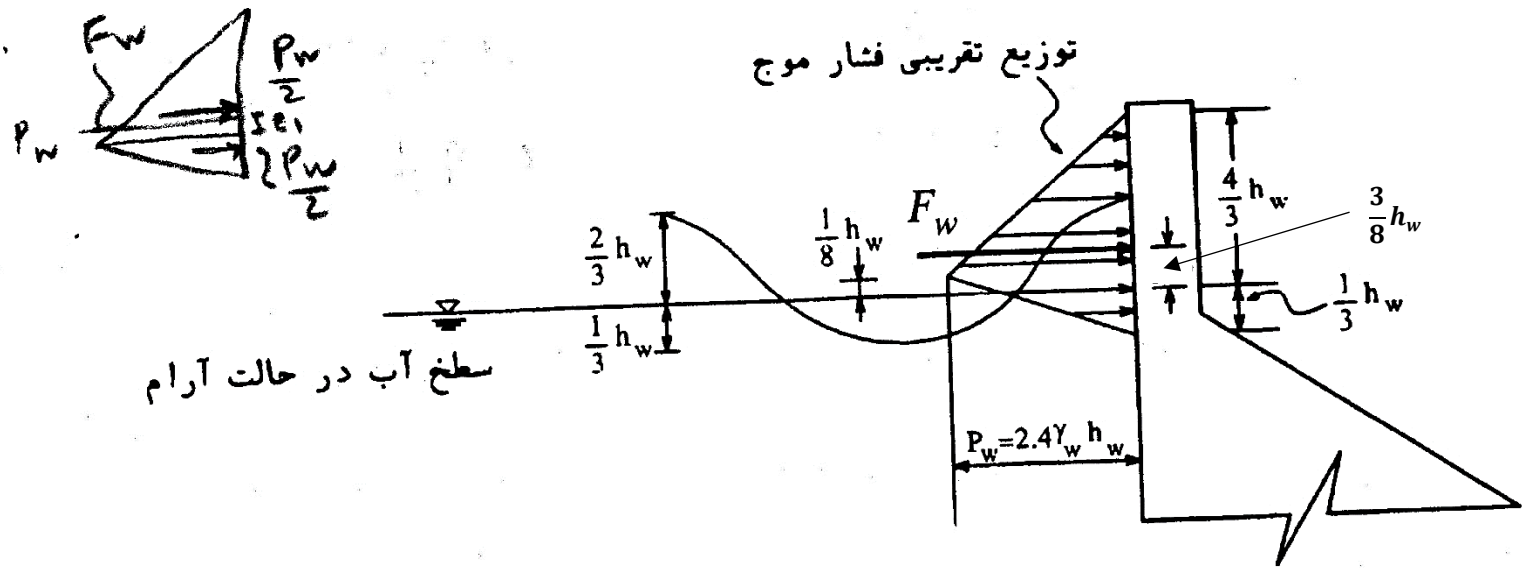
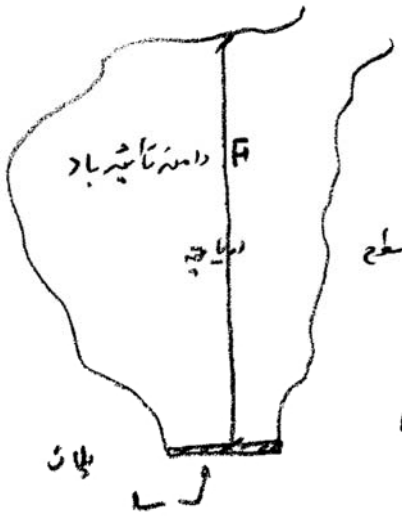


$$F_w = \frac{P_w}{2}\left(\frac{4}{3}h_w - \frac{1}{8}h_w\right) + \frac{P_w}{2}\left(\frac{1}{3}h_w + \frac{1}{8}h_w\right) = \frac{P_w}{2}h_w\left[\frac{4}{3} - \frac{1}{8} + \frac{1}{3} + \frac{1}{8}\right] = \frac{5}{6}P_w h_w$$

$$F_w = \frac{5}{6}h_w\left(2.4\,\gamma_w h_w\right) = 2\gamma_w h_w^2$$



محل اثر F_w : $\frac{3}{8}h_w$ بالای سطح آب

تعیین h_w (ارتفاع موج)

F : فاصله افقی و مستقیم دورترین نقطه از ساحل دریاچه در راستای سطح آزاد آب تا سد و در جهت عمود بر محور طولی سد

$F > 32\,km$: $h_w = 0.0322\sqrt{F.V}$

h_w بر حسب متر ، F بر حسب km ، V سرعت باد بر حسب $\frac{km}{h}$

$F \leq 32\,km$: $h_w = 0.0322\sqrt{F.V} + 0.763 - 0.271F^{\frac{1}{4}}$

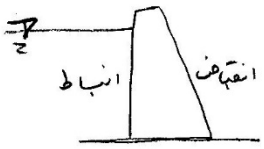
نیروی ناشی از یخ

در صورت یخ زدن سطح دریاچه، یخ نسبت به آب افزایش حجم دارد این افزایش حجم باعث ایجاد فشار و تنش در محل تماس یخ با سد می شود.

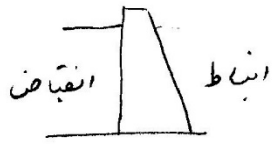
فشار یخ بستگی دارد به: ضخامت یخ، قابلیت اشکال پذیری دیواره سد، میزان شدت تغییرات درجه حرارت هوا که اغلب سدهای کشور ما می توانند از فشار یخ صرفنظر کرد.

ضابطه IS:6512-1984 فشار معادل $25 \frac{t}{m^2}$ در سطح تماس یخ با سد پیشنهاد می کند.

نیروی ناشی از تغییر درجه حرارت (دما)



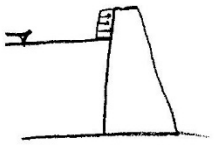
زمستان



تابستان

انبساط و انقباض ناشی از تفاوت دما در دو سوی سد می تواند تنش های حرارتی ایجاد کند که خود باعث افزایش عرض ترک ها و نفوذ آب به ترک ها و سپس افزایش مجدد عرض ترک و در نهایت افزایش فشار بالا برنده (uplift) گردد.

نیروی باد در ناحیه ارتفاع آزاد می توان فشار یکنواخت باد را در نظر گرفت.



بارگذاری سدها

احتمال تأثیر همه نیروها در یک زمان، کم است.

مثال: اگر سیلاب طرح پشت سد قرار گیرد و سرریز با حداکثر دبی خود آب را خارج نماید، فشار هیدرواستاتیک وارد بر سد افزایش می یابد اما احتمال وقوع زلزله در این حالت بسیار کم است. (بر اساس نتایج آماری تقریباً همینطور است)

بارگذاری پیشنهادی USBR

۱- بارگذاری عادی (معمولی) USUAL

شامل تأثیر هم زمان بار رسوبات، نیروی هیدرواستاتیک آب در تراز زمان (تراز تاج سرریز)، نیروی زلزله، نیروی موج بالا برنده، فشار یخ و فشار پایاب. نیروی ناشی از تغییر دما

۲- بارگذاری غیر عادی (غیر معمول) Unusual

زمان طغیان رودخانه است.

همان نیروهای بارگذاری عادی، بدون نیروی یخ، به اضافه فشار هیدرواستاتیک در حداکثر تراز آب ← این بارگذاری مربوط

۳- بارگذاری فوق العاده (Extreme) شامل بارگذاری عادی به اضافه حداکثر منطقی نیروی زلزله

بارگذاری استاندارد هند (IS 6512-1984)

نوع A (شرایط مخزن خالی در زمان احداث سد) ← منطقا بارگذاری نشده سد

نوع B (عملکرد عادی سد) سطح آب مخزن در تراز نرمال، عمق پایاب در حالت معمول، نیروی بالابرنده معمول (افضل خشک)
(با اثر زهکش در صورت وجود)، بار مرده سد، بار رسوب، بار یخ

نوع C (شرایط وقوع سیلاب حداکثر) سطح آب مخزن در تراز حداکثر، عمق در دریچه‌های باز، عمق پایاب در حالت سیلابی
نیروی بالابرنده معمول (با اثر زهکش)، بار مرده سد، بار رسوب

نوع D ترکیب نوع A + زلزله

نوع E ترکیب نوع B و زلزله

نوع F نوع C با نیروی بالابرنده حداکثر (زهکش غیرمؤثر)

نوع G نوع E با نیروی بالابرنده حداکثر (زهکش غیرمؤثر)

تنش مجاز فشاری بتن (USBR)

تنش مجاز فشاری
- $\min\left\{\frac{\text{مقاومت ۲۸ روزه}}{F.S=3}\ ,\ 110\ \frac{kg}{cm^2}\right\}$ → بارگذاری عادی
- $\min\left\{\frac{\text{مقاومت ۲۸ روزه}}{F.S.=2}\ ,\ 160\ \frac{kg}{cm^2}\right\}$ → بارگذاری غیرعادی

تنش مجاز کششی بتن در کارهای سد معمولاً از مقاومت کششی بتن صرفنظر می‌شود با این حال مقدار تنش مجاز کششی

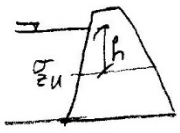
- 10.0 kg/cm² → بارگذاری عادی
- 15.0 kg/cm² → بارگذاری غیرعادی
- 5 kg/cm² → برای سدهای بزرگ

کشش

اگر تنش در بتن از تنش مجاز کششی بالاتر رود

ایجاد ترک می‌کند ← ضوابط محاسباتی برای وجود ترک اصلاح شود. برای پرهیز از این موضوع

یک مقدار حداقل برای تنش فشاری در بخش بالادست سد پیشنهاد شده است.



کمینه تنش فشاری لازم برای جلوگیری از ترک

$$\sigma_{zu} = k\,\gamma_w\,h - \frac{f_t}{F.S.}$$

مقاومت کششی بتن

ضریب زهکش
- $k = 0.6$ با وجود زهکش
- $k = 1.0$ بدون زهکش

وزن مخصوص آب

$F.S.$
- 3 بارگذاری عادی
- 2 بارگذاری غیرعادی
- 1 بارگذاری فوق‌العاده

مثال با فرض $f_t = 10 \frac{kg}{cm^2}$ ، برای بتن غیر عادی با فرض عدم وجود زهکش ، در عمق 8m زیر آب سطح زمین ، 80m

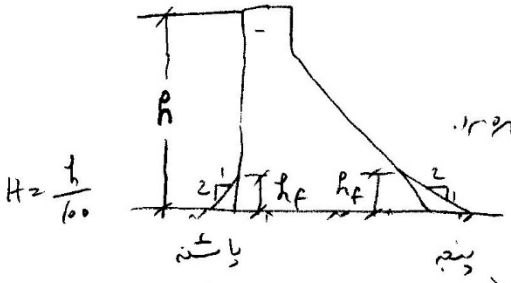
مقدار حد اقل تنش فشاری لازم برای جلوگیری از ترک را محاسبه کنید.

$$h=8m \quad \sigma_{zu} = k\gamma_w h - \frac{f_t}{F.S.} = 1\left(1\frac{t}{m^3}\right)(8m) \times \frac{m^2}{(100cm)^2} \times \frac{10^3 kg}{t} - \frac{10\frac{kg}{cm^2}}{2} = 0.8 - 5$$

$$\Rightarrow -4.2 \rightarrow \text{صفر}$$

$$h=80m \quad \sigma_{zu} = 1\left(1\frac{t}{m^3}\right)(80m) \times \frac{1m^2}{(100cm)^2} \times \frac{10^3 kg}{t} - \frac{10\frac{kg}{cm^2}}{2} = 8-5 = 3\ \frac{kg}{cm^2}$$

راه کاهش تنش در پاشنه و پنجه سد



می‌توان از ماسیچ (FiMet) برای کاهش تنش در نقاط پنجه و پاشنه استفاده کرد.

$$\rightarrow h_f = 6.5H - 1.1H^2 - 0.9$$

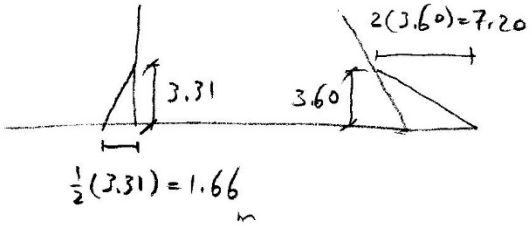
$$h_f = 6H - 0.658H^2 - 1.07$$

h_f: ارتفاع فک ماسیچ (m)، H: ارتفاع آب تقسیم بر 100

مثال با فرض ارتفاع آب برابر 80m مطلوبست h_f برای پنجه و پاشنه و طراحی ماسیچ

پاشنه $h_f = 6(0.8) - 0.658(0.8)^2 - 1.07 = 3.31\ m$

پنجه $h_f = 6.5(0.8) - 1.1(0.8)^2 - 0.9 = 3.60$



تنش مجاز برشی بتن

$$\text{تنش مجاز برشی بتن USBR} = \frac{\text{مقاومت برشی بتن}}{F.S.}$$

$$F.S. = \begin{cases} 3 & \text{ب.گ. عادی} \\ 2 & \text{ب.گ. غیرعادی} \\ 1 & \text{ب.گ. فوق‌العاده} \end{cases}$$

تنش مجاز فشاری پی ، در مورد پی ، عدم اطمینان بیشتری وجود دارد.

$$\text{تنش مجاز پی USBR} = \frac{\text{مقاومت فشاری بتن}}{F.S.}$$

$$F.S. = \begin{cases} 4 & \text{ب.گ. عادی} \\ 2.7 & \text{ب.گ. غیرعادی} \\ 1.3 & \text{ب.گ فوق‌العاده} \end{cases}$$

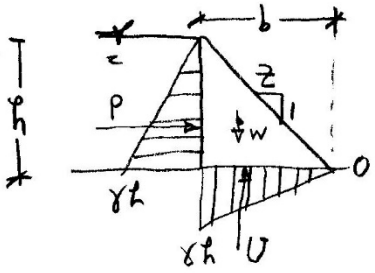
طرح مقدماتی سدهای وزنی

فرایند کلی طرح مقدماتی قبل از تهیه طرح اصلی ۱- برای بررسی امکان سنجی و مقایسه با سایر طرح‌ها (کمترین هزینه ساخت)

۲- طرح نهایی بر اساس طرح اولیه صورت می‌گیرد.

سنجش خاکریز و تکیه‌گاه سد باخرض ۳ نیرو : وزن سد ، فشار هیدرواستاتیک آب ، فشار بالا رونده

فقط انجام می‌شود



سنجش از دیدگاه تنش‌های برشی به شکل یک مثلث قائم‌الزاویه در نظر گرفته می‌شود

و فاقد ارتفاع آزاد و عرض تاج است

$$P = \frac{1}{2}\gamma h^2 \quad , \quad U = \frac{1}{2}\gamma h b \quad , \quad W = \gamma_c \frac{bh}{2} = \frac{\gamma_c}{2} z h . h$$

$$= \frac{\gamma}{2} z h . h$$

بدترین شرایط برای واژگونی : مخزن پر + فشار بالا رونده

با تکیه‌گیری حول نقطه O در این حالت داریم :

$$M_{\text{واژگونی}} = P\left(\frac{h}{3}\right) + U\left(\frac{2b}{3}\right)$$

$$= \frac{\gamma h^2}{2} \cdot \frac{h}{3} + \frac{\gamma h b}{2} \cdot \frac{2b}{3} = \frac{\gamma h^3}{6} + \frac{\gamma h b^2}{3}$$

$$\Rightarrow M_{\text{واژگونی}} = \frac{\gamma h^3}{6} + \frac{\gamma h z^2 h^2}{3}$$

رابطه y و b : $\frac{1}{z} = \frac{h}{b} \Rightarrow b = zh$

$$M_{\text{اسپاری}} = W\left(\frac{2b}{3}\right) = \gamma_c \frac{bh}{2}\left(\frac{2b}{3}\right) = \gamma_c \frac{b^2 h}{3} = \gamma_c \frac{z^2 h^2 . h}{3} = \gamma_c \frac{z^2 h^3}{3}$$

با مساوی قرار دادن لنگر واژگونی، لنگر اسپاری داریم :

$$M_{\text{واژگونی}} = M_{\text{اسپاری}} \Rightarrow \frac{\gamma h^3}{6} + \frac{\gamma z^2 h^3}{3} = \gamma_c \frac{z^2 h^3}{3} \Rightarrow \frac{\gamma}{2} = \frac{z^2}{1}(\gamma_c - \gamma) \Rightarrow z = \sqrt{\frac{\gamma}{2(\gamma_c - \gamma)}}$$

$\gamma = 1000\,g$, $\gamma_c = 2400\,g \Rightarrow z = 0.598$

با ثابت بودن h ، هرچه z افزایش یابد ، سد پایدارتر بیشتر خنثی می‌شود زیرا $\gamma_c \frac{z^2 h^3}{3}$ بیشتر از $\gamma \frac{z^2 h^3}{3}$ افزایش می‌یابد

با فرض $\gamma_w = 1000\ \frac{kg}{m^3}$ ، $\gamma_c = 2400\ \frac{kg}{m^3}$ داریم

$$z \geq \sqrt{\frac{\gamma}{2(\gamma_c - \gamma)}} = \sqrt{\frac{1000}{2(2400-1000)}} = \sqrt{\frac{1}{2(1.4)}} = 0.598 \Rightarrow b \geq 0.598\, h \approx 0.6h$$

بررسی امکان لغزش

$$\text{Sliding Factor (SF)} = \frac{\sum F_h}{\sum F_v} \leq \mu = 0.75$$

μ ضریب اصطکاک بین مصالح سد و زیرسازی است با فرض اینکه از بتن یا مصالح بنایی و زیرسد از مصالح بنایی یا سنگ‌چین

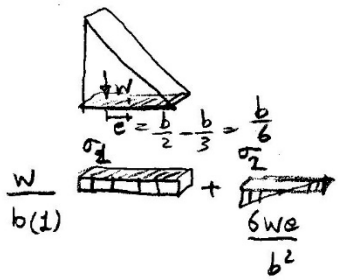
$\mu = 0.75$

$$\frac{P}{W - U} \leq 0.75 \Rightarrow \frac{\frac{\gamma h^2}{2}}{\frac{\gamma_c z h^2}{2} - \frac{\gamma z h^2}{4}} \leq 0.75 \Rightarrow \frac{\gamma}{z(\gamma_c - \gamma)} \leq 0.75 = \frac{3}{4}$$

$$z \geq \frac{4\gamma}{3(\gamma_c - \gamma)} = 0.952 \Rightarrow b \geq 0.952 h$$

برای جلوگیری از ایجاد تنش کششی در بحرانی‌ترین مکان (پاشنه سد) لازم است رابطه زیر برقرار باشد:

تنش کششی حاصل از نیروی آب + تنش کششی ناشی از نیروی بالابرنده +تنش فشاری ناشی از وزن سد ≥ 0



$$\sigma_2 = \frac{Mc}{I} \qquad M = W.e \;,\; c = \frac{b}{2} \;,\; I = \frac{1}{12}(1)(b^3)$$

$$e = \frac{b}{2} - \frac{b}{3} = \frac{b}{6}$$

$$\sigma_2 = \frac{(W.e)\left(\frac{b}{2}\right)}{\frac{1}{12}b^3} = \frac{6We}{b^2} \;,\; \sigma_1 = \frac{W}{b}$$

$$\frac{W}{b(1)} + \frac{6We}{b^2}$$

$$\sigma_{zu} = \sigma_{\max} = \frac{W}{b} + \frac{6We}{b^2} = \frac{W}{b}\left[1 + \frac{6e}{b}\right]$$

$$\sigma_{zu} = \frac{\frac{1}{2}\gamma_c h b}{b}\left[1 + \frac{6\left(\frac{b}{6}\right)}{b}\right] = \gamma_c \cdot h$$

بطور مشابه برای تنش ناشی از فشار بالابرنده

$$\sigma_1 = \frac{U}{b} \;,\; M = U.e$$

$$\sigma_{1zu} = -\frac{U}{b}\left(1 + \frac{6e}{b}\right) = -\frac{\frac{1}{2}\gamma h b}{b}\left[1 + \frac{6\left(\frac{b}{6}\right)}{b}\right] = -\gamma h$$

تنش ناشی از نیروی آب:

$$\sigma_{2zu} = -\frac{Mc}{I} = -\frac{M\frac{b}{2}}{\frac{1}{12}b^3} = -\frac{6M}{b^2}$$

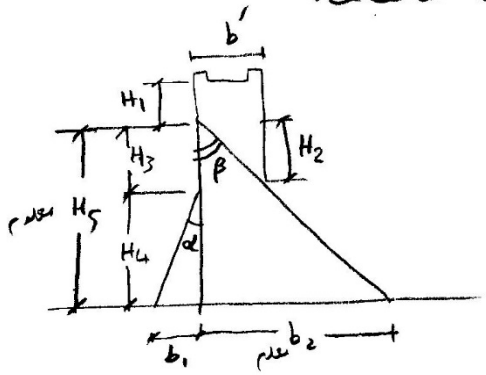
$$\sigma_{2zu} = -\frac{6}{b^2}\left[\frac{\gamma h^2}{2} \times \frac{h}{3}\right] = -\frac{\gamma h^3}{b^2} = -\frac{\gamma h^3}{z^2 h^2} = -\frac{\gamma h}{z^2}$$

$$\gamma_c h - \gamma h - \frac{\gamma h}{z^2} \geq 0 \qquad \gamma_c - \gamma \geq \frac{\gamma}{z^2} \Rightarrow z^2 \geq \frac{\gamma}{\gamma_c - \gamma} \qquad z \geq \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_c - \gamma}} = 0.845$$

$$b \geq 0.845\, h$$

نام سد تقریبا فوق معدوده $0.85h$ تا $0.95h$ را b مناسب،

تقصیح نیروی شوری



$$b = 0.55\sqrt{H_5}$$

$$b = \begin{cases} 0.15\, H_5 & \text{سد کوتاه} \\ 0.1\, H_5 & \text{سد بلند} \end{cases}$$

b معمولا: 6 – 12 m

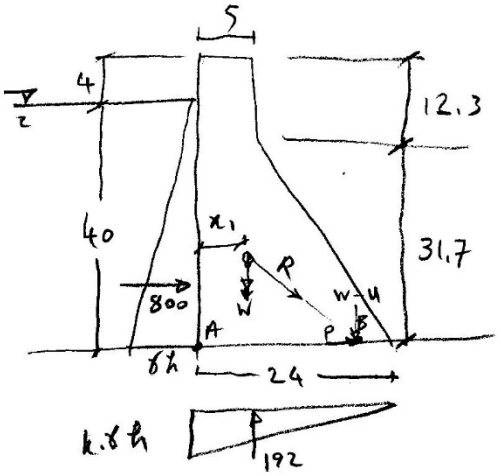
H_1 : حداقل 1m بالاتر از سطح

$$0 < \tan\alpha < 0.1 \;,\; \begin{cases} \tan\alpha + \tan\beta = 0.7 & \text{سد کوتاه و متوسط} \\ 0.8 < \tan\alpha + \tan\beta < 0.9 & \text{سد بلند} \end{cases}$$

مثال ۴-۱ در شکل نقشه پایدار سدرا بررسی نموده، سپس در صورت عدم پایداری حداقل عرض لازم b سرتاسر را با فرض ثابت بودن سایر مشخصات محاسبه کنید.

$\gamma_c = 2.48 \frac{t}{m^3}$ ، $\mu = 0.7$ ، $k = 0.4$

ضریب کاهش فشار زیر پایه سد



$$W = 2.48\left[5\times44 + \frac{(24-5)\times31.7}{2}\right] = 1292.452\ t$$

$$P = \frac{1}{2}\gamma h^2 = \frac{1}{2}(1)(40^2) = 800\ t \quad , \quad U = \frac{k\gamma h \cdot b}{2} = \frac{0.4(1)(40)(24)}{2} = 192\ t$$

$$U = \frac{1}{2}(k\gamma h)(b) = \frac{1}{2}(0.4\times1\times40)(24) = 192\ t$$

کنترل ایجاد تنش کششی در پاشنه سد

$$\sigma_1 = \frac{W}{b}\left(1+\frac{6e_1}{b}\right) \quad , \quad x_1 = \frac{5(44)\left(\frac{5}{2}\right) + \frac{1}{2}(31.7)(24-5)\left(5+\frac{24-5}{3}\right)}{5(44)+\frac{1}{2}(31.7)(24-5)} = 7.603$$

$$e_1 = \frac{24}{2} - x_1 = 12 - 7.603 = 4.397$$

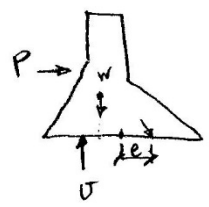
$$\sigma_{1_W} = \frac{1292.452\ t}{24\ m^2}\left[1+\frac{6(4.397)}{24}\right] = +113.04\ \frac{t}{m^2}$$

$$\sigma_{2_U} = -\frac{U}{b}\left(1+\frac{6e_2}{b}\right) = -\frac{192\ t}{24\ m^2}\left[1+\frac{6\left(\frac{24}{2}-\frac{24}{3}\right)}{24}\right] = -16\ \frac{t}{m^2}$$

$$\sigma_{3_P} = -\frac{6M}{b^2} = -\frac{6\left(800\times\frac{40}{3}\right)}{24^2} = -111.11\ \frac{t}{m^2}$$

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = -14.07 \frac{t}{m^2} < 0$$

می‌توان نشان داد که اگر محل اثر نیروها در $\frac{1}{3}$ میانی قاعده سد باشد، شکل تنش کششی حل می‌شود



$$M_O = +Pe_1 \oplus We_2 + Ue_3 = (W-U)e$$

مرکز سطح

$$\sigma_1 = \frac{M_O\, c}{I} = -\frac{(W-U)e\,\frac{b}{2}}{\frac{1}{12}b^3} = -\frac{6(W-U)e}{b^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{W-U}{b} \quad \Rightarrow \sigma_1 + \sigma_2 = -\frac{6(W-U)e}{b^2} + \frac{(W-U)}{b} = 0 \Rightarrow 6e = b$$

$$e = \frac{b}{6}$$

مرتبه b را چنان حساب کرد که فاصله B تا محل برآیند دقیقاً $\frac{2b}{3}$ شود.

با فرض b بیشتر از 5 متر $U = \frac{1}{2} k_0 h\, b = \frac{1}{2}(0.4 \times 1 \times 40)\, b = 8b$

$$W = 2.48\left[5\times 44 + \frac{(b-5)\times 31.7}{2}\right]$$

$$x_1 = \frac{5\times 44 \times \frac{5}{2} + \frac{1}{2}(31.7)(b-5)\left[5 + \frac{b-5}{3}\right]}{5(44) + \frac{1}{2}(31.7)(b-5)}$$

$$\sum M_B^{+} = 800\left(\frac{40}{3}\right) + 8b\left[\frac{2b}{3} - \frac{b}{3}\right] - W\left[\frac{2b}{3} - x_1\right]$$

$b = 25.96$ m

با قرار دادن x_1 و استفاده از سعی خطا داریم:

پایداری لغزشی

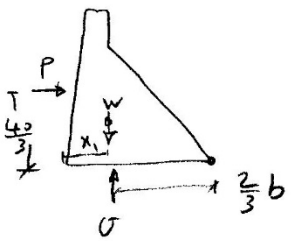
$$\frac{M \sum F_v}{\sum F_h} = 1 \qquad \frac{0.7\,[W-U]}{P} = 1$$

با قرار دادن مقادیر پارامتری W و U، $P = 800^t$ داریم: $b = 25.35$ m

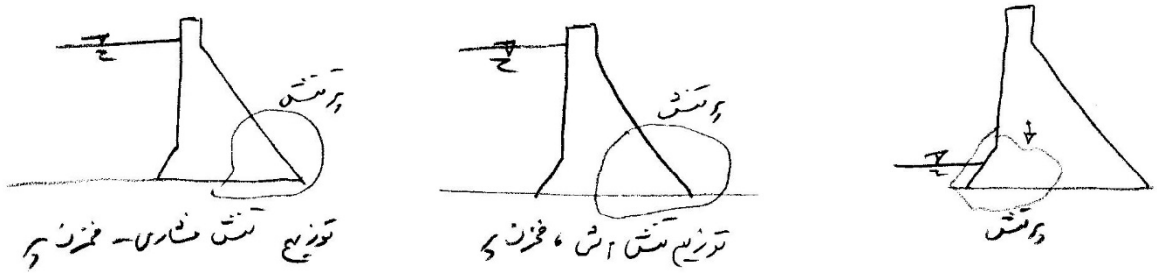
از بین دو مقدار b: 25.96 m، 25.35 m، درجهت اطمینان داریم $b = 25.96$ m

پایداری واژگونی:

$$F.S. = \frac{M_{\text{پایدار}}}{M_{\text{واژگونی}}} = \frac{W\,(b - x_1)}{800\left(\frac{40}{3}\right) + U\left(\frac{2}{3}b\right)} = 2.36 > 1.5 \quad \text{ok.}$$



چگونگی توزیع تنش در مقطع سدوزنی



توزیع تنش فشاری - مخزن پر | توزیع تنش آب، مخزن پر

با توجه به تنش های مقاومت در مقطع سد، مرتبه ای از بتن را با مقاومت متغیر نیز نام (هم منظور رعایت صرفه اقتصادی) استفاده نمود.