۲۳

سازه‌های آبی

• مرجع

- Hydraulic Structures , C.D. Smith

• سرفصل های درس

I) Storage Dams	سدهای مخزنی
II) Spillings	سرریزها
III) Outlet Works	سیستم‌های تخلیه کننده
IV) Gates	دریچه‌ها
V) Diversion Works	سیستم های انحراف
VI) Drop Structures	سازه‌های آبشاره‌ای
VII) Stone Structures	سازه‌های سنگی
VIII) Conveyance Structures	سیستم‌های انتقال آب
IX) Culvert Hydraulics	هیدرولیک کالورت ها

www.ttmar.ir

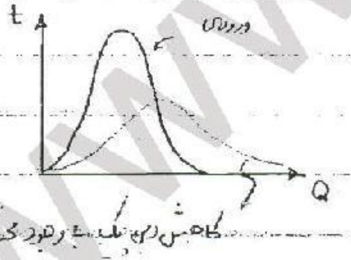
www.ttnar.ir

Chapter 1 : Storage Dams

purpose : - Flood Control کنترل سیلاب
- Irrigation تأمین آب کشاورزی
- Navigation کشتیرانی
- Municipal and Industrial Water Supply
- Conservation of Fish and wildlife
- Recreational Benefits
- Power تولید انرژی برق (نیروگاه برقابی)

از اصلی ترین اهداف، کنترل سیلاب می باشد. سیل می تواند ناشی از تغییرات ناگهانی دما، یا پراکندگی بارندگی باشد. سیل در کشورهایی که در مناطق خشک و نیمه خشک قرار گرفته اند باعث خرابی های زیادی می شود.

مخزن می تواند به طرز قابل توجهی شدت دبی (ورودی) را کاهش دهد.



سطح زیر منحنی = حجم

سطح زیر دو منحنی باید برابر باشد

کاهش دبی پیک با وجود مخزن

بخش کشاورزی در ایران، بزرگترین مصرف کننده آب می باشد و راندمان آن در ایران بسیار پایین است.

هدف کشتیرانی بیشتر در رودخانه های بزرگ با شیب کم می باشد. این هدف در ایران وجود ندارد.

سدهایی که هدف تولید برق تنها هدف ساخت آنها می باشد، دارای مخزن کوچکی می باشند.

تأمین آب شهری و صنعتی هدف بسیار مهمی است مثل سدهای لتیان، لار و سد کرج.

→ Types of Storage Dams

1) Concrete Dams
  - Solid Concrete { Gravity / Arch
  - Hollow Concrete
  - Buttress Dams (پشتبند ـ بتنی پایه‌دار)

2) Rockfill Dams

3) Earthfill Dams

4) Timber and Steel Dams

ـ نوع سد هیچ ارتباطی با هدف از ساخت سد ندارد.

→ Consideration in choice of site

- water supply
- foundation condition
- topography
- land cost
- availability of materials
  - quality
  - quantity
  - distribution

باید اطمینان حاصل کنیم که آب موجود در منطقه برای تأمین هدف ما از ساخت سد کافی باشد و تغییری در دبی رودخانه و سطح آب مناطق مسکونی موجود در منطقهٔ مورد نظر ایجاد نمی‌شود.

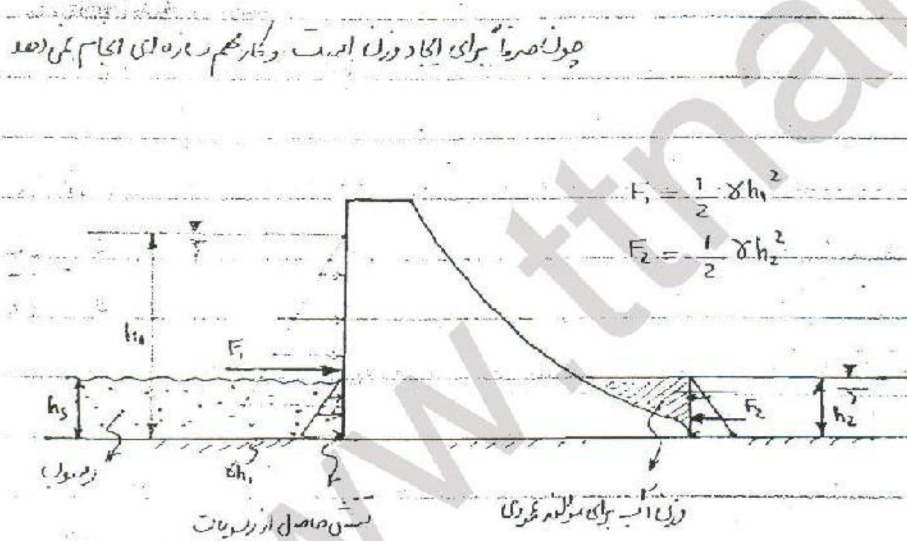
سد باید در جایی احداث شود که دارای درهٔ تنگ باشد تا سد کوتاه‌تری هم برای ایجاد مخزن مناسب برای سد و هم ایجاد سازهٔ مناسب باید باشد (با ایجاد یک سد و ایجاد مخزن آن نیرو و تنش‌های زیادی به اعضای کف و پی سازه وارد می‌شود که باید به شرایط آن و نیز شرایط تکیه‌گاه‌های سازه توجه شود که تحمل این نیروها را داشته باشد)

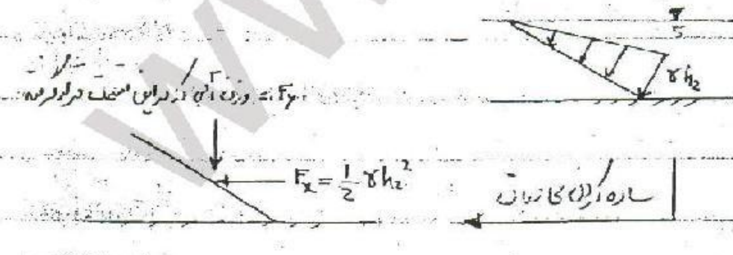
www.ttmar.ir

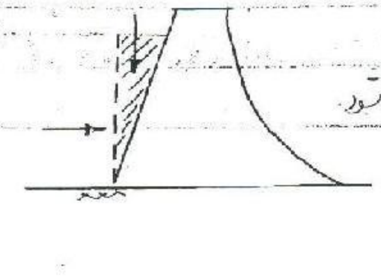
Gravity Dams (سدهای وزنی)

سدهای وزنی معمولاً از بتن ساخته می‌شوند و اصلی‌ترین عامل مقاومت سد در برابر نیروهای وارده وزن سد می‌باشد. این سد معمولاً در جایی ساخته می‌شود که مصالح مناسب در دسترس بوده و فونداسیون سد قدرت تحمل بارهای وارده از طرف خود سد و مخزن سد را داشته باشد. در این سدها معمولاً از بتن‌های کم کیفیت استفاده می‌شود که حداقل قدرت تحمل تنش‌های برشی و محوری را دارا باشد.

چون صرفاً برای ایجاد وزن است و کار مهم سازه‌ای انجام نمی‌دهد


$F_1 = \frac{1}{2}\gamma h_1^2$
$F_2 = \frac{1}{2}\gamma h_2^2$
h_1
F_1
h_s
h_2
F_2
(رسوبات)
γh_1
تنش حاصل از رسوبات
وزن آب برای مؤلفه محوری


F_y = وزن آبی که در این قسمت قرار گرفته
$F_x = \frac{1}{2}\gamma h_2^2$
γh_2
ساده کردن کار زیاد



در این حالت هم باید وزن آب به صورت مؤلفه محوری در نظر گرفته شود.

چون رودخانه در جریان دارای یک توان حمل و انتقال رسوب می‌باشد و در نزدیکی سد این توان کاهش یافته و در نتیجه رسوب موجود در جریان ته‌نشین می‌شود. در نتیجه ارتفاعی از مخزن از رسوب پر می‌شود. حتی گاهی عمر سد را بر حسب مدت زمان پر شدن مخزن سد از رسوب تعیین می‌کنند.

- نیروی حاصل از رسوب با فرض رفتار سیالی برای رسوبات:

$$F_s = (\gamma' - \gamma)\,\frac{h_s^2}{2}$$

γ': وزن مخصوص خشک رسوبات

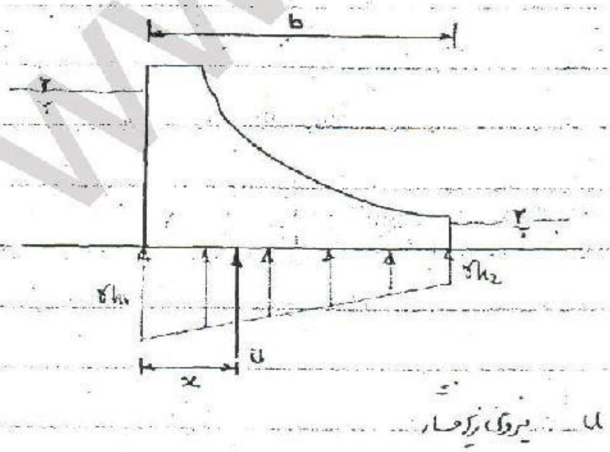
γ: وزن مخصوص آب

- در صورتی که رفتار رسوب غیر سیالی در نظر گرفته شود:

$$F_s = C\,(\gamma' - \gamma)\,\frac{h_s^2}{2}$$

در حالتی که رسوبات دانه‌ای اند و نیروی کمتری نسبت به سیال اعمال می‌کنند. بنابراین معمولاً از یک ضریب 0.6 _ 0.5 استفاده می‌کنیم.

نیروی حاصل از زیرفشار:

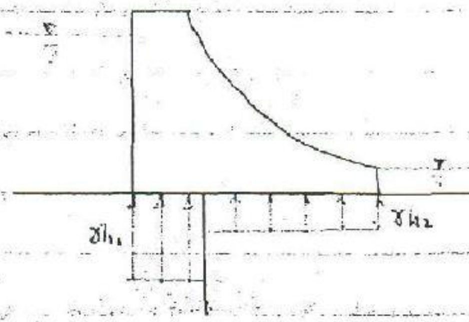


γh: نیرو و فشار ناشی از آب‌های نفوذی به درون خاک و با جریان آب زیرسطحی می‌باشد

نیروی زیرفشار $U = \dfrac{\gamma (h_1 + h_2)\, b}{2}$

محل اثر نیرو $x = \dfrac{b\,(2h_2 + h_1)}{3(h_1 + h_2)}$

www.tinar.ir

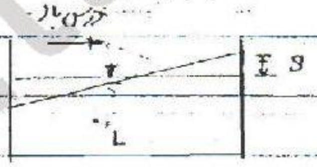


اگر از جریان زیرسطحی صرف‌نظر کنیم طبق قانون پاسکال توزیع تنش یکنواخت خواهد شد.

اگر زیرفشار وجود داشته باشد، بخشی از نیرویی که باید دانه‌های خاک زیر سد تحمل کند، زیرفشار تحمل می‌کند.

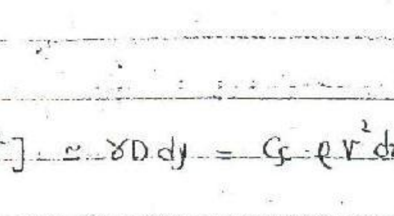
اگر نیروی زیرفشار بیشتر از نیرویی باشد که فونداسیون سد باید تحمل کند، حرکتی به سد از پی رخ می‌دهد.

- Wind Effects
  - Setup
  - Waves



باد اگر روی سطح آب بوزد، روی سطح آب ایجاد تنش برشی و تغییر شکل می‌کند:

Setup



$$\tau\, dx = F_2 - F_1$$

$$\begin{cases} F_1 = \gamma D^2/2 \\ F_2 = \gamma (D+dy)^2/2 \\ \tau = \underbrace{C_f}_{\text{ضریب باد}}\ \underbrace{\rho}_{\text{غلظت هوا}}\ V^2/2 \end{cases}$$

(V: سرعت باد)

τ: تنش برشی ناشی از باد

$$F_2 - F_1 = \frac{\gamma}{2}\left[(D+dy)^2 - D^2\right] \simeq \gamma D\, dy = C_f\, \rho V^2 dx/2$$

$$\Rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{C_f \rho V^2}{2\gamma D}$$ شیب سطح آب

www.ttnar.ir

اگر عمق ثابت باشد (D = cte) ⇐ شیب ثابت می‌شود یعنی یک خط راست خواهیم داشت

برای عمق ثابت داشتیم ⇐ Setup : $S = \frac{dy}{dx}\left(\frac{h}{2}\right)$

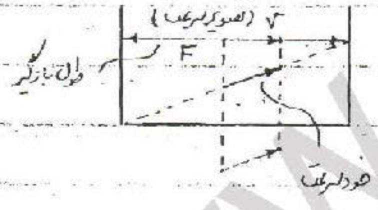
$$\Rightarrow \boxed{S = \frac{F \cdot V^2}{63000\,D}}$$

V : سرعت باد (Km/h)

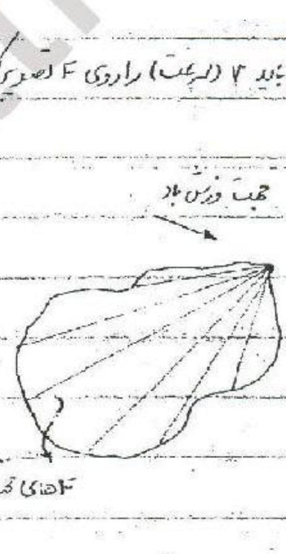
D : عمق برحسب متر (m)

F : طول استخر (طول بادگیر)

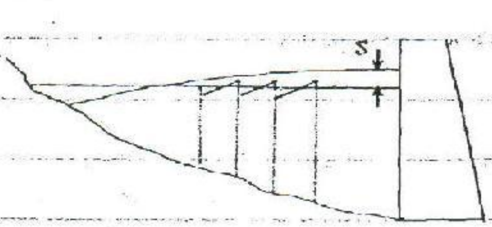
ممکن است انتخاب‌های زیادی برای F داشته باشیم، برای هر کدام که FV^2 بیشتر شود ملاک انتخاب قرار می‌گیرد.



باید V (سرعت) را روی F تصویر کنیم.



حاصلضرب هر کدام از FV^2 ها بیشتر شد آن را انتخاب می‌کنیم.



اگر بخواهیم تغییرات عمق را حساب کنیم پروفیل به صورت منحنی درمی‌آید.
در المان‌های مختلف شیب‌های متفاوتی داریم. هر چه عمق کمتر باشد شیب بیشتر است.

www.ttnar.ir

ترکیبی است که حجم آب ثابت است و سطح زیر منحنی قبل و بعد از تغییر شکل ثابت می‌ماند.

تمرین) بر مبنای عمق ثابت مخزن رابطه‌ای برای setup بدست آوردیم. اگر مخزن تغییرات عمق داشته باشد به جای یک خط راست یک منحنی برای پروفیل سطح آب داریم. setup ای داشته بزرگتر است یا کوچکتر؟ ۲) بدست آمده از فرمول چقدر ضریب اطمینان دارد؟

◀ موج یکی از نیروهایی است که به سازه‌های آبی وارد می‌شود. مهم‌ترین پارامتر آن ارتفاع موج مشخصه (h_w) است.

h_w: Sognificant Wave Height ارتفاع موج مشخصه

احتمال وقوع این موج 13 درصد است.

موج پدیده پیچیده‌ای است که از وزش باد ایجاد می‌شود. وزش باد هم در راستای افقی و هم در طول نامنظم است. ← تخمین دقیق ارتفاع موج کار ساده‌ای نیست.

با توجه به شرایط باد و شرایط دریاچه، ارتفاعی برای موج تخمین می‌زنند.

• اگر موج در آب عمیق رخ دهد:

$$h_w = 0.00513\,\underbrace{V}_{\text{سرعت باد}}^{1.06}\,\underbrace{F_e}_{\text{طول بادگیری}}^{0.56}$$

طول موج $L_o = 0.187\,V^{0.88}\,F_e^{0.56}$

($D > L_o/4$ عمق دریاچه : شرایط آب عمیق)

$$\underbrace{F_e}_{\text{طول بادگیر}} = K \cdot L \qquad \left(K = K\left(\frac{\overset{\text{عرض مخزن}}{w}}{\underset{\text{طول مخزن}}{L}}\right) \right)$$

مقدار K از جدول صفحه 16 کتاب

$F_{e(max)} = 0.031\,V^{2}$

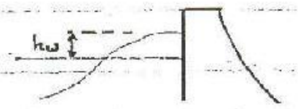
www.tlnar.ir

۲- اگر Fe بیشتر از Fe(max) باشد، تشکیل موج مستقل از طول بادگیر خواهد شد.

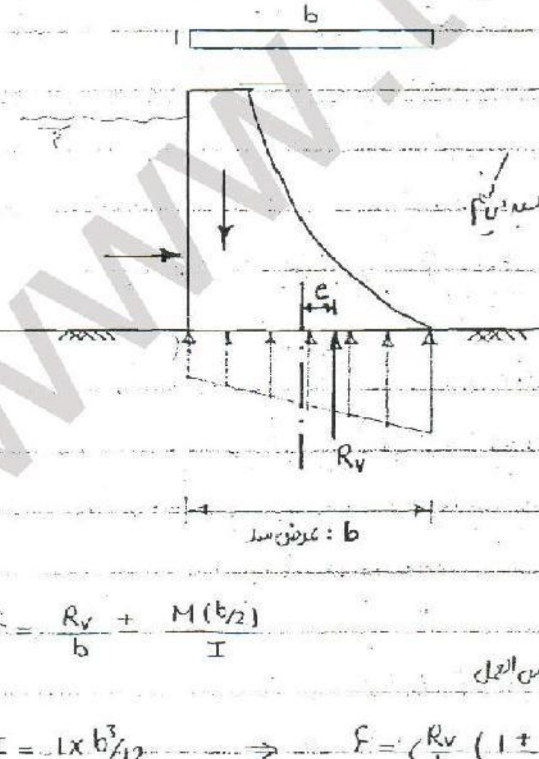
► باد با سرعت مشخص لزوماً با موج تشکیل نمی‌شود. در جدول شماره 4، صفحه 17 کتاب، حداقل زمان وزش باد برای تشکیل موج بر حسب طول بادگیر و طول موج داده شده است.

$$F_{موج} = \gamma (\underbrace{h_w \times 2})^2/2$$ نیرویی که از طرف موج به سد وارد می‌شود.

وقتی که موج به سطح قائم بتنی یا فولادی برخورد می‌کند که انرژی ضربه کم نمی‌کند، ارتفاع موج دو برابر می‌شود.



► توزیع نیرو در فونداسیون



b : عرض سد

فرض شده بر روی یک عرض واحد محاسبه می‌کنیم.

وقوع کشش سبب جدا شدن بتن از زمین می‌شود ⇐ همیشه باید عکس‌العمل فشاری باشد.

$$f = \frac{R_v}{b} + \frac{M(b/2)}{I}$$

خروج از مرکزیت نیروی عکس‌العمل

$$I = 1 \times b^3/12 \Rightarrow f = \underbrace{\frac{R_v}{b}}_{\text{مجموع نیروهای قائم}} \left(1 \pm \frac{6e}{b}\right)$$

www.ttnar.ir

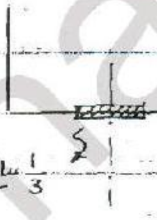
اگر زیرفشار داشته باشیم قسمتی از نیرو را زیرفشار تحمل می‌کند و اگر زیرفشار نداشته باشیم همه R_v را دانه‌های جامد تحمل می‌کنند.

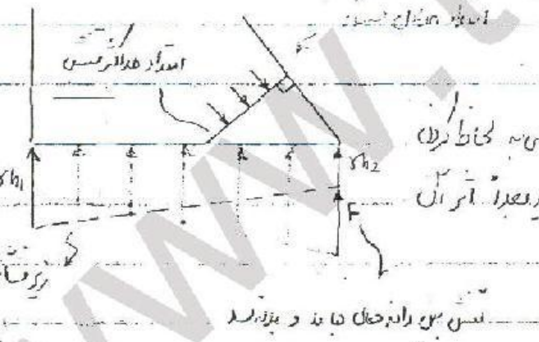
⇐ R_v همان مجموع نیروهای قائم است و لازم است مقدار نیروی زیرفشار را از آن کم کنیم.

f باید همیشه مثبت باشد ⇒ $6e < b$ ⇒ $\boxed{|e| < b/6}$

نیروی عکس العمل باید در $\frac{1}{3}$ میانی اثر کند تا فونداسیون به کشش نیفتد

که منظور از کشش بین بتن و دانه‌های جامد خاک است


$\frac{1}{3}$ میانی


امتداد حداقل تنش
امتداد حداکثر تنش
γh_1
γh_2
F
زیرفشار
تنش بین دانه‌های جامد و بتن سد

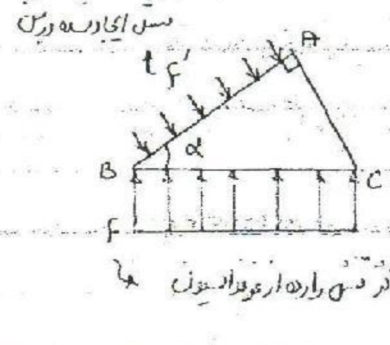
در محاسبه تنش‌های زیر سد نیازی به لحاظ کردن نیروی زیرفشار نیست ولی باید بعداً اثر آن را ببینیم

گاهی ممکن است فشار هیدرواستاتیک بیشتر از فشار کل باشد

⇐ مقطع در کششی از سد به کشش می‌افتد

تنش کل با تنش دیگر را بدست آورده و مقایسه می‌کنیم تا ببینیم بدنه سد به کشش می‌افتد یا نه. تفاوت تنش‌ها برای سهم دانه‌های جامد است که نباید به کشش بیفتند.

پس از بدست آوردن توزیع تنش، بالا بتوانیم حداکثر تنش را در بتن بدست بیاوریم



$$f' \cdot AB \cdot \cos\alpha = f \cdot BC$$

$$f' \cdot BC \cos^2\alpha = f \cdot BC$$

$$\Rightarrow \boxed{f' = \frac{f}{\cos^2\alpha}}$$

همه این کارها برای تیرک طرح است. اگر رسید به تنش، اساساً معمولاً با افزایش b تنش را از بین می‌بریم یعنی هندسه اولیه را تغییر می‌دهیم

خاک باید تحمل باربری چنین نیرو و تنشی را داشته باشد.

⇐ F را با تنش مجاز باربری خاک مقایسه می‌کنیم که باید کمتر از تحمل خاک باشد.

جدول شماره ۲ صفحه 27 کتاب تشکیلات مختلف زمین‌شناسی و تنش مجاز باربری آنها را ذکر کرده است.

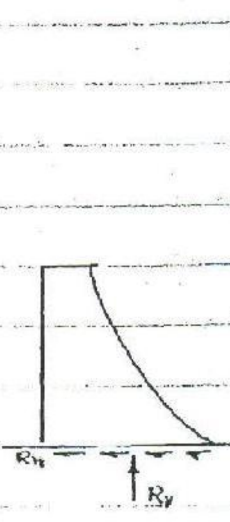
حداکثر تنش بتن را نیز باید با مقدار تنش مجاز بتن کنترل کنیم

که

تنش مجاز بتن برای سدها $50 \sim 80 \ Kg/cm^2$

(حدود بتن مگر فونداسیون)

→ Sliding (لغزش)



برای سیستم پایدار $R_H < F \cdot R_v$

F : ضریب اصطکاک بین سطح زیر سد و زمین

www.tfnar.ir

Rock (ساختار سنگی) $f = 0.7$

ضریب اطمینان برای درگیری بتن و فونداسیون اعمال می‌کنیم.

- ۲ - سیستم ابزاری $R_H < \frac{f . R_V}{S_F}$ ضریب اطمینان $S_F = 2$

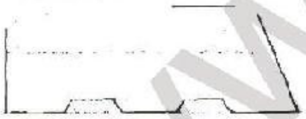
$f = tg\,\varphi$ ⟸ زاویه اصطکاک داخلی دانه‌ها ($\varphi = 20 \sim 35°$)

R_H : مجموع نیروهای افقی

R_V : در اینجا فقط نیروهایی است که توسط دانه‌های جامد تحمل می‌شود چون سیال نمی‌تواند نیروی برشی را تحمل کند.

⟸ در حالت R_V باید نیروی uplift آپلیفت هم در نظر گرفته شود.

اگر در لغزش جواب نگیریم ساده‌ترین راه افزایش وزن یا افزایش b است.



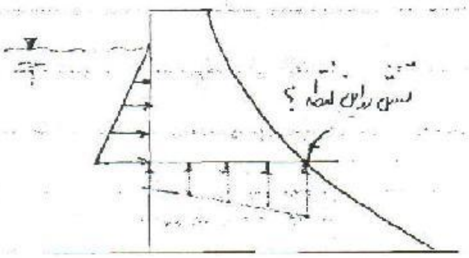
گاهی در پی بتنی که روی سنگ قرار می‌گیرد
دندانه‌هایی مثلثی مانند دندانه اره ایجاد
می‌کنند تا اصطکاک بین آنها افزایش یابد.

◄ برای طراحی سد ابتدا ابعاد را حدس زده، و بعد کنترل‌های زیر را انجام می‌دهیم:

- کنترل تنش مجاز فونداسیون
- کنترل تنش مجاز بتن
- کنترل وجود کشش
- کنترل لغزش

(سد می‌تواند به مکانیزم‌های مختلف مستقلاً بررسی شود)

www.ttmar.ir

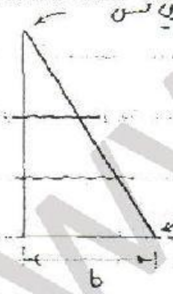


برای بدست آوردن تنش در نقطه نشان داده شده باید مطابق شکل مقطع بزنیم. قسمت بالا یک تکه می‌شود و تنش حداکثر را در آن نقطه بدست آورده و بر Cos زاویه مورد نظر تقسیم کرده و تنش را محاسبه می‌کنیم.

برای طراحی می‌توان سد را به لایه‌های مختلف (مثلاً ۱۰ cm) تقسیم کرده و b مورد نیاز برای هر مقطع را بدست آورد (مبنا: کشش در هیچ کدام از مقاطع ایجاد نشود)

← یک قوس بدست می‌آید

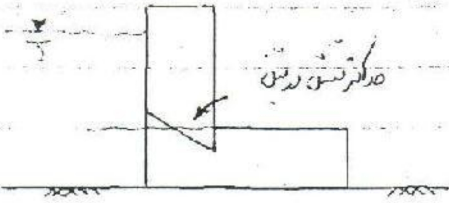
این طرح اقتصادی‌تر است ولی چون اجرای قوس مشکل است در نتیجه سد را در پائین [illegible] مسطح می‌سازند.



برای شکل مثلثی چون بارگذاری با ارتفاع خطی تغییر می‌کند بیشترین تنش در پائین سد اتفاق می‌افتد

← برای بدترین بارگذاری مقدار b را در پائین سد بدست می‌آورند و فقط به ازای ۲ یا ۳ مقطع دیگر تنش را کنترل می‌کنند

افزایش هم نیست و فقط عدم وجود کشش را کنترل می‌کنیم.



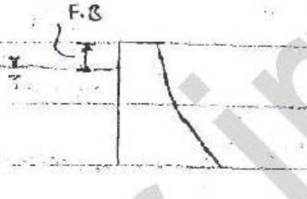
به دلیل تغییر ناگهانی مقطع، حداکثر تنش برشی در مقطع نشان داده شده رخ می‌دهد.

Free Board (F.B)

مقدار فاصله بالاترین سطح آب تا ارتفاع سد را بیشتر در نظر می‌گیریم

$F.B = \underset{\text{Setup}}{S} + \underset{\text{Runup}}{R} + \underset{0.5\ m}{E}$

ارتفاع موج جهنده آب در پشت سد بالا می‌آید



(مقدار R در رابطه شماره 16)

سدهای بتنی $R = 1.5\,h_w$

سد خاکی $h'_w = 1.6\,h_w$

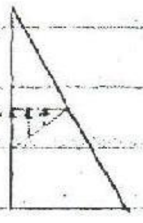
برای سدهای خاکی باید توجه بیشتری کنیم

چون نباید مطلقاً اجازه دهیم که آب از سد ... احتمال رخ آن ۱٪ است.

معمولاً در نتیجه در رابطه R از h'_w استفاده می‌کنیم

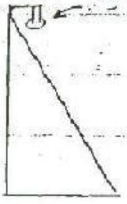
Upstream Flare

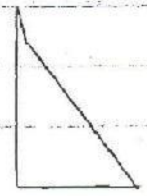
در این تحت طراحی سازه ایجاد کشش در بتن است و این که هنوز آنالیزی انجام نشده است.

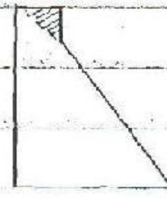


خروج از مرکزیت 1/6 است و محل آن دقیقاً در مرز 1/3 بالادست

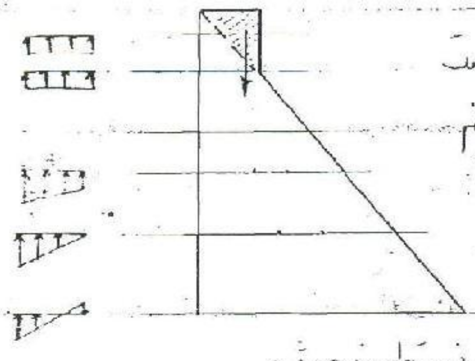
⇐ وجود هر زائده‌ای ممکن است موجب ایجاد کشش در سد گردد.







www.ttnar.ir



فرض می‌کنیم شکل سد مثلثی است

و آن مقدار بتن را اضافه می‌کنیم

از جایی به بعد این نیرو از 1/3 میانی مقطع خارج می‌شود

← امتداد نیروها را از مرز به خارج 1/3 میانی می‌کرد.

1/3 ها را در هر مقطع مشخص کرده و به هم وصل می‌کنیم. محل تلاقی خط 1/3 و امتداد نیرو

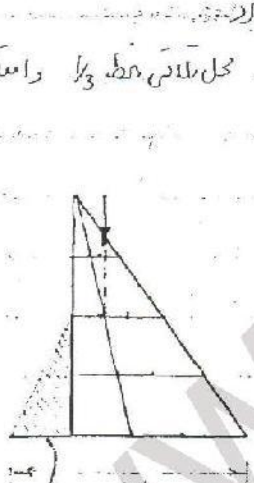
مقطعی است که از آن به بعد کشش داریم

← باید چاره‌ای در نظر بگیریم

یک زاویه‌ای از محل ایجاد کشش در بالادست

سد ایجاد می‌کنیم

(به این زاویه upstream flare گویند.)



این مقدار به اندازه‌ای است که نیرو در مرز 1/3 مقطع قرار گیرد

→ Single Arch Dam

همه نیروهای وارده به سد وزنی به پای سد وارد می‌شود.

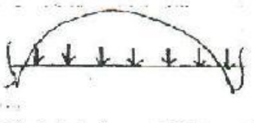
اساس طراحی سد وزنی است. سد وزنی را در جایی می‌سازیم که دره خیلی عریض و گسترده باشد.

اگر بخواهیم سد، بار را به تکیه‌گاه‌های سمت چپ و راست منتقل کند، در این حالت سد قوس قرار می‌گیرد. بنابراین خمش از سد به کشش می‌افتد که برای ما مطلوب نیست

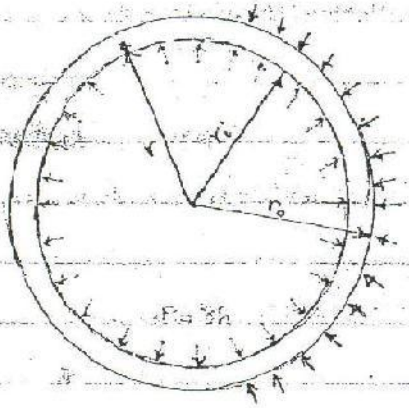
ایده‌ای برای انتقال بار به تکیه‌گاه‌ها و حل شکل خمش، ساخت سد به صورت قوسی است

← اساس کار سد قوسی = امکان انتقال بارهای اعمالی به تکیه‌گاه‌ها

در سیستم قوسی، فولاد میانی هم می‌تواند بار را تحمل کند ولی عمده بار توسط عناصر قوسی به تکیه‌گاه‌ها منتقل می‌شود.



در مخازن تحت فشار از فولاد استفاده می‌کنیم:



$$f = p\,\frac{\left[r_o^2 + \frac{r_i^2 r_o^2}{r^2}\right]}{\left[r_o^2 - r_i^2\right]}$$

r = شعاع نقطه‌ای که می‌خواهیم تنش را در آن محاسبه کنیم.

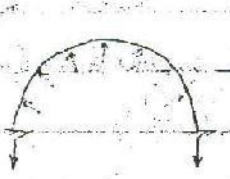
تنش در نقاط مرزی دایره‌ها با شعاع ثابت، مساوی خواهد بود

(در اینجا فرض کرده‌ایم که مخزن ضخامت قابل توجهی داشته باشد)

$$f_i = 2p\,\frac{r_o^2}{t(r_o+r_i)} \qquad (t = r_o - r_i)$$

اگر جدار مخزن خیلی نازک باشد $\Rightarrow$ $\boxed{f = \frac{p.r}{t}}$

(این رابطه مبنای کارها برای طراحی اولیه بدنه [illegible] است)



دهانه مخزن که فشار وارد می‌شود

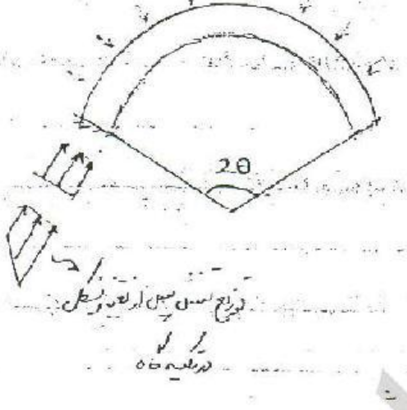
اگر نیروها از بیرون به مخزن وارد شوند، بدنه به فشار

می‌توان گفت روابط به دست آمده برای این مخزن صادق است با این تفاوت که بدنه در فشار کار می‌کند.

◄ سد قوسی همیشه متقارن ارائه داده است . آیا در این حالت ، باز هم روابط صادق است ؟

فرض : نیروها کاملاً عمود بر سد وارد می‌شوند .

این فرض صحیح است . چون سیال نیرویی عمود بر جداره وارد می‌کند .



روابط در تنش ، خطی است . در حالیکه

رفتار سیستم مخازن قابل پیش‌بینی تر است

سه بعدی است .

چون [illegible] تنش‌ها [illegible] و [illegible]

آنها متمرکز است ، کاملاً صحیح نیستند و

ممکن است در اثر بار وارده به سمت خارج حرکت

کند .

◄ تنشی که در سد ایجاد می‌شود با تنش محاسبه شده در

مخازن متفاوت می‌باشد . بنابراین از یک ضریب K که مقدارش بیش از ۱ است

استفاده می‌شود .

$$\boxed{f = \frac{K.P.r}{t}}$$

مقدار K از جدول شماره ۱۹ صفحه ۳۴ کتاب بر حسب [illegible]

بدست می‌آید .

K تابعی است از دو پارامتر $\frac{r}{t}$ و 2θ $\quad K = f\left(\frac{r}{t}, 2\theta\right)$

برای طراحی یک سد قوسی مبنای کار ما این است که تنش در سد بیش از تنش مجاز بتن مورد استفاده

نشود .

در طراحی باید ابتدا ضخامت را حدس زده (شعاع و ضخامت) و بعد تنش‌ها را با تنش مجاز مصالح

مقایسه کنیم . ممکن است شعاع را ثابت نگهداشته و با تغییر ضخامت به تنش مطلوب برسیم

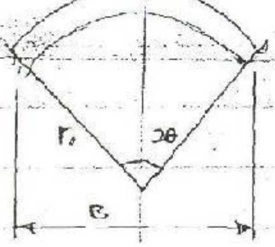
◄ طبق تجربیات بدست آمده نشان داده شده که ساخت سد تک قوسی طرح بهینه‌ای نیست

با استخراج شکل مناسب سد قوسی [illegible] را با مقیاس مدل کرده و آن را برای پلاستیک

می‌شکنند و آب را پشت سد می‌ریزند. در اثر نیروی هیدرواستاتیک، این لاستیک شکل ماهی پیدا می‌کند که قسمتی از استوانه نیست. این طرح بهینه خواهد بود.

لاستیک در این حالت در کشش کار می‌کند بنابراین بهترین شکل برای سد قوسی عکس این حالت است. چون در همه جای آن فشار ایجاد می‌شود.

با هر شکل متفاوتی از دره، شکل لاستیک متفاوت خواهد بود. بنابراین طرح بهینه همیشه یکسان نیست.



عرض دره در ارتفاع معین

$$\sin\theta = \frac{B}{2r_0} \Rightarrow r_0 = \frac{B}{2\sin\theta}$$

طول قوس : $L = 2\theta . r_0$

(برای سادگی می‌باشد : $K=1$)

$$t = \frac{P . r_0}{f} \Rightarrow A = t . L$$

f تنش مجاز

با داشتن سطح مقطع می‌توان آن را minimize کرد تا به طرح اقتصادی برسید:

$$A = \frac{P}{F} . \frac{B}{2\sin\theta} \times 2\theta . \frac{B}{2\sin\theta}$$

در این رابطه تنها پارامتری که برای تراز مشخصی از ارتفاع، مساحت را تغییر می‌دهد، زاویه مرکزی (θ) است.

$$\Rightarrow A = \left(\frac{P . B^2}{2f}\right) \frac{\theta}{\sin^2\theta}$$

$$\Rightarrow \frac{dA}{d\theta} = \frac{d}{d\theta}\left[K \frac{\theta}{\sin\theta}\right] = \frac{K\sin^2\theta - 2K\sin\theta\cos\theta}{\sin^4\theta}$$

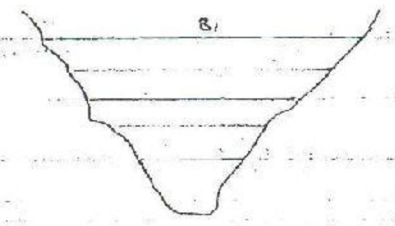
$$\frac{dA}{d\theta} = 0 \Rightarrow \theta = \frac{1}{2}\tan\theta \Rightarrow \boxed{\theta = 0.37\pi}$$

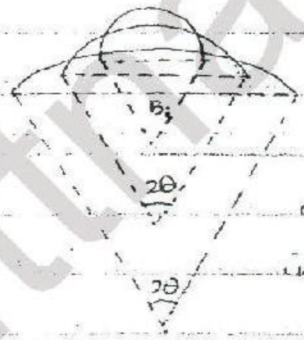
- به ازای زاویه ثابت در دره حداقل سطح مقطع را خواهیم داشت. (مستقل از عرض دره و ارتفاع سد است)

در ترازهای ارتفاعی مختلف، θ فرق نمی‌کند چون مقدار آن مستقل از K است.

⇐ در هر ارتفاعی باید زاویه مرکزی ثابت داشته باشیم. در نتیجه در ارتفاع‌های مختلف، شعاع‌های متفاوتی داریم. در پایین شعاع کم و در بالا شعاع، زیاد می‌شود.

در جایی که دره تنگ می‌شود در ترازهای بزرگ تکیه‌گاه حساب کرد.





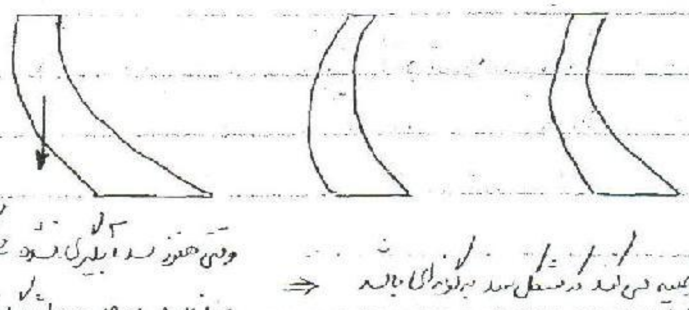
B: عرض دره
H: ارتفاع سد

اگر $\frac{B}{H} < 10$
باشد مناسب سد قوسی
مناسب‌تر از سد وزنی است.

- از نظر اجرایی اتصال بین دو تکیه‌گاه با زاویه 2θ دشوار است و ایجاد زاویه مرکزی 133° 34' امکان‌پذیر نیست.

⇐ آئین‌نامه زاویه 120° – 110° را توصیه می‌کند.

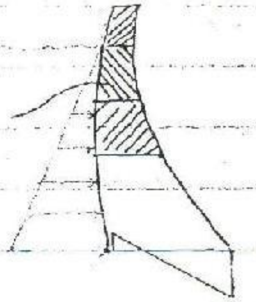
- ابتدای سد را می‌توانیم در هر مقطعی در جهت عمود بر صفحه قرار دهیم. این انتخاب هندسی باعث ایجاد اشکال مختلف خواهد شد.



وقتی هنوز سد آبگیری نشده ممکن است وزن سد موجب واژگونی آن گردد.

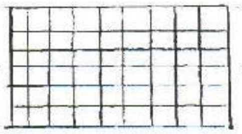
⇐ آئین‌نامه توصیه می‌کند در مقطع سد برآمدگی‌ای باشد که بدون آبگیری هم سد، پایدار بماند.

تحلیل بار وارد بر پی

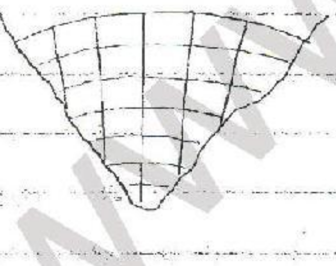


هر کدام از این المان‌ها، نوارهای دایره‌ای هستند که بار را به تکیه‌گاه منتقل می‌کنند.

یک راه‌کار برای توزیع بار در پوسته‌های دو انحنایی این است که توزیع بار را به گونه‌ای انجام دهیم تا تغییر شکل نقطه‌ها به وسیله تیرهای افقی و قائم برابر شود.



توزیع بار بین تیرهای افقی و قائم



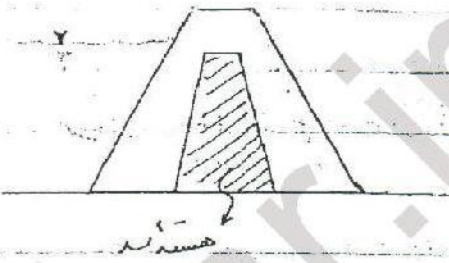
در سد دو قوسی هم همین توزیع بار
در پوسته‌های دو انحنایی را انجام می‌دهیم
تا کنش تیرهای افقی و قائم تعیین شود
و با استفاده از آن، میزان بار وارده
به فونداسیون را بدست می‌آوریم.

در این حالت کمی از بار بوسیله پوسته به پی وارد می‌شود ← طرح اقتصادی خواهد شد.

سد خاکی ...... ← Earth Dam

سد سنگریزه‌ای ← Rockfill Dam

در شرایطی که تکیه‌گاه مناسبی برای فونداسیون سد نداریم، نباید تنش زیادی به فونداسیون وارد کنیم. در نتیجه ساخت سد بتنی یا سد قوسی مناسب نخواهد بود.



سد خاکی این امکان را به ما خواهد داد. حجم سدهای خاکی تقریباً 15 - 10 برابر سدهای بتنی یا قوسی است.

خاک وقتی در سازه‌های هیدرولیکی به کار می‌رود، دو نوع مقاومت از خودشان می‌دهد :

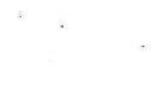
۱) چسبندگی ...... ۲) زاویه اصطکاک داخلی

کل نیروی وارد بر سد را به خاک وارد می‌کنیم. رفتار خاک در برابر آب خیلی متفاوت است. رفتار معمولاً ضعیف خاک در برابر آب نگران کننده است. ممکن است خاک در معرض آب باربری‌اش کاهش یابد.

مشکل ما صرفاً باربری نیست. یکی از کاربردهای سد جلوگیری از نفوذ آب است. مشکل اصلی نشت آب از بدنه سد خاکی است.

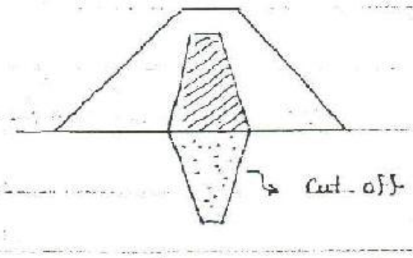
← نقش آب‌بندی را به بدنه سد می‌دهیم.

خاکی که نفوذناپذیر باشد لزوماً باربری خوبی ممکن است نداشته باشد و بالعکس. بنابراین سعی می‌کنیم بدنه سد را از مواد مختلف بسازیم. و باربری را به بدنه سد بدهیم و نفوذناپذیری را به قسمت دیگر.

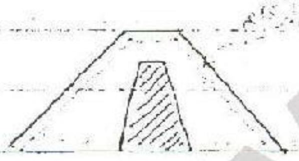


هسته سد ممکن است اشکال مختلفی داشته باشد. وظیفه آب‌بندی سد بر عهده هسته رسی خواهد بود.

⇐ در بعضی از سدها گاهی هم مشکلاتی داریم و آن، نفوذ آب در زیر سد است. (وجود درز و ترک ها)
بنابراین دیوارهایی به نام cut off در زیر سد می سازیم که به هسته متصل می شوند.



از مشکلات دیگری که در سدهای خاکی هم است، تغییر شکل هایی است که در دراز مدت اتفاق می افتد. با افزایش بار، فشردگی دانه های خاک رخ داده و پدیده تحکیم اتفاق می افتد. پدیده تحکیم مثبت است چون زاویه اصطکاک داخلی را افزایش داده و باربری بالاتر می رود.



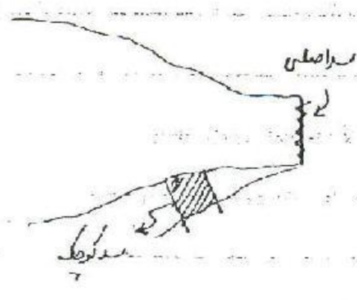
تحکیم را در خاک زیر سد هم داریم. ممکن است تحکیم در همه نقاط زیر سد یکسان نباشد، بنابراین اختلاف نشست ها سبب ایجاد ترک در سد شده و آب از درون سد نفوذ خواهد کرد.

⇐ خود تحکیم پدیده مثبتی است ولی ایجاد نشست های غیر همگون و ترک ها ایجاد مشکل خواهد کرد.

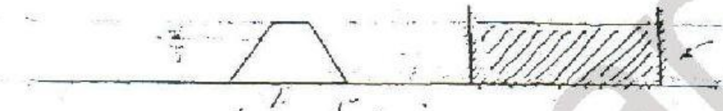
نکته دیگر این است که پس از تحکیم، ارتفاع سد کاهش می یابد. باید این نشست ها را در Freeboard در نظر بگیریم تا آب از روی سرریز عبور نکند. عبور آب از روی سرریز یعنی نابودی سد!

◄ برای اینکه آب از روی سرریز عبور نکند، یک مخزن بتنی ساخته و سد کوتاهی (2-3 m) با تراز ارتفاع سد می سازیم. اگر ارتفاع آب تا تراز سد بالا بیاید این سد خراب می شود و آب از طریق مخزن مستطیلی بتنی خارج می شود و آب تا تراز کف مخزن پایین می افتد
⇐ از عبور آب از روی سد اصلی ممانعت می شود.

این سد کوچک را قبل از سد اصلی می‌سازند.



با خراب شدن این سد، از عبور آب از روی سد اصلی جلوگیری می‌شود. بعداً می‌توان این سد را با عملیات یک روزه خالی دوباره ساخت.



(مقطع سد خاکی)

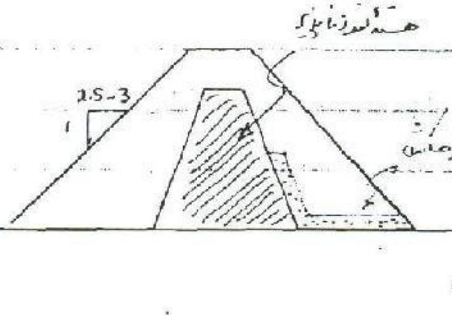
بعدها در مخزن بتنی سد خاکی ساخته شود. چون اگر سد بتنی باشد، برای عبور آب از مخزن باید یک جای تأمین شود تا دبی زیاد از طریق مخزن خارج شود.

⇐ ممکن است قبل از اینکه همهٔ آب تخلیه شود، آب از روی سد اصلی عبور کند.

از سرریز بتنی مخزن هم می‌توان استفاده نمود چون ما می‌خواهیم از ظرفیت زیادی در این سد استفاده کنیم. در این صورت قبل از پر شدن مخزن، آب خارج می‌شود.

ولی با وجود سد خاکی به خاطر شکل آن به طور اتفاقی آب تخلیه می‌شود و نیازی به سرریز به صورت مشخص نداریم.

◄ هر چه بدنهٔ سد خشک‌تر باشد، پایداری آن بیشتر است. در نتیجه برای اینکه مطمئن شویم بدنه سد کاملاً خشک است، از زهکش استفاده می‌کنیم که آب نفوذ کرده، سریع خارج شود.



زهکش بسیار نفوذپذیر است و کار عبور تراوش‌های رسیده را انجام می‌دهد. اگر زهکش نباشد قسمتی از پایین بدنه سد، خشک نیست و پایداری کمتری دارد. در نتیجه طراح مجبور می‌شود از مصالح گرانتر یا خاک بیشتری استفاده کند و علاوه بر آن فشار منفذی هم خواهیم داشت که موجب کاهش اصطکاک داخلی دانه‌های خاک و کاهش مقاومت برشی بدنه سد خواهد شد.

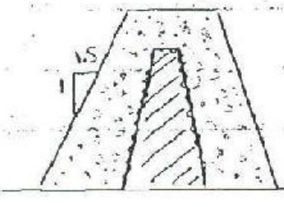
مانند ذکر فشار در لوله پیزومتری

← نصب زهکش باعث کاهش فشار منفذی و افزایش پایداری سد خواهد شد.

چون همیشه در جلوی سد آب وجود دارد در نتیجه قرار دادن زهکش در آنجا مناسب نیست. چون هزینه زیادی برای زهکش خرج می‌کنیم و مجبور می‌شویم حجم زیادی از آب را از طریق زهکش تخلیه کنیم و آب ذخیره شده در پشت سد را از دست می‌دهیم. علاوه بر اینکه قرار دادن زهکش هیچ سودی هم نخواهد داشت.

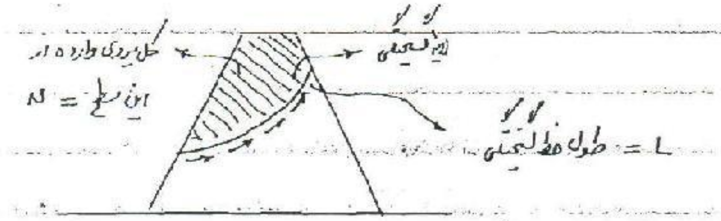
- سد سنگریزه‌ای

چون ممکن است بدنه سد از سنگریزه باشد و خیلی نفوذپذیر، ولی هسته همچنان نفوذناپذیر است. در حقیقت مخلوط سنگ، شن و ماسه را طوری می‌سازیم که فقط هسته نفوذناپذیر را محافظت کند. شیب این سد نسبت به سدهای خاکی بیشتر است چون مقاومت برشی آن بیشتر است.



بدنه اصلی سد به خاطر وجود سنگریزه، کار سازه‌ای مقابله با جریان را انجام می‌دهد اما کاملاً نفوذپذیر است. به همین دلیل در هسته سد از دیواره بتنی کاملاً نفوذناپذیر استفاده می‌شود.

www.ttmar.ir



S.R = N.tgφ + C.L (مقاومت در برابر لغزش دیوار)

Sliding Resistance

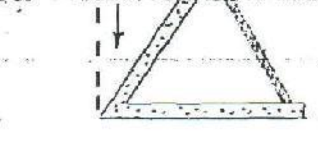
- طول سطح لغزش (L) با ارتفاع سد متناسب است و به طور خطی با آن تغییر می کند.
(با افزایش ارتفاع سد، در شکل مشابه بوده، طول L هم به تناسب آن افزایش می کند)

- نیروی N تابع وزن سطح مقطع نشان داده شده است و با توان 2 با ارتفاع سد تغییر می کند.

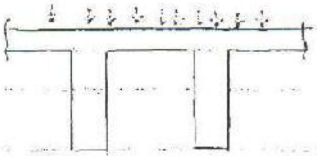
تمرین) اگر یک سد کاملاً همگن داشته باشیم و یک سد کاملاً سنگریزه ای، با افزایش ارتفاع سد
کدام لازم است شیب سدها تغییر کند؟ چرا؟
(در سد همگن شیب ملایم تر می شود ولی در سد سنگریزه ای شیب مستقل از ارتفاع است).

→ Buttres Dam سد پایه دار

این سدها از نوع سدهای ترکیبی محسوب می شوند و اساس کار آنها این است که از حجم بتن کم کرده و از خود آب استفاده می کنیم. یک صفحه بتنی مایل در برابر جریان آب داریم و پایه هایی در فواصل مشخص آن را نگهداری می کنند.

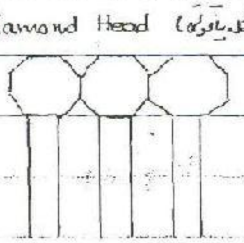


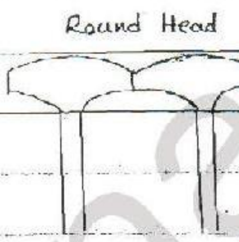
حجم مصالح مصرفی تقریباً $\frac{1}{6}$ سد وزنی است.



در این حالت ساده اتصال پایه‌ها، تنش
اضافی ایجاد می‌شود

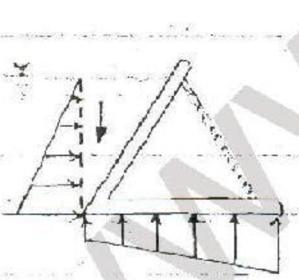
می‌توان شکل اتصال پایه‌ها را به گونه‌ای ساخت که
تنش در صفحه ایجاد نشود





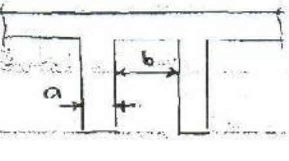
در این حالت هم تنش‌های ایجاد شده فشاری است

طراحی این نوع سدها مشابه سد وزنی است ولی تفاوت‌هایی با آن دارد که عبارتند از:



۱) باید نیروی قائم ناشی از وزن آب روی صفحه‌ی
مایل را هم در نظر بگیریم

۲) باید توجه کنیم که سد توخالی است و در محاسبه وزن سد
حجم فضای خالی را باید از وزن توپر کل کم کنیم.



۳) چون مقطع سد در جایی پر و در جای دیگر خالی است
در نتیجه بخش پر، تنش بخش خالی را هم تحمل می‌کند
اگر a عرض بخش پر و b عرض بخش خالی باشد،
پس از اینکه مقدار حداکثر تنش را از ($\frac{F}{C/\alpha}$)
باید آن را در نسبت ($\frac{a+b}{a}$) ضرب کنیم

Chapter II – Spillways

سرریز سازه‌ای است که صرفاً برای جلوگیری از سیلاب‌های غیرمطلوب ساخته می‌شود. این سیل‌ها ناخواسته از روی سرریز عبور می‌کنند. در غیر این صورت از روی سد خواهد گذشت و خرابی‌هایی به بار خواهد آورد.

Purpose of Spillways :

- Discharge the excess river flow (رهاسازی آب مازاد رودخانه)

Type of Spillways :

- Overflow Spillways
- Side channel Spillway
- Shaft Spillway
- Chute Spillway
- Box Inlet Spillway

▸ انتخاب نوع سرریز به عوامل زیر بستگی دارد:

– Kind of Dam	نوع سد
– Design Discharge	دبی طراحی
– Topography	توپوگرافی
– Nature of Foundation	شرایط فونداسیون

سرریزها پرهزینه‌ترین سازه‌های جانبی سد هستند. ممکن است هزینه ساخت آن‌ها از خود سد هم بیشتر شود!

▸ Preliminary Consideration (ملاحظات اولیه)

www.ttnar.ir

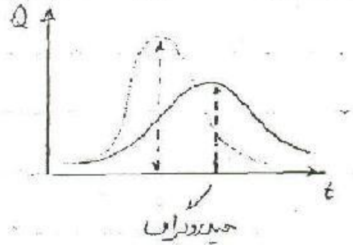
(ii) Selection of Design Discharge

مهم‌ترین کلید در طراحی سرریز، انتخاب دبی طراحی می‌باشد.

انتخاب این دبی بسیار حساس است چون دورهٔ بازگشت این دبی نشان دهندهٔ ریسکی است که خطر خرابی سد را پذیرفته‌ایم.

درگذشته برای طراحی سرریز، بیشترین دبی را که احتمال وقوع آن ناچیز بوده در نظر می‌گرفتند که سبب ساخت سرریزهایی با هزینهٔ بسیار زیاد شد.

بعدها مشخص شد که با عبور سیلاب از سرریز دبی پیک کاهش می‌یابد.



⇐ حتی با در نظر گرفتن بیشترین دبی ورودی دبی عبوری از سرریز کمتر از این مقدار است.

اگر اطلاعات بالادست سد در اختیار باشد می‌توان وقوع سیلاب قبل از رسیدن به سد را پیش‌بینی نمود و ارتفاع آب در مخزن را همیشه بالا نگهداشت و در مواقع خطر مخزن را خالی نمود. (سیستم‌های هشدار سیل)

ولی اگر اطلاعات بالادست را نداشته باشیم مجبوریم همیشه ارتفاع آب در مخزن را پایین نگه داریم تا ریسک خرابی سد برای وقوع سیلاب کاهش یابد.

⇐ چون حجم مخزن با توان 3 با ارتفاع آب پشت آن ارتباط دارد بنابراین حجم آب ذخیره شده در مخزن همیشه کمتر از حد مطلوب خواهد بود.

بنابراین امروزه بخشی از دبی پیک را از طریق سیستم‌های هشدار سیل و کاهش ارتفاع آب در مخزن کنترل می‌کنند و بخش دیگر را بر عهدهٔ سرریز می‌گذارند.

⇐ دبی پیک طراحی سرریز کاهش می‌یابد و هزینه کمتر می‌شود.

اجزای مختلف سرریز الزاماً برای یک دبی مشخص طراحی نمی‌شوند مثلاً سرریز اصلی که دبی از روی آن عبور می‌کند برای دبی 10000 ساله طراحی می‌شود ولی حوضچهٔ آرامش برای دبی 100 ساله.

چون طراحی حوضچه آرامش هزینه زیادی را در بر ندارد و در نظر گرفتن احتمال چهار بار خرابی آن در طول عمر سرریز بهتر از در نظر گرفتن دبی 10,000 ساله برای طراحی آن است.

(ii) Evaluation of tail water Rating Curve

یکی از پارامترهای مهم، وضعیت سطح آب در پایین دست است. تغییرات تراز سطح آب به ازای دبی های مختلف برای طراحی سرریز مورد نیاز است. که به آن منحنی های دبی - اشل گفته می شود.

$$Q = \frac{AR^{2/3}S^{1/2}}{n}$$ رابطه مانینگ

رابطه بین دبی و عمق را به ما می دهد.

این رابطه در شرایط خاصی صدق می کند. (مقطع و شیب طولی باید ثابت باشد و در عمق نرمال، دبی محاسبه می شود. این شرایط الزاماً برای یک رودخانه طبیعی صدق نمی کند ولی برای تخمین اولیه مناسب است)

در پایین دست سد ممکن است پل یا چیز دیگری وجود داشته باشد که مقطع را تنگ تر کند، باید این عوارض را در نظر بگیریم.

(iii) Spillway Layout (جانمایی سرریز)

سرریز یک سری ضوابط و ویژگی های وظیفه ای مشخص دارد که باید رعایت شوند. مثلاً اگر در پایین دست نیروگاه داشته باشیم، سرریز باید در جایی باشد که دور از نیروگاه باشد.

اگر سد خاکی داشته باشیم نباید سرریز را بر روی سد قرار دهیم. چون سرریز یک سازه صلب بتنی است ولی سد دارای مصالح نرم است. بنابراین نیروهایی که سرریز بر تکیه گاه خود وارد می کند سبب خرابی سد خواهد شد.

(iv) Hydraulic and Structural Design

طراحی سازه ای و هیدرولیکی

www.ttnar.ir