيدروليكية واقترح هؤلاء الباحثون التعبير التالي لحساب طول منطقة تدوير القفزة الهيدروليكية (معادلة رقم 15 و 16)

$$L_r = y_1 [-12 + 160 \tanh(Fr_1 / 20)] \text{ for } y_1 / b < 0.10 \quad 15$$

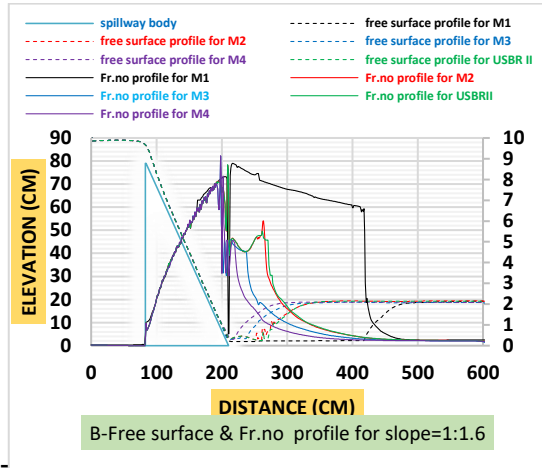
$$L_r = y_1 [-12 + 100 \tanh(Fr_1 / 12.5)] \text{ for } 0.10 < y_1 / b < 0.70 \quad 16$$

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

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

كانت القيم الناتجة عن طول مسافة تدوير القفزة الهيدروليكية ل 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].

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



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

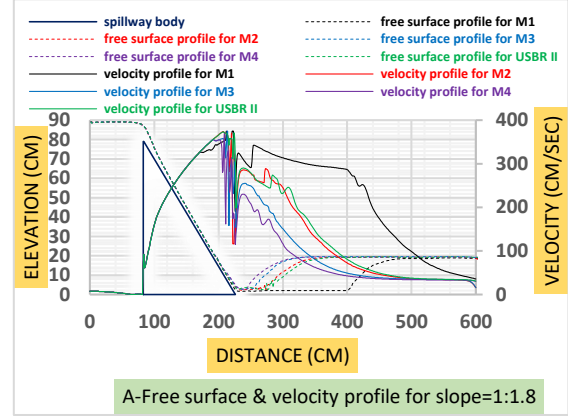
من الاشكال (5,6) وبقية النتائج غير المعروضة نلاحظ انه عند استخدام نموذج بدون ملحقات تبديد الطاقة ستكون المسافة التي يقطعها الجريان فوق الحرج هي اكبر في حالة عدم استخدامها في حوض التهدئة. الجدول التالي لتوضيح نسبة تقليل مسافة الجريان فوق الحرج لكافة الميول وللنماذج المختلفة وكما يلي:

الجدول رقم 5. نسبة تقليل مسافة الجريان فوق الحرج لكافة النماذج التي تحتوي على ملحقات تشتيت طاقة الجريان من النموذج الخالي من ملحقات مشتتات الطاقة. كذلك للنماذج الأخرى وبكافة ميول

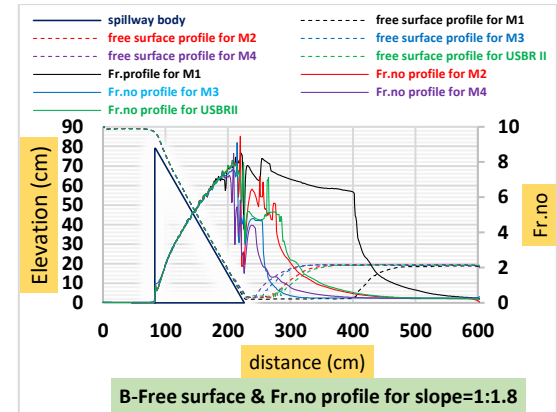
الميل V:H	النموذج	مسافة الجريان فوق الحرج من بداية حوض السكون	تخفيض النسبة المئوية لمسافة الجريان فوق الحرج
1:0.8	M1	234.80	0%
	M2	52.60	77.59%
	M3	42.90	81.72%
	M4	32.40	86.20%
	USBR II	62.60	73.33%
1:1	M1	248.00	0%
	M2	57.30	76.89%
	M3	42.20	82.98%
	M4	12.80	94.83%
	USBR II	62.90	74.63%
1:1.2	M1	257.00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

4.3.5: مخطط السرعة ورقم فرود:

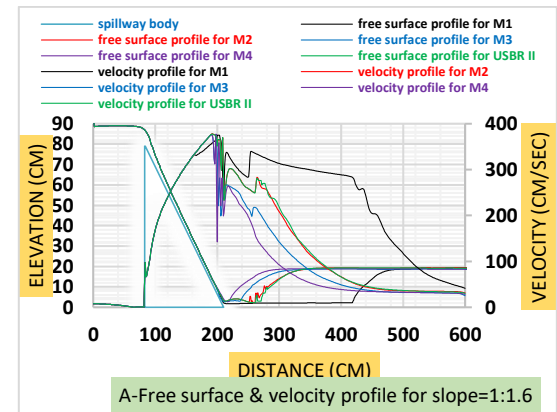
تم إجراء تحليل لانماط السرعة فوق الحرجة وتحت الحرجة التي تم الحصول عليها من النماذج العديدة وتم مقارنة توزيع السرعة وارقام فرود لكافة النماذج M1, M2, M3, M4, USBR II وبمبولهم المختلفة 1:0.8 ; 1:1.1 ; 1:1.2 ; 1:1.4 ; 1:1.6 ; 1:1.8 حيث يوضح الشكل (5) مخطط توزيع السرعة ورقم فروود للميل 1:1.8 والشكل (6) للميل 1:1.6 .



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



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



A-Free surface & velocity profile for slope=1:1.6

المصادر:

- [1] H. Babaali, N. Soori, S. Soori, A. Mojtahedi, & Hamed, 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 multi-block 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. <https://doi.org/10.3390/w12010227>
- [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%
1:1.6	M1	214.60	0%
	M2	64.60	69.89%
	M3	41.60	80.60%
	M4	14.60	93.19%
	USBR II	71.60	66.63%
1:1.8	M1	196.80	0%
	M2	65.80	66.50%
	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 والعديدية حيث استخدم نموذج USBR II ونماذج أخرى تحوي على كتل مزلق بأنماط مختلفة وبسعة ميول للمزلق. وضمن حدود هذه الدراسة تم استنتاج ما يلي:

- 1) قدم كل من النموذجين الفيزيائي والعددي والمعادلات الرياضية تمثيلاً جيداً في تقدير نسبة الاعماق المتسلسلة ومسافة منطقة تدوير القفزة الهيدروليكية من النتائج يتبين بأن النموذج الخالي من كتل المزلق أعطى أعلى قيم للاعماق المتسلسلة ومسافة التدوير من بقية النماذج. والنموذج الحاوي على 4 صفوف أعطى أقل قيم. بينما كانت قيم النموذج USBR II مقارنة للنموذج الحاوي على صفين من كتل المزلق وكفاءة ميول المزلق.
- 2) كذلك أظهرت النتائج المأخوذة من النمذجة الفيزيائية والعددية بأن كفاءة القفزة الهيدروليكية كانت بأعلى قيمة عند النموذج الحاوي على 4 صفوف من كتل المزلق وحيث كانت القيمة 61.9%، وأقل قيمة عند النموذج الخالي من كتل المزلق بنسبة 40.1% بينما النموذجين USBR II والنموذج الحاوي على صفين من كتل المزلق أعطى قيم متقاربة (44.2, 46.1) على التوالي.
- 3) فيما يخص مسافة تقليل الجريان فوق الحرج فقد أعطى النموذج M4 أعلى 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 (94.8-97.3%) ولمخطط السرعة (86.2-95.6%) ولمختلف النماذج وهذا التقارب يعتبر جيد للبيانات العددية.
- 4) أفضل نموذج لتشتيت طاقة جريان المسيل المائي هو النموذج الحاوي على 4 صفوف من كتل المزلق وكفاءة ميول المزلق، أما أفضل ميل للمزلق فكان 1:0.8 بالاعتماد على نسبة الاعماق المتسلسلة (Y2/Y1) وكفاءة القفزة، أما بالاعتماد على مسافة منطقة تدوير القفزة ونسبة تقليل مسافة الجريان فوق الحرج فقد كان الميل 1:1.0 فقد أعطى أعلى نسبة تقليل لمسافة الجريان فوق الحرج وأقل قيمة لطول منطقة التدوير.

- Outlet Obstacles at USBR II Stilling Basin". *International Journal of Science and 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 spillway, 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 implemented to represent a successfully models that compared with the theoretical model in a slope 1:1.2 for chute. Using the RNG & K- ϵ as a turbulent theoretical model and a non uniform distribution of the mesh led to successfully simulating the stream lines, velocities and shape of hydraulic jumps and Froude numbers. Using four rows of chute 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, physical model, Numerical model, CFD, FLOW-3D, USBR II