

Laboratory Study of Protecting Downstream Slope of Rockfill Weirs Using Stepped Gabions

Dr. Bahzad Mohammad Ali Noori

Engineering College, University of Dohuk/Dohuk

Dr. Ghania Aed Al-Majeed Hayawi

Engineering College, University of Dohuk/Dohuk

Email: uot_magaz@yahoo.com

Received on: 28/6/2007 & Accepted on: 3/1/2008

ABSTRACT

In the present investigation, the stability of rockfill weirs protected by gabions and subjected to overtopping flow rates under the effect of high flow rates have been studied experimentally. Five weir models with different downstream slopes [1V:2.5H, 1V:3H, 1V:4H, 1V:5H, 1V:7.5H] were constructed and tested. Fifty eight experiments were conducted for five cases of stepped gabions laying on the downstream slope [laying gabions with one layer and no connections (M-1), laying gabions with lateral connections (M-H), laying gabions with longitudinal connections (M-V), laying gabions with two layers (M-2), and laying gabions with three layers (M-3)] using three gravel diameters (11.11, 15.9 and 22.25) mm. From the data analysis, a set of equations were obtained for the estimation of failure unit discharge in terms of equivalent gravel diameter, relative submerged intensity of gabions, gabions layer solidity, and tangent of internal friction angle of gabions, for each case of gabions laying. A simple method was presented for the design of rockfill weirs protected by stepped gabions in terms of maximum failure discharge with the help of design charts obtained from the present study.

A mathematical model depending on the characteristics of the physical model was derived for each slope giving failure unit discharge values that agree quite well with the experimental values.

Comparing results of the present study with those of other investigations shows that rockfill weirs protected by gabions stand much higher failure unit discharge than earth weirs protected by gabions.

دراسة مختبرية لحماية سفح المؤخر للهدارات الركامية باستخدام السلال الصخرية المتدرجة

الخلاصة

تم في هذا البحث دراسة مدى ثباتية واستقرار سفح المؤخر للهدارات الركامية المعرضة للجريان الفوقي باستخدام السلال الصخرية المتدرجة وذلك بإنشاء خمسة نماذج من الهدارات بميول مختلفة لسفح المؤخر [1V:2.5H, 1V:3H, 1V:4H, 1V:5H, 1V:7.5H] وأجريت ثمان وخمسون تجربة، نفذت لخمس حالات وضع السلال الصخرية على سفح المؤخر [وضع السلال الصخرية بطبقة واحدة بدون ربط (M-1)، ربط السلال الصخرية أفقياً (M-H)، ربط السلال الصخرية رأسياً (M-V)، وضع السلال الصخرية بطبقتين بدون ربط (M-2)، وضع السلال

الصخرية بثلاث طبقات بدون ربط (M-3) وثلاثة أقطار من الحصى [11.11,15.9,22.25] ملم.

من تحليل النتائج تم الحصول على معادلات لحساب تصريف الفشل بدلالة معدل قطر الحصى، الكثافة النسبية للسلال الصخرية المغمورة، صلادة طبقة السلة الصخرية، وميل زاوية الوضع للسلال الصخرية لكل حالة من حالات وضع السلة الصخرية على السفح. وتم تقديم طريقة مبسطة لتصميم الهدارات الركامية المحمية بالسلال الصخرية بدلالة أكبر تصريف فشل يمر فوق الهدار وبلاستعانة بمنحنيات تصميمية لكل حالة. كما تم اشتقاق نموذج رياضي يعتمد على خواص النموذج الفيزيائي والذي أعطى تصريف فشل قريب من المقاس ولكل ميل من الميول الخمسة. عند مقارنة نتائج الدراسة الحالية مع نتائج الدراسات السابقة تبين بان الهدارات الركامية المحمية بالسلال الصخرية تعطي تصاريح فشل أكبر من الهدارات الترابية المحمية بالسلال الصخرية.

الكلمات الدالة: -السلال الصخرية، الهدارات الركامية

مقدمة عامة

لغرض الحفاظ على ثباتية واستقرارية سفح المؤخر للمنشآت الركامية المعرضة للجريان الخلالي والفوقي فقد تم تسليحها أحياناً باستخدام شبكة حديدية أو يتم رصفها بالصخور الكبيرة أو قد يتم تغطيتها بالسلال الركامية (Gabions) التي تتميز باحتفاظها بنفس نفاذية المواد الركامية المشابهة ولكن بثباتية أكبر من ثباتية الصخور المفردة (1) إن استخدام المواد الركامية لبناء الهدار ذاتي المسيل تمثل خطوة هامة ومتقدمة في مجال تصميم وبناء المنشآت الركامية (2). ويتم في هذا النوع من الهدارات خزن قسم من الماء بينما يمر القسم الآخر كجريان خلالي أو فوقي عبر الهدار الركامي. وتعدّ هذه الطريقة أكثر اقتصادية من الطرائق القديمة لإنشاء الهدارات الركامية للأسباب الآتية: -إن الهدارات الركامية ذاتية المسيل تسمح بعبور الماء من خلالها وفوقها لذلك فعند إنشائها لا حاجة لتصميم وبناء مسيل مائي تقليدي. وكمثال تطبيقي على الهدارات الركامية الذاتية المسيل سد لافنك جاك مارش (3) الذي أنشئ بأستراليا بارتفاع (12.2) متراً وبأقصى تصريف تصميمي يصل إلى (93.4) م³/ثا.م. نظراً لتبديد طاقة الماء وتهديتها أثناء مروره فوق وعبر الهدار الركامي مما يؤدي إلى عدم الحاجة لتصميم وبناء حوض تهديّة. في هذا البحث سيتم التأكيد على حماية سفح المؤخر للهدار الركامي باستخدام السلال الصخرية المترجة. حيث تكمن فائدة المنشآت المترجة في كفاءتها العالية لتبديد الطاقة (4).

ولغرض زيادة استقرارية الصخور يتم ربطها مع بعضها البعض بعدة طرائق لهذا فإن شكل الوحدة الناشئة يمكن السيطرة عليها ووضعها في مكانها المحدد بدقة أكثر من وضع الصخر المكس بصورة عشوائية. والسلال الصخرية عبارة عن أكياس مشبكة صندوقية أو أسطوانية مملوءة بالصخر أو الركام (5) والتي عادةً تستخدم في بناء المنشآت الهيدروليكية مثل السدود والأسنان الصخرية لتهديب الأنهار وكمبندات للطاقة وبناء الجدران الساندة وكذلك في حماية جدران القنوات المفتوحة ودعامات الجسور من التعرية (6) و (7) وأول الدول التي استخدمت السلال الصخرية هي مصر والصين وإيطاليا حيث قامت شركة في إيطاليا عام (1879) باستخدام هذه المشبكات الأسطوانية المملوءة بالصخور في تهديب الأودية التي تصب في نهر رينو ولا تزال بحالة جيدة والى الوقت الحاضر وقد سميت أيضاً بفرشة رينو (Reno Matters) نسبة إلى النهر كبديل عن كلمة سلة الصخرية. تستخدم السلال الصخرية في المواقع التي توجد فيها مواد ركامية ناعمة وغير قادرة على حماية المنشآت من التآكل وقوة السحب. ومن الناحية الاقتصادية عند عدم توفر المواد الصخرية ذات الأحجام الكبيرة أي تكون كلفة نقلها

من مناطق بعيدة أكثر من استعمال السلال الصخرية وعادةً السلال الصخرية تحتاج إلى $(\frac{1}{3})$

السلك مقارنة بالتكسية الحجرية (Riprap) (8).

يبين الباحث سمث (9) في دراسة مبسطة وسريعة على فرشاة السلال الصخرية الحرة لهدارات ترابية وبميل لسفح المؤخر مقداره (1V:10H) أنها تقفل بسرعة حيث ترتفع حافتها العليا بفعل التيار عندما تستعمل لحماية سفح المؤخر للهدار. أعاد الاختبار مرة أخرى بربطها مع بعضها من الأعلى والأسفل فلاحظ بأن الفرشة تزحف جميعها إلى الأسفل وبمعدل أقل من معدل الجريان المطلوب تنفيذه لهذا البرنامج هو للحصول على أقل كلفة محتملة لمادة الحماية للهدارات الترابية، كما قدم الباحث ستيفنسون (10) في دراسته عن استقرار السلال الصخرية في الهدارات بأن الفشل يحصل إما نتيجة الانقلاب (Overturning) أو نتيجة زحف السلال الصخرية (Sliding) وهذه يمكن حلها رياضياً حيث وجد علاقة لكل حالة من حالات الفشل ودرس الباحث جيروديتي (11) نموذجاً للسد الوقي الصخري في المحطة الكهرومائية في هندوراس من الناحية الهيدروليكية والذي تم إنشاؤه بمقياس (100:1) ويتكون من ركيزة تعمل كجدار مانع وقد تم حماية السفح والقمة وجزء من سفح المقدم بالسلال الصخرية المسلحة والبالغ عددها (37) وقد ثبتت بوساطة مخاطيف مربوطة في جسم الهدار للتغلب على مشكلة رفع السلة الصخرية وحركتها من مكانها حيث إن الجريان الحاصل في جسم الهدار يسبب حدوث تسرب قوي يعمل على دفع السلة الصخرية إلى الأعلى وهذا ما يسبب في تقليل وزن السلة الصخرية، وكذلك قام الباحث داوود (12) بإجراء دراسة مختبرية لاستقرارية الهدارات الترابية باستخدام السلال الصخرية حيث تمكن من دراسة سلوكية السلال الصخرية تحت تأثير معدلات الجريان العالية مع بحث العوامل المختلفة التي تؤثر على هذه السلوكية مثل كتلة السلة الصخرية وعدد طبقات السلال الصخرية و ميل سفح المؤخر ومعدل قطر الحصى وقد أنشأت خمسة نماذج بميول مختلفة لسفح المؤخر تتراوح بين (1V:10H) إلى (1V:3H).

النموذج الرياضي

إن من أهم الأهداف الرئيسية في هذا البحث هو دراسة استقرارية السلال الصخرية المستخدمة لحماية سفح المؤخر للهدار الركامي، ولكي نتوصل إلى النموذج الرياضي يمكن استخدام الفرضيات الآتية:- طبقة الحماية تتكون من سلال صخرية تحتوي على مواد ذات نفاذية عالية وان الفراغات تكون جميعها مملوءة بالماء، إن طبقة الحماية تعمل جميعها ككتلة واحدة، ولغرض تبسيط المتغيرات تم تعريفها كالآتي (13):-

$a'' =$ صلادة طبقة السلال الصخرية المستخدمة للحماية لكل نوع من الحصى، $b' =$ خشونة وجه مادة الحماية للسلة الصخرية و $h =$ سمك طبقة الحماية و $S =$ ميل سفح المؤخر و $d_c =$ عمق الماء الحرج و $g_s =$ الكثافة الوزنية للحصى و $g_w =$ الكثافة الوزنية للماء، وتم ربط

صلادة السلة الصخرية وكتلة الطبقة المغمورة بالمعادلة $(A = \frac{\rho_s g_s}{\rho_w g_w} - 1) \frac{\rho_s}{\rho_w} = A$ ولأجل الحصول

على النموذج المطلوب سيتم فصل المتغيرات إلى قسمين الأول يتعلق بالعمق الطبيعي للماء والقسم الثاني يتعلق بالقوى المؤثرة على سفح المؤخر.

معادلة عمق الماء الطبيعي (d_n)

نفرض أن سمك الطبقة من مادة الحماية على سفح المؤخر تساوي (h) الذي يمثل سمك طبقة السلة الصخرية من قعر الطبقة المحمية والى قعر العمق المفروض للمجرى. فبهذا تكون كتلة الطبقة ولكل وحدة مساحة سطحية تساوي (9):-

$$M = a'' r_s h \quad \dots (1)$$

إذ إن :-

$M =$ كتلة طبقة السلة الصخرية لكل وحدة مساحة و $r_s =$ الكثافة الكتلية للحصى والخشونة المؤثرة يتم الحصول عليها من العلاقة الآتية :

$$Ds = r' = b'h \quad \dots (2)$$

إذ إن :-

$Ds =$ معدل قطر الحصى و $r' =$ خشونة المؤثرة للسلة الصخرية و يمكن التعبير عن معامل ماننك لخشونة الحصى بالعلاقة الآتية (9):

$$n_s = 0.153 \frac{(r')^{1/6}}{\sqrt{g}} \quad \dots (3)$$

إذ إن :-

$n_s =$ معامل ماننك لخشونة الحصى و $g =$ التعجيل الأرضي وان السرعة في القنوات المفتوحة تساوي:

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \quad \dots (4)$$

إذ إن :-

$V =$ معدل سرعة جريان على سفح المؤخر للهدار و $n =$ معامل ماننك لخشونة القعر و $R =$ نصف القطر الهيدروليكي وبما أن التصريف يساوي

$$Q = A' \times V \quad \dots (5)$$

$A' =$ مساحة مقطع الجريان و $Q =$ التصريف المقاس

$$Q = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times S^{1/2} \times A' \quad \dots (6)$$

$$A' = B \times d_n \quad \dots (7)$$

إذ إن :-

$B =$ عرض القناة و $d_n =$ العمق الطبيعي للماء .

$$Q = \frac{1}{n} \times R^{2/3} \times S^{1/2} \times B \times d_n \quad \dots (8)$$

ولكن في القنوات المفتوحة العريضة $R \approx d_n$:

$$\therefore q = \frac{1}{n} \times d_n^{5/3} \times S^{1/2} \quad \dots (9)$$

إذ إن :-

$q =$ التصريف المقاس لكل وحدة عرض، ويمكن حساب (q) بدلالة العمق الحرج :

$$q = g^{1/2} \times d_c^{3/2} \quad \dots (10)$$

ومن تساوي المعادلتين (9) و (10) ينتج:

$$\frac{1}{n} d_n^{5/3} \times S^{1/2} = g^{1/2} \times d_c^{3/2} \quad \dots (11)$$

$$d_n^{5/3} = n \times g^{1/2} \times \frac{d_c^{3/2}}{S^{1/2}} \quad \dots (12)$$

وبتعويض المعادلة (3) في المعادلة (12) واعتبار $(n = n_s)$ ينتج:

$$d_n^{5/3} = \frac{0.153(r')^{1/6}}{\sqrt{g}} \times g^{1/2} \times \frac{d_c^{3/2}}{S^{1/2}} \quad \dots(13)$$

$$d_n = C \left[\frac{r'^{1/10} d_c^{9/10}}{S^{3/10}} \right] \quad \dots (14)$$

إذ إن:-

$$0.3242 = (0.153)^{3/5} = C \quad \text{يمثل ثابت مقاومة الجريان نتيجة الخشونة.}$$

تحليل القوى المؤثرة على سفح المؤخر المسببة للفشل
 في الشكل (1) مجموع القوى المسببة للزحف هي (F) وتشمل:

$$F = W_1 \sin q + W_{wg} \sin q + W_w \sin q + F_s \cos q \quad \dots(15)$$

W_1 = وزن الحصى داخل للسلة الصخرية و W_{wg} = وزن الماء خلال السلة الصخرية و W_w = وزن الماء فوق السلة الصخرية و F_s = قوة التسرب.

تحسب هذه القوى لكل وحدة مساحة ، حيث مساحة السلة الصخرية $(a_L \times b_L)$ وتمثل (a_L) عرض السلة الصخرية و (b_L) طول السلة الصخرية . كل هذه القوى تواجه مقاومة ممثلة بقوة الاحتكاك (FR) والناجمة من المركبة العمودية لـ (الوزن المغمور + وزن الماء خلال السلة الصخرية + وزن الماء فوق السلة الصخرية + قوة التسرب) مضروبة في معامل الاحتكاك

$$FR = (W_1 \cos q + W_{wg} \cos q + W_w \cos q - F_s \sin q) \times \tan f_g \quad \dots(16)$$

إذ إن:-

q = زاوية ميل السفح المؤخر و f = زاوية الوضع للسلة الصخرية.
 عند بداية الزحف القوة المسببة للزحف = القوة المقاومة للزحف.

$$(1.2a''g_s h + 1.2(1 - a'')g_w h + g_w d_n) \times \sin q + 1.2I g_w h \cos q = \quad \dots(17)$$

$$[(1.2a''g_s h + 1.2(1 - a'')g_w h + g_w d_n) \cos q - 1.2I g_w \sin q] \tan f_g$$

إذ إن:-

$$I = \frac{dh}{dl} \quad \dots (18)$$

إذ إن:-

I = الانحدار الهيدروليكي و dh = الفرق في منسوب سطح الماء بين مقدم ومؤخر الهدار
 و dl = طول مسار الماء داخل الهدار.

$$\left(1.2 a^n \left(\frac{g_s}{g_w} - 1\right) h + 1.2 h + d_n\right) S + 1.2 I h = \left(1.2 a^n \left(\frac{g_s}{g_w} - 1\right) h + 1.2 h + d_n\right) \tan f_g - 1.2 I h S \tan f_g \quad \dots (19)$$

$$s = \frac{\sin q}{\cos q} \quad \text{إذ إن:}$$

يمكن التعبير عن $\frac{g_s}{g_w} - 1$ كالآتي:

$$a \left(\frac{g_s}{g_w} - 1\right) = A \quad \dots (20)$$

$$\frac{d_n}{1.2h} (\tan f_g - S) = (1 + A) \tan f_g \left[\frac{S}{\tan f_g} + \frac{I}{(1 + A) \tan f_g} + \frac{IS}{(1 + A)} - 1 \right] \quad \dots (21)$$

أو:

$$\frac{d_n}{1.2h} (\tan f_g - S) = K_2 \left[\frac{S}{\tan f_g} + \frac{I}{K_2} + \frac{IS}{K_1} - 1 \right] \quad \dots (22)$$

إذ إن: $K_1, K_2, K_3 =$ ثوابت

$$K_1 = (1 + A) \quad \dots (23)$$

$$K_2 = (1 + A) \tan f_g \quad \dots (24)$$

وبتعويض المعادلة (14) في المعادلة (22) ينتج:

$$\left(\frac{d_c}{h}\right) = \left[\frac{K_3 S^{3/10}}{(\tan f_g - S)} \left(\frac{S}{\tan f_g} + \frac{I}{K_2} + \frac{IS}{K_1} - 1 \right) \right]^{10/9} \quad \dots (25)$$

$$K_3 = \frac{1.2 K_2}{C b'^{0.1}} \quad \dots (26)$$

العمل المختبري

ينضمن العمل المختبري إنشاء خمسة نماذج لهدارات ركامية بميول مختلفة لسفح المؤخر هي (1V:2.5H, 1V:3H, 1V:4H, 1V:5H, 1V:7.5H) على التوالي وبميل ثابت لسفح المقدم (1V:2H) لكافة النماذج كما موضح في الشكل (2). تم بناء النماذج حسب المواصفات عرض النموذج (الهدار) يساوي عرض القناة المختبرية التي تم بناء الهدار فيها (81 سم، ارتفاع (50 سم، عرض القمة (40 سم مع وضع حاجز غير نفاذ بعرض القناة مصنوع من مادة البلاستيك وبسمك (6 ملم تم تثبيته في إطار حديدي مثبت على جدران القناة والسلال الصخرية المستخدمة لحماية سفح المؤخر للهدار كانت بأبعاد (25 سم × 20 سم) كما تم تصنيف هذه النماذج إلى خمس مجاميع اعتماداً على ميول سفح المؤخر للهدار المشار إليه أعلاه. وكل مجموعة تتضمن استخدام ثلاثة أحجام من الحصى ($D_s = 11.11, 15.9, 22.25$) ملم على التوالي. وقد أستخدم كل حجم في الفحص أربع مرات للنموذج الواحد وكما يأتي ($M - 1$) قيمة $1 = NL$ بدون ربط

السلال الصخرية مع بعضها وبطبقة واحدة ($M - H$) قيمة $1 = NL$ بربط السلال الصخرية أفقياً مع بعضها وبطبقة واحدة و ($M - V$) قيمة $1 = NL$ بربط السلال الصخرية رأسياً مع بعضها وبطبقة واحدة ($M - 2$) قيمة $2 = NL$ بدون ربط السلال الصخرية مع بعضها وبطبقتين و ($M - 3$) قيمة $3 = NL$ بدون ربط السلال الصخرية مع بعضها وبثلاث طبقات، إذ إن NL تمثل عدد طبقات السلال الصخرية. كما تم تحديد موقع الهدار في القناة على بعد (15) متر من بدايتها حيث حددت نقطة المنتصف للقمة وثبت فيها الحاجز غير النفاذ بواسطة الإطار الحديدي بعدها رسمت أبعاد الهدار على جدران القناة من الداخل. و الحصى المستخدم في بناء الهدار حصى ذي قطر يساوي (11.11) ملم حسب المواصفات (14). تم بناء الهدار بوضع الحصى على شكل الهدار المرسوم داخل القناة كما تم تعديله بواسطة قطعة خشبية مستوية تطبق على سفح المؤخر والمقدم واستخدم الوزن ذو الفقاعة الهوائية لمعرفة استوائية الميل بعدها تم بناء عتبة في نهاية سفح المؤخر لمنع السلال الصخرية من الزحف إلى أسفل القناة والجدول (1) يبين بعض الأبعاد المهمة في إنشاء هذه النماذج.

القناة المختبرية

أجريت التجارب في قناة مشيدة من الخرسانة ذات قعر ثابت بطول (24.64) متراً وعرض (0.81) متر وعمق (0.75) متر كما في الشكل (3). مثبت على جداري القناة مقاطع حديد (دكسن) على شكل زاوية وبصورة أفقية تستخدم لتثبيت مقاييس العمق (Point Gauges) عليها. وتتصل مقدمه القناة بحوض التغذية بأبعاد (2.25 متر × 1.25 متر) وعمق (1.2) متر. يصل الماء إلى الحوض بواسطة أنبوب قطره (15.24) سم مثبت عليه صمام للسيطرة على التصريف ويأخذ الأنبوب الماء من خزان أرضي في المختبر عن طريق مضخة يصل تصريفها التصميمي إلى (100) لتر/ثانية. على بعد (2.5) متر من الحوض تثبت بوابة الكسح التي تبلغ أبعادها الداخلية (1 متر × 0.81 متر) وإطارها الخارجي مصنوع من الحديد و صفيحة معدنية سمكها (4) ملم ولها خاصية الحركة إلى الأعلى والأسفل عن طريق قضيب مسنن. تم تثبيت مقاييس العمق على القناة، لغرض قياس منسوب سطح الماء وعمق الماء السذلي. على عربة متحركة على طول القناة. يتصل بنهاية القناة حوض التصريف بطول (8) أمتار وعمق (1.2) متر وعرض (0.8) متر. يوجد في نهاية الحوض تخرص بطول (1.84) متر وارتفاع (0.5) متر. ثبت فيه هدار حديدي بمقطع (18 سم × 50 سم) وسمك (0.6) سم لقياس تصريف الماء في القناة. وفي الجهة اليسرى للحوض وعلى بعد (1.75) متر مقدم الهدار يوجد بئر مراقبة من الخرسانة بأبعاد (15 سم × 15 سم) وبععمق (0.6) متر ذو وجه زجاجي لكي يمكن ملاحظة وقياس منسوب سطح الماء فوق الهدار بواسطة مقياس مثبت على الوجه الزجاجي منه. كما تم وضع مطفح على أحد جانبي القناة بأبعاد (34 سم × 34 سم) وعلى بعد (1.94) متر من بداية القناة للحفاظ على شحنة ثابتة مقدم بوابة التحكم ومن ثم الحصول على تصريف مستقر مع الزمن. إن منظومة الجريان الكلية هي منظومة مغلقة أي أن الماء الخارج من القناة يعود مرة ثانية إلى الخزان الأرضي وكما مبين في الشكل (3).

مواصفات المواد المستخدمة في التجارب

مواصفات الحصى

إن المواد المستخدمة لبناء الهدار والسلال الصخرية هي من الحصى النهري تم اختياره بمديات قليلة من المناخل لكي تتمكن من الحصول على الحجم المطلوب للحصى تمت عملية الفصل بتمرير الحصى من منخل معين وارتداده على منخل آخر حسب المواصفات وعند ذلك فإن الحجم المطلوب للحصى هو معدل حجم المنخلين. إن زوايا الاحتكاك الداخلي للحصى (f)

يمكن الحصول عليها باستخدام الطريقة التي تعتمد على قياس زاوية الاستكانة (Angle of Repose) للمواد وهي الطريقة الطبيعية الأكثر وضوحاً والتي يوضع فيها الحصى على مستوى مائل يمكن اعتبار زاوية الاستكانة هي نفسها زاوية الاحتكاك الداخلي وكما موضح في الجدول (2) وقد كانت ضمن الحدود التي أشار إليها الباحثان سايمونز وستورريك (15).

مواصفات السلال الصخرية

تم صنع السلال الصخرية المستخدمة في التجارب لحماية سفح المؤخر للهدار في المختبر من نوع خاص من أكياس النايلون المشبكة بسمك (0.5) ملم وبفتحات (5) ملم. هذه الأكياس تم إعدادها على شكل حقائب مستطيلة الشكل وبأبعاد (25سم × 20سم) ملئت بالحصى المطلوب إلى أن نحصل على السمك المطلوب للسلة الصخرية بمقدار (Ds) ولكل نوع، بعدها حُدد وزن السلة الصخرية ولكل حجم من الحصى. إن طريقة وضع السلال الصخرية على سفح المقدم والمؤخر كانت على النحو الآتي توضع في بداية سفح المؤخر أربعة سلال صخرية ثم يليها في الصف الثاني خمسة سلال صخرية بحيث تكون المفاصل متخالفة والتداخل بين الصفوف (5) سم كما مبين في اللوحة (1). كما تم تحديد الصلادة (Solidity) (a') (صلادة طبقة السلة الصخرية لكل نوع من الحصى من المعادلة الآتية (9):-

$$a' = \frac{m}{a_L b_L r_s h} \quad .. (27)$$

إذ إن :-

m = كتلة السلة الصخرية. وقيم الصلادة للسلال الصخرية تم توضيحها في الجدول (3)

التجارب المختبرية

تتلخص خطوات إجراء التجارب المختبرية بما يأتي :-

- 1- توضع السلال الصخرية على الهدار من مؤخره (سفح المؤخر) وانتهاءً بمقدمه (سفح المقدم) حيث وضعت السلال الصخرية بشكل متدرج على سفح المؤخر أما على القمة وسفح المقدم فقد تم وضعها بصورة مستوية وربطت السلال الصخرية مع بعضها على سفح المقدم والقمة.
- 2- تم تجهيز الماء (تشغيل المضخة) للقناة والتحكم بالتصريف الداخل إلى القناة عن طريق القفل الموجود في بداية القناة والبوابة. حيث يطفح الماء فوق الهدار تتم ملاحظة السلال الصخرية كما في اللوحة (2). تسجل القراءات المطلوبة وهي عمق الماء فوق القمة وعمق الماء العمودي وعمق الماء الذليل وارتفاع الماء فوق الهدار الموجود في نهاية القناة وبعد نصف ساعة يتم تغير التصريف وتتم ملاحظة حركة السلال الصخرية بصورة دقيقة وكذلك حركة الحصى الموجود داخل السلة الصخرية وتستمر التجربة بتغير التصريف كل نصف ساعة إلى أن يحدث الفشل أي تلاحظ حركة السلة الصخرية من زحف أو انقلاب وتسجل هذه القراءات ويتم حساب تصريف الفشل. ويؤخذ المعدل للتصريفين خلال الفشل وقبله. بعد زيادة كل تصريف فإن حركة السلال الصخرية تلاحظ بدقة ويسجل عدد السلال الصخرية المتحركة ورقم الصف الذي تحركت منه السلال الصخرية وفي أي صف بدأ الانهيار وتصور هذه الحالات وكما مبين في اللوحات (3) و (4) و (5).

تحليل ومناقشة النتائج المختبرية

تم دراسة مخطط سطح الماء على طول مقدم ومؤخر الهدار لكافة الميول (1V:2.5H إلى 1V:7.5H) عند مركز القناة على مسافة (40.5) سم من الجدار وذلك بقياس ارتفاع مستوى سطح الماء من منسوب الماء الذليل (Tailwater) وصعوداً إلى مؤخر النموذج ولعدة نقاط متقاربة أخرى باتجاه مقدم النموذج إلى أن يصبح سطح الماء أفقياً باتجاه الجريان وقد تم رسم مخطط سطح الماء لجميع تجارب البحث وتم اختيار نماذج لحالات مختلفة منها، كما في

الشكل (4) الذي يبين مخطط سطح الماء عند مركز القناة لنموذج الهدار بميل (1V:4H) ولحالة الربط الأفقي وكتلة السلة الصخرية (1.22) كغم . وإن بقية النماذج يكون فيها مخطط سطح الماء مشابهاً لما في الشكل أعلاه.

تصريف الفشل Failure Discharge

إن المقصود بتصريف الفشل هو التصريف الذي يحدث فيه فشل طبقة الحماية (السلال الصخرية) للهدار وتؤخذ قيمته على أساس التصريف الذي يعطي فشل (100%) للسلال الصخرية الموضوع على سفح المؤخر للهدار وتكون قيمة التصريف التصميمي مساوية إلى (50%) من تصريف الفشل عندها يكون المنشأ أميناً بمعامل أمان يساوي (2) (16).

العوامل المؤثرة على تصريف الفشل

ميل السفح المؤخر Downstream Slope

إن إحدى الأهداف الأساسية للبحث هي دراسة تأثير ميل سفح المؤخر على تصريف الفشل وقد رسمت العلاقة بين الميول الخمسة وتصريف الفشل لحالات وضع السلال الصخرية على سفح المؤخر (بطبقة واحدة بدون ربط (M-1) ، بربط السلال الصخرية أفقياً (M-H) ، بربط السلال الصخرية رأسياً (M-V) ، بطبقتين بدون ربط (M-2)) للكتل الثلاثة (1.05, 1.22, 1.51) كغم كما في الأشكال من (5-أ) إلى (5-ج) ، والعلاقة التي تربط تصريف الفشل وميل سفح المؤخر يمكن كتابتها كالتالي:-

$$q_f = a_1 S^{b_1} \quad \dots (28)$$

إذ إن:

$$q_f = \text{تصريف الفشل لكل وحدة عرض} , a_1, b_1 = \text{معاملات} .$$

ويلاحظ من نتائج المعادلة (28) أن تصريف الفشل يزداد كلما يقل ميل سفح المؤخر وهذا ما لوحظ فعلاً في الأشكال (5-أ) و (5-ب) و (5-ج) وهذا يعني أن زيادة التصريف يؤدي إلى زيادة سرعة الجريان على سفح المؤخر مما يؤدي إلى زيادة قوة السحب التي تعمل على تحريك السلة الصخرية على السفح. ويلاحظ من الجدول (4) أن العلاقة التي تربط بين تصريف الفشل وميل سفح المؤخر علاقة عكسية حيث يتراوح معامل الارتباط (R) بين (0.912) و (0.999).

كتلة السلال الصخرية

استخدمت في البحث ثلاثة كتل للسلال الصخرية بثلاثة أقطار مختلفة وقد لوحظ من التجارب المختبرية كلما زادت كتلة السلة الصخرية زاد تصريف الفشل وإن الزيادة في قطر الحصى المستخدم يسبب زيادة في كتلة السلة الصخرية ومن ثم زيادة مركبة قوى الوزن العمودية على الجريان التي بدورها تؤدي إلى زيادة مقاومة الفشل (الحركة) . ورسمت العلاقة بين تصريف الفشل وكتلة السلة الصخرية وللميول الخمسة المستخدمة للهدار (1V:2.5H) إلى (1V:7.5H) وللحالات الخمسة (M-1, M-H, M-V, M-2, M-3) وكانت العلاقة التي تربط تصريف الفشل وكتلة السلة الصخرية كالتالي:-

$$q_f = a_2 W_g^{b_2} \quad \dots (29)$$

إذ إن:

$$a_2, b_2 = \text{ثوابت} و W_g = \text{كتلة السلة الصخرية} .$$

وقد تم إيجاد قيم المعاملات (a₂, b₂) ومعامل الارتباط (R) وكما مبينة في الجدول (5) . ومن ملاحظة الجدول يتبين بأن هناك علاقة طردية تربط بين تصريف الفشل وكتلة السلة الصخرية حيث يتراوح معامل الارتباط (R) بين (0.93) و (0.999). والإشكال من (6-أ) إلى (6-د) توضح العلاقة بين تصريف الفشل وكتلة السلة الصخرية من الميل (1V:2.5H) إلى الميل (1V:5H) على التوالي ، ومن هذه الأشكال يتبين أنه كلما يقل الميل تقل حالات الربط

المستخدمة لإيجاد تصريف الفشل ، في الشكلين (6-أ) و(6-ب) طبقت حالات الوضع الخمسة على الميلين، أما الشكل(6-ج) فقد طبقت فيه أربع حالات وضع ، والشكل (6-د) طبقت فيه ثلاث حالات وضع ، مما يدل على أن تصريف الفشل يزداد بزيادة قطر الحصى وزيادة كتلة السلة الصخرية ونقصان الميل.

ربط السلال الصخرية مع بعضها

إن ربط السلال الصخرية مع بعضها سواء كان الربط أفقياً (M-H) أم رأسياً (M-V) يؤدي إلى زيادة تصريف الفشل حيث يزداد تصريف الفشل في حالة ربط السلال الصخرية مع بعضها البعض أفقياً أو رأسياً ويعزى سبب ذلك بأن حالة الفشل لا تحدث إلا عند حركة المجموعة المربوطة كلها مع بعضها أو حركة الحصى من جسم الهدار تحت السلال الصخرية وهذا يحتاج إلى تصاريح أكبر للحدوث لاسيما في حالة الربط الرأسى.

معادلات تصريف الفشل لوضع السلال الصخرية المتدرجة

كل التجارب التي أجريت في المختبر هي لمعرفة استقرارية السلال الصخرية المستخدمة في حماية سفح المؤخر للهدار الركامي من التعرية والانحيار نتيجة جريان الماء من فوقه. إن العوامل المؤثرة على تصريف الفشل كثيرة منها ميل سفح المؤخر (S) وعدد طبقات السلة الصخرية (NL) وظل زاوية الوضع للسلة الصخرية ($\tan f_g$) وصلادة طبقة السلة الصخرية (a') ومعدل قطر الحصى المستخدم (D_s) والتعجيل الأرضي (g) والكثافة الكتلية الماء (r_w) والكثافة الكتلية للحصى (r_s) وكثافة الكتلة المغمورة ($r_s - r_w$) ولزوجة الماء (m). وإن تصريف الفشل للهدار الركامي المحمي بالسلال الصخرية المتدرجة يكون دالة لهذه المتغيرات.

$$q_f = f(S, NL, \tan f_g, a', D_s, g, r_w, r_s - r_w, m) \quad \dots (30)$$

وباتباع عملية التحليل البعدي وباستخدام نظرية باي [Pi-Theorem] يمكن صياغة العلاقة (30) على النحو الآتي:-

$$\frac{q_f}{g^{1/2} D_s^{3/2}} = f\left(\frac{r_s - r_w}{r_w}, Re, (NL), \tan f_g, a', S\right) \quad \dots (31)$$

إذ إن:-

Re = رقم رينولدز يصف تأثير لزوجة الجريان وعندما تكون أرقام رينولدز عالية يصل الجريان إلى حالة الاضطراب الكامل عندها يضمحل تأثير اللزوجة في القنوات المفتوحة الخشنة وبذلك يمكن إهماله. وبإعادة ترتيب المتغيرات في المعادلة (31) يمكن كتابتها بالشكل الآتي:-

$$q_f = C_s \left(g^{1/2} D_s^{3/2} \left(\frac{r_s - r_w}{r_w} \times a' \times \tan f_g \right)^{e_1} (NL)^{e_2} (S)^{e_3} \right) \quad \dots (32)$$

إذ إن:-

e_3, e_2, e_1 = أسس المتغيرات، C_s = ثابت لا بعدي يمثل معامل تصريف الفشل، تم إيجاد قيم الأسس (e_3, e_2, e_1) عن طريق إدخال البيانات لكل المتغيرات وباستخدام طريقة الـ (Nonlinear Regression) في برنامج إحصائي (SPSS VER 10) وكانت المعادلات بالشكل الآتي:-

أ-في حالة وضع السلال الصخرية على سفح المؤخر بشكل (M-1, M-2, M-3):

$$q_f = C_s \left(g^{1/2} D_s^{3/2} \left(\frac{r_s - r_w}{r_w} \times a' \times \tan f_g \right)^{3.62} (NL)^{0.89} (S)^{-1.57} \right) \dots (33)$$

وكذلك تم إيجاد معادلات خاصة لحالة الربط الأفقي (M-H) وحالة الربط العمودي (M-V) كل على حده وكانت المعادلات على النحو الآتي:-
1- حالة الربط الأفقي (M-H):

$$q_f = C_s \left(g^{1/2} D_s^{3/2} \left(\frac{r_s - r_w}{r_w} \times a' \times \tan f_g \right)^{2.47} (S)^{-1.47} \right) \dots (34)$$

حيث إن قيمة $C_s = 1.839$ ومعامل الارتباط $R = 0.976$
2- حالة الربط العمودي (M-V):

$$q_f = C_s \left(g^{1/2} D_s^{3/2} \left(\frac{r_s - r_w}{r_w} \times a' \times \tan f_g \right)^{2.3} (S)^{-1.51} \right) \dots (35)$$

حيث إن قيمة $C_s = 1.804$ ومعامل الارتباط $R = 0.972$.

زيادة نسبة تصريف الفشل مع عدد الطبقات

إن تصريف الفشل يزداد بزيادة عدد طبقات السلال الصخرية على سفح المؤخر للهدار بشكل متدرج وغير متدرج، والجدول (6) يوضح النسبة المئوية لزيادة تصريف الفشل مع عدد طبقات السلال الصخرية.

طريقة التصميم Design Method

إن إحدى الأهداف الرئيسية لهذه الدراسة هي الحصول على طريقة تصميمية لحماية الهدارات الركامية باستخدام السلال الصخرية المتدرجة ولهذا الغرض فقد تم رسم منحنيات تصميمية بالاعتماد على المعادلات (33 و 34 و 35) والجدول (3) يستفاد منها في الحياة العملية كطريقة تصميمية بسيطة كما في الأشكال (أ7) إلى (هـ7) ولأقطار مختلفة من الحصى .
تتضمن الطريقة التصميمية الخطوات الآتية:-

1- إجراء دراسة شاملة للموقع الذي سيقام فيه السد ويقدر معدل الجريان الأعظم المتوقع في ذلك الموقع.
2- يمكن اختيار ميل مناسب للسفح المؤخر للسد حيث إن الميول الشديدة (الحادة) تعطي تصاريق فشل أقل من التصاريق التي تعطيها الميول المنبسطة وكما بينتها نتائج الدراسة الحالية.
3- يحدد حجم الحصى (الصخر) المستخدم في ملء السلال الصخرية حسب توفره في موقع العمل أو بالقرب من الموقع كما أن عدد الطبقات يمكن الاستعاضة عنها بربط السلال الصخرية أفقياً أو رأسياً مع بعضها.
4- يمكن الحصول على تصريف الفشل من المنحنيات (15) إلى (5هـ) التي توضح العلاقة بين معدل قطر الحصى وتصريف الفشل ومن الضروري الأخذ بنظر الاعتبار معامل أمان يساوي (2) (أي حاصل قسمة معدل تصريف الفشل على قيمة الجريان الأعظم يجب أن يكون مساوياً أو أكبر من معامل الأمان) وإن لم يتم الحصول على هذه النسبة ففي هذه الحالة يتم زيادة القطر المستخدم أو زيادة عدد طبقات السلة الصخرية أو كلاهما وإذا لم يتم الحصول على التصريف المطلوب فيجب اختيار ميل أقل لسفح المؤخر للهدار.

بعد اشتقاق النموذج الرياضي المبين ولغرض تطبيقه فإنه يتطلب إيجاد عدد من المتغيرات من التجارب، مثل كتلة طبقة السلال الصخرية الموضوعة على سفح المؤخر للهدار لكل متر مربع، وهذا يتم بالرجوع إلى الجدول (1) الذي يبين فيه عدد طبقات السلال الصخرية الموضوعة على سفح المؤخر. إن كتلة السلال الصخرية لكل أنواع الحصى المستخدم مبينة في الجدول (3). عندها يتم حساب الكثافة الكتلية لكل متر مربع للطبقة، ويتم معرفة طول الميل الرئيس للسفح وعرضه، والكثافة (r_s) من حاصل قسمة الكتلة على حجم الطبقة، حيث يؤخذ ارتفاع الطبقة مساوياً إلى القطر (D_s) ولكل كتلة من الكتل المستخدمة كما مبين في الجدول (7). وقيم زاوية الاستكانة (f_g) من الجدول (3) بعدها يتم فرض قيمة السمك المؤثر لطبقة الحماية (h) لتحقيق غايتين الأولى هي الاقتراب من التصريف الحقيقي المقاس للفشل والثانية تحقيق قيمة عالية لصلادة طبقة السلال الصخرية. وتحسب صلادة السلة الصخرية من المعادلة (1) بعد ذلك تحدد خشونة وجه مادة الحماية (b') من المعادلة (2) وإن حجم الخشونة المؤثر (r') يكون مساوياً لـ (D_s). بعد ذلك يتم حساب كل من قيم ($h_c, K_3, K_2, K_1, C, A, \tan f_g$) للكتل الثلاثة باستخدام برنامج الـ (Matlab) كما موضحة في الجدول (8). بعد ذلك يتم حساب قيمة (d_c) من المعادلة (10) وقيم تصريف الفشل من المعادلة (25). تقارن قيم تصريف الفشل المحسوبة مع قيم تصريف الفشل المقاسة وتعاد هذه العملية عدة مرات إلى أن يتم الحصول على قيم متقاربة للتصريف المقاس مع التصريف المحسوب وبعدها يحدد معامل تصحيح تصريف الفشل (C_f) بقسمة تصريف الفشل المقاس على تصريف الفشل المحسوب كما في الجدول (9). ولغرض الحصول على قيمة حقيقية لتصريف الفشل تضرب القيم المحسوبة للتصريف بـ (C_f) ومن الجدول (9) يلاحظ أن قيم (C_f) تكون أقل من واحد في الميول (1V:2.5H, 1V:3H, 1V:4H)، وأقل من واحد للميل (1V:5H) للكتلة (1.05) كغم و (1.22) كغم، وأكبر من واحد للكتلة (1.510) كغم. أما الميل (1V:7.5H) فكانت جميع قيم (C_f) أكبر من واحد. ويعزى السبب إلى أن تصريف الفشل في الميول العالية أقل منه للميول المنبسطة. وقد رسمت العلاقة بين تصريف الفشل المحسوب من المعادلة (18) وتصريف الفشل المقاس من التجارب المختبرية في الشكل (8) ومن الشكل نلاحظ تقارب بعض القيم من خط التوافق الأمثل (Perfect agreement).

الاستنتاجات

من هذا البحث تم التوصل إلى الاستنتاجات الآتية:-

- 1- مخطط سطح الماء كان متعرجا ولاسيما عند التصريف القليلة لكنه كان سلساً (Smooth) عند التصريف العالية.
- 2- تم اشتقاق العديد من المعادلات الوضعية التي تربط تصريف الفشل مع ميل سفح المؤخر وكتلة السلال الصخرية وظهر وجود علاقة عكسية بين تصريف الفشل وميل سفح المؤخر للهدار ولوحظ زيادة تصريف الفشل بزيادة وزن السلال الصخرية وعدد الطبقات ومعدل قطر الحصى.
- 3- تم الحصول على معادلات لحساب تصريف الفشل لكافة حالات وضع وربط السلال الصخرية.
- 4- تم تقديم طريقة تصميمية مبسطة لحماية الهدارات الركامية باستخدام السلال الصخرية وعلى شكل منحنيات تمثل العلاقة بين تصريف الفشل ومعدل قطر الحصى والتي يمكن اختيار حالة وضع وربط السلال الصخرية مع بعضها أو عدم ربطها.

5- من معرفة الخصائص الفيزيائية الظاهرية للنماذج الخمسة تم اشتقاق نموذج رياضيائي بناءً على فرضيات معينة لحالة الفشل بالزحف. وتم وضع علاقات رياضية تربط بين المتغيرات، وعند تطبيق النموذج الرياضي تم الحصول على تصاريح قريبة من القيم المختبرية وللكتل الثلاثة من السلال الصخرية المدروسة وبمعامل تصحيح لكل ميل من الميول الخمسة والحل الرياضيائي لحالة الفشل بالزحف هو الآتي:-

$$\left(\frac{d_c}{h}\right) = \left[\frac{K_3 S^{3/10}}{(\tan f_g - S)} \left(\frac{S}{\tan f_g} + \frac{I}{K_2} + \frac{IS}{K_1} - 1 \right) \right]^{10/9}$$

حيث يحسب عمق الماء الحرج ومنه يحسب تصريف الفشل ومن ثم يضرب في معامل التصحيح.

6- من ملاحظة التجارب المختبرية التي نفذت تبين أن الفشل بالزحف هو الأكثر حدوثاً من الفشل بالانقلاب.

7- ربط السلال الصخرية مع بعضها يمنعها من الحركة الانفرادية والعشوائية.

8- عند استخدام الكتل الصغيرة في الحماية يكون سفح المؤخر غير مستقر لذا ينصح بتجنب استخدام هذه الكتل.

المصادر

- [1].AL- Mohammad, F.M.D.,1991,“ An Experimental Study of the Downstream Slope Stability With Overflow Rockfill Embankments”, M.Sc.Thesis, Department of Irrigation and Drainage Engineering , Mosul University, Mosul, Iraq (In Arabic).
- [2].Parkin, A.K., Trollope, D., and Lawson, J.D., 1966, “Rockfill Structures Subject to Water Flow”, Journal of . Soil Mechanics and. Foundation, Division., ASCE, November.
- [3].Wilkins, J.K., 1956, “Flow Through Rockfill and Its Application To The Design of Dams”, Proceeding 2nd Australia - NewZeland Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Christchurch.No.5PP.141-148.
- [4].Chanson, H. (2001, b) "Characterstiques diphasiques des ecoulements sur les coursier en marches descalier (Two-Phase Flow Properties of Stepped Spillway Flows)", Eau-resources, aménagement , environnement, La Houille Blanche, No. 8, pp (16-28).
- [5].Freeman, G.E.,and Fischenich, J.C., 2000 “Gabion for Stream Banks Erosion Control” Engineering Research and Progress, U.S. Army Engineer Research.
- [6].Stefano, C.S., and Ferro, V., 1998 “Calculating Average Filling Rock Diameter for Gabion- Mattress Channel Design”, Journal of Hydraulic Engineering ASCE, Vol. 124, No. 9. PP. 975-978 September.
- [7].Yoon, T.H.,"Wire Gabion for Protecting Bridge Piers", 2005, Journal of Hydraulic Engineering, Vol., 131, Issue11, PP.942-949, November.
- [8].Maynord, S.T., 1995, “Gabion – Mattress Channel Protection Design” Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 7, PP. 519-522, July.
- [9].Smith, K.V.H., 1979, “Wadi Surdud Model Testing of Weirs” Report on a Study Made in Collaboration with Sir William Halcrow and Partners, Swindan, February.
- [10].Stephenson, D., 1980, “The Stability of Gabion Weirs”, International Water Power and Dam Construction Vol. 32 No.4 April, PP. 24-28.

- [11].Gerodetti, M., 1981, "Model Studies of an Over-Topped Rockfill Dam", International Water Power and Dam Construction, Vol. 33 No. 90.
- [12].Dawood, B.K,1999 , "Laboratory Study on the Stability of Earth Weirs Protected by Gabions", Ph.D. Thesis, Department of Irrigation and Drainage Engineering, Mosul University, Mosul, Iraq (In Arabic).
- [13].Hayawi, G.A, 2006, "Laboratory Study on Protecting Downstream Slope Of Rockfill Weirs Using Gabions", Ph.D. Thesis, Department of Water Resources Engineering, Mosul University, Mosul, Iraq (In Arabic).
- [14].ASTM standard, 1972, "Method for Particle Size Analysis of Soils" Designation, D422-63, PP. 112-122.
- [15].Simons, D.B.,and Senturk ,F., 1976,"Sediment Transport Tec-hnology",Water Resources Publications, Fort Collin,Colorrado,U.S.A.
- [16]Putrus, P.K., 1986, " Investigation of Low Cost Hydraulic Structures Using Rock Protecting Slopes", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Southampton University, Southampton, U.K.

الجدول (1): الأبعاد المهمة في النماذج المستخدمة في الحالة المتدرجة.

الميل	1V:2.5H	1V:3H	1V:4H	1V:5H	1V:7.5H
1	1.25	1.50	2.0	2.5	3.75
2	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3	1.346	1.58	2.06	2.55	3.783
4	6.73	7.9	10.3	12.7	18.9
5	26.92	31.6	41.2	51	75.66
6	53.84	63.2	82.4	102	151.32
7	80.76	94.8	-	-	-
8	21.8	18.44	14.04	11.31	7.6

الجدول (2): مواصفات الحصى المستخدم في الهدار والسللة الصخرية

نوع الحصى	يمر من منخل (ملم)	يرتد على منخل (ملم)	D_s (ملم)	Φ^0
A	12.7	9.52	11.11	32.0
B	19.1	12.7	15.90	32.8
C	25.4	19.1	22.25	34.0

الجدول (3) مواصفات السلال الصخرية المستخدمة في التجارب وبأبعاد (20 × 25) سم

Φ_g^0	a'	r_s (غم / سم ³)	الحجم (سم ³)	الكتلة (غرام)	D_s (ملم)
34.2	0.716	2.638	398	1050	11.11
35.4	0.576	2.664	458	1220	15.9
36.7	0.500	2.720	555	1510	22.25
35.4	0.597	2.674	470.33	1260	المعدل

الجدول (4) قيم المعاملات (b_1 و a_1) ومعامل الارتباط (R) للمعادلة (28).

M-2			M-V			M-H			M-1			حالة الوضع الكتلة (كغم)
R	b_1	a_1										
0.970	-2.87	1.708	0.923	1.894	3.74	0.912	-1.67	3.982	0.943	1.619	3.9	1.51
0.990	2.979	1.336	0.991	1.715	3.723	0.983	1.534	4.106	0.984	1.615	3.6	1.22
0.968	2.195	2.712	0.996	1.455	4.321	0.999	1.609	3.095	0.998	1.666	2.7	1.05

الجدول (5) قيم المعاملات (b_2, a_2) ومعامل الارتباط (R) للمعادلة (29).

M-3			M-2			M-V			M-H			M-1			حالة لوضع الميل
R	b_2	a_2													
0.9	0.6	19.	0.9	0.5	17.	0.9	0.2	15.	0.9	0.2	13.	0.9	0.2	11.	1V:2.5
95	94	74	96	16	20	36	94	68	8	44	33	86	37	86	H
0.9	0.7	48.	0.9	0.7	36.	0.9	1.4	23.	0.9	1.5	18.	0.9	1.2	17.	1V:3H
90	72	68	86	27	75	98	55	50	99	07	57	96	19	61	
-	-	-	0.9	0.7	64.	0.9	0.9	30.	0.9	0.9	29.	0.9	0.8	29.	1V:4H
-	-	-	87	07	14	80	49	68	99	35	43	99	21	02	
-	-	-	-	-	-	0.9	1.3	42.	0.9	1.7	40.	0.9	1.2	41.	1V:5H
-	-	-	-	-	-	92	02	73	84	27	78	91	37	00	

الجدول (6): النسبة المئوية لزيادة تصريف الفشل مع عدد طبقات السلال الصخرية

1V:7.5H			1V:5H			1V:4H			1V:3H			1V:2.5H			الميل
1.51 0	1.22 0	1.05 0	1.51 0	1.22 0	1.05 0	1.51 0	1.22 0	1.05 0	1.51 0	1.22 0	1.05 0	1.51 0	1.22 0	1.05 0	الكثافة (كغم) حالة وضع السلال الصخرية
تصريف الفشل (لتر/ثا.م.) للحالة المتدرجة															
82.0 4	78.3 7	74.1 1	68.9 0	49.3 6	41.8 8	40.4 4	34.0 1	28.9 8	28.4 7	22.56	17.3 4	13	12.5 1	11.8 3	M-1
النسبة المئوية لزيادة تصريف الفشل															
-	-	-	-	95.7 5	108. 14	132. 55	117. 87	75.5 2	80.5	115. 2	62.7 8	52.8 8	44. 8	M-2	
-	-	-	-	-	-	-	لم يحص ل فشل	136	140.9 6	184. 66	99.6 1	80.3 3	65. 34	M-3	
-	3.51	3.82	13.7 5	5.02	1.41	5.74	11.3 8	13.4 6	19.4 6	9.56	6.34	12.3 1	13.5 1	11. 9	M-H
-	-	10.1 3	15.8 4	12.0 5	3.51	9.37	26.5 8	9.94	50.1 9	16.13	36.9 7	37.2 3	35.1 7	31. 53	M-V

الجدول (7): كتلة وكثافة طبقة السلة الصخرية للكتل الثلاثة

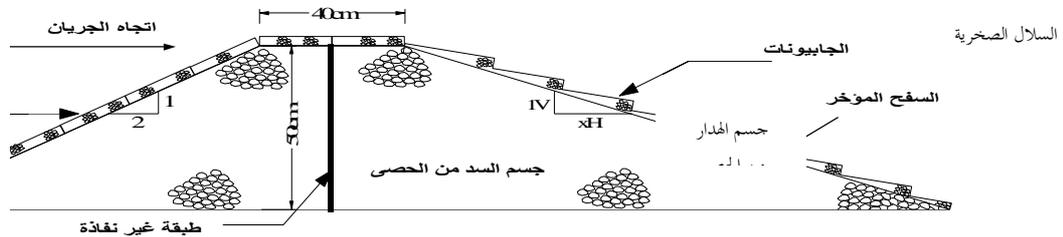
1V:7.5H		1V:5H		1V:4H		1V:3H		1V:2.5H		كتلة السلة الصخرية رصة (كغم)
r_s كغم/م ³	M كغم/م ²									
2333. 57	25.92	2333.5 7	25.92	2333.5 7	25.92	2333.5 7	25.92	2333.5 7	25.93	1.05 0
1894. 55	30.12	1894.5 5	30.12	1894.5 5	30.12	1894.5 5	30.12	1894.5 5	30.12	1.22 0
1675. 68	37.28	1675.6 8	37.28	1675.6 8	37.28	1675.6 8	37.28	1675.6 8	37.28	1.51 0

جدول (8): قيم المتغيرات المطلوبة للنموذج الرياضي وللكتل الثلاثة من السلال الصخرية.

K_3	K_2	K_1	C	$\tan \Phi_g$	A	r	a''	h	r_s (المعدل) كغم/م ³	M (المعدل) كغم/م ²	كتلة السلالة الصخرية كغم
5.03	1.31	1.93	0.324 2	0.68	0.93	0.0111 1	0.69 4	0.0160	2333.57	25.92 2	1.050
4.73	1.26	1.77	0.324 2	0.71	0.77	0.0159	0.85 9	0.0185	1894.55	30.12	1.220
4.55	1.22	1.64	0.324 2	0.75	0.64	0.0222 5	0.94 5	0.0235 5	1678.68	37.28	1.500

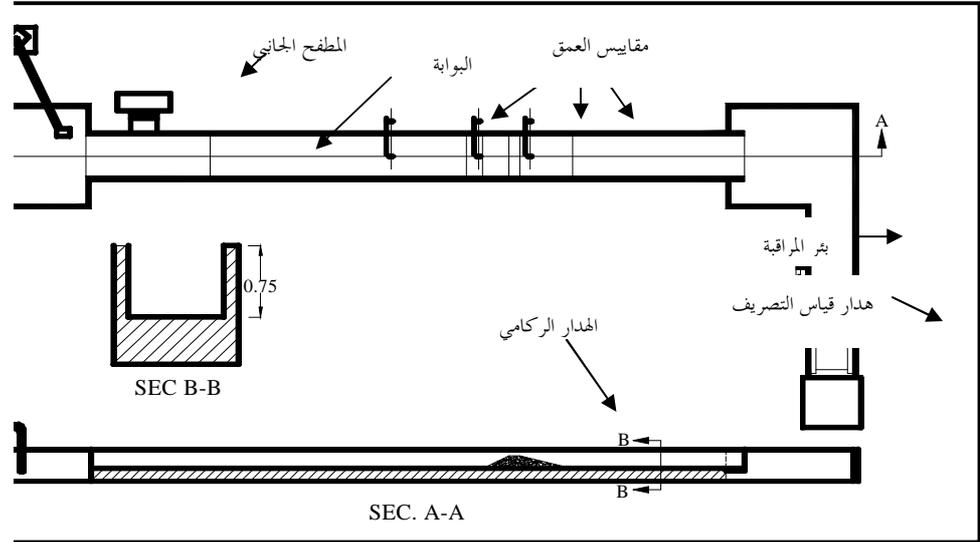
الجدول (9): معامل تصحيح تصريف الفشل (C_f) للنموذج الرياضي.

(1V : 7.5H)			(1V : 5H)			(1V : 4H)			(1V : 3H)			(1V : 2.5H)			الميل كتلة السلالة الصخرية (كغم)
C_f	q_f المقا س ب لتر/ لتر. (م)	q_f المقا س ب لتر/ لتر. (م)	C_f	q_f المقا س ب لتر/ لتر. (م)	q_f المقا س ب لتر/ لتر. (م)	C_f	q_f المقا س ب لتر/ لتر. (م)	q_f المقا س ب لتر/ لتر. (م)	C_f	q_f المقا س ب لتر/ لتر. (م)	q_f المقا س ب لتر/ لتر. (م)	C_f	q_f المقا س ب لتر/ لتر. (م)	q_f المقا س ب لتر/ لتر. (م)	
1.2 9	57. 3	74. 11	0.7 8	54. 1	41. 9	0.5 6	51. 8	28. 98	0.5 1	33. 8	17. 34	0.8 5	13. 9	11. 83	1.050
1.3 2	59. 66	78. 37	0.8 9	55. 64	49. 36	0.6 4	53. 64	34. 01	0.6 5	34. 77	22. 56	0.8 3	15. 1	12. 50	1.220
1.1 1	73. 66	82. 04	1.0 03	68. 71	68. 9	0.6 2	65. 67	40. 44	0.6 6	43. 4	28. 47	0.6 5	20	13	1.510

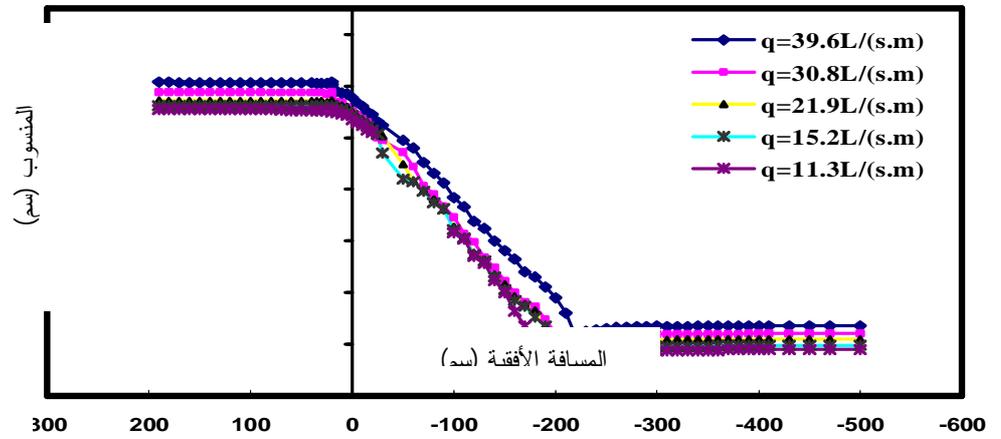


مقطع طولي للسد الركامي الغاطس

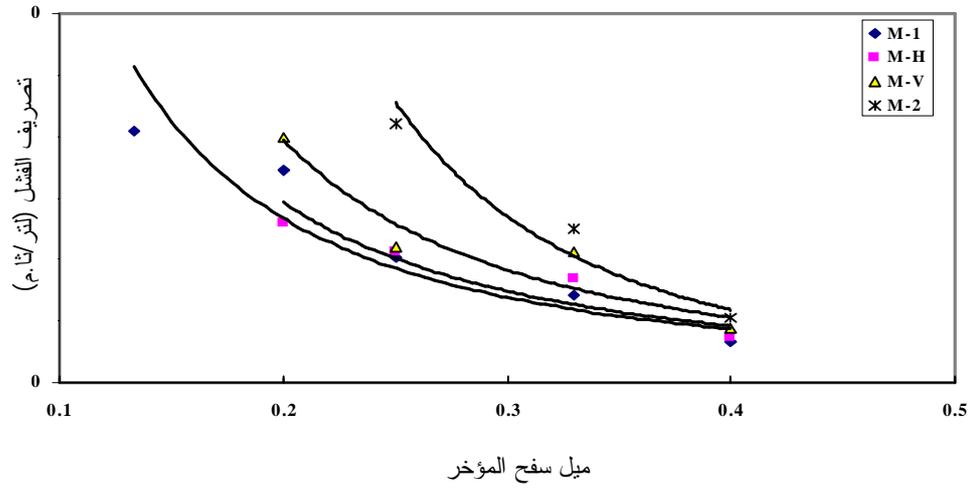
الشكل (1): القوى المؤثرة على طبقة السلالة الصخرية



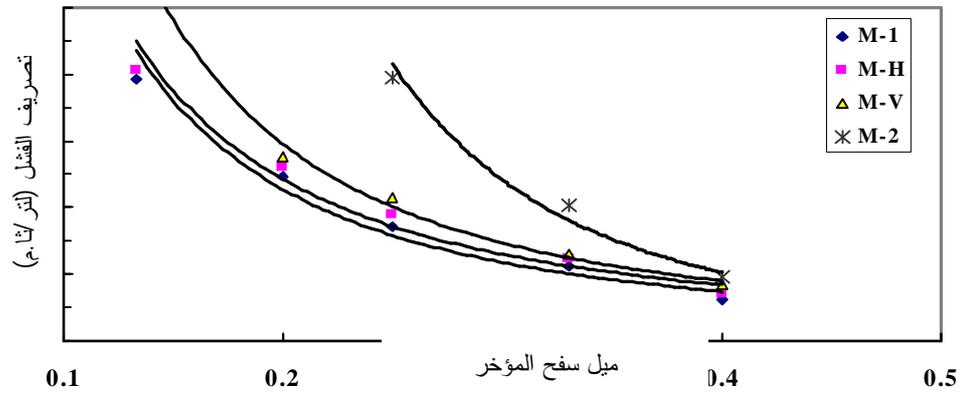
الشكل (2) : مقطع طولي للهدار الركامي



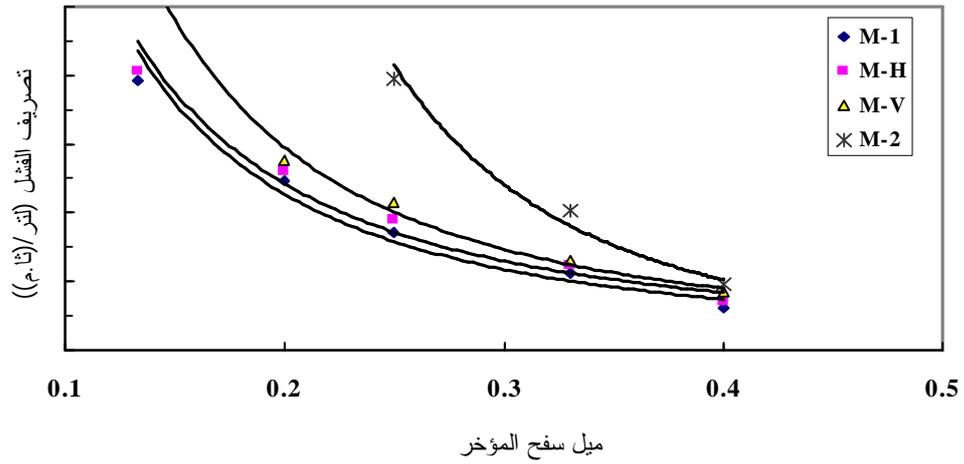
الشكل (3): القناة المختبرية المستخدمة



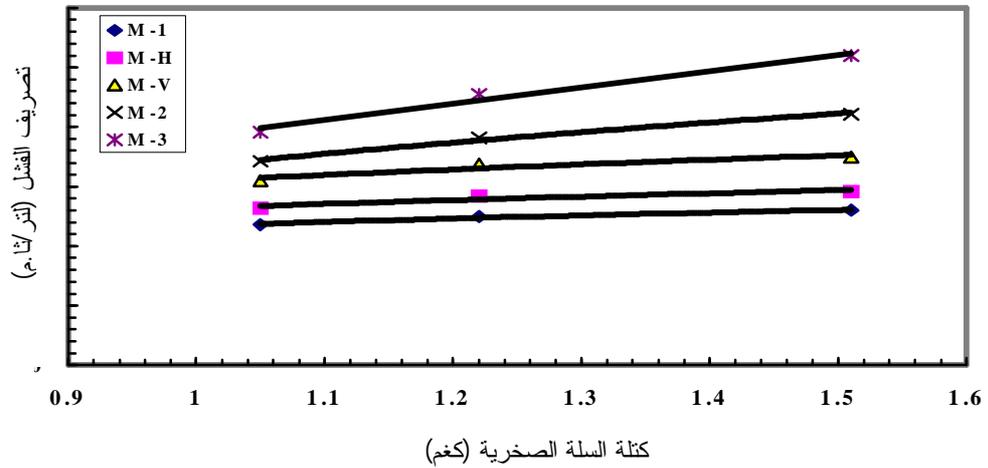
الشكل (4) : شكل سطح الماء للميل (1V:4H) والربط (M-H) وكتلة السلة الصخرية (1.22) كغم



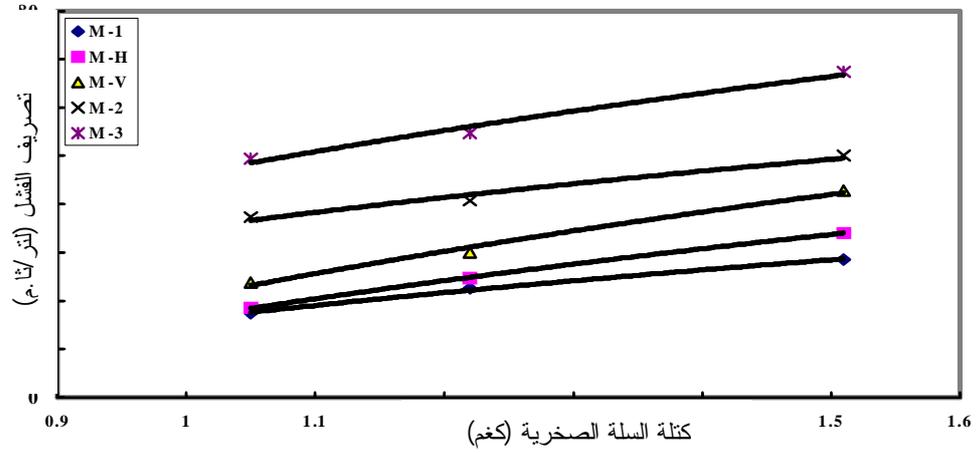
الشكل (5أ): العلاقة بين تصريف الفشل وميل سفح المؤخر
لكتلة السلة الصخرية (1.510) كغم



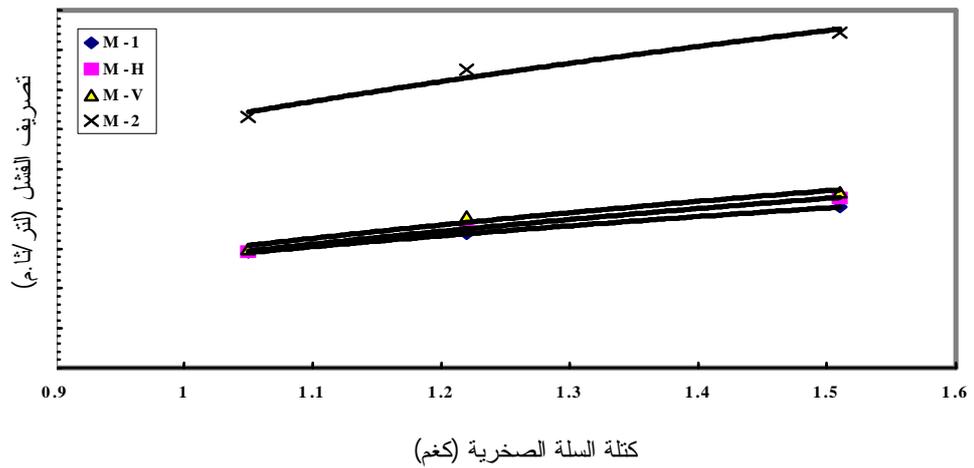
الشكل (5ب): العلاقة بين تصريف الفشل وميل سفح المؤخر
لكتلة السلة الصخرية (1.220) كغم



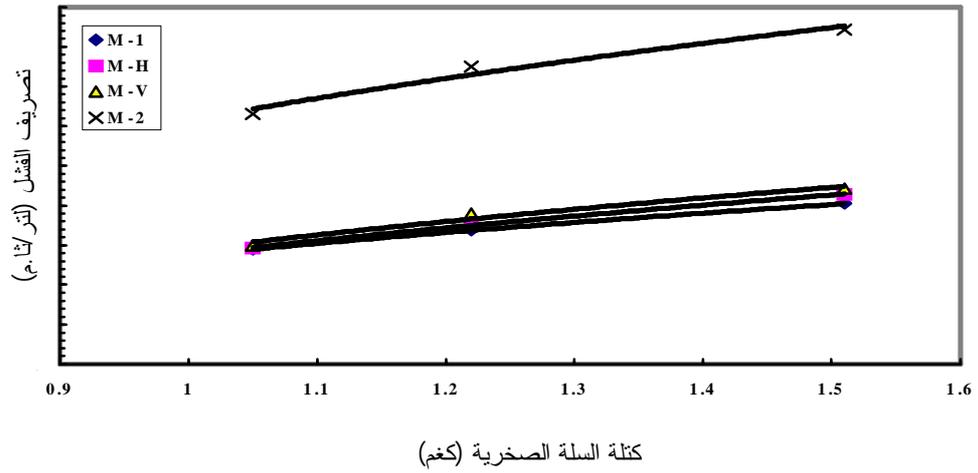
الشكل (5ج): العلاقة بين تصريف الفشل وميل سفح المؤخر
لكتلة السلة الصخرية (1.05) كغم



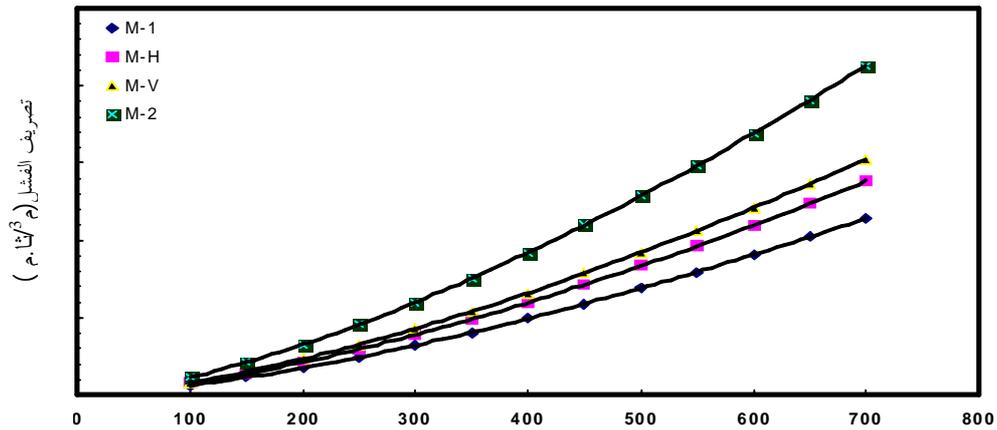
الشكل (أ 6): العلاقة بين تصريف الفشل وكتلة السلة الصخرية للميل (1V:2.5H)



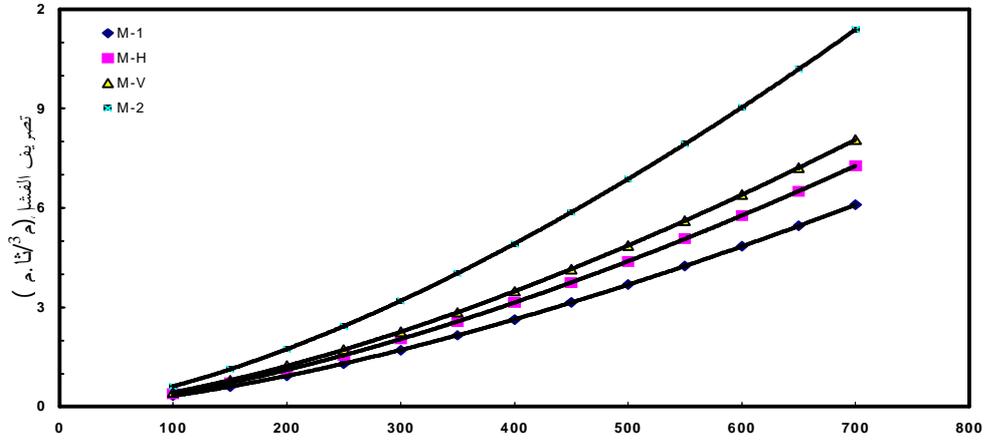
الشكل (ب 6): العلاقة بين تصريف الفشل وكتلة السلة الصخرية للميل (1V:3H)



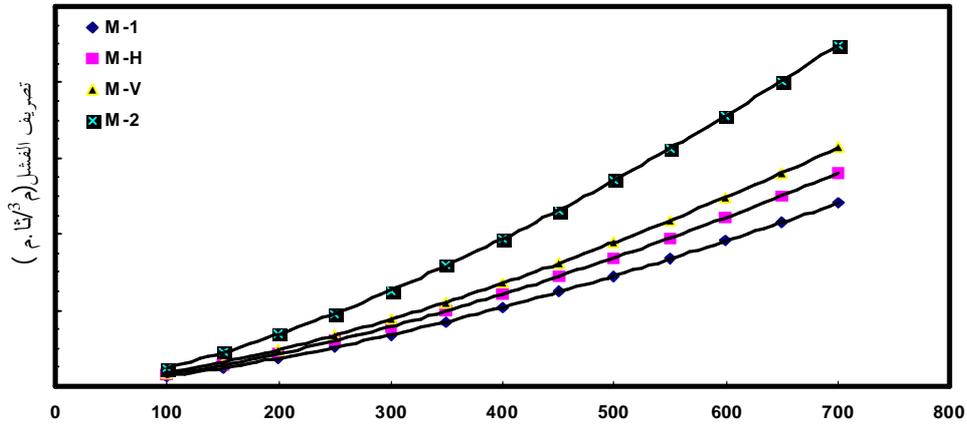
الشكل (6 ب): العلاقة بين تصريف الفشل وكتلة السلة الصخرية للميل (1V:4H)



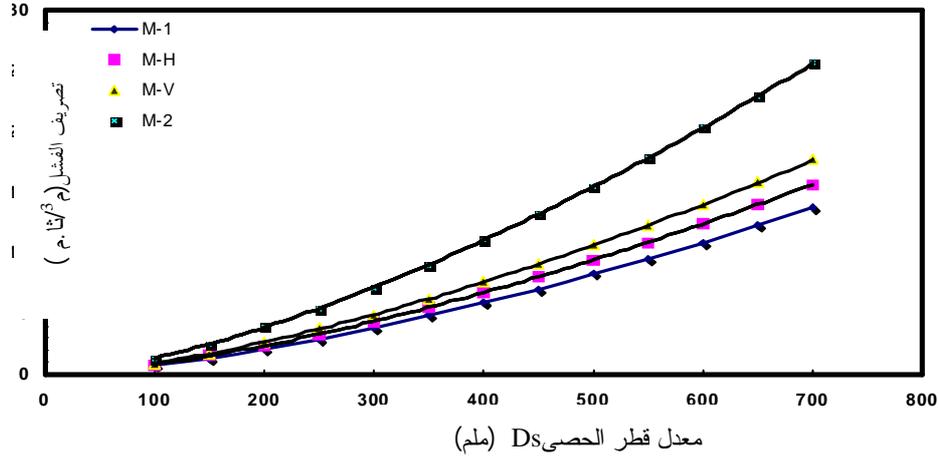
الشكل (6 د): العلاقة بين تصريف الفشل وكتلة السلة الصخرية للميل (1V:5H)



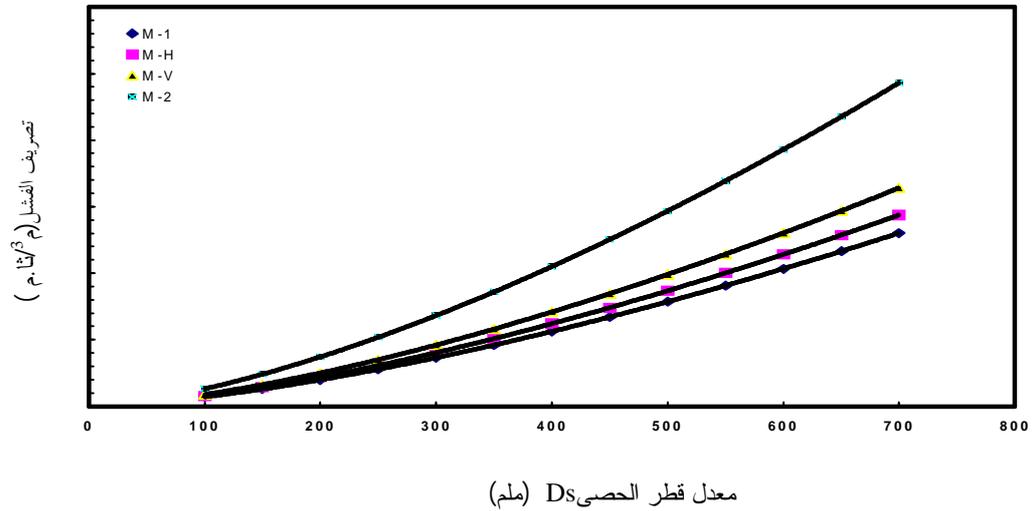
الشكل (أ7): المنحنى التصميمي للعلاقة بين تصريف الفشل ومعدل قطر
الحصى لحالات الوضع الأربعة للميل (1V:2.5H).



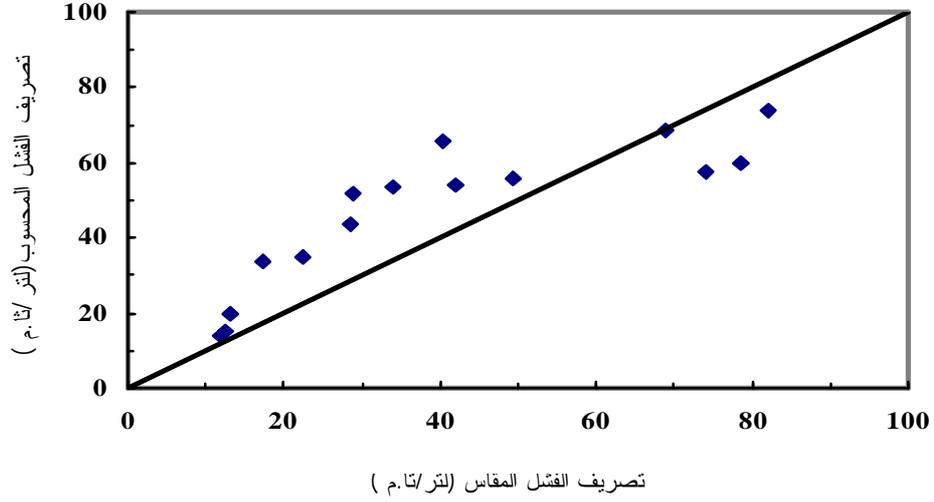
الشكل (ب7): المنحنى التصميمي للعلاقة بين تصريف الفشل ومعدل قطر
الحصى لحالات الوضع الأربعة للميل (1V:3H).



الشكل (7ب): المنحنى التصميمي للعلاقة بين تصريف الفشل ومعدل قطر الحصى لحالات الوضع الأربعة للميل (1V:4H).



الشكل (7د): المنحنى التصميمي للعلاقة بين تصريف الفشل ومعدل قطر الحصى لحالات الوضع الأربعة للميل (1V:5H).



الشكل (7هـ) : المنحنى التصميمي للعلاقة بين تصريف الفشل ومعدل قطر
الحصى لحالات الوضع الأربعة للميل (1V:7.5H) .



اللوحة (1) : وضع السلال الصخرية على سفح المؤخر للهدار الركامي قبل التشغيل للميل
(1V:7.5H) للحالة (M-1) والكتلة (1.22) كغم



اللوحة (3): حالة الفشل أثناء التشغيل للميل (1V:2.5H)
للحالة (M-3) والكتلة (1.05) كغم



اللوحة (2): صورة للهدار الركامي في حالة التشغيل
للميل (1V:5H) للحالة (M-H)
والكتلة 1.22 كغم



اللوحة (5) : فشل الميل (1V:5H) للحالة (V)
والكتلة (1.05) كغم



اللوحة (4): فشل الميل (1V:3H) للحالة
(M-H) M- والكتلة 1.05 كغم