# الترسيب في خزانات السدود الدائمة*

**سهير كليب عبدالوهاب الجــرمه**

**الملخص:**

تقلل الرواسب من السعة التخزينية للبحيرات، حيث يبلغ متوسط الفاقد من سعة تخزين البحيرات ١% كل عام في جميع أنحاء العالم (White, 2010, p. 60). عملية الترسيب هي المشكلة الرئيسية التي تؤثر على عمر الخزان، كما أنها تشكل محوراً أساسياً في إدارة الموارد المائية، مما يتطلب تحديد كلاً من معدل ونمط الترسيب، للتنبؤ بأنواع المشكلات التي يمكن أن تحدث داخل الخزان، والإطار الزمني الذي ستحدث خلاله، ومن ثّم التوصل لطرق معالجة المشكلة. وتظهر أهمية دراسة أنماط الترسيب في أنها تعكس عمليات نقل الحمولة النهرية، بالإضافة إلى أنها توفر معلومات عن عمليات الترسيب وتوزيعها، والتي قد لا تكون مؤكدة من مصادر أخرى.

---

* بحث مستخلص من الدراسة المقدمة من الباحثة/ سهير كليب عبدالوهاب الجــرمه للحصول على درجة الدكتوراه في الآداب – جامعة الفيوم – قسم الجغرافيا، بعنوان (نمذجة الترسيب والإدارة المستدامة في بحيرة السد العالي).

ويعد الترسيب في البحيرات الإصطناعية أمام السدود من أكثر المشاكل التي تواجه هيدروليكية الأنهار تعقيداً، وهذا يرجع إلى حقيقة أن الكميات المتغيرة من تدفق المياه والرواسب تشارك في عملية تراكم الرواسب، ويعد حجم وتركيب جزيئات الرواسب وخصائص حركة المياه والتباين في كميات تدفقات المياه والرواسب وشكل الخزان وقواعد تشغيل السد من بين هذه المتغيرات الرئيسية.

**الكلمات الدالة:** الترسيب، نقل الرواسب، الخزانات الدائمة، البحيرات الإصطناعية، رواسب الدلتا، رواسب المقدمة.

## المقدمة:

تعمل إقامة السدود على الأنهار على تغيير خصائص النهر الهيدروليكية وملامحه الجيومورفولوجية، مما قد يؤدي إلى إضعاف أو تنشيط قوة تأثير عوامل التعرية على المجرى. حيث نجد في مجرى مائي قصير لا يحمل مفتتات تذكر؛ يؤدي بناء السدود الدائمة للتخزين إلى إختزال حجم التصريف الفيضي، ومن ثّم اختزال طاقة النهر على النحت الهيدروليكي Hydraulic action of water والذي يمثل العملية السائدة في هذه الحالة النموذجية من الانهار والتي تعد قاصرة في الطبيعة على الروافد العليا للنهر، مثلما هو الحال على نهر درونت بمقاطعة دربي شاير ونهر ميفي Meavy في مقاطعة دارثمور في بريطانيا، والمجاري النهرية القصيرة التي تستقى مياهها من بحيرات عذبة موسمية التدفق مثل نيل فيكتوريا بين سد أوين وبحيرة كيوجا في أوغندا.

بينما في الآنهار الكبرى، والتي تستمد مائيتها من حوض تصريفها بواسطة روافدها، تؤدي إقامة سدود التخزين الدائم على مجرى النهر إلى نشاط عمليات التعرية المائية في المجرى، وتجديد النهر لخصائصه الهيدروليكية وملامحه الجيومورفولجية.

ويتبع هذا التجديد الصناعي في نظام النهر الهيدرولي نشاطاً في العمليات الجيومورفولجية المتعلقة بالنحت والنقل في المجرى وظهوراً لعمليات جيومورفولجية جديدة واختزالاً من جهة أخرى لقوى العمليات الجيومورفولجية المتعلقة بالترسيب في المجرى.

## أولاً – عمليات الترسيب في أحواض التخزين الدائم أمام السدود :

تنتج الرواسب في أحواض التخزين بواسطة انفصال حُبيبات التربة نتيجة تأثير الأمطار وقوة الجرف الميكانيكي للتيارات المائية، ويعمل الجريان السطحي على نقلها بعد حدوث الفصل مباشرة إلى أسفل المنحدر على شكل جريان فوق سطح الأرض، وتصل في نهاية المطاف إلى مجاري الأنهار لتنقل عبر المجرى إما في حالة معلقة أو بالتدحرج والإنزلاق على طول قاع النهر، وتستمر هذه العملية بإتجاه مجرى النهر حتى يصبح التدفق غير قادر على حملها فتترسب في مكانها (USSD, 2015, p. 25)، ويعد فهم مبادئ نقل الرواسب أساساً لتفسير العديد من المشكلات الهيدروليكية والهيدرولوجية وحلها.

### ١) نقل الرواسب Sediment Transport:

يستهلك النهر جزء من طاقته في الاحتكاك بقاعه وجوانبه، ويفقد جزءاً آخر منها في تلاطم كتل المياه ببعضها البعض نتيجة للإضطراب والدوامات التي تحدث فيها، أما الجزء المتبقي من الطاقة فيستخدمها النهر في نقل حمولته.

وتعظم مقدرة النهر على الحمل Competence بكثرة مياهه، وبتزايد سرعة تياره خاصة مع إقامة السدود الدائمة على الآنهار. وتتخذ عملية النقل النهري أشكالا مختلفة يمكن حصرها في الطرق الأربع الآتية:

**أ- الإذابة والتحلل الكيميائي Soluation and Corrosion:**

ويقصد بذلك نقل المواد التي تحللت أو أُزيبت تماما من الصخر مع المياه إلى الأجزاء الدنيا من النهر. وتختلف عملية التحلل الكيميائي للصخر ومدى أثرها تبعا لعوامل مختلفة من أهمها التركيب الصخري واختلاف صلابته، ودرجة حرارة مياه النهر وشكل الدوامات والتيارات المائية النهرية.

وتظل قدرة النهر على نقل حمولته الذائبة ثابتة رغم تزايد طاقة النهر؛ ذلك أن هذه الديناميكية تتوقف قدرتها على خصائص النهر الكيميائية، إذ لا يتأثر التركيب الكيميائي للمياه تحت ظروف التخزين الدائم؛ إلا في حدود ضيقة وربما غير مؤثرة، كما أن للمياه خاصية التنقية الذاتية Self-Purification وإعاة ضبط تركيبها الكيميائي إلى التركيب الطبيعي للمياه (محمد محمود طه، ١٩٨٨، ص ٣٢).

**ب- الجر Traction:**

الجر أو السحب هي العملية التي يتم بواسطتها تحريك حُبيبات الرواسب المختلفة الأحجام عن طريق الدحرجة على طول قاع المجرى، ولهذا تسعى حمولة النهر التي تتحرك على امتداد القاع سواء بالتدحرج أو الجر أو السحب بحمولة القاع Bed-Load أو حمولة الجر Traction Load ويزداد حجم حمولة القاع أو الجر ويتعاظم أثناء مواسم الفيضان واشتداد سرعة جريان المياه، كما تتمكن المياه حينئذ من دحرجة وجر كتل صخرية كبيرة، ما كان باستطاعتها تحريكها في مواسم التحاريق (انخفاض في منسوب المياه). كما أن الفتات الصخري الدقيق الذي عادةً ما يتحرك بالجر على امتداد القاع في مواسم قلة المياه نراه وقت الفيضان يتحرك بالقفز Saltation بل يصبح محمولاً بالمياه ضمن الحمولة العالقة Suspened Load.

**ج- النقل بالتعلق Suspension:**

تنقل مع مياه النهر كميات هائلة من الرواسب الصغيرة الحجم، القليلة الكثافة التي تتعلق بالمياه تبعاً لخفة وزنها ولا تلتصق بقاع المجرى. ومثل هذه المواد الخفيفة الوزن الدقيقة الحجم تُنقل مع تيار النهر لمسافات طويلة صوب الجزء الأدنى من النهر. وفي البداية تُرفع هذه المواد من القاع بالدفع الهيدروليكي للمياه أو تأتي إلى المياه الجارية من الضفاف، وتدخل على الخصوص ذلك الجزء من المجرى المائي حيث يعظم الاضطراب المائي (السمة الأساسية لحركة التدفق النهري خلف السدود)، ويكون ذلك عادة على مسافة من قاع المجرى، حيث يكون الجريان المائي من النوع الصفحي Laminar Type وتتمكن الحركات الدوامية المعقدة من تعويم الحُبيبات الدقيقة التي تبقى معلقة في المياه أثناء جريانها تجاه المصب.

**د- النقل بالقفز Saltation:**

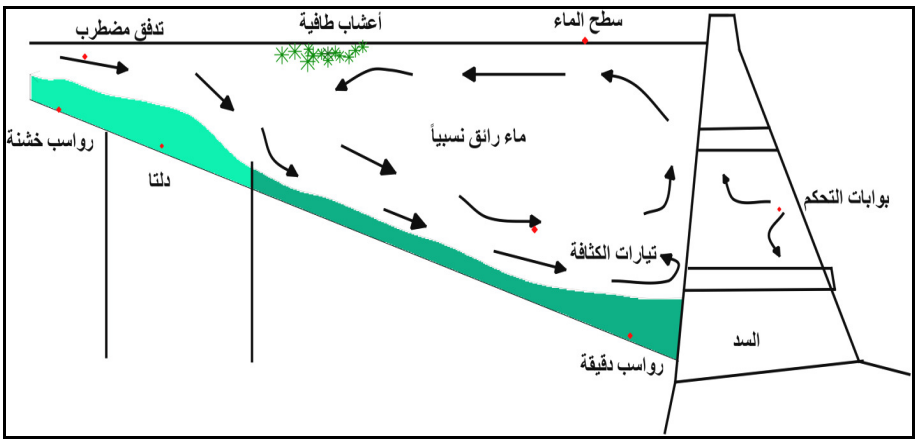
تتحرك حُبيبات الرواسب الكبيرة الحجم نسبياً فوق قاع المجرى بقوة دفع التيار المائي عن طريق القفز Jumping، فهي تلمس قاع المجرى على فترات ومسافات. ذلك أن أية حُبيبة مستقرة فوق قاع المجرى المائي تعوق المياه المتحركة وتعترض سبيلها إلى حد معلوم، فينشأ ضغط هيدروليكي خلفها، وسرعان ما تتمكن المياه من التغلب على مقاومة الحُبيبة فتتدحرج كما في حالة الجر Traction أو قد تُدفع إلى أعلى فتحتويها المياه المتحركة ضمن الحمولة العالقة. ومع هذا فإذا لم تكن صغيرة وخفيفة؛ فإن الجاذبية الأرضية قد تُلزمها بالعودة ثانية إلى قاع المجرى، ثم تتكرر العملية من جديد.

ونظرا للوضعية المتوسطة لعملية النقل بالقفز، فأنه من الصعب الفصل بين ما تساهم به عملية النقل بالقفز في نقل حمولة النهر، وبين ما تسهم به عمليات النقل بالتدحرج، ولذا فقد درجت معظم الدراسات على الجمع بين العمليتين (القافزة أو المتدحرجة) على الرغم من اختلاف ديناميكيتها. ويستخدم مصطلح حمولة القاع Bed-Load للتعبير عن نتاج نقل كلا العمليتين (سباركس، ب، و، ١٩٨٣، ص ١٣٥).

ويساهم بناء السدود في زيادة أثر هذه الديناميكية، ذلك أن الحُبيبات المنقولة بتلك الديناميكية تكون من الحجم المتوسط الذي قد تسمح أو لا تسمح كفاءة النهر بنقله عالقاً، بمعنى أنه لو تزايد حجم الحُبيبات عن ذلك الحجم المتوسط فأنه لا يمكن تحريكها إلا زاحفة، بينما لو تناقص فأنها تُنقل عالقة، بينما إذا كان حجم الحُبيبات من حجم متوسط فأنه ينتقل في سلسلة من القفزات على طول قاع المجرى، وتؤدي اقامة السدود إلى تزايد كفاءة النهر على النقل، مما يؤدي إلى زيادة مدى الحجم المتوسط الذي من الممكن نقله قافزا، وعلى هذا فمن المرجح أن عمليات النقل بواسطة هذه الديناميكية يزداد أثرها خلف سدود التخزين الدائم (محمد محمود طه، ١٩٨٨، ص ٣٣).

## ٢) ترسيب المواد العالقة في الخزانات:

عند وصول مياه النهر الحاملة لكميات كبيرة من المواد العالقة إلى الخزان، فإن سرعة واضطراب التدفق تقل جداً. وبالتالي يتم ترسيب االحمولة العالقة ومعظم حمولة القاع في الشكل المثلثي الدلتاوي عند بداية الخزان (شكل ١).




**Source:** Modified from (Palmieri, et al., 2003)

**شكل (١) :** توزيع الرواسب في الخزانات.

المواد الأصغر حجما تظل عالقة لفترة طويلة، وبسبب كثافتها العالية نسبياً مقارنة بالماء، تظل متحركة على طول قاع المجرى في شكل تيار الكثافة Denstiy Current، مع الأقتراب من السد؛ فإن المواد الدقيقة يتم إعاقتها وترسيبها كرواسب دقيقة أو في شكل غرين Silt، ولكن بعض المواد العالقة قد تمر خلال البوابات أو المخارج الموجودة في جسم السد.

ومع استمرار الترسيب للمواد الدقيقة، فإن مقدمة الدلتا تتحرك بإستمرار إلى أسفل في الخزان، ومع استمرار الزيادة في تراكم الغرين؛ فإن سعة التخزين الميت قد تمتلئ بالتدريج، ومع مرور الوقت قد يطغى على التخزين الحي مما يقلل من سعته التخزينية.

**وهناك عدد من العوامل ذات تأثير على تراكم الرواسب في الخزان متمثلة في الآتي :**

**أ- معدل تدفق الرواسب داخل الخزان:**

معدل تدفق الرواسب داخل الخزان هو بدلالة خصائص مستجمعات المياه مثل مساحة الصرف، متوسط ميل الأرض والقناة، إدارة واستخدام الأرض والعوامل الأخرى المتعلقة بعلوم المياه، لهذا فإن عملية الترسيب تكون ظاهرة معقدة و تحكمها متغيرات هيدروليكية وهيدرولوجية عديدة، ولا توجد علاقة تحليلية معروفة للتقدير المباشر لمعدل الترسيب أو سعة الفقد في الخزان، لذلك؛ فإن معدلات الترسيب تكون مبنية أساساً على علاقات تجريبية والتي يتم معايرتها باستخدام القياسات الحقلية. عموماً، يمكن أن تكون العلاقة ما بين معدل انتقال المواد العالقة $Q_S$، والتدفق الداخل للمجرى $Q$ كما في المعادلة الآتية:

$$Q_S = K\,Q^n$$ معادلة (١)

**حيث أن :** مؤشر n يتغير عادة ما بين ٢ : ٣، K ثابت ذو قيمة صغيرة كإعتراض مع Q كوحدة واحدة.

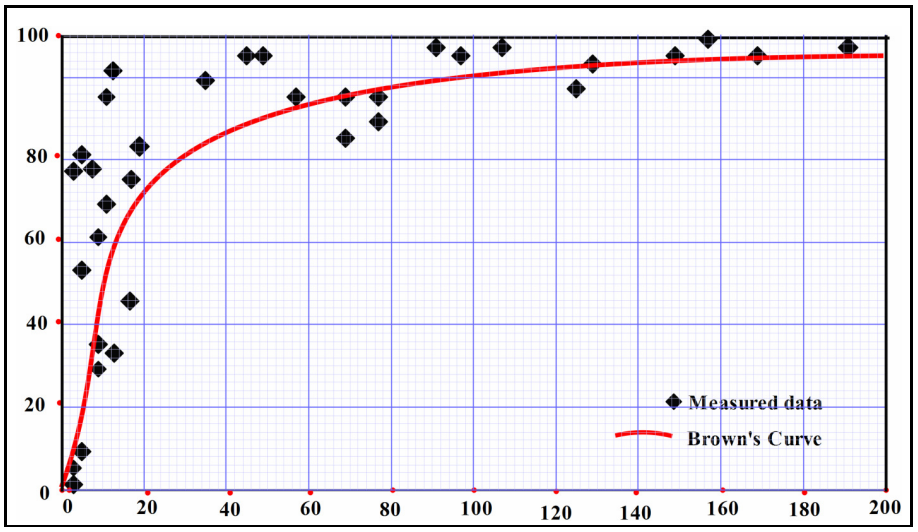
وبسبب الترسيب، فهناك نقص في التخزين، ومعدل النقص في التخزين يتوقف عادة على معدل تدفق الرواسب الداخل.

**ب- كفاءة الحجز أو الصد Trap Efficiency:**

كفاءة الحجز أو الصد للخزان هي نسبة الرواسب المحتجزة إلى حجم الرواسب القادمة. فالحمولة الداخلة إلى الخزان لا تترسب كلها، فبعضها يحمل بعيداً مع الماء المتدفق (Ghomeshi, 1995, pp. 48- 49)، وتحدد كفاءة الحجز النسبة من الرواسب الداخلة التي تحجز في الخزان، وتُعرف بنسبة كمية الرواسب المحتجزة إلى الكمية الكلية للرواسب الداخلة (Jaroot, 2009, p. 65). وهناك العديد من العوامل التي يمكن أن تؤثر على كفاءة الحجز ومنها ما يلي:

- نسبة سعة الخزان إلى التدفق الداخل للمجرى، والتي يرمز لها بالعلامة Q/C، وزيادة هذه النسبة تعني صغر كمية المياه المنطلقة في اتجاه المصب و زيادة نسبة الرواسب القادمة المحتجزة، ونظراً لأن النسبة Q/C هي مقياس لزمن المكوث Residence Time، أي الزمن اللازم لمرور المياه خلال الخزان، وكذلك تزداد كفاءة الحجز مع زيادة زمن الحجز، لذلك فإن الخزانات الضخمة التي تحتجز المياه لشهور أو سنين يكون لها كفاءة حجز عالية، بينما الخزان الصغير على المجرى الضخم له كفاءة حجز منخفضة، حيث أن الحالة الأخيرة تسمح بمرور التدفق في اتجاه المنبع بدون السماح للمواد العالقة الدقيقة بالترسيب.
- دمك المواد المترسبة نتيجة لمختلف عمليات الخزان، فمن الطبيعي أن الخزانات الممتلئة ذات الرواسب المغمورة، دائماً سيكون لها معدل دمك أصغر بأحواض نزع الغرين Desilting Basins، والخزانات ذات السحب من آن لآخر، حيث يتم خفض الخزان من آن لآخر للصيانة أو لأي غرض آخر، عندئذ فإن الرواسب تكون أسرع في الدمك بما ينتج عنه خفض في كفاءة الحجز.

- **عمر الخزان:** تقل كفاءة الخزان مع الوقت مع انخفاض سعة الخزان، بفعل المواد المترسبة، رغم أن الأمتلاء الكامل للخزان قد يستغرق وقتاً طويلاً، فإن التخزين الحي يعد انتهى في حالة امتلاء السعة بالرواسب، وبما يمنع الخزان من تحقيق أغراضه. بالنسبة لمعظم الخزانات الصغيرة والمتوسطة؛ تكون كفاءة الحجز ما بين ٧٠ إلى ٩٠%، ولكن في حالة الخزانات الكبيرة فإن نسبة Q:C تكون أكبر من واحد، وقد تصل إلى نسبة مرتفعة حتى ١٠٠%، وفي مثل هذه الحالة يصنف الخزان بأنه خزان الحفظ الزائد Hold Over Storage Reservoir.




**Source:** Modified from (Brown, 1944)

**شكل (٢) :** منحنى براون Brown لكفاءة حجز الرواسب.

ويتم تقدير كفاءة الحجز تجريبياً، بالإعتماد على الترسيبات المقاسة في عدد كبير من الخزانات، ويستخدم منحنى براون (شكل ٢) لتحديد كفاءة الحجز، ويعد كتابع لنسبة سعة الخزان إلى حجم الجريان الداخل إلى الخزان $\frac{V}{Q}$ (Ghomeshi, 1995, p. 49)، كما تعطي كفاءة حجز الرواسب $\eta_{trap}$ كأجزاء من نسبة سعة

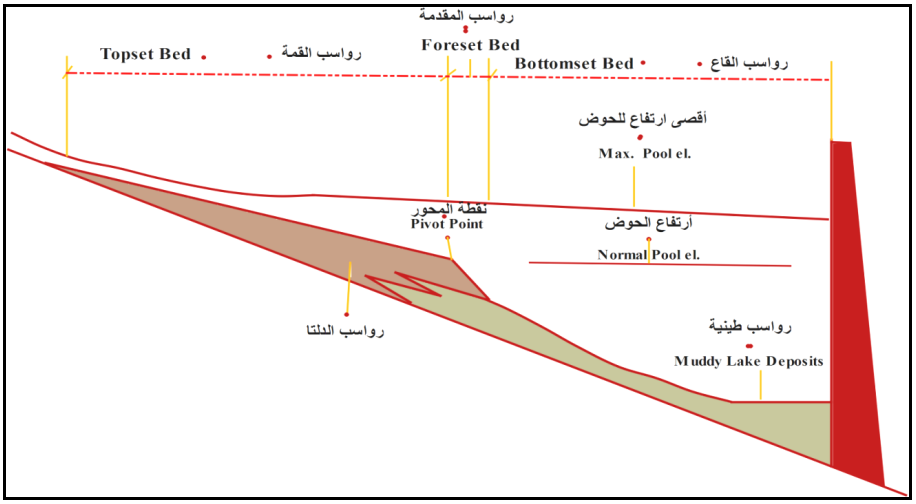
الجريان التي تمثل النسبة بين سعة التخزين (V)، إلى الجريان السنوي الوسطي (Q)، يمكن أن تختلف كفاءة الحجز فعلياً بحدود ١٠% لقيم $\frac{V}{Q}$ المنخفضة إلى ٢% لقيم $\frac{V}{Q}$ الكبيرة. ستتناقص سعة الخزان مع الزمن بسبب الترسيب، لأجل نفس الجريان السنوي تتناقص كفاءة الحجز بسبب تناقص النسبة.

## ٣) أنماط الترسيب في الخزانات الدائمة (البحيرات الإصطناعية):

عند دخول الروافد وانخفاض سرعة الجريان في الخزانات، تبدأ الحمولة في الترسيب، فيتم ترسيب حمولة القاع والأجزاء الخشنة للحمولة العالقة مباشرة لتكوين رواسب دلتا، في حين يتم نقل الرواسب الناعمة ذات السرعات المنخفضة إلى أعماق الخزان إما عن طريق الجريان الطبقي أو غير الطبقي. ويمثل الخزان الموجود على تيار واحد بدون روافد كبيرة ويتم تشغيله عند مستوى تجمع عالٍ ثابتا بيئة ترسيب موحدة وهو يمثل أبسط نمط للترسيب، ومع ذلك؛ يمكن أن تحدث مجموعة متنوعة من أنماط الترسيب بين خزان وآخر بسبب الإختلافات في الظروف الهيدرولوجية، وحجم الرواسب، وشكل الخزانات؛ فنجد الخزانات ذات مستويات المياه المتقلبة أو التي يتم إفراغها بشكل دوري، قد تتآكل الرواسب السابقة على نطاق واسع وتعاد صياغتها بعمليات مثل خفض الجريان، وانهيار المنحدرات، وحركة الأمواج؛ يضاف المزيد من التعقيد عندما يكون هناك مدخلات كبيرة من رواسب الروافد.

يتم نقل معظم الرواسب داخل الخزانات إلى نقاط الترسيب عن طريق ثلاث عمليات: ١- نقل المواد الخشنة كحمولة على طول رواسب القمة، ٢- نقل الرواسب الناعمة في تيارات الكثافة ذات العكارة العالية، و ٣- نقل الرواسب الناعمة على أنها جريان غير طبقي، ونظراً لأن الخزانات تحتوي عادة على

شواطئ طويلة فيما يتعلق بمساحة سطحها، يمكن أن يكون تآكل خط الشاطئ وانهيار المنحدر مهماً في بعض المواقع، حيث تعكس كل عملية من هذه العمليات أنماط الترسيب، ويمكن أن يساعد تفسير أنماط الترسيب في تحديد أشكال النقل النشطة، خاصة في حالة تيارات الكثافة التي تنقل الرواسب إلى السد لإنتاج رواسب بُحيرية طينية على شكل آسفين.




**Source:** Modified from (Morris and Fan, 2009, p. 272).

**شكل (٣)** : مناطق الترسيب الرئيسية في الخزانات.

يمكن تقسيم مناطق الترسيب الطولية في الخزانات إلى ثلاث مناطق رئيسية كما هو موضح في الشكل (٣)، حيث تتوافق رواسب القمة مع رواسب الدلتا التي تستقر بسرعة، بينما تتوافق رواسب القمة نهاية مجرى النهر مع رواسب القاع نهاية المجرى في الخزان. تمثل رواسب المقدمة وجه الدلتا التي تتقدم إلى الخزان ويتم تمييزها عن رواسب القمة بزيادة الميل والتناقص في حجم الحُبيبات، بينما تتكون رواسب القاع من مواد دقيقة الحُبيبات نتيجة الإنخفاض في معدل سرعة الترسيب مثل الطين والطين الغريني، وتترسب خارج الدلتا بفعل تيارات العكارة أو

التدفق غير متماسك. ويمكن أن تشمل أيضا المواد العضوية الأصيلة التي تنتجها الطحالب أو النباتات المائية داخل الخزان.

في حين أن رواسب الدلتا قد تحتوي على كل من المواد الخشنة والناعمة، إلا أن رواسب القاع تتميز بالحُبيبات الناعمة، ومع ذلك فإن تدفقات الروافد، وعمليات السحب من الخزانات، وانهيار المنحدرات، والفيضانات الشديدة يمكن أن تؤدي جميعها إلى نقل مواد أكثر خشونة إلى المناطق التي تسود فيها المواد ذات الحُبيبات الدقيقة، مما يؤدي إلى طبقات من الرواسب أو اختلافات محلية في حجم الحُبيبات.

## أ- أنماط الترسيب على القطاع الطولي:

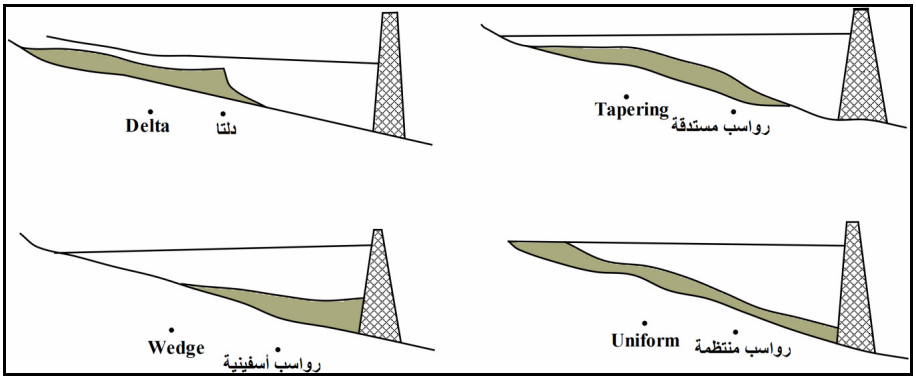
الترسيب على القطاع الطولي هو سمك عمود الطمي على طول إمتداد قاع الخزان، وتختلف أنماط الترسيب على القطاع الطولي بشكل كبير من خزان إلى آخر، حيث أنها تتأثر بشكل الحوض، خصائص الفيضان وحجم الرواسب، وتشغيل الخزان.

وقد صنف موريس و فان الترسيب (Morris and Fan, 2009) إلى أربعة أنماط اعتماداً على خصائص الرواسب وتشغيل الخزان (شكل ٤):

- **رواسب الدلتا Delta deposits:** تحتوي على الجزء الأكثر خشونة من حمولة الرواسب (> ٠,٠٦٢ مم)، والتي تم ترسيبها بسرعة في منطقة الجريان، بالإضافة إلى أنها تحتوي أيضاً على جزء كبير من الرواسب الناعمة مثل الطمي.
- **رواسب على شكل أسفيني Wedge-shaped deposits:** نتيجة لترسيب النهر حمولته أمام السد، ومن ثم تزايد طاقته، يتجه المجرى إلى تخفيض درجة انحداره بتعميق مجراه في شكل أسفيني Wedge، بمعنى أن يتزايد عمق النحت

خلف السد مباشرة، ويقل بالتقدم صوب المصب (محمد محمود طه، ١٩٨٨، ص ٤٠)، ويستمر هذا التغيير في انحاء قاع المجرى بمعدل متناقص حتى يحقق النهر اتزانا بين حجم ايراده من المفتتات وبين السرعة المطلوبة لنقل هذه الحمولة، فتصبح المفتتات أدق فتتحرك في اتجاه المنبع. يحدث هذا النمط عادة من خلال نقل الرواسب الدقيقة إلى السد بتيارات العكارة، كما توجد رواسب على شكل أسفيني في خزانات صغيرة ذات تدفق كبير من الرواسب الناعمة، وفي خزانات كبيرة تعمل عند مستوى منخفض من المياه أثناء حدوث الفيضان، مما يتسبب في نقل معظم الرواسب إلى جوار السد.

- **الرواسب المستدقة Tapering deposits:** تحدث عندما تصبح الرواسب أقل حجما، فتتحرك تدريجياً نحو السد. هذا هو النمط الشائع في الخزانات الطويلة التي عادة ما تكون عند مستوى تخزين عالي، ويعكس الترسيب التدريجي للمفتتات تحركها نحو السد.
- **رواسب موحدة / منتظمة/ متماثلة Uniform deposits:** هي غير مألوفة، ولكنها تحدث. فالخزانات الضيقة ذات التقلبات المتكررة في منسوب المياه وحمولتها من الرواسب الناعمة يمكن أن تنتج أعماق لرواسب منتظمة.




**Source:** Modified from (Morris and Fan, 2009, p. 273).

**شكل (٤) :** أنماط الترسيب على القطاع الطولي في الخزانات، يمكن أن توجد أنماط متعددة في وقت واحد في مناطق مختلفة من الخزان نفسه.

**ب- أنماط الترسيب على القطاع العرضي:**

الترسيب على القطاع العرضي هو سمك طبقات الترسيب في الخزان، والتي يتوالى ترسيبها مع الفيضانات منذ بدء عملية التخزين، حيث يتم تركيز الحمولة في أعمق جزء من القطاع العرضي، مما يؤدي إلى ترسبات لها سطح شبه أفقي بغض النظر عن شكل القطاع العرضي الأصلي. عند ملاحظة الإختلافات في هذا النمط، يمكن تفسيرها عادةً بظواهر مثل تدفق الرواسب المحلية من أحد الروافد أو نحتها عند الانحناءات أو تآكل القناة أثناء خفض منسوب المياه Drawdown، وتدفق المياه Flushing.

هناك ثلاثة أنواع من العمليات تساهم في تركيز الرواسب في أعمق جزء من القطاع العرضي، وهي: ١- تيارات الكثافة المضطربة تنقل وترسب الحمولة على القطاع الطولي Thalweg، ٢- التركيز الرأسي اللوغاريتمي/ المنحنى اللوغاريتمي Logarithmic vertical داخل عمود المياه يركز الحمولة العالقة في أعمق جزء من القطاع العرضي، ٣- إذا تم توزيع الحمولة العالقة بشكل موحد في جميع أنحاء القطاع العرضي واستقر عمودياً؛ فإن ترسيب الحمولة سيكون متناسباً بشكل مباشر مع عمق المياه، ستنتج هذه العملية الثالثة نمط رواسب أقل تركيزاً بكثير عن الأنماط التي لوحظت في الخزانات، وتشير إلى أهمية أول عمليتين في تركيز الرواسب. ستختلف الأهمية النسبية لهذه العمليات من خزان إلى آخر، لكن تيارات الكثافة ذات العكارة العالية ربما تكون ذات أهمية أكبر في شرح توزيع الرواسب الناعمة داخل الخزان مقارنة بما كان معترفاً به عموماً.

**ثانياً – الإرساب الدلتاوي في الخزانات الدائمة Delta Deposits :**

يشكل الإرساب الدلتاوي غالبية تراكم الرواسب في الخزانات الصغيرة ذات الكفاءة المنخفضة في حجز الرواسب حيث تسود المواد الخشنة، أما بالنسبة للخزانات الكبيرة ذات الكفاءة العالية في حجز الرواسب يشكل الإرساب الدلتاوي جزءا صغيراً من إجمالي تراكم الرواسب، نظراً لأن الإرساب الدلتاوي يتركز في

الروافد الضحلة لأعالي الخزانات، حيث يميل العرض إلى أن يكون أضيق حجماً ويكون حجم التخزين صغيراً (USSD, June 2015, p. 18). ويعد الإرساب الدلتاوي العنصر الأكثر وضوحاً في عملية الترسيب في الخزانات، ويمكن أن يمتد إلى أعلى النهر خلف الخزان.

## ١) أنماط الترسيب في الدلتا:

تتميز دلتا الخزانات الدائمة بالخصائص التالية (Fan and Morris, 1992):

- هناك تغيير مفاجئ بين منحدر رواسب القمة، ورواسب المقدمة.
- جزيئات رواسب القمة أكثر خشونة من رواسب المقدمة، وهناك تغير مفاجئ في قُطر الجسيمات بين رواسب القمة وباقي الرواسب.
- يعتمد ارتفاع منطقة الإنتقال من رواسب القمة إلى رواسب المقدمة على قاعدة تشغيل السد وارتفاع الحوض.

في الخزانات العميقة التي تم تشغيلها على مستويات مختلفة، قد تتشكل دلتا بارزة / مستقلة/ واضحة المعالم على مستويات مختلفة من المياه، على العكس من ذلك في الخزانات الطويلة والضيقة، قد يكون قطاع الأعماق Bathymetric profile المرتبط عادة بالإرساب الدلتاوي مختفياً، ولكن لا تزال هناك منطقة تتميز بالتحول السريع في حجم الحُبيبات؛ مما يشير إلى الحد الأدنى لترسيب المواد الخشنة.

تنمو دلتا الخزانات دائما في اتجاه المصب، وفي بعض الحالات قد يكون نموها الرأسي والبعدي كبيرا أيضا، حيث يتم تركيز الرواسب في البداية في أعمق جزء من كل مقطع عرضي، مما يخلق رواسب لها سطح شبه أفقي بغض النظر عن شكل المقطع العرضي الأصلي، ونظرا لأن منطقة المنبع من الخزان ضحلة ولديها سعة تخزين قليلة، فقد يكون النمو الطولي للدلتا سريعا في البداية (Fan and Morris, 1992). في خليج غوانتينغ في الصين تقدمت الدلتا في البداية في اتجاه مجرى النهر بمعدل ٣,٠

كم/سنة واستمرت في نفس الوقت في اتجاه المنبع بمعدل ٢,٦ كم/سنة، ومع تقدم الدلتا في اتجاه مجرى النهر إلى أجزاء أعمق وأوسع من الخزان يتباطئ معدل النمو الطولي. كما يمكن أن يؤدي الترسيب أيضا إلى انكشاف الدلتا فوق حوض الخزان، وبعد ذلك يمكن أن تنمو النباتات وتؤثر على تكوين القناة من خلال الدلتا، وفي بعض الحالات قد تتشكل النباتات على رأس الدلتا مما يؤدي إلى تكوين قنوات على طول هوامش الخزان شكل (٥) لبحيرة ميلز Mills التي تقع على نهر إلوها Elwha في الولايات المتحدة الأمريكية.

**Source:** United States Bureau of Reclamation, March 2019

**Source:** USGS

**شكل (٥) :** منظر للنباتات والقنوات التي تشكلت على دلتا بحيرة ميلز على نهر إلوها، واشنطن.

ومع تقدم الدلتا في اتجاه مجرى النهر، تتقدم رواسب القمة Topset، ورواسب المقدمة Foreset على رواسب القاع Bottom-set beds مسبقا من الرواسب الدقيقة. هذه العملية يمكن أن تخلق تطابق عدسي Lenses of coarse متناوب من المواد

الخشنة والدقيقة، حيث ترسب المواد الخشنة في أعماق الخزان والتي قد تكون غطت في وقت لاحق من قبل المواد الدقيقة.

### ٢) منحدر رواسب الدلتا :

معرفة انحدار رواسب الدلتا يمكن من التنبؤ بمدى الترسيب في الدلتا وما يترتب على ذلك من ارتفاع في مستويات الفيضان فوق حوض التخزين. في البداية، يمتد منحدر الدلتا إلى أعلى من نقطة المحور المحددة على أنها تقاطع رواسب مجموعة القمة ورواسب مجموعة المقدمة للدلتا (شكل ٣). في الخزان الممتلئ بالرواسب، وعندما تمتد رواسب الدلتا إلى السد، فإن قناة المفيض ستحدد النقطة المحورية. انحدار الدلتا هو عامل رئيسي يحدد طول تراكم رواسب الدلتا في اتجاه المنبع و حجم الرواسب التي يمكن تخزينها (Strand and Pemberton, 1987).

### ٣) منحدر رواسب المقدمة Foreset Slope :

غالبا ما يتم تقدير منحدر رواسب المقدمة للدلتا من العلاقات التجريبية، ولكن هذه الطريقة ليست دقيقة بشكل خاص ما لم يتم اشتقاق العلاقة التجريبية من الخزانات المماثلة، على سبيل المثال أفاد ستراند و بيمبرتون (١٩٨٧) أن متوسط منحدرات رواسب المقدمة للدلتا التي تم رصدها أثناء إعادة المسح في الخزانات من قِبل مكتب الإستصلاح الأمريكي هو ٦,٥ أضعاف منحدر رواسب القمة للدلتا، ولكن بعض الخزانات يكون منحدر رواسب المقدمة للدلتا أكبر من ذلك ( Strand and Pemberton, 1987)، على سبيل المثال منحدر رواسب مقدمة دلتا بحيرة ميد Lake Mead الواقعة على نهر كولورادو بالولايات المتحدة الأمريكية ١٠٠ مرة منحدر رواسب القمة للدلتا، وعلى النقيض من ذلك فإن الخزانات الموجودة في أنهار الصين ذات الحمولة الطينية الثقيلة يبلغ منحدر رواسب المقدمة للدلتا فيها ١,٦ ضعف منحدر قاع النهر الأصلي (Wuhan College of Hydropower, 1982). وبشكل عام؛ فإن الدلتا المكونة من مواد خشنة (الرمال والحصى) سيكون لها ميل

لرواسب المقدمة شديد الإنحدار Foreset slope، في حين أن الدلتا التي تحتوي على مواد دقيقة الحُبيبات سيكون لها منحدرات أقل بكثير ولوحظت أنماط مماثلة في دلتاوات الأنهار التي تصب في المحيط، فالرواسب الرملية التي تتراكم عند مصب ريو السنغال لها منحدر تحت المياه حوالي ٠,٠١٧، ما يقرب من ٣٠ مرة أكثر انحدارا من رواسب دلتا المسيسيبي حوالي ٠,٠٠٠٧ (Coleman, 1982).

## ثالثاً – الخلاصة والإستنتاجات :

من العرض السابق يتضح أن أغلب عمليات النحت والنقل المائي ينشط أثرها في المجاري النهرية خلف سدود التخزين الدائم، بينما يضعف أثر عمليات الترسيب نتيجة لإحتجاز حمولة النهر من المفتتات أمام السد، حيث يتضح أثر عمليات الترسيب في أحواض التخزين أمام السدود، وتمثل احواض تخزين السدود الدائمة مستوى قاعدة محلي صناعي Local Base Level لمجرى النهر أمامها، وعلى هذا فإن الحمولة الواردة في تيار النهر يتم ترسيبها في هذ المستوى المحلي.

وتبدو عملية الترسيب في أحواض تخزين السدود غاية في التعقيد، إذ تختلف ديناميكية الترسيب في أحواض تخزين السدود الدائمة من وقت لآخر؛ إذ تتم عملية الترسيب وفق مجموعة ديناميكيات في ارتباط وثيق بتوزيع، وتطور توزيع، طاقة النهر وكفاءته في حوض التخزين. فطاقة النهر تتناقص بالتقدم صوب جسم السد، كما أنها تتناقص بالإبتعاد عن مجرى النهر القديم المغمور بالمياه، كذلك تناقص كلما تزايد حجم وعمق كتلة المياه المخزنة في حوض التخزين.

وبتطور هذا التوزيع الأفقي والرأسي لطاقة النهر وكفاءته بتطور مناسيب امتلاء حوض التخزين بمياه النهر، ويساهم توزيع وتطور الطاقة والمرتبط بتطور مناسي الملء في تفوق ديناميكية ترسيب معينة على أخرى.

# المراجع

## أولاً – المراجع باللغة العربية:


١. سباركس، ب. و.، "الجيمورفولوجيا"، ترجمة ليلى محمـــد عثمـــان، ١٩٨٣، مكتبة الأنجلو المصرية، القاهرة.

٢. محمد محمود طه، ١٩٨٨، الآثار الجانبية للسد العالي، رسالة ماجستيرغير منشورة، كلية الآداب، جامعة عين شمس، القاهرة.


## ثانياً – المراجع باللغة الإنجليزية:


1. Brown, C.B., 1944, "Discussion of Sedimentation in Reservoirs", by B. J. Witzig, Transactions, ASCE, Vol. 109, Paper No. 2227, pp. 1080-1086.
2. Coleman, J.M., 1982, Deltas: Processes of Deposition and Models for Exploration. International Human Resources Corporation, Boston.
3. Fan, J., and Morris, G.L., March 1992, "Reservoir sedimentation. I: Delta and Density Current Deposits", Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 118, No. 3, pp. 354-369.
4. Ghomeshi, M., 1995, Reservoir Sedimentation Modeling, PhD Thesis, Department of Civil and Mining Engineering, University of Wollongong, Wollongong, Australia, 1995.
5. Jaroot, E.A.KH., 2009, The Effect of the Sediment Accumulation in Reservoirs: Case of the Roseires, Master Thesis, Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, University of Khartoum, Khartoum, Sudan.
6. Morris, G.L. and Fan, J., 2009. Reservoir sedimentation handbook: design and management of dams, reservoirs, and watersheds for sustainable use, Electronic Version, Ver. 1.01, McGraw Hill Professional.
7. Palmieri, A., Shah, F., Annandale, G.W. & Dinar, A., 2003. Reservoir Conservation, Volume 1, the RESCON Approach. Washington: World Bank.
8. Strand, R.I., and Pemberton, E.L., 1987. "Reservoir Sedimentation," In Design of Small Dams. U.S. Bureau of Reclamation, Denver.
9. United States Bureau of Reclamation, March 2019.
10. United States Society on Dams (USSD), 2015, Modeling Sediment Movement in Reservoir, USA, 25.
11. White, R., 2001, Evacuation of Sediment from Reservoir A southern African Perspective, WRC, Report, No. 297.
12. Wuhan College of Hydropower, 1982. Fluvial and Sedimentation Engineering. Water Resources Publishing, Beijing, Chinese.