

دراسة مختبريه لخصائص الجريان فوق الهدار من نوع مفتاح البيانو

هناء عبد المجيد حياوي

أستاذ مساعد

قسم هندسة السدود والموارد المائية/كلية الهندسة/جامعة الموصل

بشرى محمد علي

طالبة ماجستير

الخلاصة

يهدف البحث إلى دراسة الخصائص الهيدروليكية للهدار من نوع مفتاح البيانو. حيث تم إجراء 135 تجربة على نماذج الهدارات من نوع مفتاح البيانو بتدلي من جهة المؤخرة وذلك بأخذ ثلاثة ميول لمفاتيح المقدم ($S_i = 0.7, 0.6, 0.46$) وثلاثة نسب مختلفة لعرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر ($W_i/W_o = 1, 1.61, 1.81$) وثلاث ارتفاعات للنموذج ($P = 30, 25, 20$) سم. أظهرت النتائج أن الميل (0.7) أعطى أقل قيمة لكفاءة الأداء وأعلى قيمة لمعامل التصريف يليه الميل (0.6) و (0.46) كما أعطت نسبة عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر (1.81) أعلى قيمة لكفاءة الأداء ومعامل التصريف. وتم إيجاد علاقة وضعية لحساب معامل التصريف وكفاءة الأداء بدلالة المتغيرات اللابعدية المؤثرة فيه.

الكلمات الدالة: الهدار من نوع مفتاح البيانو، معامل التصريف، كفاءة الأداء.

Laboratory Study of Flow Characteristics Over Piano Key Weir

Bushra M. Ali

Hana A. M. Hayawi

Dam & Water Resources Engineering College of engineering /University of Mosul

Abstract

The main objective of this investigation is to obtain performance efficiency and the coefficient of discharge for Piano Key weir with downstream overhang. One hundred thirty five experiments were conducted on models of Piano key weirs. Three slope of the inlet key ($S_i = 0.7, 0.6, 0.46$), three different ratios for the inlet key width to the out let key width ($W_i/W_o = 1, 1.61, 1.81$) and three heights ($p = 30, 25, 20$) cm for each weir were used. The results showed that the slope of the inlet key (0.7) gave a lower values of performance efficiency and a highest values of coefficient of discharge than (0.6, 0.46) keys while ratios of inlet key width to the out let key width ($W_i/W_o = 1.81$) gave a highest values of coefficient of discharge. An empirical relationship was found for estimate the coefficient of discharge and performance efficiency in relation to the non dimensionless variable.

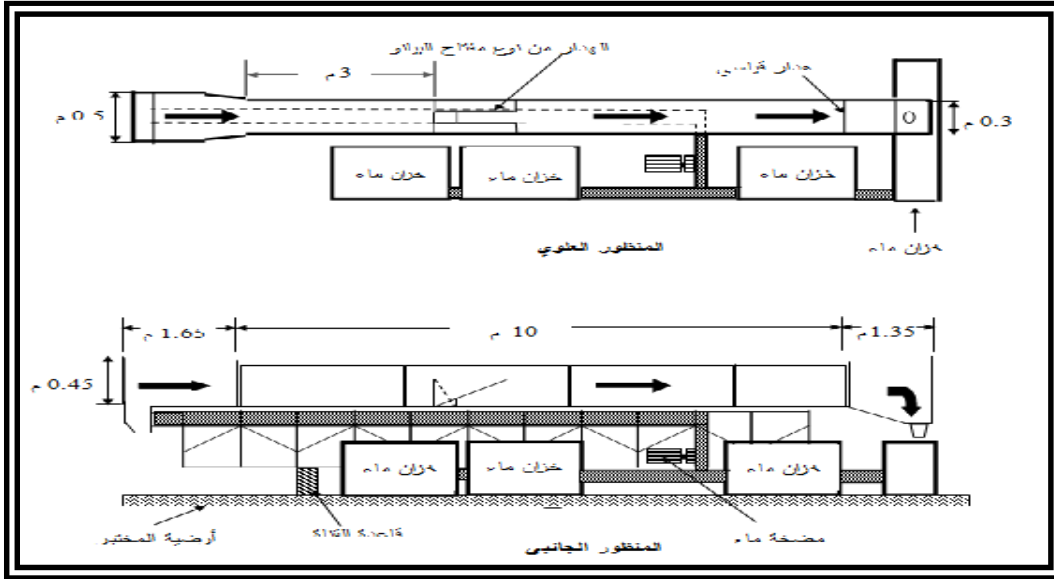
Key words: Piano Key Weir, discharge coefficient, performance efficiency.

المقدمة :

في حالة المجاري المائية ذات العرض المحدد فإن استخدام الهدار الخطي يؤدي إلى رفع منسوب المياه المقدم المجرى المائي وغمر الأراضي المجاورة وبالتالي التأثير على سكان المنطقة والحالة الاقتصادية، ويمكن تقليل منسوب ماء المقدم باستخدام هدار متعرج غير خطي (Labyrinth weir) حيث تكون حافته بشكل طيات متعرجة من المنظور العلوي ويمكن أن تكون بعدة أشكال كالمستطيلة وشبه المنحرفة والمثلثة والدائرية، كما تستخدم الهدارات المتعرجة في السدود غير أن استخدامها غير مجدي في حالة سدود الجاذبية (Gravity Dams) لان الهدارات المتعرجة تحتاج مساحة اكبر لتثبيت الجدران العمودية (الناتجة من التعرج في محور الحافة) على حافة السد الخرساني والتي تكون صغيرة نسبياً (Anderson, 2011)، لذا انشأ الهدار من نوع مفتاح البيانو خاصة في حالة سدود الجاذبية (Gravity Dams). إن الهدار من نوع مفتاح البيانو يشبه الهدار المتعرج ولكنه بحافة مستطيلة الشكل وبمبول لمفاتيح المقدم والمؤخر إن هذه المبول تنطبق على حافة السد والتي تكون اصغر من الطول الجانبي للهدار مما يسبب تدلي في مفتاح المقدم والمؤخر وهذا سبب تسميته بمفتاح البيانو حيث يزيد التصريف عند نفس الشحنة للهدار المتعرج Paxson, G., et al., (2011); Anderson, R.M. and Tullis 2011; Schleiss, 2011) درس الباحث اندرسون (Anderson, R.M., 2012) كفاءة التصريف للهدار من نوع مفتاح البيانو باستخدام المتغيرات الهندسية كنسبة عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر (W_i/W_o) استخدم خمسة قيم للنسبة (0.67, 0.8, 1, 1.25, 1.5) والتدلي للمقدم والمؤخر ورفع الحافة بجدار الحاجز (عبارة عن امتدادات عمودية على طول حافة الهدار). ووجد أن أفضل كفاءة للتصريف تكون بين-1.5 (1.25) لنسبة عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر W_i/W_o وأن التدلي لمفتاح المقدم والمؤخر يزيد من كفاءة التصريف. كما أجرى الباحث ليتي وآخرون (LeiteRibeiro, M., et al., 2011) دراسة لتقييم تأثير المعاملات الهندسية كالطول والعرض وارتفاع جسم السد والهدار على كفاءة التصريف للهدار من نوع مفتاح البيانو. وقد وجد تأثير كبير لارتفاع جسم السد على كفاءة التصريف، وان النسبة ($W_i/W_o > 1$) أكثر كفاءة، وان نسبة الطول إلى العرض (L/W) التأثير الأكبر. وأجرى الباحث ميشيل وآخرون (Machiels, O., et al., 2012) دراسة مختبرية لتحري تأثير الجدار الحاجز على كفاءة الهدار من نوع مفتاح البيانو. إن التأثير الرئيسي للجدار الحاجز هو زيادة الارتفاع الكلي للهدار حيث ينتج زيادة في تصريف الهدار نتيجة زيادة ارتفاع المدخل وتقليل السرعة مما يؤدي إلى زيادة التصريف من الحافة الجانبية. كما أجرى الباحث ليتيريبيرو وآخرون (LeiteRibeiro, M., et al., 2012) دراسة على السلوك الهيدروليكي للهدار من نوع مفتاح البيانو نوع A (التدلي من جهتي المقدم والمؤخر) بتغير عدد الدورات وبتثبيت نسبة عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر (W_i/W_o) ونسبة طول الحافة الكلي إلى عرض الهدار الكلي (L/W). استنتج انه لا يوجد تأثير لعدد الدورات على مفاتيح المقدم، لكنها يمكن أن تزيد كفاءة الهدار. ودرس الباحث ليتي ريبيريو وآخرون (LeiteRibeiro, M., et al., 2012) الكفاءة الهيدروليكية للهدارات من نوع مفتاح البيانو، ووجد إن الهدار من نوع مفتاح البيانو أكفاً في الشحنة القليلة وتقل كفاءته مع زيادة الشحنة. وأن نسبة الطول إلى العرض (L/W) مهمة حيث كلما ازدادت نسبة الطول إلى العرض (L/W) ازداد أداء الهدار ووجد أن كفاءة الهدار من نوع مفتاح البيانو تعتمد على آلية عمل مفتاح المؤخر. وأجرى الباحثان جافهيري وكابري (Javaheri, A., Kabiri, A.R., 2012) دراسة مختبرية لتأثير المعاملات الهندسية كطول وارتفاع وعرض مفتاح المقدم والمؤخر وتدلي المقدمة والمؤخرة والمبول للهدار من نوع مفتاح البيانو على نسبة الغمر لحافة الهدار، عرف نسبة الغمر (S_f) بأنها عمق الماء فوق حافة مؤخر الهدار (H_{dt}) إلى عمق الماء المقدم الهدار (H_o) ووجد انه عند زيادة نسبة العمق إلى الارتفاع (H_o/P) ونقصان نسبة الطول إلى الطول الجانبي (L/B) تقل نسبة الغمر ولا يوجد تأثير لتدلي المقدم على نسبة الغمر ولكن تدلي المؤخر يزيد من نسبة الغمر ويزيادة W_i/B تقل نسبة الغمر ويزيادة طول الهدار تزداد نسبة الغمر. يهدف هذا البحث إلى إيجاد كفاءة الأداء ومعامل التصريف للهدار من نوع مفتاح البيانو نوع (C) تدلي من جهة المؤخر فقط وإيجاد علاقة وضعية لحساب معامل التصريف وكفاءة الأداء بدلالة المتغيرات اللابعدية المؤثرة.

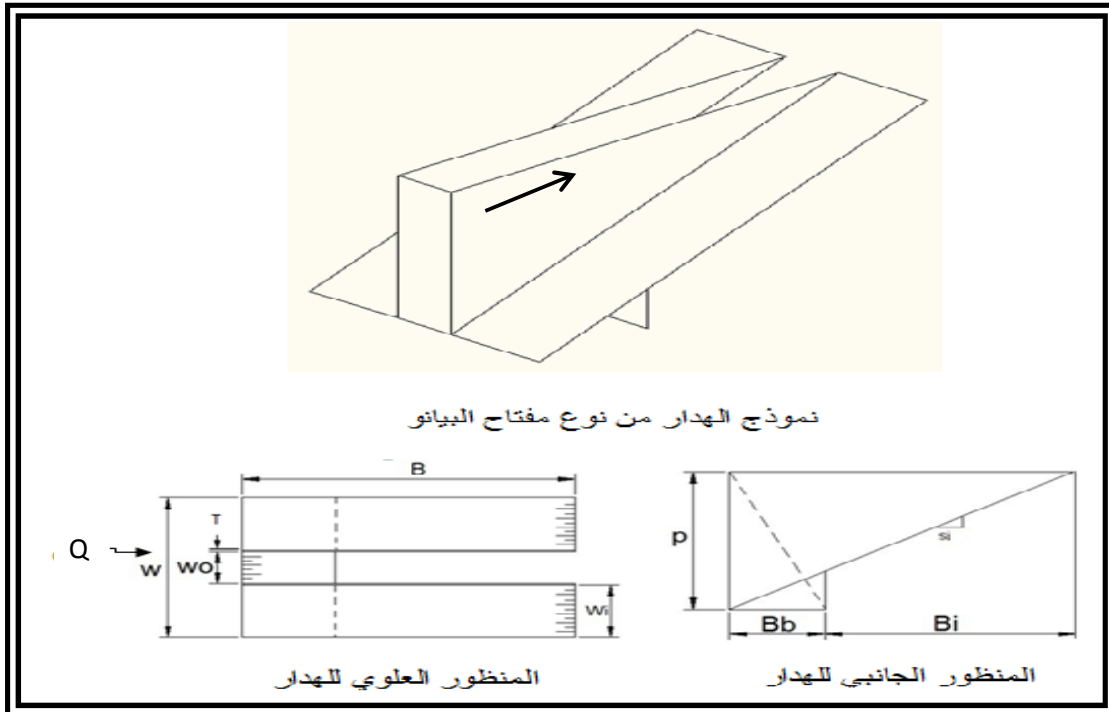
العمل المختبري :

أجريت التجارب في مختبر الهيدروليك التابع لكلية الهندسة قسم هندسة السدود والموارد المائية، باستخدام قناة مختبرية بطول 10 م وعرض 30 سم وارتفاع 45 سم كما في الشكل (1) الذي يوضح تفاصيل القناة المختبرية المستخدمة في التجارب.



الشكل (1) مخطط توضيحي للقناة المختبرية

تم اختبار 27 نموذج للهدار من نوع مفتاح البيانو المصنوعة من مادة الفايبر كلاس و بحافة حادة بسمك 2 ملم وبتدلي من جهة المؤخر فقط (نوع C) وفتحتين لمفتاح المقدم وفتحة واحدة لمفتاح المؤخر وبعرض 30 سم، الشكل (2) يوضح مخطط توضيحي لنموذج الهدار المستخدم في الدراسة والشكل رقم (3) يوضح أنواع الهدارات من نوع مفتاح البيانو نوع (A) تدلي من جهتي المقدم والمؤخر و (B) تدلي من جهة المقدم فقط و (C) تدلي من جهة المؤخر فقط و (D) بدون تدلي. تم تغيير ميل مفتاح المقدم بأخذ ثلاثة ميول ($S_i=0.7, 0.6, 0.46$) و ثلاثة نسب لعرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر (1، 1.61، 1.81) ($\frac{W_i}{W_o}$) وثلاث ارتفاعات للنموذج ($P = 20, 25, 30$) سم حيث تم صنع النماذج بارتفاع 30 سم ثم قطع كل نموذج مرتين بمقدار 5 سم للحصول على ارتفاع وطول متغير للهدار.



الشكل (2) مخطط توضيحي لنموذج الهدار من نوع مفتاح البيانو

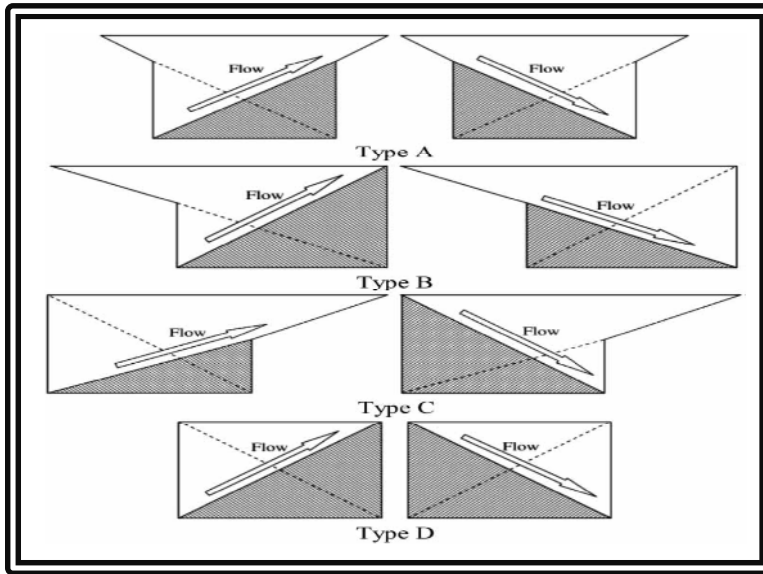
تم وضع النماذج على مسافة (3) م عن مقدم القناة للحصول على استقرار لمستوى الماء مقدم الجريان بعدها أجريت التجارب بتغيير التصريف خمسة مرات لكل نموذج، ويقاس التصريف المار فوق النمذج عن طريق هدار قياسي مستطيل الشكل بحافة حادة وبطول 30 سم و ارتفاع 10 سم وضع نهاية القناة وذلك بقياس عمق الماء باستخدام المقياس العمودي النقطي (Point) Gauge)مقدم الهدار، والذي يمكن رفعه للحصول على جريان حر والمصنع حسب المواصفات البريطانية (BSI,1965) وفق المعادلة (1) الموضوعه من قبل (العمرى، 2009)، ثم يقاس عمق الماء المقدم لنموذج (h).

$$Q = 0.58 h^{1.5} \quad \dots \dots \dots (1)$$

إذ أن:

$$Q = \text{التصريف المار فوق الهدار (م}^3/\text{ثا)}$$

$$h = \text{ارتفاع الماء فوق حافة الهدار القياسي (م)}$$



الشكل (3) انواع الهدارات

تحليل النتائج ومناقشتها:-

أن معامل التصريف للهدار من نوع مفتاح البيانو دالة للعديد من العوامل والتي يمكن وضعها بالصيغة الآتية :-

$$Cd = f(Q, H, L, P, W, W_i, W_o, B, B_i, S_i, g) \quad \dots \dots \dots (2)$$

إذ أن :-

$Q = \text{تصريف الهدار (L}^3\text{T}^{-1}\text{)}$	$Cd = \text{معامل التصريف}$
$L = \text{طول حافة الهدار (L)}$	$H = \text{عمق الماء فوق حافة الهدار (L)}$
$W_o = \text{عرض الهدار (عرض القناة المختبرية) (L)}$	$P = \text{ارتفاع الهدار (L)}$
$W = \text{عرض مفتاح المؤخر (L)}$	$W_i = \text{عرض مفتاح المقدم (L)}$
$B = \text{طول التذلي لمؤخر الهدار (L)}$	$B = \text{الطول الجانبي للهدار (L)}$
$g = \text{التعجيل الأرضي (L T}^{-2}\text{)}$	$S_i = \text{ميل مفتاح المقدم}$

وبإجراء عملية التحليل البعدي باستخدام نظرية بكنكهام (π -Theorem) يمكن استنتاج العلاقة الآتية :-

$$C_d = f \left(\frac{L}{W}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{B_i}{B}, \frac{L}{P}, \frac{H}{P}, \frac{Q}{\sqrt{gH^{5/2}}}, S_i \right) \dots \dots \dots (3)$$

حيث يمثل المقدار $\left(\frac{Q}{\sqrt{gH^{5/2}}} \right)$ رقم فرود (Fr) ويمكن صياغة العلاقة (2) بالشكل الآتي :-

$$C_d = f \left(\frac{L}{W}, \frac{W_i}{W_o}, \frac{B_i}{B}, \frac{L}{P}, \frac{H}{P}, Fr, S_i \right) \dots \dots \dots (4)$$

حسب معامل التصريف باستخدام العلاقة التالية :-

$$C_d = \frac{Q}{\frac{2}{3} \sqrt{2gL} H^{1.5}} \dots \dots \dots (5)$$

وحسبت كفاءة الأداء :-

$$Q_r = \frac{Q}{Q_n} \dots \dots \dots (6)$$

Q_n = التصريف الذي يمرره هدار خطي بطول حافة مساوي لعرض الهدار من نوع مفتاح البيانو عند شحنة الهدار من نوع مفتاح البيانو نفسها (H) (م³/ثا)

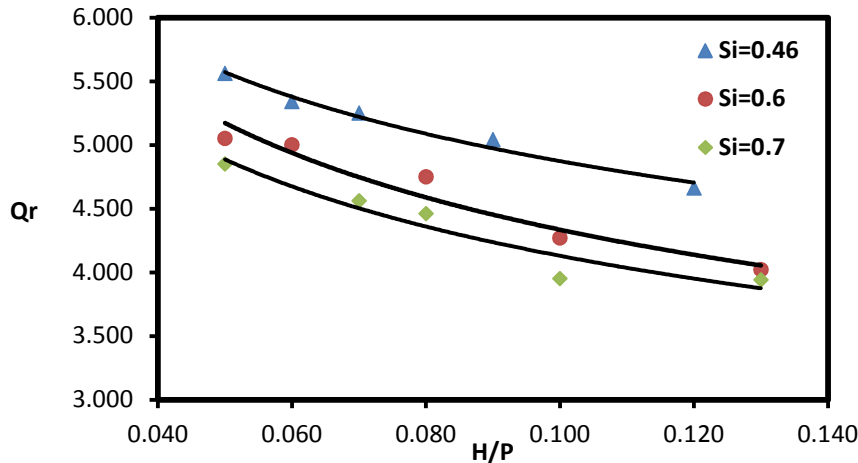
العوامل المؤثرة على كفاءة الأداء للهدار من نوع مفتاح البيانو

أن العوامل المؤثرة على كفاءة الأداء تشمل:-

1- تأثير ميل مفتاح المقدم (S_i) على كفاءة الأداء (Q_r)

رسمت العلاقة بين كفاءة الأداء (Q_r) ونسبة عمق الماء فوق الهدار إلى ارتفاعه (H/P) عند قيم مختلفة لميل مفتاح المقدم (S_i) والارتفاع نفسه (P) ونسبة عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر نفسها (W_i/W_o) لجميع تجارب البحث للهدارات المستخدمة والشكل (4) يوضح العلاقة بين كفاءة الأداء ونسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه للنموذج بارتفاع $P=30$ cm، $W_i/W_o=1.81$. ومن الشكل يمكن ملاحظة ما يأتي:-

- 1- كفاءة الأداء لجميع النماذج كانت اكبر من النماذج الاعتيادية وتزداد هذه الكفاءة بنقصان (S_i).
- 2- تقل كفاءة الأداء (Q_r) كلما ازدادت نسبة عمق الماء فوق حافة إلى ارتفاعه (H/P) لكافة النماذج والميول وذلك لأنه عند زيادة شحنة عمق الماء (H) تزداد السرعة ويزداد التصادم بين بفق الماء الخارج من الحافات الجانبية للهدار من نوع مفتاح البيانو مسببا غمر لمفتاح المؤخر كما أن عمق الماء فوق الحافة متذبذب وهذه العوامل تؤدي إلى تقليل التصريف الفعلي المار فوق النموذج والذي يقلل من كفاءة الأداء.

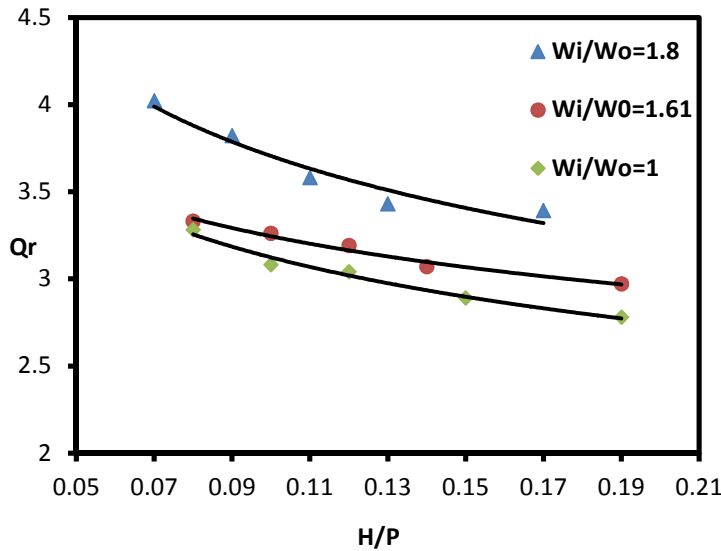


الشكل (4) العلاقة بين كفاءة الأداء ونسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه ($W_i/W_o=1.81$ سم، $P=30$)

من مقارنة النتائج لكافة النماذج التي أجراها (ألبياتي، 2014) يعطي الميل الأقل ($S_i=0.46$) أعلى قيمة لكفاءة الأداء حيث تراوحت قيم كفاءة الأداء بين (2.508–5.561) لكافة النماذج وذلك لأن هذا الميل يعطي أكبر طول لحافة الهدار فيسمح بتصريف أكبر يمر فوق حافة الهدار وذلك لأن التصريف يتناسب طردياً مع طول الحافة حيث كلما يزداد طول حافة النموذج يمرر تصريف أكبر عند نفس نسبة عمق الماء فوق حافة إلى ارتفاعه (H/P) يليه الميل ($S_i=0.6$) بقيم أقل لكفاءة الأداء تراوحت بين (2.377–5.054) لكافة النماذج و أعطى الميل ($S_i=0.7$) أقل قيم لكفاءة الأداء حيث تراوحت بين (2.102–4.854) لكافة النماذج ولأن الميل ($S_i=0.46$) يعطي أقل طول لحافة الهدار مما يجعل التصريف الذي يمرره أقل قيمة عند نفس ونسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه (H/P).

2- تأثير نسبة عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر (W_i/W_o) على كفاءة الأداء (Q_r)

رسمت العلاقة بين كفاءة الأداء (Q_r) ونسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه (H/P) لكافة تجارب البحث للهدارات و لنسب مختلفة لعرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر (W_i/W_o) مع تثبيت ميل مفاتيح المقدم (S_i) والارتفاع (P) والشكل (5) يوضح نموذج للعلاقة بين كفاءة الأداء ونسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه. يتضح من الشكل (5) أن نسبة عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر ($W_i/W_o=1.81$) تعطي أعلى قيمة لكفاءة الأداء تليها النسبة ($W_i/W_o=1.61$) والنسبة ($W_i/W_o=1$) والسبب انه بزيادة نسبة عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر (W_i/W_o) يزيد من عرض فتحة مفتاح المقدم مما يؤدي إلى زيادة حجم ومساحة الجريان عبر مفتاح المقدم وتقليل الضائعات مقدم الهدار وبالتالي يؤدي إلى تمرير تصريف أكثر فوق حافة الهدار.



الشكل (5) العلاقة بين كفاءة الأداء ونسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه ($L/W=3.77$, $S_i=0.6$, $P=25$)

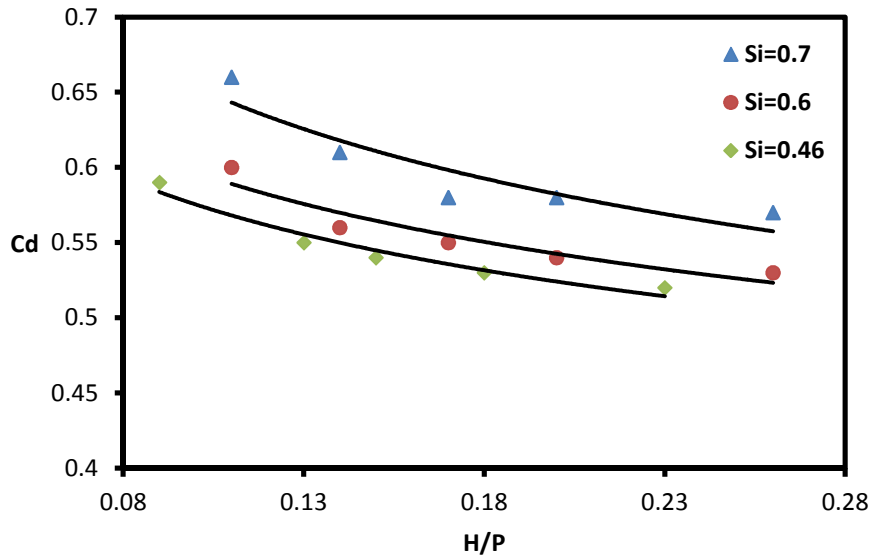
العوامل المؤثرة على معامل التصريف

درست العوامل المؤثرة على معامل التصريف وبيان تأثير كل منها وكما يأتي:-

1- تأثير ميل مفتاح المقدم (S_i) على معامل التصريف

رسمت العلاقة بين معامل التصريف (C_d) ونسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه (H/P) لجميع تجارب البحث للنماذج بميول مختلفة (S_i) عند ثبوت الارتفاع (P) وثبوت نسبة عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر (W_i/W_o) والشكل (6) يوضح نموذج للعلاقة بين معامل التصريف ونسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه. ومن الشكل (6) يمكن ملاحظة ما يأتي :-

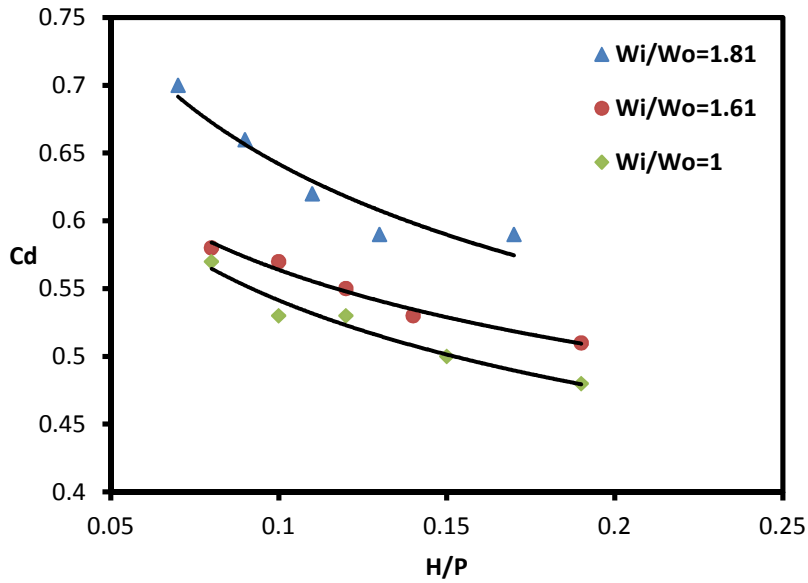
- يقل معامل التصريف كلما زادت نسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه (H/P) لكافة النماذج والميول وذلك لأنه عند زيادة التصريف تزداد شحنة عمق الماء (H) وتزداد السرعة ويزداد التصادم بين بثق الماء الخارج من الحافات الجانبية للهدار من نوع مفتاح البيانو مسببا غمر لمفتاح المؤخر كما يكون عمق الماء فوق حافة النموذج متذبذب مما يؤدي إلى تقليل معامل التصريف.
- من مقارنة النتائج لكافة النماذج التي أجراها (ألبياتي،2014) يعطي الميل (S_i=0.7) أعلى قيمة لمعامل التصريف إذ تراوحت قيم معامل التصريف بين (0.474–0.825) لكافة النماذج يليه الميل (S_i=0.6) حيث تراوحت قيم معامل التصريف بين (0.482–0.764) لكافة النماذج وثم الميل (S_i=0.46) إذ بلغت قيم معامل التصريف بين (0.426–0.69) لكافة النماذج، يعود السبب إلى أن الميل (S_i=0.7) يعطي أقل طول لحافة الهدار من نوع مفتاح البيانو وان معامل التصريف يتناسب تناسباً عكسياً مع طول حافة الهدار (Acker,1978; Chow,1959)، والميل (S_i=0.6) يعطي طول حافة أكبر لذا فان معامل التصريف يقل و أن الميل (S_i=0.46) يعطي طول أكبر لحافة الهدار لذا يقل معامل التصريف.



الشكل (6) العلاقة بين معامل التصريف ونسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه (P=20سم، W_i/W₀=1.81).

2- تأثير نسبة عرض مفتاح المقدم للهدار إلى عرض مفتاح المؤخر (W_i/W₀) على معامل التصريف

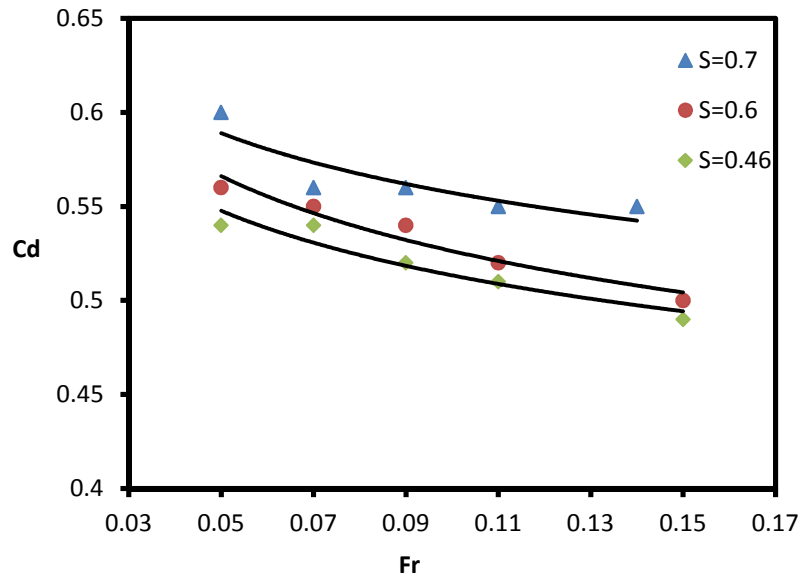
رسمت العلاقة بين معامل التصريف (Cd) ونسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه (H/P) لكافة تجارب البحث و لقيم مختلفة لنسبة عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر (W_i/W₀) مع تثبيت ميل مفاتيح المقدم (S_i) وارتفاع النموذج (P) والشكل (7) يوضح نموذج للعلاقة بين معامل التصريف ونسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه. يتضح من الشكل (7) أن نسبة عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر (W_i/W₀=1.81) تعطي أعلى قيمة لمعامل التصريف لنسبة ارتفاع الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه (H/P) نفسها، تليها النسبة (W_i/W₀=1.61) والنسبة (W_i/W₀=1) والسبب يعود إلى أن زيادة نسبة عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر (W_i/W₀) يعني زيادة عرض فتحة مفتاح المقدم مما يؤدي إلى زيادة مساحة الجريان عبر مفتاح المقدم ونقصان السرعة كذلك تقليل الضائعات بالشحنة عند بداية المقطع (Anderson,2011; LeiteRibeiro,et al., 2011; Kabiri,et al., 2012).



الشكل (7) علاقة بين معامل التصريف ونسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه ($S_i=0.6$, $L/W=3.77$, $P=25$)

العلاقة بين معامل التصريف ورقم فرود

رسمت العلاقة بين معامل التصريف (C_d) ورقم فرود (Fr) لكافة تجارب البحث ولقيم مختلفة لميل مفتاح المقدم (S_i) وبتثبيت عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر (W_i/W_o) و الارتفاع (P) والشكل (8) يوضح العلاقة بين رقم فرود ومعامل التصريف. يتضح من الشكل (8) أن معامل التصريف يقل كلما ازداد رقم فرود وذلك بسبب زيادة سرعة الجريان مع زيادة الشحنة. كما يزداد معامل التصريف عند زيادة ميل مفتاح المقدم للأسباب المذكورة سابقاً نفسها.



الشكل (8) العلاقة بين معامل التصريف و رقم فرود للنموذج ($W_i/W_o=1.61$, $P=20$)

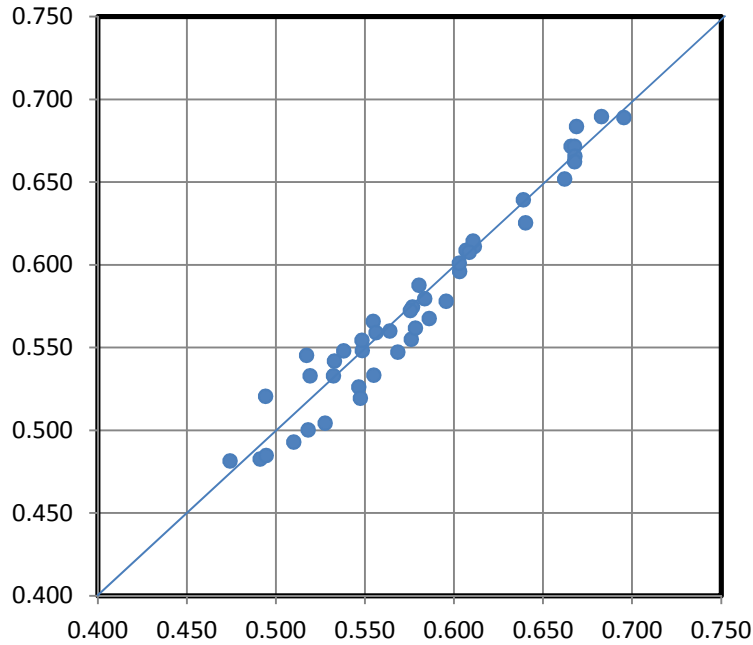
استنباط علاقة وضعية لحساب معامل التصريف وكفاءة الأداء:

من معرفة العوامل المؤثرة على معامل التصريف وكفاءة الأداء للهدار من نوع مفتاح البيانو والتي تم التوصل إليها عن طريق عملية التحليل البعدي وباستخدام البرنامج الإحصائي (SPSS 11.5) تم الحصول على العلاقة التالية لحساب معامل التصريف وبمعامل تحديد ($R^2=0.982$):

$$Cd = \frac{0.014 (Si)^{3.76} \left(\frac{L}{P}\right)^{3.86} \left(\frac{Bi}{B}\right)^{0.72} (Fr)^{0.9}}{\left(\frac{L}{W}\right)^{0.08} \left(\frac{wi}{wo}\right)^{0.02} \left(\frac{H}{P}\right)^{1.23}} \dots \dots \dots (7)$$

وللتأكد من دقة المعادلة (7) أجريت مقارنة بين القيم المحسوبة من المعادلة والقيم المقاسة في المختبر كما في الشكل (9). وقد تم حساب نسبة الخطأ بين القراءات المحسوبة من المعادلة (7) والقراءات المقاسة ولم تتجاوز ($\pm 6\%$) من العلاقة الآتية:-

$$\% \text{ Error} = \left| \frac{Cd_{\text{meas.}} - Cd_{\text{cal.}}}{Cd_{\text{meas.}}} \right| * 100 \dots \dots \dots (8)$$

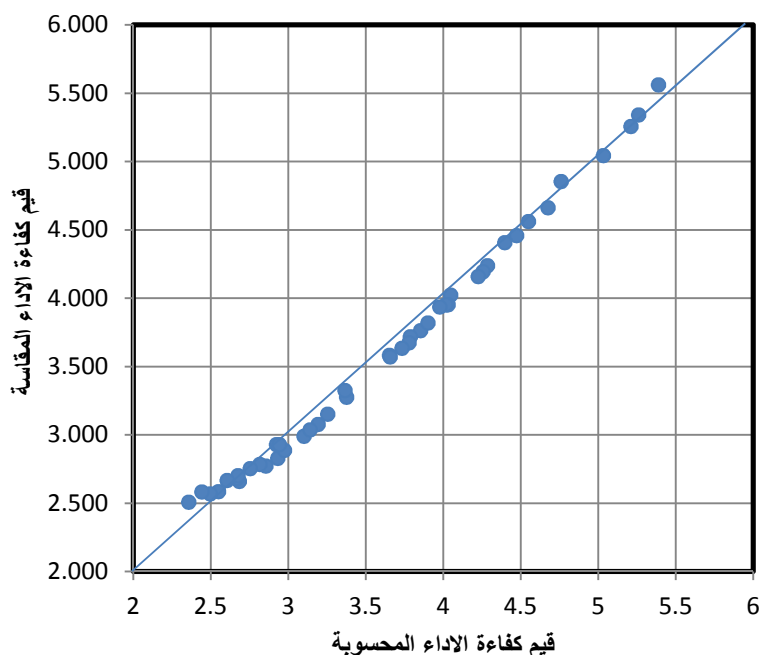


الشكل (9) العلاقة بين قيم معامل التصريف المقاسة والمحسوبة

كما تم إيجاد علاقة لحساب كفاءة الأداء وبمعامل تحديد ($R^2=0.989$):

$$Qr = \frac{4.262 \left(\frac{L}{W}\right)^{0.002} (Fr)^{0.9}}{(Si)^{0.36} \left(\frac{L}{P}\right)^{0.44} \left(\frac{wi}{wo}\right)^{0.02} \left(\frac{Bi}{B}\right)^{0.017} \left(\frac{H}{P}\right)^{1.23}} \dots \dots \dots (9)$$

وتم رسم العلاقة بين قيم كفاءة الأداء المقاسة والمحسوبة من المعادلة (9) كما في الشكل (10).



الشكل (10) المقارنة بين قيم كفاءة الأداء المقاسة والمحسوبة

الاستنتاجات :-

من خلال النتائج يمكن التوصل إلى الاستنتاجات التالية:

- 1- تقل كفاءة الأداء و معامل التصريف بزيادة نسبة عمق الماء فوق حافة الهدار إلى ارتفاعه (H/P).
- 2- تزداد كفاءة الأداء (Qr) كلما قل ميل مفتاح المقدم حيث حقق الميل (0.46) أعلى قيمة لكفاءة الأداء ويزداد معامل التصريف كلما زاد ميل مفتاح المقدم حيث حقق الميل (0.7) أعلى قيمة لمعامل التصريف (Cd).
- 3- تزداد كفاءة الأداء ومعامل التصريف كلما ازدادت نسبة عرض مفتاح المقدم إلى عرض مفتاح المؤخر (Wi/Wo).
- 4- يقل معامل التصريف بزيادة رقم فرود ضمن حدود الجريان تحت الحرج.
- 5- يستخدم هذا النوع من الهدار لإعادة تأهيل السدود القديمة لأنه يمرر تصارييف عالية ويشغل مساحة قليلة مقارنة بالسدود طويلة الحافة

المصادر :-

المصادر العربية :-

- 1- ألبياتي، بشرى محمد علي، (2014)، "دراسة مختبريه لخصائص الجريان فوق الهدار مفتاح البيانو"، رسالة ماجستير، قسم هندسة السدود والموارد المائية-كلية الهندسة، جامعة الموصل.
 - 2- العمري، نشوان، (2009)، " تأثير زاوية التفرع وانحدار قعر القناة الفرعية على الجريان - دراسة مختبرية "، رسالة ماجستير، قسم هندسة الموارد المائية - كلية الهندسة، جامعة الموصل.
- المصادر الأجنبية :-

1. Acker, P., white, W., parkins, J. and Harrison, A., (1978), "Weirs and Flume for Measurement ", First edition, John Wiley and Sons Co., Chicheester, England, U.K.
2. Anderson, R.M. and Tullis, B.P. (2011), "Piano Key Weir Hydraulics", 21st Century Dam Design – Advances and Adaptations, 31st California, April 11-15.
3. Anderson, R.M., (2011), "Piano Key Weir Head Discharge Relationships", MSc. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Utah State University, Utah.

4. British Standard Institution (BSI),1965," Method of Measurement of Liquid Flow in Open Channel", Part 4A, BSI, 3680, London, England, U.K.
5. Chow , V. T., (1959), " Open Channel Hydraulics", McGraw - Hill book Co., New York.
6. Javaheri, A. and Kabiri-Samani , A. R., (2012), "Threshold Submergence of Flow Over PK Weirs", International Journal of Civil and Geological Engineering, vol. 17, No. 5, pp. 88-93.
7. Kabiri-Samani, A. and Javaheri, A.,(2012)," Discharge Coefficient for Free and Submerged Flow Over Piano Key Weirs",J.Hydraulic Res.50(1), 114–120.
8. LeiteRibeiro, M., Bieri ,M., Boillat, J.-L.; Schleiss, A. J., Singhal, G. and Sharma, N.,(2012)," Discharge Capacity of Piano Key Weirs." , Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 138, No. 2, pp 199 – 203.
9. Leite Ribeiro, M., Boillat, J.-L., Schleiss, A.J, (2011), "Experimental Parametric Study for Hydraulic Design of PKWs.", Proc. Int. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B, 183-190,CRC Press, Boca Raton, FL.
10. LeiteRibeiro, M., Pfister, M., Boillat, J.-L., Schleiss, A.J.,(2012) , "Hydraulic Design of A-Types Piano Key Weirs.", Journal of Hydraulic Research, Vol. 50, No.4, pp 400-408.
11. Machiels, O., Erpicum, S., Archambeau, P., Dewals, B.J., and Piroton, M., (2012), "Parapet Wall Effect on Piano Key Weir Efficiency.", Journal of Irrigation and Drainage Engineering , ASCE, doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000566.
12. Negm, A., Al-Brahim, A., and Al- Hamid, A., (2002), " Combined-free Flow Over Weirs and Belowgates.", Journal of Hydraulic Research, ASCE, Vol.40, No.3, pp 359-365.
13. Paxson, G., Tullis, B. and Campbell, D., (2012),"Potential Application of Piano Key Weirs at Dams in the United States.", Proceedings USSD Conference, Denver, Colorado.
14. Rao, S. and Shulka, M., 1971," Characteristics of Flow Over Weirs of Finite Crest Width.", Journal of Hydraulic Division, ASCE, vol.97, No. HY11,pp(1807 – 1816).
15. Schleiss, A.J., (2011), "From Labyrinth to Piano Key Weirs: A Historical Review.", Proc. Int. Conf. Labyrinth and Piano Key Weirs Liège B, 3–15, CRC Press, Boca Raton, FL.