بسمه تعالی

جزوه

یناهای آبی

دانشگاه

تهران

استاد

دکتر منتظری

۲۳

سازه‌های آبی

• مرجع

- Hydraulic Structures , C.D. Smith

• سرفصل‌های درس

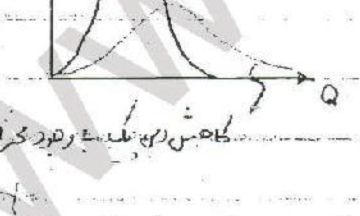
سدهای مخزنی	I) Storage Dams
سرریزها	II) Spillings
سیستم‌های تخلیه کننده	III) Outlet Works
دریچه‌ها	IV) Gates
سیستم‌های انحراف	V) Diversion Works
سازه‌های آبشاره‌ای	VI) Drop Structures
سازه‌های سنگی	VII) Stone Structures
سیستم‌های انتقال آب	VIII) Conveyance Structures
هیدرولیک کالورت‌ها	IX) Culvert Hydraulics

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 طور قابل توجهی شدت (دبی ورودی) را کاهش دهد.



سطح زیر منحنی = حجم

سطح زیر دو منحنی باید برابر باشد

بخش کشاورزی در ایران، بزرگترین مصرف کننده آب می باشد. 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.

تامین آب شهری و یا صنعتی هدف بسیار جدی است مثل سدهای لتیان، لار و سد کرج.

→ Types of Storage Dams

1) Concrete Dams
  - Solid Concrete { Gravity / Arch
  - Hollow Concrete
  - Buttress Dams (نگهدارنده _ بتنی پایه‌دار)

2) Rockfill Dams

3) Earthfill Dams

4) Timber and Steel Dams

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

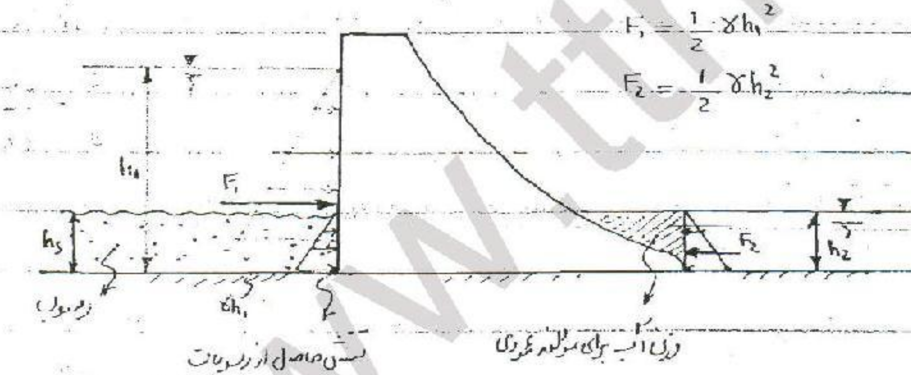
باید اطمینان حاصل کنیم که آب موجود در منطقه برای تأمین هدف ما از ساخت سد کافی باشد و تغییری در دبی رودخانه و حجم آب مناطق مسکونی موجود در منطقه مورد نظر ایجاد نمی‌شود.

سد باید در جایی انتخاب شود که دارای دره عمیق باشد سنگ بستر آن هم برای ایجاد دریاچه مناسب برای سد و هم ایجاد سازه مناسب باید باشد (بنا کردن یک سد و ایجاد کردن آن نیرو و تنش‌های زیادی به اعماق 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)

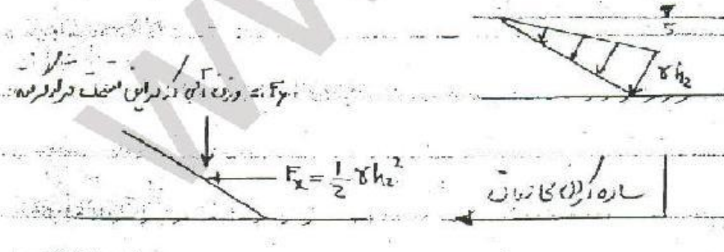
Gravity Dams (سدهای وزنی)

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.

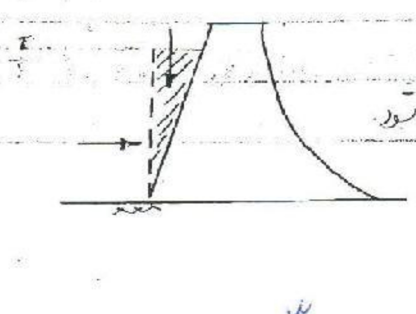
چون صرفاً برای ایجاد وزن است و کار مهم سازه‌ای انجام نمی‌دهد



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



γh_2
F_y = وزن آبی که در این مثلث قرار گرفته
$F_x = \frac{1}{2}\gamma h_2^2$
سازه‌های کمانی



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

www.ttmar.ir

همچنین رودخانه در جریان دارای یک توان حمل و انتقال رسوب می باشد و در نزدیکی سد این توان کاهش یافته و در نتیجه رسوب موجود در جریان ته نشین می شود و در نتیجه ارتفاعی از مخزن از رسوب پر می شود. حتی گاهی عمر سدها بر حسب مدت زمان پر شدن مخزن سد از رسوب تعیین می کنند.

- نیروی فشار رسوب با فرض رفتار سیال برای رسوبات

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

γ′: وزن مخصوص خشک رسوبات

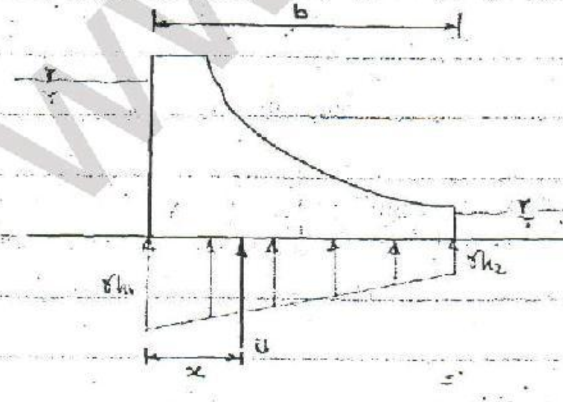
γ: وزن مخصوص آب

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

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

در حالتی که رسوبات دانه‌ای اند و نیروی محرکی بسته به سیال اعمال می کنند. بنابراین معمولاً از یک ضریب 0.5 _ 0.6 استفاده می کنیم.

نیروی حاصل از زیرفشار:

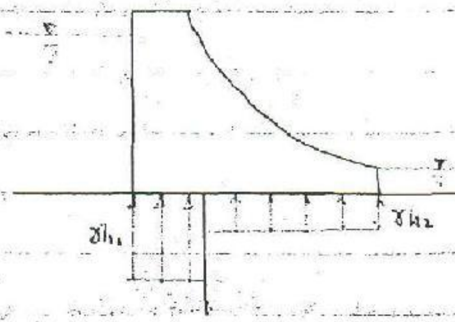


γh: نیرو و فشار ناشی از آبهای نشتی به پی و درزها و یا جریان آب زیرسطحی می باشد

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

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

www.tinar.ir

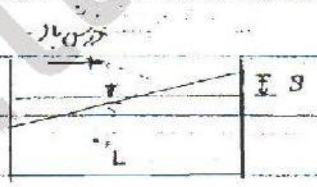


اگر از جریان زیرسطحی جلوگیری کنیم، طبق قانون پاسکال توزیع تنش یکنواخت خواهد شد.

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

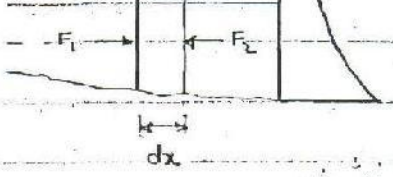
اگر نیروی زیرفشار بیشتر از نیرویی باشد که وزن المان سد باید تحمل کند، جدایی سد از پی رخ می‌دهد.

- Wind Effects
  - Setup
  - Waves



Setup

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



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

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

(V: سرعت باد)

τ: تنش برشی ناشی از باد

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

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

شیب سطح آب

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

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

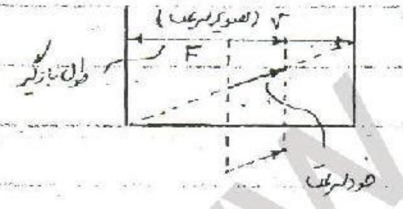
$$\Rightarrow \boxed{S = \frac{F \cdot V^2}{63000\, D}}$$

V: سرعت باد (Km/h)

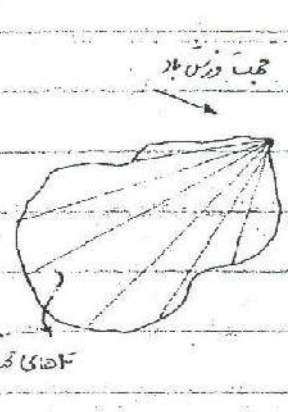
D: عمق بر حسب متر (m)

F: طول استخر (طول بادگیر)

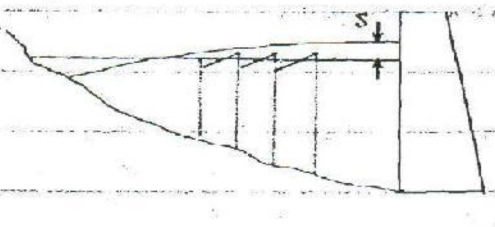
ممکن است انتخاب های زیادی برای F داشته باشیم، برای هر کدام که FV^2 بیشتر شود ملاک انتخاب قرار می‌گیرد.



باید V (سرعت) را روی F تصویر کنیم.



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



اگر تغییرات عمق داشته باشیم پروفیل به صورت منحنی در می‌آید. در المان های مختلف شیب های متفاوتی داریم. هر چه عمق کمتر باشد شیب بیشتر است.

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

تمرین) بررسی 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 که داشته بزرگتر است یا کوچکتر؟ S بدست آمده از فرمول چقدر ضریب اطمینان دارد؟

◂ موج‌های بزرگ نیرویی است که به سازه‌های آبی وارد می‌شود. مهم‌ترین یک پارامتر ارتفاع موج مشخصه (h_w) است.

h_w: Segnificant 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:

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

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

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

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

مقدار K از جدول صفحه 16 کتاب

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

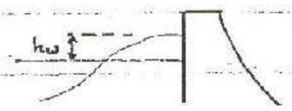
www.tinar.ir

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

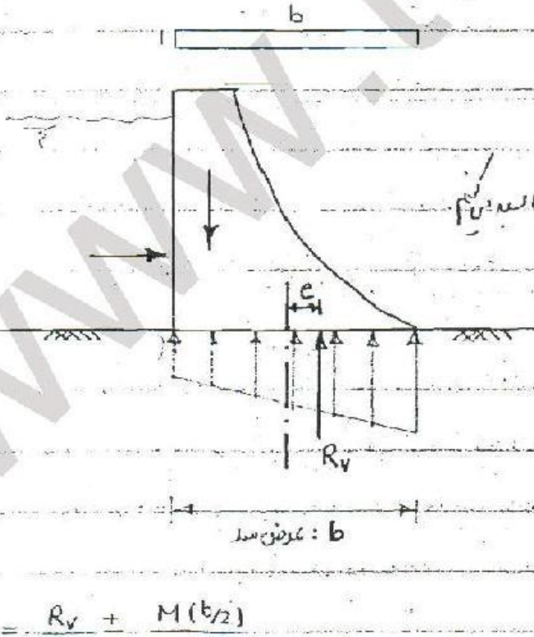
► باد با سرعت مشخص لزوماً با موج تشکیل نمی‌شود. در جدول شماره 4 صفحه 17 کتاب حداقل زمان وزش باد برای تشکیل موج بر حسب طول بادگیر و طول موج داده شده است.

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

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



► توزیع نیرو در فونداسیون



فرض شد در برابر عرض واحد محاسبه می‌کنیم

توزیع تنش باید به‌گونه‌ای باشد
بتن از زمین جدا نشود
← همیشه عکس‌العمل
فشاری باشد

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

خروج از مرکزیت نیروی عکس‌العمل

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

مجموع نیروهای قائم

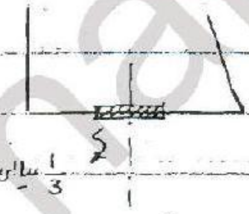
اگر زیرفشار داشته باشیم کسری از نیرو را زیرفشار تحمل می کند و اگر زیرفشار نداشته باشیم همه R_V را دانه های جامد تحمل می کنند .

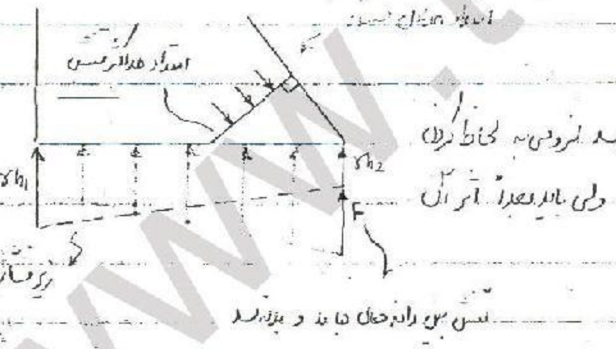
⇐ R_V همان مجموع نیروهای قائم است و لازم است مقدار نیروی زیرفشار را از آن کم کنیم .

f باید همه مثبت باشد $\Rightarrow 6e<b \Rightarrow \boxed{|e|<b/6}$

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

که منظور از کشش بین بتن و دانه های جامد خاک است


$\frac{1}{3}$ میانی


امتداد حداکثر تنش
امتداد خط لغزش
γh_1
γh_2
F
زیرفشار
تنش بین دانه های جامد و بتن است

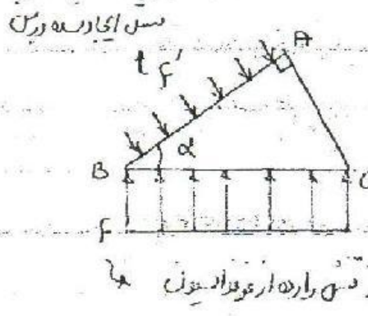
در محاسبه تنش های زیر بتن نیرویی به لحاظ کردن نیروی زیرفشار نیست ولی باید بعداً اثر آن را ببینیم

گاهی ممکن است فشار هیدرواستاتیک بیشتر از فشار کل باشد

⇐ مقطع در کشش از بتن به کشش می افتد

تنش کل با تنش دیگر را بدست آورده و مقایسه می کنیم تا ببینیم بتن به کشش می افتد یا نه .
تفاوت تنش ها برابر با سهم دانه های جامد است که نباید به کشش بیفتند .

پس از بدست آوردن توزیع تنش ، باید 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 سد تک طرح است . اگر برسد به تنش زیاد معمولاً با افزایش b تنش را از بین می بریم یعنی هندسه اولیه را تغییر می دهیم

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

⇐ f را با تنش مجاز باربری خاک مقایسه می کنیم که باید کمتر از تحمل خاک باشد .

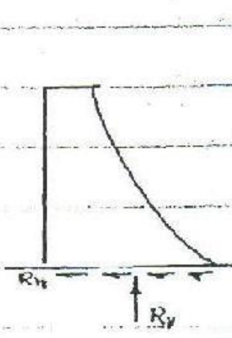
جدول شماره ۲ صفحه 27 کتاب تشکیلات مختلف زمین شناسی و تنش مجاز باربری آنها را ذکر کرده است .

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

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 سد و زیر سد بتن

Rock (ساختار سنگی) $f = 0.7$

ضریب اطمینان برای درگیری بند و فونداسیون اعمال می‌کنیم.

-۲- سیستم اصطکاکی $R_H < \frac{f \cdot R_V}{S_F}$

ضریب اطمینان $S_F = 2$

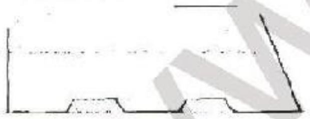
$f = tg\,\varphi$ ⇐ زاویه اصطکاک داخلی دانه‌ها ($\varphi = 20 \sim 35°$)

R_H مجموع نیروهای افقی

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

⇐ در محاسبه R_V باید نیروی uplift را هم در نظر گرفته شود

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



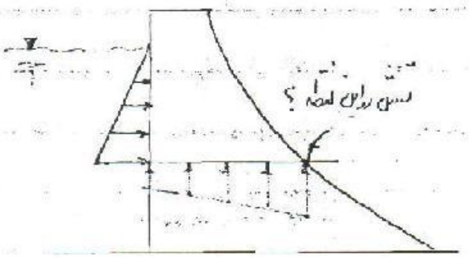
گاهی در پی بتن شیاربندی سنگ درگیر می‌کنند
در کف بند شیارهایی مانند روبرو ایجاد
می‌کنند تا اصطکاک بین آنها افزایش یابد.

◄ برای طراحی بند 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

(بند می‌تواند به مکانیزم‌های مختلف مستقلاً بررسی شود)

www.ttmar.ir

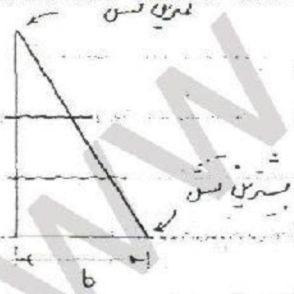


برای بدست آوردن تنش در نقطه نشان داده شده باید مطابق شکل مقطع بزنیم. قسمت بالائی سد می‌شود و تنش حداکثر را در آن نقطه بدست آورده و بر cos زاویه بیرون‌الطرف تقسیم کرده و تنش را محاسبه می‌کنیم.

برای طراحی می‌توان سد را به لایه‌های مختلف (مثلاً ۵ متری) 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

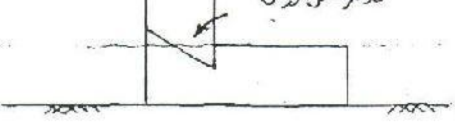
این طرح اقتصادی‌تر است ولی چون اجرای قوس مشکل است بدنه سد را در پایین دست مسطح می‌سازند.



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

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

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



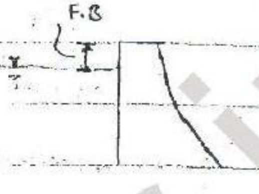
به دلیل تغییر ناگهانی مقطع، حداکثر تنش برشی در مقطع نشان داده شده رخ می‌دهد.

Free Board (F.B)

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

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

در اثر موج جهش آب در پشت سد بالا می‌آید



سدهای بتنی $R = 1.5\, h_w$ (مقادیر R در روابط صفحه 16)

سد خاکی $h'_w = 1.6\, h_w$

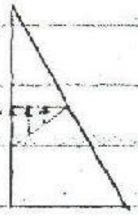
برای سدهای خاکی باید توجه بیشتری کنیم

چون نباید مطلقاً اجازه دهیم که آب از سد ... احتمال ریزش آن زیاد است.

مجبوراً در نتیجه در رابطه R از h'_w استفاده می‌کنیم.

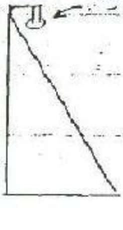
→ Upstream Flare

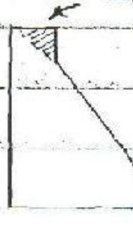
در این بخش نگرانی ما ایجاد تنش در پی است و این که هنوز آنالیزی انجام نشده است.



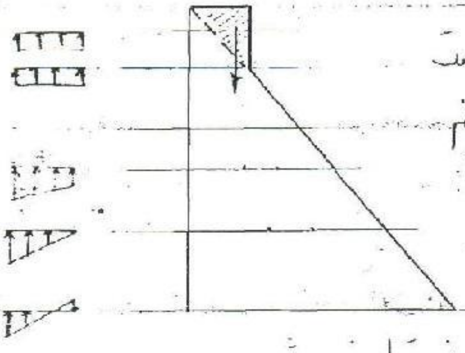
خروج از مرکزیت $\frac{1}{6}$ است و محل آن دقیقاً در مرز $\frac{1}{3}$ بالادست است

⇐ وجود هر زاویه‌ای ممکن است موجب ایجاد تنش زیاد گردد.





www.tinar.ir



فرض می‌کنیم شکل سد مثلثی است

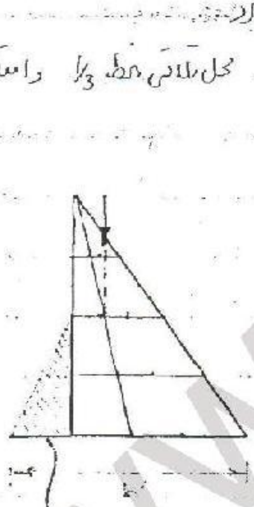
و آن مقدار بتن را اضافه می‌کنیم

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

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

1/3 ها را در هر مقطع مشخص کرده و به هم وصل می‌کنیم. محل تلاقی خط 1/3 با امتداد نیرو مقطعی است که از آن به بعد کشش داریم

← بنابر این تمهیداتی 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 پی سد وارد می‌شود.

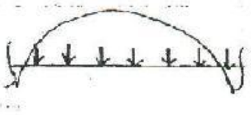
این اساس طراحی سد وزنی است. سد وزنی را در جایی می‌سازیم که پی خیلی عریض و گسترده باشد.

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

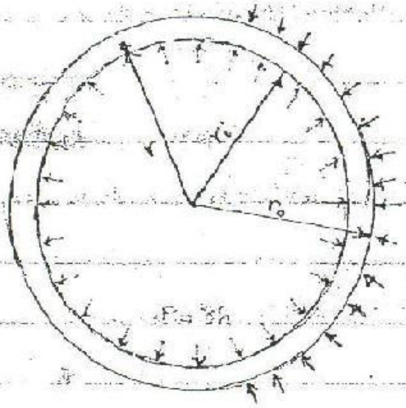
ایده‌ای برای انتقال بار به تکیه‌گاه‌ها در حل مشکل خمش، ساخت سد به صورت قوسی است

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

در سد قوسی، فونداسیون هم می‌تواند بار را تحمل کند ولی عمده بار توسط عملکرد 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.

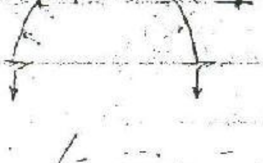
تنش در نقاط روی دایره‌ای با شعاع ثابت، مساوی خواهد بود

(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 دیوار مخزن خیلی نازک باشد $\Rightarrow$ $\boxed{f = \frac{p\,r}{t}}$

(این رابطه مبنای کارها برای طراحی اولیه بدنه سد قوسی است)



دیواره مخزن تنش کشش وارد می‌شود

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

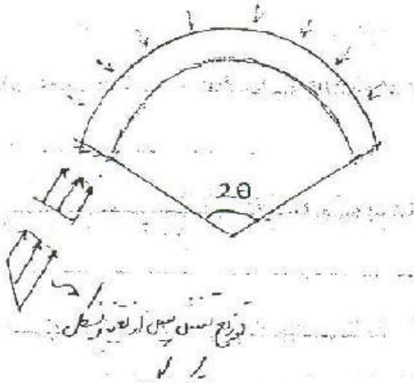
می‌گفتیم روابط بدست آمده برای این مخزن صادق است با این تفاوت که بدنه در فشار کار می‌کند.

www.ttrar.ir

◄ سد قوسی هم شبیه سد ... 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 نیروی عمود بر صفحه وارد می‌کند.



روابط در کشش، همان است در ...

رفتار سیستم مخازن، مانند بیشتر ...

سد قوسی است.

چون بیشتر تنش‌ها ... آنها فشاری است، کاملاً صلب نیستند و ممکن است در اثر بار وارده به سمت خارج حرکت کنند.

← تنشی که در سد ایجاد می‌شود با تنش محاسبه شده در مخازن متفاوت می‌باشد. بنابراین از یک ضریب K که مقدارش بیش از 1 است استفاده می‌شود.

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

مقدار K از جدول شماره 19 صفحه 34 کتاب برحسب ... بدست می‌آید.

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

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 هندسه 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.

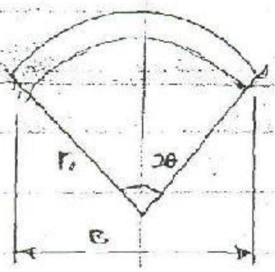
◄ طبق تجربیات بدست آمده نشان داده شده که ساخت سد یک قوسی طرح تکیه‌ای نیست. با استخراج شکل مناسب سد قوسی ... را با مقیاس مدل کرده و آن را از پلاستیک

www.ttmar.ir

می‌شکنند و آب را پمپ می‌کنند می‌ریزند . در اثر نیروی هیدرواستاتیک ، این لاستیک شکل خاصی 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 : $L = 2\theta \cdot r_0$

(برای سادگی می‌نویسیم : $K=1$)

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

f تنش مجاز

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

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

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

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

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

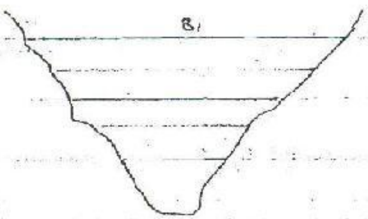
$$\frac{dA}{d\theta} = 0 \Rightarrow \theta = \frac{1}{2}\tan\theta \Rightarrow \boxed{\theta \quad 0.37\pi}$$

⇐ بنابراین زاویه ۱۳۳ درجه حداقل حجم مقطع را خواهیم داشت. (مستقل از عرض دره و مقدار حجم و ارتفاع است)

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

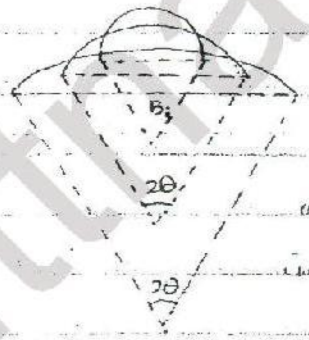
⇐ در هر ارتفاعی باید زاویه مرکزی ثابتی داشته باشیم. در نتیجه در ارتفاع‌های مختلف، شعاع‌های متفاوتی داریم: در پایین شعاع کم و در بالا شعاع، زیاد می‌شود.

در جایی که دره تنگ می‌شود می‌توان دره را بزرگی تکیه‌گاه حساب کرد.



B: عرض دره

H: ارتفاع سد



اگر $\frac{B}{H}<10$

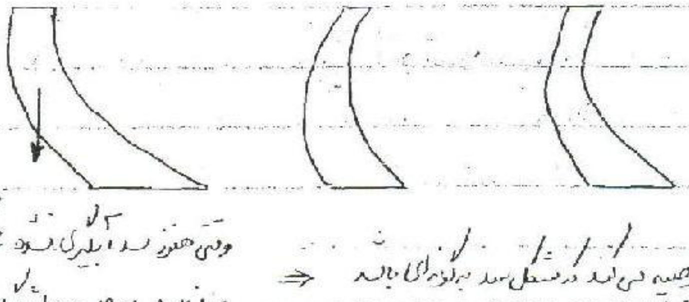
باشد ساخت سد قوسی

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.

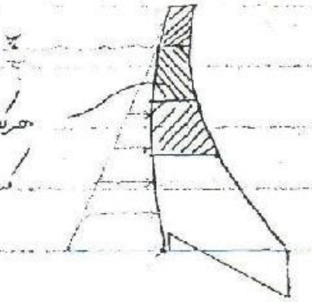
⇐ آئین‌نامه زاویه 120° ـ 110 را توصیه می‌کند.

⇐ ابتدای سد را می‌توانیم در هر مقطعی در جهت عمودی جابجا قرار دهیم. این انتخاب هندسی باعث ایجاد اشکال مختلف خواهد شد.



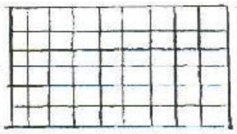
وقتی هنوز سد آبگیری نشده خالی است وزن سد موجب واژگونی آن گردد. ⇐ آئین‌نامه توصیه می‌کند در مقطع سد برآمدگی‌ای باشد که بدون آبگیری هم سد، پایدار بماند.

تحلیل بار وارد بر پی

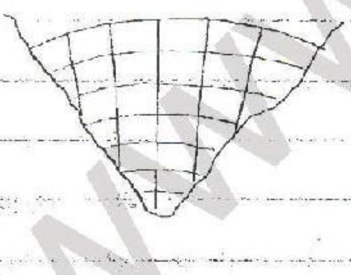


هر کدام از این المان ها، نوارهای دایره ای هستند که بار را به تکیه گاه منتقل می کنند.

بنابراین کار برای توزیع بار در پوسته های دو بعدی این است که توزیع بار را به گونه ای انجام دهیم تا تغییر شکل نقطه ها به وسیله تیرهای افقی و قائم برابر شود.



توزیع بار بین تیرهای افقی و قائم



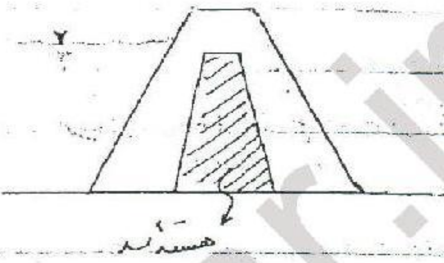
در سد دو قوسی هم همین توزیع بار در پوسته های دو بعدی را انجام می دهیم تا سهم تیرهای افقی و قائم تعیین شود و با استفاده از آن، میزان بار وارده به فونداسیون را بدست می آوریم.

در این حالت کمی از بار بدنه به پی وارد می شود ← طرح اقتصادی خواهد شد.

www.ttmar.ir

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 ویژگی مقاومت از خودشان نشان می‌دهد:

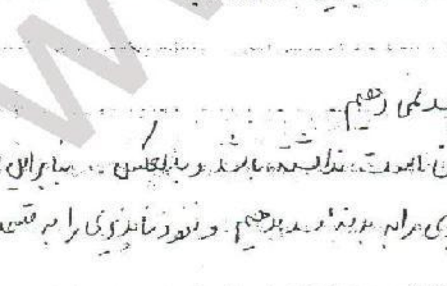
۱) چسبندگی ۲) زاویه اصطکاک داخلی

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.

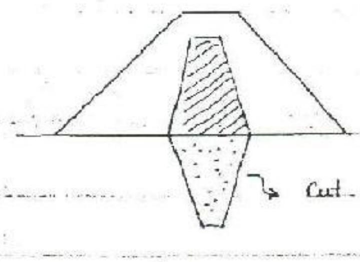
← نقش آب‌بندی را به بدنه سد می‌دهیم.

خاکی که نفوذپذیری پایینی داشته باشد، لزوماً باربری خوبی ممکن است نداشته باشد و بالعکس. بنابراین سعی می‌کنیم بدنه سد را از مواد مختلفی بسازیم. و باربری را به بدنه سد بدهیم و نفوذناپذیری را به قسمت دیگر.

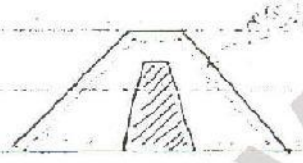


هسته سد ممکن است اشکال مختلفی داشته باشد. وظیفه آب‌بندی سد بر عهده هسته رسی خواهد بود.

⟵ در زیر پی سدهای خاکی هم مشکلاتی داریم و آن ، نفوذ آب در زیر سد است . (وجود زیرفشار)
بنابراین دیوارهایی به نام cut off در زیر سد می‌سازیم که به هسته متصل می‌شوند.



⟵ از مشکلات دیگری که در سدهای خاکی هم است ، تغییر شکل‌هایی است که در دراز مدت اتفاق می‌افتد ... با افزایش بار ، فشرده شدن دانه‌های خاک رخ داده و پدیده تحکیم اتفاق می‌افتد . پدیده تحکیم مثبت است چون زاویه اصطکاک داخلی را افزایش داده و باربری بدنه سد بیشتر می‌شود.

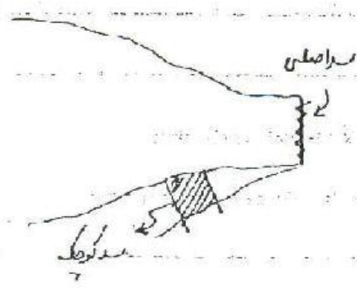


تحکیم را در خاک زیر سد هم داریم . ممکن است تحکیم در همه نقاط زیر سد یکسان نباشد که اختلاف نشست‌ها سبب ایجاد ترک در بدنه سد شده و آب از بدنه سد نفوذ خواهد کرد.

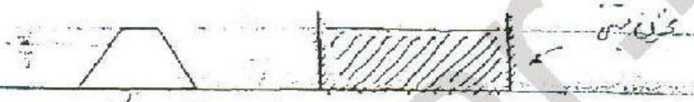
⟸ خود تحکیم پدیده مثبتی است ولی ایجاد نشست‌های غیرهمگون و ترک‌ها ایجاد مشکل خواهد کرد.

نکته دیگر این است که پس از تحکیم ، ارتفاع سد کاهش می‌یابد ، باید این نشست‌ها 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 می‌سازیم . اگر ارتفاع آب تا تراز سد بالا بیاید این سد خراب می‌شود و آب از طریق مخزن مستطیلی بتنی خارج می‌شود و آب تا تراز کف مخزن پایین می‌افتد
⟸ از عبور آب از روی سد اصلی ممانعت می‌شود.



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 خاکی دوباره
ساخت.



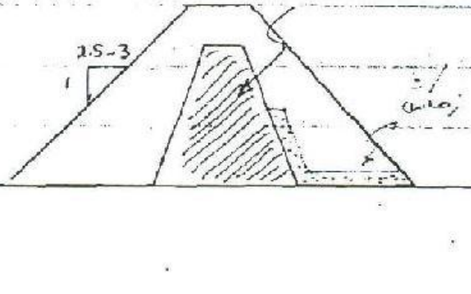
(مقطع سد خاکی)

[illegible] در مخزن بتنی سد خاکی ساخته شود. چون اگر بسته باشد، برای عبور آب از مخزن باید یک مجرای تأمین شود تا دبی زیاد از طریق مخزن خارج شود.

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

از سرریز پایینی مخزن هم می‌توان استفاده نمود چون ما می‌خواهیم از ظرفیت زیادی در پشت سد استفاده کنیم. در این صورت قبل از پر شدن مخزن، آب خارج می‌شود.
ولی با وجود سد خاکی به خاطر شکستن آن به طور ناگهانی آب تخلیه می‌شود و نیازی به سرریز به طور مشخص نداریم.

◀ هرچه بدنه سد خشک‌تر باشد، پایداری آن بیشتر است. در نتیجه برای اینکه مطمئن شویم بدنه 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 منحنی از پایین بدنه سد عمیق نیست و پایداری کمتری دارد. در نتیجه طراح مجبور می‌شود از مصالح گرانتر یا خاک بیشتری استفاده کنند و علاوه بر آن فشار منفذی هم خواهیم داشت که موجب کاهش اصطکاک داخلی دانه‌های خاک و کاهش مقاومت برشی بدنه سد خواهد شد.

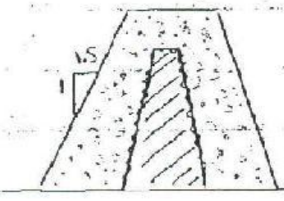
مانند ذکر فشار در سد درین

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

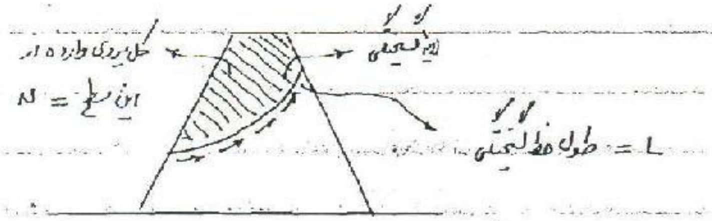
چون همیشه در طول سد آب وجود دارد در نتیجه قراردادن زهکش در اینجا مناسب نیست. چون هزینه زیادی برای زهکش خرج می‌کنیم و مجبور می‌شویم حجم زیادی از آب را از طریق زهکش کنترل کنیم و آب ذخیره شده در پشت سد را از دست می‌دهیم. علاوه بر اینکه قراردادن زهکش هیچ سودی هم نخواهد داشت.

- سد سنگریزه‌ای

چون امکان دارد بدنه سد از سنگریزه باشد و خیلی نفوذپذیر — ولی هسته همچنان نفوذناپذیر است. در حقیقت مقاومت سنگ، مجموعه پایداری می‌سازیم که فقط هسته نفوذناپذیر را محافظت کند. شیب این سد نسبت به سد خاکی بیشتر است چون مقاومت برشی آن بیشتر است.



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



$S.R = N \cdot tg\varphi + C \cdot L$ (مقاومت در برابر لغزش دیوار)

Sliding Resistance

◁ طول سد یعنی (L) با ارتفاع سد متناسب است و به طور خطی با آن تغییر می کند.

(با افزایش ارتفاع سد در شکل مشابه برده شده 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.

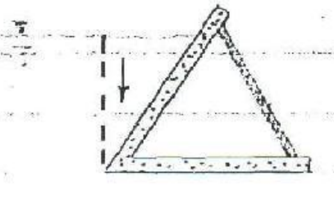
تمرین) اگر یک سد کاملاً بتنی داشته باشیم و یک سد کاملاً سنگریزه ای، با افزایش ارتفاع سد

که لازم است شیب سدها تغییر کند؟ چرا؟

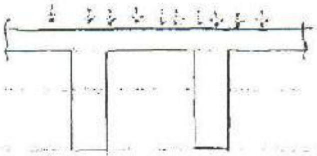
(در سد بتنی شیب ملایم تر می شود ولی در سد سنگریزه ای شیب مستقل از ارتفاع است).

→ Buttres Dam سد پایه دار

این سدها از نوع سدهای وزنی 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 معین آن را نگهداری می کنند.



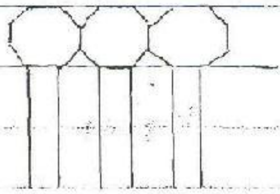
حجم مصالح مصرفی تقریباً $\frac{1}{6}$ سد وزنی است.



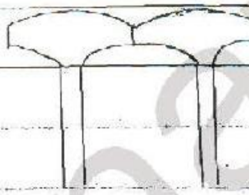
در این حالت به علت اتصال پایه‌ها، تنش اضافی ایجاد می‌شود

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

Diamond Head (شکل الماسی)

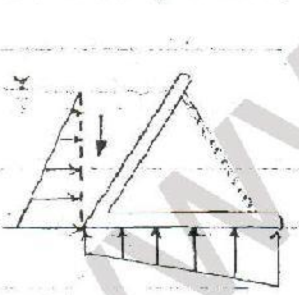


Round Head



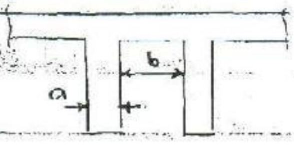
در این حالت هم تنش‌های اضافی ایجاد شده ناچیز است

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 کاربرد مقدار حداکثر تنش (در آن) $(\frac{f}{C'\alpha})$ 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. اگر این مازاد آب از روی سرریز عبور نکند، 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

▶ این ۵ 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)

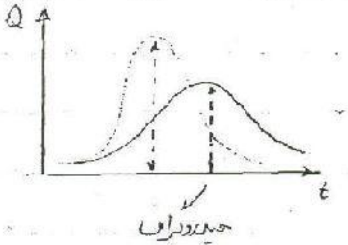
(ii) Selection of Design Discharge

مهم‌ترین کار در طراحی سرریز، انتخاب دبی طراحی می‌باشد.

انتخاب این دبی بسیار حساس است چون دورهٔ بازگشت این دبی میزان تعهد ما را بیان می‌کند که خطر خرابی سد را پذیرفته‌ایم.

در گذشته 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 مخزن 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 نگه داشت 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.

اجزاء 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 خرابی حوضچه‌ی آرامش هزینه زیادی را در بر ندارد و درنظر گرفتن احتمال چهار بار خرابی آن در طول عمر سرریز بهتر از درنظر 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 بر اساس دبی های مختلف برای طراحی سرریز مورد نیاز است که به آن منحنی های دبی - اشل گفته می‌شود.

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

رابطه بین دبی و عمق را به ما می‌دهد.

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

در پایین دست ممکن است پل یا چیز دیگری وجود داشته باشد که مقطع را تنگ‌تر کند، باید این عوارض را درنظر بگیریم.

(iii) Spillway Layout (جانمایی سرریز)

سرریز یک سری ضوابط و ویژگی‌های وظیفه‌ای 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 به تکیه‌گاه خود وارد می‌کند سبب خرابی سد خواهد شد.

(iv) Hydraulic and Structural Design

طراحی سازه‌ای و هیدرولیکی