الفصل الحادى عشر

السد الثقالى

Gravity Dam

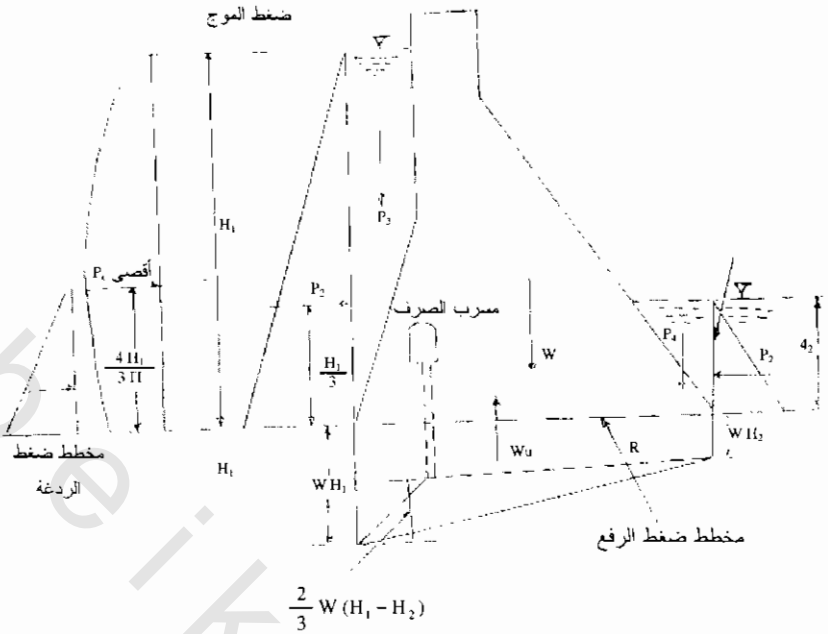
١- المقدمة:

يعتبر السد الثقالي على وزنه للاستقرار والثبات وعدم الانهيار، وعمومًا يكون بمقطع شبه منحرف وقاعدة مستقيمة. الميزة الرئيسية له هي البساطة في تحليل سلوكه الإنشائي. بجانب أنه عند الإنشاء فإنه لا يتطلب مهارات بدرجة مثل تلك المطلوبة لسدود العقد أو القنطرة (Arch Dams) أو السدود المدعمة بالدعائم الكتفية (Buttress Dams). السد الثقالي يحتاج إلى أساس صخرى جيد. كثير من السدود الضخمة في العالم سدود ثقالية. في القرن التاسع عشر كانت السدود الثقالية تنشأ من المباني بالأحجار (Stone Masonary). ولكن حاليًا تم استبدالها بالسدود الثقالية الخرسانية.

٢- القوى التي تعمل على السدود الثقالية: (Forces Acting on Gravity Dams)

السد الثقالي يكون معرضًا لعدد من القوى كالآتي:

أ – الوزن الذاتي للسد، الضغط الهيدروستاتيكي أي ضغط الماء الساكن، الدفع العلوي (Uplift pressure)، قوى الزلزال، ضغط الثلج، ضغط الموج، ضغط الطفلة. الأكثر أهمية بين هذه القوى هو وزن السد، الضغط الهيدروستاتيكي، الدفع العلوي، وقوى الزلزال. وهذه الموضحة في الشكل (١١/١).



شكل (١١/١) القوى التى تعمل على السد الثقالى

أ- الوزن الذاتي للسد: (Self Weight of Dam)

الوزن الذاتي للسد هو أكبر قوة مقاومة. وهو يساوي عدديًا الحجم في الوزن النوعي للمادة المكونة للسد. بالنسبة لمقطع السد، يتم حسابه بقسمة المقطع إلى عدة مكونات من المستطيلات والمثلثات، حساب وزن كل من تلك المكونات وجميع مختلف الأوزان للحصول على وزن السد والذي يعتبر أنه يعمل عند مركز متوسط للمقطع (Centroid of the section).

ب- ضغط الماء الساكن: (الضغط الهيدروستاتيكي Hydrostatic pressure))

ضغط الماء الساكن هو القوة الكبيرة التي تعمل على السد. قوى ضغط الماء الساكن يمكن أن تعمل أعلى من القوى في اتجاه المنبع وفي اتجاه المصب للسد. (Up stream and Downstream). في حالة القوى من اتجاه المنبع لكونها جزئيًا عمودية وجزئيًا أفقية، فإن محصلة ضغط الماء الساكن يمكن أن يتم تحويله إلى اثنين من المكونات.

(١) المكون الأفقي (Horizontal component)

$$P_1 = \frac{W H_1^2}{2} \qquad (1)$$

حيث :

H_1 = عمق عمود الماء الذي يعمل على $\frac{١}{٣}$ الارتفاع من قاعدة السد.

W = الوزن النوعي للماء.

(٢) المكون الرأسي (Vertical component)

المكون الرأسي (P_3) هو وزن الماء الموجود في عمود شبه المنحرف على طول قوى اتجاه المنبع (Upstream force) والذي يعمل على مركز الكتلة (نقطة الوسط – Centre).

بالمثل فإن محصلة ضغط الماء الساكن على الوجه في اتجاه المصب (Down stream face) يمكن تحليلها إلى اثنين من المكونات:

$$P_2 = \frac{W H_2^2}{2} \qquad (2)$$

حيث:

H2 = عمق الماء المنصرف بعد التدوير (Tail water) الذي يعمل عند $\frac{١}{٣}$ عمق الماء المنصرف (أو المتسرب بعد التدوير).

المكون الرأسي (P_4) هو وزن الماء الموجود في العمود المثلثي على طول الوجه في اتجاه المصب (Down stream) والذي يعمل على مركز الكتلة.

(٣) الدفع العلوي (Uplift Pressure)

الدفع العلوي هو الضغط العلوي للماء حيث يجد طريقه بين السد والأساس. فمقدار القوة يتوقف على طبيعة الأساس وطريقة الإنشاء. ولكن فإنه عمومًا يفترض أن الدفع العلوي يتغير طوليًا من الضغط الهيدروستاتيكي الكلي عند الوجه فوق ا لتيار

(في اتجاه المنبع) إلى الضغط الهيدروستاتيكي الكلي (ضغط الماء الساكن) عند الوجه تحت التيار (Down stream Face) (مرتكز جدار الدعم – TDE). طبقًا لهذه الفرضية، فإن الدفع العلوي (Wu) يكون:

$$W_v = \frac{H_1 + H_2}{2} A \qquad (3)$$

حيث:

A = مساحة قاعدة السد. قوة الدفع العلوي سوف تعمل عند المركز المتوسط لمخطط الدفع العلوي (Uplift pressure Diagram).

يمكن الإشارة إلى أن القياسات الحقيقية على السدود تبين أن الدفع العلوي أقل كثيرًا عن ذلك الذى في المعادلة السابقة (3). وطبقًا للدراسات والأبحاث فإن الدفع العلوي على السد الثقالي يفترض أنه يتغير طوليًا من الثلثين للدفع العلوي عند الكعب (Heel) إلى الصفر عند مرتكز جدار الدعم (Toe) لعمق الماء المنصرف السفلي بغير التدوير (Tail water Depth).

لتخفيف وتحرير الدفع العلوي، فإن عادة توفير دهليز أو قاعدة مستطيلة للصرف (Drainage Gallery) في جسم السد شكل (١) قريبًا من الكعب (Heal). الدفع العلوي في دهليز الصرف يتم عندئذ حسابه بالمعادلة:

$$W_u = CW\left(H_2 + \frac{1}{2}\zeta(H_1 - H_2)\right) A \qquad (4)$$

حيث:

C = نسبة تلك المساحة التي يعمل عليها ضغط الماء الساكن

ζ = كثافة الدفع العلوي (Uplift Intensity) أى نسبة صافي الضغط الرأسي – (H_2 المتبقى للتبديد.

طبقًا لمعايير (USBR) فإن:

C = ١ ، ζ = ٠,٦٧ وذلك للسد العالي ذو أساس صخري في طبقات (Stratified).

بالاستبدال في المعادلة (4) فإننا نجد:

$$W_u = W\left(H_2 + \frac{1}{3}(H_1 - H_2)\right) A \qquad (5)$$

(٤) ضغط الزلزال (Earth Quake Pressure)

بسبب الزلزال، تحدث الموجات الأولية والثانية في القشرة الأرضية الموجات تمنح تسارع (Impart Acceleration) للأساس أسفل السد والذي ينتج قوة القصور الذاتي المقاومة للقوة المتسارعة (Inertia force) في جسم السد وتحدث إجهادات أولية في الطبقات السفلى ثم بالتدريج في كل جسم السد رغم أن موجة الزلزال يمكن أن تسير في أي اتجاه، فإنها عادة تحيل عجلة التسارع إلى الاتجاهات الرأسية والأفقية. من بين هذه، عجلة التسارع الرأسية لا يتم اعتبارها في تصميم السد نظرًا لأنها لا تسبب قوة تلف كبيرة، الميل نحو المنبع الذي يتوفر في مقطع السد لكونه كافيًا لحماية التأثيرات الضارة المحتمل حدوثها (التغيير اللحظي في الوزن المؤثر للسد). التسارع (العجلة) الأفقية تسبب التأثيرات التالية:

(أ) قوة القصور الذاتي المقاومة للقوة المتسارعة (Inertia force) لجسم لسد: قوة القصور الذاتي التي تعمل في اتجاه معاكس للقوة المتسارعة التي تسببها قوة الزلزال تساوي مجموعة كتلة الخزان. والتسارع (Acceleration) أي:

$$E_i = \frac{W}{g}(ag) = w.a \qquad (6)$$

حيث:

E_I = قوة القصور الذاتي المقاومة للقوة المتسارعة.

a = معامل التسارع (Acceleration coefficient).

g = التسارع بسبب الجاذبية.

القيمة العادية لـــ (a) هي ما بين ٠,١ – ٠,٢ وتعتبر قوة القصور الذاتي أنها تعمل عند مركز متوسط كتلة السد (Centroid of The mass of Dam).

ب- الضغط الهيدروديناميكي الخاص بحركة الماء (Hydrodynamic Pressure of water): العجلة (التسارع) الأفقي للسد والأساس يسبب التذبذب في الزيادة والنقصان في الضغط الهيدروستاتيكي (ضغط الماء الثابت) على وجه السد. طبقاً لـــ (Von-Karman) فإن تغيرات الضغط الهيدروديناميكي يفترض أنها قطعى مكافئ (Parabolic) وتحسب من المعادلة.

$$P_e = 0.555\ a\ w\ H_1^2 \qquad (7)$$

العمل عند ارتفاع $\frac{4H_1}{3\Pi}$ فوق قاع الخزان (الشكل ١). طبقاً لـــ (Zangar)، فإن تغير الضغط الهيدروديناميكى يكون سطح مكافئ بيضاوى – (Elliptical Cum. Parabolic). باستخدام الطريقة الكهربية المشابهة، فقد استنتج المعادلة التالية التى تعطى شدة للضغط عند عمق أقصى أسفل منسوب للمياه.

$$P_e\ y = Cy\ a\ w\ H_1 \qquad (8)$$

حيث:

Cy = معامل الضغط (بدون أبعاد) عند عمق أقصى أسفل منسوب للمياه.

$$Cy = \frac{C_m}{2}\left(\frac{Y}{H_1}\left[2-\frac{Y}{H_1}\right]+\sqrt{\frac{Y}{H_1}\left[2-\frac{Y}{H_1}\right]}\right) \qquad (9)$$

C_m = أقصى قيمة لمعامل الضغط لميل ثابت معين =

$$= 0.735\frac{\theta}{90^0}$$

θ = الزاوية بالدرجات الذي يكونها وجه السد في اتجاه المصدر مع الأفقي.

إجمالي الضغط عند العمق Y يمكن إيجاده بمتوسط مساحات ربع البيضاوي وشبه القطع المكافئ Areas of quarter-Ellipse and semi-parabola.

$$Pey = \frac{1}{2}\left(\frac{\Pi}{4} Pey\ Y + \frac{2}{3} Pey\ Y\right)$$

$$(10) \qquad = 0.726\ Pey\ Y$$

النتائج المعطاة تقارن بتلك التي تم الحصول عليها باستخدام معادلة (Van – Karıman).

(٥) ضغط الثلج (Ice Pressure)

ضغط الثلج عامل هام للسدود المنشأة في الدول الباردة. ضغط الثلج عند سطح الماء للخزان معرض للتمدد والانكماش بسبب التغير في درجة الحرارة. معامل التمدد الحراري للثلج لكونه خمسة أضعاف ذلك للخرسانة، فإن السد يجب أن يقاوم القوى الناتجة عن تمدد الثلج. القوة تعمل خطيًا في موازاة طول السد عند مستوى الخزان، ومقدارها يتغير من ٢,٥ كيلوجرام/سم^{٢} إلى ١٥ كجرام/سم^{٢}. المسموح به عموما هو المتوسط ٥ كجرام/سم^{٢} وذلك في الظروف العادية.

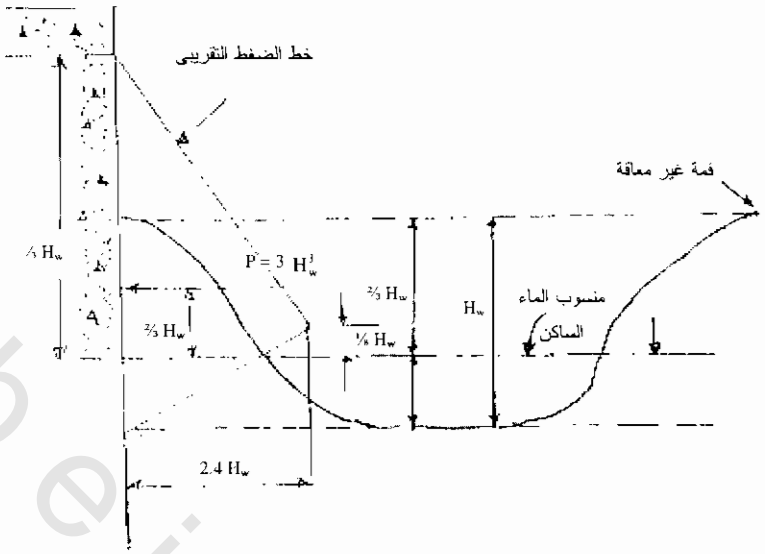
(٦) ضغط الموج (Wave Pressure)

الأمواج تولد على سطح الخزان بسبب هبوب الرياح فوقه. ارتفاع الموج يتم حسابه بمعادلة (Molitor) التى شرحت في الشكل (١١/٢) بالنسبة للطول المستقيم (F) (For Fretch) أقل من ٣٢ كيلو متر.

$$(11) \qquad H_w = 0.032\sqrt{V.F} + 0.763 - 0.2714\sqrt{F}$$

بالنسبة للطول المستقيم (F) أكبر من ٣٢ كيلو متر

$$(12) \qquad Hw = 0.032\sqrt{V.F}$$



شكل (١١/٢) ضغط الموج

حيث :

H_w = ارتفاع الأمواج بالمتر.

V = سرعة الريح كيلومتر/الساعة

F = الطول المستقيم لامتداد الماء (كيلومتر)

قوة الضغط بسبب الموج تكون طبقًا للمعادلة

(13) $Pw = 2.4\ w\ Hw\ (T/m^2)$

يعمل عند $\frac{٣}{٨}$ × ارتفاع الموج فوق سطح الماء الساكن

بفرض أن توزيع الضغط يكون ثلاثيًا مع الارتفاع (Triangular With Height)

ويساوي: $\frac{٥}{٨}$ ارتفاع الموج $\frac{5}{8}Hw$.

وإجمالي ضغط الموج Pw هو

$Pw = 2.4\ w\ Hw \times ½ \times ⅝\ Hw$

(14) $= 2\ w\ Hw^2\ (T/m)$

obeikandl.com

(٧) ضغط الطين الرملي: (Silt Pressure)

بالنسبة للطين الرملي أو رواسب التربة في الخزان، ينتج الضغط على وجه السد والذى يحسب بمعادلة (Rankine). سطح الطمي الرملي أو الأرض يفترض أنه أفقيا وموازيا لطبقة الخزان. مقدار ضغط الطين الطفلي يعطى بالمعادلة.

$$Ps = \frac{Ws\, H_s^2}{2}\left(\frac{1-\text{Sin B}}{1+\text{Sin B}}\right) \qquad (15)$$

حيث:

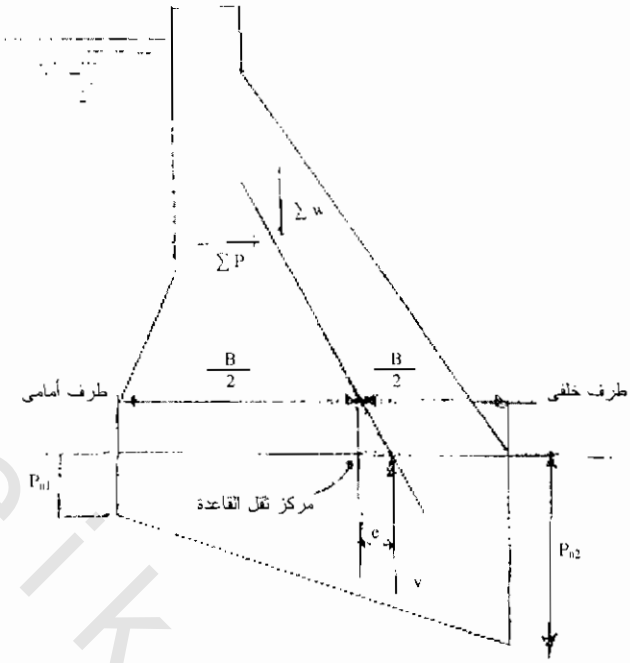
Ws = وحدة الوزن للطين الرملي أو التربة المغمورة في الماء.

B = زاوية الاحتكاك الداخلي، عادة تؤخذ ٣٠° درجة للرمل، والزلط، والطفل. والطين الرملي.

Hs = ارتفاع الطين الرملي المغمور في الماء فوق أساس السد.

(٣) رد فعل الأساسات (Reaction of Foundations)

في السد الثقالي فإن كل القوى التي تم تناولها تنقل إلى الأساس والذي للاتزان الإستاتيكي (الساكن) يجب أن يكون له رد فعل مقابل السد بقوة مساوية ومضادة والتي تسمى رد فعل الأساس. (أنظر الشكل ١). وله مركبتين (Two components)، رأسية وأفقية. المركبة الرأسية (V) هي إجمالي رد الفعل الرأسي والذي يضاد مجموع القوى الرأسية أي (Σ W) التى تعمل على الأساس، بينما المركبة الأفقية (H) هى قوى القص أو الإحتكاك على طول الوصلات فى السدود والأساس والتى تقاوم مجموع القوى الأفقية أى (Σ P). توزيع وحده رد الفعل الرأسي من المؤخر (Heel) إلى مرتكز جدار الدعم (Toe) للسد وجد أنه طولي وموضح تخطيطيًا في الشكل (١١/٣).



شكل (١١/٣) توزيع الضغط العمودى على أساس السد

الإجهاد المتعامد (Normal stress) عند أي نقطة على قاعدة السد (مع أخذ وحدة شريحة طولية في مقطع مستطيل للسد) تتكون من الإجهاد المباشر (Direct stress) وإجهاد الانكسار أو الثني (Flexural or Bending stress) والذي يحسب كالآتي:

$$\text{إجهاد مباشر} = \frac{V}{B} = \frac{V}{BX1} = \frac{\Sigma w}{A} \qquad (16)$$

$$\text{إجهاد الثني} = \pm \frac{MY}{I}$$

$$= \pm \frac{Ve\, B/2}{3} / I.\frac{B3}{12}$$

$$\text{إجهاد الثني} = \pm \frac{6\,Ve}{B_2} \qquad (17)$$

obeikandl.com

حيث:

A = مساحة القاعدة = 1 x B

B = عرض القاعدة

M = العزم حول مركز الجاذبية للقاعدة لكل القوى العمودية.

e = الحمل خارج المركز (Eccentricity loading)

I = عزم القصور الذاتي للقاعدة حول مركز جاذبيتها = $1-\frac{B^2}{12}$

Y = المسافة من مركز الجاذبية للقاعدة إلى الكعب أو مرتكز جدار الدعم. أو الجدار الأمامي للسد (Toc) $=\frac{B}{2}$

بجمع المعادلات (16)، (17)، فإننا نحصل على إجمالي الإجهاد المتعامد عند الجدار الأمامي ومؤخره السد.

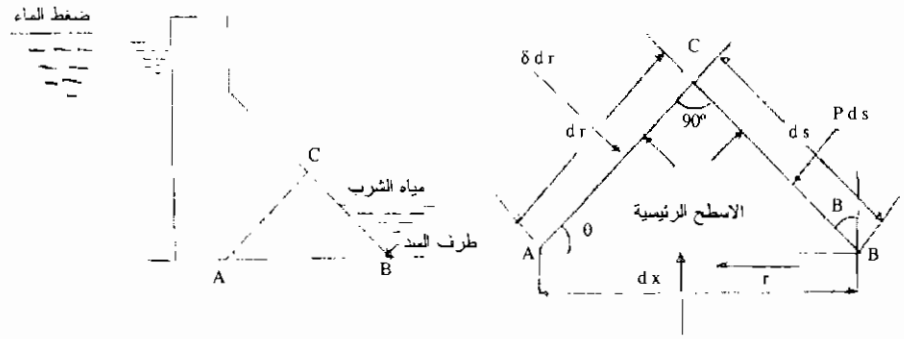
الإجهاد المتعامد عن المؤخرة = $P_{n1}=\frac{V}{B}\left(1-\frac{6e}{B}\right)$ (18)

الإجهاد المتعامد عند الجدار الأمامي = $P_{n2}=\frac{V}{B}\left(1-\frac{6e}{B}\right)$ (19)

(٤) الإجهادات الرئيسية وإجهادات القص: Principal and shear stresses

يمكن الإشارة إلى أن إجمالي الإجهادات العمودية، وإجمالي أقصى إجهادات ضغط عمودية الموضحة في المعادلة (١٩) ليست أقصى الإجهادات التي تحدث في منشأ السد. أقصى إجهادات تحدث عموديًا على السطوح المائلة (Inclined plants) العمودية على السطح الخارجي (Face) للسد.

لتقدير أقصى إجهادات إفترض مقطع مثلث بسيط (ABC) عند المقدمة أو المؤخرة لمقطع السد بحيث أن القوى يفترض أنها متجانسة على مختلف الوجوه الخارجية للسد (Faces). في الشكل (١٤) المقطع المثلثي (ABC) الموضح عند الطرف الأمامي للسد (TOE) حيث تكون الإجهادات عند أقصاها في حالة امتلاء الخزان.



شكل (١١/٤) مقطع ابتدائى مثلثى

نظرًا لأن ضغط الماء يعمل عموديًا على السطح الخارجي BC ولا توجد إجهادات قص ناتجة على هذا المستوى، فإن السطح BC (تحت التيار) للسد هو السطح المستوي الرئيسي. كذلك نظرًا لأن الأسطح الرئيسية المستوية تكون مشتركة عند زوايا قائمة، فإن السطح (CA) لمقطع المثلث يكون كذلك سطح مستوى رئيسي (Principal plane). كلاً السطحين المستويين الرئيسيين (BC) و (CA) عليهما إجهادات رئيسية تعمل عموديًا عليهم.

على فريضة:

P = شدة ضغط الماء على السطح BC بطول ds

δ = الإجهاد الرئيسي على السطح CA بطول dr

P_n = الإجهاد العمودى على السطح AB بطول dx

T = إجهاد القص على طول السطح AB

القوى العمودية على الأسطح BC، CA وAB هي pds، δds، pnd على التوالي.

بفرض طول شريحة طول واحدة للسد وتحليل كل القوى في كلا الاتجاهين. التحليل في الاتجاه العمودي، فإننا نحصل على:

$$(20) \quad Pndx = pds \cos(90^{\circ} - \theta) + \delta\, dr \sin(90^{\circ} - \theta)$$

$$Pn\, doc = pds \sin\theta + \delta\, dr \cos\theta$$

باستبدال $dr = dx\cos\theta$، $ds = dx\sin\theta$ في المعادلة (٢٠).

والحل فإننا نحصل على:

$$\delta = pn \sec^2 \theta - p \tan^2 \theta \quad (21)$$

العلاقة الرئيسية للإجهاد في المعادلة (٢١) ينطبق على كل سطحي السد في اتجاه المنبع وفي اتجاه المصب. ولكن، الحالة الشديدة تكون على السطح المواجه للمنبع عندما لا يكون هناك ماء منصرف بعد التدوير (Tail water). في هذه الحالة يكون الإجهاد الرئيسي (δ) طبقًا للمعادلة:

$$\delta = pn \sec^2 \theta \quad (22)$$

كذلك مع اعتبار قوى الحراك المائي (Hydrodynamic) على السطح المواجه للمنبع، فإن الإجهاد الرئيسي (δ_w) يعطى كالآتي:

$$\delta w = pn \sec^2 \theta - (p^3 \pm pe) \tan^2 \theta \quad (23)$$

حيث:

Pe = شدة ضغط الحراك المائي على السطح المواجه للمنبع طبقًا للمعادلة (٨).

بالمثل فإن الإجهاد الرئيسي على السطح المواجه للمصب يكون:

$$\delta = pn \sec^2 \theta (p - pe) \tan^2 \theta \quad (24)$$

الآن عند تحليل كل القوى في الاتجاه الأفقي فإننا نحصل على:

$$tdx = \delta\, dr \sin \theta - pds \cos \theta \quad (25)$$

أو

$$t = \delta \sin \theta \frac{dr}{dx} - p \cos \theta \frac{ds}{dx}$$

باستبدال الآتى:

$$\frac{dr}{dx} \text{ بـ } \cos \theta \text{ ، } \frac{ds}{dx} \text{ بـ } \theta$$

فإننا نحصل على:

$$t = (pn - p) \tan \theta \quad (26)$$

obeikandl.com

استبدال المعادلة (٢١) في المعادلة (٢٦) والحل، فإننا نحصل على:

$$t = (pn - p) \tan \theta \quad (27)$$

المعادلة (٢٧) تعطي إجهاد القص عند السطح في اتجاه المصب فقط. بالنسبة للسطح في اتجاه المنبع فإن قيمة (t) تظل نفسها ولكن الاتجاه يكون معكوسًا. وكذلك في حالة عدم وجود مياه منصرفة بعد التشغيل فإن:

$$t = pn\tan \theta \quad (28)$$

مع اعتبار أن الضغط للحراك المائي (Hydrodynamic) يسبب الزلزال، فإن إجهاد القص عند السطح المواجهة للمصب يكون كالآتي:-

$$td = (pn - (p - pe) \tan \theta \quad (29)$$

بالمثل: فإن إجهاد القص على السطح المواجه للمنبع يكون كالآتي:

$$t_u = (p + pe) \tan \theta \quad (30)$$

(٥) معيار الثبات لسدود التثاقل: Stability criteria of Gravity Dams:

لتعيين معيار الثبات لسدود التثاقل يكون من الضروري معرفة الطرق المختلفة لكيفية حدوث الانهيار لسدود التثاقل.

أ – أسباب الانهيار (causes of failure)

السببين الرئيسيين لانهيار سدود التثاقل هي:

(١) الانزلاق (Sliding)

(٢) الانقلاب (Over turning)

وتلك يمكن أن تتم أو تدعم بأسباب أخرى مثل وجود أحمال ضغط عالية تؤدي إلى انهيار السد بالضغط والإنقلاب وشروخ الشد (Tension cracks) في القاعدة المسببة للانهيار بالانزلاق.

الانزلاق (Sliding)

يحدث انهيار السد عند القاعدة على الاتصال الأفقي فوق الأساس أو على الفاصل الأفقي (Horizontal seam) في الأساس، وذلك في حالة أن القوى الأفقية المسببة للانزلاق تكون أكثر من مجموع مقاومة القص (Shear Resistance) للقاعدة أو الوصلة (Joint) والاحتكاك الاستاتيكي (Static Friction) الذي تسببه القوى العمودية.

الانقلاب (over turning)

يحدث الانهيار للسد بالانقلاب عندما تزيد القوى الأفقية عن القوى الرأسية مسببة محصلة كل القوى التي تعمل على السد لتقع خارج جسم السد. لذلك طالما أن المحصلة تقع داخل القاعدة، فإنه سوف لا يحدث انقلاب.

الضغط (compression)

نظرًا لأن محصلة كل القوى الأفقية والرأسية تقترب نحو سطح السد، فإن الإجهاد العمودي عل الطرف الأمامي (لمرتكز جدار الدعم – Toe) سوف يزداد كثيرًا وبسرعة بما يؤدي إلى انهيار بالضغط (compression failure) قبل الانقلاب.

سوف نرى أنه عند زيادة التحميل مختلف المركز (e) عن سدس $\frac{١}{٦}$ عرض القاعدة فإن الضغط العمودي على طرف المؤخرة (Heel) ينعدم بينما الضغط العمودي على المقدمة يصبح ضعف الإجهاد المباشر.

لذلك بوضع $e = \frac{B}{6}$ في المعادلة (١٨) ، (١٩) فإننا نحصل على:

$$p_{n_1} = O \qquad (31)$$

$$p_{n_2} = \frac{2V}{B} \qquad (32)$$

الشد: (Tension)

يمكن ملاحظة أن أي زيادة في قيمة (e) أكثر من $\frac{B}{6}$ للإجهاد العمودي عند طرف المؤخرة سوف تكون بالسلب أي شد (Tensile). قد تحدث تشققات الشد الأفقي والذي يقلل من قوة القص (Shearing strength) للوصلة (أو الفاصل Joint) أو القاعدة (Base). بجانب أنه مع دخول (Ingress) ضغط عمود الماء خلال تشققات الطبقة الصخرية، فإن قوة الرفع إلى أعلى (Up lift) سوف تزداد بما يقلل من حصيلة رد الفعل ومقاومة الاحتكاك نحو التحرك الأفقي. نتيجة لذلك فإن السد يمكن أن ينهار بالانزلاق.

ب – متطلبات الرسوخ والاستقرار: (Stability Requirement)

طبقًا لأسباب الانهيار التي تم تناولها، فإن متطلبات الرسوخ والاستقرار لسدود التثاقل هي كالآتي:

(١) مقاومة الانزلاق (مع إهمال القص) Resistance To sliding (Neglecting shear)

إجمالي القوة الأفقية ($\sum P$) التي تعمل على السد فوق أي اتصال أفقي تميل إلى انزلاق ذلك الجزء من السد فوق الجزء الأسفل (Lower part). مقاومة القص والاحتكاك للوصلة (أو الفاصل) يمكن أن يكون كافيًا لمقاومة الاستعداد للانزلاق. في حالة السدود الثقالي ذات الحجم المتوسط. فإنه عادة اعتبار قوى الاحتكاك فقط مع إهمال قوى القص والتي تعتبر فقط كإضافة إلى عامل الأمان.

إذا كان قيمة M = معامل الاحتكام الاستاتيكي المسموح به فإن عندئذ تكون (M $\sum W$) هي مقاومة الاحتكاك للانزلاق

$$M \sum W \geq \sum P$$

$$\frac{\Sigma P}{\Sigma W} = \tan a \leq M \qquad (33)$$

أو

حيث:

a = الزاوية بين القوى الرأسية والمحصلة. مقدار M يتغير ما بين ٠,٦ – ٠,٧٥ للمباني والأساس الصخري الجيد.

المعادلة (٣٣) التي تعطي متطلبات الرسوخ المطلوب يمكن تفسيرها وتعليلها طبيعيًا كالآتي:

المماس للزاوية مابين القوة الرأسية ومحصلة كل القوى بما فيها قوة الدفع العلوي (Uplift) التي تعمل على السد فوق أي مستوى (أو سطح) أفقي ستكون أقل من معامل الاحتكاك المسموح به عند هذا المستوى (السطح).

إعادة كتابة المعادلة (٣٣) تعطي

$$F.S. = \frac{M}{\tan a} \geq 1 \qquad (34)$$

أي معامل الأمان (F.S.) ضد الانزلاق مع اعتبار الاحتكاك فقط يجب أن لا يقل عن واحد.

(٢) مقاومة الانزلاق (مع أخذ القص في الاعتبار)

Resistance to sliding (considering shear)

لقد وجد أنه بينما تتغير كل القوى الأفقية والعمودية مع مربع ارتفاع السد، فإن مقاومة القص تتغير مع ارتفاع السد. بالتالي، فإن سلامة السد تقل مع زيادة الارتفاع ولذلك توجد الحاجة إلى تضمين عامل القص في حالة السد العالي.

متطلبات الرسوخ سوف تكون عندئذ مجموع ومقاومة الاحتكاك على الانزلاق على أي اتصال (Joint) وأن أقصى قوة قص للاتصال سوف تكون أكبر من إجمالي القوى الأفقية لتلك الوصلة بمقدار آمن.

بالتقدير الجبري:

$$\Sigma P = \frac{M \Sigma W + SB}{F.S.S.}$$

$$F.S.S = \frac{M\,\Sigma W + SB}{\Sigma P} \qquad (35)$$

حيث:

F.S.S = معامل احتكاك القص الآمن (Shear Friction Factor For Safety)

S = متوسط قوة القص للاتصال. أقصى قوة قص عمومًا تتراوح ما بين ١٤٠ طن/المتر المربع إلى ٥٠٠ طن / المتر المربع طبقًا لنوع الصخر. لأغراض التصميم الاقتصادي فإن معامل احتكاك القص الآمن (F.S.S) يجب أن يكون أكثر من (٤).

(٣) إجهادات الضغط: (Compressive stresses)

لمنع انهيار السد بالضغط أو الكسر (crushing)، يكون من الضروري أن أقصى إجهاد ضغط في أي مكان في السد لا يزيد عن إجهاد الضغط الآمن. نظرًا لأن معظم الإجهاد الرئيسي يكون أقصى إجهاد ضغط قائم فعلاً، فإنه لذلك أن معظم الإجهاد الرئيسي يجب ألا يزيد عن أقصى إجهاد ضغط (f) أي

$$p \le f \qquad (36)$$

يعتمد أقصى إجهاد ضغط مسموح به على إجهاد الكسر (crushing strength) للخرسانة والذي يمكن أن يكون من ٥٠٠ – ٦٠٠ طن/المتر المربع.

(٤) الشد الداخلي (Internal Tension)

في حالة حدوث شد في أي مكان في مقطع السد، فإنه تظهر شقوق الشد نظرًا لأن البناء أو الخرسانة أعيقًا في مقاومته للشد. كما سبق توضيحه، فإن هذا سوف ينتج عنه في حالة أن تكون $e \rangle \frac{B}{\sigma}$. لذلك فإنه لعدم حدوث شد فإن (e) يجب أن تكون أقل من $\frac{B}{\sigma}$ أو بمعنى آخر، فإن المحصلة يجب أن تقع دائمًا خلال الثلث الأوسط. وهذا يسمى بقانون الثلث الأوسط (Middle Third Rule) ويعتبر حالة شديدة الأهمية في تصميم السدود. ولكن، يكفي الإشارة إلى أنه في حالة السدود

الخرسانية العالية، فإن الشد القليل خلال الحدود المسموح بها يمكن أن يقبل بدون أي عواقب وخيمة. إجهادات الشد يجب أن لا تكون عالية عن ٥ كيلوجرام/سم^{٢} في حالات أقصى تحميل شديد.

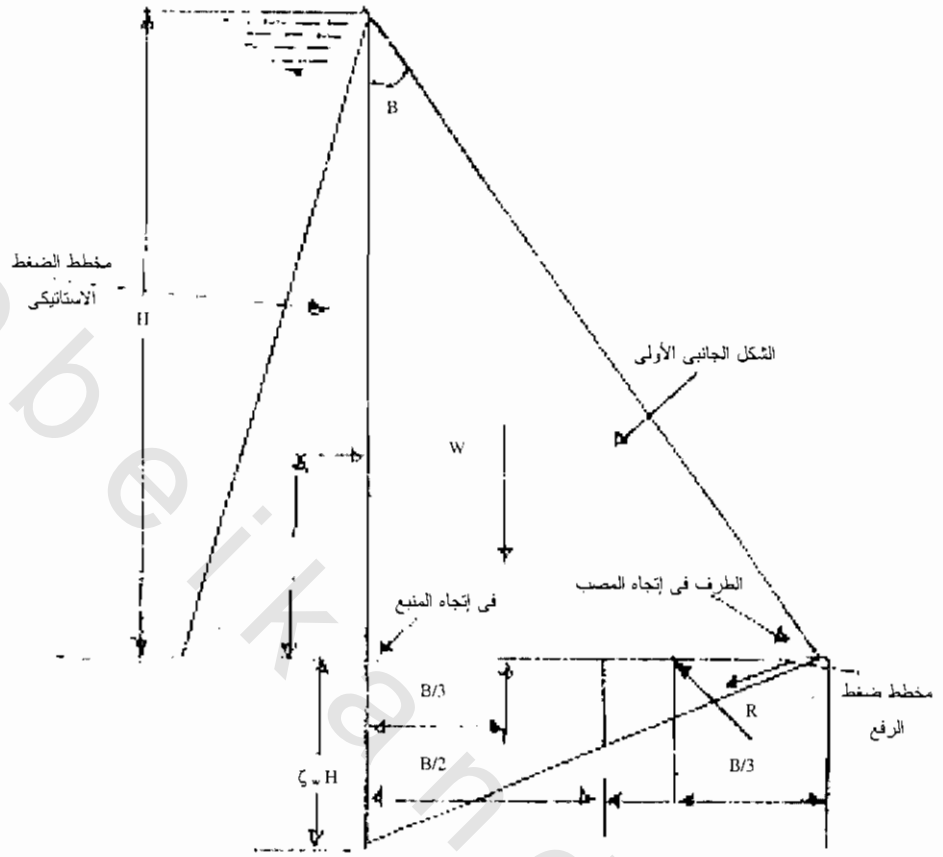
(٥) الانقلاب (Overturning)

الانقلاب يحدث عندما تكون محصلة كل القوى على السد تقع خارج قاعدة السد – للاستقرار والرسوخ، فإن السد يجب أن يكون آمناً ضد الانقلاب مع توفير عامل أمان مناسب بالإضافة إلى قواعد الأمان لانزلاق الشد (Sliding Tension)، وأقصى إجهادات ضغط.

عامل الأمان لمقاومة الانقلاب يعرف بأنه نسبة عزوم الاستقرار والرسوخ (Stabilization Moments)، إلى عزوم الإنقلاب حول الطرف الأمامي للسد (TOE) ولا تقل عن ١,٥.

(٦) الشكل الجانبي الابتدائي لسد التثاقل: Elementary Profile of A Gravity Dam

الشكل الجانبي الابتدائي لسد التثاقل هو المقطع المثلثي (Trainglular section) الذي له العرض يساوي صفر عند منسوب المياه حيث الضغط الهيدروستاتيكي للماء يساوي صفر، وأقصى عرض للقاعدة (B) حيث يعمل أقصى ضغط هيدروستاتيكي شكل (١١/٥). لذلك فإن الشكل الجانبي الابتدائي لسد التثاقل يشبه مخطط الضغط الهيدروستاتيكي نظرًا لأن الوزن (W) يعمل عند مسافة $\left(\frac{B}{3}\right)$ من السطح المواجه للمنبع، فإن الشكل الجانبي لمثلث الزاوية القائمة يوفر أقصى قوة استقرار ورسوخ الانقلاب بدون أن يسبب شد عند القاعدة. ولكن، في حالة توفير أي شكل جانبي مثلثي بخلاف الشكل الجانبي المثلثي بالزاوية القائمة، فإن وزنه ما زال يعمل قريبًا من السطح المواجه للمنبع والذي يمكن أن يوفر قوة استقرار ورسوخ أعلى ولكن قد يسبب الشد عند طرق المقدمة (TOE).



شكل (١١/٥) الشكل الجانبى الأولى للسد الثقالى

القوى التي تعمل على الشكل الجانبي الابتدائي هي:

١- وزن السد $W = \frac{1}{2} B H Y W$ (37)

حيث: Y = الجاذبية الفرعية لمادة السد.

٢- الضغط الهيدروستاتيكى $P = \frac{1}{2} W H^2$ (38)

٣- ضغط الرفع (Uplift) $W_u = \frac{1}{2} \zeta Bw H$ (39)

(أ) حساب عرض القاعدة (Calculation of Base Width)

عرض القاعدة (B) يوجد في حالتين:

- معيار الإجهاد (Stress Criterion)
- معيار الانزلاق (Sliding Criterion)

معيار الإجهاد:

في حالة الخزان تام الملئ وعدم وجود شد، فإن محصلة رد الفعل يجب أن تمر عند النقطة الثالثة الخارجية (Outer Third Point). مع أخذ عزوم القوى حول هذه النقطة والمساواة بصفر، فإننا نحصل.

$$P \times \frac{H}{3} + Wu \times \frac{B}{3} - W \times \frac{B}{3} = 0$$

استبدال تلك القوى من المعادلة رقم (٣٧) خلال رقم (٣٩) فإننا نحصل على:

$$\frac{1}{2} W H^2 \times \frac{H}{3} + \frac{1}{2} \zeta Bw H \times \frac{B}{3} - \frac{1}{2} BHY W \times \frac{B}{3} = 0 \qquad (41)$$

بالضرب في $\frac{6}{wH}$ والحل.

$$B = \frac{H}{\sqrt{Y - \zeta}} \qquad (42)$$

معيار الانزلاق:

لعدم حدوث الانزلاق، فإن القوى الأفقية المسببة للانزلاق يجب أن تتعادل مع قوى الاحتكاك المقاومة.

$$P = M (w - Wu) \qquad (43)$$

مع الاستبدال من المعادلة (٣٧) خلال (٣٩) ومع الحل

$$B = \frac{H \cdot}{M (Y - \zeta)} \qquad (44)$$

obeikandi.com

أدنى عرض للقاعدة يكون أكبر من المقادير المعطاة في المعادلة (٤٢) والمعادلة (٤٤).

مثال - ١:

عين أقصى عرض قاعدة للشكل الجانبي الابتدائي لسد التثاقل بالبيانات الآتية:

الجاذبية النوعية لمادة السد = ٢,٤

معامل شدة الرفع لأعلى = ١

معامل الاحتكاك الاستاتيكي = ٠,٧٥

الحل:

مع استبدال قيم البيان في المعادلة (٤٢) فإننا نحصل على

$$B = \frac{H}{\sqrt{2.4 - 1}} = 0.84\ H$$

مع استبدال قيم البيان في المعادلة (٤٤) فإننا نحصل على

$$B = \frac{H}{0.75\,(2.4 - 1)} = 0.95\ H$$

لذلك:

فإن أدنى عرض للقاعدة سوف يكون ٠,٩٥ ضعف الارتفاع للسد.

(ب) الإجهادات الناتجة في الشكل الجانبي الابتدائي:

Stresses Developed In The Elementary Profile:

الإجهاد العمودي على طرف المؤخرة والمقدمة للسد تم الحصول عليهما من المعادلات = (١٨) ، (٢٩) والتي يمكن وضعهم في الشكل العام.

$$Pn = \frac{V}{B}\left(1 \pm \frac{6e}{8}\right) \qquad (45)$$

obeikandl.com

بالنسبة للشكل الجانبي الابتدائي، فإن المقدار الآتية:

$$V = W - Wu \text{ and } e = \frac{B}{6}$$

يمكن استبدالهم في المعادلة (٤٥) للحصول على الإجهاد العمودي عند الطرف الخلفي والطرف الأمامي للسد عند الامتلاء الكامل للخزان.

$$P_{nh} \frac{W - Wu}{B}(1-1) = 0 \quad (46)$$

$$P_{nt} = \frac{2(W - Wu)}{B} \quad (47)$$

باستبدال القيم W , Wu في المعادلة (٣٧) ، (٣٩) في المعادلة (٤٧) والحل فإننا نحصل على:

$$Pnt = wH(Y - \zeta) \quad (48)$$

الإجهاد الرئيسي عند الطرف الأمامي يتم الحصول عليه من المعادلة (٢١) وذلك بوضع P = 0 (لا يوجد ماء منصرف سفلي (No Water Tail)).

$$\delta = Pnt\ Sac^2\theta \quad (49)$$

$$= Pnt(\tan^2\theta + 1)$$

استبدال $\tan 0$ بـ $\frac{B}{H}$ باستخدام المعادلة (٤٢) والمعادلة (٤٨) والحل

$$\delta = w\,H(Y - \zeta + 1) \quad (50)$$

إجهاد القص عند الطرف الأمامي يتم الحصول عليه من المعادلة (٢٨) كالآتي:

$$t = Pnt\ \tan\theta$$

استبدال $(\tan\theta)$ بـ $\frac{B}{H}$ واستخدام المعادلة (٤٢) و (٤٨) والحل:

$$t = w\,H\frac{H}{\sqrt{Y - \zeta}} \quad (51)$$

حيث أن الإجهاد العمودي عند الطرف الخلفي (Heel) يساوي صفر، فإن كلاً من الإجهاد الرئيسي (Principal stress) وإجهاد القص عند الطرف الخلفي يساوي صفر.

(حـ) حد الارتفاع للسد (Limiting Height of Dam)

الإجهاد الرئيسي عند طرف مقدمة السد كما في المعادلة (٥٠) هو:

$$\delta = wH(Y - \zeta + 1)$$

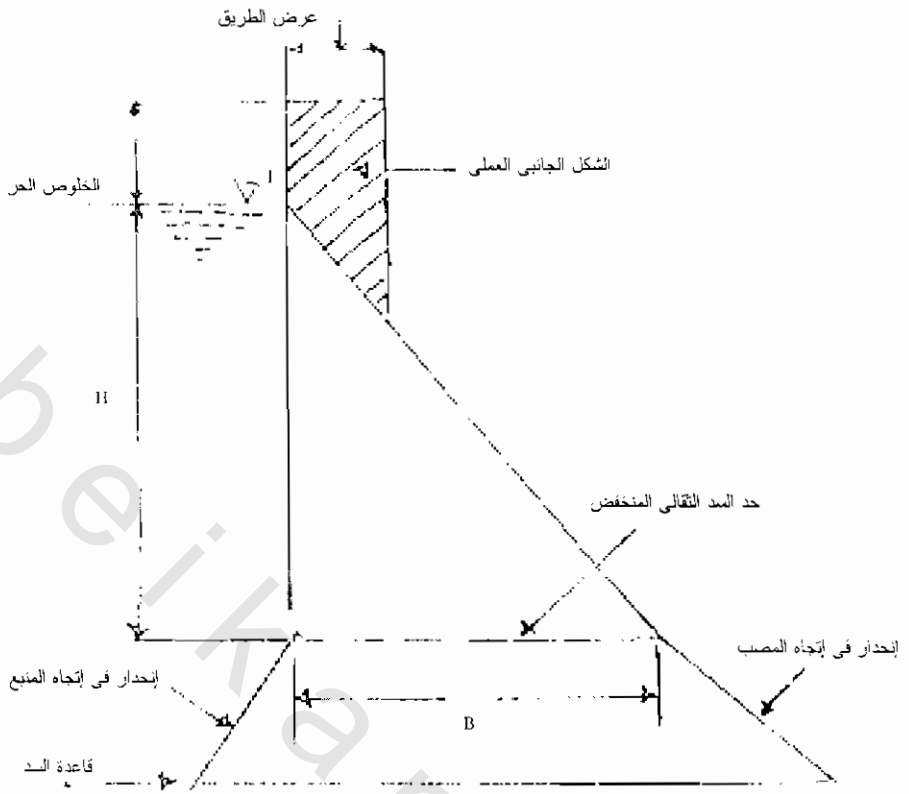
معيار الاستقرار والرسوخ للسد يتطلب أن أقصى قيمة للإجهاد الرئيسي يجب أن لا تزيد عن الإجهاد المسموح به (fa) للمادة. في حالة الحد لأكبر ارتفاع.

$$(52) \qquad fa = \sigma = w\,H(Y - \zeta + 1)$$

حد الارتفاع للسد (H_1) سيتم عندئذ تعيينه كالآتي:

$$(53) \qquad H_1 = \frac{fa}{w(Y - \zeta + 1)}$$

هذا يعني أنه إذا كان السد أعلى عن مقدار الحد الأعلى للارتفاع، فإن الإجهاد الرئيسي سوف يزيد عن الإجهاد المسموح به. لذلك، فإن لوضع الإجهاد الرئيسي تحت الحدود كما في حالة السدود العالية، فقد يكون من الضروري التغيير المناسب لمقطعه وذلك بإعطاء ميل زائد (Extra Slope) للأجناب في اتجاه المنبع وفي اتجاه المصب أسفل حد الارتفاع (انظر الشكل ٦/١١).



شكل (٦/١١) السدود العالية والمنخفضة

المعادلة (٥٣) تعرف التمييز بين سد التثاقل العالي والمنخفض. لذلك فإن السد الذي فيه الارتفاع (H) يكون أقل عن ذلك المعطى في المعادلة (٥٣) يسمى سد التثاقل المنخفض (Law Gravity Dam) بينما السد حيث يكون فيه الارتفاع منشأ بما يزيد عن المعطى في المعادلة (٥٣) يسمى سد التثاقل العالي (High Gravity Dam).

مثال:

سد التثاقل المصمت (Solid Gravity Dam) يتم إنشاؤه من الخرسانة ٤ : ٢ : ١ له البيان التالي:

عامل الأمان = ٤

الجاذبية النوعية لمادة السد = ٢,٤

معامل شدة الرفع = ٠,٦٧

يتم تعيين الارتفاع الذي يمكن أن يصل إليه إنشاء السد كسد منخفض. كذلك عين عرض قاعدته.

مع مراعاة أن أقصى إجهاد ضغط للخرسانة ٤ : ٢ : ١ = ١٦٠كجرام/سم^{٢}

الحـــل:

إجهاد الضغط المسموح به

$$fa = \frac{160}{4} = 40\ kg/cm^2 = 400\ T/m^2$$

$$Y = 2.4$$

$$\zeta = 0.67$$

$$w = 1000\ kg/m^3 = IT/m^3$$

بالاستبدال في المعادلة (٥٣)

$$H_L = \frac{400}{1\ (2.4 - 0.67 + I)} = 146.5\ m$$

عرض القاعدة يعطي بالمعادلة (٤٢)

$$B = \frac{146.5}{\sqrt{2.4 - 0.67}} = 111\ m$$

(٧) الشكل الجانبي العملي لسد التثاقل: Practical Profile of Gravity Dam

الشكل الجانبي الأولي لسد التثاقل هو فقط شكل جانبي نظري. السد الذي له قمة في شكل طرف أو قمة المثلث (Apex of A triangle) ليس عمليًا وذلك للأسباب الآتية:

(١) عند الرغبة في عبور الوادي عند موقع السد، فإنه يلزم عمل طريق أعلى قمة السد.

(٢) بسبب وجود الطريق، فإنه يجب أن يراعى الحمل الإضافي في تصميم قمة السد والذي يتطلب السمك المناسب. كذلك فإن هذا المقطع يجب أن يكون قويًا

بما يكفي لمقاومة صدمات الأجسام الطافية في الماء مثل جذوع الأشجار..إلخ..

(٣) يجب أن يكون الطريق بالعرض الكافي لإمكان تشغيل البوابة في حالة السد العالي.

(٤) لمنع حدوث الطرطشة للموجات بفعل حركة الرياح والصعود فوق القمة للسد، فإنه قمة السد يجب أن تكون فوق أقصى منسوب للخزان. أي أن السد يجب أن تتوفر له خلوص حر (Free Board).

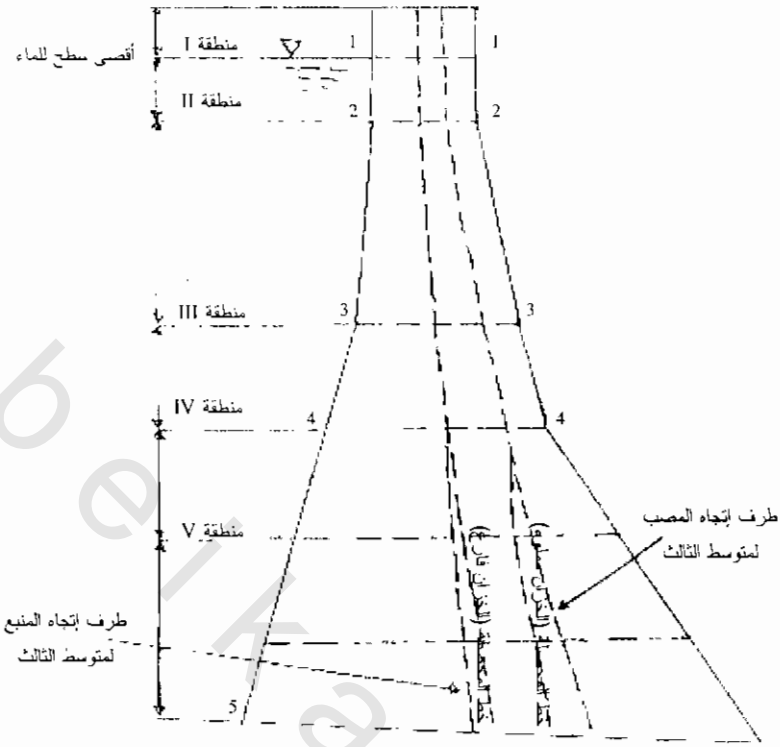
لذلك فإن الشكل الجانبي العملي للسد يجب أن يكون له العرض المناسب عند القمة لحمل الطريق والخلوص الحر الكافي (شكل ١٤٦) – عرض قمة سد التثاقل يتراوح من ٠,١٥ الارتفاع للسدود المنخفضة إلى العرض الضروري لحركة المرور فوق موقع السد. عرض القمة من ٥ – ٦ متر يعتبر مقبول بالنسبة لسدود التثاقل.

(٨) تحليل سد التثاقل: (Analysis of Gravity Dam)

تحليل سد التثاقل يتم بأخذ مقطع خاص للسد له وحدة عرض (Unit Width). كل الأحمال المختلفة التي تعمل على السد والإجهادات الناتجة يتم حسابها لمراجعة معيار استقرار ورسوخ سد التثاقل كما تم توضيحه في الفقرة (٤). لأغراض التحليل فإنه عادة تستخدم طريقة الخطوة – خطوة – أو طريق المناطق (Zoning)، ولكن للحصول على نتائج سريعة وتقريبية فإنه تستخدم طريقة الخطوة خطوة.

أ – طريقة الخطوة – خطوة (Step by Step Method)

في هذه الطريقة يتم التحليل الإنشائي خطوة خطوة من القمة إلى القاع لمقطع السد في حالتي امتلاء الخزان وحالات خلو الخزان من المياه. مقطع السد يتم تقسيمه إلى عدد من المناطق طبقاً للتغير في الإجهادات انظر الشكل (١١/٧).



شكل (١١/٧) طريقة المناطق خطوة بخطوة

المنطقة رقم (I): تلك هي جزء السد فوق أعلى منسوب للمياه أو في حالة وجود ثلج، تكون فوق قاع طبقة الثلج. في حالة الثلج، يتم تصميم السد ليتحمل ضغط الثلج. وفي حالة عدم وجود الثلج، فإن ارتفاع المنطقة (I) يتم إحكامه بمتطلبات الخلوص الحر أساسا بسبب فعل الموج. وعرض السد يتحدد بالاعتبارات العملية أو الاقتصادية للمقطع ككل.

المنطقة رقم (II): تلك هي المنطقة حيث تظل فيها أسطح السد عمودية في اتجاه المنبع وفي اتجاه المصب. حده (٢-٢) الشكل (١١/٧) يتحدد بضبط ارتفاعه بحيث أن المحصلة تمر خلال الثلث المتوسط على جانب اتجاه المصب في حالة الامتلاء للخزان.

المنطقة (III): في هذه المنطقة، يبدأ السطح المواجه للمصب ليكون له ميل أو انحدار بغرض أن المحصلة يجب أن تمر خلال منتصف الثلث (Middle Third) في حالة الخزان الممتلئ. في حالة الخزان الفارغ، تظل المحصلة خلال منتصف الثلث مع السطح المواجه للمنبع عموديًا حتى الحد (٣- ٣) ويتقاطع عند نهاية اتجاه المنبع لمنتصف الثلث (Upstream Extremityof the Hiddle Third).

المنطقة (IV): في هذه المنطقة، يبدأ السطح المواجه للمنبع كذلك في الانحدار حدوده هي (٤-٤) إلى أسفل والتي تتحدد طبقًا لحالة حدود ميل الضغط أي إن وحدة إجهادات الضغط المائل يجب أن لا تزيد عن المقادير السابق تحديدها.

المنطقة (V): في هذه المنطقة، يبدأ السطح المواجه للمصب في الاستواء (Flatten) للمحافظة على الضغط المائل (Inclined Pressure) على السطح المواجه للمصب خلال حدود العمل لحالات الخزان الممتلئ والخزان الفارغ.

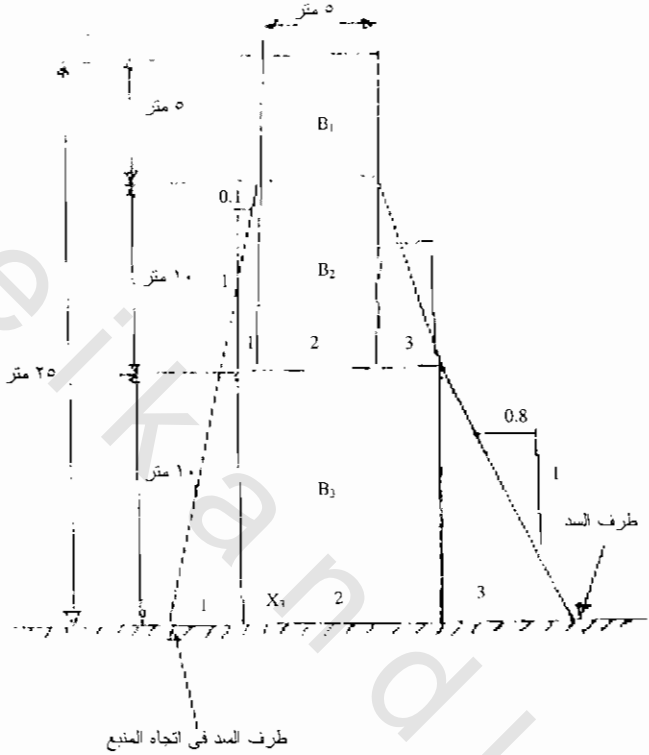
قد توجد مرحلة حيث مع زيادة الانحدار على الأسطح في مواجهة المنبع وفي مواجهة المصب، فإنه يكون من غير الممكن احتواء أقصى ضغط على الطرف المواجه للمصب (Downstream Toe) خلال حدود عمله والتي سوف تتطلب عندئذ إما مراجعة كاملة لكل التصميم أو خفض ارتفاع السد.

مثال:

الشكل (١١/٨) يوضح مقطع لسد ثقالي. باستخدام طريقة الخطوة خطوة، راجع استقرار ورسوخ مقطع السد بالبيانات الآتية:

- عمق الماء = ٢٥ متر
- لا يوجد خلوص حر.
- يتم إهمال تأثير الزلزال.
- معامل قوة الرفع = ٠,٥
- معامل الاحتكاك = ٠,٦٥

- وحدة الوزن للخرسانة = ٢٤٠٠كجرام/م^{٣}.
- أقصى إجهادات مسموح بها في ضغط السد الخرساني = ٥٠٠ طن/المتر المربع، الشد = ٥٠ طن/المتر المربع، القص = ٢٥٠ طن/المتر المربع.



شكل (١١/٨) السد الثقالى (مقطع للمثال)

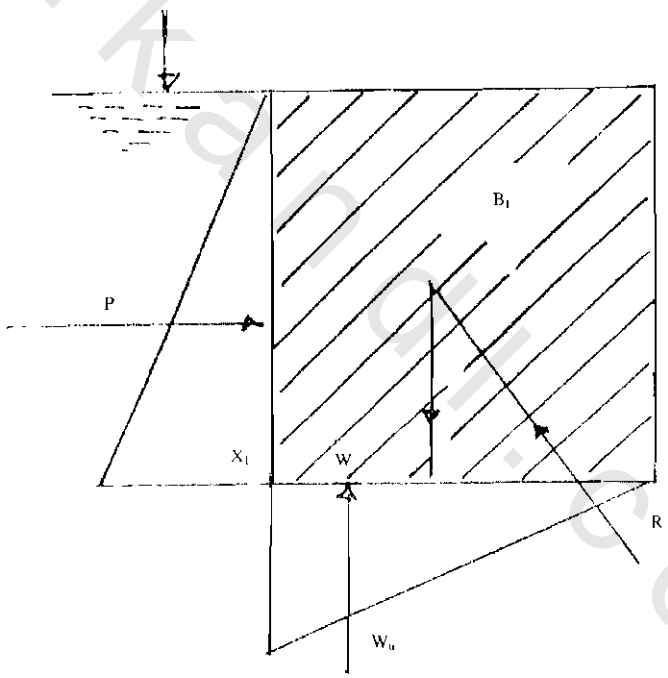
الحـــل:

<u>الخطوة رقم (I):</u> بالتقدم من القمة إلى القاع، الكتلة B_1 للمنطقة (I) يتم تحليلها أولاً كل القوى التي تعمل على الكتلة تعتبر خلال مخطط الجسم الحر (Free Body Diagram). القوى التي تعمل على الكتلة، قدرتهم الزراعية أو فعالية الرافعة (Leverage) والعزم الناتجة يتم حسابها وجدولتها. تحليل الاستقرار يتم عندئذ عمله كما تمت الإشارة إليه في الفقرة (٥).

الخطوة رقم (II): الكتل B_1 و B_2 للمناطق (I) و (II) يتم عندئذ أخذهم معًا. القوى التي تعمل متصلة عليهم وعزومهم يتم حسابها وجدولتها وعمل إجراءات مراجعة الاستقرار والرسوخ.

الخطوة رقم (III): يتم اعتبار الكتل B_1 و B_2 و B_3 معًا وتكرار الطريقة السابقة لاختبار المقطع ككل من القمة إلى القاع للسد لاستقراره ضد قوى عدم الاستقرار وعزومها والإجهادات الناتجة.

الكتلة (1): أخذ العزوم حول الاتصال (X_1) للسطح المواجه للمنبع الشكل (٢/٩)، حسابات الاستقرار مبينة في الجدول (١).



شكل (١١/٩) مخطط الجسم الحر للكتلة B_1 مع الخزان الممتلئ

جدول (١) حسابات الاستقرار للكتلة (١)

م	البند المادة	الوصف والأبعاد	القوة (كجرام) أفقية رأسية	عزم الرافعة الذراع (متر) (متر كجرام)
١	W	وزن وحدة العرض للكتلة B١ = ٢٤٠٠×١×٥×٥	٦٠٠٠٠	١٥٠٠٠٠
٢	Wu = 0.5 WH/2A = 0.25 WH A	الرفع العلوي (Uplift) = ١×٥×٥×١٠٠٠×٠,٢٥	٦٢٥٠ –	٥/٣ ١٠٤١٦ –
٣	$P=\frac{W H^2}{2}$	ضغط الماء = $\frac{1000 \times 5^2}{2}$	١٢٥٠٠	٥/٣ ٢٠٨٣٣
			٥٣٧٥٠	١٦٠٤١٧

ذراع الرافعة للمحصلة (Lever Arm of Resultant) = $\frac{١٦٠٤١٧}{٥٣٧٥٠}$ = ٢,٩٨ متر

لا مركزية التحميل (e) = ٢,٩٨ – ٢,٥ = ٠,٤٨ متر (في منتصف الثلث) باستخدام المعادلات (١٨)، (١٩).

P_{n1} = الضغط العمودي على السطح المقابل للمنبع أو الطرف الخلفي =

$$\frac{٥٣٧٥٠}{٥} \quad \frac{(١-٦\times٠,٤٨)}{٥} = ٤,٥٦ \text{ طن / المتر المربع.}$$

P_{n2} = الضغط العمودي على السطح المواجه للمصب أو الطرف الأمامي

$$= \frac{٥٣٧٥٠}{٥} \quad \frac{(١+٦\times٠,٤٨)}{٥} = ١٦,٩ \text{ طن/المتر المربع}$$

معامل الأمان ضد الإنقلاب:

$$\text{معامل الأمان} = \frac{\text{مجموع عزوم الإنقلاب}}{\text{مجموع عزوم الإستقرار}}$$

$$= \frac{١٥٠٠٠٠ + ٢٠٨٣٣}{١٠٤١٦}$$

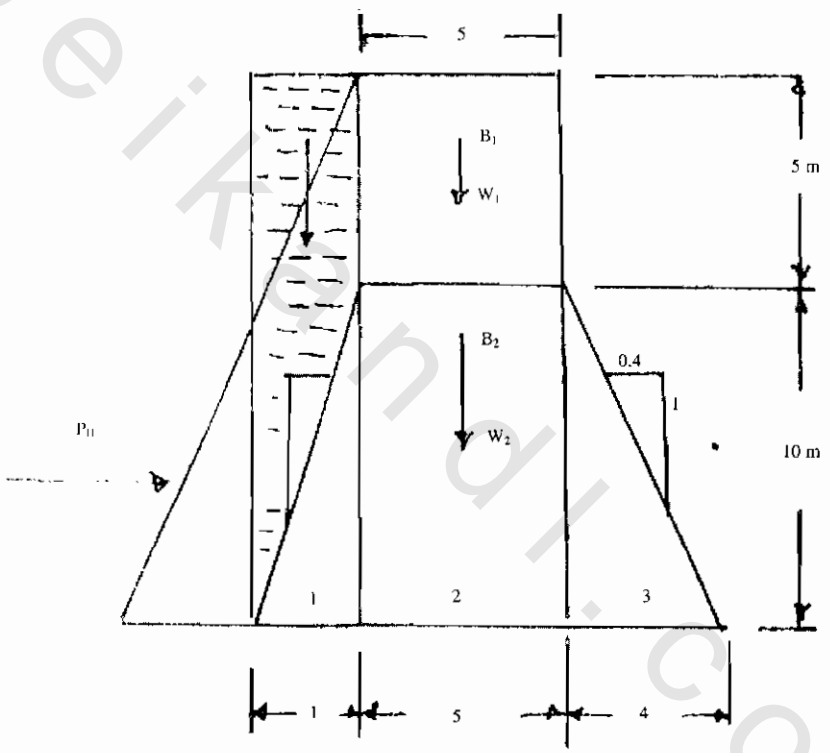
= ١,٥٢١٦,٤ لذلك يكون آمناً.

معامل الأمان ضد الإنزلاق:

معامل الأمان = $\frac{٥٣٧٥٠ \times ٠,٦٥}{١٢٥٠٠}$ = ٢,٨ > ١ لذا فهو آمن.

الكتلة B_1 و B_2

يأخذ العزوم حول السطح المواجه للمصدر الوصلة (X_2) الشكل (١٠) فإن حسابات الاستقرار موضحة في الجدول (٢).



شكل (١١/١٠) مخطط الجسم الحر للكتل B_1، B_2 والخزان ممتلئ

جدول حسابات الاستقرار للكتلة B_1 و B_2

م	البند	الوصف والأبعاد	القوة (كجرام) أفقية رأسية	ذراع الرافعة متر	العزم متر كجرام
١	٢	٣	٤	٥	٦
		الكتلة B_1			
١	W_1	٢٤٠٠ × ١ × ٥ × ٥	٦٠٠٠	٢/٧	٢١٠٠٠٠
٢	W_2	الكتلة B_2			
	W_{21}	المثلث I			
		$\frac{٢٤٠٠}{٢} \times ١٠ \times ١$	١٢٠٠٠	٣/٢	٨٠٠٠
	W_{22}	المستطيل (٢)			
		٢٤٠٠ × ١٠ × ٥	١٢٠٠٠٠	٢/٧	٤٢٠٠٠٠
	W_{23}	المثلث (٣)	٤٨٠٠٠	٣/٢٢	٣٥٢٠٠٠
		٢٤٠٠ × ١٠ × ٤ × ½			
٣	Wu	١٠×١٥×١٠٠٠×٠,٢٥ = Wu	٣٧٥٠ –	٣/١٠	١٢٥٠٠٠ –
٤	P	$\frac{١٥ \times ١٠٠٠^{٢}}{٢}$ = P_{11}	١١٢٥٠٠	٣/١٥	٥٦٢٥٠٠
		١ × ٥ × ١٠٠٠ = Pv	٥٠٠٠	٢/١	٢٥٠٠
		$\frac{١٠}{٢} \times ١٠٠٠$	٥٠٠٠	٣/١	١٦٦٧
		الخزان ممتلئ	٢١٢٥٠٠		١٤٣١٦٦٧
		الخزان فارغ	٢٤٠٠٠٠		٩٩٠٠٠٠

في حالة امتلاء الخزان:

اللاتمركز (Eccentricity) (e) = $\frac{١٤٣١٦٦٧}{٢١٢٥٠٠}$ = $\frac{١٠}{٢}$ = ١,٧٤ متر

الإجهادات العمودية (Normal Stressed)

عند الطرف الخلفي: (Heel)

$$P_{n1} = \frac{٢١٢٥٠٠}{١٠} \frac{(١-٦ \times ١,٤٧)}{١٠}$$

= –٩٣٥ كجرام / المتر المربع = ١ طن / متر مربع (الشد) أقل عن أقصى المسموح به.

عند الطرف الأمامى: (Toe)

$$P_{n2} = \frac{٢١٢٥٠٠}{١٠} \frac{(١,٤٧\times٦+١)}{١٠}$$

= ٤٣٤٣٥ كجرام / المتر المربع = ٤٣,٤ طن / المتر المربع.

معامل الأمان ضد الإنقلاب:

معامل الأمان = $\frac{١٢٥٠٠٠ + ١٤٣١٦٦٧}{١٢٥٠٠٠}$ = ١٢,٤٥ > ١,٥

معامل الأمان ضد الإنزلاق:

معامل الأمان = $\frac{٢١٢٥٠٠ \times ٠,٦٥}{١١٢٥٠٠}$ = ١,٢٢ > ١ لذلك يكون آمنا

فى حالة الخزان الفارغ:

$$e = \frac{٩٩٠٠٠٠}{٢٤٠٠٠٠} - \frac{١٠}{٢}$$ = - ٠,٨٧ متر فى منتصف الثلث.

العلامة السالبة تعنى أن اللاتمركز نحو السطح فى إتجاه المنبع أو الطرف الخلفى.

عند الطرف الخلفي (Heel):

$$P_{n1} = \frac{٢٤٠٠٠٠}{١٠} \frac{(٠,٨٧\times٦-١)}{١٠}$$

= ١١٤٧٢ كجرام / المتر المربع

= ١١,٥ طن / المتر المربع

عند الطرف الأمامى (Toe):

$$P_{n2} = \frac{٢٤٠٠٠٠}{١٠} \frac{(٠,٨٧\times٦+١)}{١٠}$$

= ٣٦٥٢٨ كجرام / المتر المربع

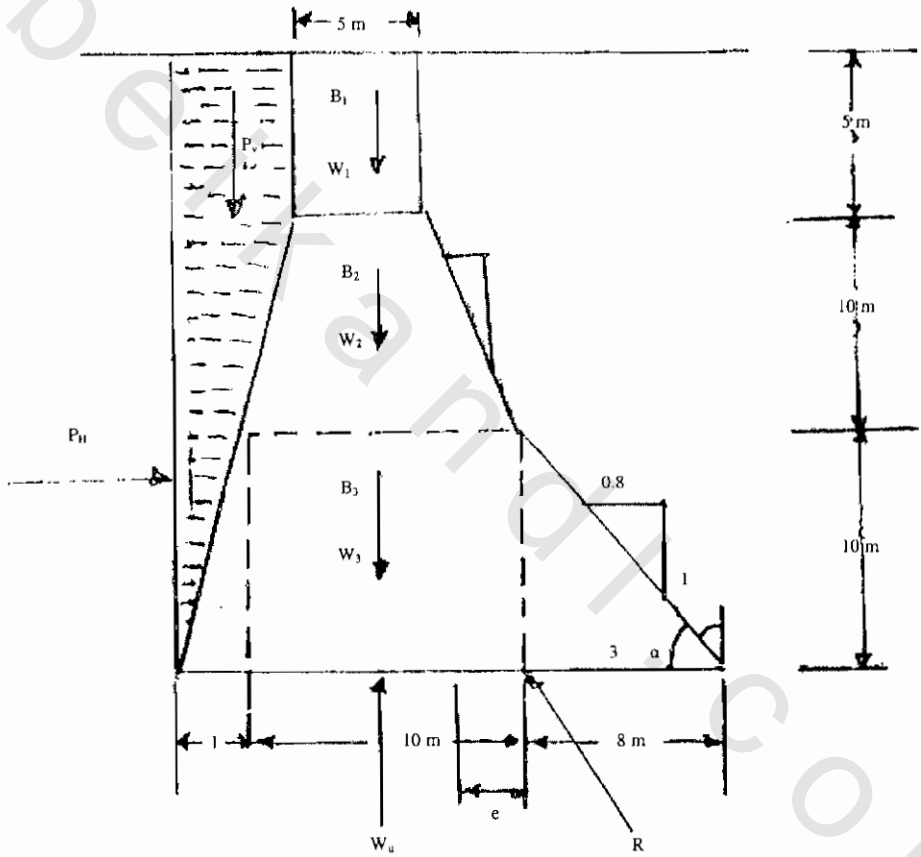
= ٣٦,٥ طن / المتر المربع

obeikandi.com

عندما يكون الخزان فارغا فإنه لا يوجد عزم إنزلاق أو إنقلاب. لذلك فإن السد يكون آمنا ضد الإنزلاق والإنقلاب.

الكتل B_1، B_2، B_3:

مع أخذ العزوم حول السطح المواجه للمنبع الإتصال X_3 (أنظر الشكل ١١). حسابات الاستقرار موضحة فى الجدول ٣.



شكل (١١/١١) مخطط الجسم الحر للكتل B_1، B_2، B_3

جدول ٣ حسابات الاستقرار للكتل B_1 و B_2 و B_3

م	البند	الوصف والأبعاد	القوة (كجرام) أفقية رأسية	ذراع الرافعة متر	العزم متر كجرام
١،٢	W_2 ،W_1	الوزن الذاتى للكتلة	٦٠٠٠٠	٢/٩	٢٧٠٠٠٠
		B_1 و B_2	١٢٠٠٠٠	٣/٥	٢٠٠٠٠
			١٢٠٠٠٠٠	٢/٩	٥٤٠٠٠٠
			٤٨٠٠٠٠	٣/٢٥	٤٠٠٠٠٠
٣	W_3	الكتلة B_3			
	W_{31}	٢٤٠٠ × ١٠ × ½	١٢٠٠٠٠٠	٢/٣	٨٠٠٠٠
	W_{32}	٢٤٠٠ × ١٠ × ١٠	٢٤٠٠٠٠٠	٦	١٤٤٠٠٠٠
	W_{33}	٢٤٠٠ × ١٠ × ٨ × ½	٩٦٠٠٠٠	٣/٤١	١٣١٢٠٠٠
٤	P_H	$\frac{٢١٥\times١٠٠٠}{٢}$	٣١٢٥٠٠٠		
	P_v	٢ × ٥ × ١٠٠٠	١٠٠٠٠٠	١	١٠٠٠٠
		٢ × ٢٠ × ١٠٠٠ × ½	٢٠٠٠٠٠	٢/٣	١٣٣٣٣,٣٣
		الخزان ممتلئ	٤٩٩٢٥٠٠		٥٨٦٥٤١٦
			٥٨٨٠٠٠٠		٣٩٩٠٠٠١

عندما يكون الخزان مملوءا:

اللاتمركزية (اختلاف المركز) (e) $= \frac{٥٨٦٥٤١٦}{٤٩٩٢٥٠} - \frac{١٩}{٢}$

= ٢,٢٥ (فى منتصف الثلث).

عند طرف المؤخرة (Heel):

$$P_{n1} = \frac{٤٩٩٢٥٠}{١٩} \frac{(٢,٢٥\times٦-١)}{١٩}$$

= ٧٦٠٦,٣ كجرام / متر مربع = ٧,٦ طن / المتر المربع.

عند طرف المقدمة (Toe):

$$P_{n2} = \frac{٤٩٩٢٥٠}{١٩} \frac{(٢,٢٥\times٦+١)}{١٩}$$

= ٤٤٩٤٦,٣٣ كجرام / المتر المربع = ٤٤,٩ طن / المتر المربع.

معامل الأمان ضد الإنقلاب:

$$\text{معامل الأمان} = \frac{٧٥٢٠٨٣ + ٥٨٦٥٤١٦}{٧٥٢٠٨٣} = ٨,٨ > ١,٥$$

معامل الأمان ضد الإنزلاق:

$$\text{معامل الأمان} = \frac{٤٩٩٢٥٠ \times ٠,٦٥}{٣١٢٥٠٠} = ١,٠٣٨ > ١$$

عندما يكون الخزان فارغا:

$$e = \frac{٣٩٩٠٠٠١}{٥٨٨٠٠٠} - \frac{١٩}{٢} = -٢,٧ \text{ (فى منتصف الثلث).}$$

العلامة بالسلب تعنى أن اختلاف المركز يكون فى إتجاه السطح المواجه للمنبع أو طرف المؤخرة (Heel).

عند طرف المؤخرة (Heel):

$$P_{n1} = \frac{٥٨٨٠٠٠}{١٩} \frac{[(-٢,٧) \times ٦-١)]}{١٩}$$

= ٥٧٣٣٤ كجرام / المتر المربع = ٥٧,٣ طن / المتر المربع

عند طرف المقدمة (Toe):

$$P_{n2} = \frac{٥٨٨٠٠٠}{١٩} \frac{[(-٢,٧)\times٦+١]}{١٩}$$

= ٤٥٦٠,٦ كجرام / المتر المربع = ٤,٥ طن / المتر المربع.

تلك فى حدود الأمان لذا فإن السد يكون آمنا.

الإجهاد الرئيسى وإجهاد القص Principal and Shear Stresses:

الإجهاد الرئيسى يعطى بالمعادلة (٢٢)

$$\text{هنا } \text{Tan}(a) = \frac{١٠}{٨}$$

$$\tan^{-1}(1.25) = 51^{\circ} 34' = a$$

obeikandi.com

لذا $\theta = 90^\circ - 51^\circ\ 34' = 38^\circ\ 26'$

الإجهاد الرئيسى عند طرف المقدمة (Toe)

$= 44946.33\ \sec^2(38^\circ\ 6')$

= ٧٣٧١١,٩٨ كجرام/متر مربع

= ٧٣,٧ طن/متر مربع

إجهاد القص عند طرف المقدمة يعطى بالمعادلة (٢٨)

$= Pn \tan\theta$

$= 44946.33 \tan(38^\circ\ 26')$

= ٣٥٦٦٢ كجرام/متر مربع

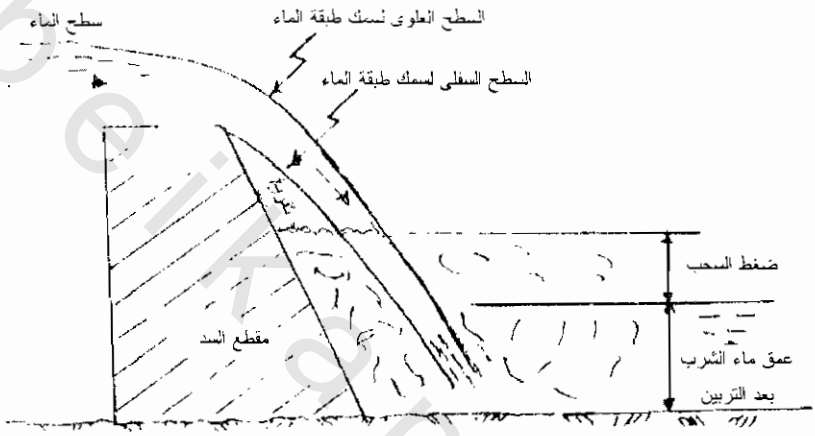
= ٣٥,٦٦ طن/متر مربع

كلاهما خلال الحدود المسموح بها، لذا فإن مقطع السد يكون آمنا.

(٩) سدود التثاقل بالفيض: (Over Flow Gravity Dams)

بالنسبة لمقطع الفيض لسد التثاقل، يكون من المهم أن الشكل الجانبى للسد يتطابق مع المنحنى السفلى (أو سمك طبقة الماء فوق الهدار – Nappe) وذلك لصفحة الماء الساقط وإلا فإنه سوف يحدث ضغط سالب أو ضغط تفريغ تحت طبقة الماء الساقط والذى يعمل على إضعاف إستقرار السد. نافورة الماء الساقط على أساس الإحتكاك بين الهواء وسطح الماء تحمل جزء من الهواء المحتجز (بسبب عدم التهوية الحرة) فى الفراغ ما بين السد وسمك طبقة الماء (Nappe) وبذا ينخفض ضغط الهواء إلى أقل من الضغط الجوى ويسبب الإرتفاع لعمق المياه المنصرفة. مع وجود الضغط الجوى الكامل فوق التدفق (Jet) والتفريغ الجزئى أسفل التدفق، فإنه يتكون ضغط إمتصاص (Suction Head) مما يسبب ضغط إضافى فى سطح السد المواجه للصرف الشكل (١١/١٢) والذى يمكن أن يساهم فى عزم الإنقلاب حول السد بجانب إحداث الثقوب (Pitting) فى وجه السد فى إتجاه الصرف. نظرا

لأنه يكون من الصعب عمليًا وكذلك مكلفًا توفير دوران هـواء حـر (Free Air circulation) خاصة في حالة السدود العالية. فإنه ينصح بأن يكون سطح السد في اتجاه المصب يتم عمله ليكون مائلاً بالتقابل (Correspond) مع السطح السفلي لسمك طبقة الماء الساقط وذلك بامتلاء المساحة أسفل السطح السفلي لسمك طبقة الماء الساقط بالطوب.



شكل (١١/١٢) الضغط السالب فى الفراغ بين السد وطبقة الماء

أ – شكل القمة (Shape of crest)

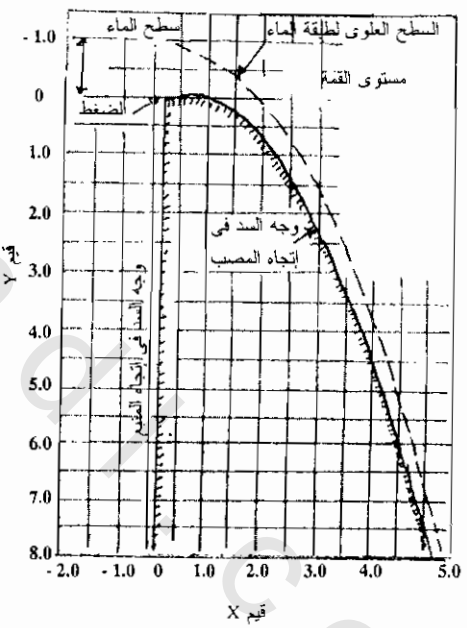
الغرض الرئيسي من اختيار شكل القمة هو تجنب الضغط السالب كما سبق توضيحه. الأغراض الأخرى تشمل الكفاءة الهيدروليكية، الاستقرار الإنشائي، واقتصاديات الإنشاء ثم اقتراح عدد من الأشكال الجانبية من بين هذه كان (Creager Profile) الأول فى إقراره لقمة قناة تصريف الفائض من مياه السد (أو المفيض – Spillway) والذي عرف بأنه القمة القياسية للسد (Standard Dam Crest). كذلك فإن طبيعة شكل القمة تعتمد على سرعة الاقتراب التي يمر بها أقصى تدفق فوق قمة السد – لذلك فإن الشكل الجانبي للسد تم دراسته بسرعة الاقتراب وبدون سرعة الاقتراب لكلا الحالتين الآتيتين:

(١) السطح العمودي في اتجاه المصب.

(٢) السطح في اتجاه المصب المائل بزاوية ٤٥ درجة.

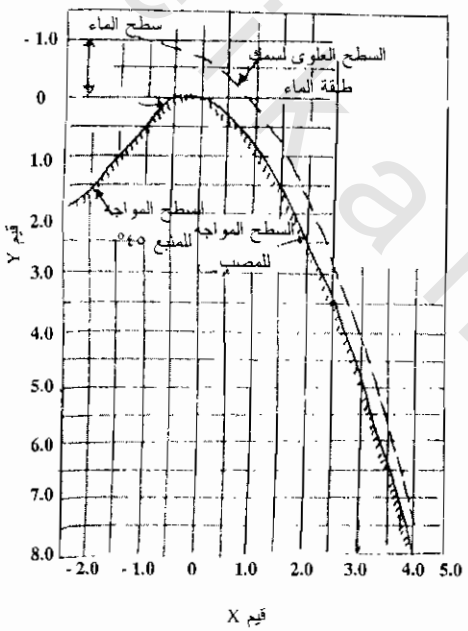
في حالة إهمال سرعة الاقتراب (velocity of Approach)، فإن الأشكال الجانبية وتناسقها بالنسبة للمصدر عند أعلى نقطة للقمة موضح في الأشكال (١١/١٣)، (١١/١٤).

طبقًا للأبحاث التجريبية المكثفة تم تطوير إحداثيات للأشكال الجانبية لسدود الفيض والتي استخدمت فيما بعد. تلك الأشكال الجانبية (Profiles) يمكن تمثيلها بالمعادلة.



القمة القياسية (السطح المواجه للمنبع عمودى)

الشكل (١١/١٣)



القمة المثالية (السطح المواجه للمنبع بميل ٤٥°)

الشكل (١١/١٤)

$$X^n = KH_d^{n-1} y \qquad (54)$$

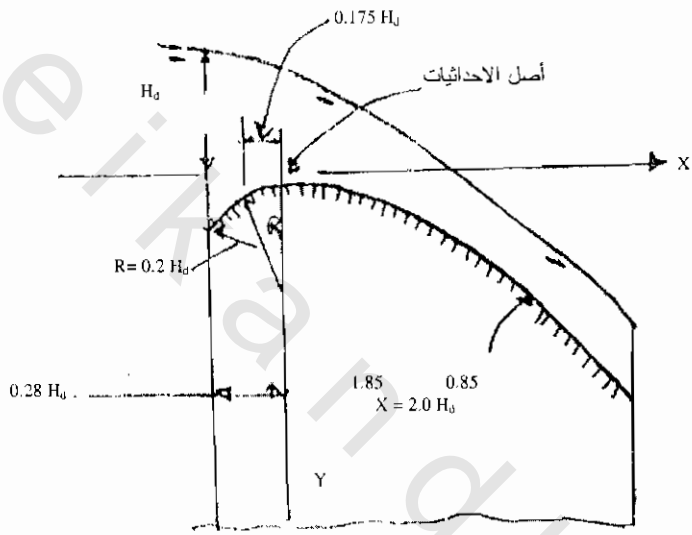
حيث:

X ، Y = الإحداثيات بالنسبة للأصل (Origin) عند أعلا نقطة للقمة.

H_d = ضغط التصميم (Design Head) فوق القمة باستثناء ضغط السرعة.

$K_{,N}$ = معايير تتوقف على الميل في اتجاه المنبع كما في الجدول (٤).

الشكل الجانبي التفصيلي للميل العمودي للاتجاه نحو المنبع موضح في الشكل (١١/١٥)



شكل (١١/١٥) الشكل الجانبى للميل العمودى فى إتجاه المنبع

تصميم الشكل الجانبي سيتم توضيحه من خلال المثال التالي:

مثال:

المطلوب تصميم الشكل الجانبي لفيض الطفح (Over Flow Spillway) لكلا الاتجاهين في اتجاه المنبع وفي اتجاه المصب حيث الميل في اتجاه المصب يكون عموديًا وله البيانات الآتية:

ذروة التصريف = ٤٠٠ متر مكعب في الثانية.

ارتفاع تدفق الذروة مقاس من قاعدة النهر = ٦٠ متر

طول المفيض متضمناً ٦ فواصل كل ٢٠ متر (صافي) = ١٢٠ متر

معامل الصرف = ٢,١

ميل سطح السد المواجه للمصب = ٠,٧ : ١

الحل:

الخطوة رقم (I):

تعيين ضغط الماء (Head) – ارتفاع عمود الماء) على قمة قناة تصريف الفائض (المفيض – Spillway) من المعادلة الآتية:

$$Q = CL\,H_c^{3/2} \qquad (55)$$

حيث:

Q = أقصى تصرف

H_c = إجمالي ارتفاع عمود الماء (Head) فوق قمة المفيض

L = طول المفيض

C = معامل التصريف.

الخطوة رقم (II):

بسبب دعامات الجسر (Piens – البغال) والأكتاف(Abutments)، فإذا الطول المؤثر للمفيض يعطى بالمعادلة: $Le = L - 2\,(N.Kp + Ka)H_c$

حيث:

N = عدد دعامات الجسم (البغال) = 5

K_p = معامل إنشاء الدعامة = 0.01

K_a = معامل إنشاء الكتف = 0.1

الخطوة رقم (III)

باستخدام الطول المؤثر للمفيض، يتم تعيين ضغط الماء التصميمي (عمود الماء) (Design Head) على المفيض H_d من المعادلة (55).

openkandi.com

الخطوة رقم (IV):

يتم تعيين (H_d/H) حيث H = ارتفاع السد. وطبقًا لأبحاث سلاح المهندسين الأمريكي حيث H_d/H تكون أكبر من (1.33)، فإن سرعة الاقتراب تكون صغيرة جدًا ويمكن أن تهمل. كذلك إذا كان $\frac{H_d + H}{H_d} > 1.7$، معامل الصرف لايتم إهماله فى حالة مياه الصرف.

الخطوة رقم (V):

عين الشكل الجانبي لاتجاه المنبع باستخدام العلاقة في المعادلة (54) ولفيض المفيض (Over Flow Spillway) مع الميل العمودي لاتجاه المنبع بواسطة

$$X^{1.85} = 2\ H_d^{0.85}\ Y \qquad (57)$$

الخطوة رقم (VI):

عين الشكل الجانبي في اتجاه المنبع بالمعادلة (58) طبقًا للتجارب التي أجراها سلاح المهندسين الأمريكي.

$$Y = \frac{0.724\,(X + 0.27H_d)^{1.85}}{H_d^{0.85}} + 0.126\,H_d$$

$$- 4315\ Hd^{0.375}\ (X + 0.27\ H_d)^{0.625} \qquad (58)$$

باستخدام المعادلة (55):

$$H_c = \left(\frac{4000}{21 \times 120}\right)^{2/3} = 6.32\ m$$

باستخدام المعادلة (56):

$$L_c = 120 - 2\,(5 \times 0.01 + 0.1) \times 6.32 = 118.11m$$

Hd يتم تعيينها من المعادلة (55)

$$Hd = \left(\frac{4000}{2.1 \times 118.11}\right)^{2/3} = 6.39\ m$$

ارتفاع السد = H = ٦٠ – ٦,٣٩ = ٥٣,٦١ متر

لذلك، فإن التأثير الناتج عن سرعة الاقتراب يمكن إهماله

$$\frac{H + Hd}{Hd} = \frac{53.61 + 6.39}{6.39} = 9.39 > 1.7$$

لذلك، فإن معامل التصريف لا يتأثر بحالة مياه التسرب والصرف. الشكل الجـانبي للاتجاه نحو المصب: (Down stream profile)

ميل السطح المواجه للمصب = ٠,٧ : ١

لذلك:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1.0}{0.7}$$

استخدام المعادلة (57):

$$Y = \frac{X^{1.85}}{2(6.39)^{0.85}}$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1.85\,X^{0.85}}{9.66} = \frac{1.0}{0.7}$$

جدول (٥) محاور الإحداثيات للشكل الجانبي في اتجاه المصب.

Y	X	Y	X
2.84	6	0	0
3.78	7	0.10	1
4.85	8	0.37	2
6.03	9	0.79	3
7.32	10	1.34	4
8.06	10.53	2.02	5

الشكل الجانبي في اتجاه المنبع (Up Stream Profile)

باستخدام المعادلة (58) واستبدال (Hd) فإننا نحصل على

$$Y = 0.148\,(X + 1.725)^{1.85} + 0.805 - 0.867\,(X + 1.725)^{0.625}$$

جدول (٦) محاور الإحداثيات للشكل الجانبي في اتجاه المنبع

Y	X	Y	X
0.270	- 1.2	0.011	- 0.3
0.471	- 1.5	0.056	- 0.6
0.805	- 1.725	0.139	- 0.9

obeikandl.com

(١٠) إنشاء سدود التثاقل: Construction of Gravity Dams

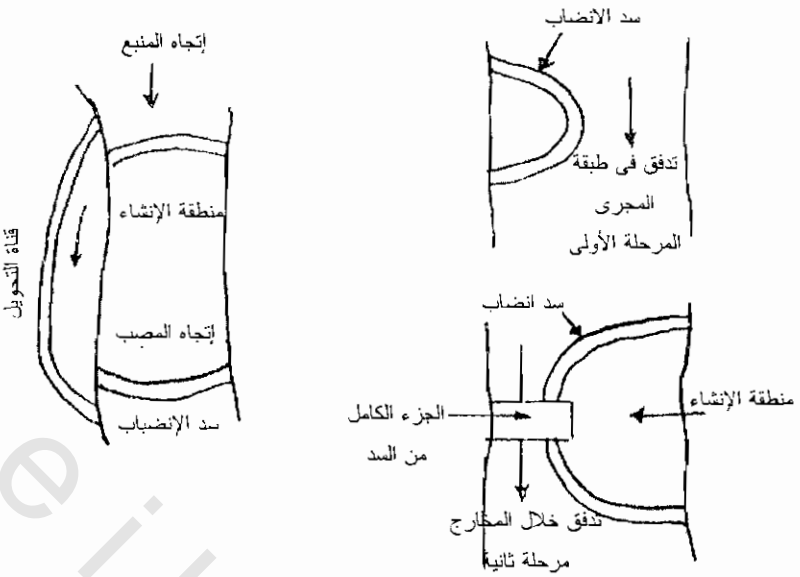
إنشاء سدود التثاقل يمكن وصفه في الخطوات التالية:

أ – تحويل التدفق لمياه المجرى (Stream Flow Divergion)

قبل بدء العمل في الإنشاء فإنه يتم الإمساك بلسان الماء (Reach)، حيث يكون من الضروري تحويل تدفقات المياه في النهر بحيث يكون موقع الإنشاء خاليًا بما يمكن من استخدام العمال والمعدات. التحويل يمكن أن يتم بأي من الطرق الآتية:

(١) في حالة الظروف الجيولوجية والجغرافية المناسبة، يمكن استخدام نفق أو قناة تحويل (Tunnel or Diversion Canal) لتحويل كل التدفق حول موقع السد (انظر الشكل (٢/١٦). في حالة سد التثاقل الخرساني المستقيم (Bhakra)، فقد تم إنشاء نفقين بالبطانة الخرسانية كل بقطر ١٥ متر وطول ٨٠٠ متر، وحاملا بتصرف مقداره ٥٦٦٠ متر مكعب في الثانية وذلك كمنشآت تحويل على شهر (Sutlej). في حالة سد هوفر (Hoover) في الولايات المتحدة، تم إنشاء أربع أنفاق كل بقطر ١٥ متر لتحويل النهر. وهذه فيما بعد تم تحويلها إلى منشآت المخرج.

(٢) أحيانًا في حالة الأنهار شديدة الاتساع، فإن التحويل يتم بعملية من مرحلتين انظر الشكل (١١/١٦). في هذه الحالة فإن التدفق يتم تحويله إلى جانب واحد من القناة بواسطة سد الإنضباب وهو سد مؤقت لحجز الماء أو نزحه من موقع التشييد – Coffer Dam، بينما يستمر العمل على الجانب الآخر. العمل على الجزء السفلي لجانب يتم عندئذ تكملته. في المرحلة الثانية، يتم تحويل التدفق خلال المخارج (out lets) في هذا الجزء ويستمر العمل في النصف الآخر من القناة. لخفض مشكلة التحويل، قد ينصح بجدولة الإنشاء للجزء السفلي من السد خلال فترات التدفق المنخفض.



شكل (١١/١٦) تحويل النهر

ب- *معالجة الأساس بالحقن بالأسمنت: Foundation Treatment By Grouting*

أساس سد التثاقل يجب أن يتم حفره حتى الطبقة المتاح فيها الصخر المصمت (Sound Rock). عمق الحفر قد يكشف تشققات، تصدعات (Fissure)، أو فجوات (Cavities) في الطبقة السفلية (Substrata) والتي يجب أن تتم معالجتها بالحقن تحت الضغط بخليط من الماء والأسمنت مع كمية صغيرة من الرمل الرفيع (Fine sand) في الثقوب التي تم حفرها في الطبقة الصخرية. وهذا يسمى معالجة الأساس بالأسمنت والذي يلزم تنفيذه قبل وضع الخرسانة في السد.

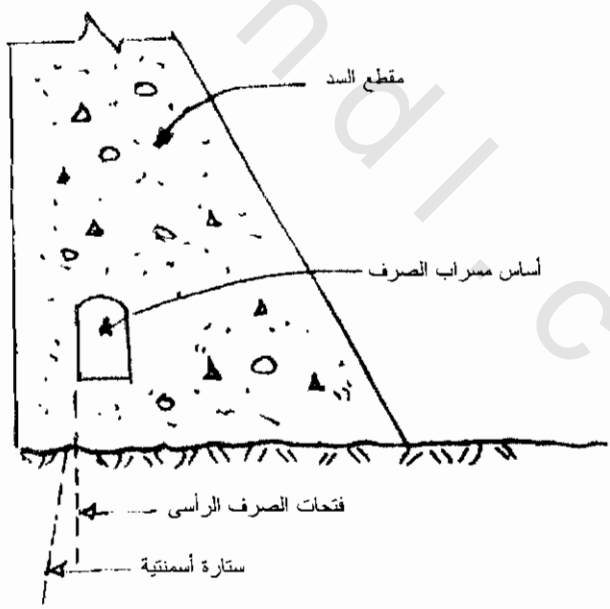
الطريقتين المستخدمين عمومًا في معالجة الأساس بالخرسانة هما:

- الطريقة المتماسكة أو المدمجة (Consolidation Grouting)
- طريقة الستارة (Curtain Grouting)

الطريقة المتماسكة تتضمن الحفر لحفر ضحلة نسبيًا ومعالجتها بالأسمنت عند ضغط منخفض يتراوح من ٠,١ إلى ٠,٧ كجرام سم^{٢}. يتحدد عمق ثقوب الحفر مجرى وجود صدوع صخرية ومتطلبات التصميم الأخرى. يتم عمل حفر الثقوب

في شكل هندسي مناسب مثل السداسي فوق كل المساحة لتسهيل التداخلات البينية لسهولة إزالة مادة الكسح إلى الخارج (Washout).

طريقة الستارة والتى تستخدم عادة في السدود الخرسانية العالية والتي يقصد بها عمل أساس سد غير نفاذ وتقويته على الطرف الخارجي للسد في اتجاه المنبع. العملية تكون بالمعالجة العميقة بالأسمنت (Deep Grouting) لعدد من الحفر (الثقوب) منظمة لتكوين ستارة أو حاجز مقام في اتجاه عمودي على اتجاه التسرب والارتشاح. الثقوب بقطر ٣٠-٧٥ مليمتر يتم حفرها من الأساس أو سرداب الصرف (Drainage Gallery) بميل يصل إلى ١٠- ١٥ درجة مئوية من العمودى شكل (١١/١٧) والحقن فيهم بالخلطة الأسمنتية (١ : ١). ولا يتم حفر الثقوب عند متوسطات (Centres) ١٢ متر ثم يلي ذلك ثقوب متوسطة عند فواصل أقرب حوالي ٣ متر وحفرها وملئها بالمونة الأسمنتية (Grout). هذا يضمن أن الشقوق والفواصل يتم ملئها جيدًا. المعالجة بالخرسانة (المونة الأسمنتية تجري عند ضغوط حتى ٣كجرام/سم^{٢}).



شكل (١١/١٧) الستارة الاسمنتية للسد الثقالى

الطريقة العامة المتبعة في معالجة الأساس بالخرسانة هي كالآتي:

١- يتم حفر عدة ثقوب أسفل الطرف الخلفي للسد (The Heel).

٢- يتم غسيل هذه الثقوب بالماء تحت الضغط. ضغط الماء يساوي عمومًا ارتفاع عمود الماء المواجه للسد.

٣- يتم إنزال ماسورة ملولبة (Threaded) مع الثقب والتوصيل بطلمبة الحقن الأسمنتي (Grouting) ويتم حقن الخليط الأسمنتي تحت ضغط.

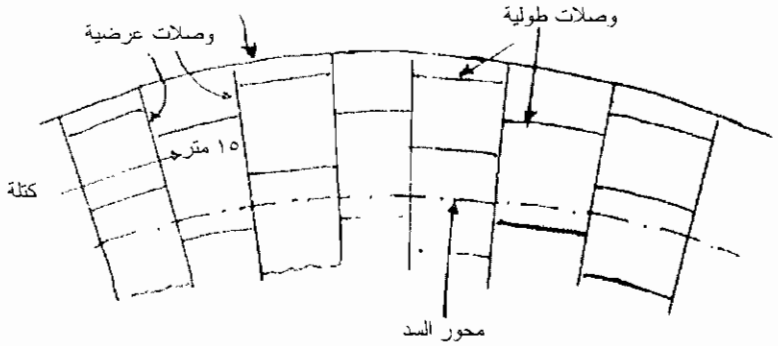
٤- يتم غلق الثقب الأسمنتي (Grout Hole) عند قمته. ربط الثقب الواحد يتم إكماله عمومًا قبل حفر الثقوب المجاورة.

جـ- *صب الخرسانة والتوصيل: (Concreting and Joining)*

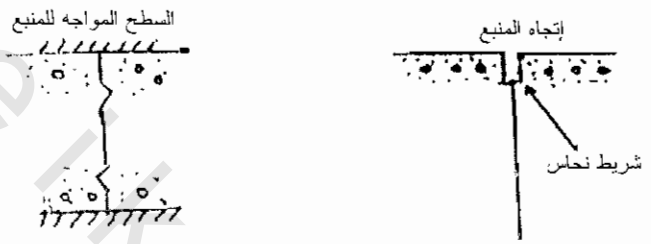
نظرًا لأن الإنشاء الكلي للسد لا يمكن تنفيذه كاملاً في مدى واحد، فإن خرسانة السد يتم وضعها عادة في شكل كتل (Bloeks) بعرض أقصاه ١٥ متر للسدود الضخمة. أقصى ارتفاع لثقب واحد والذي يسمى مدى الارتفاع أو الرفع (Lift) هو عادة ١,٥متر. المقاطع يتم صبها بالتبادل ولحدوث الشد الجيد فإن كل كتلة تظل لعدة أيام حتى الشد النهائي قبل وضع الأخرى مجاورة لها. الأسطح الجانبية لكل مقطع يتم إعطائها طلاء أسفلتي لمنع الالتصاق لمقاطع الاتصال ولتكوين وصلات إنشائية لخفض التشقق في الخرسانة.

نتيجة للتغيرات في درجة الحرارة، فإن الخرسانة يكون لها الاستعداد للانكماش وتكوين الشقوق. وصلات الانكماش يتم توفيرها لهذا السبب في الأسطح الأفقية والرأسية وتسمى الوصلات الطولية والعرضية الشكل (١١/١٨) بينما الوصلات الطولية يتم توفيرها موازية لمحور السد لمنع التشققات الطولية. فإن الوصلات العرضية يتم توفيرها عمودية على محور السد لمنع حدوث تشققات عرضية غير منتظمة.

سدود التثاقل يتم عملها مانعة لنفاذ المياه بتجهيزات مجاري الخابور (Key ways) وحاجزات الماء (Water stops) الشكل (١١/١٩).



شكل (١١/١٨) الوصلات الطولية والعرضية



شكل (١١/١٩) مجارى الخابور وإيقاف المياه فى السدود الثقالى

مجارى الخابور: يتم تجهيزها بين المقاطع والوصلات لنقل القص (Shear) من مقطع أو وصلات إلى المجاور وبذا تمكين السد من أن يعمل كمنشأ أحادي (Monolithic Structure).

حاجزات الماء: من الإنشاء المعدني توضع كذلك في الوصلات العرضية قريبًا من السطح المواجه للمنبع لمنع حدوث التسرب للماء في جسم السد.

د – *التحكم فى درجة الحرارة:*

التحكم في درجة الحرارة يكون ضروريًا لمنع التشقق للكتل الخرسانية بسبب التدرج العالي في درجة الحرارة بين الداخل والسطح. بسبب التغير اليومي في درجة الحرارة عند السطح، فإن التشققات السطحية يمكن كذلك أن تظهر. المياه التي تدخل خلال تلك التشققات قد تتراكم ثم تتجمد عند هبوط درجة الحرارة. الثلج الذي يتكون يبدأ في التمدد عند ٤°C درجة مئوية بما ينتج عند زيادة عمق واتساع الشقوق.

الطرق المستخدمة لمراجعة وخفض تنمية وظهور التشققات في الكتلة الخرسانية هي:

(١) التبريد المسبق للخرسانة والذي يتم بتبريد الركام السميك والدقيق بماء بارد مثلج وبنفخ الهواء خلالهم.

(٢) التبريد اللاحق للخرسانة ويتم بتدوير الماء المثلج خلال أنابيب مغمورة في الخرسانة في كل رفعه (صبه). التبريد يتم مباشرة بعد وضع الكتلة ويستمر حتى تصل درجة حرارة الكتلة إلى متوسط درجة حرارة الخرسانة المحيطة.

(٣) يمكن استخدام الأسمنت منخفض درجة الحرارة (Low Heat cement) في عمل الخرسانة.

(٤) تحديد الارتفاع لكل رفعة (صبة) بمقدار ١,٥ متر، توفير وصلات الإنشاء وتوفير الوقت الكافي لعدة أيام بين إنشاء الكتل والمقاطع المتناولة (كما سبق توضيحه) وهذا يساعد كذلك على التحكم في التشققات.

الدهاليز أو السراديب في السدود: (Galleries In Dams)

السراديب أو الدهاليز هي فتحات في السد التي يتم علمها موازية لمحور السد أي في الاتجاه الطولى. السراديب تستخدم لعدة أغراض والتي يتم تقسيمها كالآتي:

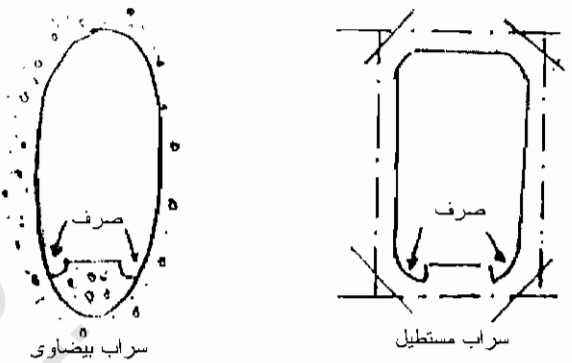
أ – سرداب الأساس والصرف للقيام بعملية المعالجة الخرسانية وكذلك لصرف المياه المتسربة في الخزان.

ب– سرداب التفتيش: لإمكان الوصول إلى داخل السد وإجراء أعمال الصيانة للبوابات والمحابس.

جـ– سرداب البوابة: لإيواء المعدات الميكانيكية المستخدمة في عمل البوابات في المفيض ومسارات بوابات التحكم (Sluice ways).

السراديب تكون عمومًا في شكل بيضاوي أو في شكل مستطيل الشكل (١١/٢٠).

وهي تصمم بطريقة مناسبة، مع الحرص نحو تركيز الإجهاد العالي حول فتحاتها. السراديب لها اقتراب إما خلال رافعة أو مصعد (Elevator) أو خلال سراديب عند النهايات (Ends).



شكل (١١/٢٠) السراديب فى السدود الخرسانية

أسئلة ومسائل:

١- ما هي القوى المختلفة التي تعمل على سد التثاقل. اكتب مصطلحات تمثل القوى مع بيان تلك القوى في شكل مخططات.

٢- يناقش تأثير الزلزال في تصميم سد التثاقل.

٣- عرف الشكل الجانبي الأولي لسد التثاقل. كيف يمكن حساب الإجهادات العمودية، الرئيسية وإجهادات القص التي تعمل على السد؟

٤- ماذا يعنى بالشكل الجانبي العملي لسد التثاقل؟ ناقش أهميته في تصميم السد.

٥- ما هو حد الارتفاع للسد؟ بين توضيح التفرقة بين السد المنخفض والسد العالي.

٦- ناقش قاعدة التصميم للشكل الجانبي لمفيض سد التثاقل.

٧- يقترح إنشاء سد تثاقل عند موقع معين لنهر. اشرح واذكر الخطوات المختلفة اللازمة لتنفيذ الإنشاء.

٨- ناقش انهيار سد التثاقل وقواعد الاستقرار والرسوخ المستخدمة في التصميم.

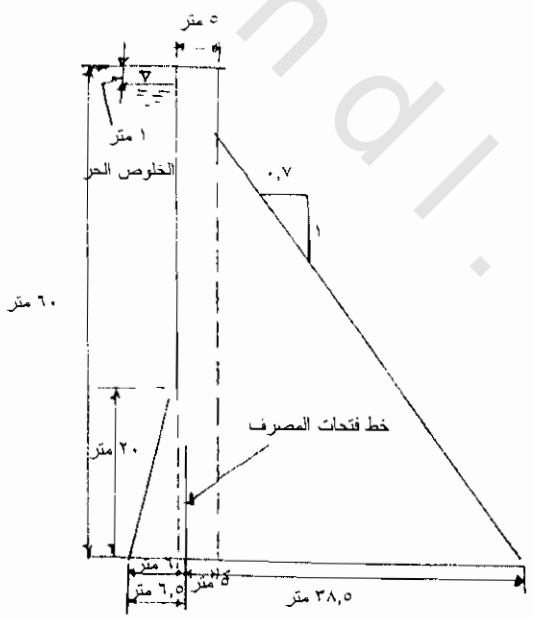
obeikandi.com

٩- اكتب ملاحظات عن الآتي:

- التحكم في درجة حرارة السدود الخرسانية.
- المعالجة الخرسانية بالستارة.
- السراديب في السدود الخرسانية.

١٠- سد تثاقل عالي بارتفاع ١٠ متر وسطحه العمودي في اتجاه المنبع له قمة بعرض ٣ متر. ماذا يجب أن يكون عرض قاعدته إذا كانت محصلة القوى النشطة هي بقطع نقطة الثلث المتوسط للقاعدة عندما يكون عمق الماء ٩ متر. افترض ضغط الرفع الكلي (Full up lift Pressure) مع إهمال حمل الثلج وقوى الزلزال.

١١- بالنسبة لمقطع سد التثاقل الموضح في الشكل (١١/٢١) راجع الاستقرار للسد في حالة الامتلاء الكامل للخزان. افترض ثقوب خط المصرف (Line of Drain Holes) ٦,٥ متر في اتجاه المصب من سطح السد. كذلك أوجد الإجهادات الرئيسية وإجهادات القص عند الطرف الخلفي والطرف الأمامي للسد. يتم إهمال قوي الزلزال.



شكل (١١/٢١) توضيح للمثال