

التحليل الهيدروليكي

HYDRAULIC ANALYSIS

تصنيف السريان

Classification of Flows

إن موضوع الهيدروليكا يشمل دراسة حركة الماء خلال مجاري المياه سواء الطبيعية أم الصناعية ويشمل القنوات المفتوحة والأنابيب. وسريان الماء يقسم إلى عدة أنواع:

١- السريان الحر والسريان المضغوط: يحدث السريان الحر عندما يكون السطح العلوي للماء معرض للضغط الجوي، أما السريان المضغوط فيحدث عندما يكون سطح الماء محدودة بسطح صلب (أي أن السريان في قنوات مغلقة، البرابخ أو الكباري تحت ظروف الفيضانات).

٢- السريان المنتظم وغير المنتظم: يحدث السريان المنتظم عندما يكون عمق السريان ثابت عند أي مقطع عرضي من القناة وسطح الماء مواز لقاع القناة. أما السريان غير المنتظم أو المتغير يحدث عند دخول أو خروج السريان على طول القناة ويتغير عمق السريان من مقطع عرضي إلى آخر.

٣- السريان المستقر وغير المستقر: يحدث السريان المستقر عندما لا يتغير عمق السريان مع الزمن أما السريان غير المستقر يحدث عند تغير السريان مع الزمن. وقد يكون السريان غير المنتظم (المتغير) ذو تغير تدريجي أو تغير سريع (أي يحدث قفزات

هيدروليكية). السريان المنتظم وغير المستقر لا يحدث عملياً ومن ناحية أخرى قد يكون السريان غير المستقر ذو تغير تدريجي كما يحدث في موجات الفيضان أو تغير سريع كما في المد.

٤ - السريان الطبقي والسريان الاضطرابي: السريان الطبقي محكوم باللزوجة أما السريان الاضطرابي فهو محكوم بقوة القصور الذاتي أو الجاذبية. سواء كان السريان طبقي أو مضطرب فيمكن تحديده بواسطة رقم رينولد ورمزه Re ويحدد من المعادلة:

$$R_e = VR/v \quad (٣, ١)$$

حيث إن:

$$V = \text{سرعة السريان (م/ث)}.$$

$$R = \text{نصف القطر الهيدروليكي (م)} = A/P.$$

$$A = \text{مساحة مقطع السريان (م}^2\text{)}.$$

$$P = \text{المحيط المبتل (م)}.$$

$$v = \text{اللزوجة الكينماتيكية (م}^2\text{/ث)}.$$

يُعد السريان طبقي إذا كان رقم رينولد أقل من ٥٠٠ ويكون انتقالياً في الحدود من ٥٠٠ إلى ١٢٥٠٠ بينما يكون اضطرابياً إذا كان أكبر من ١٢٥٠٠ والحدود العليا قد تكون مؤثرة جداً ومعتمدة على الظروف الخاصة للسريان.

٥ - السريان تحت الحرج والحرج وفوق الحرج: عندما يكون السريان محكوم بقوة الجاذبية فإن السريان يمكن تمييزه بواسطة رقم فرود ورمزه F ويحدد من المعادلة:

$$F = V/\sqrt{gD} \quad (٣, ٢)$$

حيث إن:

$$g = \text{عجلة الجاذبية الأرضية وتساوي } 9,81 \text{ (م/ث}^2\text{)}.$$

$$D = \text{العمق الهيدروليكي (م)} = A/T.$$

$$T = \text{عرض سطح ماء السريان (م)}.$$

ويُعد السريان تحت حرج إذا كانت قيمة F أقل من الواحد الصحيح ويكون السريان حرج إذا كانت قيمة F مساوية للواحد الصحيح ويكون السريان فوق حرج إذا كانت قيمة F أكبر من الواحد الصحيح.

السريان المستقر المنتظم في القنوات المفتوحة

Steady Uniform Flow in Open Channels

السريان المنتظم في القنوات المفتوحة أو الأنابيب غير الممتلئة محكوم بالمعادلات

التالية:

١ - معادلة ماننق

$$V = (1/n) R^{2/3} \sqrt{S} \quad (3,3)$$

٢ - معادلة شيزي

$$V = C \sqrt{RS} \quad (3,4)$$

٣ - معادلة دارسي-ويسباك (تستخدم بصفة عامة للسريان داخل الأنابيب)

$$h = f L V^2 / (2 g d) \quad (3,5)$$

٤ - معادلة هازن-ويليم (تستخدم غالباً للسريان داخل الأنابيب)

$$V = 0.84917 C_H R^{0.63} S^{0.54} \quad (3,6)$$

حيث إن:

$$S = \text{ميل خط الطاقة (م/م)}.$$

L = طول الأنبوب (م).

h = فاقد الضاغط للأنبوب (م).

d = قطر الأنبوب (م) $= R \cdot \epsilon$.

n = معامل مانتيق للخشونة.

C = معامل شيزي.

f = معامل الاحتكاك لدارسي-ويسباك.

C_H = معامل هازن- ويليام.

المعاملات في المعادلات من رقم (٣,٣) - (٣,٦) يمكن إيجادها من العلاقات:

$$(٣,٧) \quad C = R^{1/6} / n \quad \text{or} \quad n = R^{1/6} / C = R^{1/6} \sqrt{f / \sqrt{8g}}$$

$$(٣,٨) \quad f = 8g n^2 / R^2 \quad \text{or} \quad n = R^{1/6} \sqrt{f / \sqrt{8g}}$$

$$(٣,٩) \quad C_H = 1.175562 R^{0.037} / (n S^{0.04}) \quad \text{or} \quad n = 1.175562 R^{0.037} / (C_H S^{0.04})$$

وفي حالة أن تكون نوع مادة قاع القناة معلومة سواء حبيبات أو مادة مبطنة فإن معامل الخشونة لمانتيق يمكن استنتاجه باستخدام معادلة ستريكلر

(Simons and Sentruk 1976,1992).

$$(٣,١٠) \quad n = d_{90}^{1/6} / 26$$

حيث d_{90} هو قطر الحبيبات (م) التي تشكل ٩٠٪ من المادة، والقيم المقدرة باستخدام المعادلة رقم (٣,١٠) قد تكون صغيرة جداً في ظروف حقلية أخرى.

والقيم النموذجية للظروف الحقلية المختلفة موجودة في الجدول رقم (٣,١)

(Chow 1959).

الجدول رقم (٣، ١). القيم النموذجية لمعامل مانتق للخشونة n.

نوع القناة	معامل مانتق للخشونة n
محفورة في الأرض نظيفة، مستقيمة ومتماثلة	٠,٠١٦ - ٠,٠٢٠
محفورة في الأرض مستقيمة ومتماثلة مع بعض الأعشاب القصيرة والحشائش	٠,٠٢٢ - ٠,٠٥٥
قناة ترابية راكدة، ملتفة بدون أي غطاء نباتي	٠,٠٢٣ - ٠,٠٣٠
قناة ترابية راكدة، ملتفة مع بعض الأعشاب القصيرة والحشائش	٠,٠٢٥ - ٠,٠٣٣
قناة من الصخور المصقولة والمتماثلة	٠,٠٢٥ - ٠,٠٤٠
قناة من الصخور الخشنة وغير منتظمة	٠,٠٣٥ - ٠,٠٥٠
قناة مهملة مع وجود حشائش مرتفعة بارتفاع عمق السريان	٠,٠٥٠ - ٠,١٢٠
قناة مهملة مع وجود أحراش حشائش مرتفعة	٠,٠٨٠ - ٠,١٤٠
القناة طبيعية نظيفة، مع شط مستقيم، منصة كاملة، بدون انشقاقات عميقة أو مجمعات	٠,٠٢٥ - ٠,٠٣٣
القناة طبيعية مع شط مستقيم، منصة كاملة، بدون انشقاقات عميقة أو مجمعات مع وجود بعض الحشائش والأحجار	٠,٠٣٠ - ٠,٠٤٠
قناة ملتفة طبيعياً مع وجود بعض أو مجمعات أو مياه ضحلة.	٠,٠٣٣ - ٠,٠٤٥
قناة ملتفة طبيعياً مع وجود بعض أو مجمعات أو مياه ضحلة مع منصة قصيرة، ميول وقطاعات غير مؤثرة	٠,٠٤٠ - ٠,٠٥٥
قناة ملتفة طبيعياً مع وجود بعض أو مجمعات أو مياه ضحلة مع وجود بعض الحشائش والأحجار	٠,٠٣٥ - ٠,٠٥٠
قناة ملتفة طبيعياً مع وجود بعض أو مجمعات أو مياه ضحلة مع منصة قصيرة، ميول وقطاعات حجرية غير مؤثرة	٠,٠٤٥ - ٠,٠٦٠
نهر راكد مع وجود مجمعات عميقة جداً	٠,٠٥٠ - ٠,٠٨٠
جدول مائي مع وجود حشائش كثيرة	٠,٠٧٥ - ٠,١٥٠
سهول الفيضان والمراعي بدون أغصان	٠,٠٢٥ - ٠,٠٥٠

تابع الجدول رقم (١، ٣).

معامل مانتق للخشونة	نوع القناة
n	
٠,٠٥٠-٠,٠٢٥	سهول الفيضان مع مناطق مزروعة
٠,١٦٠-٠,٠٣٥	سهول الفيضان مع أغصان مقطوعة
٠,١٦٠-٠,٠٥٠	سهول الفيضان مع أشجار
٠,٠١٦-٠,٠١١	قناة مبطنة بالخرسانة
٠,٠٢٥-٠,٠١٦	قناة خشنة
٠,٥٠٠-٠,٠٣٠	قناة بها نباتات تبطنها

المصدر: Chow (1959).

تصميم القنوات غير القابلة للانجراف

Design of Nonerodible Channels

تشمل القنوات غير القابلة للانجراف القنوات المبطنة بالاسمنت، الصخور أو المدرعة. وعادة تصمم تلك القنوات عندما يكون ميل الأرض عبر طولها شديد الانحدار، أو محدودية ميول جوانب القناة، أو النحر في قاع أو جوانب القناة غير مقبول، أو القناة يجب أن تمر عبر صخور مكشوفة. إن خطوات تصميم هذا النوع من القنوات يكون بطريقة المحاولات، وخطوات الحسابات كما يلي:

- ١- أوجد التصرف التصميمي Q (m^3/s) (أعلى قيمة للفيضان في القنوات المتحكم فيها، أو التصرف الأقصى لقنوات الري أو تلك المستخدمة في توليد الكهرباء).
- ٢- ارسم قطاع للقاع على طول القناة، وقم بالعلامات المطلوبة للارتفاعات بصورة معكوسة عند أعلى السريان وفي اتجاه السريان، أوجد ميل القاع الملائم للقناة لأقل كمية من الحفر. وقاع القناة يجب أن لا يكون في الموضع العالي.

٣- أحسب أقصى سرعة مسموح بها V (م/ث) وذلك لنوع التبتين أو الدرع. للقنوات المبطنة بالاسمنت أو مبطنة بالقطع الصخرية فإن السرعة تتراوح بين ٥ - ١٥ م/ث وتعتمد على مقاومة الانجراف للإسمنت أو الصخر، أما القنوات المبطنة بالنجيل "الحشائش" فتتراوح السرعة بين ١ - ٢,٥ م/ث تعتمد على نوع التربة والحشائش. أما التقدير المبدئي للسرعة القصوى لنوع مادة التبتين يمكن إيجاده مستخدماً الطريقة الموضحة في الجزء الخاص بالقنوات القابلة للانجراف.

٤- قدر معامل مانتيق للخشونة n مستخدماً الجدول رقم (٣, ١)، واحسب نصف القطر الهيدروليكي مستخدماً العلاقة

$$V = (1/n) R^{2/3} \sqrt{S} \quad (٣, ٣)$$

٥- احسب مساحة المقطع العرضي للسريان

$$A = Q/V \quad (٣, ١١)$$

٦- قدر الميل الجانبية للقناة. القيم النموذجية لها موجودة في الجدول رقم (٣, ٢). أن الميل الجانبية للقنوات الطينية يجب أن تختبر بتحليل الاستقرار.

٧- افرض عمق الماء D (م) واحسب عرض القاع B (م)، وللقنوات ذات الشكل شبه المنحرف

$$A = B D + z D^2 \quad (٣, ١٢)$$

٨- احسب

$$P = \left[B + D 2 \sqrt{(z^2 + 1)} \right] \quad (٣, ١٣)$$

٩- احسب

$$R = A/P \quad (٣, ١٤)$$

الجدول رقم (٣، ٢). الميول الجانبية المناسبة للقنوات غير القابلة للانجراف.

نوع القناة	الميول الجانبية المناسبة (z أفقي: 1 رأسي)
مبطنة بالأسمنت	الحوائط الرأسية (١ : ٠) إلى (١ : ٢) أو مستقيمة
مبطنة بالصخور المقطوعة	١ : ٠ للحدود التطبيقية للصخور
مدعمة بالحجر	١ : ١,٥ أو مستقيمة
مبطنة	ميول صخرية ١ : ١
طمي أسمتي	١ : ٢

المصدر: (Chow 1959).

إذا كانت قيمة R لا تساوي القيمة المقدرة من المعادلة في الخطوة (٤) تقريباً افرض قيمة جديدة لـ D ثم أعد الخطوات من (٧) إلى (٩)، كرر تلك الخطوات حتى تقترب القيمتان. وخطوات تصميم الأشكال الأخرى لمقاطع السريان تشبه الخطوات السابقة غير أنها تستخدم معادلات أخرى لكل من A, P .

مثال رقم (٣، ١): صمم قطاع لمجرى مائي مبطن بالأسمنت طوله ٢ كم حيث S تساوي $٠,٠٠٢٥$ م/م. المنبع من بناء هيكلي. والقناة المتكونة بعرض ٥٥ م تقريباً. والقناة الأمامية مبطنة ولها السعة الكافية التي تجعل التبتين لا يؤثر فيه الانجراف والفيضان عند المصب. استخدم Q تساوي ٥٠٠ م^٣/ث، السرعة المسموح بها للتبتين الأسمتي هي $٥,٠$ م/ث و n تساوي $٠,٠١٥$.

الحل:

من المعادلة رقم (٣، ٣)

$$5.0 = (1/0.015)R^{2/3} \sqrt{(0.0025)}$$

فإن

$$R = 1.837 \text{ m}$$

$$A = 500/5.0 = 100 \text{ m}^2$$

وحيث إن طبقة التبطين الأسمنتية ستركب على المنحدرات الطينية فإن الميول الجانبية المناسبة هي ٢ أفقي : ١ رأسي. الحسابات بالقيم الافتراضية لـ D موجودة في الجدول رقم (٣,٣). ولتقليل احتمالات السرعة الزائدة للفيضان في مناطق معينة فإن القناة سيكون لها عرض قاع يساوي ٤٦ م وميول جانبية ٢ أفقي : ١ رأسي وعمق كلي يساوي ٢,٦٥ م، مما يوفر حافة حرة حوالي ٠,٦٥ م فوق مستوى الفيضان.

الجدول رقم (٣,٣). الأبعاد التقريبية للقناة المبينة بالأسمنت.

قيم R (م) $R = A/P$	قيم P (م) من معادلة رقم (٣, ١٣)	قيم B (م) من معادلة رقم (٣, ١٢) $B = (A - zD^2)/D$	قيم D المفروضة (م)
١,٦٣	٦١,٤٧	٥٣,٦٤	١,٧٥
٢,١٦	٤٦,١٨	٣٥,٠	٢,٥٠
١,٨٢	٥٤,٩٤	٤٦,٠	٢,٠
١,٨٤	٥٤,٣٤٥	٤٥,٢٨	٢,٠٢٧
١,٨٣٧	٥٤,٤٣٢٧	٤٥,٣٨٥٥	٢,٠٢٣

تفاوتت السرعة في مقاطع السريان للقنوات المفتوحة في كل من الاتجاهين الرأسي والأفقي. وتستخدم معادلات مختلفة لتقدير السرعات عند عمق محدد للقنوات الناعمة والخشنة. وللريان الاضطرابي، في حالة $5 < U_* / \nu$ تعامل القنوات كقناة ناعمة، وتعامل كقناة خشنة إذا كانت $70 < U_* / \nu$ ، والحالة الانتقالية

تكون عند $5 < k U_* / v < 70$ ، حيث U_* الاحتكاك أو سرعة القص (م/ث) وتساوي $\sqrt{g R S}$ و k الارتفاع المكافئ للخشونة (م). وبالنسبة للقنوات المبطننة بالحجارة المدكوكة فإن $k = d_{65}$ ، وبالنسبة للقنوات ذات القاع المتحرك فإن k عادة تكون أكبر بكثير من d_{65} بسبب الحدود الشاذة والأشكال المختلفة للقاع، وقد تتغير القيمة من ٠.٠٣ إلى ٠.٩١ م. وفي حالة معرفة معامل شيزي C أو معامل ماننق n فيمكن حساب k من المعادلة:

$$(٣, ١٥) \quad C = R^{1/6} / n = 32.6 \log (12.2 R / k)$$

للسريان الاضطرابي في القنوات الناعمة

$$(٣, ١٦) \quad U / U_* = 5.5 + 5.75 \log (U_* y / v) = 5.75 \log (9 U_* y / v)$$

حيث إن، U = السرعة عند العمق y أعلى قاع القناة (م/ث).

للسريان الاضطرابي في القنوات الخشنة

$$(٣, ١٧) \quad U / U_* = 8.5 + 5.75 \log (y / k) = 5.75 \log (30 y / k)$$

وفي الحالة الانتقالية بين القنوات الناعمة والخشنة فإن الثابت ٨,٥ في المعادلة

رقم (٣, ١٧) يتغير بتغير $(k U_* / v)$ (Simons and Senturk; 1976, 1992) وللسريان

الطبقي في القنوات المفتوحة ذات المقطع المستطيل فإن توزيع السرعة في الاتجاه الرأسي

يمكن إيجاداه من (Chow 1959):

$$(٣, ١٨) \quad U = (\gamma S / \mu) (y D - y^2 / 2)$$

حيث إن:

γ = كثافة للماء (كجم/م^٣).

D = عمق السريان (م).

μ = اللزوجة الديناميكية للماء (كجم.ث/م^٢).

ويحدث السريان الطبقي إذا كانت السرعة وعمق ماء السريان صغيرة نسبياً. السرعات للعمق المتوسط عند المواقع المختلفة على طول المقطع العرضي للقناة يفترض أنها تتناسب مع $y^{2/3}$ حيث y هي عمق الماء (م) عند هذا الموقع. ويمكن إيجاد توزيع السرعة المفضل للعمق المتوسط على طول المقطع العرضي للقناة من HEC-RAS (USACE 1991c)، HEC-2 USACE (1998) أو من نماذج شبيهة.

تصميم القنوات القابلة للانجراف

Design of Erodible Channels

السرعة القصوى المسموح بها Maximum Permissible Velocity

يجب اختبار قاع وجوانب القنوات القابلة للانجراف أو الترسب تحت ظروف سريان مختلفة. واستقرار تلك القنوات مرتبط بخواص مادتي القاع والجوانب بالإضافة إلى الخواص الهيدروليكية للسريان. وهناك طريقة بسيطة وعملية لتصميم القنوات القابلة للانجراف تعتمد على السرعة القصوى المسموح بها للسريان لكل من مادتي القاع والجوانب. والقيم النموذجية لمعامل ماننق للخشونة والسرعات القصوى المسموح بها لكل أنواع التربة موضحة في الجدول رقم (٤، ٣) (SCS 1954, Simons 1959, and Senturk 1976, 1992 Chow 1959).

الجدول رقم (٣، ٤). القيم النموذجية لمعامل مانتق للخشونة وأقصى سرعة مسموح بها.

أقصى سرعة مسموح بها (م/ث)				المادة
ماء محمل بحبيبات طينية غير غروية، رمل، حصي، قثافيت الصخر	ماء محمل بحبيبات طينية غروية	ماء صافي	n	
٠,٤٦	٠,٧٦	٠,٤٦	٠,٠٢	رمل ناعم (غروي)
٠,٦١	٠,٧٦	٠,٥٣	٠,٠٢	رملية جيرية (غير غروية)
٠,٦١	٠,٩١	٠,٦١	٠,٠٢	طينية جيرية (غير غروية)
٠,٦١	١,٠٧	٠,٦١	٠,٠٢	رواسب طينية (غير غروية)
٠,٦٩	١,٠٧	٠,٧٦	٠,٠٢	جيرية عادية
٠,٦١	١,٠٧	٠,٧٦	٠,٠٢	رماد بركاني
١,١٤	١,٥٢	٠,٧٦	٠,٠٢٥	حصي ناعم
٠,٩١	١,٥٢	١,١٤	٠,٠٣	طينية صلبة (صمغية جداً)
١,٥٢	١,٥٢	١,١٤	٠,٠٢٥	حصي جبلي متدرج (غير غروية)
٠,٩١	١,٥٢	١,١٤	٠,٠٣٠	رواسب طينية (غروية)
١,٥٢	١,٦٨	١,٢٢	٠,٠٢٥	حصي طمي متدرج (غروي)
١,٩٨	١,٨٣	١,٢٢	٠,٠٣٥	حصي غير مصقول متدرج (غير غروية)
١,٩٨	١,٦٨	١,٥٢	٠,٠٣٥	حصي أو زلط
١,٥٢	١,٨٣	١,٨٣	٠,٠٢٥	حجر رخو

المصدر: (Chow 1959) ; Simons and Senturk (1976, 1992) ; SCS (1954).

الميول المناسبة للقنوات القابلة للانجراف موضحة في الجدول رقم (٣، ٥)

.(Chow 1959)

الجدول رقم (٣, ٥). الميول الجانبية المناسبة للقنوات القابلة للانجراف.

مادة القناة	الميول الجانبية (z أفقي : 1 رأسي)
طينية صلبة	٠,٥ : ١ إلى ١ : ١
طينية مدكوكة أو تربة تحتوي على طين وطيني ورمل	١ : ١,٥
تربة طميية، جيرية أو رملية	١ : ٢
تربة رملية جيرية، طميية مسامية، رمل دقيق	١ : ٣

المصدر: (Chow 1959).

سرعة لا ترسيب ولا نفايات Nonsilting, Nonscouring Velocity

لتفادي حدوث ترسيب في القنوات (قنوات الري، الترعة) فإن تصميم القنوات القابلة للانجراف أحياناً يتطلب أن تكون سرعة السريان في تلك القنوات أعلى من الحد الأدنى للسرعة المسموح بها وفيما يلي المعادلات الأكثر شيوعاً لتقدير السرعة التي لا يحدث عندها ترسيب للطيني أو النفايات:

١ - معادلة كيندي لسرعة لا ترسيب ولا نفايات

$$V_o \text{ (m/s)} = C D^{0.64} \quad (3, 19)$$

حيث إن C تساوي ٠,٣٧ للتربة ذات الحبيبات الدقيقة جداً، ٠,٥٥ للتربة الغروية والرملية، ٠,٦٠ للتربة الرملية الخفيفة والخشنة، ٠,٦٦ للتربة الرملية والجيرية، ٠,٧١ للتربة الطميية الخشنة والصخرية (Chow 1959, Singh 1967)

٢ - معادلة لاسي لتنظيم السرعة

$$V_o \text{ (m/s)} = (Q f^2 / 140)^{1/6} \quad (3, 20)$$

حيث إن:

$$f = \text{معامل لاسي للغرين} = 1.76 \sqrt{d}$$

$d =$ القطر المتوسط للحبيبات (مم) (Davis and Sorensen 1970 ; Zipparro and Hansen 1993)

مثال رقم (٣، ٢): صمم قناة مائية طميية (غير مبطنة) للوصول للمصب كما في المثال رقم (٣، ١). قاع القناة يحتوي على غرين وجير وحصى، استخدم ميول للجوانب ٢ أفقي: ١ رأسي.

الحل:

هذه القناة قد لا تكون آمنة في المستقبل فتنمو بها الحشائش مع الزمن ولذا نستخدم n تساوي ٠,٠٣٥. وقاع القناة الموجودة ذو ميل شديد (٠,٠٢٥ م/م). ولتقليل ميل قاع القناة نعطي ١, ٤ م لبناء مسقط عند أعلى المجرى المائي، أو ٢ م لمسقط عند أعلى المجرى مع مسقط ١, ٢ م على بعد ١ كم من أعلى المجرى في اتجاه المصب، وقد تم إيجاد هذه القيم بعد عدة محاولات باستخدام ارتفاعات مختلفة للمساقط والتي تنتج ميول للقاع لا تسمح بتعدي السرعة القصوى المسموح بها وعرض لا يكون أكبر بكثير من عرض قاع القناة.

الميل المتوسط للقاع مع المسقط يساوي:

$$(2000 \times 0.0025 - 4.1) / 2000 = 0.00045 \text{ m/m}$$

وفي حالة الفيضان فإن القناة ستنقل الطمي الغير صمغي والرمل والحصى وشظايا الصخر ولذا السرعة المسموح بها من الجدول رقم (٣، ٤) تساوي:

$$V = 1.52 \text{ m/s}$$

وبالتالي مساحة المقطع

$$A = 500 / 1.52 = 328.95 \text{ m}^2$$

إذاً

$$1.52 = (1/0.035) R^{2/3} \sqrt{(0.00045)}$$

وبالتالي

$$R = 3.97 \text{ m} = (B D + 2 D^2) / \left[B + \left\{ 2 \sqrt{(5) D} \right\} \right]$$

وباستخدام طريقة المحاولة والخطأ فإن D تساوي ٤,٦٠٥ م و B تساوي ٦٢,٢٢٣ م لتقليل احتمال السرعة العالية للفيضان في الأماكن المحددة، فإن قاع القناة يساوي ٦٣ م ويعمق كلي ٥,٢٥ م والتي تعطي حافة حرة حوالي ٠,٦٥ م فوق سطح الماء. وبوجود المسقط المائي فإن حفر القناة سيزداد ويزداد قاع القناة ومستوى الفيضان سيكون في حده الأدنى.

تحليل استقرار الرواسب (مدى احتمالية الانجراف والترسيب) مطلوب لتصميم قناة مستقرة، تقييم متطلبات الحماية من الانجراف، واحتمالية وجود الرواسب الملوثة في قاع القناة. المعادلات الأكثر استخداماً لتقييم استقرار الرواسب كالتالي:

١ - معادلة شيلدز لإجهاد القص (Simons and Senturk 1976, 1992): وهذه الطريقة تقارن إجهاد القص عند بدء الحركة مع إجهاد القص عند قاع القناة تبعاً للسريان في القناة.

$$(٣,٢١) \quad \text{Shear resistance of sediments} = a (\gamma_s - \gamma) d$$

$$(٣,٢٢) \quad \text{Shear stress at canal bed due to flow} = \lambda R S$$

حيث إن:

$$\gamma_s = \text{كثافة مادة الترسيب (كجم/م}^3\text{)} .$$

$$\gamma = \text{كثافة الماء (كجم/م}^3\text{)} .$$

$$d = \text{قطر الحبيبات (مم).}$$

$$R = \text{متوسط نصف القطر الهيدروليكي (م).}$$

$$S = \text{ميل خط الطاقة (م/م).}$$

$$a = \text{معامل وهو دالة في } U_* d/v.$$

$$U_* = \text{سرعة القص (م/ث)} = \sqrt{g R S}.$$

$$v = \text{اللزوجة الكينماتيكية (م}^2/\text{ث).}$$

قيم a التقريبية عند قيم مختلفة للمقدار $U_* d/v$ موضحة في الجدول رقم (٣، ٦). ولم يتم تقدير قيم a عند $U_* d/v$ تساوي ٢، ٠، وأوضحت الاتجاه العام للبيانات التجريبية أن قيمة a تزداد بنقصان قيمة $U_* d/v$. ولمعظم سريان القنوات المفتوحة يقترح استخدام القيمة ٠، ٠٤٧.

٢- معادلة ماير-بيتر-مولر (USBR 1984). إن معادلة ماير-بيتر-مولر المعدلة لنقل حمل القاع لبداية نقل حبيبة واحدة هي:

$$d = D S \left[57.9 \left\{ n / (d_{90}^{1/6}) \right\}^{3/2} \right] \quad (٣، ٢٣)$$

حيث إن:

$$d = \text{قطر الحبيبات الغير منقولة (م).}$$

$$D = \text{عمق الماء المتوسط (م).}$$

$$n = \text{معامل ماننق للخشونة.}$$

$$d_{90} = \text{قطر الحبيبات التي تشكل ٩٠٪ من المادة (مم).}$$

٣- معادلة اينشتين-ستكلير-ماننق (Simons and Senturk 1976, 1992 ;

USACE 1991d; Singh 1967) : تعتمد هذه الطريقة على معادلة ماننق لتقدير خشونة

القنوات ومعادلة ستريكلر لتقدير خشونة الحبيبات ومعادلة اينشتين لبدء الحركة. وتبعاً لهذه المعادلة فإن قطر الحبيبات لبدء الحركة يساوي:

(٣,٢٤)

$$d = 18.18 R' S$$

الجدول رقم (٣,٦). القيم التقريبية للمعامل a في معادلة شيلدز.

a	$U_* d/v$
٠,٤٥	٠,٢٥
٠,٣٩	٠,٣
٠,٢٩	٠,٤
٠,٢٢	٠,٥
٠,١٩	٠,٦
٠,١٢	١,٠
٠,٠٦	٢,٠
٠,٠٤٧	٣,٠
٠,٠٤٠	٤,٠
٠,٠٣٥	٦,٠
٠,٠٣٤	٨,٠
٠,٠٣٣	١٠
٠,٠٣٤	٢٠
٠,٠٣٥	٣٠
٠,٠٣٧	٤٠
٠,٠٤٠	٦٠
٠,٠٤٥	١٠٠
٠,٠٥٢	٢٠٠
٠,٠٦٠	٥٠٠
٠,٠٦٠	٨٠٠
٠,٠٦٠	١٠٠٠

المصدر: مستنتجة من منحنيات شيلدز Shieds في (Simons and senturk (1976)).

حيث إن R' هو نصف القطر الهيدروليكي المكافئ. والقيم التقريبية لـ R' يمكن تقديرها من معادلة (Singh 1967) :

$$(٣,٢٥) \quad R'/R = (n'/n)^{3/2}$$

حيث إن n' هو معامل الخشونة للحبيبات من معادلة ستريكلر في حالة d_{50} بوحدات (م) (Simons and Senturk 1976,1992).

$$(٣,٢٦) \quad n' = (d_{50})^{1/6} / 25.67$$

وفي حالة d_{50} بوحدات (مم)

$$(٣,٢٧) \quad n' = (d_{50})^{1/6} / 81.2$$

حيث d_{50} هو قطر الحبيبات التي تشكل ٥٠٪ من أخف وزن لمادة قاع القناة.

٤ - معادلة كامب (ASCE 1976): تعتمد هذه الطريقة على معادلة إجهاد القص لبدء الحركة وإجهاد الشد عند قاع القناة ومعادلة ماننق لتقدير ميل خط الطاقة. وتبعاً لتلك المعادلات فإن متوسط سرعة السريان في القناة عند بدء الحركة v_o يمكن إيجاده كالتالي:

$$(١٣,٢٧) \quad v_o = (1/n) R^{1/6} \left[\sqrt{\{a (s-1) d\}} \right]$$

$$(٣,٢٧) \quad v_o = \sqrt{[(8 g/f) a (s-1) d]}$$

حيث إن:

s = الكثافة النوعية لحبيبات الرسوبيات.

f = معامل الاحتكاك لدارسي-ويسباك.

d = قطر الحبيبات (م).

بالنسبة للمعامل a فإن كامب يقترح استخدام القيمة ٠,٠٤ لبدء الحركة، والقيمة ٠,٨ للحمل الشديد بغض النظر عن ميل خط الطاقة. وللميول المستوية التي تكون

عندها قيمة $U_* d/v$ أقل من ٠,٣، فإنه تستخدم قيم أكبر لبدء الحركة (انظر الجدول رقم (٣,٦)).

المعادلات من رقم (٣,٢١) إلى رقم (٣,٢٧) تستند على ظروف معملية محددة أو بيانات حقلية للرواسب غير الملتصقة أو على الخبرات العملية. ونتوقع للحبيبات ذات القطر أقل من ٠,٠٠٩ مم (طينية) مقاومة التماسك والتي لا تحدث في ظروف تلك المعادلات. وسيختلف تقدير حجم الحبيبات القابلة للانجراف من هذه المعادلات تحت ظروف هيدروليكية أخرى. وينصح أن يتم تقدير الانجراف المحتمل باستخدام أكثر من نموذج ويتم اختيار الحجم المناسب بالخبرة.

مثال رقم (٣,٣): قدر انجراف الرواسب من قاع قناة تحت ظروف سريان منتظم حيث R تساوي ٣,٤ م، والميل S يساوي ٠,٠٠٠٠١، ومعامل ماننق للخشونة n يساوي ٠,٠٢٥، وقيم d_{50} ، d_{90} لمادة قاع القناة هي ٠,٣، ٠,٨ مم على التوالي. اعتبر أن:

$\gamma_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ ، $\gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$ ، $\nu = 1.13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ، والقناة عريضة ولذا يمكن اعتبار أن R تساوي تقريباً D (متوسط عمق الماء).

الحل:

باستخدام معادلة ماننق فمتوسط سرعة السريان في القناة يساوي

$$(1/0.025) \times (3.4)^{2/3} \times \sqrt{0.00001} = 0.286 \text{ m/s}$$

وباستخدام كل من معادلة شيلدز، وماير-بيتر-مولر، واينشتين-ستركلر-ماننج، ومعادلة كامب لتقدير قطر الحبيبة الذي ينجراف عند تلك الظروف الهيدروليكية:

١ - معادلة شيلدز

$$U_* = \sqrt{g R S} = \sqrt{(9.81 \times 3.4 \times 0.0001)} = 0.081 \text{ m/s}$$

وفي المحاولة الأولى لقطر ٠,٣ مم

$$U \cdot d/v = 0.018 \times 0.3 \times 10^6 / (1000 \times 1.13) = 4.78$$

وباستخدام a تساوي ٠,٠٤ من الجدول رقم (٣,٦)

$$\tau (\text{canal bed}) = \lambda R S = 1000 \times 3.4 \times 0.00001 = 0.034 \text{ kg/m}^2$$

$$\tau (\text{resistance}) = a (\gamma_s - \gamma) d = 0.04 \times 1650 \times d$$

وبمساواة إجهاد القص عند القاع بمقاومة القص أي الشد نجد إن

$$d = 0.00051 \text{ m} = 0.51 \text{ mm}$$

وبقيمة d تساوي ٠,٥١ مم فإن $U \cdot d/v$ تساوي ٨,١٢، والقيمة المعدلة لـ a (أي

٠,٠٤) تكون محافظة.

٢- معادلة ماير-بيتر-مولر

$$d = 3.4 \times 0.00001 / [57.9 \{0.025 / (0.8^{1/6})\}^{3/2}] = 0.00014 \text{ m} = 0.14 \text{ mm}$$

٣- معادلة اينشتاين-ستركلر-ماننق

$$n' = (0.3)^{1/6} / 81.2 = 0.010$$

$$R' = 3.4 \times (0.010 / 0.025)^{1.5} = 0.87 \text{ m}$$

$$d = 18.18 \times 0.87 \times 0.00016 = 0.00016 \text{ m} = 0.16 \text{ mm}$$

٤- معادلة كامب

$$s = (2650) / 1000 = 2.65$$

$$0.286 = (1/0.025) \times (3.4)^{1/6} \times \sqrt{(0.04 \times 1.65 d)}$$

$$d = 0.00051 \text{ m} = 0.51 \text{ mm}$$

نجد من النتائج المستنتجة سابقاً أن نتيجتين أقل من d_{50} لمادة قاع القناة

والأخيرتين لهما قيمة أكبر. وهذا يؤدي إلى استنتاج وجود احتمالية لتحرك الرواسب.

ولاحظ أن هذه التقديرات للحركة المبدئية وليس لعملية التنظيف.

تصميم القنوات المزروعة Design of Vegetated Channels

للاعتبارات البيئية والاقتصادية كثيراً ما يكون من المستحسن للتحكم في الانجراف دراسة تبطين جوانب القنوات بزراعتها بالنباتات. والطريقة الشائعة لتصميم القنوات المزروعة تقوم على استخدام السرعة المسموح بها أو خرائط وجداول n-VR أو استخدام الجداول المحددة بواسطة هيئة الحفاظ على التربة الأمريكية لمختلف أنواع التبطين بالنباتات (SCS 2945, Chow 1959, Barfield et al 1981). و VR هي ناتج حاصل ضرب السرعة في نصف القطر الهيدروليكي، و n معامل ماننق للخشونة. وقسمت الأعشاب كمعوقات إلى خمس فئات (أ، ب، ج، د، هـ) على أساس النوع، وارتفاع وحالة الإعشاب. والمبادئ الإرشادية لتحديد فئة الإعاقة من البطانة النباتية مدرجة في الجدولين رقمي (٣،٧) و (٣،٨) (SCS 1954).

الجدول رقم (٣،٧). فئات المعوقات لمختلف الأغطية النباتية.

فئة المعاق	الغطاء النباتي	الظروف
أ	عشب الحب المتهدل	قاعدة ممتازة، طويل (متوسط ٧٦ سم).
	عشب بري أصفر أزرق الساق	قاعدة ممتازة، طويل (متوسط ٩١،٥ سم).
ب	نبات متسلق	نمو ذو كثافة عالية، غير مقطوعة
	عشب برمودا	طويل، يقف بصورة جيدة (متوسط ٣٠،٥ سم).
	خليط العشب الأصلي (العشب ذات الساق	سم).
	الزرقاء الصغيرة، الجراما الزرقاء، أعشاب	
	الوسط الغربي الطويلة والقصيرة الأخرى)	
	أعشاب الحب المتهدلة	تقف بصورة جيدة، غير محشوشة
	ليسيديزا سيرسا	تقف بصورة جيدة، طويل (٦١ سم)
	برسيم	تقف بصورة جيدة، طويل، غير خشبية (٤٨ سم)
	أعشاب الحب المتهدلة	سم)

تابع جدول رقم (٣,٧).

الظروف	الغطاء النباتي	فئة العائق
تقف بصورة جيدة، غير مقطوعة بمتوسط (٢٨ سم)	نبات متسلق	
تقف بصورة جيدة، محشوشة بمتوسط (٣٣ سم)	الجراما الزرقاء	
نمو ذو كثافة عالية، غير مقطوعة.		
يقف بصورة جيدة، غير مقطوعة (متوسط ٣٣ سم)		
قائم بصورة معتدلة، غير مقطوع (٢٥,٤ إلى ١٢٢ سم).	عشب سرطان عشب برامودا	ج
قائم بصورة جيدة، محشوشة (بمتوسط ١٥ سم)	ليزبلا الشائعة	
تقف بصورة جيدة، غير مقطوعة بمتوسط (٢٨ سم).	خليط العشب والبقول الصيفية (عشب البستان، النخيل الأبيض، الزوات الايطالي، ليزبلا الشائعة)	
قاعدة ممتازة، غير مقطوع (١٥ إلى ٢٠ سم)	عشب الحريش	
غطاء كثيف جدا (متوسط ١٥ سم)	اعشاب كتاكلي الزرقاء	
قاعدة جيدة، له رؤوس (١٥ إلى ٣٠,٥ سم)		
قائم بصورة جيدة، مقطوع لارتفاع ٦ سم	عشب برامودا	د
قائم بصورة ممتازة، غير مقطوع بمتوسط (١١,٥ سم).	ليزبلا الشائعة عشب الجاموس	
قاعدة جيدة، غير مقطوع (٧,٥ إلى ١٥ سم)	خليط العشب والبقول بالخرزف والريبع (عشب البستان، النجيل الأبيض، الزوات الايطالي، ليزبلا الشائعة)	
قاعدة جيدة، غير مقطوع (١٠ إلى ١٣ سم)	ليسيديزا سيرسا	
بعد القطع ارتفاعه ٥ سم، قاعدة جيدة جدا قبل القطع		
قائم بصورة جيدة مقطوع لارتفاع ٣,٨ سم	عشب برمودا	هـ
الجدامة المحروقة	عشب برمودا	

الجدول رقم (٣,٨). دليل اختيار فئة العائق النباتي.

الحالة	متوسط طول العشب (سم)	فئة العائق
قائم تماماً	$76 <$	أ
	$61 - 28$	ب
	$25 - 15$	ج
	$15 - 5$	د
	< 5	هـ
قائم بصورة معتدلة	$76 <$	ب
	$61 - 28$	ج
	$25 - 15$	د
	$15 - 5$	د
	< 5	هـ

المصدر: (SCS 1954).

والسرعات المسموح بها للأنواع المختلفة من الغطاء النباتي مبينة في الجدول رقم (٣,٩) (SCS 1954). والسرعات التي تتجاوز 1.52 م/ث ينبغي إن لا تستخدم إلا في حالة الغطاء الجيد والصيانة الجيدة للبطانة النباتية.

وقيم معامل مانتنق n ونتائج ضرب VR لمختلف فئات الإعاقة مبينة في الجدولين رقم (٣,١٠) و (٣,١٠ب) (SCS 1954).

وبعد تحديد فئة الإعاقة لنوع البطانة النباتية المفضلة، خطوات حسابات التصميم كما يلي:

١ - اختر السرعة المسموح بها V ، لنوع البطانة النباتية من الجدول رقم (٣,٩).

الجدول (٣, ٩). السرعات المسموح بها في القنوات التي بها غطاء نباتي.

الغطاء العشبي	مدى الميل (%)	السرعات المسموح بها (م/ث)	
		التربة المقاومة للالانجراف	التربة سهلة الانجراف
عشب برمودا	٥ - ٠	٢,٤٤	١,٨٣
	١٠ - ٥	٢,١٣	١,٥٢
	١٠ <	١,٨٣	١,٢٢
عشب الجاموس، أعشاب كتكاكي الزرقاء،	٥ - ٠	٢,١٣	١,٥٢
الشويعة الملساء، الجرما الزرقاء	١٠ - ٥	١,٨٣	١,٢٢
	١٠ <	١,٥٢	٠,٩١
خليط العشب	٥ - ٠	١,٥٢	١,٢٢
	١٠ - ٥	١,٢٢	٠,٩١
	١٠ <	NR	NR
ليسبيديزا سيرسا، أعشاب الحب المتهدلة،	٥ - ٠	١,٠٧	٠,٧٦
السيقان الزرقاء الصفراء، نبات متسلق،	٥ <	NR	NR
برسيم، عشب متوحش			
ليسبيديزا عادي*، عشب السودان	٥ - ٠	١,٠٧	٠,٧٦
	٥ <	NR	NR

* سنوية تستخدم على المنحدرات المتوسطة أو كحماية مؤقتة حتى يتم إنشاء الأغشية الدائمة.

NR تعني أنها ليست موصى بها.

المصدر: (SCS 1954).

٢ - افترض قيمة أولية لمعامل ماننق n وأقرأ قيمة VR المقابلة من الجدول رقم

(١٠, ١٣) أو رقم (١٠, ٣ب).

٣ - احسب قيمة $R = VR/V$.

٤ - استخدم معادلة ماننق لتقدير $\sqrt{S}$ $VR = (1/n) R^{5/3}$.

٥ - إذا كانت قيمة VR لا تساوي تقريباً القيمة المتحصل عليها من الخطوة رقم (٢) افترض قيمة أخرى لـ n حتى تقترب القيمتان المقدرتان.

٦ - احسب مساحة السريان باستخدام $A = Q/V$.

٧ - حدد الميول الجانبية المقبولة Z لمقطع القناة على شكل شبه منحرف وكذلك افترض عرض القاع الملائم B .

٨ - قدر عمق القناة من المعادلة $A = B D + z D^2$.

الجدول رقم (١٠، ١٣). قيم VR و n لأنواع الإعاقة المختلفة.

قيمة معامل ماننق n لمختلف فئات العوائق					نتائج ضرب السرعة ونصف القطر الهيدروليكي VR (م ^٢ /ث)
أ	ب	ج	د	هـ	
٠,٢٩	٠,١٥	٠,٠٨٥	٠,٠٦	٠,٠٣٦	٠,٠٩٣
٠,١٧٥	٠,١٠	٠,٠٥٨	٠,٠٤٦	٠,٣٠	٠,١٨٦
٠,١٣	٠,٠٨	٠,٠٤٨	٠,٠٤٠	٠,٠٢٩	٠,٢٧٩
٠,١١	٠,٠٧	٠,٠٤٢	٠,٠٣٨	٠,٠٢٧	٠,٣٧٢
٠,٠٩٢	٠,٠٦٣	٠,٠٣٩	٠,٠٣٧	٠,٠٢٦	٠,٤٦٤
٠,٠٨٥	٠,٠٥٩	٠,٠٣٨	٠,٠٣٥	٠,٠٢٥	٠,٥٥٧
٠,٠٧٥	٠,٠٥٢	٠,٠٣٥	٠,٠٣٤	٠,٠٢٥	٠,٧٤٣
٠,٠٧	٠,٠٤٨	٠,٠٣٤	٠,٠٣٢	٠,٠٢٥	٠,٩٢٩
٠,٠٦	٠,٠٤	٠,٠٣٢	٠,٠٣٠	٠,٠٢٤	١,٨٥٨

المصدر: (SCS 1954).

الجدول رقم (١٠، ٣ ب). قيم n و VR لأنواع الإعاقة المختلفة.

نتائج ضرب السرعة في نصف القطر الهيدروليكي VR (م^٢/ث) لأنواع إعاقات مختلفة

معامل ماننق n	أ	ب	ج	د	هـ
٠,٠٢٤	-	-	-	-	١,٨٥٨
٠,٠٣٠	-	-	-	١,٨٥٨	٠,١٩٥
٠,٠٤٠	-	١,٨٥٨	٠,٤٤٦	٠,٢٩٧	٠,٠٦٨
٠,٠٥٠	-	٠,٨٣٦	٠,٢٤٨	٠,١٤٥	٠,٠٣٦
٠,٠٦٠	١,٨٥٨	٠,٥٢٠	٠,١٧٢	٠,٠٩٢	٠,٠٢١
٠,٠٧٠	٠,٩٢٩	٠,٣٦٢	٠,١٢٨	٠,٠٦٤	٠,٠١٤
٠,٠٨٠	٠,٦٤١	٠,٢٧٩	٠,١٠٠	٠,٠٤٦	٠,٠١٠
٠,٠٩٠	٠,٥٠٢	٠,٢٢٣	٠,٠٨٤	٠,٠٣٧	-
٠,١٠	٠,٤٠٩	٠,١٨٦	٠,٠٧٢	٠,٠٣١	-
٠,١٥	٠,٢٣٢	٠,١٠٤	٠,٠٤٠	٠,٠١٥	-
٠,٢٠	٠,١٥٦	٠,٠٦٤	٠,٠٢٧	-	-
٠,٣٠	٠,٠٨٦	٠,٠٣٣	-	-	-
٠,٣٧٥	٠,٠٣٧	-	-	-	-

- توضح أن الناتج VR ليس متغيراً لهذه القيم مع n ونوع الإعاقه.

المصدر: (SCS (1954).

مثال رقم (٣,٤): أوجد أبعاد القناة المحفورة في تربة قابلة للانجراف ومبطنه بعشب برمادا وسيتم الاحتفاظ بمتوسط ارتفاع له حوالي ٦ سم. والتصرف في القناة ٣ م^٣/ث مع ميول ٠,٠٢ للقاع وميول جوانب ٢,٥ أفقي : ١ رأسي.

الحل:

من الجدولين رقمي (٣,٧ و ٣,٨) فإن فئة الإعاقه هي د، ومن الجدول رقم (٣,٩) فإن السرعة القصوى المسموح بها للميل ٢٪ هي ١,٨٣ م/ث.

وبفرض n كمحاولة أولى تساوي ٠,٠٣٣. ومن الجدول رقم (٣, ١٠) أو الجدول رقم (٣, ١٠) ب) فإن VR تساوي ٠,٨٣٦ م^٢/ث ولذا فإن:

$$R = 0.836/1.83 = 0.4568 \text{ m}$$

وباستخدام معادلة ماننق:

$$VR = (1/n) R^{5/3} \sqrt{S} = (1/0.033) (0.4568)^{5/3} \sqrt{0.02} = 1.16$$

وبالمثل فإن المحاولات الأخرى لقيم n المختلفة تعطي القيم الموضحة أدناه:

(١)	(٢)	(٣)	(٤)
n	VR من الجدول (٣, ١٠)	R	$VR = (1/n) R^{2/3} S^{1/2}$
٠,٠٣٤	٠,٧٤٣	٠,٤٠٦	٠,٩٢٦
٠,٠٣٧	٠,٤٦٤	٠,٢٥٤	٠,٣٨٨
٠,٠٣٥	٠,٥٥٧	٠,٣٠٤	٠,٥٥٦

ولقيمة n تساوي ٠,٠٣٥ نجد أن القيم من الأعمدة ٢, ٤ متقاربة ولذا نختار R تساوي ٠,٣٠٤ م.

مساحة المقطع العرضي A :

$$(١) \quad A = 3/1.83 = 1.64 \text{ m}^2 = B D + z D^2$$

المحيط المبلل P :

$$P = A/R = 1.64/0.304 = 5.386 = B + \left[2 \sqrt{(z^2 + 1)} \right] D$$

$$(٢) \quad = B + \left[2 \sqrt{(2.5^2 + 1)} \right] D = B + 5.385 D$$

حيث D عمق الماء، B عرض قاع القناة، وبطريقة التجربة والخطأ يمكن تقدير قيمة D التي تعطي المساحة A المطلوبة والتي تساوي ١,٦٤ م^٢.

قيمة D (قيم المحاولة)	B من المعادلة (٢)	A من المعادلة (١)
٠,٣٩	٣,٢٨٦	١,٦٦٢
٠,٣٨	٣,٣٤	١,٦٣
٠,٣٨٣	٣,٣٢٣	١,٦٤

وللوصول إلى سرعة سريان في القناة أقل من تلك المسموح بها للصقل وهي ١,٨٣ م/ث وذلك للسماح بحافة حرة حوالي ٠,٣٢ م، استخدم القيم B تساوي ٣,٤ م و D تساوي ٠,٧ م.

السريان خلال المنعطفات

Flow Through Bends

بسبب قوي الطرد المركزية وارتفاع مستوى سطح الماء عند جوانب القناة الخارجية عنها عن الجانب الداخلي وكذلك منتصف القناة. وينتج هذا ترحيل السرعة القصوى من خط مركز القناة. والقنوات القابلة للانجراف تتطلب تدعيم الجانب الخارجي عند المنعطفات. والارتفاع في سطح المياه يمكن تقديره من المعادلة التالية (USACE 1994):

$$\Delta y = (C V^2 B) / g r \quad (٣,٢٨)$$

حيث إن:

Δy = الارتفاع الأعلى = الفرق في الارتفاع لسطح الماء (م) بين سطح الماء

النظري عند وسط الخط ووسط الجانب الخارجي للمنحني.

V = السرعة المتوسطة للماء في القناة (م/ث).

B = عرض سطح القناة عند مركز خط المياه (م).

$r =$ نصف قطر المنحني في مركز خط القناة (م).

$C = 0,5$ للسريان تحت الحرج و $1,0$ للسريان الحرج وفوق الحرج.

وللحد من التدفقات الثانوية وتشويه توزيع السرعة عند المنعطفات ينبغي أن تكون r اكبر من ٣ مرات عرض القناة.

وفي بعض الحالات تصمم قنوات تصريف الفيضان في التربة القابلة للانجراف بتقوس محدد وبعيداً عن المخرج أو البناء المقترح للحد من إمكانية انتقال تربة القناة نحو البناء.

وقد تبين أن قاع القناة الرملية يميل إلى وضع نمط التعرج عندما تكون:

$$SQ^{1/4} \leq 0.0007 \quad (٣,٢٩)$$

والقناة نفسها قد تميل إلى وضع نمط ضفيري "مزوج" عندما تكون:

$$SQ^{1/4} \geq 0.0041 \quad (٣,٣٠)$$

والمرحلة الانتقالية تقع بين القيم المحددة في المعادلتين رقم (٣,٢٩) ورقم (٣,٣٠)

(Simons and Senturk 1976, 1992).

الحافة الحرة

Freeboard

الحافة الحرة هي المسافة بين الارتفاع التصميمي لسطح المياه وأعلى جانب

للقناة أو المصرف والقيم المقترحة للحافة الحرة موضحة أدناه (USACE 1994):

- القنوات ذات المقطع المستطيل: ٠,٦١ م.
- القنوات على شكل شبه المنحرف والمبطنة بالاسمنت أو الأحجار الصغيرة: ٠,٧٦ م.
- السدود الأرضية: ٠,٩١ م.

شكل سطح الماء

Water Surface Profiles

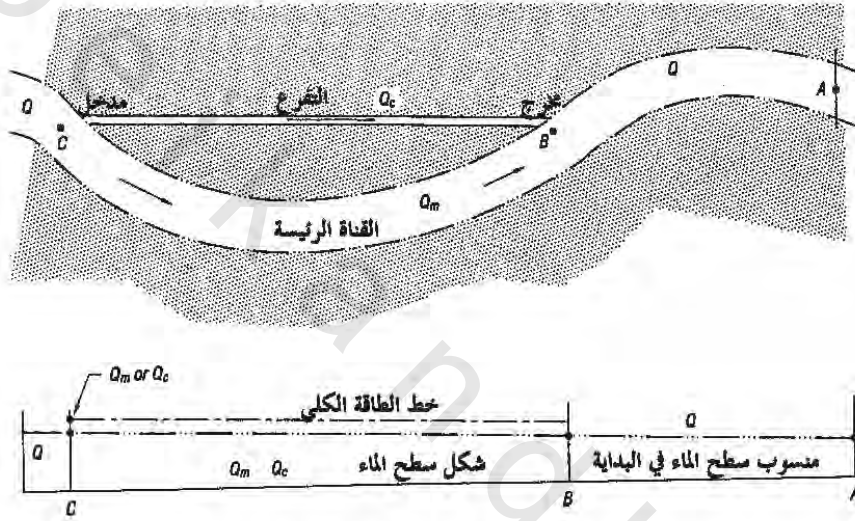
تحليل السريان المستقر لتحديد مواصفات سطح المياه للقنوات ذات المقاطع العرضية والتصرفات التي تتغير من موقع إلى آخر تتم باستخدام نماذج حاسوبية مثل: HEC2 (USACE 1991c) و HEC-RAS (USACE 1988) و WSP-2 (USDA 1976). وهذه التحليلات ضرورية لتقدير سرعة السريان وأعماق المياه عند المواقع المختلفة على طول وعبر القناة، وارتفاع اصطفااف السدود، وجسور الممرات المائية والجسور المعزولة، وتحديد سهول الفيضان... إلخ، وتحليل سهل الفيضان يشمل حسابات شكل سطح الماء للفيضان لفترات العودة المختلفة (أي ١٠، ٢٥، ٥٠، ١٠٠، و ٥٠٠ سنة الفيضانات) بوجود أو بدون التجاوزات. والتحليل الهيدروليكي مع وجود التجاوزات يوفر البيانات المطلوبة للحد من التطورات داخل الفيضانات وتشمل تحديد تخيل لنشأة الفيضان على جانبي التيار. وإن هذه الزيادة الناتجة في ارتفاع سطح المياه هي ضمن الحد الأقصى (أي ٣، ٠ م) أو تلك المتاحة دون عائق عرضي للسريان ولا يقل عن الحد الأدنى الموصى باستخدامه. والمقطع العرضي للسريان لهذا التجاوز المتخيل يسمى "طريق الفيضان". والخيارات لتحليل الماء العائد مع التجاوزات المختلفة مدرجة في النماذج الأنفة الذكر. وبالإضافة إلى ذلك، تشمل هذه النماذج تحليل السريان عند الجسور، المفارق الموزعة أو نقاط تشعب السريان. والمدخلات الأساسية تشمل القطاع العرضي للقناة عبر أقسام على طول القناة حتى المصب، والتصرف في مختلف القطاعات العرضية، ومعامل فاقد الاحتكاك، والتقلصات، والتوسعات، والجسور وأرصعة الدعائم. ورغم أنه لا توجد قيود على عدد القطاعات العرضية المطلوبة لدراسة معينة فمن المستحسن أن يكون أقل عدد من ٦ إلى ١٠ حتى

المصب. وأعداد إضافية من القطاعات العرضية تكون مطلوبة في القنوات المجاورة للأبنية (أي الجسور والمجاري المائية، المساقط، الهدارات وعند نقاط التشعب). ويجب أن يكون المقطع العرضي عمودياً على خطوط السريان المتوقعة. ولتلبية هذا الشرط، قد يكون المقطع العرضي على منحنى.

بعض مشروعات التخفيف البيئي للأنهار الكبرى (نهرى ميسوري والميسيسيبي) بحاجة إلى إصلاح بيئي لسهول الفيضان بتحويل جزء صغير من تصرف الفيضانات إلى تفرعات غير مبوبة أو من خلال قنوات التسريب. وهذه التفرعات تعمل على خلق أراضي رطبة، وبرك، ومجاري مائية خلال سهول الفيضانات، أو من خلال التفرعات القديمة التي قد سدت عند شق القناة. والمياه الخارجة من تلك التفرعات تعود إلى النهر الرئيس مرة أخرى. وتحليل السريان لتفرعات هذه المشاريع تنطوي على تقدير السريان من تلك التفرعات مع الأبعاد المحددة (أي العرض وارتفاعات مداخل ومخارج فتحات التفرع، والقطاعات العرضية وميول أرضية التفرع) تحت مختلف الظروف. وهذا التحليل يمكن تحقيقه عن طريق التجربة والخطأ باستخدام نماذج هيدروليكية، مثل HEC-RAS و HEC-2 (USACE 1998, 1991c). والخطوات الحسابية لذلك كالتالي (Chow 1959):

- ١ - اختر التصرف Q المار في القناة الرئيسة عند فتحة مدخل المنبع.
- ٢ - افترض أن هذا التصرف Q ينقسم إلى عدة تصرفات Q_m (السريان عبر القناة الرئيسة) وتصرف Q_e (السريان عبر فتحة التفرع) عند المدخل، بحيث $Q = Q_m + Q_e$ (انظر الشكل رقم (١، ٣)). وأن Q_m هو تصرف القناة الرئيسة خلال المنبع من مكان مدخل التفرع إلى مخرج التفرع. وعند المخرج فإن السريان Q_e يعود إلى مكانه في المجرى الرئيس ليصبح تصرف القناة Q .

٣ - احسب شكل سطح المياه للسريان Q_m خلال القناة الرئيسة من فتحة مخرج التفرع لفتحة مدخل التفرع والسريان Q يبدأ من نقطة محددة في المصب حتى مخرج التفرع. أوجد ارتفاع خط الطاقة عند مدخل ومخرج التفرع.



الشكل رقم (٣، ١). رسم تخطيطي للسريان المتفرع.

٤ - احسب شكل سطح المياه للسريان Q_c خلال التفرع بدأ من حساب ارتفاع سطح الماء عند المخرج ثم أوجد ارتفاع خط الطاقة عند المدخل.

٥ - إذا كان ارتفاع خط الطاقة عند المدخل لا تتطابقان، كرر الخطوات من رقم (٢) إلى رقم (٤) مع تعديل Q_m إلى أن تصبح القيمتان قريبتان بشكل معقول.

وفي مراحل التخطيط من الضروري إجراء عدد كبير من المحاولات الحسابية للحصول على قيم مقبولة لتحديد أبعاد التفرع ولتحديد التصرف المتحول تحت الظروف المختلفة. وعادة يكون التصرف المتدفق من خلال التفرع Q_c صغيراً

بالنسبة لإجمالي التصرف في النهر Q (أقل من ١٠ ٪)، ولهذا فإن خط الطاقة وارتفاع سطح الماء خلال القناة الرئيسة مع تصرف Q_e لن يختلف كثيراً عن تلك الحالة لإجمالي التصرف Q_m . وفي هذه الحالة الخطوات الحسابية البسيطة كالتالي:

١- احسب ارتفاع سطح الماء والارتفاعات في خط الطاقة عند مدخل القناة الرئيسة لمختلف ظروف السريان Q .

٢- لكل حالة من حالات السريان افترض عدة قيم للسريان المتحول للتفرع وقم بحساب شكل سطح الماء للتفرع عند هذه القيم Q_e بادئاً بحساب ارتفاع سطح الماء عند المخرج (الخطوة رقم (١)).

٣- اختر التصرف المتحول Q_e والذي يؤدي إلى ارتفاع خط الطاقة عند المنبع، وهو يساوي تقريباً ما حسب في الخطوة رقم (١).

مثال رقم (٣، ٥): تفرع مائي على شكل شبه منحرف عرض القاع له ٣٠،٥ م، والميول الجانبية ٣ أفقي: ١ رأسي، وميل القاع ٠،٠٠٢١، والمنسوب العكسي ٢٤٥،٦٣ م المطلوب لتحويل السريان من النهر الرئيس بتصرف متوسط سنوي ١٠٦٠ م^٣/ث. ومنسوب خط الطاقة في النهر عند مدخل التفرع عند ظروف التصرف المتوسط السنوي هو ٢٤٦،٣٢ م. افترض أن التصرف المتحول بواسطة التفرع أقل من متوسط التصرف السنوي. استخدم n تساوي ٠،٠٣٥.

الحل:

حيث إن التفرع له قطاع عرضي وميل قاع ثابتين استخدم معادلة ماننق لتقدير خط الطاقة عند مدخل التفرع.

بطريقة التجربة والخطأ واستخدام قيم عديدة لـ Q_e نجد أن:

$$y = 0.685 \text{ m} \quad , \quad A = 22.30 \text{ m}^2 \quad , \quad P = 34.83 \text{ m}$$

$$R = 0.6402 \text{ m} , \quad V = 0.3075 \text{ m/s} , \quad Q_c = 6.857 \text{ m}^3/\text{s}$$

أي أن التصرف للتفرع ٦,٨٥٧ م^٣/ث.

ومنسوب ميل خط الطاقة عند مدخل التفرع يساوي

$$245.63 + 0.685 + (0.3075^2)/2g = 246.32 \text{ m}$$

وهو يساوي المنسوب المعطى لخط الطاقة عند المنبع لظروف التصرف المتوسط

السنيوي ولذا التصرف المتحول بواسطة المنحدر هو ٦,٨٥٧ م^٣/ث.

السيان الحرج

Critical Flow

يعرف السيان الحرج بأنه السيان عند أقل طاقة نوعية. الطاقة النوعية E (م)

عند مقطع السيان يمكن حسابها من المعادلة:

$$(٣,٣١) \quad E = y + V^2/2g$$

حيث إن:

$$y = \text{عمق السيان (م).}$$

$$V = \text{السرعة (م/ث).}$$

للقنوات ذات المقطع المستطيل:

$$(٣,٣٢) \quad E = y + q^2/(2g y^3)$$

حيث إن:

$$q = \text{التصرف لكل وحدة عرض من القناة (م}^3\text{/ث).}$$

وللحصول على القيمة الدنيا للطاقة النوعية نضع $dE/dy = 0$ وهذا يتج:

$$(٣,٣٣) \quad y_c = (q^2/g)^{1/3}$$

$$(٣,٣٤) \quad E(\text{minimum}) = 3/2 (y_c)$$

(٣,٣٥)

$$V_c = \sqrt{(g y_c)}$$

حيث إن:

$$y_c = \text{العمق الحرج (م).}$$

$$V_c = \text{السرعة عند السريان الحرج (م/ث).}$$

للسريان الحرج، رقم فرود يساوي الواحد الصحيح $F = V/\sqrt{(g y)} = 1$. وعندما تكون $F > 1$ يكون السريان فوق الحرج، أما عندما تكون $F < 1$ يكون السريان تحت الحرج.

وللقنوات الشائعة وعند تصرف معلوم Q (م^٣/ث) فإن:

(٣,٣٦)

$$E = y + Q^2 / (2g A^2)$$

وللحصول على القيمة الدنيا للطاقة النوعية اجعل $dE/dy = 0$ وهذا ينتج

(٣,٣٧)

$$Q^2 / g = A^3 / T$$

أو

(٣,٣٨)

$$V^2 / 2g = D / 2$$

حيث إن:

$$T = dA/dy = \text{العرض العلوي (م).}$$

$$D = \text{العمق الهيدروليكي} = A/T.$$

ويمكن استخدام المعادلة رقم (٣,٣٧) لاستنتاج معادلات أخرى خاصة بالتصرف الحرج لمختلف أشكال مقاطع القنوات، وكمثال لذلك للقنوات ذات المقطع المستطيل:

(٣,٣٩)

$$Q_c = B \sqrt{(g y^3)}$$

وللمقطع المثلث الشكل:

(٣، ٤٠)

$$Q_c = z y^{2.5} \sqrt{g/2}$$

وللمقطع على شكل شبه منحرف :

(٣، ٤١)

$$Q_c = (B y + z y^2)^{1.5} \sqrt{g/(B + 2 z y)}$$

وللمقطع على شكل القطع المكافئ:

(٣، ٤٢)

$$Q_c = T \sqrt{\{(8/27) g y^3\}}$$

حيث إن:

z = ميل الجوانب.

B = عرض القاع.

قد يشكل قطاع السريان الحرج قطاعاً حاكماً لكل من السريان فوق الحرج والسريان تحت الحرج. والقطاع الحاكم هو ذلك القطاع حيث تكون هناك علاقة محددة وواضحة بين المرحلة والتصرف. وهذا القطاع يتحكم في السريان بطريقة تجعل ظروف السريان في جانب واحد (أي إما المنبع أو المصب) لا يتأثر بالجانب الآخر. وفي حالة السريان تحت الحرج يكون التحكم في السريان عند نهاية المصب، وفي حالة السريان فوق الحرج يكون التحكم في السريان عند المنبع.

هيدروليكا الهدارات والمفايض

Hydraulics of Weirs and Spillways

الهدارات ذات المصطبة العريضة وذات المصطبة الحادة

Broad-Crested and Sharp-Crested Weirs

تصنف الهدارات على أنها ذات مصطبة عريضة إذا كانت مصطبة الهدار عريضة بما يكفي لمنع حدوث دوامة حرة عند ركن الهدار (Rouse 1950). ويعتبر الهدار أنه ذو مصطبة عريضة إذا كان الضاغط فوق المصطبة H أقل من 1.5 B حيث B هو عرض

مصطبة الهدار المواجهة لاتجاه السريان. أما إذا كانت $H > 1.5 B$ فإن الدوامة تتكون وتنفصل فيسلك الهدار مسلك الهدار ذو المصطبة الحادة.

وإذا كانت حافة الهدار ذو المصطبة العريضة المواجهة للسريان مدورة جيداً لتقليل أثر الانكماش وإذا كان الاحتكاك عبر طول عرضه مقداراً مهماً أو كانت الحافة مائلة للتغلب على فاقد الضاغط نتيجة الاحتكاك هنا يكون التصرف عند العمق الحرج y_c . وفي حالة السقوط الحرف فإن y_c تحدث عند $3y_c$ إلى $4y_c$ من الحافة العلوية لمصطبة الهدار، و $y_c = 1.4 y_b$ حيث y_b هو عمق الماء عند الحافة. وعند المقطع الحرج يكون

$$(3, 33) \quad y_c = (q^2/g)^{1/3}$$

$$(3, 43) \quad H = y_c + V_c^2/2g = y_c + (q/y_c)^2/2g = y_c + y_c/2 = 3/2 y_c = 2.098 y_b$$

$$(3, 44) \quad q = \left[\sqrt{(8g/27)} \right] H^{3/2}$$

ولهذا فالهدار ذو الحافة العريضة يكون التصرف الأقصى النظري له يمكن إيجاده:

$$(3, 45) \quad Q = 1.70 L H^{3/2} = 5.17 L y_b^{3/2}$$

الضاغط H يجب أن يقاس على بعد $2.5H$ خلف حرف المصطبة العريضة للسريان وأعلىها، لمعظم الحالات العملية فإن معامل الهدار 1.70 ينبغي تقليله للتغلب على فاقد الاحتكاك على المصطبة. وقد وجد أن هذا المعامل يختلف باختلاف الضاغط H وعرض مصطبة الهدار (Brater et al. 1966). ولا يتأثر السريان أعلى الهدار ذو المصطبة العريضة بالغمر بشكل ملحوظ إذا كان $(2/3 H + P) < y_T$ ، حيث y_T عمق الماء الخلفي، P ارتفاع الهدار فوق قاع القناة.

تصرف الهدار ذو المصطبة الحادة يعطى بالمعادلة:

$$(3, 46) \quad Q = 2/3 C_d L \left[\sqrt{(2g)} \right] H^{3/2} = C L H^{3/2}$$

معامل الهدار C يتغير من 1.76 إلى 2.54 مع وجود نسبة H/P عند نهاية الانكماش نتيجة للحواف الحادة عند نهايات الهدار. ولا يتأثر السريان أعلى الهدار ذو المصطبة الحادة بالغمر بشكل ملحوظ إذا كان $y_T < (0.25 H + P)$ ، أما الغمر الأكبر:

$$Q_1/Q = [1 - (H_1/H)^{3/2}]^{0.385} \quad (3, 47)$$

حيث إن:

$$Q_1 = \text{التصرف في وجود الغمر.}$$

$$H_1 = \text{عمق الماء الخلفي أعلى حافة مصطبة الهدار.}$$

المصطبة مستدقة الرأس (العقدية) Ogee Crest

إذا كانت الدوامات السفلية أو العلوية للماء فوق الهدار ذو المصطبة الحادة مشبعاً بالهواء (كل من الدوامتين عند الضغط الجوي) فإن معامل التصرف يمكن إيجاده من المعادلة التالية (Chow 1959).

$$C = 1.805 + 0.221 H/P \quad (3, 48)$$

وفي حالة عدم تشبع الدوامة السفلية وهي حالة غير مرغوب فيها في الأداء الهيدروليكي والضغط السالبة في الاتجاه السفلي للمصب. ولتقليل الضغوط السالبة فقد وضعت الأشكال العقدية ليتطابق مع شكل الدوامة السفلية كلما أمكن تطبيقه:

$$X^n = K H_d^{n-1} Y \quad (3, 49)$$

حيث إن:

X و Y المحورين السيني والصادي للشكل بنقطة أصل عند أعلى نقطة في المصطبة.

H_d = الضاغط التصميمي ويشمل ضاغط السرعة نتيجة للسريان.

K و n موضحة في الجدول رقم (3, 11).

الجدول رقم (٣, ١١). المعاملات والأسس لمعادلة المصطبة ذات الشكل العقدي.

الميل في الاتجاه العلوي للقناة	K^a	n^a	K^b	n^b
رأسي	٢,٠٠٠	١,٨٧٢	٢,١٤١	١,٨٣٧
١ أفقي: ٣ رأسي	٢,٠٠٠	١,٨٥١	٢,١٤١	١,٨١٧
٢ أفقي: ٣ رأسي	١,٩٠١	١,٨٠٢	٢,٠٥٨	١,٧٧٢
١ أفقي: ١ رأسي	١,٨٥٢	١,٧٨٠	٢,٠٥٨	١,٧٦١

المصدر: (USBR 1987).

a : السرعة مهملة لضغط الاقتراب.

b : سرعة ضاغط الاقتراب تساوي $0.20 H_d$.

واستناداً إلى اختبار النماذج وضعت أشكال هندسية لتوفير حافة علوية ناعمة للمصطبة العقدية في شكل قوسين بأنصاف أقطار مختلفة. الشكل النموذجي للمصطبة العقدية موضح بالشكل رقم (٣, ٢) (USBR 1987).
التصرف للمصطبة العقدية يمكن إيجاده بالمعادلة:

$$Q = C L H_o^{3/2} \quad (٣, ٥٠)$$

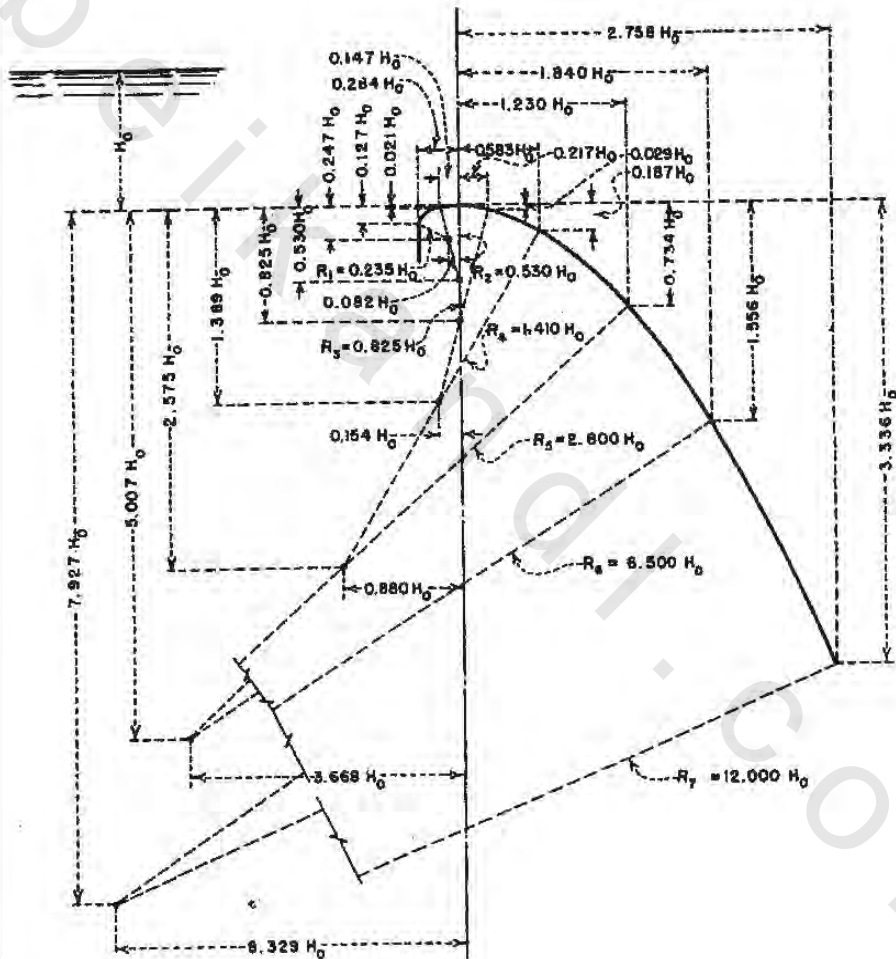
حيث إن:

$$C \text{ تتراوح من } ٢,١٨١ \text{ إلى } ٢,٢٢٥ \text{ في حالة } H_o = H_d$$

$$P/H_d > 2.50$$

المنحنيات التجريبية متاحة لتقدير C لقيم أخرى من H_o و P/H_d بخلاف الضاغط التصميمي (USBR 1987). واختيار قيم C مختلفة عن القيم P/H_d مدرجة في الجدول رقم (٣, ١٢).

وقيم تقريبية لمعامل التصرف لضغوط تصميمية أخرى للشكل العقدي مبينة في الجدول رقم (١٢، ٣ ب).



الشكل رقم (٣، ٢). الشكل العقدي النموذجي.

الجدول رقم (١٢, ١٣). معامل التصرف للجانب الرأسي للمصطبة ذات الشكل العقدي بتغير قيمة P .

C	P/H_d
١,٧٠٠	٠
٢,٠٩٨	٠,٥
٢,١٤٢	١,٠
٢,١٥٩	١,٥
٢,١٧٠	٢,٠
٢,١٧٦	٢,٥
٢,١٨١	٣,٠

H_d = الضاغط التصميمي مشتملاً السرعة المطبقة.

المصدر: (USBR 1987).

الجدول رقم (١٢, ٣ب). معامل التصرف للجانب الرأسي للمصطبة ذات الشكل العقدي للقيم المختلفة عن ضاغط التصميم.

C_s/C	H_o/H_d
٠,٨	٠,٠٥
٠,٨٥	٠,٢٠
٠,٩	٠,٤٠
٠,٩٤	٠,٦
٠,٩٧	٠,٨
١,٠	١,٠
١,٠٢٥	١,٢
١,٠٥	١,٤
١,٠٧	١,٦

C_s = معامل التصرف عند ضاغط H_o .

المصدر: (USBR 1987).

Flow along Steep Slopes السريان عبر المنحدرات شديدة الميل

من الحالات الشائعة التي تعترض السريان فوق الحرج السريان في الناحية السفلية للتيار عبر المصب أو عند ميل الوزرة في نهاية المساقط. تقدير السرعة وعمق السريان على قمة هذه المنحدرات الشديدة تكون مطلوبة لتصميم قياسات الطاقة المفقودة عند هذه الأبنية. ويمكن أن يتم ذلك باستخدام معادلة الطاقة:

$$(3.51) \quad H + z = y + q^2 / (2 g y^2) + q^2 n^2 L / y^{3.33}$$

حيث إن:

H = الضاغط فوق المصطبة ويشمل سرعة الاقتراب (م).

z = ارتفاع المصطبة فوق المرتكز (م).

L = طول الميل (م).

q = وحدة التصريف (م³/ث) = $CH^{1.5}$.

C = معامل التصريف للمصطبة.

y = عمق السريان عند المرتكز (م).

تحل المعادلة رقم (3.51) بطريقة التجربة والخطأ. ويمكن حساب السرعة عند

المرتكز وتساوي $V = q/y$. وللمنحدرات شديدة الميل والتي تتغير الميول فيها من

٠.٦ أفقي: ١ رأسي إلى ٠.٨ أفقي: ١ رأسي عند المرتكز يمكن تقديرها من المنحنيات

التجريبية المتوفرة في مختلف المراجع مثل (Chow 1959; Peterka 1978). والقيم الموصى

بها موضحة في الجدول رقم (3.13).

الجدول رقم (٣, ١٣). السرعات للوجه السفلي للسريان داخل القناة بميل من ٠,٦ أفقي: ١ رأسي إلى ٠,٨ أفقي: ١ رأسي.

السرعة (م/ث)						Z(m)
H=12.2m	H=9.1m	H=6.1m	H=3.05m	H=2.29m	H=0.76m	
١٣,٧	١٣,٧	١٣,٧	١٣,٧	١٣,٤	١٢,٢	١٢
١٩,٨	١٩,٨	١٩,٨	١٨,٩	١٨,٦	١٥,٢	٢٤
٢٤,٤	٢٤,٤	٢٤,٤	٢٢,٩	٢١,٣	١٥,٨	٣٧
٢٨,٠	٢٨,٠	٢٧,٤	٢٤,٧	٢٣,٢	١٥,٨	٤٩
٣٢,٠	٣١,٧	٢٩,٩	٢٦,٢	٢٤,١	١٥,٨	٦١
٣٤,٤	٣٣,٨	٣٢,٠	٢٧,٤	٢٤,٤	١٥,٨	٧٣
٣٧,٢	٣٦,٣	٣٣,٥	٢٨,٠	٢٤,٧	١٥,٨	٨٥
٣٩,٦	٣٨,١	٣٥,٤	٢٨,٣	٢٤,٧	١٥,٨	٩٨
٤١,٥	٣٩,٦	٣٦,٦	٢٨,٣	٢٤,٧	١٥,٨	١١٠
٤٣,٦	٤١,٥	٣٧,٢	٢٨,٣	٢٤,٧	١٥,٨	١٢٢

المصدر: (Peterka (1978).

القفزة الهيدروليكية Hydraulic Jump

تحدث القفزة الهيدروليكية في المرحلة الانتقالية بين السريان فوق الحرج والسريان تحت الحرج. وتشمل الحالات التي تعترض السريان فوق الحرج أسفل المنحدر الحاد لمصرف المياه أو المساقط المبنية أو السريان من خلال فتح بوابة دخول قناة المنحدر البسيط على الجانب السفلي. وللقفزة الهيدروليكية في القنوات المستطيلة الأفقية (انظر الشكل رقم (٣, ٣)) تكون:

$$y_1 y_2 (y_1 + y_2) = 2 q^2 / g \quad (١٣, ٥٢)$$

$$y_2 / y_1 = 1/2 \left[\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1 \right] \quad (٣, ٥٢)$$

(٣,٥٣)

$$H_L = (y_2 - y_1)^3 / (4 y_1 y_2)$$

(١٣,٥٤)

$$E_1 = y_1 + V_1^2 / 2g = y_1 + q^2 / (2g y_1^2)$$

(ب ٣,٥٤)

$$E_2 = y_2 + V_2^2 / 2g = y_2 + q^2 / (2g y_2^2)$$

حيث إن:

y_1 = عمق الماء فوق الحرج قبل القفزة الهيدروليكية.

y_2 = عمق الماء تحت الحرج بعد القفزة الهيدروليكية.

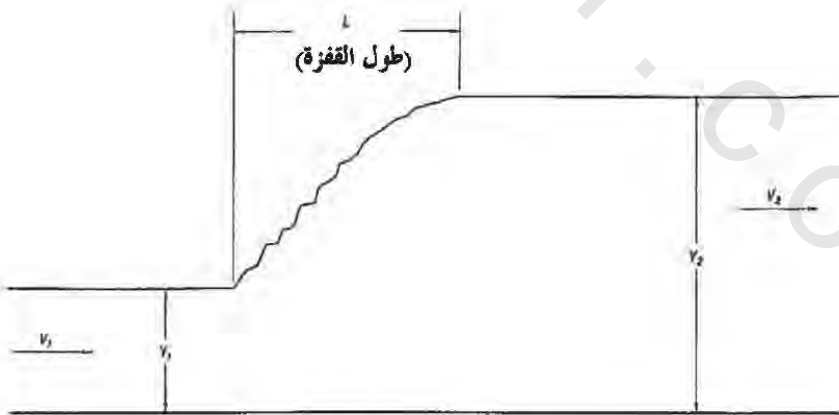
V_1, V_2 = السرعة قبل وبعد القفزة الهيدروليكية على الترتيب.

$F_1 = V_1 / \sqrt{g y_1}$ = رقم فرود قبل القفزة الهيدروليكية

H_L = فاقد الطاقة خلال القفزة الهيدروليكية.

q = التصريف لكل وحدة عرض من القناة.

E_1, E_2 = الطاقة النوعية قبل وبعد القفزة على الترتيب.



الشكل رقم (٣,٣). القفزة الهيدروليكية في القنوات الأفقية.

يمكن استنتاج عمق الماء بعد القفزة y_2 من المنحنيات البيانية التجريبية المنشورة بين y_2/y_1 و F_1 لمختلف أنواع الوزرة المائلة (Chaw 1959). وفي كثير من الحالات العملية تكون وحده التصرف q وارتفاعات سطح الماء والسرعات عند المنبع والمصب للمسقط معروفة من حسابات منحني سطح الماء. ويمكن اعتماد طريقة التجربة والخطأ لتحديد معاملات القفزة الهيدروليكية لمثل هذه الحالات. وتلك المعاملات عديمة الوحدات وذلك بوضع $x = y_1/y_c$ ، $y = y_2/y_c$ ، $n = E_2/y_c$ ، $m = E_1/y_c$ ، $\ell = H_L/y_c$ حيث y_c العمق الحرج ويساوي $y_c = (q^2/g)^{1/3}$. لاحظ أن x تتغير من صفر إلى الواحد الصحيح. ولأي اختيار لقيمة x فإن قيم المعاملات عديمة الوحدات m ، y ، n ، z يمكن استنتاجها من:

$$m = x + 1/(2x^2) \quad (١٣,٥٥)$$

$$xy(x+y) = 2 \quad (٣,٥٥ ب)$$

$$n = y + 1/(2y^2) \quad (٣,٥٥ ج)$$

$$\ell = (y-x)^3/(4xy) \quad (٣,٥٥ د)$$

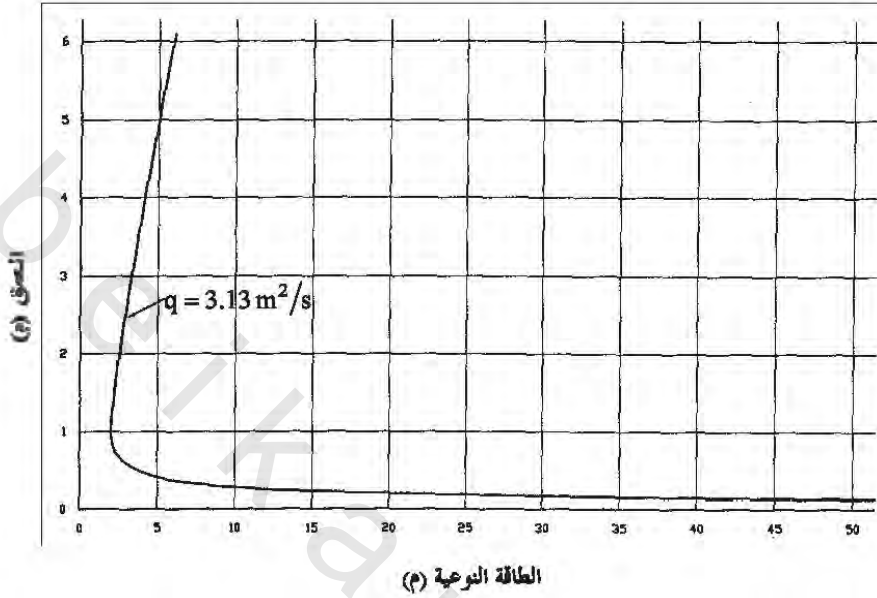
اختيار قيم y ، x ، m ، n ، ℓ مدرجه في الجدول رقم (٣,١٤). ويمكن رسم منحني بياني واحد بين y_1 و E_1 لمختلف قيم q . وهذا المنحنى يمكن تحديده لرسم منحني بياني بين y_2 و E_2 . ويصبح هذا المنحنى البياني هو منحني الطاقة النوعية. ومنحنى الطاقة النوعية النموذجي موضح في الشكل رقم (٣,٤). والمجموعة الثانية من المنحنيات البيانية يمكن إعدادها بين H_L و E_2 للقيم المختلفة من q وتسمى منحنيات بلنش، وهذه المنحنيات مفيدة للمواقع التي لا تزال ذكرها كأحواض ترسيب أرضية في التطبيقات العملية (Singh 1967). ومنحنى بلنش النموذجي موضح في الشكل رقم (٣,٥).

الجدول رقم (٣، ١٤). اختيار القيم ℓ ، n ، m ، x ، y .

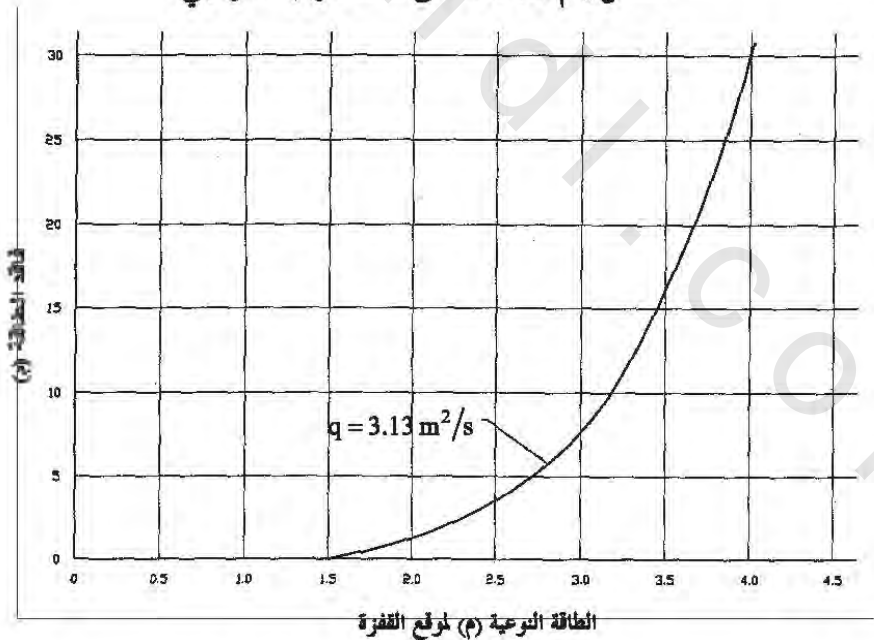
$\ell = H_L/y_c$	$n = E_2/y_c$	$m = E_1/y_c$	$x = y_1/y_c$	$y = y_2/y_c$
٠	١,٥	١,٥	١,٠	١,٠
٠,٠٠١٨٢٤	١,٥١٣٢٢٣	١,٥١٥٠٤٧	٠,٩٠٦٢٥٦	١,١
٠,٠١٣٤٨٨	١,٥٤٧٢٢٢	١,٥٦٠٧١	٠,٨٢٣٦١	١,٢
٠,٠٤٢٥٦١	١,٥٩٥٨٥٨	١,٦٣٨٤١٩	٠,٧٥٠٣٤٣	١,٣
٠,٠٩٥٢٢١	١,٦٥٥١٠٢	١,٧٥٠٣٢٣	٠,٦٨٥١٢٥	١,٤
٠,١٧٦٩٥٣	١,٧٢٢٢٢٢	١,٨٩٩١٧٥	٠,٦٢٦٨٩٣	١,٥
٠,٢٩٢٩٤٤	١,٧٩٥٣١٣	٢,٠٨٨٢٥٦	٠,٥٧٤٧٧٣	١,٦
٠,٣٩١٣٩٦	١,٨٤٦٤٥٨	٢,٢٣٧٨٥٤	٠,٥٤٣١٧٧	١,٦٦٦٤
٠,٤٤٨٣١١	١,٨٧٣٠١	٢,٣٢١٣٢١	٠,٥٢٨٠٣١	١,٧
٠,٦٤٨٢٤٥	١,٩٥٤٣٢١	٢,٦٠٢٥٦٦	٠,٤٨٦٠٤٢	١,٨
٠,٦٧٠٨٩٤	١,٩٦٢٦٢	٢,٦٣٣٥١٤	٠,٤٨٢٠٨٢	١,٨١
٠,٦٩٤٠٤٧	١,٩٧٠٩٤٨	٢,٦٦٤٩٩٥	٠,٤٧٨١٦٥	١,٨٢
٠,٧١٧٧١	١,٩٧٩٣٠٣	٢,٦٩٧٠١٣	٠,٤٧٤٢٨٨	١,٨٣
٠,٧٤١٨٨٩	١,٩٨٧٦٨٤	٢,٧٢٩٥٧٣	٠,٤٧٠٤٥٢	١,٨٤
٠,٧٦٦٥٨٨	١,٩٩٦٠٩٢	٢,٧٦٢٦٨	٠,٤٦٦٦٥٦	١,٨٥
٠,٧٩١٨١٤	٢,٠٠٤٥٢٥	٢,٧٩٦٣٤	٠,٤٦٢٨٩٩	١,٨٦
٠,٨١٧٥٧٣	٢,٠١٢٩٨٤	٢,٨٣٠٥٥٦	٠,٤٥٩١٨٢	١,٨٧
٠,٨٤٣٨٦٨	٢,٠٢١٤٦٧	٢,٨٦٥٣٣٥	٠,٤٥٥٥٠٣	١,٨٨
٠,٨٧٠٧٠٨	٢,٠٢٩٩٧٤	٢,٩٠٠٦٨١	٠,٤٥١٨٦٣	١,٨٩
٠,٨٩٨٠٩٦	٢,٠٣٨٥٠٤	٢,٩٣٦٦	٠,٤٤٨٢٦	١,٩
١,٢٠٣٤٢٧	٢,١٢٥	٣,٣٢٨٤٢٧	٠,٤١٤٢١٤	٢
١,٥٧٠٠٥٢	٢,٢١٣٣٧٩	٣,٧٨٣٤٣١	٠,٣٨٣٤٨٦	٢,١

تابع الجدول رقم (١٤، ٣).

$\ell = H_L/y_c$	$n = E_2/y_c$	$m = E_1/y_c$	$x = y_1/y_c$	$y = y_2/y_c$
٢,٠٠٤٠٥٤	٢,٣٠٣٣٠٦	٤,٣٠٧٣٥٩	٠,٣٥٥٥٧١	٢,٢
٢,٥١١٨٠١	٢,٣٩٤٥١٨	٤,٩٠٦٣١٩	٠,٣٣٠٥٦٢	٢,٣
٣,٠٩٩٩٥٧	٢,٤٨٦٨٠٦	٥,٥٨٦٧٦٣	٠,٣٠٧٧٥٨	٢,٤
٣,٧٧٥٤٨٣	٢,٥٨	٦,٣٥٥٤٨٥	٠,٢٨٧٠٤	٢,٥
٣,٨٣٢٠٥٩	٢,٥٨٧٣٠٣	٦,٤١٩٣٦٢	٠,٢٨٥٥٠٨	٢,٥٠٧٨
٤,٥٤٥٦٥	٢,٦٧٣٩٦٤	٧,٢١٩٦١٥	٠,٢٦٨١٩٣	٢,٦
٥,٤١٨٠٢٢	٢,٧٦٨٥٨٧	٨,١٨٦٦١	٠,٢٥١٠١٢	٢,٧
٦,٤٠٠٤٧٩	٢,٨٦٣٧٧٦	٩,٢٦٤٢٥٤	٠,٢٣٥٣٢٤	٢,٨
٧,٥٠١٢٠٢	٢,٩٥٩٤٥٣	١٠,٤٦٠٦٥	٠,٢٢٠٩٧٤	٢,٩
٨,٧٢٨٦٧٩	٣,٠٥٥٥٥٦	١١,٧٨٤٢٣	٠,٢٠٧٨٢٥	٣
١٠,٠٩١٧١	٣,١٥٢٠٢٩	١٣,٢٤٣٧٤	٠,١٩٥٧٥٥	٣,١
١١,٥٩٩٣٨	٣,٢٤٨٨٢٨	١٤,٨٤٨٢١	٠,١٨٤٦٥٧	٣,٢
١٣,٢٦١١١	٣,٣٤٥٩١٤	١٦,٦٠٧٠٣	٠,١٧٤٤٣٤	٣,٣
١٥,٠٨٦٦١	٣,٤٤٣٢٥٣	١٨,٥٢٩٨٦	٠,١٦٥٠٠٣	٣,٤
١٧,٠٨٥٨٨	٣,٥٤٠٨١٦	٢٠,٦٢٦٧	٠,١٥٦٢٨٧	٣,٥
١٩,٢٦٩٢٥	٣,٦٣٨٥٨	٢٢,٩٠٧٨٣	٠,١٤٨٢١٩	٣,٦
٢١,٦٤٧٣٣	٣,٧٣٦٥٢٣	٢٥,٣٨٣٨٦	٠,١٤٠٧٣٩	٣,٧
٢٤,٢٣١٠٦	٣,٨٣٤٦٢٦	٢٨,٠٦٥٦٨	٠,١٣٣٧٩٣	٣,٨
٢٧,٠٣١٦٥	٣,٩٣٢٨٧٣	٣٠,٩٦٤٥٢	٠,١٢٧٣٣٥	٣,٩
٣٠,٠٦٠٦	٤,٠٣١٢٥	٣٤,٠٩١٨٨	٠,١٢١٣٢	٤

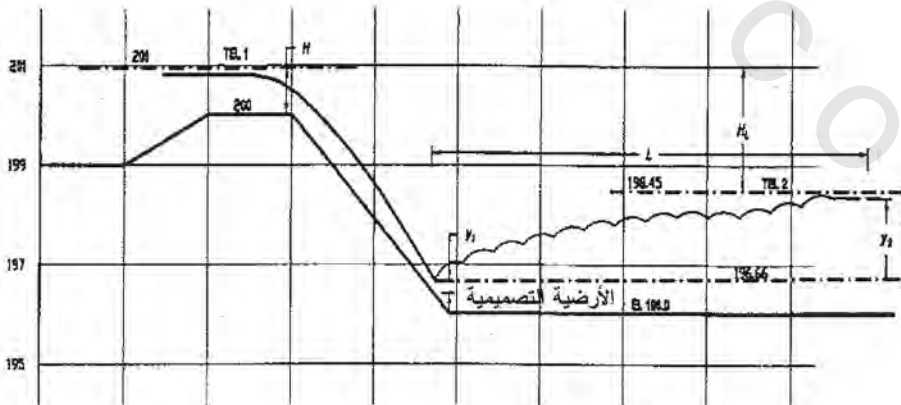


الشكل رقم (٣، ٤). منحنى الطاقة النوعية النموذجي.



الشكل رقم (٣، ٥). منحنى بلنش النموذجي.

مطلوب تحديد موقع القفزة الهيدروليكية لتصميم الساحات وأحواض الترسيب لتصبح مساقط هيكليّة، مصارف المياه، وبوابات المسيل. والترتيب النموذجي للمساقط بوزرة مائلة موضح في الشكل رقم (٣.٦). إذا كان العمق المتوفر للماء الخلفي يفوق ارتفاع القفزة التالية فإن القفزة الهيدروليكية ستتشكل فوق الوزرة المائلة، وتشكل وجه المصب هيكل المسقط أو مصرف المياه. وإذا كان العمق المتوفر للماء الخلفي يقل عن ارتفاع القفزة التالية فإن القفزة الهيدروليكية ستتشكل على الجزء الأفقي الذي يربط المسقط بقناة المصب أو نهاية بوابات المسيل. وموقع القفزة الهيدروليكية على الوزرة الأفقية قليلة الاحتكاك وحيث السريان تحت الحرج قد يكون غير مستقر ويتنقل للأمام مع تغيرات طفيفة نسبياً في عمق التصريف أو عمق الماء الخلفي. ومن ناحية أخرى فإن القفزة الهيدروليكية على الوزرة المنحدر قد تكون مقصورة على منطقة محددة جداً لمجموعة كبيرة من ظروف السريان. ولذلك فمن الناحية العملية ومن المستحسن أن تتشكل القفزة الهيدروليكية فوق أو في طرف الوزرة المائلة لمعظم أحوال السريان (انظر الشكل رقم ٣، ٦).



الشكل رقم (٣، ٦). مسقط بوزرة مائلة.

يمكن تقدير طول القفزة L على الأرضية الأفقية من القيم الواردة في الجدول

رقم (٣, ١٥) (USBR 1987).

الجدول رقم (٣, ١٥). طول القفزة الهيدروليكية على القاع الأفقي.

L/y_2	F
٣,٦	١,٥
٤,٤	٢
٥,٢٥	٣
٥,٨	٤
٦,٠	٥
٦,١٥	٦
٦,١٥	٧
٦,١٥	٨
٦,١٥	٩
٦,١٥	١٠
٦,١٠	١١
٦,٠٥	١٢
٦,٠٢	١٣
٦,٠	١٤
٥,٩٢	١٥
٥,٨٥	١٦
٥,٨	١٧
٥,٧	١٨
٥,٦	١٩
٥,٤٥	٢٠

المصدر: (USBR 1987).

الخطوات الحسابية لمكان القفزة الهيدروليكية على الوزرة الأفقية أو أرضية ذات ميل معتدل (الشكل رقم ٣،٧) كما يلي (Chow 1959):

١- احسب عمق المياه y عند الوزرة المائلة المانع للماء أو بعد نهاية بوابة المصب مباشرة، وعمق الماء الخلفي y_2' في قناة المصب.

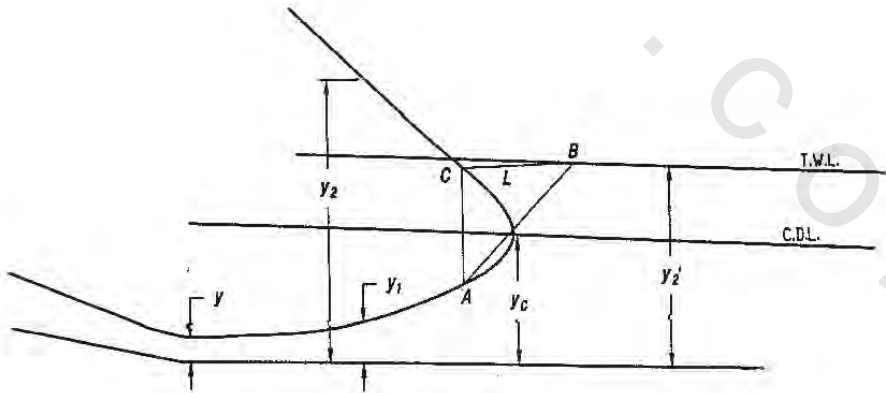
٢- احسب العمق الحرج y_c .

٣- احسب شكل ميل سطح الماء المعتدل بدءاً من y_c عند نهاية المصب إلى y في نهاية المنبع.

٤- لكل عمق y_1 وعلى شكل سطح الماء المحسوب احسب F_1 وعمق القفزة التالية المرافقة F_2 وارسم بيانياً أعماق القفزة التالية (الشكل رقم ٣،٧). القفزة التي ستشكل تكون ذات ميل منتظم إذا كانت $y_2' < y_2$.

٥- حدد نقطة تقاطع شكل القفزة التالية وخط عمق الماء الخلفي.

٦- قدر طول القفزة L المقابلة لعمق القفزة التالية عند نقطة التقاطع المذكورة.



الشكل رقم (٣،٧). القفزة الهيدروليكية على ميل متوسط.

٧- عين موقع التقاطع الأفقي L بين عمق الماء الخلفي وشكل عمق القفزة التالية. هذا هو مكان القفزة A . وإذا كان مقدار عمق القفزة التالية عند هذا المكان يختلف اختلافاً كبيراً عن تلك المستخدمة في تقدير طول القفزة أعد حساب طول قفزة الماء الخلفي وعين موقع نقطة التقاطع لتحسين موقع القفزة.

تشكل القفزة الهيدروليكية في الوزرة شديدة الانحدار إذا كانت $y_2' > y_2$. الخطوات الحسابية لهذه الحالة (الشكل رقم ٣، ٧ ب) كما يلي (Chow 1959):

١- احسب عمق المياه y ، على الوزرة المائلة مباشرة بعد نهاية بوابة المسيل وعمق الماء الخلفي y_2' وفي اتجاه مصب القناة.

٢- احسب العمق الحرج y_c ، وارسم بيانياً خط العمق الحرج (CDL) فوق الوزرة شديدة الانحدار.

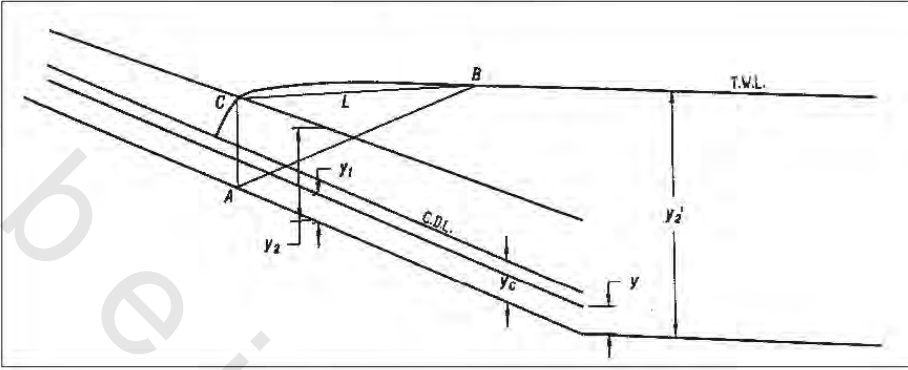
٣- احسب شكل سطح المار المنحدر بشدة بدءاً من y_c عند نهاية المنبع حتى y_2' عند نهاية المصب.

٤- لكل عمق y_1 عند سطح الماء في الوزرة شديدة الانحدار، عمق قفزة تالية (بالتسلسل) y_2 . وارسم منحنى تسلسل عمق الماء.

٥- حدد موقع نقطة تقاطع شكل القفزة التالية مع خط عمق الماء الخلفي.

٦- قدر طول القفزة التجريبي L والمرادفة لعمق القفزة التالية عند نقطة التقاطع للعمق المذكور أعلاه.

٧- حدد التقاطع الأفقي L بين عمق الماء الخلفي وشكل عمق القفزة التالية. هذا هو موقع القفزة A . وإذا كان عمق القفزة التالية عند هذا الموقع يختلف اختلافاً كبيراً عن تلك المستخدمة في تقدير طول القفزة التجريبي أعد حساب طول قفزة الماء الخلفي وعين التقاطع لتحسين موقع القفزة.



الشكل رقم (٣،٧). القفزة الهيدروليكية على ميل شديد.

وعندما يكون شكل سطح الماء متاحاً لقيم q المعلومة عند كل من منبع السريان ومصب السريان لمنشأة سقوط فإنه من المرغوب أن تقع القفزة الهيدروليكية عند القاع الأفقي أو عند منبع السريان عند الطرف الأمامي للوزرة المائلة، والخطوات الحسابية المبسطة لتلك الحالات العملية تكون كالتالي:

• احسب الطاقة الكلية لنقطة السقوط في منبع السريان، $TEL1$ = منسوب سطح الماء عند منبع السريان + $V_1^2 / 2g$ ، حيث V_1 هي سرعة السريان المقرب. أهمل فاقد الاحتكاك على الوزرة المائلة.

• احسب الطاقة الكلية لنقطة السقوط عند المصب، $TEL2$ = منسوب الماء الخلفي + $V^2 / 2g$ ، حيث V هي السرعة في قناة مصب السريان.

• احسب الفاقد في الضاغط H_L حيث $H_L = TEL1 - TEL2$.

• بمعرفة q و H_L احسب E_2 باستخدام منحنيات بلنش أو الخطوات الحسابية المستخدمة لتعيين هذه المنحنيات (الموضحة سابقاً في هذا الجزء).

• بمعرفة q و E_2 احسب y_2 من المنحنيات البيانية للطاقة النوعية أو الخطوات الحسابية المستخدمة لتحديد هذه المنحنيات (الموضحة سابقاً في هذا الجزء).

• قم برسم خط عند العمق E_2 أسفل TEL_2 وحدد موضع النقطة حيث يتقاطع الخط مع الوزرة المائلة. إذا كانت الوزرة أفقية وتقع عند أو أسفل هذا الارتفاع فإن القفزة الهيدروليكية يحتمل أن تكون عند أو فوق الطرف الأمامي من الوزرة المائلة (الشكل رقم ٦، ٣).

• إذا كان طول الوزرة المائلة كبيراً فإن y_1 و V_1 عند الموقع المقدر من الوزرة الأفقية ربما يتم تقديرهما باستخدام الإجراءات المعطاة في الجزء الذي عنوانه "السيان على طول المنحدرات الشديدة انحدار". وعندها يتم حساب TEL_1 باستخدام هذه القيم والخطوات الحسابية المتبقية تعاد للحصول على الموقع المراجع للوزرة الأفقية.

إن تصميم منسوب القاع الأفقي أو حوض الترسيب عند مصب السريان للمساقط أو قنوات تصريف فائض المياه أو بوابة الهويس يتطلب اختبار التصرفات المختلفة (مثلاً، ١٠، ٢٥، ٥٠، ٧٥، ١٠٠٪ من التصرف التصميمي). الوزرة الأفقية أو الطرف الأمامي للوزرة يجب أن يكون عند موقع أسفل موقع القفزة الهيدروليكية للمدى الكامل من التصرف المتوقع.

مثال رقم (٦، ٣): حالتى تصميم لحوض ترسيب يشملان تصرف q يساوي $١٧٠٠ \text{ م}^٣/\text{ث}$ و $٣٥٠١ \text{ م}^٣/\text{ث}$ على الترتيب. أوضحت حسابات سطح الماء الجانبي للتدفق الأقل أن الطاقة الكلية عند المنبع TEL_1 تساوي ٢٠١ م وأن منسوب الماء الخلفى ١٩٨٠٣٣ م ، والطاقة الكلية عند المصب TEL_2 تساوي ١٩٨٠٤٥ م . وللتدفق الأعلى الطاقة الكلية عند المنبع TEL_1 تساوي ٢٠٨٠١٨ م وأن منسوب الماء الخلفى

٢٠٦,٠٥ م، والطاقة الكلية عند المصب TEL2 تساوي ٢٠٦,٢٢ م. حدد موقع والطول التقريبي للقاع الأفقي.

الحل:

باستخدام منحنيات بلنش يمكن استنتاج قيمة E_2 من القيم المعروفة q والفاقد الكلي $H_L = TEL1 - TEL2$. إذن y_2 تبعاً لقيمة E_2 يمكن قراءتها لقيمة q المعطاة من المنحنيات البيانية للطاقة النوعية. ومنسوب القاع الأفقي يجب أن يكون أسفل المنسوب $TEL2 - E_2$.

اختبار تجريبي بديل بطريقة التجربة والخطأ للحسابات موضحة في الجدول رقم (٣, ١٦). وقيمة الاختبار التجريبي لـ x يتم افتراضها والقيمة المناظرة لـ y يتم حسابها من المعادلة رقم (٣, ٥٥) ب. وهذا يساعد في حساب y_1, y_2, E_1, E_2 . ويتم مواصلة الاختبارات التجريبية حتى تصبح قيمة $E_1 - E_2$ قريبة من قيمة H_L المعلومة. حسابات حالي التصرف المعطاة تقترح أن طول الوزرة الأفقية ٤٠ م ويجب أن تكون عند منسوب ١٩٦,٠ م تقريباً (انظر الشكل رقم ٣, ٦).

الجدول رقم (٣, ١٦). حسابات القفزة الهيدروليكية لموقع قاع أفقي أسفل الوزرة المائلة.

المتغير	حالة التدفق الأقل	حالة التدفق الأعلى
q (م ^٣ /ث)	١,٧	٣٥,١
H_L (م)	$٢٠١,٠ - ١٩٨,٤٥ = ٢,٥٥$	$٢٠٨,١٨ - ٢٠٦,٢٢ = ١,٩٦$
y_c (م)	٠,٦٦٥٤	٥,٠٠
$\ell = H_L / y_c$	٣,٨٣٢٣	٠,٣٩٢
x (بمعرفه ℓ ومن الجدول رقم (٣, ١٤))	٠,٢٨٥٥	٠,٥٤٣٢

تابع الجدول رقم (٣, ١٦).

حالة التدفق الأقل	حالة التدفق الأعلى	المتغير
٢,٥٠٧٨	١,٦٦٦٤	y (من المعادلة رقم ٣,٥٥)
٠,١٩ = ٠,٦٦٥٤ × ٠,٢٨٥٥	٢,٧٢ = ٥,٠٠ × ٠,٥٤٣٢	y ₁ (م)
١,٦٧	٨,٣٣	y ₂ (م)
٤,٢٧	١١,١٩	E ₁ (م)
١,٧٢	٩,٢٣	E ₂ (م)
٦,٥٥	٢,٤٩٨	$F_1 = q / \sqrt{(g y_1^3)}$
١٩٦,٦٦ = ١,٦٧ - ١٩٨,٣٣	١٩٧,٧٢ = ٨,٣٣ - ٢٠٦,٠٥	منسوب القاع الأفقي (م)
١٠,٤ = ١,٦٧ × ٦,٢	٤٠ = ٨,٣٣ × ٤,٨	طول القاع الأفقي (م)

السريان غير المستقر Unsteady Flow

واحدة من أكثر مشاكل السريان غير المستقر شيوعاً والتي تواجه التطبيق العملي هي تحليل حاجز تكسر (صد) أمواج الفيضان. وتحليل مفصل لحاجز تكسر أمواج الفيضان فإنه يجب استخدام نموذج حاجز التكرس NWS (Fread 1988) أو ما يماثله. وقد تم تطوير العديد من المعادلات البسيطة والتقريبية لتقدير أقصى تصرف وزمن التحرك وعمق الفيضان الناتج عن حاجز التكرس. وفي بعض الحالات العملية فإن تلك الطرق البسيطة يمكن أن تكون مفيدة.

في حالة عمق كامل واتساع جزئي لحاجز تكسر ما:

$$Q_{\max} = (8/27) b Y_0 (B/b)^{1/4} \sqrt{(g Y_0)} \quad (٣,٥٦)$$

في حالة عمق جزئي واتساع كامل لحاجز تكسر ما:

$$Q_{\max} = (8/27) B Y (Y_0/Y)^{1/3} \sqrt{(g Y)} \quad (٣,٥٧)$$

في حالة عمق جزئي واتساع جزئي لحاجز تكسر ما:

$$Q_{\max} = (8/27) b Y (B/b)^{1/4} (Y_0/Y)^{1/3} \sqrt{g Y} \quad (٣,٥٨)$$

حيث إن:

$$Q_{\max} = \text{أقصى تصرف (م}^3/\text{ث).}$$

$$B = \text{عرض القناة (م).}$$

$$b = \text{عرض حاجز التكسر (م).}$$

$$Y = \text{عمق الماء فوق قاع حاجز التكسر (م).}$$

$$Y_0 = \text{عمق الماء خلف حاجز التكسر (م) (USACE 1977).}$$

ولانهيار كامل وفوري للحاجز والتدفق خلال قناة مستطيلة فإن عمق الماء Y

(م) عند زمن t (ث) ومسافة x (م) من الحاجز (مع إهمال الاحتكاك) يعطى بالمعادلة

التالية (Chow 1959; Rouse 1950):

$$x = 2 t \sqrt{g Y_0} - 3 t \sqrt{g Y} \quad (٣,٥٩)$$

المعادلات العملية لتقدير أقصى تصرف فوق حاجز التكسر اعتماداً على

معلومات انهيار الحاجز هي (USBR 1987):

$$Q_{\max} = 19.13 (Y_0)^{1.85} \quad (٣,٦٠)$$

ومعادلة خدمة الحفاظ على التربة لأقصى تصرف على حاجز التكسر هي

(USDA 1981):

$$Q_{\max} = 16.58 (Y_0)^{1.85} \quad (٣,٦٠)$$

عملياً يجب عمل التقديرات الأولية باستخدام طرق عديدة مختلفة، ويجب

اختيار قيمة محافظة معقولة عن طريق الحكم. وهناك طريقة ملائمة أخرى لتقدير

تصرفات الفيضان فوق حاجز التكسر وأزمة التحرك وأعماق المياه في قناة النهر

المنشورية لانهيار كامل وفوري للحاجز وهي استخدام الجداول البيانية لساكا (USACE 1974).

من الممكن استنتاج بيانات المقطع العرضي لوادي مصب النهر وبيانات ارتفاع التخزين في حوض السد (الحاجز) وطول وقمة ارتفاع السد وزمن تطور الكسر وارتفاع حوض السد والذي عنده يبدأ الانهيار وعرض القاع وارتفاع القاع وميل جوانب الكسر المحتمل، حيث يمكن استخدام نموذج HEC-1 (USACE 1991a) لحساب أقصى التصرفات ومناسيب الفيضان عند أزمنة مختلفة ومواضع مختلفة في قناة مصب النهر. وقد أوضحت التقييمات المقارنة لنموذجي HEC-1 و NWS Dam-Break أن الاثنين يؤديان إلى نتائج يمكن مقارنتها لأقصى التصرفات وأقصى مراحل في وادي مصب النهر (Tschantz and Mojib 1981). وينصح باستخدام نموذج NWS Dam-Break (Fread 1988) لتحليل أكثر تعقيداً.

التصرف على طول المنحدرات Overland Flow along Slopes

التصرف على طول المنحدرات الناتج عن العاصفة يكون عادة غير ثابت ومتنوع الحيز وصعب التحليل. وتشمل الطرق العملية لاستنتاج معدلات التصرف على طول منحدرات أكوام المخلفات الصلبة وتجمعات النفايات طريقة إيزارد في حالة السريان الطبقي وطريقة هورتون في حالة السريان المضطرب (Chow 1959). وتعرض التصرفات على طول المنحدرات إلى انجراف كبير يفترض أن يكون مضطرباً. في مثل هذه الحالات فإن معادلة هورتون للمعدل الزائد المنتظم لسقوط الأمطار هي:

$$q_L = 0.000278 i \tan h^2 \left[6.06 t \left\{ i / (c L) \right\}^{0.5} S^{0.25} \right] \quad (3, 61)$$

حيث إن:

q_L = التصرف عند النهاية المنخفضة من الشريط الأساسي بوحدات (ل/ث)

لكل متر مربع من المساحة التي تسهم في الجريان السطحي.

i = معدل زيادة سقوط الأمطار (مم/ساعة).

t = الزمن من بداية زيادة سقوط الأمطار (ساعة).

S = ميل السطح على طول اتجاه السريان (م/م).

L = طول الانجراف الأساسي (م).

c = معامل الخشونة وقيمها مبينة في الجدول رقم (٣، ١٧).

بفرض أن المساحة التي تسهم في الجريان السطحي هو لانجراف أساسي طوله

L ولوحدة عرض فإن التصرف لكل وحدة عرض على المنحدر يعطى بالمعادلة:

$$q = q_L L \quad (٣، ٦٣)$$

الجدول رقم (٣، ١٧). القيم النموذجية لمعامل الخشونة c .

نوع السطح	c
التربة الجرداء والمضغوطة	٠,١٠
غطاء العشب القليل أو السطح القاحل متوسط الخشونة	٠,٢٠
الغطاء العشبي المتوسط	٠,٤٠
الغطاء العشبي الكثيف	٠,٨٠

المصدر: (Chow 1959).

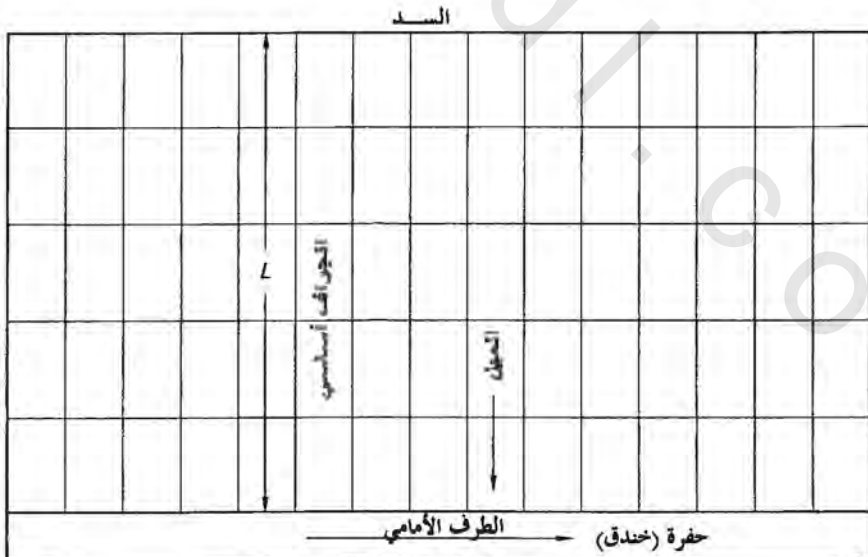
إذا كان السريان طبقي ($iL < 3871$) فيجب استخدام معادلة إيزارد

(Chow 1959). وتعطى معادلة هورتون المنحنى المائي للسريان عند نهاية الانجراف

الأساسي للزيادة المستمرة لنزول الأمطار بمعدل منتظم لفترة محددة من الزمن.

ويمكن استنتاج المنحنى المائي للسريان لفترة محدودة من نزول الأمطار t_0 باستخدام مبدأ التنظيم. ولتقديرات محافظة للسريان على طول المنحدرات الشديدة فإنه يمكن افتراض أن زيادة سقوط الأمطار تساوي تقريباً كمية المطر.

وعادةً فإن التصرف عند الطرف الأمامي يتم جمعه في الخندق الفرعي (الموازي لطول السد) والمتقل إلى المجاري المائية القريبة. والسريان قرب نهاية منبع النهر عند الخندق هو نفسه عند قاع الانجراف الأساسي الأول. ويزداد التصرف في الخندق مع المسافة من نهاية منبع التيار حيث إن المزيد والمزيد من الخطوط الأساسية تسرب فيه (السريان في الخندق متنوع الحيز). وكمية حركة التدفق القادم من الانجرافات الأساسية المتعاقبة تعيق التدفق في الخندق. وطريقة بسيطة نسبياً لتصميم الخندق هي عمل قاع مائل بشدة (فوق حرج) حوالي ٠.٠٥ وتقدير أبعاد الخندق يتم بفرض أن السريان حرج عند نهاية مصب النهر (الشكل رقم ٣,٨).



الشكل رقم (٣,٨). السريان البري على طول ميل السد.

مثال رقم (٣,٧): كون منحني مائي للسريان عند نهاية انجراف بطول ٦١ م لوحدة العرض على طول المنحدر، مع اعتبار أن ميل السطح S يساوي ٠,٠١٤، ومعامل الخشونة c يساوي ٠,١٩٨، بفرض أن شدة سقوط الأمطار i منتظمة ويساوي ٢٤٣,١٧ مم/ساعة أثناء العواصف الشديدة لفترات من ٦ و ١٢ دقيقة. ويبلغ طول السد حوالي ١٠٠٠ م. ضع تصميمياً للخندق الجانبي على طول الطرف الأمامي لميل السد لنقل التصريف إلى المجرى المائي القريب. لتكون محافظاً وبهدف التبسيط افترض أن توقيتات التدفقات من الخطوط الأساسية التي تصل الخندق هي تلك التي يمكن أن تتحد قممها.

الحل:

في هذه الحالة فإن

$$i/(cL) = 20.137$$

وباستخدام المعادلة رقم (٣,٦١)

$$q_L = 0.0676 \tan h^2 [9.354 t]$$

و

$$q = 61 q_L = 4.1236 \tan h^2 [9.354 t]$$

والحسابات بطريقة التنظيم الخطي موضحة في الجدول رقم (٣,١٨). ويمثل العمود رقم (٣) المنحنى المائي لسقوط المطر المستمر. وفي حالة عاصفة ممطرة تدوم ست دقائق فإن الإحداثيات الرأسية للمنحنى المائي للعمود رقم (٣) تتأخر بمقدار ١٠,٠ ساعة كما في العمود رقم (٤) ويمثل الفرق في العمود رقم (٥) المنحنى المائي المناظر. وفي حالة عاصفة ممطرة تدوم ١٢ دقيقة فإن الإحداثيات الرأسية للمنحنى

المائي تتأخر بمقدار ٠,٢٠ ساعة ويمثل الفرق في العمود رقم (٧) المنحنى المائي المناظر.

قمة المنحنى المائي q_{max} لعاصفة ممطرة تدوم ٦ دقائق هي ٠,٣١٧١ ل/ث،
ولعاصفة ممطرة تدوم ١٢ دقيقة هي ٠,٦٢٩١ ل/ث.

الجدول رقم (٣, ١٨). حسابات التصريف البري باستخدام طريقة هورتون.

فترة سقوط المطر ١٢ دقيقة		فترة سقوط المطر ٦ دقائق		q (ل/ث)	tan h (9.354 t)	t (ساعة)
q (الفرق)	q (تأخر)	q (الفرق)	q (تأخر)			
(٦)-(٣)=(٧)	(٦)	(٤)-(٣)=(٥)	(٤)	(٣)	(٢)	(١)
٠,٠٤١	٠	٠,٠٤١	٠	٠,٠٤١	٠,٠٩٩٧	٠,١
٠,١٦١	٠	٠,١٢٠	٠,٠٤١	٠,١٦١	٠,١٩٧	٠,٢
٠,٣٠٩	٠,٠٤١	٠,١٨٩	٠,١٦١	٠,٣٥٠	٠,٢٩١	٠,٣
٠,٤٣٥	٠,١٦١	٠,٢٤٥	٠,٣٥٠	٠,٥٩٥	٠,٣٨٠	٠,٤
٠,٥٣١	٠,٣٥٠	٠,٢٨٥	٠,٥٩٥	٠,٨٨١	٠,٤٦٢	٠,٥
٠,٥٩٤	٠,٥٩٥	٠,٣٠٩	٠,٨٨١	١,١٨٩	٠,٥٣٧	٠,٦
٠,٦٢٦	٠,٨٨١	٠,٣١٧	١,١٨٩	١,٥٠٦	٠,٦٠٤	٠,٧
٠,٦٢٩	١,١٨٩	٠,٣١٢	١,٥٠٦	١,٨١٨	٠,٦٦٤	٠,٨
٠,٦١٠	١,٥٠٦	٠,٢٩٧	١,٨١٨	٢,١١٦	٠,٧١٦	٠,٩
٠,٥٧٤	١,٨١٨	٠,٢٧٦	٢,١١٦	٢,٣٩٠	٠,٧٦٢	١,٠
٠,٥٢٧	٢,١١٦	٠,٢٥١	٢,٣٩٠	٢,٦٤٢	٠,٨٠٠	١,١
٠,٤٧٤	٢,٣٩٠	٠,٢٣٣	٢,٦٤٢	٢,٨٦٦	٠,٨٣٤	١,٢
٠,٤٢٠	٢,٦٤٢	٠,١٩٦	٢,٨٦٦	٣,٠٦٢	٠,٨٦٢	١,٣
٠,٣٦٦	٢,٨٦٦	٠,١٧٠	٣,٠٦٢	٣,٢٣٢	٠,٨٨٥	١,٤
٠,٣١٦	٣,٠٦٢	٠,١٤٦	٣,٢٣٢	٣,٣٧٨	٠,٩٠٥	١,٥

التصرف الكلي Q عند المصب عند نهاية الخندق أثناء عاصفة مدتها ١٢ دقيقة:

$$Q = 0.629 \times 1000 / 1000 = 0.629 \text{ m}^3 / \text{s}$$

وبفرض خندق شبه منحرف مع عرض قاعه B يساوي ٣,٠ م. فإن ميل أحد جوانب هذا الخندق هو ١٤,٠ أو ٢٨,٤٧ أفقي: ١ رأسي والآخر هو ٢ أفقي: ١ رأسي.

$$A = 0.3y + (2 + 71.428)y^2 / 2$$

$$T = 0.3 + (2 + 71.428)y$$

باستخدام معادلة التصرف الخرج:

$$Q = 0.629 = \sqrt{(gA^3 / T)} = 3.132(0.3y + 36.714y^2)^{1.5} / (0.3 + 73.428y)^{0.5}$$

وبإتباع التجربة والخطأ نجد أن عمق الماء y يساوي ١٤,٠ م. وباستخدام حافة حرة ٢,٠ م يكون الخندق عمقه ٣٤,٠ م. ويمكن أن يقل عرض القاع بانتظام في اتجاه منبع التيار للحصول على حد أدنى من ١٥,٠ م عند طرف منبع التيار المائي.

انجراف التربة على المنحدرات Soil Erosion on Slopes

يؤدي السريان البري على طول المنحدرات الشديدة فوق الطبقة الرقيقة والغدير (الحز) والأخدود للانجراف. وانجراف الطبقة الرقيقة والحز يتم توضيحها في الجزء التالي من هذا الفصل. وانجراف الأخدود على المنحدرات الشديدة موضح في هذا الجزء. وقد تم تطوير المعادلات العملية لتقدير أقصى عمق وعرض لقمة الأخدود.

والخطوات الحسابية للتقدير المحافظ هي كالتالي (Johnson 1999):

١- احسب مساحة مقطع التصرف A (م^٢) للأخدود:

$$A = 0.276 [L \cos \theta]^{1.636} \quad (٣, ٦٣)$$

حيث إن:

$$L = \text{طول الميل (م)}.$$

$$\theta = \text{زاوية الميل مع الأفقي} = \arctan(S), \text{ S هو الميل (م/م)}.$$

٢- احسب متوسط عمق التساقط السنوي P (م) ومتوسط التساقط الكلي خلال فترة التحليل (مثل t عام). ومتوسط التساقط السنوي بالقرب من موقع قياس التساقط يمكن الحصول عليه من السجلات المنشورة (مثل Gale Research Company 1985).

٣- احسب نسبة متوسط الجريان السطحي لمعدل سقوط الأمطار C للموقع. ومتوسط الجريان السطحي السنوي في المنطقة المجاورة للموقع يمكن أن يتم الحصول عليها من السجلات المنشورة (مثل Gerbert *et al.* 1989) وبيانات مصادر المياه للولايات المختلفة التي تنشر سنوياً من قبل هيئة المسح الجيولوجي بالولايات المتحدة.

٤- احسب الحجم الكلي للجريان السطحي V (م^٣) المتوقع عند الطرف الأمامي للمنحدر أثناء فترة التحليل:

$$V = G P t A \quad (٣, ٦٤)$$

٥- احسب أقصى عمق $D_{\max}$ (م) لشق الأخدود:

$$D_{\max} = G L S \quad (٣, ٦٥)$$

إذا كان محتوى المنحدر من الطين $> ١٥\%$:

$$G = 1 / \left[2.25 + \left\{ 0.789 V / (H^3) \right\}^{-0.55} \right] \quad (٣, ٦٦)$$

إذا كان $> ١٥\%$ محتوى المنحدر من الطين $> ٥٠\%$:

$$G = 1 / \left[2.80 + \left\{ 0.197 V / (H^3) \right\}^{-0.70} \right] \quad (٣, ٦٧)$$

إذا كان محتوى الطين في مادة المنحدر $< ٥٠\%$:

$$G = 1 / \left[3.55 + \left\{ 0.76 V / (H^3) \right\}^{-0.85} \right] \quad (٣, ٦٨)$$

حيث إن:

$$H = \text{الارتفاع الرأسى للمنحدر (م)} = L \sin \theta$$

٦- احسب عرض المصبطة W (م) للأخدود عند نقطة أعمق شق:

$$W = (D_{\max} / 0.61)^{1.149} \quad (٣, ٦٩)$$

٧- احسب المسافة D_L (م) من $D_{\max}$ على طول الميل المقاس من المصبطة:

$$D_L / D_{\max} = 0.713 [V S / (L^3)]^{-0.415} \quad (٣, ٧٠)$$

وبسبب الطبيعة العملية لهذه المعادلات فيجب استخدام التقديرات فقط

للتحليلات الكمية.

مثال رقم (٣, ٨): قدر احتمال انجراف الأخدود على منحدر كومة التخلّص من

المخلفات الصلبة أثناء فترات ١٠ و ٢٠٠ عام من المعالجة. حيث θ تساوي 14° ، L يساوي ٦٢ م، ومحتوى الطين من مادة المنحدر $> 15\%$ ، و P تساوي ٠,٥ م/عام، و C يساوي ٠,٢٠.

الحل:

$$S = \tan 14^\circ = 0.25$$

$$H = 15 \text{ m}$$

وباستخدام المعادلات رقم (٣, ٦٣) ورقم (٣, ٦٤) فإن:

$$A = 224.8 \text{ m}^2$$

$$V(10\text{yr}) = 0.20 \times 0.50 \times 10 \times 224.8 = 224.8 \text{ m}^3$$

$$V(200\text{yr}) = 4496 \text{ m}^3$$

وباستخدام المعادلة رقم (٣, ٦٦):

$$G(10\text{yr}) = 0.137$$

$$G(200\text{yr}) = 0.31$$

وباستخدام المعادلة رقم (٣, ٦٥):

$$D_{\max}(10\text{yr}) = 0.137 \times 62 \times 0.25 = 2.12 \text{ m}$$

$$D_{\max}(200\text{yr}) = 0.31 \times 62 \times 0.25 = 4.81 \text{ m}$$

وباستخدام المعادلة رقم (٣, ٦٩):

$$W(10\text{yr}) = 4.18 \text{ m}$$

$$W(200\text{yr}) = 10.73 \text{ m}$$

بإستخدام المعادلة رقم (٣, ٧٠):

$$D_L(10\text{yr}) = 48.4 \text{ m}$$

$$D_L(200\text{yr}) = 31.67 \text{ m}$$

والقيم المقدرة لـ $D_{\max}$ هي أن هناك احتمال للتعرض للفقد في المادة المتخلفة.

معادلة عملية لتقدير معدل تقدم ضاغط الأخدود هي (Tompson, 1964):

$$R = 0.0065 A^{0.49} S^{0.14} P^{0.74} E \quad (٣, ٧١)$$

حيث إن:

R = معدل تقدم ضاغط الأخدود لكل وحدة زمن من الفترة الزمنية التي

يمثلها متغير كمية المطر P .

P = تجميع أعماق كميات المطر (مم) أثناء فترة التحليل التي ساوت أو

تجاوزت ١٢,٧ مم في ٢٤ ساعة.

A = مساحة الصرف فوق ضاغط الأخدود (هكتار).

S = ميل قناة الاقتراب فوق ضاغط الأخدود (%).

E = عامل التربة الذي يُعرف على أنه محتوى الطين (أحجام الجزيئات من ٠,٠٠٥ مم أو أصغر) بنسبة الوزن في قطاع التربة الجانبي الذي يحتمل أن يتقدم الضاغط خلاله.

معادلة عملية أبسط مطورة من قبل خدمة المحافظة على التربة هي على الصورة التالية (USDA 1966):

$$R = 0.363 A^{0.46} P^{0.20} \quad (٣,٧٢)$$

ويمكن أن تختلف المعدلات الناتجة من هذه المعادلات اختلافاً كبيراً. ويجب استخدام الحكم والتحقق بقدر الإمكان لتقدير احتمالية تقدم ضاغط الأخدود ولتصميم القياسات التركيبية أو غير التركيبية لمراقبتها.

Sediment Yield Analysis تحليل حصيلة الترسبات

متوسط حصيلة الترسبات السنوية لحوض صرف المياه يمكن أن يتم تقريبها باستخدام معادلة الفقد في التربة العالمية (USLE):

$$T = 2.243 R K LS C P \quad (٣,٧٣)$$

حيث إن:

T = الفقد في التربة (طن/ هكتار).

R = معامل سقوط المطر.

K = معامل انجراف التربة.

LS = معامل طول المنحدر.

C = معامل غطاء التربة.

P = معامل وقاية الممارسة.

هذه المعاملات يمكن تقديرها من الجداول والمنحنيات البيانية المنشورة
(Barfield et al. 1981; USEPA 1977).

وقد تم أيضاً تطوير التعبيرات العملية لتقدير بعض من هذه المعاملات.
ولتقدير متوسط الفقد السنوي في التربة:

١ - في المناطق التي تكون عاصفة النوع ١ قابلة للتطبيق (انظر "عمق ومدة
المطر التصميمي" في الفصل الثاني):

$$(٣,٧٤) \quad R = 0.0134 P_{2.6}^{2.2}$$

٢ - في المناطق التي تكون عاصفة النوع ٢ قابلة للتطبيق:

$$(٣,٧٥) \quad R = 0.0219 P_{2.6}^{2.2}$$

حيث إن:

$$P_{2.6} = \text{تساقط عاصفة سنتين، ست ساعة (مم).}$$

لتقدير الفقد في التربة نتيجة عاصفة منفرد:

١ - في المناطق التي تكون عاصفة النوع ١ (انظر "عمق ومدة المطر
التصميمي" في الفصل الثاني) قابلة للتطبيق:

$$(٣,٧٦) \quad R = 0.0122 P^{2.2} / D^{0.6065}$$

٢ - في المناطق التي تكون عاصفة النوع ٢ قابلة للتطبيق:

$$(٣,٧٧) \quad R = 0.0156 P^{2.2} / D^{0.4672}$$

حيث إن:

$$P = \text{تساقط العاصفة الكلي (مم).}$$

$$D = \text{مدة العاصفة (ساعة).}$$

إن قيم K لأنواع مختلفة من الترب في مناطق مختلفة يمكن الحصول عليها من المكاتب المحلية ومكاتب الولاية لخدمة المحافظة على المصادر المائية. والقيم النموذجية موضحة في الجدول رقم (٣.١٩) (SCS 1978; Barfield *et al.* 1981):

$$LS = (\lambda / 22.13)^m [(430 x^2 + 30 x + 0.43) / 6.613] \quad (3,78)$$

حيث إن:

$$\sin \theta = x$$

θ = زاوية ميل الأرض.

$$\lambda = \text{طول الميل (م).}$$

$$m = 0.2 \text{ إذا كانت } x \leq 0.01.$$

$$m = 0.3 \text{ إذا كانت } 0.01 < x \leq 0.03.$$

$$m = 0.4 \text{ إذا كانت } 0.03 < x \leq 0.05.$$

$$m = 0.5 \text{ إذا كانت } 0.05 < x \leq 0.12.$$

$$m = 0.6 \text{ إذا كانت } x > 0.12 \text{ (USEPA 1980).}$$

الجدول رقم (٣.١٩). القيم النموذجية لمعامل انجراف التربة K.

k	نوع التربة
٠,٣٧	طينية لومية ، طينية طينية لومية ، رملية لومية ناعمة جداً
٠,٣٢	طينية ، طينية لومية ، لومية ، طينية طينية
٠,٢٤	رملية لومية ناعمة ، لومية رملية ناعمة جداً ، رملية لومية
٠,١٧	لومية رملية ناعمة ، لومية رملية
٠,١٥	رملية

المصدر: (SCS 1978).

عادة تختلف قيمة C من ٠.٠٠٣ لحوالي ٩٥ إلى ١٠٠٪ من أغطية الأرض مع مسح إلى ١٠٠ في لعدم وجود غطاء أرضي، و P تساوي ١.٠ عندما لا تتخذ أي ممارسات للمحافظة على التربة أو لأي من استخدامات التربة الأخرى غير المزرعة بالمحاصيل. وفي حالة المحاصيل الكنتورية يمكن أن تختلف قيمة P من ٠.٥٠ لميول الأرض في حدود من ٢ إلى ٧٪ إلى ١٠٠ لميول الأرض في حدود من ٢٥ إلى ٣٠٪ (USEPA 1977). وقد يتم تخصيص نسخة مبرمجة معدلة من معادلة الفقد في التربة على أنها المعادلة العالمية المعدلة للفقد في التربة (RUSLE). والمعادلة الأساسية هي نفسها USLE (المعادلة العالمية للفقد في التربة). أما المعادلة العالمية المعدلة للفقد في التربة فهي نموذج لعملية مجمعة تعتمد على تحليل كميات كبيرة من البيانات التجريبية لتحديد العوامل المختلفة للمعادلة العالمية المعدلة للفقد في التربة. وهي تشمل طرقاً تفصيلية لحساب العوامل مثل عامل إدارة الغطاء C للحالة التي تكون فيها البيانات التجريبية غير كافية لتحديد هذه المعاملات (Renard et al. 1991; Foster et al. 1996).

يمكن استخدام المعادلة العالمية المعدلة للفقد في التربة MUSLE لتقدير الفقد في التربة أثناء حدوث العاصفة (Williams 1975):

$$Y = 11.79 (Q q)^{0.56} K LS C P \quad (٣,٧٩)$$

حيث إن:

$$Y = \text{الفقد في التربة (طن).}$$

$$Q = \text{حجم الجريان السطحي أثناء العاصفة (م³).}$$

$$q = \text{أعلى قيمة للتصرف (م³/ث).}$$

يمكن أن لا تصل كل تلك الترسبات المقدرة باستخدام المعادلة العالمية للفقد في التربة USLE أو المعادلة العالمية المعدلة للفقد في التربة MUSLE إلى الجريان السطحي

لسطح التيار المنصرف من حوض السد بسبب الترسيب على طول مسار السريان البري من موقع انجراف الترسبات إلى التيار. ولتقدير صافي كمية الترسبات التي تصل التيار فإن التقديرات المذكورة أعلاه يجب أن تضرب في نسبة تسلم الرواسب (USEPA 1988A SDR):

$$(٣,٨٠) \quad SDR = 0.77 L_d^{-0.22}$$

حيث إن:

$$L_d = \text{مسافة السريان البري (م).}$$

والمعادلة البديلة لنسبة تسليم الرواسب SDR هي (USACE 1989):

$$(٣,٨١) \quad SDR = 0.30 A^{-0.2}$$

حيث إن:

$$A = \text{مساحة الصرف (كم}^2\text{).}$$

وبسبب الطبيعة الذاتية لمعاملات كل من المعادلة العالمية للفقد في التربة USLE والمعادلة العالمية المعدلة للفقد في التربة MUSLE ونسبة تسلم الرواسب SDR، فإنه يجب التحقق من معقولية التقديرات عن طريق طرق عديدة بديلة بقدر الإمكان عن طريق القياسات الحقلية. وأحد الطرق البديلة هي استخدام معادلة دندي-بولتون (USACE 1989):

$$(٣,٨٢) \quad T = 101.25 R^{0.46} [1.54 - 0.26 \log A]$$

إذا كانت R أقل من أو تساوي ٥٠,٨ مم.

$$(٣,٨٤) \quad T = 685.883 [\exp(0.002165 R) \{1.54 - 0.26 \log A\}]$$

إذا كانت R أكبر من ٥٠,٨ مم.

حيث إن:

$$T = \text{حصيلة الترسبات (طن / كم}^2 \text{ / سنة).}$$

$$R = \text{متوسط الجريان السطحي السنوي (مم).}$$

ويمكن الحصول على قيم R من (Gerbert *et al.* 1989) أو من سجلات تدفق المجاري المائية القريبة المنشورة من قبل هيئة المسح الجيولوجي لبيانات مصادر المياه بالولايات المتحدة كل عام.

وقد تم تطوير نماذج الحاسب مثل (Wilson *et al.* 1984) SEDIMOT-2 لتقدير المنحنيات المائية للجريان السطحي للعاصفة وحصيلة الترسبات من حوض الصرف باستخدام المعادلة العالمية للفقد في التربة USLE أو المعادلة العالمية المعدلة للفقد في التربة MUSLE ونسبة تسلم الرواسب SDR وللقيام بتخطيط المنحنيات المائية للجريان السطحي والرواسب خلال حوض الترسيب. وتقدر هذه النماذج الترسبات في حوض الترسيب اعتماداً على حجم الحبيبات وسرعة سقوط الرواسب المنجرفة من حوض الصرف وزمن المعالجة في حوض النهر وتقوم بحساب حمل الرواسب في التدفق.

والمعادلة العملية لتقدير كمية الترسبات التي تصل إلى حوض السد هي (USBR 1987):

$$Q_s = 1098 A^{-2.4} \quad (٣,٨٤)$$

حيث إن:

$$Q_s = \text{حصيلة الرواسب (م}^3 \text{ / كم}^2 \text{ / السنة).}$$

ولا استخدام هذه المعادلة للتحقق من التقديرات اعتماداً على المعادلة العالمية للفقد في التربة أو معادلة دندي - بولتون، فيجب أن تزداد قيمة Q_s بحوالي ٥ إلى ٢٥٪.

لحساب انتقال حمل القاع (USBR 1987; Simons and Sentruk 1976)، وعن طريق معكوس نسبة تسلم الرواسب لتقدير الفقد في التربة من حوض الصرف. وطريقة أخرى تقريبية للتحقق من مدى صحة هذه التقديرات هي استخدام بيانات تدفق التيار وحمل الرواسب المتاحة من مواقع أخرى في المجرى المائي أو مجرى مائي آخر له نفس خصائص انتقال الرواسب والسريان. ويتم تسجيل التصرف اليومي الملاحظ (م^٣/ث) وحمل الرواسب المعلقة (طن/ اليوم) في أوراق السجلات. ويتم رسم خط مستقيم مناسب خلال النقاط المرسومة. هذا الخط المستقيم أو معادلته يمكن أن يستخدم لتقدير الحمل المعلق من الترسبات اليومية المعروفة في الموقع موضع الاهتمام. ولاستخدام هذه الطريقة للتحقق من مدى صحة التقديرات السابقة فإنه يجب ضبط الحمل المعلق المقدر لحمل القاع (مضروباً في ١,٠٥ إلى ١,٢٥) ومقسوماً على نسبة تسلم الرواسب. وإذا لم تكن البيانات التي تخص الموقع متاحة فإنه يجب عمل تقديرات أولية باستخدام طرق تقريبية عديدة وقيم معقولة مختارة عن طريق الحكم.

مثال رقم (٣,٩): حمل الراسب المعلق المقاس يومياً وتدفقات المجرى المائي المناظرة لمجرى مائي موضحة في الجدول رقم (٣,٢٠). ويقدر حمل القاع بحوالي ٥٪ من الحمل المعلق وتقدر نسبة تسليم الرواسب بحوالي ٠,١٨. احسب حصيلة الرواسب من حوض الصرف أثناء فترة ذوبان الجليد عندما يكون متوسط تدفق التيار ٣٠,٢٥ م^٣/ث.

الحل:

انحسار لوغاريتمات Q_s (طن/ اليوم) و Q (ل/ث) كمتغيرات غير مستقلة ومستقلة على الترتيب تعطي:

$$\log Q_s = -4.182 + 1.783 \log (Q)$$

أو

$$Q_s = 0.0000658 Q^{1.783}, \quad r^2 = 0.72$$

لكل Q تساوي ٢٥٠ ل/ث فإن Q_s تساوي ١,٢٤ طن/يوم.

وبالتكيف مع حمل القاع (أي بالضرب في ١,٠٥) ولنسبة تسليم الرواسب (أي بالقسمة على ٠,١٨) تعطي متوسط حصيلة الرواسب التقريبية من حوض الصرف بحوالي ٧,٢٣ طن/يوم. ويجب التحقق من هذا عن طريق التقديرات التي تم الحصول عليها بالطرق الأخرى.

والمعادلة التقريبية لتقدير سعة انتقال الرواسب للمجرى المائي

(Johnson 1999 ; Simon *et al.* 1981):

$$q_s = \left[(3.281)^{b+c-2} \right] a D^b V^c \quad (٣,٨٥)$$

حيث إن:

q_s = معدل انتقال الرواسب (م^٣/ث).

D = متوسط عمق السريان (م).

V = السرعة المتوسطة (م/ث).

a, b, c هي المعاملات الموضحة في الجدول رقم (٣,٢١).

ويمكن أن تكون المعادلة رقم (٣,٨٥) قابلة للتطبيق لرقم فرود من ١ إلى ٤ ،

وسرعة V من ١,٩٨ إلى ٧,٩٢ م/ث، وميل القاع من ٠,٠٠٥ إلى ٠,٠٤٠ ، و d_{50}

من ٠,٠٢٦ إلى ١٥ مم.

الجدول رقم (٣،٢٠). بيانات حمل الرواسب المعلقة وتدفق التيار.

Q (l/s)	Q_s (t/d)	Q (l/s)	Q_s (t/d)	Q (l/s)	Q_s (t/d)	Q (l/s)	Q_s (t/d)	Q (l/s)	Q_s (t/d)
٧٠,٧٨	٠,٠٢	١١٠,٤٠	٩٥,٢٦	٦٧,٩٥	٠,١٣	٧٣,٦١	٠,١١	٣٦,٨١	٠,١٥
٧٠,٧٨	٠,٠٤	٥٤٣,٦٠	٢,٥٤	٧٠,٧٨	٠,٠٢	٧٠,٧٨	٠,٣٤	٤٥,٣٠	٠,٢٢
٧٠,٧٨	٠,٠٢	٢٠٦,٦٨	١,٥٤	٦٥,١٢	٠,٠٥	٣٦٨,٠٧	١,٨١	٤٢,٤٧	٠,٠٧
٥٠,٩٦	٠,١٦	١١٠,٤٢	٠,٩١	١٢٤,٥٨	٠,١١	٦٥,١٢	٠,٤١	٤٥,٣٠	٠,٣٩
٥٣,٧٩	٠,٠١	٨٧,٧٧	٠,٢٤	٢٦٦,١٤	٠,٣٤	٥٦,٦٣	٠,٢٥	٦٥,١٢	٠,٤٤
٥٣,٧٩	٠,٠١	٨٢,١١	٠,١٧	٥٤٠,٧٧	٧,٣٥	٦٥,١٢	٠,٢٠	٨٧,٧٧	٠,٥٣
٧٣,٦١	٠,٠٦	٧٩,٢٨	٠,٠٣	٦٣٧,٠٤	١٢,٧٠	٦٧,٩٥	٠,٠٦	٩٣,٤٣	٠,٠٨
١٧٨,٣٧	٠,٢٠	٨٤,٩٤	٠,٠٨	٥٩٧,٤٠	٥,١٧	١١٣,٢٥	٠,١٤	٢٣٥,٠٠	١,١٨
٧٠,٧٨	٠,٤١	٢٦٣,٣١	١,٠٩	٦٥٤,٠٢	٨,٤٤	١٣٠,٢٤	٠,١٥	١٩٨,١٩	٠,٣١
٣١,١٤	٠,١١	٢٣٥,٠٠	٠,٤١	٦٧٩,٥٠	٧,٦٢	٥٦٩,٠٩	٣,٩٩	١٢٧,٤١	٠,٦٨
٤٢,٤٧	٠,١٨	١٢١,٧٤	٠,٢٠	١٠٤٤,٧٠	١٩,٠٥	٣٩٦,٣٨	٠,٥٨	٤٢,٤٧	٠,١٧
١١٣,٢٥	٠,٢٢	٧٠,٧٨	٠,٠٥	٩٥٩,٨٠	١٥,٤٢	١٩٨,١٩	٠,٤١	٣٩,٦٤	٠,١٢
٧٦,٤٤	٠,٣٢	٥٩,٤٦	٠,٠٧	٦٨٥,١٧	٢,٩٠	١٣٣,٠٧	٠,٢٩	٤٢,٤٧	٠,٠٦
٣٦٢,٤٠	١,٧٢	٥٠,٩٦	٠,٩١	٢٦٦,١٤	٠,٨١	٦٥,١٢	٠,٠٧	٤٥,٣٠	٠,٢٨
٢٦٨,٩٧	٠,٣٧	٧٠,٧٨	٠,٠٢	٦٢,٢٩	٠,٠٥	٧٣,٦١	٠,١٥	٩٠,٦٠	٠,٣٣
٧٢,١١	٠,٢٣	٥٦,٦٣	٠,٠٦	٧٩,٢٨	٠,٢٠	٨٢,١١	٠,٠٦	٨٤,٩٤	٠,١٦
٥٦,٦٣	٠,٠٨	٤٢,٤٧	٠,٤٠	٧٠,٧٨	٠,٠٤	١٠٤,٧٦	٠,٠٨	١٣٥,٩٠	٠,٠٨
٥٦,٦٣	٠,٢٧	٥٩,٤٦	٠,٢٢	٧٠,٧٨	٠,٠٢	٢٥١,٩٨	٠,٢٢	٣٤٢,٥٨	٠,٣٣
٥٠,٩٦	٠,١٣	٦٧,٩٥	٠,٠٨	٥٩,٤٦	٠,٠٥	٣١٧,١٠	١٥,٤٢	٢٧٤,٥٨	١,٤٥
٣٣,٩٨	٠,٠١	١١٨,٩١	٠,٤٤	٦٥,١٢	٠,٤٤	٧٣,٦١	٠,٣١	٩٣,٤٣	٠,٣١
٥٣,٧٩	٠,٠٣	٥٩,٤٦	٠,٤٠	١٠٤,٧٦	٠,٠٣	٨٤,٩٤	٠,١٨	٦٥,١٢	٠,١٢
٥٣,٧٩	٠,٠٩	٢٨,٣١	٠,٠٥	٢٠٣,٨٥	٠,٥٤	٥٩,٤٦	٠,٠٥	٥٣,٧٩	٠,٢٠
٣١,١٤	٠,١٨	٣٦,٨١	٠,١٦	٣١٤,٢٧	١,٥٤	٦٧,٩٥	٠,٢١	٤٨,١٣	٠,٣٢
٥٣,٧٩	٠,١٥	٣٩,٦٤	٠,٠٥	٣١١,٤٤	١,١٨	٦٢,٢٩	٠,٠٥	٥٣,٧٩	٠,٠٣
٥٦,٦٣	٠,٤٦	٤٢,٤٧	٠,٠٦	٣١١,٤٤	١,٧٢	٥٩,٤٦	٠,١٤	٥٠,٩٦	٠,١١
١٠٤,٧٦	٠,١١	٥٣,٧٩	٠,٠٢	٨٦٩,٢٠	٩,٩٨	٦٧,٩٥	٠,٠٦	٦٧,٩٥	٠,٤٩

تابع الجدول رقم (٣،٢٠).

Q (l/s)	Q_s (t/d)	Q (l/s)	Q_s (t/d)	Q (l/s)	Q_s (t/d)	Q (l/s)	Q_s (t/d)	Q (l/s)	Q_s (t/d)
٢٠٩,٥١	٠,٢٥	٣٣,٩٨	٠,٠٢	٩٢٢,٩٩	٣١,٧٥	٦٢,٢٩	٠,٠٥	٥١٥,٢٩	٤,٣٥
٤٦٧,١٦	٣,٢٧	٤٨,١٣	٠,٠٥	١٢٢٣,١٠	٩٤,٣٥	٥٣٧,٩٤	٣,٧٢	٢٣٢,١٦	١,٩١
١٨٤,٠٣	٠,٤٦	٣١٩,٩٣	١,٥٤	١٣٣٠,٧٠	١٦,٣٣	٥٤٩,٢٧	٢,٠٠	٤٨,١٣	٠,٢٨
١٢١,٧٤	٠,٢٧	٥٦٦,٢٥	٤,٨١	١٦٤٧,٨٠	١٥٢,٤١	٣١١,٤٤	٣,٦٣	٣٦,٨١	٠,١٨
٦٥,١٢	٠,٠٩	٢٠٩,٥١	٠,٥١	١٨٤٣,٢٠	١٩٥٩,٦٠	٩٩,٠٩	٠,١٥	٥٠,٩٦	٠,٤٤
٦٧,٩٥	٠,١٢	٩٩,٠٩	٠,١٥	١٦١٦,٧٠	٤٧٠,٨٤	٥٦,٦٣	٠,٠٦	٤٥,٣٠	٠,٣٠

الجدول رقم (٣،٢١). معاملات معادلة سعة انتقال الرواسب.

$$G = 0.5 \left[\left(\frac{d_{84}}{d_{50}} \right) + \left(\frac{d_{50}}{d_{16}} \right) \right] \cdot G$$

c	b	a	d_{50} (مم)
G = 1.0			
٣,٣٠	٠,٧١٥	$10^{-1} \times ٣,٣٠$	٠,١
٣,٦١	٠,٤٩٥	$10^{-1} \times ١,٤٢$	٠,٢٥
٣,٨٢	٠,٢٨٠	$10^{-1} \times ٧,٦٠$	٠,٥
٣,٩٣	٠,٠٦٠	$10^{-1} \times ٥,٦٢$	١,٠
٣,٩٥	٠,١٤٠ -	$10^{-1} \times ٥,٦٤$	٢,٠
٣,٩٢	٠,٢٤٠ -	$10^{-1} \times ٦,٣٢$	٣,٠
٣,٨٩	٠,٣٠٠ -	$10^{-1} \times ٧,١٠$	٤,٠
٣,٨٧	٠,٣٤٠ -	$10^{-1} \times ٧,٧٨$	٥,٠
G = 2.0			
٣,٥٥	٠,٥١٠	$10^{-1} \times ١,٥٩$	٠,٢٥
٣,٧٣	٠,٣٣٠	$10^{-1} \times ٩,٨٠$	٠,٥
٣,٨٦	٠,١٢٠	$10^{-1} \times ٦,٩٤$	١,٠
٣,٩١	٠,٠٩٠ -	$10^{-1} \times ٦,٣٢$	٢,٠
٣,٩١	٠,١٩٦ -	$10^{-1} \times ٦,٦٢$	٣,٠
٣,٩٠	٠,٢٧٠ -	$10^{-1} \times ٦,٩٤$	٤,٠

تابع الجدول رقم (٣,٢١).

معامل التدرج $G = 0.5 [(d_{84}/d_{50}) + (d_{50}/d_{16})]$ ،			
d_{50} (مم)	a	b	c
G = 3.0			
٠,٥	$10 \times 1,21$	٠,٣٦٠	٣,٦٦
١,٠	$10 \times 9,14$	٠,١٨٠	٣,٧٦
٢,٠	$10 \times 7,44$	٠,٠٢٠ -	٣,٨٦
G = 4.0			
١,٠	$10 \times 1,٠٥$	٠,٢١٠	٣,٧١

المصدر: (Johnson 1999).

الانجراف بسبب الرياح Wind Erosion

تقديرات الفقد في التربة والانجراف التي تسببه الرياح تكون مطلوبة لتقييم احتمال تعرض النفايات أو مخلفات التربة التي تغطيها أغطية التربة. ويتم التعبير عن الفقد في التربة بالشكل التالي (USDA 1982, 1983b):

$$E = f(I, K, C, L, V) \quad (٣,٨٦)$$

حيث إن:

E = المتوسط السنوي للفقد في التربة، طن/ايكر/ السنة (طن/ هكتار/ السنة).

f = دالة المتغيرات الموضحة.

I = انجراف التربة نتيجة تأثير الرياح، وعادة يعبر عنها بتقسيم التربة إلى

مجموعات انجراف بالرياح (WEGs) اعتماداً على أنواع التربة (تربة رملية،

تربة رملية طينية، طينية، طميية، كتل طينية، وأحجار).

K = معامل خشونة السطح، يعبر عنه عادة بأس يساوي ١,٠ للسطح الناعم

ويساوي ٠,٥ للسطح الخشن.

C = المعامل المناخي (معبراً عنه بالنسبة المثوية) الذي يوضع كل شهر لمواقع

مختلفة اعتماداً على متوسط سرعة الرياح وأس البحر-التساقط.

L = المسافة غير المحمية، التي يتم الحصول عليها عادةً من المنحنيات البيانية

المتاحة للعروض المختلفة لأسطح التربة، والمسافات على طول اتجاه الرياح

السائدة، وزوايا اتجاه الرياح السائدة.

V = الغطاء النباتي، والذي يعبر عنه عادةً بدلالة وزن بقايا الحبوب الصغيرة

المسطحة لكل وحدة مساحة.

يتم تقدير الغطاء النباتي V من المنحنيات البيانية التي تعبر عن كمية محددة من

مجموعة الحبوب المسطحة لمحصول محدد (مثلاً، الذرة السكرية أو القطن أو الذرة) في

حقل إلى كمية مساوية من بقايا الحبوب الصغيرة (R) من المحصول السابق. ويجب

استخدام المنحنيات البيانية والجداول التي توضع لولايات مختلفة في دراسات محددة.

وتكون الملاحظات التقنية، بما فيها هذه المنحنيات البيانية والجداول للولايات المختلفة

متاحة من المكاتب المحلية من NRCS (USDA). ولتسهيل تنبؤات الانجراف بسبب

الرياح فإن معادلة انجراف الرياح يمكن أن يتم برمجتها أيضاً (مثلاً، USNRC 1982).

مثال رقم (٣، ١٠): احسب المعدل السنوي للفقد في التربة نتيجة الانجراف بسبب

الرياح لموقع في يومينج حيث WEG (يعكس المعامل I في المعادلة رقم ٣، ٨٦) ويساوي

٢، سطح الركاب للتلال (يعكس المعامل K)، C يساوي ٣٠٪ (لشهر حرج في مكان

الموقع في يومينج)، V تساوي ٥٠٠ رطل/ايكر (٥٦٠ كجم/هكتار)، L تساوي

٢٨٠٠ قدم (٨٥٣، ٤ م). وعادة يكون الشهر الحرج هو الشهر الذي يتوقع فيه

حدوث انجراف الرياح والأكثر شدة.

الحل:

إن الجدول رقم (٣,٢٢) يبين قيم E للسطح غير البارز في WEG2 مع C تساوي ٣٠٪ ليومينج. وباستخدام الجدول رقم (٣,٢٢) ليومينج (USDA 1982)، نجد أن E تساوي ٢٦ طن/ايكر (٥٨,٣ طن/هكتار) في السنة.

الجدول رقم (٣,٢٢). الفقد في التربة طن/ايكر (طن/الهكتار) على السطح غير البارز في يومينج
 $C = 30\%$ ، $WEG = 2$

بقايا الحبيبات الصغيرة المسطحة { رطل / ايكر (كجم / هكتار) }					المسافة غير المحمية للحقل على طول اتجاه الرياح السائدة { قدم (م) }
٠	٢٥٠	٥٠٠	٧٥٠	١٠٠٠	
(٠)	(٢٨٠,٢)	(٥٦٠,٤)	(٨٤٠,٦)	(١١٢٠,٨)	
١٩	١٤,٥	١١	٦,٨	٣,٣	١٠٠
(٤٢,٦)	(٣٢,٥)	(٢٤,٧)	(١٥,٢)	(٧,٤)	(٣٠,٥)
٢٥,٥	٢٠	١٥,٧	١٠	٥,٥	٢٠٠
(٥٧,٢)	(٤٤,٨)	(٣٥,٢)	(٢٢,٤)	(١٢,٣)	(٦١)
٣٣,٥	٢٧	٢١,٩	١٥	٨,٥	٥٠٠
(٧٥,١)	(٦٠,٥)	(٤٩,١)	(٣٣,٦)	(١٩,١)	(١٥٢,٤)
٣٧,٨	٣٠	٢٤,٥	١٧	١٠	١٠٠٠
(٨٤,٧)	(٦٧,٢)	(٥٤,٩)	(٣٨,١)	(٢٢,٤)	(٣٠٤,٨)
٣٩,٩	٣٢	٢٥,٨	١٧,٧	١٠,٦	٢٠٠٠
(٨٩,٤)	(٧١,٧)	(٥٧,٨)	(٣٩,٧)	(٢٣,٨)	(٦٠٩,٦)
٤٠	٣٢,٧	٢٦	١٨	١٠,٩	٣٠٠٠
(٨٠,٧)	(٧٣,٣)	(٥٨,٣)	(٤٠,٣)	(٢٤,٤)	(٩١٤,٤)
٤٠	٣٣	٢٦	١٨	١١	٤٠٠٠
(٨٩,٧)	(٧٤,٠)	(٥٨,٣)	(٤٠,٣)	(٢٤,٧)	(١٢١٩)
٤٠	٣٣	٢٦	١٨	١١	٥٠٠٠
(٨٩,٧)	(٧٤,٠)	(٥٨,٣)	(٤٠,٣)	(٢٤,٧)	(١,٥٢٤)

المصدر: مقتبس من المنحنيات البيانية المعطاة في (USDA 1982).

تحليل انتقال الرواسب Sediment Transport Analysis

يشمل تحليل انتقال الرواسب تقديرات تسوية الأرض وحرث التربة والترسيب في الأنهار وأحواض الأنهار ويمكن أن يتم أدائه باستخدام نماذج الحاسب مثل نموذج HEC-6 (USACE 1991d). ومدخلات هذا النموذج يشمل التالي:

- ١ - المنحنيات المائية للسريان في القناة الرئيسة والقنوات الفرعية.
- ٢ - القطاعات العرضية للقناة مع معاملات الخشونة والتصرفات عند كل منها، بما يشبه نماذج HEC-2 و HEC-RAS (USACE 1991c, 1998).
- ٣ - توزيع حجم حبيبات مادة القاع عند كل قطاع عرضي.
- ٤ - الأحمال المعلقة من الماء المتدفق في القناة الرئيسة والقنوات الفرعية وتوزيعات أحجام حبيباتها.

في معظم الحالات الميدانية لا تكون البيانات التفصيلية الخاصة بالموقع متاحة وبيانات الداخل للموقع يجب أن تمثل اعتماداً على البيانات المحدودة والحكم. وفي بعض الحالات يجب عمل التقديرات الأولية بالبيانات المحدودة إذا كانت الرواسب الملوثة التي انجرفت من الموقع سوف تصل إلى موقع المصب في اتجاه التيار أو استقرت غالباً في التيار الذي يصل لمنبع النهر في هذا الموقع. والخطوات الحسابية لمثل هذه التحليلات التمهيدية تشمل التالي:

- ١ - احسب السرعة القصوى والمتوسطة والدنيا للسريان، وأعماق الماء المتاحة في الدراسة.
- ٢ - احسب متوسط d_{15} , d_{50} , d_{95} للرواسب التي يحتمل أن تنجرف من الموقع.

٣- احسب سرعة السقوط لجزيئات معلومة الأحجام من المنحنيات البيانية (مثلاً، usbr 1971) أو باستخدام معادلة روبي (Low 1989):

$$\omega = \left[\left\{ (2/3)g(G_s - 1)d^3 + 36v^2 \right\}^{0.5} - 6v \right] / d$$

(٣,٨٧)

حيث إن:

ω = سرعة سقوط الجزيئات (م/ث) ذات القطر d (م).

v = اللزوجة الكينيماتيكية (م^٢/ث).

G_s = الكثافة النوعية للجزيئات.

٤- احسب مسافات الانتقال الأقل والمتوسطة والقصوى L (م) لجزيئ قطره d (م)، باستخدام العلاقة:

$$L \cong DV/w$$

حيث إن:

D = متوسط عمق الماء (م) في متناول الدراسة.

V = سرعة السريان (م/ث).

مثال رقم (٣, ١١): إن أقصى سرعة وعمق للسريان في مجرى مائي يتدفق في موقع ملوث تقدر بأن تكون ١,٥٢ م/ث و ٤,٦ م على الترتيب. ومتوسط القطر d_{15} من الرواسب الملوثة حوالي ٠,٠٥ مم. لخزان ماء موضوع على بعد ٦ كم من الموقع، استنتج إذا كانت أي نسبة ذات أهمية من الرواسب الملوثة يحتمل أن تصل إلى الخزان. مع العلم بأن G_s تساوي ٢,٦٥، و v تساوي 1.0×10^{-6} م^٢/ث.

الحل:

$$w = \left[\sqrt{\left\{ (2/3) \times 9.81 \times 1.65 \times (0.00005)^3 + 36 \times (0.000001131)^2 \right\}} - 6 \times (0.000001131) \right] / 0.00005 = 0.00197 \text{ m/s}$$

$$L(\max) = 4.6 \times 1.52 / (0.00197) = 3550 \text{ m}$$

هذا يعني أن احتمال أن تصل للخران أي نسبة ذات أهمية من الرواسب الملوثة

مستبعد.

وللتحكم في كمية الرواسب التي تنقل عن طريق المجرى المائي من العوالق التي تصل في اتجاه مصب التيار فإنه يتم الاستعانة بأحواض الترسيب. ويتم نقل جزء رئيس من حمل الرواسب السنوي أثناء حدوث العاصفة ويمكن بإنشاء أحواض الترسيب إضعاف شدة الفيضان وحجز الرواسب أثناء حدوث العاصفة باستخدام نماذج الحاسب مثل SEDIMOT-2 (Wilson et al. 1984).

ويمكن الحصول على تقدير تمهيدي من كفاءة حجز حوض الترسيب للرواسب متوسطة القطر d (م)، باستخدام المعادلة العملية (USB 1971; Barfield et al. 1981; Vetter 1940).

$$W / W_0 = \exp(-\omega L / q) = \exp(-\omega A / Q) \quad (3,88)$$

حيث إن:

W_0 = وزن الرواسب الداخلة إلى الحوض (كجم).

W = وزن الرواسب الخارجة من الحوض (كجم).

L = طول الحوض (م).

w = سرعة سقوط (م/ث) للجزيئات ذات القطر d (م).

q = التسرب لكل متر عرض من الحوض (م³/ث).

A = مساحة سطح الحوض (م²).

Q = التصرف الداخل للحوض أو الخارج منه (م³/ث).

ومن المتطلب للترسيب أو أحواض الترسيب أن تحجز الرواسب التي تنقل عن طريق الماء المنصب على أساس مستمر (في أحواض الترسيب يكون مطلوباً حجز الرواسب من الماء المستخدم لأنظمة إعادة ملء المياه الجوفية أو أنظمة إعادة تدوير المياه للمباني الصناعية). مثل هذه الأحواض يمكن أن تحدد أحجامها باستخدام المعادلة التالية (USBR 1971; Johnson 1999):

$$P = [(1 - \exp(-X))] \quad (١٣,٨٩)$$

$$X = (1.055 L w) / (V \times D) \quad (٣,٨٩ ب)$$

حيث إن:

P = نسبة الرواسب ذات القطر d (م) التي ترسب على طول الحوض.

V = متوسط سرعة السريان في قناة التصريف (م/ث).

w = سرعة سقوط (م/ث) للجزيئات ذات القطر d (م).

D = عمق الماء في الحوض (م).

مثال رقم (٣, ١٢): احسب حجم حوض الترسيب لقناة تحمل تصرف $٦,٥$ م^٣/ث مع متوسط سرعة سريان $٠,١٥$ م/ث ومتوسط حمل الرواسب السنوية ٢٠٠٠٠ م^٣/سنة، وتوزيع حجم جزيئات الرواسب موضحة في الجدول رقم (٣, ٢٣). استخدم G_s تساوي $٢,٦٥$ ، و γ تساوي $١٠ \times ٠,٩٤$ م^٦/ث.

الحل:

في المحاولة الأولى، بفرض أن للحوض:

$$L = 300 \text{ m} , \quad D = 3 \text{ m}$$

فإن

$$X = 1.055 (300 \omega) / (0.45) = 703 \omega$$

الجدول رقم (٣,٢٣). توزيع حجم الجزيئات لحمل الرواسب السنوي.

النعومة (%)	قطر الجزيئات (مم)
١٠٠	٠,٥
٩٨	٠,٢٥
٨٣	٠,١٢٥
٤٦	٠,٠٦٢
٣٣	٠,٠٣١
٢٢	٠,٠١٦
١٣	٠,٠٠٨
٧	٠,٠٠٤

وحسابات كفاءة حجز حوض الترسيب موضحة في الجدول رقم (٣,٢٤).
ومنها كفاءة حجز الحوض تساوي:

$$13181/20000 = 0.66$$

وإذا كان الحوض معداً ليتسع لسنة واحدة من حمل الرواسب فقط مع عمق راسب قدره ٠,٣ م، فإن متوسط عرضه هو:

$$13181/(300 \times 0.3) = 146 \text{ m}$$

إذا حجم هذا الحوض غير مقبولاً ويجب إعادة الحسابات لقيم أخرى من L.

الجدول رقم (٣،٢٤). حسابات كفاءة الحجز.

(١)	(٢)	(٣)	(٤)	(٥)	(٦)	(٧)	(٨)
D (مم)	للكل	ω (مم/ث)	$P = 1 - e^{-x} \quad x = 703 \omega$			معدل الرواسب	معدل الترسيب
			متوسط			المتدفقة	(م ^٢ /سنة)
			P			(م ^٢ /سنة)	(٧) × (٦)
١,٥		١,٠٦١٩	٤٣,٥٢	١,٠			
	١,٠٢			١,٠	١,٠	٤٠٠	٤٠٠
١,٢٥		١,٠٣٠٥	٢١,٤٤	١,٠			
	١,١٥			١,٠	١,٠	٣٠٠٠	٣٠٠٠
١,١٢٥		١,٠١١٦	٨,١٥	١,٩٩٩٧			
	١,٣٧			١,٩٢	١,٩٦	٧٤٠٠	٧١٠٤
١,٠٦٢		١,٠٠٣٦	٢,٥٣	١,٩٢	١,٦٩	٢٦٠٠	١٧٩٤
١,٠٣١		١,٠٠٠٨٨	١,٦١٩	١,٤٦	١,٣٠٦	٢٢٠٠	٦٧٣
١,٠١٦		١,٠٠٠٢٣٥	١,١٦٥	١,١٥٢	١,٠٩٦	١٨٠٠	١٧٣
١,٠٠٨		١,٠٠٠٠٥٨	١,٠٤٠٨	١,٠٤	١,٠٢٥	١٢٠٠	٣٩
١,٠٠٤		١,٠٠٠٠١٤٦	١,٠١٠٣	١,٠١٠٢	١,٠٠٥	١٤٠٠	٧
١,٠٠٧							
المجموع	١,٠					٢٠٠٠٠	١٣١٨١

تشتت القناة المفتوحة Open-Channel Dispersion

التشتت قرب الحقل Near-Field Dispersion

تحليل التشتت ومنطقة الخلط يكون مطلوباً لتقييم أثار تصرف المادة الملوثة في المجاري المائية خلال المصادر المرحلية وغير المرحلية. ولتصرفات منفردة المصدر فإنه يمكن إجراء مثل هذه التحليلات باستخدام نماذج (USEPA 1996a) (CORMIX). ويشمل التشتت قرب الحقل التخفيف الناتج عن التصرفات خلال النافورات والرذاذات والتي تتأثر بكمية الحركة وقابلية طفو تصرف النافورة وشكل مخرج التصريف. والخطوات الحسابية للتحليل التمهيدي للنافورات الأفقية الدائرية البسيطة التي تشبه مخرج الأنبوب هي كما يلي (Fischer *et al.* 1979):

• احسب معدل تدفق كمية حركة النافورة (م³/ث):

$$M = Q V_j \quad (٣,٩٠)$$

• احسب الطول المميز l_c (م):

$$l_c = Q / M^{1/2} \quad (٣,٩١)$$

• احسب السرعة القصوى عند مسافة x من فتحة النافورة:

$$w_m = 7 M l_c / (Q x) \quad (٣,٩٢)$$

• احسب :

$$C_m / C_0 = 5.6 l_c / x \quad (٣,٩٣)$$

• احسب التخفيف المتوسط (s_{mean}) عند مسافة x من فتحة النافورة:

$$s_{mean} = (\text{حجم التدفق عند مسافة } x) \div (\text{حجم التدفق عند فتحة النافورة})$$

$$s_{mean} = \mu / Q = 0.25 x / l_c \quad (٣,٩٤)$$

حيث إن:

$$Q = \text{التصرف خلال فتحة النافورة (م}^3/\text{ث).}$$

$$V_j = \text{سرعة النافورة (م/ث).}$$

$$\mu = \text{حجم التدفق عند مسافة } x \text{ (م}^3/\text{ث).}$$

$$C_m = \text{التركيز الأقصى عند مسافة } x.$$

$$C_0 = \text{التركيز الأولي.}$$

وفي حالة فتحة رأسية لمسبب طفو دائري منفرد (كثافة الماء الفائض تكون أقل من كثافة الماء المستقبل) وجد أن التدفق يصبح شبيهاً بريشة عند مسافة قصيرة من فتحة النافورة. الخطوات الحسابية للتحليل التمهيدي هي (Fischer et al. 1979)

كالتالي:

$$\bullet \text{ احسب كمية حركة دفع النافورة (م}^4/\text{ث}^2):$$

$$(3,90) \quad M = QV_j$$

$$\bullet \text{ احسب الطول المميز } l_0 \text{ (م):}$$

$$(3,91) \quad l_0 = Q/M^{1/2}$$

$$\bullet \text{ احسب الطول المميز للنافورة الطافية:}$$

$$(3,95) \quad l_m(m) = M^{3/4} / \sqrt{B}$$

$$\bullet \text{ احسب معدل تدفق النافورة الطافية:}$$

$$(3,96) \quad B = [(\rho_a - \rho) / \rho] g Q$$

حيث إن:

$$\rho_a = \text{كثافة الماء المستقبل.}$$

$$\rho = \text{كثافة الانبثاق.}$$

لكل $y \ll l_m$ ، حيث إن $y =$ عمق الماء فوق الثغر، يكون التدفق شبيهاً بالريشة.

ولكل $y \gg l_m$ ، يكون التدفق شبيهاً بالنافورة.

• احسب رقم ريتشاردسون R_0 ، للنافورة الدائرية:

$$(٣, ٩٧) \quad R_0 = l_c / l_m = Q \sqrt{B/M^{5/4}}$$

• احسب العمق اللابعدي:

$$(٣, ٩٨) \quad \xi = 0.25 (y/l_c) (R_0 / 0.557)$$

• إذا كانت $l_m < y$ احسب حجم الدفق في الريشة على عمق y فوق الفتحة:

$$(٣, ٩٩) \quad \bar{\mu} = \xi^{5/3}$$

• إذا كانت $l_m > y$ احسب حجم الدفق في النافورة على عمق y فوق الفتحة:

$$(٣, ١٠٠) \quad \bar{\mu} = \xi$$

• احسب التخفيف المتوسط على عمق y :

$$(٣, ١٠١) \quad \mu/Q = \bar{\mu} (0.557/R_0)$$

تتكون الرذاذات متعددة الفتحات من فتحات عديدة على مسافات متقاربة.

وتميل تصرفات الماء الفائض من خلال هذه الفتحات إلى أن تتداخل لتكون ريشة

رأسية خلال مسافة من مواقع الفتحات. خطوات أداء التحليل التمهيدي للتخفيف

في الريشة هي (Fischer et al. 1979) كما يلي:

• احسب التصرف q ، لكل وحدة طول من الرذاذ، وتركيز المادة الملوثة

الأولي C_0 ، فوق هذا الماء المستقبل، وكثافة الماء المنصرف ρ_a ، وكثافة الماء

المستقبل ρ (كجم/م^٣):

$$\Delta\rho = \rho_a - \rho \quad , \quad g' = g\Delta\rho/\rho$$

• احسب:

$$(3, 102) \quad (C - C_0)/(C_0 - C_a) = 2.63 q^{2/3} / (g^{1/3} y)$$

حيث إن:

C = التركيز المخفف عند ارتفاع y فوق فتحات الرذاذ.

C_a = التركيز الخلفي في المياه المحيطة.

وفي الحالات التي لا يمكن عمل تحليل الرذاذات متعددة الفتحات، فإن مصدر المستوى الرأسي لتحليل التشتت الموقع البعيد يمكن افتراضه مساوياً لطول الرذاذ L ، وارتفاع يساوى ٣٠٪ من عمق الرذاذ (Chin 1985).

تشتت الحقل البعيد Far-Field Dispersion

يشمل تشتت الحقل البعيد التخفيف الناتج عن التدفق خلال الاضطراب في القناة بعيداً عن مخرج التصريف حيث لا تكون كمية حركة الانبثاق كبيرة. وتشمل بعض نماذج محاكاة جودة المياه في الأنهار والخزانات (USEPA 1987a) QUAL2E و (USEPA 1988b) WASP4 و (USACE 1987) WQRRS. ولأجل التحليل التمهيدي لتشتت الملوثات المنطلقة في المجرى المائي، فإن معادلات تحليلية تقريبية أبسط، أو معادلات شبه تحليلية، يمكن أن تكون مفيدة. وبشكل عام فإن الوكالات المنظمة هي التي تحدد منطقة خلط حادة أو مزمنة لمنطقة المياه السطحية والتي لا يتم فيها تطبيق مقاييس جودة الماء. وهي منطقة المياه السطحية في اتجاه مصب التيار من نقطة تصرف الماء الفائض حيث يحدث الخلط الفيزيائي في كل الاتجاهات حتى تحقق المكونات في تصرف التركيز المنتظم في الماء المستقبل. ويفترض حدوث الخلط الكامل عند القطاع العرضي في المجرى المائي حيث تكون التركيزات عند كل النقاط في القطاع العرضي

ضمن ٥٪ من القيمة المتوسطة للقطاع العرضي. ومعظم مقاييس جودة المياه تحدد استخدام متوسط التدفق المنخفض سبعة أيام وعشر سنوات (7Q10) لتقييم الآثار المتعلقة بجودة المياه على سطح الماء. ويجب الحفاظ على حجم منطقة الخلط عند الحد الأدنى ويجب أن تسمح بالممر الآمن وحماية وانتشار الكائنات المائية. وبالإضافة لذلك فإن التلوث في منطقة الخلط يجب ألا يكون ساماً بشكل كبير. ولنقطة مصدر ما فإن طول الخلط L_{mix} يمكن أن يقدر عن طريق (Fischer *et al.* 1979):

$$L_{mix} = 0.1 u W^2 / D_y \quad (\text{للخلط الكامل}) \quad (٣, ١٠٣)$$

إذا كان المصدر يقع عند منتصف القطاع العرضي للمجرى المائي، أو عن طريق:

$$L_{mix} = 0.4 u W^2 / D_y \quad (\text{للخلط الكامل}) \quad (٣, ١٠٤)$$

إذا كان المصدر يقع على ضفة المجرى المائي.

حيث إن:

$$u = \text{سرعة السريان.}$$

$$W = \text{عرض المجرى المائي.}$$

$$D_y = \text{معامل التشتت الجانبي.}$$

وموضح في التالي ثلاث نماذج تحليلية لمحاكاة تشتت الحقل البعيد في المجاري

المائية. أول هذه النماذج يستخدم (Prakash 1977, 1999):

$$C(x, y, z) / C_0 = \left[Q_0 / \left\{ 4 (z_2 - z_1) \sqrt{(\pi x u D_y)} \right\} \right] \sum \sum \left[\{ \text{erf} (E1) - \text{erf} (E2) \} \{ \exp (E3) \} \right] \quad (١٣, ١٠٥)$$

حيث إن:

$$E1 = \left[z - m D - (-1)^m z_1 \right] / \left[\sqrt{(4 D_z x / u)} \right] \quad (٣, ١٠٥) \text{ (ب)}$$

$$E2 = \left[z - m D - (-1)^m z_2 \right] / \left[\sqrt{(4 D_z x / u)} \right] \quad (٣, ١٠٥) \text{ (ج)}$$

$$E3 = -[y - n W - (-1)^n y_0]^2 / [(4 D, x/u)] \quad (د٣, ١٠٥)$$

حيث إن:

$$\text{erf}(x) = \text{دالة الخطأ لـ } x.$$

$$\Sigma \text{ (الأولى) من } m = \infty \text{ إلى } -\infty$$

$$\Sigma \text{ (الثانية) من } n = -\infty \text{ إلى } \infty$$

$$C(x, y, z) = \text{التركيز عند النقطة } (x, y, z).$$

$$C_0 = \text{تركيز المصدر.}$$

$$Q_0 = \text{معدل تصريف الماء الملوث.}$$

$$D_z, D_y = \text{معاملات التشتت العرضي والرأسي على الترتيب.}$$

$$D = \text{عمق السريان.}$$

$$z, y, x = \text{المسافات في الاتجاهات الطولية والعرضية والرأسية على الترتيب}$$

عن نقطة الأصل في منتصف القناة.

$$z_2, z_1 = \text{الإحداثيات الرأسية لمصدر الخط الرأسي.}$$

$$y_0 = \text{الإحداثي } y \text{ عند النقطة حيث يقع مصدر الخط الرأسي.}$$

ويمثل تيار قناة المصدر بمتوسط القطاع العرضي المكافئ للمستطيل. ويفترض في القاع والصفين وسطح الماء في القناة ألا يكون لها حدود للسريان. وأثار هذه الحدود تعلق عن طريق استخدام طريقة الصور. وفي حالة النقل في حالة السريان المستقر يتم إهمال تأثير التشتت الطولي. ويفترض أن يكون السريان في اتجاه التيار منتظماً ومستقراً، وتأثير التيارات الثانوية يفترض أن يعلل لها عن طريق معامل التشتت العرضي.

وتكون المعادلة رقم (٣، ١٠٥) قابلة للتطبيق في مصدر الخط الآسي الذي يقع عند x تساوي صفر، حيث x تكون موجبة في اتجاه مصب التيار. وإذا كان المصدر سطحاً رأسياً له طول محدد L ، يوازي اتجاه السريان (اتجاه x)، فإنه يفترض أن يتكون من عدد من المصادر الرأسية ذات أطوال متناهية الصغر موضوعة بالقرب من بعضها البعض. ويتم الحصول على تأثير هذه المصادر الرأسية عن طريق التراكم الخطي:

$$C'(x, y, z, L) = \sum C(x + i \Delta x, y, z) \quad (٣, ١٠٦)$$

حيث إن:

$C'(x, y, z, L)$ = التركيز عند النقطة (x, y, z) الناتج عن مصدر السطح الرأسي بالطول المحدد، L .

$C(x + i \Delta x, y, z)$ = التركيز عند $(x + i \Delta x, y, z)$ الناتج عن مصدر الخط

الرأسي الذي يقع عند $x = 0$ ، والمعطى في المعادلة

رقم (٣، ١٠٥) مع استبدال Q_0 بالقيمة Q_0 / N .

Δx = الطول متناهي الصغر للمصدر الآسي L / N .

N = عدد المصادر الرأسية بالطول المتناهي الصغر والذي يقسم فيها طول

المصدر L .

وفي حالة تصرف مصدر نقطة مستمر، فإن معادلة التشتت الحمل في السريان

المنتظم في الحالة المستقرة (التأفق) في الاتجاه الطولي (أي على طول اتجاه تدفق النهر)

تصبح:

$$C(x, y, z) / (C_0 Q_0) = \left[1/4 \pi x \sqrt{(D_y D_z)} \right]$$

$$\left[\exp(-\lambda x / u) \right] \sum \sum \exp \left[-\left(y - n B - (-1)^n y_0 \right)^2 / (4 D_y x / u) \right] \times$$

$$\exp \left[-\left\{ z - m D - (-1)^m z_0 \right\}^2 / (4 D_z x / u) \right] \quad (٣, ١٠٧)$$

حيث إن:

$$C_0 = \text{التركيز في التصريف عند مخرج التصريف.}$$

$$Q_0 = \text{معدل التصريف المتسرب للمخرج.}$$

$$C(x, y, z) = \text{التركيز عند النقطة } (z, y, z).$$

$$D_y = \text{معامل التشتت العرضي.}$$

$$u = \text{السرعة.}$$

$$D_z = \text{معامل التشتت الرأسي.}$$

$$\lambda = \text{معامل التحلل (طن}^{-1}\text{).}$$

$$y_0 = \text{الإحداثي } y \text{ لمصدر النقطة أو مخرج التصريف.}$$

$$z_0 = \text{الإحداثي } z \text{ لمصدر النقطة أو مخرج التصريف.}$$

$$x = \text{مسافة التيار من مخرج التصريف الذي يقع عند } x = 0.$$

$$\Sigma \text{ (الأولى) من } n = -\infty \text{ إلى } \infty.$$

$$\Sigma \text{ (الثانية) من } m = -\infty \text{ إلى } \infty.$$

تقع نقطة أصل الإحداثيات عند منتصف النهر عند عمق متوسط وعندها x

تساوي صفر. وفي حالة الحفاظ على الكتلة في بعض الحالات فإن ١٠٠ حد أو أكثر

يجب استخدامها في حسابات المعادلة رقم (١٠٧، ٣). وبالتالي ينصح بأداء الحسابات

باستخدام برنامج فورتران أو أوراق العمل. ويمكن محاكاة التصريفات من مخارج

التصريف العديدة التي تقع عند نقاط متنوعة على ضفاف النهر باستخدام مبدأ

التراكم، أي:

$$C(x, y, z, T) = \sum C_i Q_i [C \{x + i \Delta x_i, y, z\}] \quad (٣, ١٠٨)$$

حيث إن:

$C(x, y, z, T)$ = التركيز عند النقطة (x, y, z) الناتج عن التصريفات عند مخرج التصريف T .

الرمز السفلي $i = 1$ يشير إلى أبعد مخرج في اتجاه مصب التيار.

$i = 2$ يشير إلى مخرج التصريف التالي عكس اتجاه منبع التيار وهكذا.

Δx_i = مسافة مخرج التصريف رقم i من أبعد مخرج للتصريف في اتجاه مصب التيار.

$C(x + i \Delta x_i, y, z)$ = قيمة (الجانب الأيمن) المحسوب من المعادلة رقم

(٣، ١٠٧) باستخدام $[x + i \Delta x_i]$ لـ x .

Σ من $i = 1$ لعدد مخرج التصريف الكلي T .

يمكن استخدام هذا النموذج لتقدير التركيزات عند نقاط مختلفة على طول

عرض وعمق النهر عند حافة مصب النهر لمنطقة الخلط. وهذا النموذج يفترض التالي:

١- وجود سريان منتظم مستقر في طرف النهر. ويتضمن افتراض الحالة

المستقرة للسريان المستمر من مخرج التصريف. ويتضمن السريان المنتظم قطاع عرضي

ثابت في طرف النهر بأكمله. ويقدر متوسط القطاع العرضي للمستطيل التمثيلي

لطرف النهر في منطقة الخلط. وعدم انتظام القطاعات العرضية في النهر يمكن أن

يحسن التشتت والتخفيف. وبالتالي يمكن أن يكون افتراض القطاع العرضي المنتظم

للمستطيل مناسباً.

٢- التدفق في النهر يكون أحادي البعد (على طول مجرى النهر) مع عدم

وجود تدفقات ثانوية في الاتجاهات الأخرى. وهذا الافتراض يعد محافظاً أيضاً لأن

التدفقات الثانوية تميل إلى تحسين الخلط أو زيادة التشتت العرضي.

النموذج التحليلي الثاني لمحاكاة تشتت الحقل البعيد في المجارى المائية

(USEPA 1987b) يستخدم:

$$C(x, y)/C_0 = \left[1/\sqrt{4\pi D_y t} \right] \left[\int \exp(E4) dy' + \int \exp(E4) dy' + \right. \\ \left. (3, 109) \int \exp(E4) dy' + \int \exp(E4) dy' + \dots \right]$$

حيث إن:

حدود التكامل الأول والثاني والثالث والرابع من a إلى b، ومن c إلى d، ومن e إلى f، ومن g إلى h، على الترتيب.

$$E4 = -(y - y')^2 / (4D_y t)$$

$$a = -B/2 - y_s$$

$$b = B/2 - y_s$$

$$c = -B/2 + y_s$$

$$d = B/2 + y_s$$

$$e = -B/2 - 2W - y_s$$

$$f = B/2 - 2W - y_s$$

$$g = -B/2 + 2W + y_s$$

$$h = B/2 + 2W + y_s$$

$$t = x/u$$

B = طول مصدر الخط الأفقي عبر المجرى المائي.

y_s = المسافة من خط المتصف في المصدر إلى ضفة المجرى المائي والذي

يفترض أن يكون عند $y = 0$.

يحاكي هذا النموذج التأفق الطولي فقط والتشتت العرضي ويحسب داخلياً

معامل التشتت العرضي باستخدام العلاقة:

$$D_y = 0.5 u_* D$$

حيث إن:

$$u_* = \text{سرعة القص} = \sqrt{(g D S)}$$

وهو يفترض مصدر الخط الأفقي بالعرض المحدد عبر المجرى المائي ويستخدم طريقة الصور لتعليل أثار حدود القناة. وتمثل كل تكامل في المعادلة رقم (٣, ١٠٩) مساهمة صورة المصدر ونمط الصورة الذي يتكرر إلى ما لا نهاية. يحاكي النموذج الثالث (USNRC 1976) مصدر النقطة ويستخدم:

$$C(x, q) / C_0 = (Q_0 / Q) [1 + 2 \sum \{ \exp(E5) \cos(n \pi q_s / Q) \cos(n \pi q / Q) \}] \quad (3, 110)$$

حيث إن:

$$\sum \text{ من } 1 \text{ إلى } \infty$$

$$E5 = -(n^2 \pi^2 D^2 D_y u_x) / Q^2$$

$Q =$ تدفق الكلي للمجرى المائي.

$q =$ تصرف المجرى المائي عند ضفة النهر (يفترض أن يكون عند $y = 0$) إلى

مسافة y حيث يتم حساب $C(x, q)$ مثل $q \rightarrow Q$, $y \rightarrow W$.

$y_s =$ مسافة مصدر النقطة من ضفة النهر.

$q_s =$ تصرف المجرى المائي بين $y = 0$ و y_s .

هذا النموذج يحاكي أيضاً التأفق الطولي فقط والتشتت العرضي.

مثال رقم (٣, ١٣): ماء ملوث ينساب خلال منطقة رشح بعمق ٠,٣٥ م على طول الضفة من مجرى دائم. معدلات الرشح المقدرة خلال الأطوال المختلفة من منطقة الرشح على طول المجرى المائي معطاة في الجدول رقم (٣, ٢٥). ومتوسط عرض وعمق المجرى المستقبل ٢٤٤ م و ٣,٣٥ م على الترتيب. والسرعة المناظرة لسريان

سبعة أيام وعشر سنوات (7Q10) هي ٠,٦٢ م/ث. بفرض أن D_y يساوي ١٦ م^٢/ث، وتوزيع التركيز منتظم على طول العمق. احسب طول الخلط الكامل.
الحل:

لتوزيع منتظم للتركيز على طول العمق افترض قيمة عالية نسبياً لـ D_z (١٦ م^٢/ث). ويمكن اعتبار المصدر على أنه مستوى رأسي يمتد من x تساوي صفر إلى x تساوي ٢٩٣٦ م (حيث x موجبة في اتجاه مجرى التيار)، z_1 تساوي ١,٦٧٥ م، z_2 تساوي ١,٦٧٥ م، y_0 تساوي ١٢٢ م (وتكون نقطة الأصل في منتصف القطاع العرضي للقناة). وللحفاظ على الكتلة يتم استخدام عدد كبير من الصور (أي ١٠٠٠) في برنامج فورتران. وبتقسيم منطقة الرشع إلى ١٠ أجزاء أصغر وباستخدام المعادلات رقم (٣,١٠٥) ورقم (٣,١٠٦) فإن التركيزات المقدرة في مواقع مختلفة موضحة في الجدول رقم (٣,٢٦).

نلاحظ عند x تساوي ٣٢٠٠٠ م فإن التركيز خلال عرض القناة يساوي ٠.٠١٢ ملجم/ل. وبالتالي فإن الطول النظري اللازم للخلط الكامل حوالي ٣٢٠٠٠ م. وباستخدام التركيزات المقدرة عند النقاط الإضافية على طول عرض القناة فإن منطقة الخلط مع طرفها التي تعرف عن طريق التركيز النوعي (٠.٠١٢ ملجم/ل) يمكن رسمها. والمعيار المستخدم بشكل شائع هو تحديد حد الخلط الكامل أو منطقة الخلط عند القطاع العرضي حيث يكون التركيز عند كل النقاط ضمن ٥٪ من القيمة المتوسطة من القطاع العرضي (Fischer et al. 1979). والقطاع العرضي حيث يكون أقصى انحراف عن التركيز المتوسط ضمن ٥٪ يكون حوالي ٢٥٠٠٠ م في اتجاه مصب التيار من المصدر. ونظرياً فإن هذا الطول الكبير يمكن أن يكون مطلوباً؛ لأن D_y تكون صغيرة نسبياً.

الجدول رقم (٣,٢٥). معدلات الرش من الماء الملوث.

التركيز (ملجم/ل)	معدل الرش (ل/ث/م)	طول منطقة الرش (م)
٢٥٠	٠,٠١٥٥	٥٦٤-٠
٢٥٠	٠,٠٠٨	١٢٠٣-٥٦٤
٢٥٠	٠,٠٠١١	١٩٦١-١٢٠٣
٢٥٠	٠,٠٠٦٥	٢٧٠١-١٩٦١
٢٥٠	٠,٠٠٥٣	٢٩٣٦-٢٧٠١

الجدول رقم (٣,٢٦). توزيع التركيز في المجرى المائي.

المسافة من حافة مصب			التركيز (ملجم/ل)
النهر لمنطقة الرش			المسافات على طول عرض المجرى المائي من الضفة حيث يحدث الرش
x (م)	٠ (م)	٧٠ (م)	١٢٠ (م)
٣٠	٠,١٩	٠,٠٠٢	٠,٠٠٠٠٤
٣٠٠	٠,١١	٠,٠٠٣	٠,٠٠٠٠٧
٣٠٠٠	٠,٠٥	٠,٠١٤	٠,٠٠١٦
١٥٠٠٠	٠,٠٢٥	٠,٠١٨	٠,٠١٠
٣٢٠٠٠٠	٠,٠١٢	٠,٠١٢	٠,٠١٢

وفي حالات معينة فإن تركيز المكون في المياه السطحية يمكن أن يتأثر ببعض العمليات مثل القابلية للتحلل بالبكتريا وسرعة التبخر. ومدى تأثير هذه العمليات يمكن أن تقدر عن طريق تقديم معامل مضاعف في المعادلة رقم (٣.١٠٥) كما يلي:

$$C(x, y, z, \lambda) = C(x, y, z) \exp(-\lambda x / u) \quad (3, 111)$$

حيث إن:

$C(x, y, z)$ تعطى بالمعادلة (٣، ١٠٥).

$C(x, y, z, \lambda) =$ التركيز عند النقاط (x, y, z) ، بما فيها تأثير التحلل بالبكتيريا والتبخر.

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$$

$\lambda_1 =$ ثابت معدل التحلل بالبكتيريا (زمن^{-١}).

$\lambda_2 =$ ثابت معدل التبخر (زمن^{-١}).

وثواب معدل التحلل بالبكتيريا في البيئة الهوائية للمكونات المختلفة يمكن الحصول عليها من مجموعة من المراجع (مثل USEPA 1985). وثواب معدل التحلل بالبكتيريا المقترحة للترتيب الأولي للمكونات المختارة لتحليلات المستوى المصور موضحة في الجدول رقم (٣، ٢٧) (USEPA 1985).

وثابت معدل التبخر هو دالة لثابت قانون هنري وهو يتناسب عكسياً مع عمق الماء الذي يذاب فيه المكون. وثابت قانون هنري (K_H) لبعض الكيماويات المختارة موضح في الجدول رقم (٣، ٢٨). وللكيماويات الأخرى يمكن تقدير K_H عن طريق:

$$K_H \cong (\text{ضغط البخار (مم زئبق)}) \times (\text{الوزن الجزيئي (جم/جزئ)}) \div (\text{إذابة الماء (جم/ل)} \times 760)$$

$$K_H \cong \left[\frac{(\text{Vapor Pressure in mm of Hg}) \times (\text{molecular weight in gm/mole})}{(\text{water solubility in mg/l}) \times 760} \right] \quad (٣، ١١٢)$$

القيم النموذجية لثابت معدل التبخر لمياه بعمق ١ م موضحة في الجدول رقم (٣، ٢٨) (USEPA 1985). وقيم λ_2 لأعماق مياه مختلفة عن ١ م يمكن أن يتم تقديرها عن طريق قسمة القيم في الجدول رقم (٣، ٢٨) على عمق المياه بالأمتار.

الجدول رقم (٣, ٢٧). ثوابت معدل التحلل بالبكتريا للترتيب الأولي وثوابت قانون هنري للكياويات المختارة.

المكون	ثابت معدل التحلل بالبكتريا المقترح λ_1 للمستوى المصور للتحليل (يوم ^{-١}) ^a	ثابت قانون هنري (ض.ج.م ^٣ /مول) ^b
الكلور السباعي	*	$10^{-4} \times 8,19$
رابع كلوريد الكربون	$0,5 < (استخدم 0,5)$	$10^{-2} \times 2$
١,١ ايثلين الكلور الثنائي	$0,5 < (استخدم 0,5)$	$10^{-2} \times 3,4$
١,٢ ايثلين الكلور الثنائي - جانب واحد	$0,5 - 0,05 (استخدم 0,05)$	$10^{-3} \times 7,58$
١,٢ ايثلين الكلور الثنائي - جانبيين	$0,5 - 0,05 (استخدم 0,05)$	$10^{-3} \times 6,56$
إيثلين الكلور الثلاثي	$0,5 - 0,05 (استخدم 0,05)$	$10^{-3} \times 9,10$
إيثلين الكلور الرباعي	$0,5 - 0,05 (استخدم 0,05)$	$10^{-2} \times 2,59$
البنزين	$0,5 < (استخدم 0,5)$	$10^{-3} \times 5,59$
كلورو بنزين	$0,5 < (استخدم 0,5)$	$10^{-3} \times 3,72$
١,٢ كلورو بنزين الثنائي	$0,5 - 0,05 (استخدم 0,05)$	$10^{-3} \times 1,93$
١,٣ كلورو بنزين الثنائي	$0,5 - 0,05 (استخدم 0,05)$	$10^{-3} \times 3,59$
١,٤ كلورو بنزين الثنائي	$0,5 - 0,05 (استخدم 0,05)$	$10^{-3} \times 2,89$
الاثيل بنزين	$0,5 < (استخدم 0,5)$	$10^{-2} \times 6,43$
طولوين	$0,5 < (استخدم 0,5)$	$10^{-3} \times 6,37$

المصدر a: USEPA (1985).

المصدر b: Maidment (1993).

الجدول رقم (٣, ٢٨). القيم النموذجية لثابت معدل التبخر.

ثابت معدل التبخر λ_2 لعمق ماء مخلوط قدره ١ م (يوم ^{-١})	ثابت قانون هنري K_H (ض.ج.م ^٣ /جزئ)
٤,٨	١
٤,٨	١-١٠
٤,٧	٢-١٠
٤,٢	٣-١٠
١,٨	٤-١٠

المصدر: (USEPA (1985).

مثال رقم (٣, ١٤): احسب التركيز في مثال رقم (٣, ١٣) عند مسافة ١٥٠٠٠ م من موقع الرش و ٧٠ م من الضفة على طول عرض النهر. المكون هو إيثيلين الكلور الثلاثي، مع وجود تأثير للتحلل بالبكتريا والتبخر.

الحل:

باستخدام برنامج فورتران أو أوراق العمل لأداء حسابات المعادلة رقم (٣, ١٠٥) عند x تساوي ١٥٠٠٠ م وعند مسافة ٧٠ م من ضفة النهر، مع سرعة u تساوي ٠,٦٢ م/ث، وعمق مياه يساوي ٣,٣٥ م، يكون:

$$C(x, y, z) = 0.018 \text{ mg/l}$$

وأيضاً يتم توزيع المكون بانتظام على العمق. ومن الجدول رقم (٣, ٢٧) في حالة إيثيلين الكلور الثلاثي نجد أن:

$$\lambda_1 = 0.05 \text{ day}^{-1} \quad , \quad K_H = 9.10 \times 10^{-3}$$

ومن الجدول رقم (٣, ٢٨) لقيمة K_H فأن $\lambda_2 \cong 4.6 \text{ day}^{-1}$ لمياه بعمق ١ م.

ولمياه بعمق ٣,٣٥ م تكون λ_2 تساوي:

$$4.6/3.35 = 1.373 \text{ day}^{-1}$$

إذن:

$$\lambda = 0.05 + 1.373 = 1.423 \text{ day}^{-1}$$

وكذلك:

$$x/u = 15,000/(0.62 \times 86,400) = 0.28 \text{ day}$$

وبالتالي:

$$C(x, y, z, \lambda) = 0.018 \exp(-1.423 \times 0.28) = 0.012 \text{ mg/l}$$

تقدير معاملات التشتت Estimation of Dispersion Coefficients

بعض المعادلات لتقدير معامل التشتت الطولي D_x هي:

$$(٣, ١١٣) \quad D_x / (U_* D) = 5.915 (W/D)^{0.62} (U/U_*)^{1.428} \quad (\text{Seo and Cheong 1995})$$

$$(٣, ١١٤) \quad D_x = 5.93 U_* D$$

(USNRC 1976)

حيث إن:

$$D = \text{متوسط عمق الماء.}$$

$$U_* = \text{سرعة القص.}$$

$$W = \text{متوسط عرض القناة.}$$

والبيانات التجريبية لبعض المجاري المائية مبينة في الجدول رقم (٣, ٢٩)

(Fischer et al. 1979; Graf 1995).

الجدول رقم (٣،٢٩). معامل التشتت الطولي للمجري المائية المختارة.

المجرى المائي	العمق (م)	العرض (م)	متوسط السرعة (م/ث)	معامل التشتت الطولي D_x (م ^٢ /ث)
نهر ساكرامنتو ، كاليفورنيا	٤,٠		٠,٥٣	١٥,٠
نهر ساوث بلات ، كلورادو	٠,٤٦		٠,٦٦	١٦,٢
نهر ميسوري	٢,٧	٢٠٠	١,٥٥	١٥٠٠
نهر كليش ، تينسي	٠,٨٥	٤٧	٠,٣٢	١٤,٠
نهر كليش ، فيرجينيا	٠,٥٨	٣٦	٠,٢١	٨,١
نهر باول ، تينسي	٠,٨٥	٣٤	٠,١٥	٩,٥
كوبر جريك ، فيرجينيا	٠,٤٠	١٩	٠,١٦	٩,٩
نهر كلورادو، من لي إلى خليج نيوتيلود	٨,٢	٧١,٦	٠,٩١	١٦٤-١٠٩

المصدر: (Fischer *et al.* (1979); Graf (1995).

بعض المعادلات لتقدير معامل التشتت العرضي D_y هي:

$$(٣,١١٥) \quad D_y = 0.23 U_* D$$

(USNRC1976)

$$(٣,١١٦) \quad D_y = 0.15 U_* D$$

(Fischer *et al.* 1979)

$$(٣,١١٧) \quad D_y = 0.60 U_* D$$

(USEPA 1991c) مع تغير مقداره ٥٠٪

$$(٣,١١٨) \quad \log (D_y / U_* D) = -2.698 + 1.498 \log (W / D)$$

(Bansal 1971)

البيانات التجريبية لبعض المجري المائية مبينة في الجدول رقم (٣,٣٠)

(Fischer *et al.* 1979)

الجدول رقم (٣,٣٠). معامل التشتت العرضي للمجري المائية المختارة.

المجرى المائي	العمق (م)	العرض (م)	متوسط السرعة (م/ث)	معامل التشتت العرضي D_y (م ^٢ /ث)
نهر بتوماك، ميرلاند	١,٧٤ - ٠,٧٣	٣٥٠	٠,٥٨ - ٠,٢٩	٠,٠٥٨ - ٠,٠١٣
نهر ميسوري، مصب نهر محطة كوبر النووية،	٤	٢٧٠ - ٢١٠	٥,٤	١,١
نهر ميسوري، قرب بلير،	٢,٧	٢٠٠	١,٧٥	٠,١٢
نهر اسكا				

المصدر: (Fischer et al. (1979).

بعض المعادلات لتقدير معامل التشتت الرأسي D_z هي:

$$D_z = 0.067 U_* D \quad (٣,١١٩)$$

(Fischer et al. 1979)

$$\log (D_z / \nu) = -8.08 + 1.89 \log (U_* D / \nu) \quad (٣,١٢٠)$$

(Bansal 1971)

يمكن استخدام قيمة عالية نسبياً لـ D_z (يساوي تقريباً D_y) لمحاكاة الأحوال التي تكون فيها المادة الملوثة مختلطة جيداً على عمق المجرى المائي واختلافات التركيز في الاتجاه الرأسي ليست مؤثرة.

يجب أن تقدر معاملات التشتت باستخدام طرق عديدة وقيم معقولة مختارة عن طريق الحكم. وعند التطبيق العملي يجب التحقق من القيم عن طريق قياسات حقلية.

تركيز الأكسجين المذاب في المجاري المائية

Dissolved Oxygen Concentrations in Streams

تصرفات الماء الفائض في المجاري المائية تؤدي إلى الزيادة في مطلبها من الأكسجين الكيميائي الحيوي (BOD) الذي يستهلك الأكسجين المذاب (DO). وتركيز الأكسجين المذاب في مياه الأنهار الأقل من ٤ إلى ٥ ملجم/ل يعتبر مضر للنباتات والحيوانات المائية. وتعتمد هيدروليكا وعمليات إجهاد مطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي واستهلاك الأكسجين المذاب في الأنهار على التالي:

١ - الاختلافات الزمنية (التي تعتمد على الزمن) والمكانية في تدفقات المجاري المائية وأعماق المياه والسرعات.

٢ - الاختلافات المكانية في هندسة النهر (أشكال القطاعات العرضية للمجاري المائية ووجود منعطفات في النهر).

٣ - الاختلافات الزمنية في العوامل المناخية (مثل سرعة الرياح والحرارة والضغط الجوي والمطر والثلج وضوء الشمس).

٤ - الاختلافات الزمنية والمكانية في الأكسجين المذاب المحيط في النهر.

٥ - أحوال النهر (مثل المدى المساحي للغطاء الجليدي ودرجات حرارة المياه تحت الغطاء الجليدي ومساحات الجليد الحرة).

٦ - هندسة مخارج التصريف (مثل شكل نقطة أو خط أو عدم نقطة) وسرعة التصريف من مخارج التصريف (أي السرعات العالية أو المنخفضة التي يمكن أن تؤثر على الخلط الأولي).

٧ - مدى حاجة الأكسجين للتمثيل الضوئي والتنفس والرواسب في البيئة

النهرية.

بعض النماذج شائعة الاستخدام لمحاكاة هذه العمليات تشمل (USEPA 1987a) QUAL2E و (USEPA 1988b) WASP4 و (USACE 1978) WQRRS. ولتقديرات أولية لتركيز الأكسجين المذاب DO في المجاري المائية الناتج من تصرفات الأكسجين الكيميائي الحيوي BOD خلال مصدر النقطة (مثل مخارج التصريف)، يمكن استخدام منهج بسيط نسبياً يقوم على صياغة سترير-فليبس. وفي حالة السريان المنتظم المستقر، تتوقع معادلة سترير-فليبس أن نقص في الأكسجين المذاب في مواقع مصب النهر من النقطة التي يكون عندها نقص الأكسجين المذاب DO وتركيزات الأكسجين الكيميائي الحيوي BOD معروفة. يعرف النقص في الأكسجين المذاب DO كما يلي:

$$D = C_s - DO_0 \quad (3, 121)$$

حيث إن:

D = النقص في الأكسجين المذاب (ملجم/ل).

C_s = تركيز تشبع الأكسجين المذاب (ملجم/ل) عند درجة حرارة الماء في

النهر وعلى ارتفاع من النهر عند الموقع موضع الاهتمام.

DO_0 = تركيز الأكسجين المذاب المحيط في مياه النهر (ملجم/ل).

معادلة سترير-فليبس للنقص في الأكسجين المذاب D عند نقطة مصب

النهر لموقع ما هي (USEPA 1985, 1987a; USACE 1987):

$$D = [K_L L_0 / (K_a - K_L)] [\exp(-K_L x / u) - \exp(-K_a x / u)] + D_0 \exp(-K_a x / u) \quad (3, 122)$$

حيث إن:

K_a = معامل إعادة التهوية (يوم⁻¹).

K_L = معامل تحلل الأكسجين الكيميائي الحيوي (يوم^{-١}).

D = النقص في الأكسجين المذاب (ملجم/ل).

x = مسافة مصب النهر (م).

u = سرعة السريان (م/يوم).

D_0 = النقص الأولي في الأكسجين المذاب عند $x = 0$ (ملجم/ل).

L_0 = مطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي الأولي عند $x = 0$ (ملجم/ل).

يفترض نموذج ستريتر- فليس الفروض التالية:

١- يمكن إهمال تأثير مطلب الأكسجين للتمثيل الضوئي والتنفس والرواسب. وعادةً هذه التأثيرات تكون صغيرة إذا لم يكن هناك نمو للطحالب في بداية النهر موضع الاهتمام.

٢- في بداية النهر موضع الاهتمام تكون التيارات المائية موازية لاتجاه السريان ولا يوجد أكسجين مذاب ولا أكسجين كيميائي حيوي بين هذه التيارات المائية المتوازية. وهذا هو الافتراض الأساسي لمعادلة ستريتر- فليس. وبمجرد افتراض حالة السريان المنتظم والمستقر، فإن هذا يمكن أن يكون الموقف الناتج. ويمكن أن يكون هذا محافظاً لأنه لا يتضمن تخفيف في تعزيز الأكسجين المذاب أو مطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي الناتج عن الخلط المستعرض (عن طريق التشتت) في بداية المجرى المائي بأكمله.

باستخدام المعادلة رقم (٣, ١٢٢) فإن تركيزات الأكسجين المذاب ومطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي في مواضع مختلفة في طرف النهر يمكن أن يتم تقديرها. وتخطيط تركيز الأكسجين المذاب (المحور- y) مقابل مسافات النهر يسمى منحنى هبوط الأكسجين. والقيمة الحرجة (الأقل) لتركيز الأكسجين المذاب أو أقصى قيمة للنقص في الأكسجين المذاب تعطى بالمعادلة:

$$D_{\max} = D_0 \exp(-K_a t_c) + \{K_L L_0 / (K_a - K_L)\} \{\exp(-K_L t_c) - \exp(-K_a t_c)\} \\ (١٣, ١٢٣) = [K_L L_0 / K_a] \exp(-K_L t_c)$$

حيث إن:

t_c = الزمن الحرج عند حدوث $D_{\max}$ ويعطى بالمعادلة:

$$(٣, ١٢٣) \quad t_c = [1/K_a - K_L] \ln \{ [K_a / K_L] - D_0 K_a (K_a - K_L) / (L_0 K_L^2) \}$$

والمسافة التي تحدث عندها $D_{\max}$ تعطى بالمعادلة:

$$(٣, ١٢٤) \quad X = u t_c$$

يتطلب تحليل الأكسجين المذاب أن يكون تركيز مطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي معلوماً عند x تساوي صفر. والقياس الأكثر استخداماً لمطلب الأكسجين المذاب هو مطلب الأكسجين المذاب خمسة أيام (BOD_5)، والذي يعرف بأنه مطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي الذي تم إجهاده (أكسدته) بعد t يساوي خمسة أيام من الإجهاد/ الأكسدة، أي أن:

$$(٣, ١٢٥) \quad BOD_5 = BOD_0 [1 - \exp(-K_L t)]$$

حيث إن:

BOD_0 = مطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي الأولي (ملجم/ل) عند $t = 0$.

t = الزمن بالأيام الذي يقدر بخمسة أيام لتقدير BOD_5 .

قيم K_L النموذجية عند درجة حرارة 20° مئوية من حوالي 0.2 إلى 0.3 يوم $^{-1}$ ، وتعتبر قيمة 0.23 يوم $^{-1}$ هي شائعة الاستخدام. واختلاف قيمها بالنسبة إلى درجة الحرارة يمكن أن تقدر عن طريق المعادلة:

$$(٣, ١٢٦) \quad K_L (at T ^\circ C) = K_L (at 20 ^\circ C) \times (1.135)^{T-20}$$

يمكن أن يتم تقدير معامل إعادة التهوية عن طريق معادلة أوكونور (USEPA 1985):

$$(٣, ١٢٧) \quad K_a(\text{at } 20^\circ \text{C}) = 3.932 u^{0.5} / Y^{1.5}$$

حيث إن:

$$u = \text{السرعة (م/ث)}.$$

$$Y = \text{عمق الماء (م)}.$$

ويمكن تقدير القيم عند درجات حرارة أخرى عن طريق المعادلة:

$$(٣, ١٢٨) \quad K_a(\text{at } T^\circ \text{C}) = K_a(\text{at } 20^\circ \text{C}) \times (1.024)^{T-20}$$

ويمكن أن الحصول على قيم تركيز تشبع الأكسجين المذاب من جداول خاصة (USEPA 1985) أو تقرب عن طريق المعادلة:

$$C_s \text{ (عند درجة حرارة } T^\circ \text{ مئوية وعلى ارتفاع صفر م) يساوي}$$

$$(٣, ١٢٩) \quad C_s = 14.065 - 0.41022 T + 0.00791 T^2 - 0.00007774 T^3$$

ويمكن تقدير القيم عند ارتفاعات E غير الصفر عن طريق المعادلة:

$$C_s \text{ (عند ارتفاع E م)} = C_s \text{ (عند ارتفاع صفر متر)} \times (1 - 0.0011656 E)$$

$$(٣, ١٣٠) \quad C_s(\text{at } E \text{ m}) = C_s(\text{at } 0 \text{ m}) \times [1 - 0.00011656 E]$$

والقيم المقدرة بالمعادلتين رقم (٣, ١٢٧) ورقم (٣, ١٢٨) تكون لغطاء جليدي

قدره صفر٪. ويمكن استخدام عامل مضاعفة قدره ٠,٥ لتقدير قيم ١٠٠٪ غطاء

جليدي. وقيم النسب الأخرى من الغطاء الجليدي يمكن أن تستنتج عن طريق

الاستكمال الخطي. وقيم C_s النموذجية عند الضغط الجوي وعند درجة حرارة من

صفر إلى ٣٥ درجة مئوية موضحة في الجدول رقم (٣, ٣١) (USEPA 1987a).

إن تصرف الأكسجين الكيميائي الحيوي من مخرج التصريف يخفف بالتأفق

والتشتت في مياه النهر. وعادة لا تحقق معايير جودة المياه ضمن منطقة خلط صغيرة

نسبياً في الجوار القريب من مخرج التصريف. وطبقاً لـ (USEPA 1991c) يمكن أن

يوجد حتى نوعان من مناطق الخلط القابلة للتطبيق على معايير الحياة المائية: المزمدة والحادة. وفي المنطقة التي تحيط مباشرة بمخرج التصريف لا يتم تحقيق أي من المعيار المزمّن ولا الحاد. ويجب أن يحقق المعيار الحاد عند الحافة الداخلية لمنطقة الخلط. ويجب تحقيق المعيار المزمّن عند حافة منطقة الخلط الثانية. ولا تحتوى مناطق الخلط التي تؤخذ بشكل شائع على أكثر من ٢٥٪ من مساحة القطاع العرضي يجب ألا يمتد أكثر من ٥٠٪ من عرض النهر.

الجدول رقم (٣,٣١). ذوبان الأكسجين في الماء عند الضغط الجوي.

درجة الحرارة T (°م)	C _s (ملجم/ل)
٠	١٤,٦
٥	١٢,٨
١٠	١١,٣
١٥	١٠,٢
٢٠	٩,٢
٢٥	٨,٤
٣٠	٧,٦
٣٥	٧,١

المصدر: (USEPA (1985).

مثال رقم (٣,١٥): معاملات معدل مطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي المسجلة عند درجة حرارة ٢٠° مئوية هي ٠,٢٢١ يوم^{-١}، وعند درجة حرارة ٣° مئوية هي ٠,٢٢٦ يوم^{-١}. معامل إعادة التهوية للمجرى المائي هو ٣,٥٣ يوم^{-١} عند درجة

حرارة ٢٠° مئوية. احسب القيم عند درجة حرارة ٢° مئوية مع فرض أن الغطاء الجليدي في المجرى المائي يساوي ٨١٪.
الحل:

اختلاف معامل معدل تحلل مطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي مع درجة الحرارة يعطى بالمعادلة رقم (٣، ١٢٦):

$$K_L (\text{at } 3^\circ \text{C}) = K_L (\text{at } 20^\circ \text{C}) (A)^{3-20}$$

إذن:

$$0.026 = 0.221 (A)^{-17}$$

وهذا ينتج:

$$A = 1.134$$

إذن معامل معدل تحلل مطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي BOD عند درجة حرارة ٢° مئوية يساوي:

$$K_L (\text{at } 2^\circ \text{C}) = 0.221 \times (1.134)^{2-20} = 0.02298 / \text{day}$$

معامل إعادة التهوية عند درجة حرارة ٢° مئوية (المعادلة رقم (٣، ١٢٨)) يساوي:

$$K_a (\text{at } 2^\circ \text{C}) = 3.53 \times (1.024)^{2-20} = 2.30 / \text{day}$$

معاملات المضاعفة الموصى بها لضبط K_a في حالات صفر٪ و ١٠٠٪ من غطاء جليدي هي ١،٠ و ٠،٠٥، على الترتيب (USEPA 1987a). وعن طريق الاستكمال الخطي فإن عامل المضاعفة في حالة ٨١٪ من الغطاء الجليدي يقدر بمقدار ٠،٢٣، وبهذا فإن قيمة K_a (عند درجة حرارة ٢° مئوية وغطاء جليدي ٨١٪) تساوي:

$$K_a = 0.23 \times 2.30 = 0.53 / \text{day}$$

مثال رقم (٣، ١٦): في مجرى مائي يتم تزويد ٣٣,٨٥ ملجم/ل من مطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي BOD عند نقطة يكون فيها النقص الأولي في الأكسجين المذاب D_0 يساوي ٢,٠ ملجم/ل. وبسبب مراقبات مصب النهر للمجرى المائي فإن سرعة السريان بطيئة نسبياً وحوالي ٢٥٩٢ م/يوم. احسب النقص في الأكسجين المذاب عند مسافة ١٢٠٠ م من النقطة التي يتم عندها تزويد مطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي. ومعامل إعادة التهوية (K_a) ومعامل تحلل مطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي (K_L) يساويان ٠,٠٩٣٣ يوم^{-١} و ٠,٠١٧٨٧ يوم^{-١} على الترتيب، واحسب أيضاً الزمن الحرج والنقص الحرج في الأكسجين المذاب. بفرض أن تأثير التشتت المستعرض على تخفيف مطلب الأكسجين الكيميائي الحيوي يمكن إهماله.

الحل:

استخدم المعادلة رقم (٣، ١٢٢)، مع الأخذ في الاعتبار إن:

$$K_a = 0.0933 \text{ day}^{-1}, \quad K_L = 0.01787 \text{ day}^{-1}, \quad D_0 = 2.0 \text{ mg/l}$$

$$u = 2592 \text{ m/day}, \quad x = 1200 \text{ m}, \quad L_0 = 33.85 \text{ mg/l}$$

$$K_a x / u = 0.0933 \times 1200 / 2592 = 0.0432$$

$$K_L x / u = 0.01787 \times 1200 / 2592 = 0.00827$$

النقص في الأكسجين المذاب (عند x تساوي ١٢٠٠ م):

$$D = 2.0 \times [\exp(-0.0432)] + \{33.85 \times 0.01787 / (0.0933 - 0.01787)\} \{ \exp(-0.00827) - \exp(-0.0432) \} = 2 \times 0.9577 + 8.019$$

$$[0.9918 - 0.9577] = 2.19 \text{ mg/l}$$

وباستخدام المعادلة رقم (٣، ١٢٣):

$$t_c = \{1 / (0.0933 - 0.01787)\} \ln \left[\left(\frac{0.0933}{0.01787} \right) \{1 - 2 \times \right.$$

$$\left. \frac{(0.0933 - 0.01787)}{(0.01787 \times 33.85)} \} \right] =$$

$$13.257 \ln(3.9189) = 18.1 \text{ days}$$

باستخدام المعادلة رقم (١٢٣، ٣):

$$D_{\max} = 2.0 \times \exp(-0.0933 \times 18.1) + \{33.85 \times 0.01787 / (0.0933 - 0.01787)\} \\ [\exp(-0.01787 \times 18.1) - \exp(-0.0933 \times 18.1)] = \\ 0.369 + 8.019(0.7236 - 0.1846) = 4.69 \text{ mg/l}$$

السريان في الأنابيب

Pipe Flow

السريان خلال الأنابيب أو الأنفاق يمكن أن يكون سريان تحت ضغط أو سريان في قناة مفتوحة. ويمكن تحليل سريان القناة المفتوحة باستخدام الطرق الموضحة مسبقاً. وسريان الضغط خلال الأنابيب يمكن أن يكون طبقياً إذا كان رقم رينولدز $R_{ed} < 2000$ (باستخدام قطر الأنبوب) $R_{ed} \geq 2000$ ، وانتقالي إذا كان $2000 < R_{ed} < 4000$ ومضطرباً إذا كان $R_{ed} \geq 4000$. وباستخدام قطر الأنبوب:

$$R_{ed} = V d / \nu \quad (3, 131)$$

حيث إن:

$$d = \text{قطر الأنبوب.}$$

وفي حالة سريان أنبوب ممتلئ كلياً فإن $R = d/4$. إذن $R_{ed} = 4 R$ ، حيث R رقم رينولدز المحسوب باستخدام نصف القطر الهيدروليكي R في مكان d .

السريان الطبقي في الأنابيب Laminar Flow in Pipes

يظهر السريان الطبقي عادة في الموائع اللزجة (مثل الزيت الخام، الجلسرين، بعض زيوت المحركات) ويحدث خلال السرعات المنخفضة في الأنابيب. ويوضح توزيع السرعة خلال المقطع العرضي للأنبوب ذو السريان الطبقي من معادلة هاجن-بوسيلي:

$$u = [(p_1 - p_2) / (4 \mu L)] [(d^2 / 4) - y^2] \quad (3, 132)$$

حيث إن:

 y = المسافة من مركز الأنبوب (م). u = السرعة (م/ث) عند y . p_1, p_2 = ضاغط الضغط عند نقاط بداية ونهاية السريان (كجم/م^٢). L = المسافة بين النقطتين (م). μ = اللزوجة الديناميكية (كجم.ث/م^٢).

السرعة القصوى في القطاع العرضي تحدث عند المنتصف وتعطى بالمعادلة:

$$u_{\max} = [(p_1 - p_2) d^2 / (16 \mu L)] \quad (٣, ١٣٣)$$

ومتوسط السرعة عبر القطاع العرضي:

$$V = [(p_1 - p_2) d^2 / (32 \mu L)] \quad (٣, ١٣٤)$$

مثال رقم (٣, ١٧): احسب الضاغط والقدرة اللازمة لنقل الزيت الخام عبر مسافة

١ كم بمعدل تصرف ١٥٠٠ ل/ث خلال خط أنابيب بقطر ١٠ سم، ومعامل

اللزوجة الديناميكية μ يساوي ٠,١٢ بواز، والكثافة ρ تساوي ٨٦٠ كجم/م^٣.وأدنى درجة حرارة متوقعة في الجوار القريب حوالي ٧° مئوية. احسب أيضاً R_{ed} .

الحل:

$$1500 \text{ l/h} = 0.0004167 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$V = 1.5 \times 4 / (3,600 \times \pi \times 0.10^2) = 0.053 \text{ m/s}$$

$$\mu = 0.12 \text{ poise} = 0.12 \text{ dyne} \cdot \text{s} / \text{cm}^2 = 0.12 \text{ gm} / \text{cm} \cdot \text{s} = 0.12 \times 1.020$$

$$\times 10^{-3} \text{ gm} \cdot \text{s} / \text{cm}^2 = 0.1224 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2 = 0.012 \text{ kg} / \text{m} \cdot \text{s}$$

$$v \text{ (m}^2/\text{s)} = \mu \text{ (kg/m} \cdot \text{s)} / \rho \text{ (kg/m}^3) = 0.012 / 860 = 0.000014 \text{ m}^2/\text{s}$$

باستخدام المعادلة رقم (٣, ١٣٤):

$$p_1 - p_2 = 32 \mu (\text{kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2) V L / d^2 = 32 \times 0.001224 \times 0.053 \times 1000 / (0.10^2) \\ = 207.6 \text{ kg} / \text{m}^2$$

الضغوط المطلوب:

$$207.6 / 860 = 0.24 \text{ m}$$

القدرة المطلوبة:

$$Q (p_1 - p_2) = 0.00041673 \times 207.6 = 0.0865 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}$$

$$R_{ed} = V d \rho / \mu = 0.053 \times 0.10 \times 860 / 0.012 = 380$$

وحيث إن القيمة أقل من ٢٠٠٠ إذن السريان طبقياً.

Turbulent Flow in Pipes السريان المضطرب في الأنابيب

السريان المستقر في الموائع غير القابلة للانضغاط في الأنابيب يكون محكوماً

بمعادلة برنولي:

$$(٣, ١٣٥) \quad p_1 / \gamma + V_1^2 / 2g = p_2 / \gamma + V_2^2 / 2g + z_2 + h_L$$

حيث إن:

$$p_1 = \text{الضغط (كجم/م}^2\text{) عند النقطة ١.}$$

$$p_2 = \text{الضغط عند النقطة ٢.}$$

$$V_1, V_2 = \text{السرعات (م/ث) عند النقطتين ١ و ٢ على الترتيب.}$$

$$z_1, z_2 = \text{المنسوب للنقطتين ١ و ٢ على الترتيب.}$$

$$h_L = \text{الفاقد في الضغوط بسبب الاحتكاك والفواقد الثانوية الأخرى بين}$$

$$\text{النقطتين ١ و ٢.}$$

وإذا كان الضغط في المعادلة رقم (٣, ١٣٤) معبراً عنه بارتفاع المائع (م) فإن:

$$(٣, ١٣٦) \quad h = (p_1 - p_2) / \gamma = 32 \mu V L / (\rho g d^2) = (64 / R_{ed}) [LV^2 / 2 g d]$$

وبوضع $f = 64/R_{\text{هـ}}$ معامل خشونة الأنبوبة فإن المعادلة رقم (٣، ١٣٦)

تصبح معادلة دارسي- ويسباك للفاقد نتيجة الاحتكاك خلال الأنابيب:

$$h = f L V^2 / (2 g d) \quad (٣، ١٣٧)$$

ويمكن الحصول على قيم f من منحنى مودي المتاح في معظم المراجع (مثل

معادلات شيزي أو مانتيق أو هازن-وليم (المعادلات رقم (٣، ٣) ورقم (٣، ٤) ورقم

(٣، ٦)) إذا كان يمكن تقدير المعاملات النسبية لهم. ومعامل الخشونة f يمكن أن

يقدر بدون معرفة قطر الأنبوب إذا كان معامل شيزي C معلوماً:

$$f = 8 g / C^2 \quad (٣، ١٣٨)$$

ولتقدير f من n يجب أن يكون قطر الأنبوب معلوماً، ومن C_H فإن كلاً من القطر والميل S يجب أن يكونا معلومين:

$$f = 124.85 n^2 / (d^{1/3}) \quad (٣، ١٣٩)$$

$$f = 156.06 / (C_H^2 d^{0.26} S^{0.08}) \quad (٣، ١٤٠)$$

قيم n ، C_H النموذجية للأنابيب الأكثر شيوعاً في الاستخدام موضحة في

الجدول رقم (٣، ٣٢) والجدول رقم (٣، ٣٢) ب (Brater et al. 1996; ASCE 1976).

وكبدل لاستخدام منحنى مودي فإن الفاقد نتيجة الاحتكاك أو معدل

التصرف أو قطر الأنبوب يمكن أن يقدر بوضوح إذا كان ارتفاع خشونة جدار

الأنبوب e واللزوجة الكينماتيكية للسائل ν والمتغيران الاثنان الآخران أو المتغيرات

الثلاثة الأخرى معلومة (Swamee and Jain 1976):

$$h_L = [1.07 Q^2 L / (g D^5)] \left[\ln \left\{ (e / (3.7 D)) + 4.62 (\nu D / Q)^{0.9} \right\} \right]^{-2} \quad (٣، ١٤١)$$

هذه المعادلة صالحة في حالة $10^{-2} < e/D < 10^{-6}$ و $3 \times 10^8 < R_{ed} < 3000$.
لاحظ أن e و D يجب أن تكونا بنفس الوحدات.

الجدول رقم (١٣،٣٢). القيم النموذجية لمعامل مانتق n .

نوع الأنبوب	معامل مانتق n
أسبوستس - أسمنت	٠,٠١١ - ٠,٠١٥
حديد مسبوك نظيف غير مغطى	٠,٠١٣ - ٠,٠١٥
حديد مسبوك نظيف مغطى	٠,٠١٢ - ٠,٠١٤
حديد مجلفن	٠,٠١٥ - ٠,٠١٧
معدن موج	٠,٠٢٣ - ٠,٠٢٩
معدن موج ، صفيحة معدنية بنائية	٠,٠٣٠ - ٠,٠٣٣
خرسانة خشنة التكوين	٠,٠١٥ - ٠,٠١٧
خرسانة فولاذية التكوين	٠,٠١٢ - ٠,٠١٤
طين مزيج	٠,٠١١ - ٠,٠١٧
بلاط الطين	٠,٠١٢ - ٠,٠١٤
الأنفاق الصخرية غير المبطنة	٠,٠٣٨ - ٠,٠٤١
الفلاذ بالطلاء الزجاجي	٠,٠٠٩ - ٠,٠١٠
النحاس الأصفر أو الزجاج	٠,٠٠٩ - ٠,٠١٣
البلاستيك (الناعم)	٠,٠١١ - ٠,٠١٥
كلوريد البولي فينيل (البلاستيك الخشن)	٠,٠٠٩ - ٠,٠١٠

المصدر: (1976) ASCE ; (1996) Brater et al.

الجدول (٣,٣٢) ب). القيم النموذجية لمعامل هازن-وليم C_H

نوع الأنبوب	معامل هازن-وليم C_H
كلوريد البولي فينيل، الزجاج، الفولاذ المطلي	١٣٠ - ١٥٠
أنبوب الفولاذ المبرشم	١١٠ - ١٠٠
أنبوب الحديد المسبوك	١٠٠ - ٩٥
أنبوب الخرسانة الناعمة	١٤٠ - ١٢٠
الأنبوب الخشن (أنبوب الخرسانة الخشن)	٨٠ - ٦٠

المصدر: (Brater et al. (1996) ; ASCE (1976).

$$(٣,١٤٢) \quad Q = -0.965 (g D^5 h_L / L)^{0.5} \ln \left[e / (3.7 D) + \{ 3.17 v^2 L / (g D^3 h_L) \}^{0.5} \right]$$

هذه المعادلة صالحة في حالة $R_{ed} > 2000$.

$$(٣,١٤٣) \quad D = 0.66 \left[e^{1.25} (L Q / g h_L)^{4.75} + v Q^{9.4} \{ L / (g h_L) \}^{5.2} \right]^{0.04}$$

هذه المعادلة صالحة في حالة $10^{-6} < e/D < 10^{-2}$ و $5000 < R_{ed} < 3 \times 10^8$.

والمعادلات من رقم (٣.١٤١) إلى رقم (٣.١٤٣) تكون مفيدة على وجه

خاص في تطبيقات الحاسب الآلي. وقيم e النموذجية موضحة في الجدول رقم

(٣.٣٣) (Brater et al. 1996; ASCE 1976; Chow 1959; Streeter 1971).

بالإضافة إلى الاحتكاك هناك فواقد ثانوية في الأنابيب عند المدخل والمخرج

والضيق والاتساع والانحناءات والبوابات والصمامات. وهذه الفواقد يعبر عنها

كالتالي:

$$(٣,١٤٤) \quad h_L = k V^2 / 2 g$$

حيث إن:

$$h_L = \text{فاقد الضاغط.}$$

V = سرعة السريان في الأنبوب عند أو بعد موقع تلك المعالم النسبية مباشرة.

k = معامل الفاقد الثانوي.

وقيم k للمعاملات المختلفة يمكن أن توجد في المراجع القياسية (مثل Streeter

1996; Brater *et al.* 1996; Potter and Wiggert 1991; (1971). وعند اتساع أو ضيق الأنبوب

فإن V تتعلق بالأنبوب الأصغر.

أحياناً يكون السريان خلال الضيق محدوداً بالتكهف الذي يحدث عندما يصل

الضغط المطلق عند الضيق إلى ضغط البخار المشبع للسائل. وقد يحدث التكهف أيضاً

عند النقطة العالية في السيفون. وضغط البخار المشبع للسائل عند درجات الحرارة

المختارة موضح في الجدول رقم (٣,٣٤) (Streeter 1971).

الجدول رقم (٣,٣٣). القيم النموذجية لخشونة جدار الأنبوب e .

نوع مادة الأنبوب	e (مم)
الأنابيب المسحوبة	٠,٠٠١٥
الفولاذ المطلي بالزجاج	٠,٠٠٥
الحديد المطروق	٠,٠٦ - ٢,٤
الحديد المجلفن	٠,١٥ - ٤,٦
الحديد المسبوك	٠,١٢ - ٣,٠
المعادن المموجة	٠,٣٠ - ٦٠
الفولاذ المبرشم تماماً	٠,٣٠ - ٩,٠
الخرسانة	٠,٣٠ - ٣,٠

المصدر: (Streeter 1971); ASCE (1976); Brater *et al.* (1996).

الجدول رقم (٣,٣٤). ضغط بخار الماء المشبع.

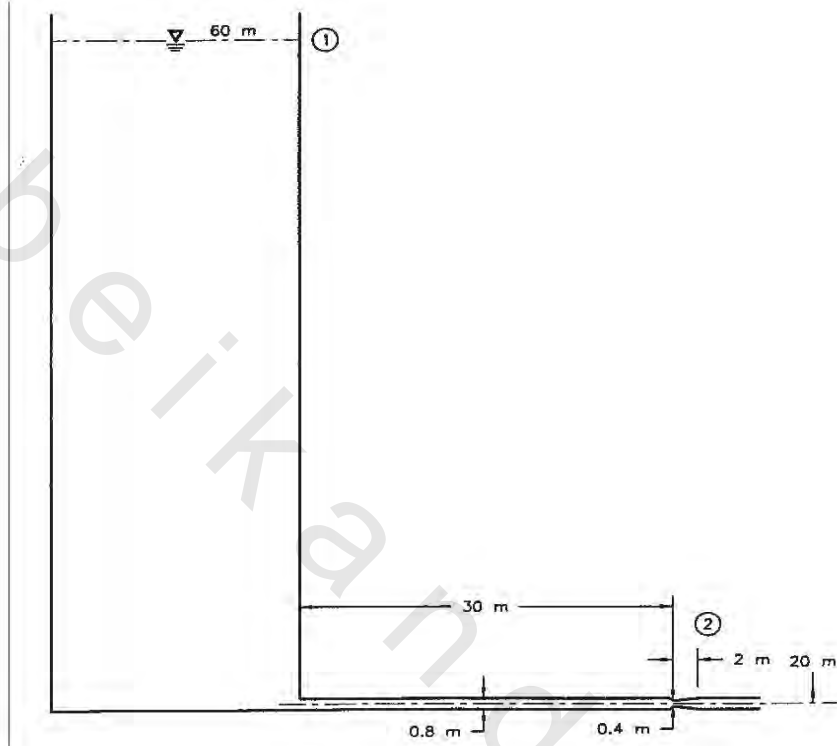
درجة الحرارة (°م)	ضغط بخار الماء المشبع (م)
٠	٠,٠٦
١٠	٠,١٢٥
٢١	٠,٢٥٦
٣٢	٠,٤٩
٦٠	٢,٠٣
١٠٠	١٠,٣٣

المصدر: (Streeter (1971).

مثال رقم (٣, ١٨): احسب التصرف الحرج للأمن للماء عند درجة حرارة ١٦° مئوية والذي يمكن أن يبدأ عنده التكهف عند موقع الصمام في مخرج المستوى المنخفض من الخزان الموضح في الشكل رقم (٣, ٩). بفرض أن f تساوي ٠,٠١٥، ومعامل الفاقد عند الضيق k_v يساوي ٠,٣٠، ومعامل الفاقد عند الاتساع k_e يساوي ٠,٣٥، والضغط الجوي p_a يساوي ١٠,٣٣ م. قارن التصرف الأمن للنظام عندما يتم تثبيت قطر الأنبوب ٠,٨ م بدون وجود ضيق واتساع. بفرض أن ضغط بخار الماء عند p_v / γ عند درجة حرارة ١٦° مئوية يساوي ٠,١٨ م. لاحظ أن كلا من k_e و k_v مسجلة بالنسبة إلى السرعة في الأنبوب الأصغر.

الحل:

لتجنب التكهف فإن الضغط عند الضيق حيث يوجد الصمام يجب أن يظل أعلى من ضغط بخار الماء. والنقطة الأولى تقع عند سطح ماء الخزان والنقطة الثانية تقع عند مركز فتحة مخرج الأنبوب.



الشكل رقم (٣,٩). الرسم التخطيطي لمخرج المستوى المنخفض.

وعن طريق معادلة الاستمرار بين النقطتين ١ و ٢:

$$V_c \times (\pi/4)(0.4^2) = V \times (\pi/4)(0.8^2)$$

وبالتالي

$$V_c = 4V$$

حيث إن:

V_c = السرعة خلال المقطع الضيق.

V = السرعة خلال قطاع الأنبوب المنتظم.

وعن طريق معادلة برنولي بين النقطتين ١ و ٢:

$$z_1 + p_a / \gamma = z_2 + p_v / \gamma + f L V^2 / 2 g d + 0.30 V_c^2 / 2g + V_c^2 / 2g$$

$$60 + 10.33 = 20 + 0.18 + (0.015 \times 30 \times V^2) / (2g \times 0.8) + 0.30 \times 16V^2 / 2g$$

$$+ 16V^2 / 2g$$

إذن:

$$V = 6.76 \text{ m/s}$$

و:

$$Q = 6.79 \times (\pi/4) (0.64) = 3.411 \text{ m}^3 / \text{s}$$

أو:

$$Q = 3411 \text{ l/s}$$

إذا لم يكن هناك ضيق أو اتساع يمكن أن تؤخذ النقطة ٢ عند فتحة مخرج الأنبوب.

الآن بتطبيق معادلة برنولي بين النقطتين ١ و ٢:

$$z_1 + p_a / \gamma = z_2 + p_a / \gamma + f L V^2 / 2 g d + V^2 / 2g$$

$$60 + 10.33 = 20 + 10.33 + 0.015 \times 32 V^2 / (2 g \times 0.8) + V^2 / 2g$$

إذا:

$$40 = 1.60 V^2 / 2g$$

و:

$$V = 22.15 \text{ m/s}$$

و:

$$Q = 22.15 \times (\pi/4) \times 0.64 = 11.13 \text{ m}^3 / \text{s}$$

أو:

$$Q = 11130 \text{ l/s}$$

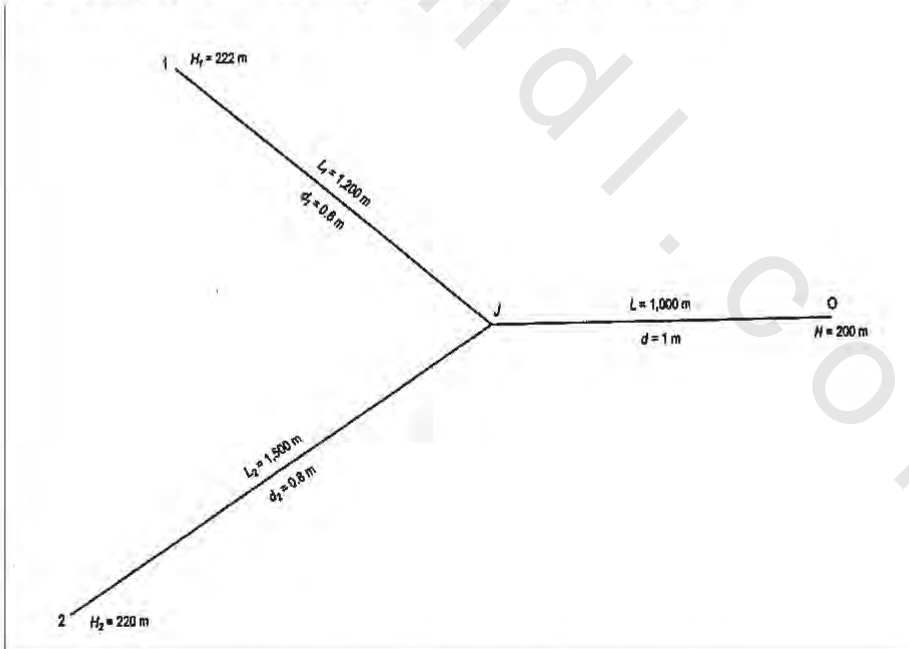
مثال رقم (٣, ١٩): احسب أحجام الأفرع الجديدة (بفرض أربعة أشخاص في الموقع) التي يمكن أن تدعم بخطوط إمداد الماء الموضحة في الشكل رقم (٣, ١٠). يفترض أن يتم إمداد الماء عند ضواغط من ٢٢٢ و ٢٢٠ م على الترتيب. تصرف الماء المتاح ١, ١١٧٨ ل/ث. متوسط احتياجات الماء في المنطقة ٦٥٠ ل/شخص/يوم. احسب أيضاً قدرة الضخ اللازمة عند الاتصال بمصدر الماء حيث يكون الضاغط المتاح بدون الضخ ٢٠٠ م. رغم أنه سيتم تثبيت بعض الصمامات في النظام لهذا التحليل التمهيدي.

الحل:

$$H_1 = 222 \text{ m} , d_1 = 0.6 \text{ m} , L_1 = 1200 \text{ m} , f_1 = 0.018$$

$$H_2 = 220 \text{ m} , d_2 = 0.8 \text{ m} , L_2 = 1500 \text{ m} , f_2 = 0.015$$

$$H = 200 \text{ m} , d = 1.0 \text{ m} , L = 1000 \text{ m} , f = 0.012$$



الشكل رقم (٣, ١٠). الرسم التخطيطي لأنابيب إمداد المياه.

بتطبيق معادلة الاستمرارية:

$$(i) \quad V_1 (\pi/4) d_1^2 + V_2 (\pi/4) d_2^2 = V (\pi/4) d^2 = Q = 1.1781$$

$$V = 1.1781 / [(\pi/4) 1.0^2] = 1.5 \text{ m/s}$$

بفرض أنه مع الضخ فإن الضاغط عند الاتصال بالمصدر عند O يكون H_o . وبتطبيق

معادلة برنولي بين النقطتان O و ١ والنقطتان O و ٢ فإن:

$$(ii) \quad H_o = f L V^2 / (2 g d) + f_1 L_1 V_1^2 / (2 g d) + H_1$$

$$(iii) \quad H_o = f L V^2 / (2 g d) + f_2 L_2 V_2^2 / (2 g d) + H_2$$

بمساواة المعادلتين (ii) و (iii):

$$\begin{aligned} 0.018 \times 1200 \times V_1^2 / (2g \times 0.6) + 222 \\ = 0.015 \times 1500 \times V_2^2 / (2g \times 0.6) + 220 \end{aligned}$$

أو:

$$(iv) \quad 1.83486 \times V_1^2 + 2 = 1.43349 V_2^2$$

والمعادلة (i) تعطي:

$$(v) \quad 0.2827 V_1 + 0.50265 V_2 = 1.1781$$

من المعادلة (v):

$$V_1 = 4.1673 - 1.7780 V_2$$

وبالتعويض في المعادلة (iv):

$$1.43349 V_2^2 - 2 - 1.83486 [3.1613 V_2^2 - 14.8189 V_2 + 17.36639] = 0$$

أو:

$$4.3671 V_2^2 - 27.1906 V_2 + 33.86489 = 0$$

وهذا يعطي:

$$V_2 = 1.7214 \text{ m/s} \quad \text{أو} \quad V_2 = 4.50 \text{ m/s}$$

ومن المعادلة (v) يمكن ملاحظة أنه عند قيمة $V_2 = 4.50 \text{ m/s}$ سوف تؤدي إلى قيمة سالبة لـ V_1 . إذن:

$$V_2 = 1.7214 \text{ m/s}$$

وبالتالي:

$$V_1 = 4.1673 - 1.7780 \times 1.7214 = 1.1067 \text{ m/s}$$

$$Q_1 = 1.1067 \times (\pi/4) \times 0.36 = 0.3129 \text{ m}^3/\text{s}$$

و

$$Q_2 = 1.7214 \times (\pi/4) \times 0.64 = 0.8652 \text{ m}^3/\text{s}$$

إمداد الماء اللازم لكل منزل يساوي:

$$650 \times 4 = 2600 \text{ l/day} = 0.00003 \text{ m}^3/\text{s}$$

أقصى عدد منازل في الفرع ١:

$$0.3129 / 0.00003 = 10430$$

أقصى عدد منازل في الفرع ٢:

$$0.8652 / 0.00003 = 28840$$

الضاغط اللازم عند الاتصال مع المصدر عند النقطة O:

$$H_o = 0.012 \times 1,000 \times 1.5^2 / (2g \times 1.0) + 0.018 \times 1,200 \times (1.1067)^2 / (2g \times 0.6) + 222 = 1.376 + 2.247 + 222 = 225.623 \text{ m}$$

ضاغط الضخ اللازم عند O:

$$225.623 - 200 = 25.623 \text{ m}$$

القدرة اللازمة:

$$\gamma Q H = 1000 \times 1.1781 \times 25.623 = 30186 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

باستخدام كفاءة نظام كلية حوالي ٠,٨ فربما يكون من اللازم نظام ضخ ذو قدرة ٣٨٠٠٠ كجم.م/ث.

ولتحليل شبكات عمل الأنابيب التي تتضمن أنابيب ووصلات عديدة من المفضل استخدام برامج الحاسب المتاحة (مثل Streeter 1971; Potter and Wiggert 1992; Brater *et al.* 1996; KYPIPE2 and KYPIPE3 1992).

هيدروليكا الرذاذات Hydraulics of Diffusers

يتم تصرف الماء الفائض في بعض الأحيان إلى الموقع المستقبل للماء خلال أنابيب متعددة الفتحات (الرذاذات). تتكون الرذاذة من أنبوب تمتد تقريباً عمودياً على الشاطئ وتتصل بأنبوبة أخرى (رذاذة) يمكن أن تكون موازية أو عمودية على التيار. لأنبوبة الرذاذة كثير من المخارج على مسافات متقاربة (فتحات) ملحقة بها. وإذا كان الموقع المستقبل للماء منتظماً (ليس طبقياً) وثابت (مثل بحيرة أو محيط) فإن التقدير التمهيدي للتخفيف S_a في المياه العميقة يمكن الحصول عليه من (Fischer *et al.* 1979):

$$S_a = C_0 / C = 0.38 (g')^{1/3} y / q^{2/3} \quad (٣,١٤٥)$$

حيث إن:

y = عمق الماء فوق المصدر.

S_a و C = التخفيف المركزي والتركيز على الترتيب على عمق y .

C_0 = التركيز المبدئي عند فتحة الرذاذة (أي عند $y = 0$).

q = تصرف الماء الفائض لكل وحدة طول من الرذاذة (م^٣/ث).

$g' = g \Delta \rho / \rho$.

ρ = كثافة الماء الفائض.

$$p_0 - p = \Delta p$$

$$p_0 = \text{كثافة الماء المستقبل.}$$

يمكن ألا تقدم المعادلة رقم (٣، ١٤٥) تقديرات مناسبة بسبب تأثير الحصر الناتج عن مجال الرذاذ الذي يمكن أن يتواجد بالقرب من قمة الريشة المرتفعة. والعامل التقريبي للسلامة يمكن أن يستخدم في التصميم. والمعادلة التقريبية لتقدير متوسط تخفيف الرذاذ الموجهة عمودياً على التيار العميق المنتظم بما فيها تأثير الحصر هي (Fischer et al. 1979):

$$(٣، ١٤٦) \quad S_n = S_a / [1 + \{(Q_0 S_a) / (u L y_m)\}]$$

حيث إن:

$$S_n = \text{متوسط التخفيف في التيار العمودي الذي يشمل تأثير الحصر.}$$

$$L = \text{طول أنبوب الرذاذ.}$$

$$u = \text{سرعة التيار المحيط العمودي على الرذاذ.}$$

$$y_m = \text{أقصى ارتفاع للماء الفائض المرتفع.}$$

$$Q_0 = \text{تصرف الماء الفائض الكلي خلال الرذاذ.}$$

متوسط التخفيف S_p لرذاذ موجهة موازية لتيار عميق منتظم يشمل تأثير الحصر يمكن أن تقرب عن طريق (Fischer et al. 1979):

$$(٢، ١٤٧) \quad S_p = 0.38 (g')^{1/3} y_m / q^{2/3}$$

التحليل الهيدروليكي للرذاذ يتضمن استخدام معادلة دارسي-ويسباك

(المعادلة رقم (٣، ١٣٧)) ومعادلة تصرف الفوهة:

$$(٣، ١٤٨) \quad Q_0 = C_d (\pi d^2 / 4) \sqrt{(2 g H)}$$

حيث إن:

$$C_d = \text{معامل تصرف الفوهة.}$$

$$H = \text{الضغوط فوق مركز الفوهة.}$$

$$d = \text{قطر الفوهة.}$$

يختلف معامل التصرف من حوالي ٠,٥٩ إلى ٠,٩٨ اعتماداً على شكل المدخل.

خطوات الحسابات هي كالتالي:

١ - احسب التخفيف اللازم S_n أو S_p عند عمق محدد y مع توجيه الرذاذة بالنسبة إلى التيار المحيط.

٢ - إذا كانت الرذاذة موجهة عمودياً على التيار المحيط افترض أن S_a من ١,٢ إلى ١,٥ من قيمة S_n واحسب q باستخدام المعادلة رقم (٣,١٤٦). وإذا كانت الرذاذة موجهة موازياً للتيار المحيط احسب q باستخدام المعادلة رقم (٣,١٤٧) مع القيم المطلوبة لـ S_p .

٣ - بمعرفة تصرف الماء الفائض Q_0 احسب طول الرذاذة التمهيدي $L = Q_0 / q$.

٤ - بمعرفة u, L, y, S_a, Q_0 يمكن استخدام المعادلة رقم (٣,١٤٦) للتحقق من أن S_n المطلوبة قد تحققت. وإلا عدل قيمة L . وهذه الخطوة ليست مطلوبة إذا كانت الرذاذة موجهة موازياً للتيار المحيط.

٥ - عن طريق الحكم احسب المسافات المناسبة بين الفتحات $(L_1, L_2, L_3, \dots, L_n)$ من ١ إلى ١٠ م تقريباً اعتماداً على الطول الكلي لأنبوبة الرذاذة وعدد الفتحات n .

٦- بفرض أن متوسط سرعة السريان من حوالي ١,٢٥ إلى ١,٨ م/ث احسب قطر أنبوب الرذاذة D .

٧- احسب أقطار الفتحات التمهيدية ($d_1, d_2, d_3, \dots, d_n$) بين ٥ إلى ٢٤ سم تقريباً ومجموع مساحات كل الفتحات يجب أن تكون بين ٣/١ إلى ٣/٢ من مساحة القطاع العرضي لأنبوب الرذاذة.

٨- رقم الفتحة الأخيرة المجاورة للطرف الهامد من أنبوب الرذاذة على أنها الفتحة رقم ١ واحسب القيم الأولية لكل من C_{d1}, d_1, q_1 لهذه الفتحة.

٩- استخدم المعادلة رقم (٣, ١٤٨) لتقدير الضاغط اللازم H_1 عند الفتحة.

١٠- اعتماداً على قياس أعماق الموقع للماء احسب الميل الذي عنده سوف توضع أنبوب الرذاذة، أوجد التغير في الارتفاع ($\Delta z_1, \Delta z_2, \Delta z_3, \dots, \Delta z_n$) للأنبوب المعكوسة من فتحة إلى أخرى.

١١- أوجد السرعة في الجزء الأبعد (المجاور إلى الفتحة رقم ١) من أنبوب الرذاذة، $V_1 = q_1 / (\pi D^2 / 4)$.

١٢- احسب ضاغط السرعة $V_1^2 / 2g$.

١٣- احسب الكثافة النوعية s_0 للماء المستقبل و s للماء الفائض واحسب $\Delta s = s_0 - s$.

١٤- احسب الضاغط H_2 عند الفتحة الثانية:

$$H_2 = H_1 + f L_1 V_1^2 / (2gD) + \Delta s (\Delta z_1) / s$$

١٥- احسب C_{d2} للفتحة الثانية باستخدام:

لمدخل الفتحة انسيابية الحافة

$$C_{d2} = 0.975 \left[1 - V_1^2 / (2 g H_2) \right]^{0.375} \quad (٣, ١٤٩)$$

لمدخل الفتحة حادة الحافة

$$C_{d2} = 0.63 - [0.58 V_1^2 / (2 g H_2)] \quad (٣, ١٥٠)$$

$$q_2 = C_{d2} (\pi d_2^2 / 4) \sqrt{(2 g H_2)} \quad ١٦ - احسب:$$

$$V_2 = V_1 + [q_2 / (\pi D^2 / 4)] \quad ١٧ - احسب:$$

١٨ - كرر الخطوات من رقم (١٢) حتى رقم (١٧) لكل الفتحات حتى

الفتحة رقم n بالتتالي.

بعد هذه الحسابات التمهيدية يمكن عمل التغييرات الملائمة في أقطار الفتحات وتباعدها،... إلخ. للحصول على تصميم مقبول للرزادة.

مثال رقم (٣, ٢٠): من المرغوب تحقيق معامل تخفيف يساوي ٨٥ عند عمق متوسط حوالي ٤٥ م فوق أنبوبة الرزادة للماء الفائض ذو معدل تصرف ٦,٥ م^٣/ث من الرزادة إلى الجسم المستقبل للماء مع اعتبار أن $\Delta p / p = \Delta s / s = 0.025$ ، $f = 0.012$. وقد تم وضع أنبوبة الرزادة على ميل ٠,٠٨ م/م . وبفرض أن الرزادة موجهة عمودياً على التيار المحيط وأن السرعة u تساوي ٠,٢٥ م/ث . احسب الأبعاد الأولية للرزادة . مخزون الماء الفائض يقع على مسافة ٢ م فوق مستوى الماء في الجسم المستقبل للماء وسوف توصل إلى أنبوبة الرزادة مع أنبوبة طولها ١٠٠٠ م من نفس النوع والحجم . وهذه الأنبوبة لها كوعين ($k_e = 0.20$) ووصلة واحدة على شكل تي ($k_T = 1.1$) . سطح الماء في الجسم المستقبل للماء هو ٦٢ م فوق الفتحة الأولى (أي، قريباً من الطرف الهامد لأنبوبة الرزادة) . احسب سعة الضخ اللازمة .

الحل:

لتقدير أولي نفرض أن:

$$S_a = 1.3 \times S_n = 1.3 \times 85 = 110.5$$

ومن المعادلة رقم (٣, ١٤٥):

$$110.5 = 0.38 \times (9.81 \times 0.025)^{1/3} \times 45 / q^{2/3}$$

فيكون:

$$q = 0.030 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$L = Q_0 / q = 6.5 / 0.030 = 216.7 \text{ m}$$

اختار $L = 200 \text{ m}$

استخدم المسافات بين الفتحات ثابتة وتساوي ١,٠ م. إذا الفتحات من ١ إلى ٣٠ بقطر d يساوي ١٥ سم، والفتحات من ٣١ إلى ٦٠ بقطر d يساوي ١٤ سم، والفتحات من ٦١ إلى ١٣٠ بقطر d يساوي ١٣ سم، والفتحات من ١٣١ إلى ٢٠٠ بقطر d يساوي ١٢ سم. لاحظ أن مجموع مساحات كل الفتحات هو حوالي ٦٠٪ من مساحة القطاع العرضي للأنبوبة الرذاذة.

وبفرض أن متوسط السرعة خلال أنبوبة الرذاذة يساوي ١,٤ م/ث، إذن:

$$A = 6.5 / 1.4 = \pi D^2 / 4$$

وبالتالي تكون $D = 2.4 \text{ m}$

بفرض أن $C_{d1} = 0.975$ و $q_1 = 0.030 \text{ m}^3 / \text{s}$. إذن من المعادلة رقم (٣, ١٤٨):

$$0.030 = 0.975 \times (\pi d_1^2 / 4) \times \sqrt{(2 g H_1)}$$

أي $H_1 = 0.15 \text{ m}$

$$V_1 = q_1 / (\pi D^2 / 4) = 0.030 / (\pi \times 2.4^2 / 4) = 0.00663 \text{ m/s}$$

إذا تم التحكم في السرعة بحيث تكون منخفضة جداً، إذن قطر الأنبوبة قريباً من الطرف الهامد يمكن أن يقلل.

وباستخدام الخطوة رقم (١٦):

$$H_2 = 0.15 + 0.012 \times 1.0 \times (0.00663)^2 / (2 \times 9.81 \times 2.4) + 0.025 \times 0.08 \\ = 0.152 \text{ m}$$

وبفرض أن فتحات المداخل دائرية. إذن، باستخدام المعادلة رقم (٣, ١٤٩):

$$C_{d2} = 0.975 \left[1 - \left\{ (0.00663)^2 / (2 \times 9.81 \times 0.152) \right\} \right]^{0.375} = 0.975 \\ q_2 = 0.975 \times (\pi d_2^2 / 4) \times \sqrt{(2g H_2)} = 0.975 \times (\pi \times 0.15^2 / 4) \\ \times \sqrt{(2g \times 0.152)} = 0.030 \text{ m}^3 / \text{s}$$

والحسابات حتى الفتحة رقم ٢٠٠ يمكن تنفيذها باستخدام برنامج فورتران البسيط أو أوراق العمل. وتصرفات الفتحة المحسوبة، والسرعة خلال أجزاء أنبوبة الرذاذ من منبع السريان، و C_d للفتحة، والضغوط عند الفتحة للفتحات المختارة موضحة في الجدول رقم (٣, ٣٥).

الضغوط المحسوب (فوق مستوى الماء المحيط) اللازم للرذاذ يساوي ٥,٨٢ م. ويمكن أن تدقق الحسابات لإنجاز تصميم رذاذ مقبول.

في حالة: Q_0 يساوي ٦,٥ م^٣/ث و D يساوي ٢,٤ م وأنبوب بطول ١٠٠٠ م يصل الرذاذ بمصدر الماء الفائض فإن:

$$V = 6.5 / (\pi \times 2.4^2 / 4) = 1.44 \text{ m/s} \\ \text{باستخدام المعادلة رقم (٣, ١٣٧) فإن الفاقد في الضغوط خلال الأنبوب:} \\ 0.012 \times 1,000 \times (1.44)^2 / (2 \times 9.81 \times 2.4) + (2 \times 0.2 + 1.1) \times \\ 1.44^2 / (2 \times 9.81) = 0.528 + 0.158 = 0.686 \text{ m} \\ \text{الضغوط الكلي اللازم لخروج الماء الفائض خلال فتحات الرذاذ:}$$

$$0.686 + 0.582 = 1.268 \text{ m}$$

الضغوط المتاح عند نقطة تخزين الماء الفائض (المقاس فوق أبعد فتحة):

$$(62 + 2)s = 64 s \text{ kg/m}^2$$

(s = الوزن النوعي للماء عند فرع النهر).

عمق الماء المحيط عند الفتحة الأولى يساوي ٦٢ م، وعمق الماء المحيط عند

الفتحة الأخيرة:

$$62 - 0.08 \times 200 = 46 \text{ m}$$

متوسط الضغوط للماء المحيط مقابل ما يتسرب من الماء الفائض:

$$\{(62 + 46)/2\} s_0 = 54 s_0 \text{ kg/m}^2$$

(s_0 = الوزن النوعي للماء المحيط).

الضغوط الكلي اللازم لتسرب الماء الفائض خلال الفتحات:

$$54 s_0 + 1.268 s \text{ kg/m}^2$$

حيث إن: $\Delta s/s = 0.025$ فإن $s_0 = 1.025 s$ ، إذن:

$$54 s_0 + 1.268 s = 56.618 s \text{ kg/m}^2$$

الضغوط المطلوب كنسبة من الضغوط المتاح يكون حوالي:

$$(56.618/64) \times 100 = 88\%$$

إذن ربما لا يكون هناك حاجة للضخ ما لم يحدث صداداً للأنبوب وعوامل أخرى

تعمل على زيادة الضغوط المطلوب.

الجدول رقم (٣,٣٥). المتغيرات الهيدروليكية المحسوبة عند فتحات الرذاذة المختارة.

رقم الفتحة	تصرف الفتحة (م ^٣ /ث)	السرعة في الأنبوب (م/ث)	C _d	ضاغط الفتحة (م)
١	٠,٠٣٠	٠,٠٠٦٦٣	٠,٩٧٥	٠,١٥٠
٢	٠,٠٣٠	٠,٠١٣	٠,٩٧٥	٠,١٥٢
٥	٠,٠٣٠	٠,٠٣٣	٠,٩٧٥	٠,١٥٨
١٠	٠,٠٣١	٠,٠٦٧	٠,٩٧٥	٠,١٦٨
٥٠	٠,٠٣٣	٠,٣٥٣	٠,٩٦٦	٠,٢٤٩
١٠٠	٠,٠٣٣	٠,٧٠٤	٠,٩٤٩	٠,٣٥٢
١٥٠	٠,٠٣٢	١,٠٦٩	٠,٩٢٨	٠,٤٦٢
٢٠٠	٠,٠٣٥	١,٤٣٦	٠,٩٠٦	٠,٥٨٢

في حالة المجاري المائية الضحلة فإن الخلط الرأسي يكون سريعاً نسبياً والتخفيف الأولي خلال تقريباً طول واحد من الرذاذة يمكن أن يقدر عن طريق

(Tchobanoglous and Burton 1991: Adams 1982):

$$(٣,١٥١) \quad S_i = \left[u D L / (2 Q_0) \right] \left[1 + \sqrt{1 + (2 Q_0 V_0 \cos \alpha) / (u^2 L D)} \right]$$

حيث إن:

u = سرعة السريان.

Q_0 = معدل تصرف الماء الفائض.

L = طول الرذاذة.

S_i = التخفيف المبدئي.

D = عمق الماء في النهر.

V_0 = السرعة خلال فتحات الرذاذة.

α = زاوية انحدار الفتحة على الأفقي المقاسة في المستوى الرأسي الموازي لاتجاه تدفق النهر.

أحياناً يلزم تقدير التخفيف عند نهاية منطقة الخلط الأولية لتصرفات الفتحة الرأسية المنفردة (مثلاً، التصرف خلال أنبوب منفرد تصرفها رأسياً لأعلى) في بحيرة أو محيط أو نهر. في مثل هذه الحالات يمكن تقدير التخفيف المبدئي عن طريق (Tchobanoglous and Burton 1991; Muellenhoff *et al.* 1985):

١ - في حالة الجسم المستقبل للماء الراكد (بحيرة أو محيط بتيارات منخفضة):

$$S_i = 0.13 (g' / D^5 / Q_0^2)^{1/3} \quad (٣, ١٥٢)$$

٢ - في حالة الماء المستقبل المتدفق (نهر):

$$S_i = 0.29 (u D^2 / Q_0) \quad (٣, ١٥٣)$$

حيث إن:

S_i = متوسط التخفيف عند نهاية منطقة الخلط الأولية.

$g' =$ قابلية طفو الماء الفائض $= g(\rho_s - \rho) / \rho$.

$\rho_s =$ كثافة الماء الفائض.

$\rho =$ كثافة الماء المستقبل.

أدنى تخفيف عند منتصف الريشة، $S_m \cong 0.55 S_i$.

مثال رقم (٣, ٢١): احسب الأبعاد الأولية للرداظة متعددة الفتحات في مجرى مائي لتحقيق تخفيف المجال القريب بحوالي ٢٠ لتصرف ماء فائض بمقدار ١,٥ م^٣/ث عندما يكون متوسط التدفق المنخفض لسبعة أيام وعشر سنوات هو ٥٠ م^٣/ث. وتكون فتحات الرداظة موجهة أفقياً وموازية لاتجاه تدفق النهر. ومتوسط سرعة وعمق التدفق في النهر هي ١ م/ث و ١,٨ م، على الترتيب.

الحل:

من الملاحظات العملية ولأجل التخفيف الأولي S_i يساوي ٢٠، وبفرض أن السرعة في الفتحة V_0 تساوي ٣ م/ث. وباستخدام المعادلة رقم (٣, ١٥١) مع اعتبار أن:

$$u = 1 \text{ m/s}, D = 1.8 \text{ m}, Q_0 = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}, \alpha = 0$$

وعن طريق المحاولة والخطأ نجد أن L يساوي ١٦ م.

وبفرض أن تباعد الفتحات $\cong$ عمق ماء النهر (للمجري المائية الضحلة) =

١,٨ م. وبالتالي يكون عدد الفتحات يساوي $16/1.8 \cong 9$.

أيضاً بفرض أن متوسط السرعة في أنبوبة الرذاذ هي ١,٤ م/ث، ومتوسط

قطر أنبوب الرذاذ في حالة التصرف Q_0 يساوي ١,٥ م^٣/ث، هو:

$$D = \sqrt{(1.5/1.4) \times 4/\pi} = 1.17 \text{ m}$$

وبفرض تصرف متساوي تقريباً خلال كل فتحة مع سرعة V_0 تساوي ٣ م/ث، يكون قطر الفتحة:

$$\sqrt{[(1.5/(9 \times 3))] \times 4/\pi} = 0.266 \text{ m}$$

التخفيف S_i المقدر عن طريق المعادلات رقم (٣, ١٥١) ورقم (٣, ١٥٢) ورقم

(٣, ١٥٣) يزداد بارتفاع الريشة حتى سطح الماء. ولتقديرات تمهيدية يمكن إهمال هذه

الزيادة ويمكن تقدير معدل التصرف Q_s عن طريق (Tchobanoglous and Burton 1991):

$$Q_s = S_i Q_0 \quad (٣, ١٥٤)$$

التركيز الأقصى (المركزي) في هذه الريشة C_s يقدر عن طريق:

$$C_s = C_0 / S_m \quad (٣, ١٥٥)$$

ويمكن افتراض أن طول الريشة يكون مساوياً لطول الرذاذ L . وبالتالي فإن ارتفاع

الريشة h_s يعطى بالمعادلة:

$$h_s = Q_s / (u L) \quad (٣, ١٥٦)$$

ويمكن عمل حسابات التصرف الحقلي البعيد باستخدام المعادلات رقم (٣، ١٠٥) ورقم (٣، ١٠٦) مع Q_s = تصرف المصدر، و C_s = تركيز المصدر، و L = طول سطح المصدر الرأسي، و h_s = ارتفاع سطح المصدر الرأسي.

الطرق المائي Water Hammer

من المطلوب تقدير ضغط الطرق المائي عند تصميم خطوط الأنابيب حيث تكون الصمامات أو البوابات التي تقع عند نهاية خط الأنابيب يتم إغلاقها تدريجياً أو بشكل مفاجئ. وأحد الحالات الميدانية الشائعة مصادفتها لذلك هو تحديد ضغط الطرق المائي في بربخ بسبب إغلاق بوابات الطورين. ويمكن الحصول على قيمة محافظة من ΔH (م) بفرض الإغلاق المفاجئ للصمام أو البوابة:

$$\Delta H = a V_0 / g \quad (٣، ١٥٧)$$

حيث إن:

$$V_0 = \text{سرعة السريان الأولية في الأنبوب.}$$

$$a = \text{سرعة موجة الضغط في الأنبوب.}$$

إذا كان الصمام موضوعاً على بعد مسافة L من حوض السد فإن إغلاق الصمام المفاجئ يمكن أن يحدث إذا كان $T \leq 2L/a$ ، حيث T = زمن إغلاق الصمام. وسرعة موجة الضغط تعطى بالمعادلة:

$$a = \sqrt{\left[E_w / (\gamma / g) \left(1 + d E_w / (E_p t) \right) \right]} \quad (٣، ١٥٨)$$

حيث إن:

$$E_w = \text{معامل مرونة الحجمي للماء (كجم / م}^2\text{).}$$

$$E_p = \text{معامل مرونة جدران الأنبوب (كجم / م}^2\text{).}$$

t = سمك جدران الأنبوب (م).

d = القطر الداخلي للأنبوب (م).

لإغلاق بطن للصمام أو البوابة فربما يكون من المفضل استخدام نماذج الحاسب المتاحة (مثلاً، SURGE5; Watters 1984; Streeter 1971).

مثال رقم (٣, ٢٢): حوض سد يتصل بنقطة التوزيع عن طريق خط أنابيب بطول ١٠٠٠ م وقطر ١٥ سم من الفولاذ. تحمل الأنبوب تصرف ٤٤ ل/ث عندما يكون الصمام الواقع عند نقطة التوزيع يتم إغلاقه بسرعة. احسب ضغط الطرق المائي عند الصمام. بعد ٠,٥ ث من إغلاق الصمام، فإنه عندما يتعرض مقياس الضغط الموضوع عند الصمام إلى هبوط مفاجئ في الضغط مشيراً إلى تسريب في خط الأنابيب. احسب موضع التسريب. على اعتبار أن:

$$E_w = 21100 \text{ kg/cm}^2, \quad E_s = 2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

$$t = 12 \text{ mm}, \quad \gamma = 1000 \text{ kg/m}^3$$

الحل:

$$\left\{ \left(\gamma / g \right) \left(1 + d E_w / (E_p t) \right) \right\} = (1,000 / 9.81) \left[1 + \left\{ 15 \times 21,100 / (2.04 \times 10^6 \times 1.2) \right\} \right] \\ = 115.116$$

$$a = \sqrt{[21,100 \times 10^4 / 115.116]} = 1351.86 \text{ m/s}$$

$$V = 0.044 / (\pi \times 0.15 \times 0.15 / 4) = 2.49 \text{ m/s}$$

ضغط الطرق المائي:

$$aV / g = 1353.86 \times 2.49 / 9.81 = 343.6 \text{ m}$$

يجب أن تكون الأنبوبة قادرة على تحمل هذا الضغط المفرط.

كما يتضح أن موجة الضغط تصل إلى نقطة التسريب وتعود الاستجابة إلى

الصمام في ٠,٥ ث، أي أن $2L'/a = 0.5$ ، حيث L' = مسافة التسريب من الصمام:

$$L' = 0.5 \times 1353.86 / 2 = 338.46 \text{ m}$$

النماذج الهيدروليكية

Hydraulic Models

بعض نماذج حاسب الملكية العامة الرقمية الشائعة الاستخدام لأنواع مختلفة من التحليلات الهيدروليكية مذكورة وموضحة أدناه:

• نموذج القطاعات الجانبية لسطح الماء HEC-2 (USACE 1991c): هذا النموذج يقوم بحساب القطاعات الجانبية لسطح الماء للتدفقات أحادية البعد المتغيرة تدريجياً في الحالة الثابتة في القنوات الطبيعية أو التي من صنع الإنسان. ويمكن أن يستخدم لحساب أثار السدود أو البنايات في القناة. ويتم عمل الحسابات الهيدروليكية باستخدام نموذج الخطوة القياسية. ويمكن تطبيقه لكل من السريان فوق الحرج وتحت الحرج. وفي السريان تحت الحرج يتم ترتيبهم من مصب النهر إلى منبع النهر. في السريان فوق الحرج يتم ترتيبهم من منبع النهر إلى مصب النهر. ويتم تحديد هندسة القطاعات العرضية من يسار إلى يمين مصب النهر. لدى النموذج القدرة على أداء الحسابات الهيدروليكية خلال الجسور والبرابخ وسدود التدفق الجانبية وتجاوزات السهول الفيضية والتدفقات المتفرعة. وبالإضافة إلى القطاعات الجانبية لسطح الماء يقوم النموذج بحساب سرعات القناة وعلى الضفاف، ومساحات التدفق، والتصرفات، وارتفاع درجة الطاقة، والفواقد، وعرض المصبطة عند كل قطاع عرضي. ويمكن أيضاً أن يقدم توزيع السرعة في الأجزاء المختارة من القطاعات العرضية.

• نظام تحليل النهر HEC-RAS (USACE 1998): هذا النموذج هو برنامج قطاع جانبي لسطح الماء يعتمد على النوافذ، والذي يستبدل نموذج HEC-2 الموصوف سابقاً. ويمكن أن يستخدم البيانات المطورة لنموذج HEC-2، أو يمكن للمستخدم أن

يدخل البيانات بشكل محدد لأجل هذا النموذج. ويتفاعل المستخدم مع النموذج من خلال السطح البيئي التخطيطي للمستخدم لإدارة الملفات، وإدخال وتحرير البيانات، والتحليلات الهيدروليكية، والعروض التخطيطية للمدخلات والمخرجات، وإعداد التقارير. ويمكنه أداء حسابات السريان فوق الحرج وتحت الحرج والمختلطة ويمكنه أن يحاكي تجاوزات طرق الفيضان، والجسور والبرابخ، والانجراف عند الجسور، والتدفقات المتفرعة. ويمكن عرض المدخلات والمخرجات وطباعتها بشكل تخطيطي. وأيضاً يمكن تصدير النتائج المحسوبة إلى ملفات GIS و CADD.

• **القطاعات الجانبية لسطح الماء WSP-2 (USDA 1976):** هذا النموذج يحاكي خصائص التدفق لمجموعة محددة من أحوال المجرى المائي والسهل الفيضي. وهو يقوم بحساب القطاعات الجانبية لسطح الماء في القنوات المفتوحة وتقديرات الفواقد في الضاغط في القطاعات المغلقة، بما فيها الطرق المعبّدة مع فتحات الجسور أو البرابخ. وبصفة عامة يؤدي النموذج نفس حسابات نموذج HEC-2 (USACE 1991c).
• **نموذج تصدع السد DAMBRK (Fread 1988):** وهو نموذج معقد نسبياً

لمحاكاة ارتفاعات سطح الماء الناتجة عن أعطال السد. وهو يشمل مكون خرق لتقدير المواصفات الزمنية والهندسية لمجموعة محددة من العوامل بها خلل. ويقوم النموذج بحساب المنحنى المائي للتدفق في حالة الخلل بما فيها أثار إفراغ مخزون حوض السد وتدفقات حوض السد ويستخدم تقنية التحديد الديناميكي لتقدير ارتفاعات سطح الماء وأزمة وصول موجة فيضان تصدع السد عند قطاعات عرضية مختلفة للسد في اتجاه مصب التيار. ويمكنه أداء الحسابات في حالة السريان تحت الحرج وفوق الحرج والمتغير ويمكن أن يدمج أثار سد الجسور والسدود الأخرى، وتدفقات الانقراض،

وأما حوض السد الناتجة من الانزلاق الأرضي، والسهول الفيضية. وعادةً يتطلب تحليل تصدع النهر استخدام هذا النموذج ويتم أدائه على أنه دراسة خاصة.

• الانجراف والترسيب في الأنهار وأحواض السدود HEC-6 (USACE 1991d):

وهو نموذج أحادي البعد يقوم بحساب أعماق الانجراف أو الترسيب عند قطاعات عرضية مختلفة من القناة أو حوض السد. وتشمل بيانات المدخلات الأساسية هندسة القطاعات العرضية الشبيهة بنموذج HEC-2 (USACE 1991c) وجدول أحمال الرواسب مقابل التصرفات، وتدرج الرواسب المعلقة ومادة القاع عند قطاعات عرضية عديدة. والمنحنيات المائية للتصرفات هي مدخل كدالة فترة من الفترات الزمنية. ويمكن أن يقوم النموذج بأداء حسابات نقل حمل القاع باستخدام واحدة من دوال النقل الـ ١٢ المحتواة في النموذج. ويمكن أن يحاكي ترسيب وانجراف الطين وجزيئات الطمي بالحجم الدقيق، ويقوم بضبط تقديرات نقل الرواسب لأحمال الغسل.

• برنامج تحليل البربخ (CAP 2001): يستخدم هذا النموذج الإجراءات

القياسية الخاصة بالنموذج USGS لحساب التدفق خلال البرابخ. ويمكن أن يقوم بتقدير علاقات مرحلة التصرف للبرابخ المستطيلة والدائرية وقنطرة الأنبوبة والبرابخ الاهليجية والبرابخ الأخرى الغير قياسية الشكل. ويقوم النموذج بحل طاقة الحالة المستقرة أحادية البعد ومعادلات التسلسل لارتفاع سطح الماء من اتجاه منبع التيار وارتفاعات سطح الماء في اتجاه مصب التيار. ويمكن أن يتم تحميله من الموقع:

<http://www.waterengr.com/freeprog.htm>

• نماذج جودة مياه المجاري المائية المحسنة، QUAL2E and QUAL2E-UNCAS

(USEPA 1987a): هذان هما أداتان لتخطيط جودة المياه الذي يمكن تشغيلهما كنماذج

ثابتة أو متحركة. وهما يستخدمان لدراسة أثار أحمال المخلفات على جودة مياه المجرى المائي أو لتحديد خصائص كمية وجودة أحمال المخلفات غير المرحلية كجزء من برنامج أخذ العينات في الحقل. ويمكن استخدامها كذلك لعمل نموذج لأثار الاختلافات اليومية في المتغيرات الجوية على جودة المياه (بشكل أساسي، الأكسجين المذاب والحرارة) أو لاختبار الاختلافات المذابة اليومية التي يتسبب فيها نمو وتنفس الطحالب. وللمنموذجين القدرة على التحليل غير الأكيد، الخيار لمدخل متغير علم المناخ المتغير الوصول في محاكاة درجة حرارة الحالة المستقرة، والخيار لرسم تركيزات الأكسجين المذاب الملاحظ والمتوقع.

• نموذج منطقة الخلط الهيدروديناميكية ونظام دعم القرار لتصرفات المادة الملوثة في أسطح المياه CORMIX (USEPA 1996a): هذا النموذج يتنبأ بتخفيف ومسار قذف التصرفات المغمورة أحادية الفتحة، وتصرفات الرذاذ المغمورة متعددة الفتحات، وتصرفات سطح الكثافة الاختيارية (موجب، متعادل، سالب) في البيئة الطبقة أو منتظمة الكثافة مع أو بدون التدفق العرضي. ويقوم النموذج باختبار ترابط وتجانس البيانات، ويقوم بتنفيذ النماذج الهيدروديناميكية الملائمة، ويقوم بتفسير النتائج بدلالة معايير التصرف المنتظم. وهو يرشد إلى الخلط الأولي السريع ويفترض وجود تصرف المادة الملوثة المحافظ مع إهمال أي عملية للتفاعل أو التحلل.

• نماذج التخفيف لتصرفات أفرع النهر، PLUMES (USEPA 1994): يعد هذا النموذج مفيداً عند تصميم رذاذات مخرج التصريف حيث يكون السريان المحيط غير طبقي ويكون الجسم المستقبل للماء عميقاً نسبياً. وهو يشمل نموذجين تخفيف أولية معقدين نسبياً ونظامين للعد العشري في الموقع البعيد بسيطين نسبياً. وتشمل المدخلات المطلوبة شكل الفتحة والتباعد والتصريف الكلي وقطر وعمق الريشة

ودرجة ملوحة تفرع النهر والحرارة والظروف المحيطة في الماء المستقبل ومسافة الموقع البعيد للحسابات. ومقارنة بنموذج CORMIX (USEPA 1996a) فإن هذا النموذج أبسط في الاستخدام.

• جودة المياه في حالة أنظمة النهر-حوض السد WQRRS (USACE 1978):

يتكون هذا النموذج من ثلاث وحدات قياس منفصلة: حوض السد وهيدروليكا المجرى المائي ووحدة قياس جودة المجرى المائي. ويمكن تكامل الثلاث وحدات لتحليل جودة مياه حوض النهر الكامل. ويمكن أيضاً تنفيذ هيدروليكا المجرى المائي وحوض السد على أنها نماذج مستقلة. وتعمل وحدة قياس جودة المجرى المائي مع وحدة قياس هيدروليكا المجرى المائي. وتكون وحدة قياس حوض السد قابلة للتطبيق في خزانات تجميع الماء العميقة نسبياً مع فترات الإقامة الطويلة. ويمكن معالجة خزانات تجميع الماء الضحلة ذات السريان السريع خلال الأوقات على أنها مجارى مائية بطيئة الحركة. وتقوم وحدة قياس هيدروليكا المجرى المائي بحساب المتغيرات الهيدروليكية للتدفق المتغير بانتظام في أنظمة السريان المستقرة وغير المستقرة. وتقوم وحدة قياس جودة المجرى المائي بمحاكاة قمة أحمال المادة الملوثة في البيئة الهيدروليكية المستقرة أو غير المستقرة. هذا النموذج يعد معقداً بعض الشيء والمشروعات التي تتضمن استخدام هذا النموذج يجب أن تعامل على أنها دراسات خاصة.