الفصل الثانى عشر

سدود القنطرة (العقد) ودعامة التثبيت (الكتف)

Arch and Buttress Dams

١- مقدمة:

سد القنطرة أو العقد يكون منحنيًا في المسقط الأفقي (Curved In plan). ويحمل معظم حمل الماء أفقيًا على الأكتاف بفعل وتأثير العقد (القنطرة). قوة الدفع أو الضغط الناتجة (Thrust) يجعل من الأساسي أن تكون الحوائط الجانبية للخانق السحيق شديد الانحدار الضيق (Canyon) تكون قادرة على مقاومة تأثير وفعل العقد. نظرًا لأن وزن السد لا يقاوم حمل الماء فإن الحجم الكلي لسد العقد يكون أقل كثيرًا عن ذلك لسد التثاقل.

هذه الحقيقة تجعل أنه من المناسب عمليًا للسد العالي حيث تسبب قلة الخرسانة، فإنه يمكن تحقيق وفر اقتصادي في تصميم وإنشاء السد.

سد دعائم الأكتاف (انظر الشكل ١٠/١)، يقوم بحجز المياه بمساعدة الغشاء المائل المانع لنفاذ المياه (Sloping water tight membrane) المحمل على الجانب الخلفي (Backside) بسلسلة من الدعائم على مسافات متساوية بزوايا قائمة على محور السد. ضغط الماء على السطح المائل (Sloping Deck) يتم نقله إلى الأساس خلال الدعائم والتي تعمل مثل الأعمدة (Columns). سد الدعامة يكون كذلك أخف في الوزن مقارنة بسد التثاقل.

٢- تقسيم سدود العقد:(Classification of Arch Dams)

سدود العقد تنقسم عمومًا إلى:

أ – سدود العقد المصمتة (Massive Arch Dams)

ب – سدود العقد المتعددة (Multiple Arch Dams)

في حالة سدود العقد المصمتة:

يوجد حائط منحنى واحد عادة عمودي أو قريبًا من ذلك، والذي يمتد لكل العرض بين الأكتاف. هذه تنقسم كذلك إلى:

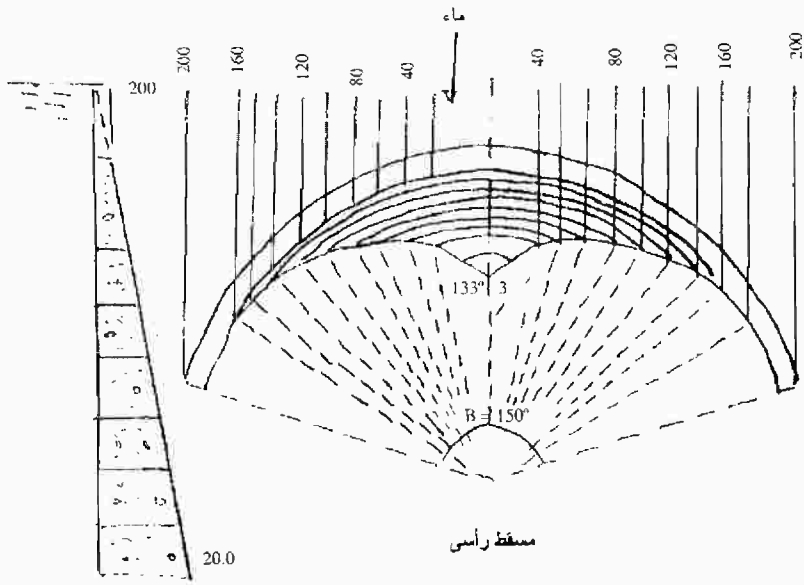
- سدود القنطرة ذات نصف القطر الثابت (Constant Radius)
- سدود القنطرة ذات الزاوية الثابتة (Constant Angle)
- سدود القنطرة ذات نصف القطر المتغير(Variable Radius)

في حالة سدود العقد المتعددة:

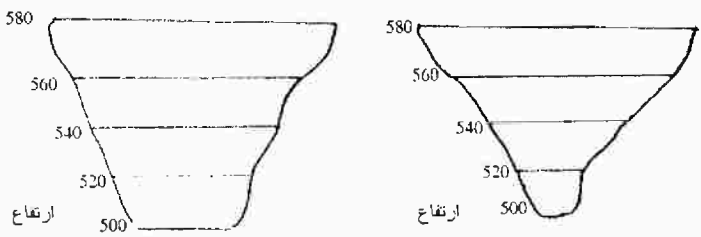
فإنها تتكون من عدد من القناطر (العقد) الأصغر عادة مائلة أو محملة على بغال أو أكتاف. وهي تعرف كذلك بسدود الدعائم (الأكتاف) (Buttress).

سد العقد ذو نصف القطر الثابت:

هذا السد سطحه المواجه للمنبع يكون في شكل عمودي أسطواني ذو نصف قطر ثابت الشكل (٣/١) خط المنتصف (Line of centers) هو خط عمودي مستقيم له عدد من وحدات العقد أو الحلقات المرصوصة على ارتفاعات مختلفة. لذا، فإن هذا النوع يعرف كذلك بسد العقد ذو المركز الثابت (Constant Center Arch Dam) الزوايا المركزية للحلقات العقد للسطح المواجه للمصب (باطن العقد Intrados) تختلف عند مختلف الارتفاعات ما بين الأقصى على قمة السد إلى الأدنى عند قاع السد. نظرًا لأن فعل الكابولي (cantliver) ينقل نسبة كبيرة من الحمل عند مستويات منخفضة، فإنه يتم التبنى العملي للسد بالعقد ذو نصف القطر الثابت في حالة الخانق الضيق شديد الانحدار بالشكل حرف U انظر الشكل (٣/٢).



شكل (١٢/١) سد العقد بنصف القطر الثابت

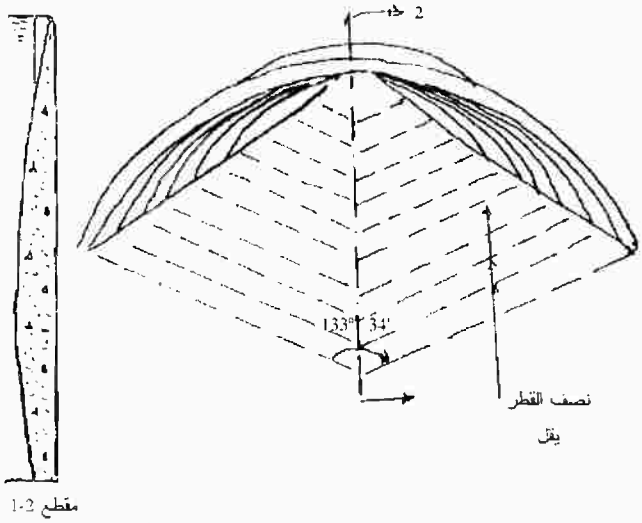


شكل (١٢/٢) أخدود (خانق) شكل U، شكل V

سد العقد (القنطرة) بالزاوية الثابتة:

وهو يستخدم زاوية مركزية ثابتة لحلقات القبو الأفقية من القمة إلى القاع مع الانخفاض في أنصاف الأقطار للعقد والذي يعطي سطح ذو انحناء مزدوج (Double Curvature) على الجانب المواجه للمنبع شكل (١٢/٣).

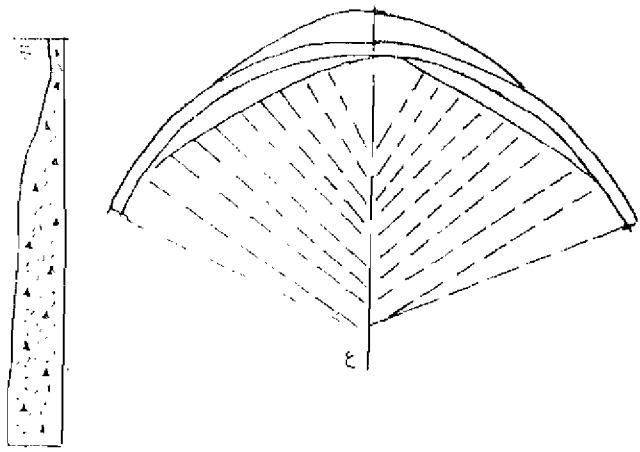
الزاوية الثابتة عند (34' 130°) وجد أنها تعطي مقطع العقد الأكثر اقتصادًا. سطح الانحناء المزدوج ينتج عنه خفض في حجم السد. لذلك، فإن سد العقد بالزاوية الثابتة وجد أنه هو الأكثر اقتصادًا. وهو يحتاج إلى ٤٣% من الخرسانة اللازمة في حالة سد العقد بنصف القطر الثابت.



شكل (١٢/٣) سد العقد بنصف القطر الثابت

سد العقد ذو نصف القطر المتغير: Variable Radius Arch Dam:

هذا السد له أنصاف أقطار متغيرة لحلقات العقد المقابلة للسطح في مواجهة المنبع (منحنى العقد الخارجي أو ظاهر العقد – Extrados وتلك في مواجهة السطح في اتجاه المصب) السطح الباطني أو باطن العقد Intrados من القمة إلى القاع، ولها مراكز ذات أنصاف أقطار مختلفة على المنحنى الأملس الناعم الشكل (١٢/٤). نظرًا لأن مراكز حلقات القبو الأفقية لا تقع على طول خط **واحد عمودي**، فإن مثل هذه السدود تعرف كذلك بسدود العقد متغيرة المركز(Variable centre Arch Dam) الزاوية المركزية لمختلف العقود ليست ثابتة ولكنها تختلف في المجال من ٨٠ – ١٥٠ درجة مئوية، بحيث أنه يمكن الحصول على أقصى طاقة للسد عند كل الارتفاعات. بسبب حقيقة أن أداء عقدها يكون مؤثرًا حتى عند الارتفاعات المنخفضة فإن سدود العقد ذات نصف القطر المتغير تكون مناسبة أكثر في حالة الأنهار الضيقة شديدة الانحدار ذات الشكل حرف (V). شكل (١٢/٢) للحصول على أكبر كفاءة للعقد. وهذا يحقق كذلك وفر كبير في الخرسانة بمقدار ٥٨% من ذلك اللازم لسدود العقد ذات نصف القطر الثابت. للأسباب السابقة، فإن معظم التصميمات الحالية لسدود العقد تكون إما بالزاوية الثابتة أو متغيرة نصف القطر ونادرًا ما تكون من نوع نصف القطر الثابت.



شكل (١٢/٤) سد العقد بنصف القطر المتغير

٣- مبادئ تصميم سد العقد (Principles of Arch Dam Design)

لتصميم سدود العقد، فإنه تراعى نفس القوى التي تعمل على سدود التثاقل. وتلك هي:

أ- الوزن الذاتي للسد.

ب- الضغط الهيدروستاتيكي (ضغط الماء الساكن)

جـ- ضغط الرفع (Uplift).

د- قوى الزلزال.

هـ- ضغط الموج.

و - ضغط الطفل الرملي.

ولكن الأهمية النسبية لتلك القوى أقل كثيرًا. فمثلاً، بسبب العرض الضيق للقاعدة، فإن ضغط الرفع (Up lift) يصبح أقل كثيرًا عن ذلك لسدود التثاقل. ولكن الإجهادات الداخلية بسبب ضغط الثلج والتغيرات في درجة الحرارة وخضوع الدعائم الجانبية (Yielding of side supports) (الأكتاف) تكون أكثر كثيرًا في تصميم سد العقد. ضغط الثلج يسبب حمل مركز مستمر على طول عنصر العقد عند ارتفاع واجهة الثلج. التغيرات في درجة الحرارة تنتج قوى داخلية التي تسبب تحركات طفيفة للسد في اتجاه المنبع صيفًا وفي اتجاه المصب شتاءا. بسبب فعل العقد، فإن قوة الدفع (Thrust)

تنتشر بعيدًا عند امتداد الكتف (Abutment span) وخضوع الكتف الناتج قد يسبب إجهادات داخلية في أضلاع العقد (Arch Ribs).

٤- طرق تصميم سد العقد: (Arch Dam Design Methods)

الطرق العادية المستخدمة في تصميم سد العقد هي:

١- الطريقة الاسطوانية (Cylindrical Method)

٢- طريقة محاولة الحمل (Trial Load Method)

٣- طريقة التحليل اللدن (Elastic Analysis Theory)

٤- طريقة الغلاف اللدن.

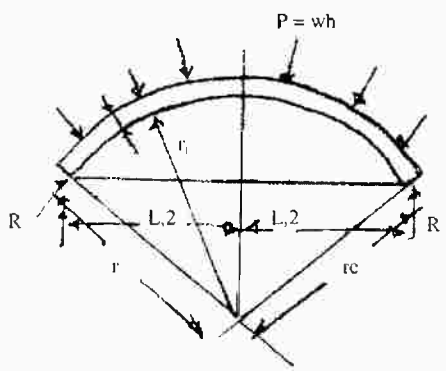
٥- طريقة العنصر المحدد والمحصور : Finite Element Method

وسيتم تناول الطرق ١، ٢ باختصار..

الطريقة الاسطوانية:

المبدأ الأساسي لهذه الطريقة هي بفرض أن الحمل الأفقي للماء على عقد السد يؤخذ بفعل العقد فقط. الإجهادات المنتجة في السد تعتبر مساوية لتلك المنتجة في اسطوانة رقيقة ذات أنصاف أقطار خارجية متساوية.

سمك العقد شكل (١٢/٥) يبين مقطع في حلقة العقد لاسطوانة رقيقة معرضة لحمل الماء عند العمق (h) أسفل السطح الحر للماء.



شكل (١٢/٥) القوى التى تعمل على حلقة العقد

نظرًا لأن الضغط يعمل نصف قطري أو إشعاعى (Radially)، فإن إجمالي قـوة الضغط الهيدروستاتيكي التي تعمل على محور النهر هي:

$$P = wh.\ 2\,r_e\ Sin\frac{\theta}{2}$$

$$P = 2\ whre\ Sin\frac{0}{2} \qquad (1)$$

حيث:

Re = نصف القطر الخارجي لحلقة العقد.

θ = الزاوية المقابلة للقوس (العقد) عند المركز

نظرًا لأن قوة الضغط يتم اتزانها برد فعل الأكتاف

$$2\ whr_e\ Sin\frac{\theta}{2} = 2\,R\ Sin\ \frac{0}{2}$$

حيث رد الفعل لكل كتف أو دعامة

$$R = whr \qquad (2)$$

المعادلة (٢) تعطي أقصى قوة ضغط تحدث على العقد والتي تـساوي رد فعـل دعائم الأكتاف (Abutment Reaction)

بفرض أن σ = متوسط إجهاد الضغط الواقع على العقد (القوس)

t = سمك العقد (القوس)

عندئذ

$$\sigma\ \frac{R}{l} = \frac{whre}{l} \qquad (3)$$

إذا كانت (t) صغيرة مقارنة بـ (re)، فإن أقصى وحدة الإجهاد للمادة (f) سـوف تكون تقريبًا مساوية لمتوسط الإجهاد.

$$f = \sigma = \frac{whre}{t} \qquad (4)$$

$$t = \frac{whre}{f} \qquad (5) \qquad \text{أو}$$

في حالة اعتبار نصف القطر إلى خط المنتصف للعقد (r) بديلاً عن نصف القطر الخارجي، عندئذ فإن المعادلة (٥) سوف تصبح

$$t = \frac{whr}{f - 0.5\,wh} \qquad (6)$$

بالمثل: عند اعتبار نصف القطر الداخلي (r) للعقد، فإن سمك العقد سوف يكون

$$t = \frac{whri}{f - wh} \qquad (7)$$

الزاوية الاقتصادية لسد العقد هي الزاوية المركزية الثابتة (Constant Central Angle) لسد العقد والتي تتطلب أدنى حجم من الخرسانة للمجموع المحدد للاتساع والتحميل وإجهاد الاسطوانة النظري المسموح به.

حجم البناء لأى عقد يتناسب مع حاصل كل من السمك وطول خط المنتصف (المحور) للعقد (القوس).

أي: حجم البناء في وحدة الارتفاع (h) هو

$$h = ct\,(\theta.\,re) \qquad (8)$$

حيث:

C = ثابت

من المعادلة (٣) $t = \frac{whre}{\sigma}$

كذلك:

$$\frac{L}{2\,Sin\,\frac{\theta}{2}} = re \qquad (9)$$

مع الاستبدال في المعادلة (٨) فإننا نحصل على

$$V = \frac{Cwht^2\,\theta}{4\,\sigma\,Sin^2\,\frac{\theta}{2}} \qquad (10)$$

لأدنى حجم $O = \frac{dv}{d\theta}$

بمفاضلة المعادلة (١٠) بالنسبة لـ (θ) والتسوية بصفر فإننا نحصل على

$$\tan\frac{\theta}{2} = \theta$$

$$\theta = 133^\circ\ 34' \quad \text{أو} \quad (11)$$

المعادلة (١١) تبين أنه معظم الزاوية المركزية الاقتصادية هي (133° 34'). عمليًا الزوايا المركزية لسد العقد تتراوح من ١٠٠° إلى ١٤٠° مع عرض القاعدة ليظل ما بين ٠,١ إلى ٠,٥ ضعف الارتفاع.

مثال:

البيانات الآتية المتاحة على سد العقد المقترح في مشروع وادي النهر:

ارتفاع السد = ٦٠ متر

سمك السد عند القمة = ١,٥ متر

العرض العلوي للوادي = ٧٥ متر

عرض القاع للوادي = ١٥ متر

أقصى زاوية مقابلة للقوس عند قمة السد = ١٥٠°.

الإجهاد المسموح به للخرسانة = ٥٠٠ طن / المتر المربع

يتم تصميم العقد بالآتي:

أ – نصف القطر الثابت.

ب– الزاوية الثابتة.

الحل:

المعطى هي:

h = ٦٠ متر

Li = ٧٥ متر

θ = ١٥٠°

أ- سد العقد بنصف القطر الثابت (Constant Radius)

هنا:

$$ri = \frac{Li}{2\,Sin\,\frac{0}{2}}$$

$$= \frac{75}{2\,Sin\,75^\circ} = 38.8 \approx 39\ m$$

سمك السد عند القمة = ١,٥ متر

$$rc = 39 + 1.5 = 40.5\ m$$

باستخدام المعادلة (٥):

$$t = \frac{1000 \times h \times 40.5}{500.000} = 0.081\,h$$

السمك عند الفواصل الكنتورية مقداره عشرة أمتار سيكون كما في الجدول (١).

جدول (١) سمك العقد لسد العقد بنصف القطر الثابت:

t = 0.081 h	h
0	0
0.81	10
1.62	20
2.43	30
3.24	40
4.05	50
4. 86	60

لذلك فإن سمك قاعدة السد = ٤,٨٦ متر.

ب – سد العقد بالزاوية الثابتة (Constant Angle)

الزاوية المركزية الاقتصادية

$\theta = 133^\circ\ 34'$

$$\frac{\theta}{2} = 66^\circ\ 47'$$

$$ri = \frac{Li}{2 \operatorname{Sin} 66^\circ\ 47'}$$

أو

$$r_i = 0.544\ Li$$

باستخدام المعادلة (٧) فإن سمك العقد عند مختلف الفواصل الكنتورية كما في الجدول (٢).

جدول (٢) سمك العقد لسد العقد بالزاوية الثابتة:

h (متر)	wh (طن/المتر المربع)	f-wh طن/متر مربع	Li (متر)	ri (متر)	Whri (طن/متر)	t (متر)
صفر	صف	٥٠٠	٧٥	٤٠,٨	صفر	صفر
١٠	١٠	٤٩٠	٦٥	٣٥,٤	٣٥٤	٠,٧٢
٢٠	٢٠	٤٨٠	٥٥	٢٩,٩	٥٩٨	١,٢٥
٣٠	٣٠	٤٧٠	٤٥	٢٤,٥	٧٣٥	١,٥٦
٤٠	٤٠	٤٦٠	٣٥	١٩	٧٦٠	١,٦٥
٥٠	٥٠	٤٥٠	٢٥	١٣,٦	٦٨٠	١,٥١
٦٠	٦٠	٤٤٠	١٥	٨,١٦	٤٩٠	١,١١

١ – *حدود الطريقة الاسطوانية (Limitations of cylindrical Method)*

الطريقة الاسطوانية لها المحددات التالية:

أ – فهي تفترض الشريحة (Slice) من قوس السد لتكون في شكل حلقة. ولكن، نظرًا لأن شرعية السد ليست حلقة كاملة فإن الإجهادات المحسوبة بالطريقة الاسطوانية ليست تقريبية.

ب– أنواع سد العقد تسلك كعقود قطعية (segmental Arches) (أي باطنها أقل من نصف دائرة) بحيث أنه تحت تأثير الأحمال الخارجية، فإن أطوال العقد يحدث لها قصر (Get Shortened). لذلك، نظرًا لأن الاتساع أو البحر (Span) ليس ثابتًا وليس مرنًا (Inelastic) فإن السد المحمل يحدث له تغير في الشكل (Deformed) مع إنتاج عزوم وإجهادات قص بالإضافة إلى أحمال العقد العمودية. تلك

الإجهادات تسمى إجهادات تقصير الضلع Rib-shortening stresses وهي كبيرة عندما يكون مقطع العقد أكثر سمكاً وله زاوية مركزية أصغر.

جـ- اتساع أو بحر الأكتاف والذي يفترض أنه ثابت هو في الحقيقة مرن (Elastic) وهو ينتشر قليلاً بعيداً بفعل الدفع للعقد (Thrust of the Arch). مثل هذا الانتشار يضيف كذلك إلى تأثير تقصير الضلع (Rib shortening Effect).

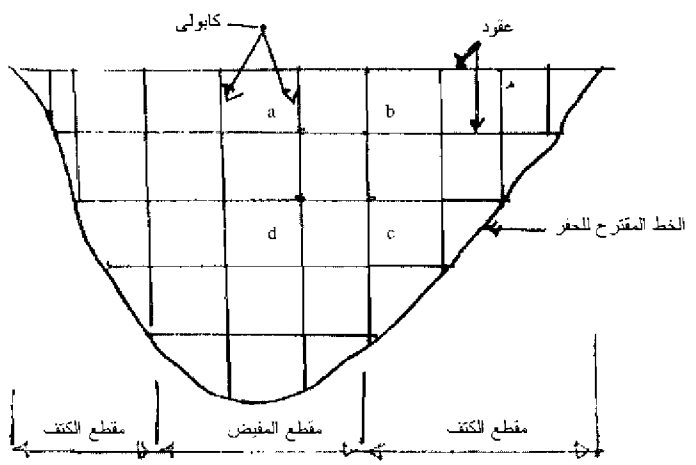
د - التغيرات المفاجئة في درجة الحرارة وانكماش البناء مثل الخرسانة ينتج كذلك عزوم بالإضافة إلى تلك التى بسبب التغير اللدن في الشكل كما تم ذكره سابقاً.

٢- *طريقة محاولة الحمل (Trial Load Method)*

بسبب حدود الطريقة الاسطوانية، فإن مسائل الإنشاء الحقيقية المعقدة لا يمكن حلها بدقة. حيث أن التحليل الحقيقي معقد جداً، طريقة محاولة الحمل (USBR) توفر تصميم أفضل وكافي لسدود العقد.

في طريقة المحاولة يفترض أن السد مكون من نظامين من العناصر وهما:

- سلسلة من العقد الأفقية الناقلة للدفع إلى الأكتاف والدعائم.
- سلسلة من الكابولي الرأسي (Vertical Cantilevers) المثبتة عند الأساس الشكل (١٢/٦).



شكل (١٢/٦) طريقة محاولة الحمل

المركبة الأفقية (Horisontal Component) لحمل الماء التي تعمل على سد العقد تقاوم بالتضامن (Jointly) مع فعل العقد والكابولي. توزع الحمل ما بين العقود والكابولي يتم تعيينه بواسطة طريقة المحاولة والخطأ (Trial And Error) على مبدأ أن كل نقطة تقاطع للعناصر الأفقية والرأسية (a b c d) (انظر الشكل (١٢/٦) انحراف العقد يساوي انحراف الكابولي. إذا كانت الانحرافات التي تم حسابها لا تساوي الأحمال الجديدة يتم افتراضها لحين وجود التوزيع الذي ينتج انحرافات متساوية لكل من العقد والكابولي.

نظرًا لأن الطريقة هي بالمحاولة والخطأ فإنها كانت تعتبر شاقة. ولكن، مع وجود الحاسب الآلي الرقمي الحديث، فإنه يمكن عمل الضبط بسهولة. ولكن نظرًا لأن طريقة محاولة الحمل ليست مبنية على مبادئ راسخة لتحليل العقد، فإن النتيجة المعطاة بهذه الطريقة يمكن أن تنتج ظواهر غير مرغوبة. فمثلاً، في حالة سد (Boulde) في الولايات المتحدة التي استخدمت فيه وجد أن التأثير الرأسي أو الكابولي يسبب الجهود العالية للشد لتظهر عند قاعدة السد متطلبة اتساع قاعدة السد.