الفصل الثالث عشر

السدود الترابية Earth Dams

مقدمة:

السدود الترابية التي تشمل كلاً من سدود الـردم الترابـي (Earth Fill) والـردم الصخري (Rock fill) المستخدمة للمواد الطبيعية المتاحة مثل التربة الرملية، الطفلية والصخرية مع أدنى أعمال لإنشاء الدعائم. تلك تسمى كذلك بالسدود الترابية الداعمة (Embankment Dams). بينما كانت السدود القديمة المعروفة صغيرة الحجم ومصنوعة من مواد التربة، فإن السدود الأخيرة أنشئت بأحجام أكبر ومن مواد البناء وخاصة من الخرسانة. ولكن مع التطوير الحديث نحو ترشيد الأداء الهندسي في كل من التصميم والإنشاء وكذلك لإتاحة معدة إزالة التربة، فقد أصبح هناك توجه كبير نحو إنشاء السدود الترابية بديلاً عن السدود الخرسانية. بجانب الميزة الكبيرة نحو تأسيس السدود الترابية على التربة العادية الجيدة، فإن تلك السدود أقل في تكلفة الإنشاء مقارنة بسدود التثاقل وسدود العقد، ويمكن أن تكون بنفس الارتفاع أو أعلى، مع الاستفادة من المواد المتاحة للاستخدام في الإنشاء وهي مناسبة تحديدًا للمناطق الزلزالية (seismic) بسبب توافقها الجيد مع الزلازل. ولكن، إنشاء السد الترابي هو عمل تخصصي يتطلب مهارات هندسية عالية والحرص حيث أن أى هبوط يمكن أن يؤدي بسهولة إلى انهيار السدود. من أمثلة السدود الترابية الضخمة سد (Nurek) في الاتحاد السوفيتي (سابقًا) ارتفاع ٣٠٠متر، سد ميكا في كندا بارتفاع ٢٤٢ متر متر، سد أوفيللي في أريكا بارتفاع ٢٣٥ متر وسد نهيري في الهند بارتفاع ٢٦٥متر.

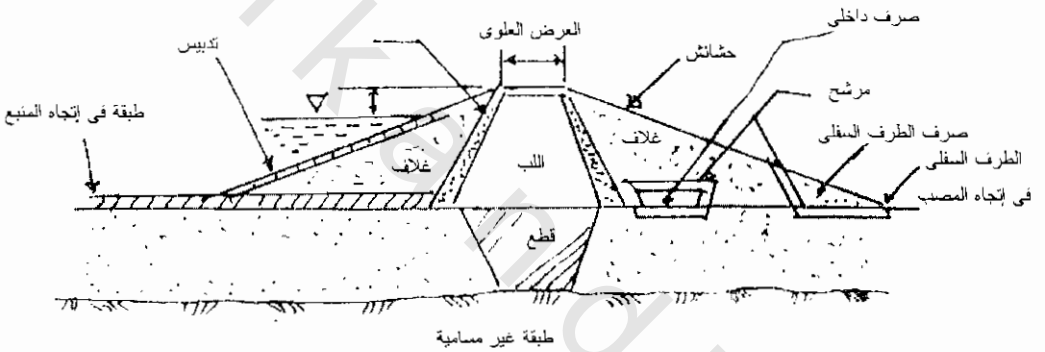
٢- مكونات السدود الترابية ووظائفها:

Components of Earth Dams and Their Functions:

الأجزاء المكونة للسد الترابي ووظائفها سيتم تناولها كالآتي انظر الشكل (١٣/١).

القلب أو اللب (Core) والذي يسمى (Hearting) وهو حائط مركزى مانع لنفاذ المياه عادة من الطفلة ومادة ناعمة والذي يمتد من مستوى سطح الأرض حتى أعلى منسوب للفيضان. وهو يحجز التدفق الحر للماء في مقطع السد.

الغلاف (Sheell) ويسمى كذلك الغطاء (Casing) وينشأ من مواد أكثر خشونة عن حائط اللب ويمتد في شكل الكتف على كلا جانبي اللب. وهو بذلك يوفر الدعم الإنشائي للب ويوزع الحمل بالتساوي على الأساس.



شكل (١٣/١) مكونات أجزاء السد الترابى (نوع المناطق)

<u>مرشح الانتقال (Transition filter):</u> يوضع ما بين اللب والغلاف، مرشح الانتقال يمنع حركة المادة الحبيبية الناعمة في اللب إلى الفراغات في مادة الغلاف، ذات الحبيبات الخشنة.

<u>الطبقة في اتجاه المنبع: Up stream Blanket</u> وهذه طبقة من مادة غير مسامية (عادة من الطفلة) موضوعة إلى الخارج على مستوى الأرض الطبيعية على الجانب في اتجاه المنبع (Up stream) وهي تزيد من مسار الماء المرتشح أو المتحلل (Percolation) وذلك لخفض ضغط التسرب.

القطع (Cut off): القطع هو حاجز غير مسامي(Impervious) يتكون في مركز القاعدة لتربة السد ويمتد من اللب إلى الأساس إلى العمق حيث الوصول إلى الطبقة غير المسامية. نظرًا لأن القطع يعمل على إيقاف تدفق الماء وزيادة مسار الرشح، فإنه يكون مناسبًا من الناحية العملية حيث يكون الأساس بنفسه غير قادر على المقاومة في حالة التسرب.

الصرف الداخلي (Internal Drain)

قادر على حمل أي تسرب يخترق لب القطع بعيدًا The core of The cut off. وهو كذلك يمنع التشبع للجزء العلوي للغلاف في اتجاه المصب بسبب سقوط الأمطار. وهو يتطلب مرشح حماية لمنع الحمل للجسيمات بواسطة الماء المتحرك نحو نظام الصرف وبذا انسدادها.

الصرف عند طرف السطح في اتجاه المصب (Toe Drain):

هذا الصرف يتم توفيره عند طرف السد تحت التيار ويقوم بنفس الغرض مثل الصرف الداخلي. وهو يتكون من مرشح متدرج من مادة دقيقة نسبيًا قرب محيط الصرف ومادة خشنة قرب المركز الذي يتجمع فيه الماء المتسرب ويتحرك إلى النقطة حيث يمكن صرفه بأمان. وهو يمنع عمليًا حدوث مستنقع أو أرض موحلة.

يتم تجهيز دكة من الحجارة (Rip Rap) للحماية على الأسطح المائلة وذلك في اتجاه المنبع عمومًا، وأحيانًا في اتجاه المصب للسد وذلك لحماية الميول من تأثيرات الموج والأمطار .. إلخ. تتكون البركة الحجرية بسمك من ٠,٦سم إلى ١ متر على طبقة من الزلط السميك بسمك ٣٠سم نوع من الحشائش يسمى (Sod) ينمو على السطح المائل في اتجاه المصب لحمايته ضد غسيل المياه الذي يسببه السقوط الغزير للأمطار وبذا منع تكون سراديب ومسارات على الميل.

٣- تقسيم السد الترابي: (Earth Dam Classification)

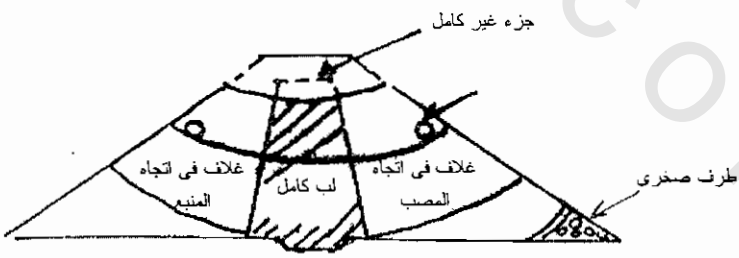
السدود الترابية تقسم عمومًا على أساس طرق الإنشاء المستخدمة مثل سدود الملء بالدلفنة أو الترقيق (Rolled Fill) والسدود بالملء الهيدروليكي.

أ- سدود الملء بالدلفنة أو الترقيق(Rolled Fill Bank)

في سدود الملء بالدلفنة أو الترقيق، يتم إنشاء دعامات الأكتاف في شكل طبقة متتالية مدمجة ميكانيكيًا. يتم تكوين المواد المناسبة من حفر الحفر وتكويمها وبعد إضافة الماء يتم نقلها إلى موقع الإنشاء بواسطة معدة تحريك التربة. يتم بعد ذلك نشرها بواسطة البلد وزارات في طبقات سمك ١٥-٤٥سم، وتوضع على أعلى محتوى من الرطوبة ودمجها جيدًا ثم ربطها والصاقها بالطبقة السابقة بواسطة الهراسات الميكانيكية. الملء بالدلفنة أو التدقيق هو المستخدم عادة في إنشاء السد الترابي.

ب- السدود بالملء الهيدروليكي(Hydraulic Fill Dams)

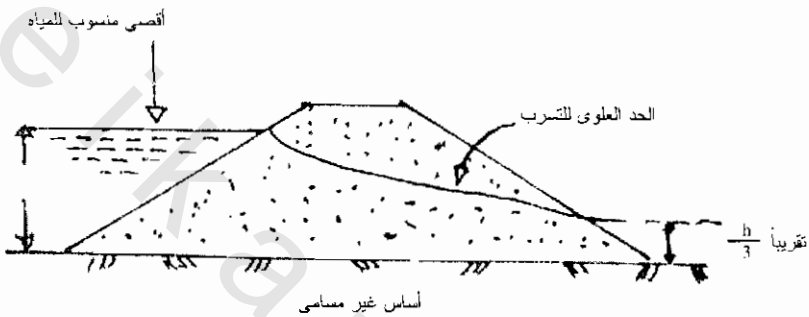
في سد الملء اليهدروليكي، يتم حفر المواد، ونقلها ووضعها بالطرق الهيدروليكية للمسيلات (Flumes) الحاملة للمادة المخلوطة بالماء عند حفره الإمداد بمواد الردم يتم وضعها على طول الطرف الخارجي للكتف الشكل (١٣/٢). عمومًا يتم ضخ المادة وغسيلها بواسطة تلك المسيلات. الوحل (Slush). الناتج يتم صرفه خلال المخارج في المسيلات نحو طول السد على فواصل متساوية. بينما ترسب المواد الخشنة للوحل عند الطرف الخارجي، فإن المواد الدقيقة ترسب نحو المركز مكونة لب مركزي غير مسامي. لا يتم عمل الدمج. بسبب النقص في التحكم نحو وضع المادة، ضعف الصرف والترسيب الناتج، فإنه يوجد الكثير من حالات الانهيار لهذا السد. لذلك، فإنه لا يوصي بإنشاء السد بطريقة الملء الهيدروليكي.



شكل (١٣/٢) سد الملء الهيدروليكى للسد

جـ- السد الترابي المتجانس (Homogenous Earth Dam)

كذلك يسمى الدعامة البسيطة (Simple embankment)، نوع السد الترابي هذا ينشأ أساسًا من نوع واحد من المادة، وهي نوع الطفلة الرملية (Sandy Claycy) منساب للأساس غير المسامي، السد له ميول جانبية مائلة نسبيًا لضمان الاستقرار. ولكن بعض التسرب سوف يخرج على الميل في اتجاه المصب إلى ارتفاع تقريبًا ثلث عمق الخزان بصرف النظر عن استواء وعدم نفاذيته التربة الشكل (١٣/٣). نوع السد هذا يكون محدودًا للسدود الصغيرة ذات الارتفاع حتى ١٥ متر.



شكل (١٣/٣) سد ترابى متجانس

بشكل المحددات ذات العلاقة، فإن السد الترابي المتجانس ثم استبداله حاليًا بالسد المطور المتجانس (Modified Homogenous Dam) الذي له الخواص الرئيسية للصرف الداخلي المطور والمؤثر، في الجزء في اتجاه المصب وقريبًا من طرف السد نحو المصب رغم توفير بعض الإجراءات مثل ترشيح الصرف، والطرق في اتجاه المصب المملوءة بالصخر (Rock fill Toe) وأنبوب الصرف. فإن تبني مثل هذه الإجراءات يسمح بزيادة شدة الميل وبالتالي زيادة ارتفاع السد.

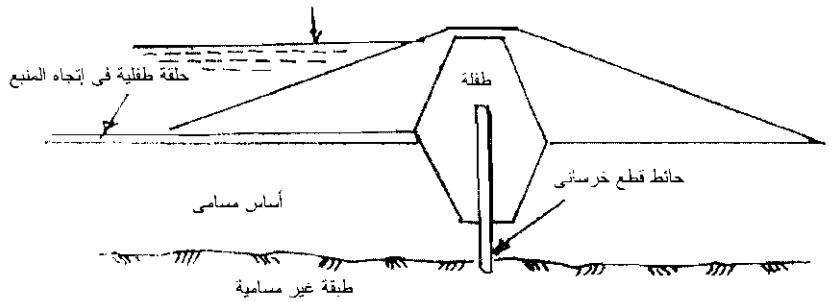
٤- السد الترابي النطاقي (Zoned Earth Dam)

السد الترابي النطاقي يسمى كذلك الدعامة المنطقية (Zoned Embankment)، السد يستفيد باستخدام أكثر من نوع واحد من مواد التربة أي الطفلة، الرمل الدقيق، الطين

الرملي. يتم تقسيم مقطع السد إلى مناطق شكل (١). المنطقة المركزية تعمل من لب طفلي غير مسامي نسبيًا لمنع حدوث التسرب، بينما المناطق الإنتقالية لغطاء كلا السطحين للب السد لمنع حدود مسارات أنبوبية خلال الشقوق المكونة في اللب. الأغلفة الخارجية (Enveloping outer shells) تكون من مكونات غير مسامية، من التربة الغرينية (الطين الخشن) (Silty) أو من التربة الرملية الطينية (تربة صفراء Loamy) ويوفر الاستقرار على وضعه على الميل المناسب، النفاذية تزداد عمومًا من المركز نحو الميول الجانبية. في الحقيقة، بصرف النظر عن اللب المركزي غير المسامي، فإن إجمالي السد يكون جزء من نظام صرف ذو مناطق انتقالية التي تعمل كمرشحات، بينما الغلاف في اتجاه المصعب يسمح بمرور الماء المرشح نحو الصرف الداخلي. هذا بجانب أنه يوجد كذلك توفير مرشحات عند طرف الصرف في اتجاه المصب للتسربات قرب طرف السد في اتجاه الصرف. بسبب تلك المميزات فإن نوع السد هذا يستخدم عادة حالياً.

٥- السد الترابي من نوع الغشاء الحاجز: Diaphragm Type of Earth Dam

هذا النوع من السد الترابي هو حائط ليس مركزي من البناء السميك أو الخرسانة والذي يسمى الغشاء الحاجز، والذي يمتد نحو الطبقة المسامية تحت الأرض ويعمل كحاجز ضد تسرب المياه، بينما المادة المسامية المنفذة المحيطة مثل مواد التربة والتربة توفر الاستقرار. أحياناً، قد يتضمن الغشاء جدار القطع الخرساني (Concrete Cut off wall) ذو المقطع الرقيق في اللب الطفلي (Clay core) ومرتبط بالطبقة الصخرية أو المادة غير المسامية شكل (١٣/٤). يتم توفير طبقة من الطفلة على السطح المواجه للمنبع لخفض الفقد بالتسرب بسبب عدم التجانس لمقطع السد وحدوث تشققات في جدار الغشاء الحاجز بسبب هبوط الدعائم والأساس، فإن سد الغشاء لا يتم استخدامه حاليًا.



شكل (١٣/٤) سد ترابى من نوع الغشاء الحاجز

الخط الباطني الخاص بالمياه الجوفية: (Phreatic Line)

الخط الباطني هو خط التدفق العلوي الذي يفصل المنطقة المشبعة عن المنطقة غير المشبعة حيث أسفله يوجد ضغط هيدروستاتيكي (ضغط الماء الساكن) في مقطع السد. على طول الخط الباطني، يوجد الضغط الجوي. هذا الخط الذي لا يتأثر وضعه بوجود الأساس المسامي، يكون دائمًا عمودي على السطح المواجه للمنبع والذي يمثل خط متساوي الجهد (Equipotential) بنسبة ١٠٠%، الخطوط المتساوية الجهد التالية تقابل الخط الباطني بفواصل ارتفاع متساوية (Δ h). بالمثل، فإن خطوط التدفق التالية يتم تحديدها على حالة تساوي المسافة بين خط التدفق مع ذلك ما بين خطوط الجهد (Pontential Lines) وبذا تكوين سلسلة من المربعات شكل (١٣/٥).

٦- تحليل شبكة التدفق (Flow Net Analysis)

تحدث كمية كبيرة من التسرب في السد الترابي خلال الأساسات وفي جسم السد خلال المسام ومواد التربة الطفلية المانعة للنفاذ نسبيًا. لتعيين كمية التسرب. فإنه يكون من الضروري تعيين إجمالي التدفق والذي يتطلب تكامل معادلة لابلاس (Laplace Equation) المبنية على قانون داريس (Daryś law) لتسرب المياه خلال التربة. لذلك فإننا سوف نبدأ بمناقشة نظرية التسرب وأهمية معادلة لابلاس قبل التعامل مع التحليل الإجمالي للتدفق.

نظرية التسرب أو الارتشاح (Seepage Theory):

قانون داريس لتسرب المياه خلال التربة يعبر عنه العلاقة التالية:

$$Q = K\dot{I}A \quad (1)$$

حيث:

Q = معدل تدفق التسرب أو الارتشاح.

$\dot{I}$ = التدرج في الطاقة (أي الفقد في الضغط الرأسي في وحدة طول الارتشاح خلال التربة).

K = معامل النفاذية

A = مساحة مقطع التربة الذي خلاله يحدث الارتشاح للماء في التربة المتجانسة، K تكون ثابتة عند أي نقطة في كتلة التربة. لذلك فإن معادلة التدفق عند أي نقطة يمكن التعبير عنها في الاتجاهات X ، Y كالآتي:

$$Q_x = K\dot{I}_x A_x \quad (2\text{-a})$$

$$Q_y = K\dot{I}_y A_y \quad (2\text{-b})$$

لذلك

$$I_x = \frac{\partial h}{dx} \quad (3\text{-a})$$

$$I_y = \frac{dh}{dy} \quad (3\text{-b})$$

(العلاقة السالبة تبين أن الفقد في الضغط الرأسي يزداد بزيادة طول عينة التربة).

استبدال المعادلة (٣) بالمعادلة (٢) والحل لسرعة التدفق فإننا نحصل على

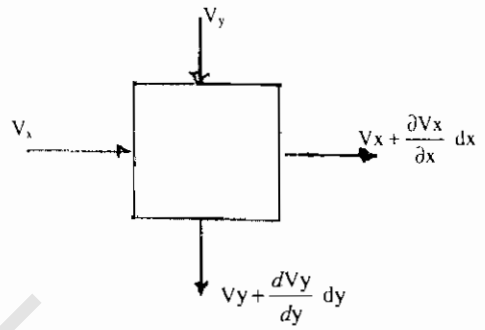
$$V_x = \frac{Qx}{Ax}$$

$$V_x = \frac{K\,\partial\, h}{\partial x} \quad (4\text{-a})$$

$$V_x = \frac{-\,K\,\partial h}{\partial y} \quad (4\text{-b})$$

في حالة التدفق الثابت لا يوجد تغير في حجم الماء في مسام التربة ومعدل تدفق الماء إلى عنصر التربة يجب أن يساوي معدل التدفق الماء إلى الخارج.

افترض عناصر صغيرة من التربة ذات الأبعاد dy, dx وسمك واحد شكل (١٣/٥)



شكل (١٣/٥) تدفق البعدين خلال كتلة التربة

التدفق الداخل (In Flow) = Vx dy + Vy dx (5)

التدفق الخارج (out Flow) =

$$\left(Vx + \frac{\partial Vx}{dx}dx\right)dy + \left(Vy + \frac{\partial Vy}{\partial y}\right)dx \quad (6)$$

حيث أن التدفق الداخل = التدفق الخارج في حالة التدفق الثابت، وعند تساوي المعادلة (٥) مع المعادلة (٦) فإننا نحصل على

$$\frac{\partial Vx}{\partial x} + \frac{\partial Vy}{\partial y} = 0 \quad (7)$$

باستبدال المعادلة (b – ٣) في المعادلة (٧) فإننا نحصل على

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (8)$$

المعادلة (8) تعرف بمعادلة (Laplace) والتى يمكن التعبير عنها فى الشكل العادى جداً لتكون

obeikandl.com

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \qquad (9)$$

حيث:

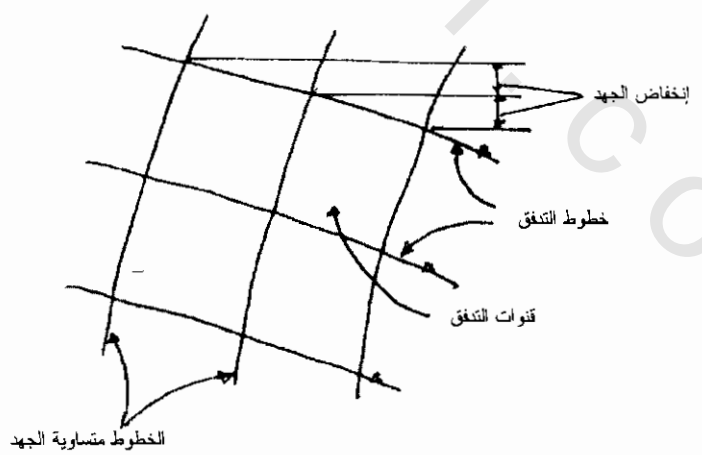
$\varphi = -Kh$ والذى هو التدفق المسبب للجهد.

فى حالة ثبات K، فإن φ هى مقياس مباشر لضغط التسرب.

دلالة معادلة لابلاس:

معادلة لابلاس كما تم تناولها تمثل مجموعتين من المنحنيات، كل مجموعة محتوية على عدد نهائي من المنحنيات المتوازية تقريبًا، وكل منحنى للمجموعة الواحدة يتقاطع مع كل منحنى للمجموعة الأخرى عند زوايا قائمة. أحد مجموعات الخطوط تمثل مسارات التسرب (Trajectories of seepage) وتسمى خطوط التدفق (Flow Lines). ما بين خطى تدفق متجاورين توجد قناة التدفق التي ترسل جزء مثبت من إجمالي ١ك. المجموعة الأخرى تسمى الخطوط متساوية الجهد (Equnipotential lines) التي هي ببساطة كنتورات متساوية الضغط الرأسى الفرق بين أن من الخطوط المتجاورة متساوية الجهد هو فرق الضغط (Potential Drop) أو الفقد في الضغط الناتج كتدفقات مياه التسرب خلال قناة التدفق.

الإطار العام لخطوط التدفق والخط متساوي الجهد يسمى التدفق الشبكي (Flow Net) شكل (١٣/٦).



شكل (١٣/٦) صافى التدفق

خواص منحنيات شبكة التدفق (Properties of flow Net curves)

عند رسم شبكة التدفق للسد الترابي يتم ملاحظة الخواص الآتية للمنحنيات:

١- شكل وتتابع خطوط التدفق يمثل الانتقال التدريجي من واحد إلى آخر.

٢- خطوط التدفق والخطوط متساوية الجهد يجب أن يتقاطع كل منهم مع الآخر عند زوايا قائمة.

٣- خطوط التدفق يجب أن تبدأ وتنتهي عند زوايا قائمة بالنسبة لسطح الأرض في اتجاه المنبع واتجاه المصب على التوالي.

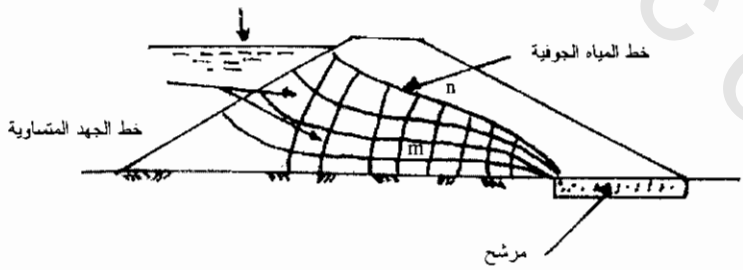
٤- في حالة عدم وجود طبقة في اتجاه المنبع (Up Stream Stratum) فإن خط التدفق يتبنى بالتدريج الشكل شبه البيضاوي.

٥- الخطوط متساوية الجهد يجب أن تبدأ وتنتهي عند زوايا قائمة لأول وآخر خطوط تدفق على التوالي.

٦- أي مربع تم الحصول عليه بتقاطع خطوط التدفق والخطوط متساوية الجهد يسمى الحقل (Field).

٧- في حالة الرسم الجيد للمنحنيات، فإنه يمكن رسم دائرة في كل حقل تمس كل الأجناب الأربع للحقول.

على ضوء الخواص السابقة، فإنه يمكن رسم خطوط التدفق والخطوط متساوية الجهد في شبكة التدفق في جسم السدود في الأساسات. الشكل (١٣/٧) يبين شبكة التدفق المرسومة لسد ترابي متجانس مع توفير مرشح صرف أفقي.

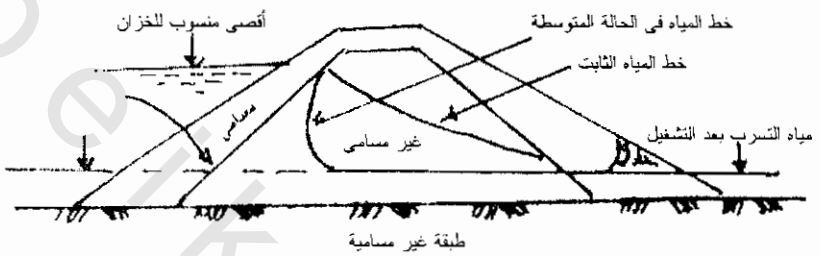


شكل (١٣/٧) صافى التدفق للتسرب خلال السد الترابى المتجانس بالمرشح الأفقى للصرف

الخط الباطنى الجوفى فى السد الترابى النطاقى:

Phreatic Line In Zoned Earth Dam

لتعيين الخط الباطنى الجوفى فى السد الترابى النطاقى، فإنه يمكن تطبيق طريقة كاساجراند (Casagrand's Method) ويمكن تحديد الخط الباطنى خلال اللب غير المسامى لحالة الاستقرار شكل (١٣/٨).



شكل (١٣/٨) خط المياه الجوفية فى السد الترابى النطاقى

الحالة الأولية للخط النطاقي تقابل حالة التناسب قبل امتلاء الخزان. مع امتلاك الخزان وقبل الوصول إلى مستوى الخزان الممتلئ تمامًا، فإن الخطوط الباطنية تمر خلال مرحلة متوسطة. الحالة المستقرة يتم الوصول إليها عند مستوى الامتلاء الكامل عند بداية الخط الباطني عند نقطة التقاطع لمستوى الخزان مع اللب غير المسامى وينتهي عند تقاطع ميل اللب في اتجاه الصب مع أدنى وضع لخط التسرب. رغم أن التربة قد تكون مشبعة بفعل الخاصية الشعرية فوق هذا الخط بما يرفع خط تشبع التسرب إلى جزء أسفل الخط الباطني.

يمكن الإشارة إلى أن وضع الخط الباطني يتوقف فقط على هندسة المقطع ويتوقف على نوع التربة ذات النفاذية المختلفة ولكن لها نفس نسبة النفاذية الأفقية إلى الرأسية. فمثلاً، لنفس مقطع السد، فإنه يتم تحديد الخط الباطني في حالة الاستقرار في كل من الطفلة وكذلك في الرمل رغم أن كمية التسرب تكون أعلى كثيرًا في حالة الرمال.

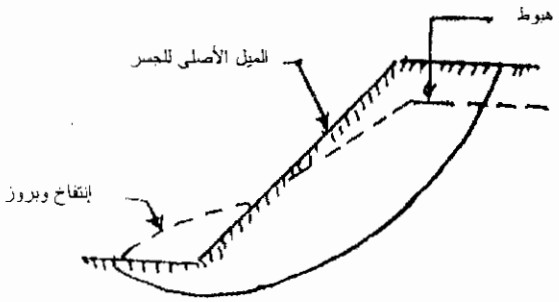
ضغط الثقب الدقيق (Pore Pressure):

كتلة التربة تشمل الجسيمات الصلبة، والفراغات المملوءة بالماء والهواء. عند تحميل كتلة التربة الرطبة بدون السماح للماء أو الهواء بالهروب، فإن جزء من الحمل يسبب التشويه اللدن لحبيبات التربة بدون تغير حجمهم الصلب ويسمى الإجهاد المؤثر (Effectives stress). جزء الحمل الباقي يحمل بواسطة الإجهاد في الماء والهواء المحجوز في الفراغات ويعرف بضغط ثقب الماء أو باختصار ضغط الثقب (Pore pressure). بسبب أن ضغط ثقب الماء يعتمد على قابلية الانضغاط للتربة المدمجة وكمية الهواء الموجودة فيه، فإنه ينتج ضغوط أكبر عند دمك التربة قريبًا من التشبع. ولذلك، يكون من المناسب عمليًا في إنشاء السد العالي الترابي الممتلئ دمك التربة الملتصقة مع الماء إلى أقصى أدنى محتوى من الرطوبة لأقصى كثافة جافة للمراقب (Proctory Dry Density).

يحدث ضغط تثبت كبير خلال وبعد إنشاء السد الترابي مثل امتلاء الخزان. في الحال مع إنشاء السد، تكون كتلة التربة تحت الضغط بسب الثقل الفوقي وبدون الصرف للتربة الرطبة المدمجة ونتيجة لذلك تحدث ضغوط صافية (Sizeable pure pressures). ولكن هذا يتم بتدرج تشتتها مع إعادة توزيع رطوبة التربة. مع امتلاء الخزان، فإن الماء يعود إلى الدخول في الفراغات ويحدث شكل آخر لضغط الثقب. في حالة استقرار حالة التسرب فإن الضغط الرأسي للثقب عند أي نقطة يساوي الضغط الهيدروستاتيكي بسبب ضغط الماء في الخزان أقل من فقد الضغط في التسرب خلال السد إلى هذه النقطة. ضغط الثقب يمكن إيجاده من شبكة التدفق بالفرق في الارتفاع بين نقطة معينة على حقل شبكة التدفق والنقطة المقابلة لتقاطع الخط متساوي الجهد مع الخط الباطني شكل (٧). هذا الفرق في الارتفاع سوف يقابل كذلك في الارتفاع الذي سوف يصل إليه الماء في الأنبوب البيزومتري (Piezometer) بفتحة عند m.

تحليل استقرار الميل: (Slope stability Analysis)

الانهيار العادي للسد الترابي يتكون من انزلاق كتلة ضخمة من التربة على طول السطح المنحنى شكل (١٣/٩).



شكل (١٣/٩) مقطع للإنهيار بالإنزلاق

لهذا فإن استقرار السد الترابي يتحدد بقدرته على مقاومة إجهاد القص الناتج من الأحمال المسلطة الخارجية مثل الخزان والزلزال ومن قوة الجسم الداخلية بسبب وزن التربة وميول السد. قوى الجسم الداخلية والخارجية تنتج كذلك إجهادات ضغط عمودية على جهد سطح الانزلاق، والذي يساهم في كل من قوة القص للتربة وكذلك لإحداث ضغوط الثقب (Pore pressures).

لقد وجد (Terzaghi) أن إجمالي الإجهاد العمودي على أي سطح يتكون من الإجهاد المؤثر (Effective stress) وضغط السائل.

لذلك فإن إجمالي إجهاد الضغط العمودي يمكن توضيحه رياضيًا كالآتي:

$$\sigma = \sigma' + u$$

حيث:

σ = إجهاد الضغط العمودى

σ' = الإجهاد المؤثر

u = ضغط ثقب الماء

قوى القص على طول سطح يتم الحصول عليها من معادلة كولومب.

$$S = C + (\sigma - u) \tan \varphi \qquad (10\text{-a})$$

أو

$$S = C + \sigma' \tan \varphi \qquad (10\text{-b})$$

حيث:

C = التماسك (Cohesion) الذى قيمته للرمل تكون صفر وللطفلة مابين ٥-٦٠ كيلو نيوتن/المتر المربع.

φ = زاوية الاحتكاك الداخلى.

المعادلة (١٠) يمكن أن تدل على أن جزء التجزئة المقاومة على طول السطح يقل بفعل ضغط ثقب الماء.

تم اقتراح طرق مختلفة لحساب استقرار السد الترابي. عمومًا، تلك الطرق مبنية على قوة القص للتربة وفرضية معينة بالنسبة لطبيعة انهيار الدعامة. طريقة إنزلاق الحلقة (Slip Circle) التي اقترحها المهندس السويدي هي المستخدمة عادة.

طريقة انزلاق الحلقة (Slip Circle Method)

الطريقة الأساسية تفترض أن انهيار السطح هو قوس من دائرة في المقطع. توجد عزوم حول مركز الدائرة، بواسطة القوى الداخلية والأحمال الخارجية متضمنة وزن كتلة التربة، القوة الناتجة عن ضغط الماء على سطح الميل.. إلخ. تلك العزوم تعمل على إحداث الانقلاب (Overturning) ($\sum$ Mo) وبالتالي الانهيار. عزوم المقاومة يتم توفيرها بمقاومة القص على طول سطح الانهيار زائد أي مقاومة توفرها تكوينات المنشآت التي تمتد خلال سطح الانهيار. تأمين الميل يتم بواسطة النسبة بين المقاومة إلى عزوم الانقلاب، والتي يجب أن تكون أكبر من الواحد الصحيح.

لتعيين الاستقرار لميل مقترح مثل الدعامة الكتفية فإنه يكون من الضروري محاولة كثير من الدوائر المختلفة. الدائرة التي تعطي أدنى عامل أمان هي الأكثر حرجا. عدد الدوائر يتحدد طبقًا للخبرة.

التحليل الأساسي كما تم وصفه يستخدم لأي تربة حيث تكون مقاومة القص مستقلة عن الضغط العمودي على سطح الانهيار. في التربة، حيث القص يتأثر بالضغط المحصور (Confining)، فإن الإجهاد المؤثر على كل جزء من قوس الانهيار يجب أن يتم تعيينه لحساب قوة القص. لذلك، لا يوجد تحليل مضبوط لهذا، تستخدم

تقريبات مختلفة، من هذه طريقة الشرائح هي التي يعتمد عليها وهي المستعملة على نطاق واسع.

طريقة الشرائح (Method of slices)

هذه تفترض حالة من الشد البسيط (Plain strain) لمنع الانهيار على طول حلقة اسطوانية. الطريقة تتكون من تقسيم كتلة التربة لقوس الانهيار (مع افتراض مركز للقوس) إلى عدد من الأقسام العمودية المسماة الشرائح الشكل (٤/١٠)، ثم وضع القوى التي تعمل على أجناب كل حلقة، ثم مساواتها بالصفر لحالة الاتزان شكل (٤/١١).

العزم الذى يعمل على تدوير كتلة التربة حول O هو

$$Mo = \sum Wx$$

$$= W_1 x_1 + W_2 x_2 + W_3 x_3 + W_4 x_4 + W_5 x_5 + W_6 x_6$$

حيث كلاً من x_1، x_2 ... الخ هم ذراع العزم لكل قسم

عزم المقاومة يتم توفير بإجهادات القص المماسة العاملة على قوس الانهيار

$$Mr = \sum s\ DL.\ r$$

حيث:

s = قوة القص للتربة.

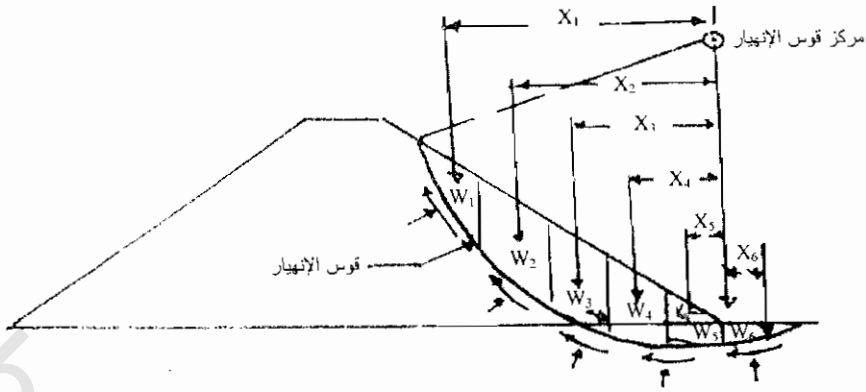
L = طول قوس الانهيار للجزء

r = نصف قطر قوس الانهيار.

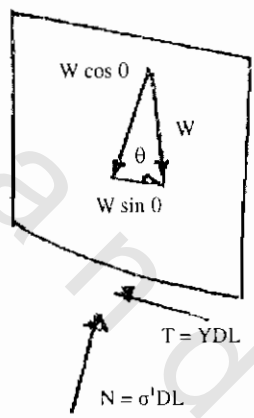
قوة القص للتربة يتم الحصول عليها باستخدام معادلة كولومب.

يتم اختبار استقرار السد بأدنى عامل أمان على طول قوس الانهيار المفترض. هذا يعني احتمال انهيار العديد من الأقواس التي يلزم محاولتها. ولكن معامل الأمان يجب أن يكون أكبر واحد.

$$\text{معامل الأمان} = \frac{Mr}{Mo} > 1$$



شكل (١٣/١٠) تحليل الاستقرار بطريقة الشرائح



شكل (١٣/١١) مخطط الجسم الحر للقوى التى تعمل على جزء القوس

استقرار الميل في اتجاه المنبع أثناء الانخفاض السريع:

Stability of up stream Slope During Rapid Draw Down

تحليل الاستقرار للسد الترابي في حالة استقرار التسرب تم مناقشتها في البند السابق. بعد وضع الخزان في الاستخدام، فإن الانخفاض السريع يحتمل أن يكون له تأثير سالب على تأمين ميول الدعائم. تحديدًا للميل في اتجاه المنبع، فإن الانخفاض المفاجئ بدون أي تغير ملموس في منسوب الماء خلال الكتلة المشبعة للتربة قد يسبب خفض في قوى المقاومة التي ينتج عنها انزلاق السطح المائل. هذا للأسباب الآتية:

obeikandl.com

١- خط التشبع مازال أعلى حيث الصرف ليس بالسرعة مثل الانخفاض، نتيجة لـذلك فإن ضغوط الثقب لا يتم تشتتها في الحال.

٢- الانخفاض يزيل الماء فوق الميل في اتجاه المنبع للسد والذي يساهم بوزنـه فـي استقرار كتلة تربة السد. لإيقاف التلف، الإجراءات المقترحة هي:

- توفير حماية للميل بدكه من الحجارة أو الرصف الخرساني.
- تحديد معدل الانخفاض.
- أن يكون ميل السطح في اتجاه المنبع أقل حدة عن السطح في اتجاه المصب.

انهيار السدود الترابية: Failure of Earth Dams

الأسباب الرئيسية لانهيار السدود الترابية هي الأساسات الضعيفة وغير المسامية، الفيض غير المناسب، ضعف الإنشاء، وعدم مساواة الرسوخ (Uneven settlement).

انهيارات السدود الترابية يمكن تقسيمها إلى ثلاث أنـواع: وهـي هيدروليكيـة، وتسرب، إنشائية، يقدر أن الانهيارات الهيدروليكية تشكل ٤٠% من كـل الانهيـارات والباقي ٦٠% مناصفة بين التسرب والإنشائية.

الانهيارات الهيدروليكية (Hydraulic Failures)

وهذه تكون بسبب العوامل الآتية:

أ – التدفق العلوي فوق السد Over topping

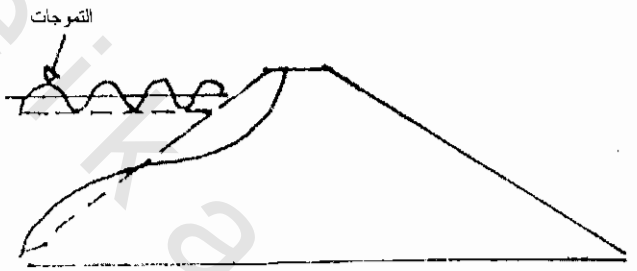
التدفق العلوي فوق قمة السد يعني أن مستوى الماء في الخزان قد يرتفع فوق قمة السد ويتدفق خلال مقطع المفيض Spill way Section. هذا التدفق العلوي قـد يكـون بسبب أي من الآتي:

- تدفقات الفيضانات الحقيقية التي تصل إلى الخزان. قد تكون أكثر كثيرًا عن تصميم الخزان بينما المفيض يكون ذو طاقة غير مناسبة لصرف التدفقات.
- عدم كفاءة الخلوص (الفرق بين خط التـصريف وقمـة الـسداد أو سـيل المـاء Freeboard حيث النتيجة أن الرياح الشديدة وفعل الأمواج السطحية يكـون كافيًـا ليتسبب في الانسكاب (Spillage).

- العيوب أو عدم التشغيل لبوابة المفيض ومعدات العمل الأخرى في وقت ذروة المفيض قد يسبب زيادة الضغط (Heading up) أو زيادة التدفقات في الخزان والذي ينتج عنه التدفق العلوي فوق قمة السد (overtopping) أو انفجار السد.

ب- تأثير الموج (Wave Action)

أمواج الريح الكاسحة على قمة سطح الماء تسبب دحرجة اسطوانية (Rollers) انظر الشكل (١٣/١٢) والذي يميل إلى غرف التربة من سطح الميل المواجهة للمنبع عدا في حالة حماية ميل الجسر الترابي بوساطة توفير الدكة الحجرية. أحياناً، تسبب الأمواج كذلك انزلاق لجزء من الميل المواجه للمنبع.



شكل (١٣/١٢) التموجات بفعل الموج

جـ- برى طرف السد في اتجاه المصب (Toe Erosion):

يكون بسبب تأثير مياه الصرف السفلي (بعد التشغيل) أو بسبب التيار المتقاطع (Cross-current) الذي قد ينشأ من جيوب المفيض أو مساحات الخروج للمخارج عند طرف السد في اتجاه المصب. يمكن منع حدوث ذلك بتوفير دكه حجرية على سطح الميل في اتجاه المصب إلى ارتفاع أعلى قليلاً عن مستوى مياه الصرف (Tail water).

د- تكوين الأخدود أو ميل الماء (Gullying)

الأخاديد أو مسيلات الماء تتكون على ميل السد المواجه للمنبع بسبب شدة الأمطار. يمكن منع وجود تلك الأخاديد بتوفير مسطحات (Berms) على فواصل مناسبة وكذلك بالتغطية بالتربة المحتوية على العشب وجذوره للميل وكذلك توفير نظام صرف جيد.

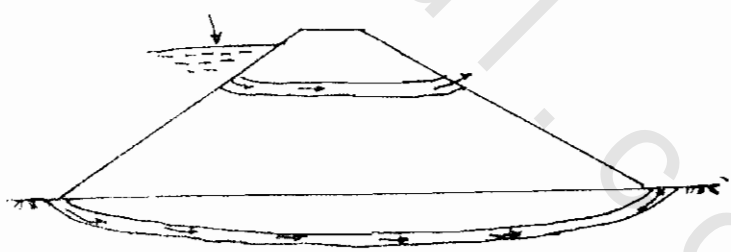
الانهيار بالتسرب: (Seepage Failure)

رغم أن التسرب خلال السد لا يمكن تجنبه، إلا أن أي تسرب زائد وغير محكم خلال مقطع السد والأساس قد يؤدي إلى حدوث مسارات موحلة (Piping And Sloughing) مسببة انهيار السد.

المسارات (Piping) هو نوع من تكوين الأنبوب المفتوح خلال كتلة التربة الشكل (٢٢) بسبب البرى الداخلي لكتلة التربة بدءًا من المخرج نحو الاتجاه الخلفي.

الغليان (Boiling) والذي هو مصاحب لأنبوب المسارات المفتوح عبارة عن رفع كتلة تربة السد الترابي على الجانب في اتجاه المصب بالتدفق المختلف في ضغط الثقب (Differential pore pressure) يؤدي كذلك إلى البرى. الانهيار الكلى للسد.

الوحل (Sloughing): الوحل هو خلق مستنقع ويحدث عندما يكون طرف السد في اتجاه المصب في حالة الخزان الممتلئ قد أصبح مشبعًا بسبب التسرب وضعف الصرف والبرى منتجًا هبوط قليل (Small Slump) أو انزلاق صغير شكل (١٣/١٤). الانزلاق يصبح مشبعًا ويهبط ثانياً. مع تقدم واستمرار الوحل فإن الجزء المتبقي من السد يصبح رقيق جدًا لمقاومة ضغط الماء ويمكن أن ينهار فجأة. كل من المسارات الأنبوبية والوحل يمكن منعه بتحقيق الصرف المناسب لمياه التسرب وتوفير المخارج التي تسمح للماء بالهروب مرة ولكن مع الاحتفاظ بالتربة وثباتها.



شكل (١٣/١٣) المسارات الأنبوبية خلال السد والأساس

شكل (١٣/١٤) الإنزلاق فى إتجاه المصب بسبب الوحل

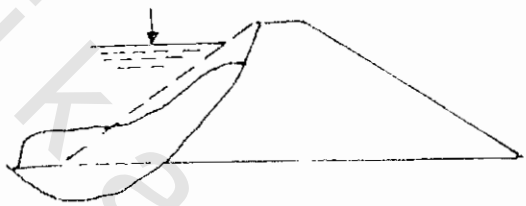
الانهيار الإنشائي (Structural Failure)

يحدث ذلك في حالة الإجهادات الناتجة بسبب الحمل على السد بما فيها وزنة تزيد كثيرًا عن إجهاد القص لكتلة تربة السد وقوة الأساس.

الانهيار الإنشائي يمكن أن يكون بسبب الآتي:

أ- انزلاق الأساس (Foundation slide)

عندما يكون أساس السد ضعيفًا، أي من الطين الرملي الدقيق أو التربة اللينة أو به شروخ طفلية ضعيفة، فإن سطح السد يمكن أن ينزلق مسببًا الانتفاخ الخارجي للأساس.



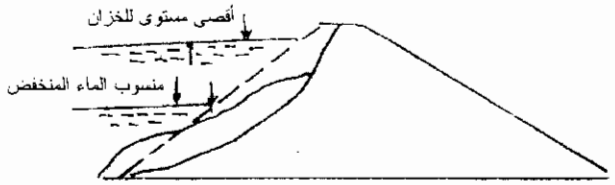
شكل (١٣/١٥) إنزلاق الأساس

ب – انزلاق التدفق (Flow Slide):

وهذا يحدث بسبب سيولة تربة الأساس المتضمنة الرمل المفكك أو الطين الرملي عندما ينهار سطح السد على أساسه.

جـ- الانخفاض المفاجئ(Sudden Drawdown)

الانخفاض المفاجئ فى حالة الخزان الممتلئ خلال العمل هي الحالة الأكثر حرجًا لاستقرار السد. خاصة في حالة شدة الميل للسطح المواجه للمنبع أو أن التربة المستخدمة في إنشاء السد ذات نوعية ضعيفة ولم يتم دكها بطريقة صحيحة، فإن الانخفاض المفاجئ للماء قد يسبب الانزلاق للسطح المواجه للمنبع (الشكل ١٣/١٦)، يسبب الفقد في الضغط الهيدروستاتيكي الذي يعمل على الميل في اتجاه المنبع والذي بخلاف ذلك له تأثير استقرار على مقطع السد.



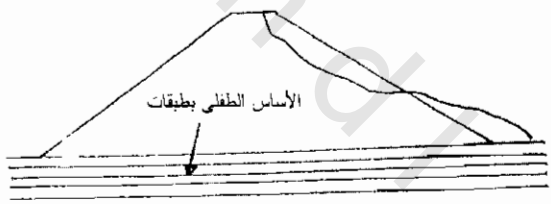
شكل (١٣/١٦) الانهيار بسبب الإنخفاض المفاجئ

د- انزلاق الميل في اتجاه المصب (Down stream slope slide)

كذلك فإنه في حالة شدة الميل لسطح السد المواجه للمصب وأن التربة المستخدمة ضعيفة مع عدم الدمك الجيد وأن الخزان عند أقصى منسوب للمياه، فإن معدل التسرب سيكون كبيرًا لأي حالة صرف غير مؤثرة فإن ضغوط ثقب الماء أسفل خط التشبع قد ترتفع كثيرًا مقللة الإجهاد المؤثر وقوة القص بما يسبب الانهيار في شكل انزلاق الميل في اتجاه المصب.

هـ- الانتشار (spreading)

عند وضع السد الترابي على أساس ضعيف متضمنًا طبقات من التربة اللينة، الطفل، فإن الانهيار قد يحدث خلال انتشار ميل الدعامة.



شكل (١٣/١٧) الانهيار بالانتشار

الانهيار بسبب الزلازل (Failure Due to Earthquakes)

انهيارات السد الترابي بسبب الزلازل تكون بسبب التأثيرات التالية:

- التسرب والمسارات الأنبوبية بسبب التشققات الناتجة في لب السد.
- هبوط القمة بسبب ضغط أساس الدعامة. هذا يقلل من الخلوص (Freeboar) ويزيد من فرص التدفق فوق القمة (Overtopping).

- انزلاق القص لجزء كبير من ميول السد يسبب التسارع على الدعامة (Acceleration On the Embankment).
- اهتزاز قاع الخزان مسببًا موجات بطيئة.
- انزلاق جانب التل الطبيعي مسببًا التدفق العلوي والتلف للمنشآت التابعة للسد.
- سيولة الرمل أسفل الأساس.
- تحرك الصدع مسببًا خفض في طاقة الخزان وبالتالي التدفق العلوي فوق قمة السد.

اعتبارات التصميم في السدود الترابية:

١- قاعدة أو معيار التصميم (Design criteria)

المطلب الأساسي في تصميم السد الترابي هو بتوفير منشأ بأقل التكاليف والذي يظل آمنًا ومستقراً في كل مراحل الإنشاء والتشغيل للخزان. لتحقيق ذلك فإنه يجب تحقيق الاعتبارات الآتية:

١- الحاجز الترابي (Embankment) يجب أن يكون آمنًا ضد أي تدفق علوي عن طريق فعل الموج أو خلال حدوث فيضان، تصميميًا من خلال توفير مفيض وطاقة خروج كافية.

٢- ميول السد الترابي يجب أن تكون مستقرة في كل حالات الإنشاء وتشغيل الخزان بما في ذلك الانخفاض المفاجئ في محتوى الخزان.

٣- يجب أن يتم تصميم السد الترابي بما لا يشكل إجهادات زائدة على الأساس.

٤- يجب التحكم في تدفق التسربات خلال السد والأساس بما يمنع حدوث مسارات أنبوبية (Piping) أو برى داخلي آخر وكذلك الوحل في منطقة المخرج حيث تخرج التسربات.

٥- الميل المواجه للمنبع يجب أن تتم حمايته ضد البرى الناتج عن تأثير الموج، وكذلك حماية القمة العليا والميل في اتجاه المصب ضد البرى بسبب الأمطار والرياح.

٢ – تصميم السد أو الحاجز الترابي: Embankment Design

لتحقيق القواعد التصميمية السابقة، فإنه يجب تصميم السد الترابي لتحقيق أقصى استخدام لمواد الإنشاء بما في ذلك مواد الحفر للأساس وذلك بهدف خفض التكاليف، جدوى استخدام مواد الحفر عندما تشكل هذه نسبة كبيرة من مادة السد الترابي تعتمد على تسلل عملية الإنشاء. فمثلاً، نظرًا لأنه يجب توفير مساحة تشوين كبيرة لاستخدام المواد (تربة، صخور) الحفر من مفيض الجسر بدون تشوين، حفر المفيض يمكن تأخيره حتى توفير المساحة المطلوبة لتفادي تهدير كميات كبيرة من تلك المواد.

بالإضافة إلى ما سبق، يجب إعطاء العناية المناسبة في تصميم المكونات الأخرى للسد الترابي كالآتي:

أ – ميل السد الترابي:

تلك هي الميول المطلوبة لاستقرار السد على أساس ثابت ومستقر. كلاً من الميول في اتجاه المنبع وفي اتجاه المنصب للسد الترابي تتوقف على (١) طبيعة المواد المستخدمة المكونة للسد (٢) ارتفاع السد (٣) نوع السد أي متجانس، نطاقي (Zoned)، من نوع الغشاء الحاجز (Diaphragm).

لقد أوصى (Terzaghi) لميول تلك الحالات كما في الجدول التالي:

جدول (١٣/١) الميول المقترحة للسد الترابي

م	نوع السد	نوع المادة	الميل في اتجاه المنبع	الميل في اتجاه المصب
١	متجانس	متدرجة جيدًا	١ : ٢,٥	١ : ٢
٢	متجانس مطور أ– ارتفاع أقل من ١٥ متر ب – ارتفاع يزيد عن ١٥ متر		 ١ : ٢,٥ ١ : ٣	 ١ : ٢ ١ : ٢,٥
٣	نطاقي واللب من الطفلة	رمل أو رمل وزلط	١ : ٣	١ : ٢,٥
٤	الغشاء الحاجز حيث جدار اللب من الخرسانة	رمل أو رمل وزلط	١ : ٢,٥	١ : ٢

عمومًا الميول في اتجاه المنبع هي ٢,٥ : ١ أو ٣ : ١ بينما الميول في اتجاه المصب تكون ٢ : ١ أو ٢,٥ : ١

ب- عرض قمة السد (Crest Wedth)

عرض القمة للسد الترابي يبنى أساسًا على أساس أن مستوى الخزان ممتلئ، التدفق العلوي (Top Flow)، أي الخط الجوفي يكون محصورًا في السد.

أدنى عرض يكون بحيث يتم توفير تدرج آمن في التسرب عند هذا المستوى. نظرًا لأنه من الصعب تعيين هذا العامل عمليًا، فإن عرض القمة يتم تعيينه باستخدام المعادلة الآتية:

(i) بالنسبة للسد المنخفض $B = \frac{H}{5} + 3$

(ii) بالنسبة للسدود أعلا من ٣٠ متر $B = 1.65\,(H + 1.5)^{1/3}$

حيث:

B = عرض القمة بالمتر.

H = ارتفاع السد أو الجسر مقاس من أدنى مستوى في طبقة المجرى (متر)

اعتبارات أخرى مثل الارتفاع وأهمية السد، ومتطلبات الطرق عمليًا للإنشاء والقدرة على مقاومة صدمات الزلازل، تلك لها علاقة عند اختيار عرض القمة. عمومًا، عرض القمة يكون من ٦ متر إلى ١٢ متر للسدود المنخفضة والعالية.

جـ- الخلوص الحر (Free Board) بين سطح الماء وقمة السد:

الخلوص الحر هى المسافة العمودية بين مستوى الخزان الممتلئ وإرتفاع قمة السد. الخلوص الحر يتم توفيره بحيث أن الامواج التى تدفعها الرياح على سطح الماء لاتكون قادرة على اجتياز قمة السد. حيث أن الخزان له مستوى تخزين عادى ومستوى أقصى، فإن الخلوص الحر يتم تصميمه على أساس أدنى خلوص حر، والخلوص الحر العادى.

أدنى خلوص حر (Minimum Free Board): الذى هو الفرق فى الارتفاع بين أقصى مستوى للخزان وإرتفاع قمة السد يتم توفيره لمنع حدوث تأثير الموج على تخطى المياه لقمة السد (Overtopping) والذى يمكن أن يتطابق مع حدوث دخول تدفقات الفيضان المصمم (In Flow Design Flood).

تعيين الخلوص الحر يتطلب إيجاد إرتفاع الموج بفعل الرياح فى الخزان، سرعة الرياح، ومدتها، ومداها (Fetch) وعمق الماء وعرض الخزان. تستخدم لهذا الغرض معادلة (Molitor):

فى حالة مدى الموج (Fetch) أقل من ٣٢ كيلومتر

$$Hw = 0.032\sqrt{V.F} + 0.763 - 0.2714\sqrt{F}$$

فى حالة مدى الموج (F) أكبر من ٣٢ كيلومتر

$$Hw = 0.032\sqrt{V.F}$$

حيث:

Hw = ارتفاع الموج بالمتر

V = سرعة الرياح (كيلومتر / الساعة)

F = مدى الموج أو الطول المستقيم لإمتداد الماء (كيلومتر).

الخزان الممتلئ أو أقصى منسوب للخزان و ٧٥% من أقصى سرعة للرياح يتم أخذهم فى الإعتبار عند حساب الخلوص الحر.

طبقاً لتوصيات (USBR) فإن الخلوص الحر المقابل لإرتفاع السد ومختلف أنواع المفيض موضح فى الجدول الآتى:

جدول (١٣/٢) الخلوص الحر الموصى به

طبيعة المفيض (قناة تصريف الفائض من مياه السد)	إرتفاع السد	الخلوص الحر
حر	أى	الأدنى (٢ متر) والأقصى (٣ متر) فوق أعلا منسوب للفيضان
محكم	أقل من ٦٠ متر	٢,٥ متر فوق قمة البوابات
محكم	أكثر من ٦٠ متر	٣ متر فوق قمة البوابات

الخلوص الحر العادي وأدنى خلوص حر يوصي به لمختلف المدى على السدود الترابية بالدكة الحجرية كما في الجدول التالي:

المدى (كيلومتر)	الخلوصي الحر (بالمتر)	
	العـــــادي	الأدنى
١,٥	١,٢٥	١,٠٠
١,٥	١,٥	١,٢٥
٤,٠٠	١,٧٥	١,٥
٨,٠٠	٢,٥	١,٧٥
١٦	٣,٠٠	٢,٠٠

ملاحظة: يمكن زيادة الخلوص الحر بنسبة ٥٠% في حالة توفير رصف (تبليط) ناعم على الميل في اتجاه المنبع.

د- ارتفاع السد (Height of Dam)

ارتفاع السد يؤخذ بالمسافة الرأسية من أساس السد حتى أقصى سطح للمياه في الخزان عند صرف الفائض (Spillway) بالطاقة التصميمية حيث يضاف إليه خلوص مناسب. التجاوز الإضافي للخلوص الحر (١,٥ متر) يعطي كذلك ضد تأثير الثلوج في الأماكن الباردة بما ينتج عنه احتمال تشقق التربة. نظرًا لأن مواد التربة تميل إلى تكوين طبقة مدمجة (Consolidate) تحت تأثير حالات التحميل والتى تسود بعد إنشاء السد، فإنه يمكن إعطاء بعض التجاوز للدمج طبقًا لنتائج الاختبار المعملي.

عادة يكون التجاوز ما بين ٢ إلى ٥% من إجمالي ارتفاع السد. يتم كذلك توفير حوائط ساترة (Parapet walls) بارتفاع متر واحد على قمة السد على الجانب المواجه للمنبع، حيث أن ذلك يوفر عامل أمان إضافي. في حالة السدود الضخمة، يمكن أن يتم دمج تلك كعنصر للخلوص الحر وذلك بإنشائها قوية بما يكفي.

هـ- السطحية الضيقة (Berm):

المسطاح (السطحية الضيقة)، عبارة عن شريط أفقي من الأرض الطبيعية يترك في الميل الجانبي للسد الترابي. يتم توفير المسطاح الضيق كذلك على الميول في اتجاه المنبع وفي اتجاه المصب للسد الترابي. وهي تعمل لعدة أغراض كالآتي:

(١) المسطاح يوفر استقرار أكثر بزيادة عرض السد.

(٢) توفر طريق لمرور وسائل النقل الصغيرة المستخدمة في التفتيش.

(٣) خفض البرى السطحي بكسر استمرار الميل الجابني والمساعدة في توفير بعض الصرف.

(٤) المسطاح على الميل في اتجاه المنبع يوفر الأساس لحمل طبقة الدكة الحجرية لمنعها من الانزلاق أسفل الميل. لهذا السبب، فإن المسطاح يمتد إلى حوالي ١,٥ متر أسفل أدنى منسوب للمياه.

المسطاح عموما لا يقل عرضه عن ٣ متر.

٣- اعتبارات التصميم في المناطق الزلزالية:

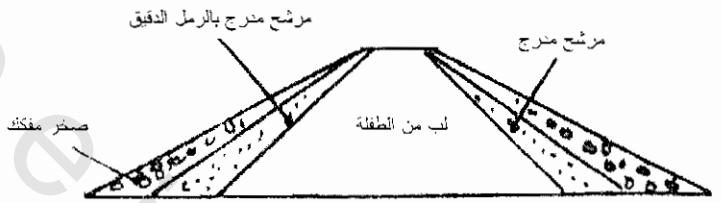
Design considerations in seismic Regions:

انهيار السدود الترابية بسبب الزلازل تم مناقشته في البند السابق. للحيطة نحو التأثيرات الضارة السابق ذكرها، فإنه يكون من الضروري استخدام التصميم المناسب. وهذا يشمل الإجراءات الآتية:

المادة المسامية غير المتماسكة للترشيح في اتجاه المنبع:

Conesion Less Graded Filter Up stream:

عندما يكون اللب المركزي منشأ من مادة متماسكة فعند حدوث تشققات بسب الزلازل فإن توفير مرشح في اتجاه المنبع من الرمل الناعم المتدرج الشكل (١٣/١٨) سوف يفيد، ذلك لأن الرمل الناعم من المرشح سوف يتدفق نحو التشققات ويغلقها جزئيًا.



شكل (١٣/١٨) المرشحات المتدرجة الغير ملتصقة

المادة المسامية غير المتماسكة للترشيح في اتجاه المصب:

Cohesion Less Graded Filter Upstream:

التشققات الكبيرة في اللب بسبب الزلزال قد تسبب تسرب شديد ومسارات أنبوبية خلال السد الترابي. توفير المادة المسامية المدرجة غير المتماسكة الموضوعة في اتجاه المنبع للب السد وممتدة حتى قمة السد الشكل (٤/١٨) ، تحقق حماية جسم السد من التسرب ومن المسارات الأنبوبية (Piping). عند وصول مياه التسرب خلال التشققات إلى مادة الترشيح المسامية في اتجاه المصب، إما أن مادة اللب تنتفخ وتحدث القفل للتشققات أو أن الجسيمات لمادة اللب في التشققات يحدث لها اجتراف (Eroded) وتحمل نحو مادة الترشيح المسامية في اتجاه المصب. مادة الترشيح المسامية المدرجة هذه سوف توقف حركة الجسيمات وتغلق التشققات حيث لا يتم تكوين مسارات أنبوبية.

المنطقة في اتجاه المصب عالية المسامية: Highly porous Downstream zone

عند تشقق لب السد بفعل الزلزال، فإنه يمكن أن تصل إلى الجزء في اتجاه المصب كمية كبيرة من المياه، التدفقات الزائدة التي تتكون يجب أن يتم صرفها بسرعة ما أمكن وإلا فإنه يمكن أن يتكون ضغط عالي وحرج للماء على الجانب في

اتجاه المصب. المنطقة في اتجاه المصب ذات الصخر الضخم توفر أفضل جمع لكل من النفاذية والاستقرار لضمان تأمين السد حتى في حالة أن قمة السد تكون معرضة للتدفق أعلاها (Overtopped).

٤- مقطع السد بالقمة الأكثر سمكا: *Thicker top dam section:*

أثناء الزلزال، تهتز قمة السد باتساع يزيد عن ذلك للقاعدة ولذلك يكون أكثر عرضة للتدمير. بعمل قمة السد أكثر سمكًا إما بزيادة عرض القمة أو باستخدام ميول مستوية (Flatter slopes) قرب القمة، والذي يزيد من طول مسار التسرب خلال التشققات بما يزيد من تأمين السد ضد قوى التسرب.

٥- اللب الأكثر سمكًا: *(Thicker Core)*

اللب الأكثر سمكًا يوفر المقاومة الأكبر للمسارات الأنبوبية ويجعل السد آمناً ضد تأثير الزلازل على لوى (Twist) استقامة السد.

٦- معالجة الأساس *(Foundation Treatment)*

نظرًا لأن السد المؤسس على أساس من التربة اللينة يكون أكثر عرضة للاهتزاز في حالة الزلزال، فإن كل التربة اللينة أو المفككة من الأساس يجب أن تتم إزالتها واستبدالها بمواد حجرية مدمجة.

٧- تحليل استقرار الميل مع إسراع الزلزال:

Slope stability Analysis with Earthquake Acceleration:

الزلزال يمكن أن يكون تحت أي من الحالات الآتية لعمل الخزان:

(١) حالة الاستقرار (الخزان ممتلئ)

(٢) الانخفاض المفاجئ (Sudden Draw down)

تلك الحالات شديدة الأهمية لتحليل استقرار السدود الترابية. بالنسبة للميل في اتجاه المنبع، الحدوث المتزامن لتلك الحالات يعتبر من الاحتمالات البعيدة. بالنسبة للميل في اتجاه المصب، فإن الحالة شديدة القسوة هي عندما يكون الخزان ممتلئ وأن يكون السد معرضًا للقوى الهيدروستاتيكية. لذلك فإنه يكون من الضروري مراجعة

الميول للسد مع مراعاة هذه الحالات. عادة تستخدم قوى العجلة الأفقية بالإضافة إلى القوى العادية الأخرى وتخصيص قيم مناسبة للقوة الأفقية – ١/٢٠ إلى ١/٥ من وزن الكتلة المنزلقة، طبقًا لمكان المساحة بالنسبة لمختلف مناطق الزلزال.

حماية الميل: (Slope Protection)

ميل السد في اتجاه المنبع يجب أن تتم حمايته ضد الانجراف والتعرية (Erosion) بسبب تأثير الأمواج وكذلك التلف الذي تسببه الحفر والجحور بفعل الحيوانات. بالمثل الميل في اتجاه المصب يحتاج إلى الحماية ضد التعرية بفعل الرياح وتدفقات الأمطار. لذلك فإنه يلزم توفير غطاء حماية في أي من الحالات. الغطاء قد يتضمن دكه حجرية إما بالدكه العشوائية أو بالبناء الحجري، أو بطبقة من الخرسانة للميل في اتجاه المنبع.

حماية الميل في اتجاه المنبع (Upstream Slope Protection)

حماية الميل في اتجاه المنبع يجب أن يمتد من قمة السد إلى مسافة آمنة أسفل أدنى منسوب للمياه (حوالي ١,٥ متر) وتنتهي على مسطح ضيق حامل (Supporting Berm) الشكل (١٣/١٩) هذا يضمن حماية مؤثرة للطرف السفلي للدكة الحجرية عند اصطدامها بالموج. يتم توفير حماية الميل بطبقة من الخرسانة أو بالدكة الحجرية.

يتم وضع طبقة من مادة الرشح (Filter) المكونة من الزلط أو كسر الحجارة أسفل طبقة الدمك الحجرية لمنع الانجراف بفعل الموج وكسح المادة المدمجة. سمك مادة الرشح لا يقل عن ٢٥ سم ويفضل أن يكون في طبقتين.

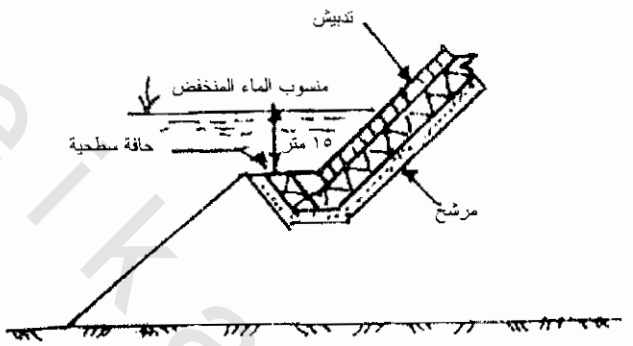
أدنى سمك لطبقة الدمك الحجري (Riprap) هو ٣٠سم. والمواصفات هي كما في الجدول.

أدنى سمك لطبقة الدمك الحجري بالبناء اليدوي

ارتفاع الموج (متر)	سمك الطبقة سم
أقل من ١	٣٠
١ – ٢	٤٥
أعلا من ٢	٤٠

أدنى سمك لطبقة الدمك بالردم

ارتفاع الموج (متر)	أدنى حجم للصخر (سم)	سمك الطبقة سم
حتى ١ متر	٣٠	٤٥
١-٢	٤٠	٦٠
أكثر من ٢	٧٠	١٠٠



شكل (١٣/١٩) تدبيش مع حافة سطحية أسفل منسوب الماء

الطبقة الخرسانية:

هي تتكون من طبقة خرسانية على الميل تحت السطح في اتجاه المنبع للسد. وتمتد الطبقة من قمة السد إلى ١,٥ متر أسفل أدنى منسوب للخزان. وتنتهي على مسار ضيق وحاجز خرساني يمتد إلى ما لا يقل عن ٤٥سم أسفل تحت السطح للطبقة. سمك طبقة الخرسانة هو حوالي ٢٠ سم للسد بارتفاع ١٥متر.

حماية الميل في اتجاه المصب: (Down stream slope protection)

لحماية الميل في اتجاه المصب فإنه سيتم عمل طبقة حماية أو الدكة الحجرية. طبقة الغطاء للحماية تكون عادة نوع من الحشائش على ميل السد، مع استخدام التسميد بانتظام لنمو الحشائش.

نظام الصرف في السد الترابي (Drainage system in Earth Dam)

السد الترابي لا يكون محكمًا ضد تسرب المياه على الإطلاق، حيث الماء يتسرب دائمًا خلال جسم السد وأسفل الأساس. لذلك، فإنه يكون من الضروري توفير الصرف الكفؤ خلال إجراءات صرف مقايسة ومحكمة للتعامل مع الصرف خلال جسم السد وأساس السد.

نظام الصرف للجسر: Drainage system for Embankment

الصرف الداخلي يمكن تقسيمه إلى الآتي:

١- طبقات الصرف الأفقية والمرشحات.

٢- الطرف الصخري للسد في اتجاه المصب (Rock Toe)

٣- مرشح الصرف المائل.

٤- صرف الصدع أو الفتحة (Chimney Dains)

الوظيفة الرئيسية لنظام الصرف هي لخفض ضغط ثقب الماء في كل من الأساس والجسر وبذا زيادة استقراره. وهو يمنع كذلك الانجراف والتعرية بفعل التسرب (Seepage Erosion)، المسارات الأنبوبية والاحتياج (Boiling).

نظام الصرف يتكون من عنصرين وهما:

١- مرشح الحماية الملتصق مع التربة، والذي يوفر الصرف الحر ويمنع الانجراف والتعرية، وهو يسمى المرشح المقلوب (Inverted Filter).

٢- مسار تجميع الصرف (Conduit) لتجميع وصرف كل مياه التسرب.

تصميم المرشح: (Filter Design Criteria)

طبقًا للتجارب التي أجراها (Terzaghi) وآخرين التي أظهرت أنه لكي يكون المرشح مؤثرًا فإنه ليس من الضروري فرز كل مواد التربة بالمنخل. إلا أن المرشح فقط يحتاج إلى وضع بعض الحبيبات الأكبر في الحجم والتي بالتالي يمكن أن تحافظ

obeikandl.com

على الحبيبات الصغيرة وتمنعها من الحركة شكل (١٣/١٩). لقد وجد أن القطر المؤثر (De) يجب أن يكون أقل من (D_{85}) للتربة الجاري ترشيحها.

$$De \leq D_{85}$$

كذلك $$De = \frac{1}{4} D_{15} \text{ To } \frac{1}{5} D_{15}$$

هذا يعنى أن حبيبات المرشح الدقيقة (D_{15}) يجب أن لا تزيد عن ٤–٥ ضعف (D_{85}) للتربة.

$$D_{15}\,(\text{Filter}) \leq D_{85}\,(\text{Soil})$$

$$\frac{D_{15}\,(\text{Filter})}{D_{85}\,(\text{Soil})} < 4 \text{ to } 5$$

لقد وجد أنه لتوفير الصرف الحر فإن المرشح يجب أن يكون أكثر مسامية عن التربة الجاري ترشيحها. نظرًا لأن نفاذية المرشح قد تصل إلى ١٠ –٢٠ ضعف تلك للتربة وأن معامل النفاذية للتربة المماثلة يتغير تقريبًا طبقًا لمربع الحجم المؤثر للحبيبة (Effective Grain Size)، فقد كان الاستنتاج أن ١٥% من حجم المرشح (D_{15}) يجب أن يكون ٤–٥ ضعف ١٥% من حجم التربة (D_{15}).

$$\frac{D_{15}\,(\text{Filter})}{D_{15}\,(\text{Soil})} > 4 \text{ or } 5$$

تلك المعادلات هي قواعد تدرج المرشح والتي تكون الأساس لتصميم المرشح.

إنشاء السد الترابي: Construction of Earth Dam:

إنشاء السد الترابي يتضمن عمومًا الخطوات الآتية:

أ- تحضير الموقع:

وهذا يشمل نظافة مواقع العمل وحفر الإمداد بتربة الردم (Borrow pits) لإمكان إنشاء السد. ويشمل العمليات الآتية:

أ- النظافة:

حيث تتم إزالة الأشجار، الصخور، المنشآت المؤقتة.. إلخ من المساحة التي تكون مناسبة للاستخدام كحفر لمواد الردم ولأساس السد. وكذلك إزالة جذور النباتات والمواد العضوية لمكان حفر تربة الردم. هذا يكون غالبًا خلال منطقة الجسر.

ب- التجريد:

وهو إزالة سطح التربة، المواد العضوية والتربة اللينة غير المناسبة لتحمل المنشأ خلال منطقة الجسر. سطح التربة الذي تم إزالته يتم تشوينه واستخدامه في الملء في الجانب المواجه للمنبع للسد المؤقت (Coffer Dam) أو على الميل المواجه للمصب لحمل نمو الحشائش.

٥- إزالة الصخور المفتتة والمواد الضعيفة الأخرى من الأكتاف. مادة الحفر يمكن استخدامها فيما بعد في إنشاء السد المؤقت.

التحويل والسد المؤقت: (Diversion and coffer Damming)

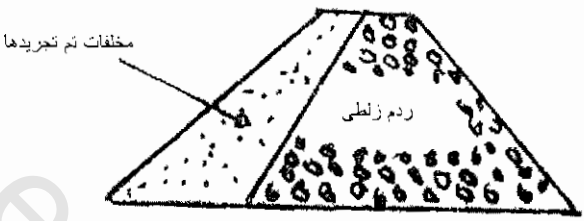
التحويل هو تغير اتجاه التدفق للنهر حول منطقة الإنشاء. يتم ذلك بإنشاء سد مؤقت وقناة تحويل أو نفق يحمل المياه حول الموقع.

السد المؤقت(Coffer Dam) يجب أن يكون منخفض التكلفة ولكنه محكم لنفاذ المياه. النوع البسيط للسد المؤقت هو الامتلاء بمخلفات الصخور وردم التربة في المكان لتكوين سد خام (Crude Dam) الشكل (١٣/١٧). القلب أو الجزء المركزي له هو كومة مثلثية الشكل (Triangular Mound) من المواد الضخمة مثل قطع الصخور الضخمة.

يتم وضع هذه ابتداءًا من الأكتاف على الجانبين ثم العمل نحو مركز السد. عندما يكون الإنشاء في مجرى متدفق، فإن الصخور الثقيلة يجب أن يتم وضعها على القاع حيث لا يتم حملها بقوة التيارات. عند الوصول إلى مركز المجرى يمكن استخدام

الصخور الثقيلة جدًا أو الخرسانة سابقة التجهيز والتي تتحمل ضغط الماء. المواد الدقيقة يتم وضعها على الاتجاه المواجه للمنبع لتكوين اللب ومنع تسرب المياه.

قناة التحويل تستخدم مع السد المؤقت إما كقناة منفردة أو كنفق حيث تكون الظروف الطبوغرافية والجيولوجية مناسبة.



شكل (١٣/٢٠) السد المؤقت

تحضير الأساس (Foundation preparation)

قبل إنشاء السد الترابي، يكون من الضروري إنشاء الآتي:

- **خندق القطع: Cut off trench**
- **وخندق الربط: key Trench**

- خندق القطع: هو حفر في شكل الحفر المكشوف الذي يحمل حتى مستوى الصخر المصمت أو أي طبقة من التربة غير المسامية. وهو خندق مائل جانبي يتم حفره وردمه بمادة غير مسامية، ثم دكه بنفس الطريقة كما في حالة المنطقة غير المسامية للسد. خندق القطع يوضع في اتجاه المنبع من خط المركز للسد ولكن موازيًا له وإلى نقطة حيث السد غير المسامى فوق الخندق يمكنه توفير مقاومة مساوية وتسرب مثل الخندق نفسه.

الالتصاق بين خندق القطع والأساس غير المسامى هو مستوى ضعيف، حيث خلاله يمكن تكوين قوى التسرب. كل الحفر والفراغات التي يتم ملاحظتها هناك تلزم نظافتها جيدًا وعزلها بخلطة مناسبة من الرمل والأسمنت.

- خندق الربط: الشكل (٣٠)، يتم تجهيزه في كل الأساسات حيث لا يتم استخدام خندق القطع. الخندق يربط المنطقة غير المسامية للسد مع أساسها ولهذا السبب فإنه يجب أن يخترق عدة أمتار من التربة الضعيفة بسب التدفق السطحي .. إلخ.. عمومًا يكون بعمق ١٠ متر واتساع ١٠ متر عند القاع مع ميول جانبية ١ : ١.

الحقن بالأسمنت (Grouting)

الحقن بالأسمنت يتم من خلال حقن خليط من الأسمنت، الماء والمواد المضافة الأخرى مثل الرمل، الطفل وبودرة الصخر فى التكوينات اسفل التربة (Subsoil Formation). والحقن الأسمنتي يقوم بوظيفتين وهما توفير عدم النفاذية للتربة وتحسين قوتها. الحقن الأسمنتي يتم بملء التشققات والتصدعات، الفراغات وحتى الفواصل البينية بين جبليات التربة بالمادة الأسمنتية. هذه المادة يجب أن تكون في حالة سيولة كافية لاختراق أصغر الفتحات التي تتطلب الملء. وهذا يتطلب أن اللزوجة يجب أن تكون منخفضة وأن كل الحبيبات يجب أن تكون أصغر من الفتحات. ولكن الحقن الأسمنتي يجب أن يكون قويًا وصلبًا مثل التكوينات المحيطة. معظم الحقن الأسمنتي يستخدم الأسمنت البورتلاندي والماء مع خليط متوسط من الرمل الخشن وكسر الصخر بنسبة ١ : ١ الحقن الأسمنتي يتم عادة بطريقتين وهما الحقن الأسمنتي المدمج (Consolidated) وحقن الستارة (Curtain).

السدود الصخرية (Rock-Fill Dams)

السدود الصخرية تتصف بأن القطع الصخرية تعمل كعنصر إنشاء رئيسي للسد. الامتلاء بالصخر يمكن أن يتم بالردم المفكك أو بالرص اليدوي للريش من الدمج المناسب. السدود الصخرية تكون من نوعين:

نوع الغشاء غير المسامى (Impervious Membrane)

نوع تربة اللب غير المسامية (Impervious Earth Core)

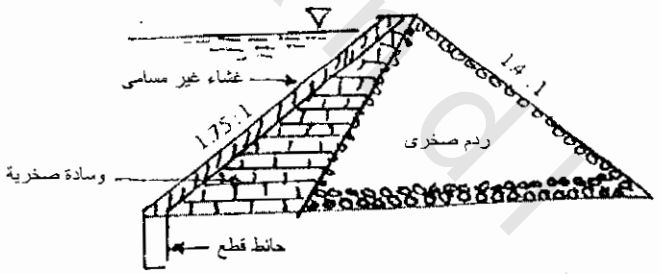
سد التل الصخري ذو الغشاء الغير مسامي :

Impervious Membrane Rockhill Dam:

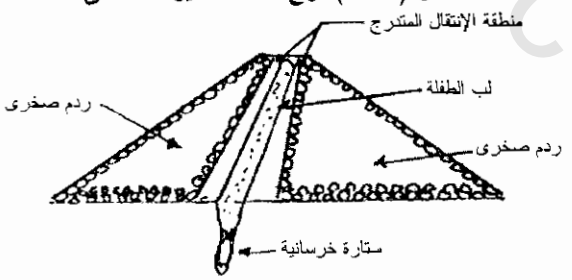
توجد طبقة غير مسامية من الخرسانة، الصلب، أو الأسفلت أو الخرسانة المسلحة على ميل السد المواجه للمنبع والشكل (٢١ – أ/١٣) الغشاء يكون محمولاً على وسادة من الصخر المرصوص يدويًا أو بالبناء الصخري والذي يوفر تأسيس ناعم ومدمج للغشاء.

الوسادة الصخرية بالتالي تكون محملة على ردم صخري. الردم الصخري على السطح المواجه للمصب يكون له ميل ١,٤ أفقي إلى ١ رأسي (١,٤ : ١) الميل في اتجاه المنبع يكون إما متساوى أو أكثر استواء (١,٧٥ – ١) لتسهيل الإنشاء للطبقة غير المسامية.

يتم توفير خندق القطع عند طرف السد في اتجاه المنبع لمنع التسرب أسفل السد وكذلك لتوفير مقاومة الدفع للغشاء غير المسامي. هذا النوع من الردم الصخري (Rock fill) يكون أسهل في الإنشاء، حيث يكون الصخر الصلب متاحًا. ولكن يكون معرضًا للهبوط الشديد والذي يمكن أن ينتج عند تشقق للغشاء. وهذا لا يتم إنشاؤه في ارتفاعات كبيرة، حيث نادرا ما يزيد الارتفاع عن ١٠٠ متر.



شكل (٢١–أ) نوع الغشاء غير المسامى



شكل (٢١–ب) نوع اللب الترابى غير المسامى

شكل (١٣/٢١) أنواع الردم الصخرى للسد

سد تربة اللب الصخرية (Earth – Core Rock Fill Dam)

هذا السد يسمى كذلك سد التربة الصخرية (Earth Rock Dam) وله لب من الطفل غير المسامى الموضوع قريبًا من مركز السد. اللب يكون معزولاً عن الردم الصخري بمنطقة انتقالية على جانبي السد في اتجاه المنبع وفي اتجاه المصب وتحتوي على مادة دقيقة مدرجة إلى الحبيبات الأكبر بالتدريج. المنطقة الانتقالية لا توفر فقط دعامة ثابتة للب السد ولكن تحافظ عليه من دفعه بالماء. توفير ستارة من الخلطة الأسمنتية تعمل على عزل اللب والعمل كحاجز غير مسامي نحو دخول التسرب أسفل السد.

سد التربة الصخرية أقل في التكلفة مقارنة بنوع السد الغشائي وهو مناسب للسدود الحديثة العالية بالملئ الصخري. مقارنة بالأنواع الأخرى (الخرسانية، السدود الترابية) فإن سد الملء الصخري يوفر ميزة المقاومة العالية للزلزال بسبب مرونته، قلة مواد الإنشاء نسبيًا بسبب زيادة حدة الميول وقلة التكلفة والسرعة فى الإنشاء فى حالة توفر المواد المناسبة.

obeikandl.com