

التحقيقات العددية والتجريبية من معامل التصريف للهدارات رقيقة الحافة.

طارق اديب الغزوي* د.م. قتيبة السعدي**

(الإيداع: 3 شباط 2020 ، القبول: 7 حزيران 2020)

الملخص:

تعد الهدارات من أكثر الأجهزة المستخدمة في قياس الغزارة المارة في الأفنية المكشوفة وتنظيم الجريان فيها، وهناك العديد من الدراسات التي تهتم بمعرفة طبيعة الجريان عبر الهدارات والحصول على معادلة خاصة لمعامل التصريف (Cd) الذي يحدد قيمة التصريف الحقيقي. جرى تدعيم التجارب المخبرية ببرنامج متخصص في محاكاة الجريانات بمختلف أنواعها، حيث استُخدم برنامج (FLOW-3D) والذي يعد من عائلة برامج ميكانيك الموائع الحسابية (CFD) computational fluid dynamics. جرت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع علاقات مختلفة ونتائج برنامج (Flow-3D) وكانت الأخطاء أقل من الخطأ النسبي الأعظمي، حيث تراوح الخطأ بينها وبين النتائج المخبرية: للهدار المستطيل ($\pm 2.00-5.05\%$) و الخطأ النسبي الأعظمي 8.25% ، الهدار المثلي بزواوية 90 درجة ($\pm 1.21-3.77\%$) و الخطأ النسبي الأعظمي 6.81% ، والمثلي بزواوية 30 درجة ($\pm 0.95-2.99\%$) و الخطأ النسبي الأعظمي 3.00% . كانت نتائج النمذجة العددية جيدة ولم تتجاوز الخطأ النسبي الأعظمي، حيث من الممكن استخدام النمذجة العددية للتنبؤ بطبيعة عمل النماذج قبل بنائها وخاصة المعقدة منها وتجربة عدة حلول والحكم على النتائج بأقل تكلفة ممكنة. أخيراً تم اقتراح علاقات لمعامل التصريف للأنواع الثلاثة بناء على التجارب المخبرية.

الكلمات المفتاحية: الهدار رقيق الحافة، ميكانيك الموائع الحسابية (CFD)، الخطأ النسبي الأعظمي، الخطأ المتوسط التريبيعي ، معامل التصريف (Cd)، التحليل البعدي.

* طالب ماجستير - قسم الهندسة المائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق.

** مدرس - قسم الهندسة المائية - كلية الهندسة المدنية - جامعة دمشق.

Numerical and Experimental Investigations of Discharge Coefficient of Sharp Crested Weirs

Dr. Kutaiba Saadi(**)

Tarek AL-Ghazawi(*)

(Received: 3 February 2020, Accepted: 7 June 2020)

Abstract:

Weirs are one of the most used devices to measure and regulate flows in open channels. There are many studies concerned of knowing the nature of flow through the weirs and obtaining an equation for the discharge coefficient (Cd) that gives the value of the real discharge.

Laboratory experiments were supported by a specialises program in simulating flows of all kinds. FLOW-3D is also used ,the results obtained were compared with different formulas and results of the (Flow-3D) program and the errors were less than the maximum relative error, where the error ranged on following: Rectangle Weir ($\pm 2.00-5.05\%$) and maximum relative error 8.25%, the Triangular Weir angle 90 degrees ($\pm 1.21-3.77\%$), maximum relative error 6.81%, Triangular Weir angle 30 degrees ($\pm 0.95-2.99\%$), and maximum relative error 3.00%.

The results of numerical modeling were consistence good and did not exceed the maximum relative error. this make it possible to use numerical modeling to predict the nature of the work of models before building them, especially complex ones, try several solutions and judge the results at the lowest possible cost. Finally, formulas for the discharge coefficient of the three types of weirs were suggested based on laboratory experiments.

Keywords: sharp crested weirs, Computational Fluid Dynamics (CFD), Maximum Relative Error, Root Mean Square Error (RMSE), Discharge Coefficient (Cd), Dimensional Analysis.

*Postgraduate Student–Damascus University, Faculty of Civil Engineering, Water Department.

**Teacher –Damascus University, Faculty of Civil Engineering, Water Department.

1- مقدمة:

تُعرّف الهدارات بأنها أجهزة تستعمل لقياس الغزارة المارة في الأقبية المكشوفة، ومن أجل صرف المياه الزائدة عند تجاوزها حداً معيناً. وتُستخدم كثيراً في مشاريع شبكات المياه والصرف والسدود ومحطات الضخ وفي مختلف المشاريع المائية [2]. حظي هذا الموضوع باهتمام الكثير من الباحثين على مدى سنوات عديدة، ولا زال الاهتمام بهذا الجزء مستمراً ليومنا هذا. والهدف المشترك لكل الباحثين هو التحقق من سلوك الجريان عبر الهدار، وحساب قيم معامل التصريف الذي يمكن من حساب قيم الغزارة الفعلية المارة عبر الهدار [11].

1-1- أنواع الهدارات:

يوجد أنواع كثيرة للهدارات نذكر الشائعة منها [12]:

- الهدارات رقيقة الحافة.
- الهدارات عريضة العتبة.
- الهدار ذو المقطع العملي.
- الهدارات البئرية.

1-2- أهداف البحث:

تتلخص أهداف البحث بالآتي:

- مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها تجريبياً، مع العلاقات المعروفة لحساب معامل التصريف.
- مقارنة النتائج مع نموذج عددي (كبرنامج Flow-3D)، وتقييم آفاق استخدام النمذجة العددية.
- استنتاج علاقات معامل التصريف للهدارات المدروسة.

2- مواد وطرق البحث:

1-2- الدراسة المخبرية:

تمت الدراسة تجريبياً باستخدام جهاز قياس تصريف الهدارات، الذي يحوي على مكان مخصص لوضع أشكال مختلفة من الهدارات رقيقة الحافة، والذي يعمل مع طاولة التجارب (Hydraulic Bench)، كما يبين الشكل (1).



الشكل رقم (1): جهاز الهدارات المستخدم في التجارب المخبرية.

1-2-1- طاولة التجارب:

طاولة التجارب عبارة عن جهاز مساعد يستخدم عند إجراء العديد من تجارب مخبر الهيدروليك، التي تحتاج إلى غزارة ثابتة أثناء التجربة، تُغذى بها الأجهزة التي توضع على الطاولة، وكذلك توفر الطاولة إمكانية قياس الغزارة المارة عبر الجهاز المستخدم في التجربة بالطريقة الوزنية، كما يوضح الشكل (2).



الشكل رقم (2): طاولة التجارب التي يعمل معها جهاز الهدارات لتأمين الغزارة.

$$Q = \frac{3*W}{t*1000} \dots\dots\dots(1) \quad \text{علاقة التصريف الخاصة بالجهاز:}$$

W : الوزن المستخدم عند حساب قيمة التصريف (kg)، t : زمن القياس (Second)، Q : التصريف المحسوب ($\frac{m^3}{s}$).
2-2- النمذجة العددية:

أصبحت برامج النمذجة العددية في جميع التخصصات مهمة جداً للتنبؤ بأداء النموذج عند تشغيله. وحظيت فروع الهندسة المائية باهتمام كبير في الآونة الأخيرة، حيث انتشرت برامج متخصصة في نمذجة المنشآت المائية بأشكالها كافة ومراقبة عمل النموذج تحت تأثير الظروف المختلفة، ومن هذه البرامج (Flow-3D) [10].

ويعد برنامج (Flow-3D) من مجموعة برامج (Computational Fluid Dynamics) اختصاراً "CFD". تم تطوير التقنيات العددية بشكل خاص لتوظيفها لحل المعادلات التي تمثل حركة السوائل، في نظام إحداثيات ثلاثي أبعاد، وإعطاء حلول متعددة بمقاييس وشروط مختلفة لمشكلات جريان السوائل بوجود مجموعة من الظروف الفيزيائية والعددية، حيث يتم تطبيق برنامج (Flow-3D) باستخدام مجموعة من السوائل وظواهر نقل الحرارة [11].

يقوم البرنامج بالحل العددي لمعادلات نايفيه-ستوكس Navier-Stokes Equations وهي معادلات غير خطية تصف حركة المواد المائعة اللزجة، مثل السوائل والغازات، بالإضافة إلى استخدام معادلة الاستمرارية [6].

$$\dots\dots\dots(2) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + (\rho V_i)_{,i} = 0$$

$$\dots\dots\dots(3) \quad \rho \frac{\partial v_j}{\partial t} + \rho V_{j,i} V_i + P_{,j} - \tau_{ij,i} - \rho F_j = 0$$

$$\dots\dots\dots(4) \quad \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \varepsilon_{,i} V_i + P V_{i,i} - \tau_{ij} V_{j,i} + q_{i,i} - \rho r = 0$$

حيث:

ρ : كافة السائل في كل خلية (kg/m^3).

V_i : السرعة في كل خلية (m/s).

ε_i : الطاقة الداخلية في كل خلية (K).

F_j : مجموعة القوى المؤثرة في السائل بكل خلية (N).

$P_{,j}$: الضغط في كل خلية (pa).

τ_{ij} : إجهادات اللزوجة المؤثرة في كل خلية (N/m^2).

$q_{i,i}$: تدفق الحرارة (في حال وجود مصدر حراري) (m^3/s).

r : قيمة الإمداد الحراري لكل خلية (في حال وجود مصدر حراري) (K).

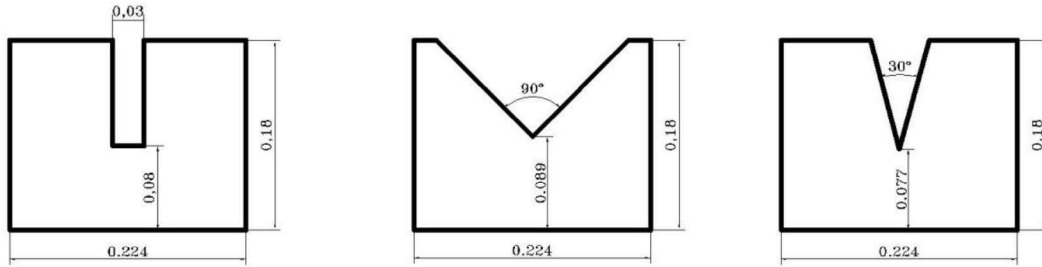
الحل العددي لهذه المعادلات قائم على تقريب المصطلحات المختلفة مع التعبيرات الجبرية. بعد ذلك يتم حل المعادلات الناتجة وإعطاء حل تقريبي للمشكلة المدروسة. تدعى هذه العملية بـ "المحاكاة" [6].

استُخدمت النمذجة العددية ضمن بيئة برنامج (Flow-3D V11.2) من خلال إدخال النتائج المخبرية التي تم الحصول عليها إلى البرنامج ومقارنة النتائج بينهما. في المخبر يمكن قياس كل من غزارة وضغط الهدار، حيث يُدخل الضاغظ الذي تم الحصول عليه ويُقارن الغزارة الناتجة مع الغزارة المقيسة في المخبر [11].

2-2-1-1- بناء النموذج:

2-2-1-2- رسم النماذج:

تم رسم النماذج باستخدام برنامج (Autodesk AutoCAD V2019)، ومن ثم تصدير النماذج إلى برنامج (Flow-3D) بعد تحويلها إلى صيغة STL. يوضح الشكل (3) أبعاد الهدارات (بالمتر) المستخدمة في الدراسة.



الشكل رقم (3) أبعاد الهدارات المستخدمة في التجارب المخبرية.

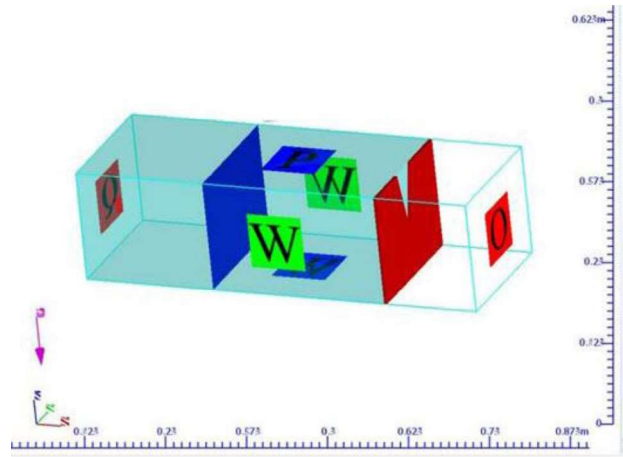
2-2-1-2-2- بناء الشبكة:

الشبكة التي يشكها البرنامج تمثل الفضاء المادي المدروس، ويتم تمثيل كل متغير من المتغيرات في السائل المدروس في الشبكة من خلال مجموعة من القيم في نقاط مختلفة. وبما أن المتغيرات الفيزيائية تتغير بشكل مستمر في الفضاء المدروس، فالشبكة مع التباعد بين العقد يوفر تمثيل أفضل للواقع.

2-2-1-3- الشروط الحدية:

يمكن تشغيل برنامج (Flow-3D) بعدة أنماط مختلفة وذلك بحسب الشروط الحدية والمعادلات التي تمثلها، والشروط الحدية المستخدمة في إعداد نموذج الدراسة [11] هي:

1. Wall: يستخدم للأجزاء التي تشكل حاجز أو جدار لا يجري السائل من خلالها، ويرمز له البرنامج بـ "W".
2. Specified Pressure: شرط الضاغظ الثابت، ويرمز له البرنامج بـ "P". استخدم هذا الشرط للأجزاء من النموذج التي يكون لها ضاغظ ثابت.
3. Volume Flow Rate: معدل الجريان، ويرمز له البرنامج بـ "Q". للدلالة على المصدر المائي أو الحوز العلوي (Up Stream).
4. Outflow: التدفق الخارج، ويرمز له في البرنامج بـ "O". للدلالة على مكان الخروج أو الحوز الخلفي للمنشأة (Down Stream)، ويبين الشكل (4) الشروط الحدية لنموذج الدراسة.



الشكل رقم (4): الشروط الحدية للنموذج المدروس (المثلثي كمثال).

2-3- حساب الأخطاء:

لا بد من حساب الخطأ النسبي الأعظمي لقياسات التجارب التي تتم في المخبر، من أجل تقييم مدى دقة النتائج والعلاقات المستنتجة المرتبطة بها [1].

2-3-1- حساب الخطأ النسبي الأعظمي للتصريف:

العلاقة الخاصة بالهدار المثلثي:

$$Q = \frac{8}{15} * C_d * \sqrt{2g} * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) * h^{\frac{5}{2}} \quad (5)$$

نوجد المشتقات الجزئية:

$$\left|\frac{\partial Q}{\partial h}\right| = \frac{4}{3} C_d \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}} \quad \text{و} \quad (6) \left|\frac{\partial Q}{\partial C_d}\right| = \frac{8}{15} \sqrt{2g} h^{\frac{5}{2}}$$

العلاقة الخاصة بالهدار المستطيل:

$$Q = \frac{2}{3} * C_d * b * \sqrt{2g} * h^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

نوجد المشتقات الجزئية:

$$\left|\frac{\partial Q}{\partial h}\right| = C_d b \sqrt{2g} h^{\frac{1}{2}} \quad \text{و} \quad (8) \left|\frac{\partial Q}{\partial C_d}\right| = \frac{2}{3} b \sqrt{2g} h^{\frac{3}{2}}$$

بالتالي الخطأ المرتكب في حساب التصريف [1].

$$(9) \Delta Q = \left|\frac{\partial Q}{\partial C_d}\right| \cdot \Delta C_d + \left|\frac{\partial Q}{\partial h}\right| \cdot \Delta h$$

حيث: $\Delta C_d = 1\% * cd$ و $\Delta h = \pm 0.0004m$ [1].

2-3-2- الخطأ النسبي الأعظمي في حساب معامل التصريف:

من علاقة التصريف (5) نوجد معامل التصريف للهدار المثلثي:

$$C_d = \frac{15Q}{8\sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{\frac{5}{2}}} \quad (10)$$

نوجد المشتقات الجزئية:

$$\left|\frac{\partial C_d}{\partial h}\right| = \frac{75Q}{16\sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{\frac{7}{2}}} \quad \text{و} \quad (11) \left|\frac{\partial C_d}{\partial Q}\right| = \frac{15}{8\sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{\frac{5}{2}}}$$

من علاقة التصريف (7) نوجد معامل التصريف للهدار المستطيل:

$$C_d = \frac{3Q}{2b\sqrt{2g}h^{\frac{3}{2}}} \quad (12)$$

نوجد المشتقات الجزئية:

$$\left| \frac{\partial C_d}{\partial h} \right| = \frac{2.25Q}{b\sqrt{2g}h^{\frac{5}{2}}} \quad \text{و} \quad \left| \frac{\partial C_d}{\partial Q} \right| = \frac{3}{2b\sqrt{2g}h^{\frac{3}{2}}} \quad (13)$$

بالتالي الخطأ المرتكب في حساب معامل التصريف [1].

$$\Delta C_d = \left| \frac{\partial C_d}{\partial Q} \right| \cdot \Delta Q + \left| \frac{\partial C_d}{\partial h} \right| \cdot \Delta h \quad (14)$$

3-3-2- حساب الخطأ المتوسط التربيعي بين القياسات المخبرية وعلاقات أخرى:

لا بد من حساب الخطأ بين النتائج التي تم الحصول عليها وبين نتائج النمذجة العددية والدراسات المتعلقة بهذا الموضوع، و يتم حساب الخطأ بين القيم باستخدام العلاقة الآتية:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(C_d)_{observed,i} - (C_d)_{predicted,i}]^2} \quad (15)$$

حيث: $(C_d)_{observed,i}$: معامل التصريف المقاس مخبرياً، $(C_d)_{predicted,i}$: معامل التصريف المحسوب من العلاقات. 3-3-2- التحليل البعدي:

عمل التحليل البعدي مهم جداً من أجل إهمال العوامل غير المؤثرة في معامل التصريف: تتعلق علاقة التصريف بالعديد من العوامل [5]:

$$Q = f_1(h, b, P, \rho, \mu, \sigma, g) \quad (16)$$

إن علاقة معامل التصريف بناءً على التحليل البعدي [5] هي:

$$C_d = f_2\left(R_e, W_e, \frac{h}{P}, \frac{h}{b}\right) \quad (17)$$

يعتمد الجريان فوق الهضبات بشكل أساسي على قوة القفالة، وتهمل في أغلب الدراسات للزوج الممثلة بعدد رينولدز (R_e) والتوتر السطحي الممثل هنا بعدد فيبر (W_e). [7]

تم التحقق مخبرياً من نوع الجريان من خلال حساب عدد رينولدز المعطى بالعلاقة: $R_e = \frac{\rho \cdot V \cdot R_h}{\mu} = \frac{V \cdot R_h}{\nu}$

حيث: R_h : نصف القطر الهيدروليكي يعطى بالعلاقة: $R_h = \frac{A}{P}$ ، A : مساحة مقطع الجريان (m^2)، P : المحيط المبلل (m). $R_e < 500$ جريان صفحي: في هذه الحالة يتم إدخال عدد رينولدز في علاقة معامل التصريف [7].

$R_e > 1000$ جريان مضطرب: في هذه الحالة لا يتم إدخال عدد رينولدز في علاقة معامل التصريف [7].

4-2- تحليل ودراسة الجريان فوق الهضبات رقيقة الحافة:

2-4-1- الهدار المستطيل رقيق الحافة:

تعطى علاقة التصريف للهدار المستطيل رقيق الحافة بالعلاقة [2,4]:

$$Q = \frac{2}{3} * C_d * b * \sqrt{2g} * h^{\frac{3}{2}} \left[\left(1 + \frac{\alpha V_0^2}{2gh}\right)^{\frac{3}{2}} - \left(\frac{\alpha V_0^2}{2gh}\right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (18)$$

حيث: Q : التصريف المار عبر الهدار (m^3/s)، C_d : معامل تصريف الهدار، h : ضاغط الهدار (m)،

V_0 : سرعة الاقتراب (m/s)، b : عرض فتحة الهدار (m).

2-4-1-1- معامل التصريف للهدار المستطيل رقيق الحافة:

يوجد دراسات عديدة لتحديد معامل التصريف للهدار المستطيل رقيق الحافة [6,8]، وقد تم التوصل لعدة علاقات منها:
1. علاقة Rehbock 1929: تم التوصل إلى العلاقة التالية لحساب معامل التصريف:

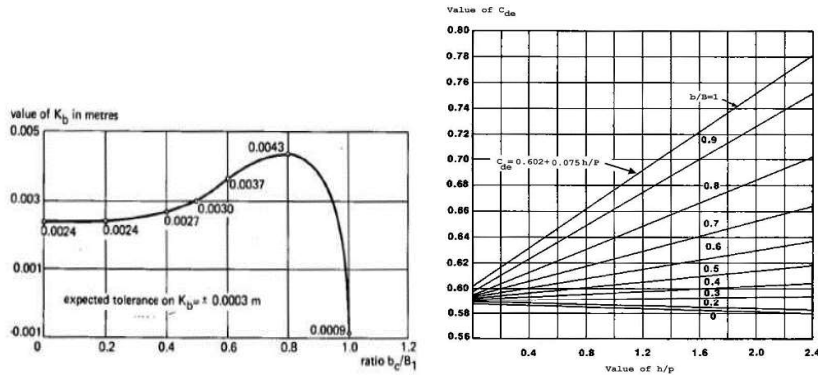
$$C_d = 0.611 + 0.08 \frac{h}{P_s} + \frac{1}{1000} h \dots\dots\dots(19)$$

حيث: h: ضاغك الهدار (m)، P_s : ارتفاع عتبة الهدار.

2. علاقة Kindsvater - Carter (1957): أُجري تحقيق تجريبي على نطاق واسع، حيث استنتج عدد من الصيغ لحساب قيمة معامل التصريف، وذلك بالاعتماد على النسبتين (h/P_s) و (b/B) كما يوضح الشكل (5).

$$Q = \frac{2}{3} * C_e * \sqrt{2g} * (b + K_b) * (h + K_h)^{\frac{3}{2}} \dots\dots\dots(20)$$

حيث: Q: تصريف الهدار (m^3/s)، C_e : معامل تصريف الهدار، h: ضاغط الهدار (m)، V_0 : سرعة الاقتراب (m/s).
b: عرض فتحة الهدار (m) B: عرض القناة (m)، K_b, K_h : مقادير من أجل إدخال تأثير اللزوجة والتوتر السطحي،
وبيين الشكل (5) مخططات حساب C_e و K_b .



الشكل رقم (5): مخططات لحساب C_e, K_b .

3. علاقة Swame (1988):

$$C_d = 0.611 + 0.075 * \frac{h}{P_s} \dots\dots\dots(21)$$

حيث: h: ضاغك الهدار (m) P_s : ارتفاع عتبة الهدار.

2-4-2- الهدار المثلثي رقيق الحافة:

تعطى علاقة التصريف للهدار المثلثي رقيق الحافة بالعلاقة [2,4].

$$Q = \frac{8}{15} * C_d * \sqrt{2g} * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) * h^{\frac{5}{2}} \dots\dots\dots(22)$$

حيث: Q: التصريف المار عبر الهدار (m^3/s)، C_d : معامل تصريف الهدار، h: ضاغط الهدار (m)، θ : زاوية الفتحة.

2-4-2-1- معامل التصريف للهدار المثلثي رقيق الحافة:

يوجد دراسات عديدة لتحديد معامل التصريف للهدار المثلثي رقيق الحافة [4,9] ونذكر من أهم العلاقات:

1. علاقة Barr and Strickland (1910): تستخدم من أجل الهدارات المثلثية بزواوية $(\theta = 90^\circ)$:

$$C_d = 0.566 + \frac{0.0157}{\sqrt{h}} \dots\dots\dots(23)$$

حيث: h: ضاغك الهدار (m)

2. علاقة Cone (1916): تم اقتراح علاقة صالحة للتطبيق من أجل المجال $(109^\circ - 28^\circ)$:

$$C_d = \frac{0.576}{hj} + \frac{0.00584}{shj} \dots\dots\dots(24)$$

h: ضاغك الهدار (m)، S: الميل جوانب فتحة الهدار، أما العلاقة التي نحسب منها j: $j = \frac{0.0195}{S^{0.75}} \dots\dots(25)$

3. علاقة Numachi, Kurokawa, And Hutizawa (1943):

$$C_d = 0.574 + \frac{0.0055}{h} + \left(0.055 + \frac{0.278}{0.886+P}\right) \left[\frac{h}{B} - \left(0.1 - \frac{0.0098}{0.079+P}\right)\right]^2 \dots\dots\dots(26)$$

حيث: h: ضاغك الهدار (m)، B: عرض القناة (m).

4. علاقة Lenz (1943):

$$C_d = 0.560 + \frac{N}{ha} \dots\dots\dots(27)$$

حيث N.a: معاملات تأخذ بالحسبان زاوية الهدار، وتحدد من جدول تبعاً لقيم الزوايا.

3- نتائج البحث:

3-1- الهدار المستطيل:

3-1-1- النتائج المخبرية: يبين الجدول (1) النتائج المخبرية للهدار المستطيل رقيق الحافة.

الجدول (1) النتائج المخبرية للهدار المستطيل رقيق الحافة.

| | تجربة 1 | تجربة 2 | تجربة 3 | تجربة 4 | تجربة 5 |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $Q * 10^{-3}$ (m3/s) | 0.786 | 0.765 | 0.722 | 0.683 | 0.629 |
| h (cm) | 5.95 | 5.84 | 5.62 | 5.41 | 5.12 |
| Cd | 20.61 | 0.612 | 30.61 | 0.613 | 40.61 |

تابع الجدول (1).

| | تجربة 6 | تجربة 7 | تجربة 8 | تجربة 9 | تجربة 10 |
|----------------------|---------|---------|---------|---------|----------|
| $Q * 10^{-3}$ (m3/s) | 0.588 | 0.551 | 0.516 | 0.477 | 0.470 |
| h (cm) | 4.89 | 4.68 | 4.48 | 4.25 | 4.21 |
| Cd | 40.61 | 0.614 | 50.61 | 50.61 | 0.615 |

3-1-2- الخطأ النسبي الأعظمي المرتكب على القياسات المخبرية:

يوضح الجدول (2): الخطأ النسبي الأعظمي المرتكب في قياس (Q) وحساب (Cd) للهدار المستطيل.

| | تجربة 1 | تجربة 2 | تجربة 3 | تجربة 4 | تجربة 5 | تجربة 6 | تجربة 7 | تجربة 8 | تجربة 9 | تجربة 10 |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| $\frac{\Delta Q}{Q} 100\%$ | 1.62 | 1.64 | 1.68 | 1.72 | 1.79 | 1.84 | 1.9 | 1.95 | 2.03 | 2.04 |
| $\frac{\Delta cd}{cd} 100\%$ | 6.40 | 6.48 | 6.66 | 6.85 | 7.12 | 7.37 | 7.61 | 7.87 | 8.19 | 8.25 |

3-1-3- مناقشة للنتائج المخبرية من منظور التحليل البعدي:

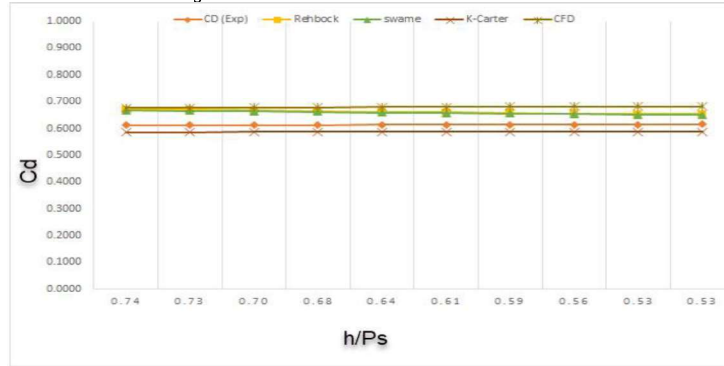
يوضح الجدول (3): حساب عدد رينولدز للتجارب المخبرية للهدار المستطيل رقيق الحافة.

| | تجربة 1 | تجربة 2 | تجربة 3 | تجربة 4 | تجربة 5 | تجربة 6 | تجربة 7 | تجربة 8 | تجربة 9 | تجربة 10 |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Re | 3156 | 8152 | 6145 | 8138 | 4129 | 2012 | 3115 | 9010 | 7101 | 4100 |

الجريان مضطرب ($Re > 1000$) بالتالي يهمل تأثير عدد رينولدز والتوتر السطحي في علاقة معامل التصريف [3].

3-1-4- مقارنة النتائج:

يوضح المخطط المبين في الشكل (6) الخط البياني لقيم معامل التصريف مع $(\frac{h}{P_s})$ لعلاقات مختلفة و النمذجة العددية.



الشكل رقم (6) مقارنة قيم التصريف لعلاقات مختلفة للهدار المستطيل رقيق الحافة مع علاقات مختلفة.

3-1-4- حساب الأخطاء بين النتائج المخبرية وعلاقات أخرى:

يبين الجدول (4) قيم الارتباط والخطأ المتوسط التربيعي بين النتائج المخبرية وعلاقات مختلفة للهدار المستطيل.

| | Rehbock | swame | Karter | CFD |
|----------------|---------|-------|--------|-------|
| R ² | 0.980 | 0.981 | 0.539 | 0.940 |
| RMSE (%) | 4.11 | 3.84 | 2.00 | 5.05 |

3-2- الهدار المثلي بزواية 90 درجة:

3-2-1- النتائج المخبرية:

يوضح الجدول رقم (5): قيم النتائج المخبرية للهدار المثلي رقيق الحافة بزواية 90.

| | تجربة 1 | تجربة 2 | تجربة 3 | تجربة 4 | تجربة 5 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Q * 10 ⁻³ (m ³ /s) | 1.443 | 1.116 | 0.928 | 0.799 | 0.709 |
| h (cm) | 6.14 | 5.52 | 5.11 | 4.8 | 4.56 |
| Cd | 0.654 | 0.660 | 0.666 | 10.67 | 0.676 |

تابع الجدول (5).

| | تجربة 6 | تجربة 7 | تجربة 8 | تجربة 9 | تجربة 10 |
|--|---------|---------|---------|---------|----------|
| Q * 10 ⁻³ (m ³ /s) | 0.615 | 0.587 | 0.511 | 0.493 | 0.485 |
| h (cm) | 4.3 | 4.21 | 3.97 | 3.9 | 3.87 |
| Cd | 0.680 | 0.684 | 0.689 | 0.695 | 0.697 |

3-2-2- الخطأ النسبي الأعظمي المرتكب على القياسات المخبرية:

يوضح الجدول رقم (6): الخطأ النسبي الأعظمي المرتكب على قياسات (Q) وحساب (Cd) للهدار المثلي (90).

| | تجربة 1 | تجربة 2 | تجربة 3 | تجربة 4 | تجربة 5 | تجربة 6 | تجربة 7 | تجربة 8 | تجربة 9 | تجربة 10 |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| $\frac{\Delta Q}{Q} 100\%$ | 2.63 | 2.81 | 2.96 | 2.96 | 3.08 | 3.19 | 3.33 | 3.38 | 3.52 | 3.56 |
| $\frac{\Delta cd}{cd} 100\%$ | 4.66 | 5.08 | 5.40 | 5.69 | 5.93 | 6.23 | 6.34 | 6.67 | 6.77 | 6.81 |

3-2-3- مناقشة للنتائج المخبرية من منظور التحليل البعدي:

تم حساب عدد رينولدز للتجارب المخبرية للهدار المثلي زاوية (90) ووضعت النتائج في الجدول التالي:

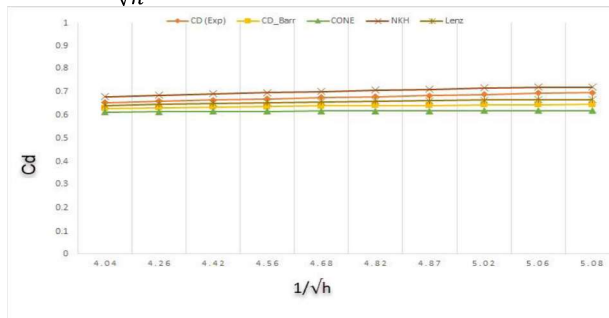
الجدول رقم (7): حساب عدد رينولدز للتجارب المخبرية للهدار المثلي رقيق الحافة بزوايا 90.

| | تجربة 1 | تجربة 2 | تجربة 3 | تجربة 4 | تجربة 5 | تجربة 6 | تجربة 7 | تجربة 8 | تجربة 9 | تجربة 10 |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Re | 2785 | 2201 | 1862 | 1620 | 1464 | 1291 | 1202 | 1059 | 1031 | 1019 |

الجريان مضطرب ($Re > 1000$) بالتالي يهمل تأثير عدد رينولدز والتوتر السطحي في علاقة معامل التصريف [3].

3-2-4- مقارنة النتائج:

يوضح المخطط المبين في الشكل (7) الخط البياني لقيم معامل التصريف مع $(\frac{1}{\sqrt{h}})$ لعلاقات مختلفة والنمذجة العددية.



الشكل رقم (7): مقارنة قيم التصريف لعلاقات مختلفة للهدار المثلي رقيق الحافة بزوايا 90 مع علاقات مختلفة.

3-2-4- حساب الأخطاء بين النتائج المخبرية وعلاقات أخرى:

يوضح الجدول رقم (8): قيم الارتباط والخطأ المتوسط التربيعي بين النتائج المخبرية وعلاقات مختلفة للهدار المثلي 90.

| | Barr and Strickland | Cone | NKH | Lenz | CFD |
|----------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| R ² | 0.974 | 0.965 | 0.988 | 0.975 | 0.981 |
| RMSE (%) | 2.49 | 4.00 | 2.01 | 1.21 | 3.77 |

3-3- الهدار المثلي بزوايا 30 درجة:

3-3-1- النتائج المخبرية:

يوضح الجدول رقم (9): النتائج المخبرية للهدار المثلي رقيق الحافة بزوايا 30.

| | تجربة 1 | تجربة 2 | تجربة 3 | تجربة 4 | تجربة 5 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|
| Q * 10 ⁻³ (m ³ /s) | 0.994 | 0.878 | 0.799 | 0.762 | 0.743 |
| h (cm) | 8.97 | 8.53 | 8.21 | 8.05 | 7.96 |
| Cd | 0.652 | 0.653 | 0.654 | 0.665 | 0.657 |

تابع الجدول (9).

| | تجربة 6 | تجربة 7 | تجربة 8 | تجربة 9 | تجربة 10 |
|--|---------|---------|---------|---------|----------|
| Q * 10 ⁻³ (m ³ /s) | 0.696 | 0.649 | 0.591 | 0.560 | 0.536 |
| h (cm) | 7.75 | 7.53 | 7.25 | 7.09 | 6.96 |
| Cd | 0.658 | 0.659 | 0.660 | 0.661 | 0.663 |

3-3-2- الخطأ النسبي الأعظمي المرتكب على القياسات المخبرية:

يوضح الجدول رقم (10): الخطأ النسبي الأعظمي المرتكب على قياسات (Q) وحساب (Cd) للهدار المثلي بزوايا

.30

| | تجربة 1 | تجربة 2 | تجربة 3 | تجربة 4 | تجربة 5 | تجربة 6 | تجربة 7 | تجربة 8 | تجربة 9 | تجربة 10 |
|------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| $\frac{\Delta Q}{Q} 100\%$ | 7.89 | 8.11 | 8.28 | 8.37 | 8.42 | 8.55 | 8.69 | 8.88 | 8.99 | 9.09 |
| $\frac{\Delta cd}{cd} 100\%$ | 2.49 | 2.57 | 2.63 | 2.66 | 2.68 | 2.72 | 2.77 | 2.84 | 2.88 | 3.00 |

3-3-3- مناقشة للنتائج المخبرية من منظور التحليل البعدي:

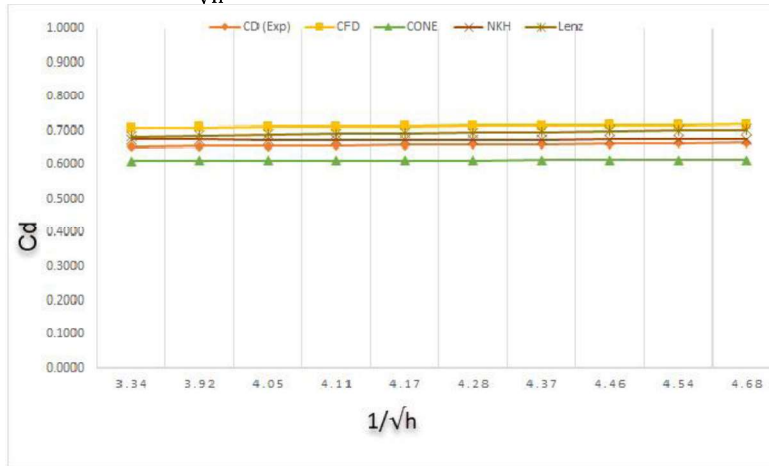
يوضح الجدول رقم (11): قيم عدد رينولدز للتجارب المخبرية للهدار المثلي رقيق الحافة بزوايا 30.

| | تجربة 1 | تجربة 2 | تجربة 3 | تجربة 4 | تجربة 5 | تجربة 6 | تجربة 7 | تجربة 8 | تجربة 9 | تجربة 10 |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Re | 1783 | 1601 | 1474 | 1414 | 1383 | 1306 | 1228 | 1130 | 1077 | 1036 |

الجريان مضطرب ($Re > 1000$) بالتالي يهمل تأثير عدد رينولدز والتوتر السطحي في علاقة معامل التصريف [3].

3-3-4- مقارنة النتائج:

يوضح المخطط المبين في الشكل (8) الخط البياني لقيم معامل التصريف مع $(\frac{1}{\sqrt{h}})$ لعلاقات مختلفة.



الشكل رقم (8): مقارنة قيم التصريف لعلاقات مختلفة للهدار المثلي رقيق الحافة بزوايا 30 مع علاقات مختلفة.

3-3-5- حساب الأخطاء بين النتائج المخبرية وعلاقات أخرى: تم حساب الأخطاء ووضعت في الجدول (12).

يوضح الجدول رقم (12): قيم الارتباط والخطأ المتوسط التربيعي بين النتائج المخبرية وعلاقات أخرى للهدار المثلي

.30

| | NKH | Lenz | Cone | CFD |
|----------|-------|-------|-------|-------|
| R^2 | 6660. | 0.968 | 0.964 | 0.986 |
| RMSE (%) | 0.95 | 2.64 | 2.99 | 2.38 |

4- الاستنتاجات والتوصيات:

1- كان هناك تفاوت طفيف بين النتائج المخبرية التي تم الحصول عليها مقارنة بنتائج علاقات مختلفة ونتائج النمذجة

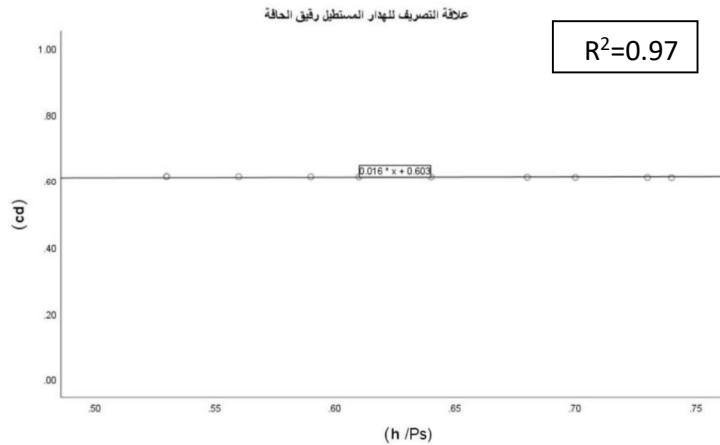
العديدية. يعود هذا التفاوت لاختلاف ظروف التجارب لمختلف العلاقات (درجة حرارة - ضغط - مادة القناة ومادة

- الهدار هل هي بلاستيك أو خرسانة، وشكل الحواف) بالإضافة لاختلاف أبعاد الهدارات المستخدمة في التجارب لكل علاقة. ولكن كانت الأخطاء أقل من الخطأ النسبي الأعظمي لنتائج التجارب التي تم الحصول عليها:
- الهدار المستطيل: ترواحت الأخطاء (±2.00-5.05%) و الخطأ النسبي الأعظمي 8.25%.
 - الهدار المثلثي بزواوية 90: ترواحت الأخطاء (±1.21-3.77%) و الخطأ النسبي الأعظمي 6.81%.
 - الهدار المثلثي بزواوية 30: ترواحت الأخطاء (±0.95-2.91%) و الخطأ النسبي الأعظمي 3.00%.
- 2- لوحظ ارتفاع طفيف في قيم معامل التصريف بناء على نتائج النمذجة العددية، ويعود ذلك إلى أن البرنامج يقوم بعمل المحاكاة في ظروف نموذجية (درجة حرارة ثابتة - ضغط ثابت..) والتي يصعب توفيرها جميعاً بقيمة ثابتة خلال زمن التجربة. بالإضافة لذلك تتحكم أبعاد الشبكة التي تغطي النموذج بدقة النتائج التي يتم الحصول عليها، مما يؤدي إلى عدم إمكانية تمثيل الشكل الحقيقي للتفاصيل الدقيقة للشكل الهندسي، كحواف عتبة الهدار مثلاً. ولكن النتائج كانت مقبولة والخطأ المرتكب أصغر من الخطأ النسبي الأعظمي.
- 3- بناء على النتائج التي تم الحصول عليها تبين أنه بالإمكان استخدام النمذجة العددية للتنبؤ بدقة جيدة لمنشأة الهدار المقترح إنشاؤه، حيث تساهم النمذجة العددية في تخفيض تكلفة التجارب التي تتطلب إنشاء نماذج فيزيائية مكلفة ومعقدة، ويمكن من خلالها دراسة سلوك النموذج وأخذ فكرة عامة عنه.
- 4- العلاقات الناتجة:

$$Cd = 0.603 + 0.016 \frac{h}{P_s} \dots\dots\dots(28) \quad \text{الهدار المستطيل:}$$

والقيود لهذه العلاقة:

$$b [m] = 0.03, P_s [m] = 0.08, \frac{h}{P_s} = 0.53 \sim 0.74, Q \left[\frac{l}{s} \right] = 0.470 \sim 0.786$$

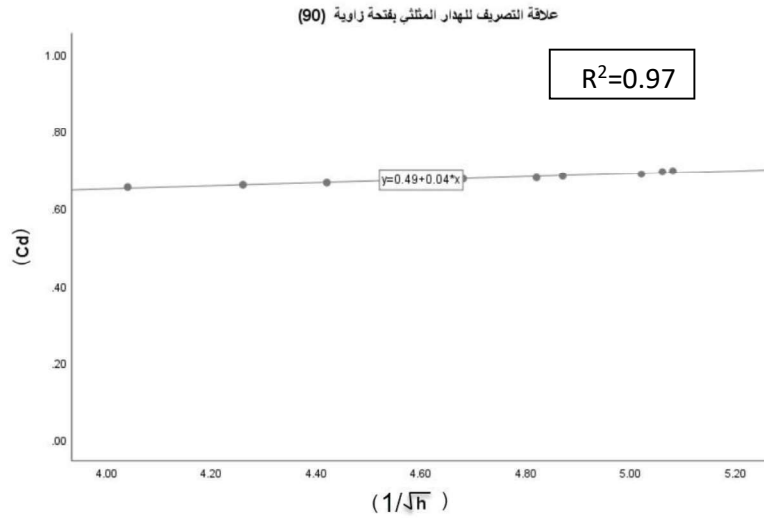


الشكل رقم (9): العلاقة الممثلة للهدار المستطيل رقيق الحافة.

$$Cd = 0.49 + \frac{0.04}{\sqrt{h}} \dots\dots\dots(29) \quad \text{الهدار المثلثي (90 درجة):}$$

والقيود لهذه العلاقة:

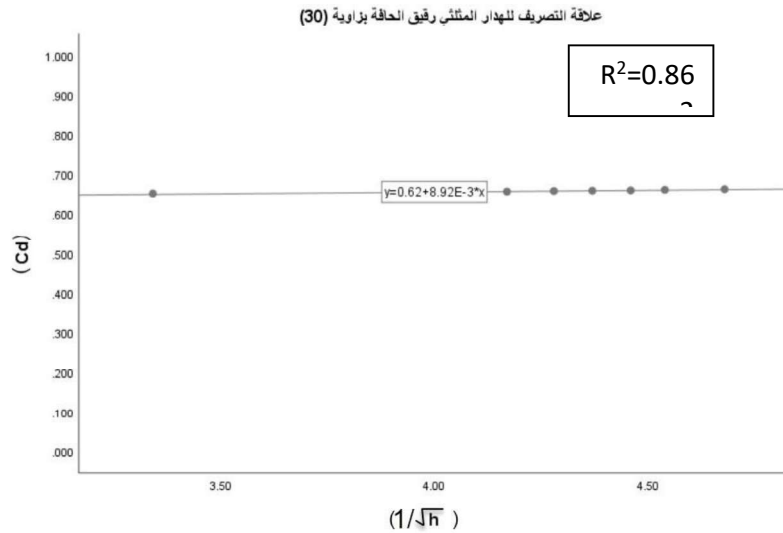
$$387 \sim 0.0614, Q \left[\frac{l}{s} \right] = 0.485 \sim 1.443, P_s [m] = 0.089, h [m] = 0.0$$



الشكل رقم (10): العلاقة الممثلة للهدار المثلثي رقيق الحافة بزاوية (90).

الهدار المثلثي بزاوية (30 درجة):(30) $Cd = 0.62 + \frac{0.0089}{\sqrt{h}}$ والقيود لهذه العلاقة:

$Q \left[\frac{1}{s} \right] = 0.536 \sim 0.994$, $P_s [m] = 0.077$, $h [m] = 0.0$, $696 \sim 0.0897$



الشكل رقم (11): العلاقة الممثلة للهدار المثلثي رقيق الحافة بزاوية (30).

5- المراجع والمصادر:

- 1- مرعي، يوسف (1990). الدقة في تقدير غزارة الجريان لمجموعة مختارة من أجهزة التحكم والقياس على المنشآت المائية. أطروحة دكتوراه، معهد الهندسة والاقتصاد المائي، الجامعة التقنية في كراكوف، 162-170.
- 2- السعدي، قتيبة ومعلا، وائل وزينو، أمجد (2003). الهيدروليك (2) الجريان ذو السطح الحر، منشورات جامعة دمشق، ط1: 191 - 200.
- 3- مرعي، يوسف ومعلا، وائل (2008). الهيدروليك (3)، منشورات جامعة دمشق: 264-300.
- 5SHEN, J., (1981). Discharge Characteristics of Triangular-notch Thin-plate Weirs. UNITED STATES GOVERNMENT PRINTING OFFICE, WASHINGTON: 7-15.
- 4- Sturm, T.W., (2001). Open Channel Hydraulics. George Tchobanoglous, Univerity of Caldornia, Davis: 49-50.
- 5- CHUNG, T.J., (2002). COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS. Cambridge University: 33-34.
- 6- MUNSON, B.R, YOUNG, D.F., and OKIISHI, T.H., (2002). Fundamentals of Fluid Mechanics. Wiley, Fourth edition: 659-662.
- 7- Osman, A., (2006). Open Channel Hydraulics. Elsevier, First edition: 200-203.
- 8- Hanif, M., (2008). Open Channel Flow. Springer, Second edition: 212-213.
- 9- GHARAHJEH, S., (2012). EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON SHARP CRESTED RECTANGULAR WEIRS. Master Thesis, Middle East Technical University: 10-25.
- 10- DURU, A., (2014). NUMERICAL MODELLING OF CONTRACTED SHARP CRESTED WEIRS. Master Thesis, MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY: 12-16.
- 11- Radecki-Pawlik, A., Pagliara, S., and Hradecký, J., (2018). Open Channel Hydraulics, River Hydraulic Structures and Fluvial Geomorphology. Taylor & Francis Group, LLC: 47-54.