

بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی پی‌آبرفتی ساخت‌گاه سد مخزنی چپرآباد با نگرشی ویژه به مسئله آب‌بندی

قدرت برزگری، علی ارومیه‌ای: گروه زمین‌شناسی مهندسی،
دانشگاه تربیت مدرس

تاریخ: دریافت ۸۴/۱۲/۱۷ پذیرش ۸۶/۲/۱۵

چکیده

توجه به مسئله نشت زیر پی و انتخاب روش مناسب آب‌بندی، یکی از بخش‌های مهم در طرح‌های سدسازی به‌شمار می‌رود. بررسی این مسئله، ارتباط تنگاتنگی با ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی ساخت‌گاه دارد. سد چپرآباد، از نوع خاکی با هسته رسی و ارتفاع ۴۴/۵ متر از پی با ظرفیت مخزن ۱۲۷ میلیون مترمکعب است که در ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان ارومیه واقع در استان آذربایجان غربی در حال اجراست. ساخت‌گاه سد در قسمت بستر از رسوبات آبرفتی با ضخامتی حدود ۶۰ متر تشکیل شده است و تکیه‌گاه‌های آن روی سنگ‌های آهکی و شیستی با سن پرکامبرین و اینفراکامبرین قرار می‌گیرد. در این مقاله با بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی ساخت‌گاه، همچنین روش‌های مختلف آب‌بندی پی آبرفتی از جمله امکان استفاده از پرده و دیوار آب‌بند، پوشش آب‌بند، گودبرداری و استفاده از ژئوسینتتیک مورد بررسی قرار گرفته است. در این رابطه از نرم‌افزار Plaxis برای آنالیز تراوش و ارائه الگوی طراحی استفاده شده است. نتیجه بررسی‌ها نشان می‌دهد علی‌رغم مناسب بودن دیوار آب‌بند، به دلیل وجود لایه‌های روان‌گرا، استفاده از روش پرده آب‌بند اولویت بیش‌تری دارد.

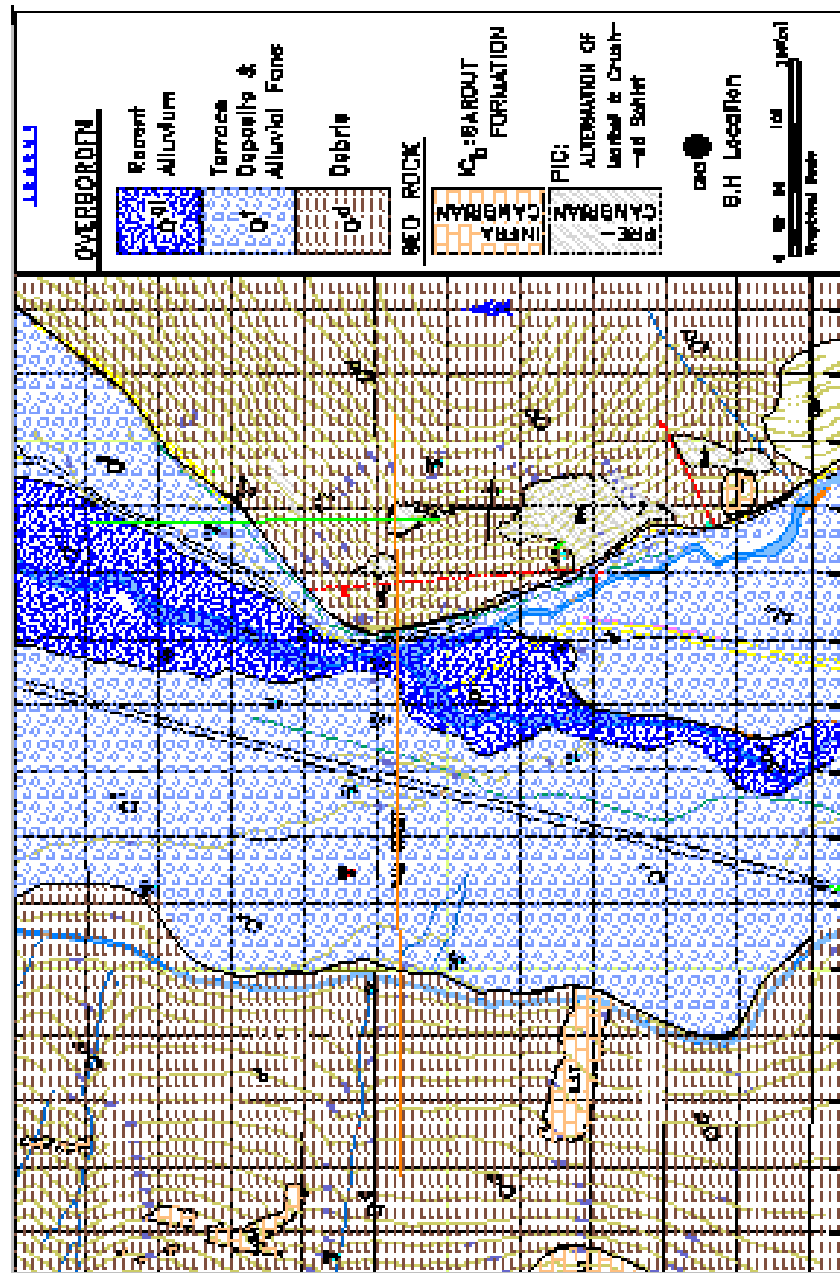
واژه‌های کلیدی: زمین‌شناسی مهندسی، روش‌های آب‌بندی، سد چپرآباد، پرده آب‌بند

مقدمه

یکی از دلایل اصلی گسیختگی سدهایی که بر روی نهشته‌های آبرفتی قرار دارند فرسایش درونی است. آبی که در خاک جریان می‌یابد نیرویی در جهت جریان به توده خاک وارد می‌سازد، مقدار این نیرو متناسب با شیب‌های هیدرولیکی است. اگر نیروی نشت به اندازه‌ای باشد که بر نیروی مقاوم خاک غلبه کند پدیده فرسایش در خاک اتفاق می‌افتد. با شستن و انتقال ذرات خاک به سطح و پیشرفت عمل فرسایش، پدیده‌های مخرب نشت به تدریج توسعه می‌یابد [۱۱]. پی اصلی سد چپرآباد از نهشته‌های آبرفتی تشکیل شده است. نوع این رسوبات در لایه‌های سطحی به‌خصوص در پایین‌دست، از نوع ماسه‌سیلتی است که مستعد پدیده‌های مخرب نشت هستند و همچنین وجود مسئله فرار آب، استفاده از روش مناسب آب‌بندی و کنترل نشت را ضروری کرده است.

زمین‌شناسی عمومی منطقه

گستره سد چپرآباد از دیدگاه زمین‌ساختی، بنا بر تقسیم‌بندی نبوی (۱۳۵۵) در واحد "خوی-مهاباد" واقع شده است [۶]. در یک دسته‌بندی کلی از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی، لیتولوژی تشکیل‌دهنده ساخت‌گاه سد را می‌توان به دو قسمت رسوبات ناپیوسته سطحی در قسمت بستر و طبقات سنگی (از جنس آهک و شیست و شیل خردشده) در تکیه‌گاه‌ها تقسیم‌بندی کرد. امتداد کلی طبقات زمین‌شناسی به صورت شمالی غربی - جنوب شرقی بوده و به دلیل قدیمی بودن سازندها و تحمل فازهای تکنونیک متفاوت، عوامل زیادی سبب ایجاد تغییرشکل‌ها و شکستگی‌ها شده و حضور آب‌های نفوذی در مناطق سطحی باعث گسترش خردشدگی‌ها در قالب هوازگی سطحی شده است. نهشته‌های کواترنر در این محدوده گسترش زیادی دارند. به طوری که تشکیل دهنده عمده ساخت‌گاه سد چپرآباد به شمار می‌روند. گسترش واحدهای مختلف زمین‌شناسی مختلف ساخت‌گاه سد چپرآباد در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساخت‌گاه سد چپرآباد

از گسل‌های عمده نزدیک به ساخت‌گاه سد می‌توان به گسل‌های اشنویه و شیوه‌برو اشاره کرد. گسل اشنویه با طولی حدود ۲۰ کیلومتر و فاصله ۷ کیلومتر تا محل ساخت‌گاه، دارای امتداد شمال‌شرقی - جنوب‌غربی بوده و در کوتاه‌تر دارای پیشینه لرزه‌خیزی است. گسل شیوه‌برو با فاصله حدود ۱۶ کیلومتر تا ساخت‌گاه، دارای امتداد تقریبی شرقی - غربی بوده و آثار حرکت جوان در آن دیده نشده است.

ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی پی آبرفتی ساخت‌گاه سد

ساخت‌گاه سد چپرآباد در دره‌ای نامتقارن و نسبتاً پهن قرار دارد. تکیه‌گاه راست شیب بیش‌تری نسبت به تکیه‌گاه چپ دارد. پهنای دره در بستر سیلابی رودخانه حدود ۲۵۰ متر است. به طور کلی می‌توان وضعیت نهشته‌های آبرفتی تشکیل‌دهنده ساخت‌گاه را به دوگونه درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم کرد. بخش عمده سمت راست از رسوبات شنی (با درصد کمی سیلت یا رس) تشکیل یافته که در گروه کلی GC-GM جای می‌گیرد. این رسوبات به طرف چپ دانه‌ریزتر شده و تدریجاً به ماسه سیلتی و رسی تبدیل می‌شوند و در گروه SM و SC قرار می‌گیرند. در شکل ۲ تغییرات دانه‌بندی رسوبات آبرفتی بستر نشان داده شده است. به طور کلی، پی آبرفتی ساخت‌گاه سد چپرآباد مجموعه‌ای ناهمگن و لایه‌بندی شده‌ای از مصالح زیر است:

شن با دانه‌بندی ضعیف تا خوب همراه با ماسه (GP-GW)

شن لای‌دار همراه با ماسه و رس (GM-GC)

ماسه دانه‌بندی شده با شن (SW-SP)

ماسه رس و لای‌دار با کمی شن (SM-SC)

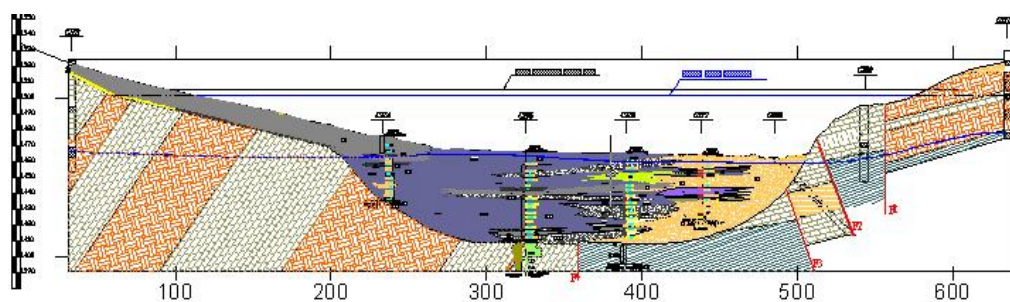
رس لای‌دار با کمی ماسه و شن (CL-ML)

لای (ML)

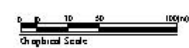
ضخامت حداکثر این نهشته‌ها در مقطع محور سد حدود ۵۹ متر است. این ضخامت به سمت بالادست تقریباً ثابت است، ولی به طرف پایین‌دست افزایش می‌یابد. بافت حاکم پی آبرفتی در بالادست، ماسه لای‌دار و در پایین‌دست بصورت ماسه (در بعضی نقاط همراه با سیلت و رس) است. شکل ۳ مقطع زمین‌شناسی مهندسی موازی محور سد را نشان می‌دهد.



شکل ۲. تغییرات تدریجی دانه‌بندی نهشته‌های آبرفتی ساخت‌گاه
الف) به طرف جناح چپ ب) به طرف جناح راست



Geological Section Along Dam Axis



شکل ۳. مقطع زمین‌شناسی مهندسی موازی با محور سد چپرآباد

۱. ارزیابی روان‌گرایی نهشته‌های آبرفتی

یکی از عمده‌ترین عوامل خسارت به سازه‌ها در هنگام زلزله، ایجاد روان‌گرایی در نهشته‌های ماسه‌ای است که به شکل‌های مختلفی موجب آسیب و یا تخریب کلی سازه‌ها می‌شود. روان‌گرایی به پدیده‌ای اطلاق می‌شود که تحت اثر لرزه‌های متناوب حاصل از

زمین‌لرزه با شدت‌های چشم‌گیر و اشباع بودن آن‌ها، فشار منفذی شدیداً بالا می‌رود، مقاومت برشی و تنش‌های مؤثر کاملاً کاهش می‌یابد و خاک پایداری و توان خود را از دست می‌دهد [۱]. پتانسیل روان‌گرایی هر نهشته‌ی خاکی با ترکیبی از ویژگی‌های خاک، عوامل محیطی و ویژگی‌های زلزله محتمل کنترل می‌شود [۱۴]. در این میان ویژگی‌های دانه‌بندی هر نهشته‌ی خاکی اهمیت زیادی دارد.

با توجه به دانه‌بندی نهشته‌های پی آبرفتی ساخت‌گاه سد چپرآباد، مهم‌ترین مسئله‌ای که باید در نظر گرفته شود بررسی پتانسیل روان‌گرایی است. بدین منظور از روش ارائه شده آقایان پروفیسور یود و ادیس (۱۹۹۶)، استفاده شده است [۱۷]. در این روش نسبت تنش سیکلیک پیش‌بینی شده از زلزله (1CSR) به تنش لازم برای ایجاد روان‌گرایی (2CRR) تعیین شده و با مقایسه این دو نسبت، ضریب اطمینان نهشته‌های پی آبرفتی در برابر روان‌گرایی تعیین می‌شود. نسبت (CSR) با استفاده رابطه (۳-۱)، ارائه شده سید و ادیس (۱۹۷۱)، قابل محاسبه است [۱۵].

$$CSR = \left(\frac{T_{av}}{\sigma'_v} \right) = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) rd \quad \text{رابطه ۱}$$

در رابطه یاد شده:

$$\begin{aligned} a_{max} &: \text{شتاب حداکثر ناشی از زلزله} \\ \sigma_v &: \text{تنش سربار کل} \\ \sigma'_v &: \text{تنش سربار مؤثر} \\ rd &: \text{ضریب کاهش تنش} \end{aligned}$$

محاسبه ضریب کاهش تنش با استفاده از رابطه ۲ ارائه توسط بلیک (۱۹۹۶) امکانپذیر است [۱۰].

$$r_d = \frac{1.0 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5}}{1.0 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.00121z^2} \quad \text{رابطه ۲}$$

در این رابطه Z عمق موردنظر برحسب متر است.

1. Cyclic Stress Ratio
2. Cyclic Resistance Ratio

یکی از روش‌های بدست آوردن نسبت تنش لازم برای ایجاد روان‌گرایی (CRR)، استفاده از عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده $(N_1)_{60}$ طبق رابطه (رابطه ۳) (راچ، ۱۹۹۸) است [۱۲]. که با استفاده از ضریب مقیاس بزرگی^۳ برای بزرگی متناظر با زلزله طرح تصحیح می‌شود. که بر اساس توصیه ICDL، حداکثر بزرگای محتمل^۴ در نظر گرفته می‌شود. برای سد چپرآباد شتاب حداکثر ناشی از زلزله (a_{max}) برابر با شتاب حداکثر بزرگای محتمل طرح یعنی $g/4.4$ و حداکثر بزرگای محتمل برابر با $7/4$ ریشتر در نظر گرفته شد.

$$CRR_{M=7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60cs}} + \frac{(N_1)_{60cs}}{135} + \frac{50}{[10 * (N_1)_{60cs} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad \text{رابطه ۳}$$

عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده برای ماسه تمیز است این اصلاح که در واقع تاثیر ریزدانه‌ها (FC) در میزان نسبت تنش لازم برای ایجاد روان‌گرایی (CRR) است برای پی آبرفتی سد چپرآباد از طریق اعمال دو ضریب α و β برای عدد نفوذ استاندارد مطابق رابطه ۴ محاسبه شد.

$$(N_1) = \alpha + \beta (N_1)_{60} \quad \text{رابطه ۴}$$

ضرایب α و β رابطه ۴ بصورت زیر محاسبه و اعمال می‌شوند:

$$\begin{aligned} \alpha &= 0 && \text{for } FC \leq 5\% \\ \alpha &= \exp[.76 - (.90 / FC^{.2})] && \text{for } 5\% < FC < 35\% \\ \alpha &= 5.0 && \text{for } FC \geq 35\% \\ \beta &= 1.0 && \text{for } FC \leq 5\% \\ \beta &= [0.99 + (FC^{.5} / 1000)] && \text{for } 5\% < FC < 35\% \\ \beta &= 1.2 && \text{for } FC \geq 35\% \end{aligned}$$

در رابطه ۳، $CRR_{M=7.5}$ ، نسبت تنش لازم برای ایجاد روان‌گرایی برای زلزله با بزرگای $7/5$ ریشتر است. برای بزرگای کوچک‌تر از $7/5$ ، ضریب تصحیحی به صورت رابطه ۵ پیشنهاد شده است (یود و همکاران، ۲۰۰۱) [۱۷].

3. Magnitude Scaling Factor

4. Maximum Credible 4 - Magnitude Scaling Factor

4. M Earthquake

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}} \quad \text{رابطه ۵}$$

برای ساخت‌گاه سد چپرآباد با بزرگای بیشینه محتمل برابر ۷/۴، ضریب (MSF) برابر ۱/۰۳۴ بدست می‌آید و در نهایت نسبت تنش سیکلیکی CRR بصورت رابطه ۶ محاسبه شد:

$$CRR = CRR_{M=7.5} * MSF \quad \text{رابطه ۶}$$

ضریب ایمنی در مقابل روان‌گرایی (FS_L) با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود:

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR} \quad \text{رابطه ۷}$$

نتایج برآورد پتانسیل روان‌گرایی با استفاده از اعداد نفوذ استاندارد برای چهار تا از گمانه حفاری شده در روی محور سد که در واقع محل احداث سیستم آب‌بندی است در جدول ۱ ارائه شده است همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضریب اطمینان در مقابل روان‌گرایی در اکثر نقاط کمتر از یک بوده و با توجه به بافت دانه‌بندی مصالح که عموماً ماسه‌ای است، وقوع پدیده روان‌گرایی در هنگام زلزله، بسیار محتمل است.

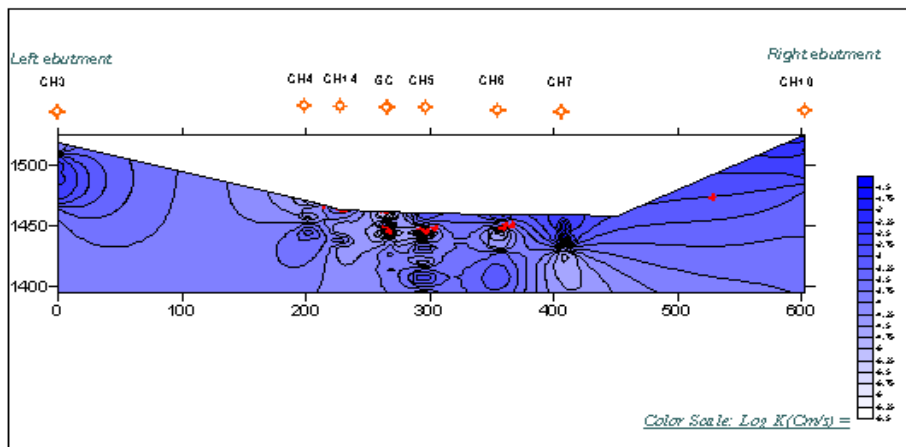
۲. وضعیت آب‌گذری ساخت‌گاه سد

نتایج آزمایش‌های نفوذپذیری صحرایی (لفران)، تغییرات زیادی را در نفوذپذیری نهشته‌های آبرفتی نشان می‌دهد به‌طوری که از خیلی کم (10^{-7} cm/s) تا خیلی زیاد (10^{-2} cm/s) در نقاط مختلف تغییر می‌کند، با این حال ضریب تراوایی در گمانه‌های اکتشافی بیش‌تر در محدوده 10^{-3} cm/s تا 10^{-5} است. همچنین به دلیل هوازدگی و خردشدگی بسیار زیاد قشر سطحی سنگ بستر با ضخامتی در حدود ۱۰ متر (از عمق ۵۹ تا ۶۰ متری سطح زمین) و نفوذپذیری بیش از ۱۰۰ لوژن در این قسمت، این بخش از سنگ‌بستر نیز جزو آبرفت به شمار رفته و لایه نفوذپذیر با ضخامتی در حدود ۷۰ متر را تشکیل می‌دهند. نفوذپذیری توده‌سنگ تکیه‌گاه چپ تا عمق ۵۵ متری بیش‌تر از ۱۰۰ لوژن است در اعماق بیش‌تر به حدود ۵ لوژن می‌رسد. در تکیه‌گاه راست نیز تا عمق حدود ۴۰ متری بیش از ۱۰۰ لوژن و بعد از آن با روند کاهشی در عمق ۵۰ متری به ۱۶ لوژن می‌رسد [۲]. در شکل ۴ مقطع هم‌نفوذپذیری موازی محورسد،

تغییرات نفوذپذیری در نقاط مختلف را نشان می‌دهد. در تهیه مقطع هم‌نفوذپذیری، جهت وارد کردن تأثیر ضرایب نفوذپذیری، از لگاریتم اعداد نفوذپذیری استفاده شده است.

جدول ۱. محاسبه ضریب اطمینان نهشته‌های پی‌آبرفتی سد چپرآباد در مقابل روان‌گرایی

| Borehole | Depth(m) | (N) ₄₀ | FC | | alpha | beta | (N) ₄₀₀ | rd | CSR | IMSF | CBR | FS ₁ |
|----------|----------|-------------------|----------|----------|----------|----------|--------------------|----------|-------|-------|-------|-----------------|
| | | | <0.075mm | | | | | | | | | |
| CH4 | 7 | 22.08 | - | 0 | 1 | 22.06372 | 0.949 | 0.271284 | 1.038 | 0.243 | 0.931 | |
| | 9 | 17.94 | - | 0 | 1 | 17.94394 | 0.923 | 0.263957 | 1.038 | 0.191 | 0.752 | |
| | 13 | 8.91 | - | 0 | 1 | 8.913156 | 0.827 | 0.268861 | 1.038 | 0.104 | 0.403 | |
| | 16 | 10.49 | - | 0 | 1 | 10.49 | 0.728 | 0.255036 | 1.038 | 0.117 | 0.478 | |
| CH5 | 27.75 | 14.88 | - | 0 | 1 | 14.88192 | 0.517 | 0.214183 | 1.038 | 0.159 | 0.770 | |
| | 5 | 18.37 | - | 0 | 1 | 18.37421 | 0.966 | 0.374132 | 1.038 | 0.196 | 0.544 | |
| CH6 | 12.5 | 25.04 | - | 0 | 1 | 25.04405 | 0.842 | 0.335655 | 1.038 | 0.293 | 0.905 | |
| | 24 | 11.49 | - | 0 | 1 | 11.49282 | 0.553 | 0.253464 | 1.038 | 0.127 | 0.518 | |
| | 26.5 | 15.23 | - | 0 | 1 | 15.23157 | 0.527 | 0.245413 | 1.038 | 0.162 | 0.687 | |
| | 36.5 | 17.00 | - | 0 | 1 | 16.99806 | 0.473 | 0.229079 | 1.038 | 0.181 | 0.819 | |
| | 38.5 | 8.79 | - | 0 | 1 | 8.791785 | 0.461 | 0.225195 | 1.038 | 0.103 | 0.473 | |
| | 14 | 12.22 | 1 | 0 | 1 | 12.21789 | 0.794 | 0.342359 | 1.038 | 0.133 | 0.404 | |
| CH7 | 16 | 22.85 | 1 | 0 | 1 | 22.84628 | 0.728 | 0.322223 | 1.038 | 0.255 | 0.820 | |
| | 18 | 10.09 | 1 | 0 | 1 | 10.09456 | 0.667 | 0.301812 | 1.038 | 0.114 | 0.392 | |
| | 20 | 8.32 | 1 | 0 | 1 | 8.324324 | 0.618 | 0.284549 | 1.038 | 0.099 | 0.360 | |
| | 22 | 11.24 | 6 | 0.029665 | 1.004697 | 11.32713 | 0.681 | 0.271258 | 1.038 | 0.125 | 0.478 | |
| | 24 | 12.80 | 6 | 0.029665 | 1.004697 | 12.88684 | 0.553 | 0.261373 | 1.038 | 0.139 | 0.554 | |
| | 26.5 | 8.01 | 10 | 0.889388 | 1.021623 | 9.058932 | 0.527 | 0.252425 | 1.038 | 0.105 | 0.431 | |
| | 28 | 11.60 | 5 | 0 | 1 | 11.59958 | 0.515 | 0.248284 | 1.038 | 0.127 | 0.533 | |
| | 32 | 2.21 | 7 | 0.120326 | 1.00852 | 2.348952 | 0.490 | 0.239834 | 1.038 | 0.055 | 0.237 | |
| | 34 | 5.51 | 7 | 0.120326 | 1.00852 | 5.677015 | 0.480 | 0.236439 | 1.038 | 0.077 | 0.339 | |
| | 36 | 3.26 | 1 | 0 | 1 | 3.256962 | 0.471 | 0.233352 | 1.038 | 0.060 | 0.267 | |



شکل ۴. مقطع هم‌نفوذپذیری موازی با محور سد چپرآباد (بستر آبرفتی)

۳. ویژگی‌های پی آبرفتی از دیدگاه آب‌بندی

از دیدگاه آب‌بندی، در داخل مخزن سد چپرآباد، کف‌بندی^۵ طبیعی با نهشته‌هایی از نوع سیلتی-رسی وجود دارد که در سراسر بستر مخزن گسترش دارد و می‌تواند در آب‌بندی مخزن و پی آبرفتی بستر مخزن تأثیر به‌سزایی داشته باشد. پیوستگی این کف‌بند طبیعی در بعضی نقاط از جمله محدوده محور، به دلیل شستگی و فرسایش از بین رفته است. با اجرای کف‌بند رسی در زیر پوسته بالادست سد می‌توان این قسمت از کف‌بند طبیعی موجود را ترمیم کرد و بر کارایی آن افزود. شکل ۵ نمایی از گسترش کف‌بند طبیعی مخزن سد چپرآباد را نشان می‌دهد.



شکل ۵. نمایی از گسترش کف‌بند طبیعی در بستر مخزن (دید به سمت جنوب از تکیه‌گاه راست)

5. Clay Blanket

مسئله دیگری که می‌تواند در شناسایی آب‌بندهای طبیعی موجود حائز اهمیت باشد، اطلاع از شرایط آب‌های زیرزمینی و شناسایی سفره‌های زیرزمینی موجود در ساخت‌گاه سد است. در ساخت‌گاه سد چپرآباد اکثر گمانه‌های تزریق پرده‌آب‌بند که در سمت چپ پی‌آبرفتی حفاری شدند آرتزین کردند. پدیده آرتزین، نشانه وجود سفره‌های تحت فشار در پی است. آرتزین این گمانه‌ها پایدار بوده و چندین روز با دبی‌های مختلف (در بعضی گمانه‌ها حدود ۱۰ لیتر در دقیقه) ادامه داشت. عمق آرتزین شدن این گمانه‌ها در محدوده بین ۲۵ تا ۳۵ متری قرار داشت. وجود شرایط آب‌زیرزمینی فوق در پی سد چپرآباد، نویدبخش وجود کف‌بند طبیعی در عمق حدود ۳۰ متری است. به دست آوردن این عمق، در طراحی سیستم آب‌بندی و در تصمیم‌گیری کامل و یا معلق بودن سیستم آب‌بندی قائم و تعیین عمق بهینه آن کمک شایانی می‌کند.

انتخاب روش آب‌بندی

نقش آب‌بندها در پی، جلوگیری از حرکت آب و طولانی کردن مسیر جریان است. روش‌های مختلفی برای آب‌بندی وجود دارد که انتخاب هرکدام به شرایط زمین‌شناسی، خصوصیات هیدرولیکی ساخت‌گاه و ابعاد هندسی سد بستگی دارد [۱۶]. روش‌های آب‌بندی ساخت‌گاه سد چپرآباد در دو قسمت آب‌بندهای افقی و قائم بررسی و تجزیه و تحلیل شد:

۱. آب‌بندهای افقی

۱-۱. روش پوشش بالادست (کف‌بند):

تأثیر پوشش بالادست، افزایش طول مسیر جریان و در نتیجه کاهش شیب هیدرولیکی است؛ به عبارت دیگر در شبکه جریان تعداد خطوط افت پتانسیل در مقایسه با حالت نبود پوشش، افزایش می‌یابد. برای محاسبه ابعاد پوشش، روابط مختلفی وجود دارد از آن جمله می‌توان به روش بنت^۱ اشاره کرد. معادله اصلی بنت در رابطه (۳-۸) ارائه شده است [۹].

$$a = \sqrt{\frac{K_b}{K_f \cdot Z_f \cdot Z_b}} \quad \text{رابطه ۸}$$

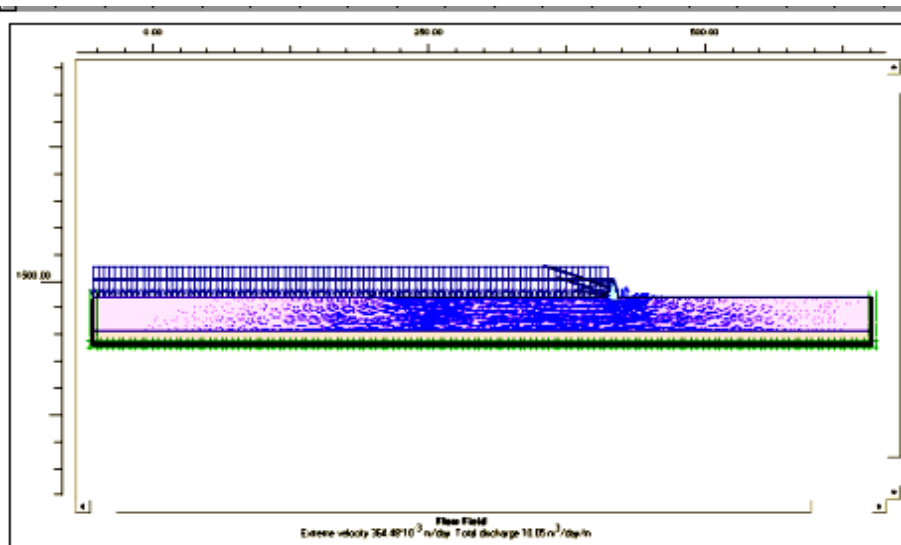
6. Bennet

در رابطه ۸:

K_b : نفوذپذیری کف‌بند، که معادل با هسته‌رسی و برابر 1×10^{-6} (سانتی‌متر بر ثانیه) است.
 Z_b : ضخامت کف‌بند، که معادل ۱/۵ متر در نظر گرفته شد.
 K_f : نفوذپذیری پی‌آبرفتی که به‌طور متوسط، 3×10^{-3} (سانتی‌متر بر ثانیه) منظور شد..
 Z_f : ضخامت شالوده نفوذپذیر از کف هسته‌رسی که در حدود $64 = 6 - 74$ متر منظور شد
 (۶ متر از پی برداشته می‌شد).

a : پارامتری که جهت تعیین طول موثر کف‌بند استفاده می‌شود.

با این روش، ابعاد پوشش نفوذناپذیر لازم برای ساخت‌گاه سد چیرآباد، طولی حدود ۷۰۰ متر بدست می‌آید. برای بررسی تأثیر پوششی با این طول، از نرم‌افزار Plaxis استفاده شد. نتایج تحلیل نشان داد با به‌کارگیری این روش، میزان نشست از ۲۵ به ۱۰ مترمکعب در روز کاهش می‌یابد و عامل ایمنی مصالح در برابر شیب هیدرولیکی خروجی در پایین‌دست از ۰/۸۳ به ۲/۷ می‌رسد (شکل ۶). علاوه بر هزینه سنگین اجرای این روش، به دلیل شیب زیاد تکیه‌گاه‌ها به‌خصوص تکیه‌گاه راست، امکان اجرای پوشش آب‌بند وجود ندارد و در صورت امکان با هزینه زیادی همراه خواهد بود.



شکل ۶. بررسی تأثیر پوشش آب‌بند در کاهش نشست با استفاده از نرم‌افزار Plaxis

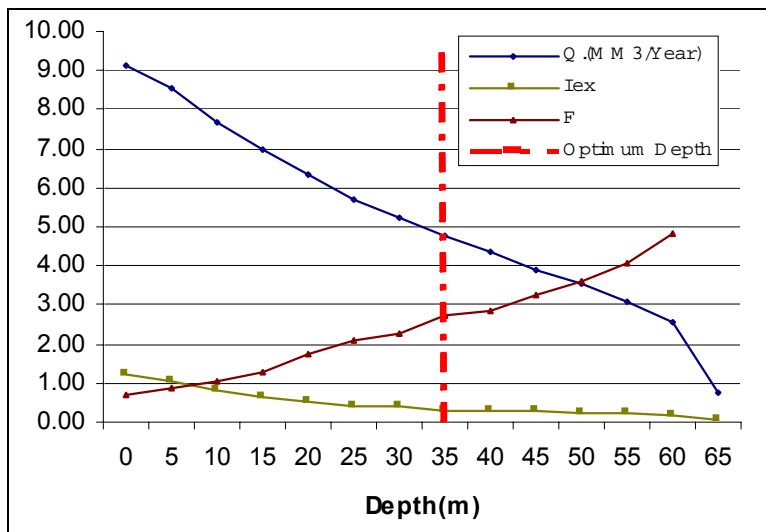
۲-۱. استفاده از ژئوسنتتیک‌ها^۷:

ژئوممبران‌ها به‌عنوان نوع خاصی از ژئوسنتتیک‌ها در هرجایی که کنترل جریان آب یا سایر مایعات مدنظر باشد کاربرد دارند. این مواد به‌دلیل طبیعت پلیمری خود، نفوذپذیری و ضخامت اندکی دارند. به‌همین دلیل کاربردهای گسترده‌ای در سازه‌های کنترل جریان آب، یافته است [۴]. استفاده از ژئوممبران‌ها به دو صورت آب‌بند قائم و افقی در ساخت‌گاه سد چپرآباد می‌تواند گزینه قابل‌بحثی باشد. نتایجی که در طراحی پوشش آب‌بند با استفاده از روش بنت به‌دست آمد نشان داد ابعاد لازم برای آب‌بندی با پوشش کاملاً نفوذناپذیر (ژئوممبران)، حدود ۵۰۰ متر است. اجرای ژئوممبران با این طول، به دلیل وسیع‌تر بودن مخزن در بالادست، ابعاد بسیار زیادی را شامل می‌شود. هزینه لازم برای اجرای این روش به‌خصوص در ساخت‌گاه‌هایی که مصالح ریزدانه رسی در دسترس باشد اقتصادی به نظر نمی‌رسد.

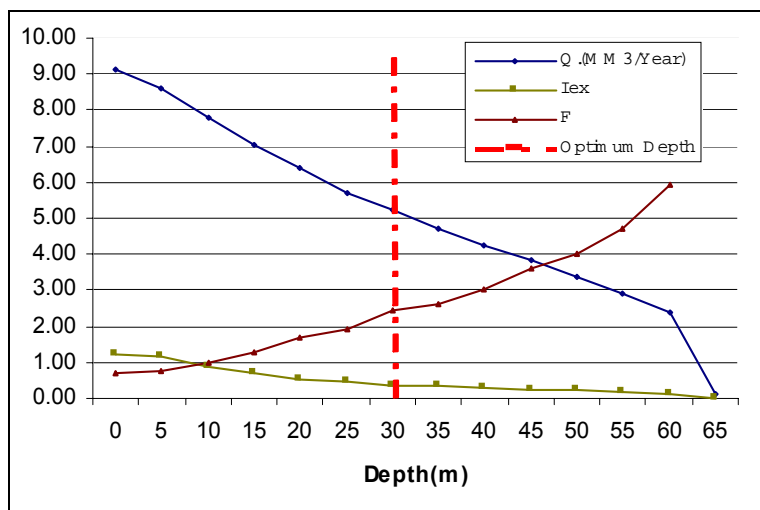
۲. آب‌بندهای قائم

در طراحی این نوع آب‌بندها در لایه‌های نفوذپذیر با ضخامت زیاد، یکی از عوامل مؤثر در کیفیت طراحی و هزینه‌های اجرای آن، عمق لازم برای آب‌بندی است. تصمیم‌گیری در مورد به‌کارگیری آب‌بند کامل یا معلق و بدست‌آوردن عمق بهینه در آب‌بندهای معلق، یکی از مراحل اساسی در طراحی این نوع آب‌بندها به‌شمار می‌رود. به‌همین منظور از آنالیز تراوش با استفاده از برنامه اجزای محدود Plaxis استفاده شد. در این بررسی با مدل‌سازی دو نوع آب‌بند قائم با نفوذپذیرهای در حد 1×10^{-5} و 1×10^{-7} cm/s، به ترتیب برای پرده آب‌بند و دیوار آب‌بند و با فرض محتاطانه نفوذپذیری پی در حد 1×10^{-2} cm/s، میزان کاهش نشت با افزایش عمق آب‌بندی و تأثیر آن در افزایش ضریب اطمینان نهشته‌های پایین‌دست در مقابل نیروهای مخرب نشت (پایپینگ) مورد تحلیل قرار گرفت. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نتایج بررسی در حالت استفاده از پرده آب‌بند و دیوار آب‌بند را نشان می‌دهد.

7. Geosynthetics



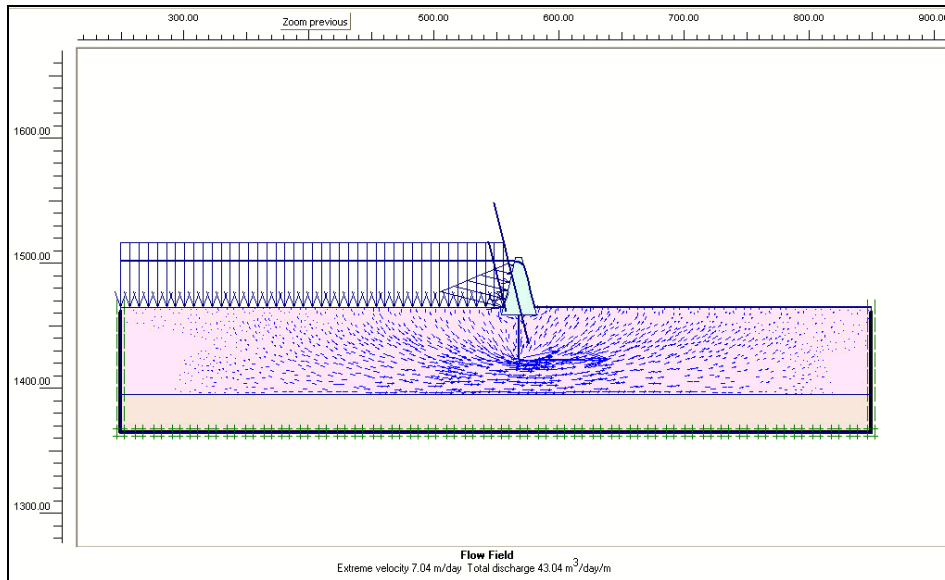
شکل ۷. تغییرات مقدار نشست، شیب هیدرولیکی خروجی و ضریب اطمینان در مقابل Piping با افزایش عمق آب‌بند قائم



شکل ۸. تغییرات مقدار نشست، شیب هیدرولیکی خروجی و ضریب اطمینان در مقابل Piping با افزایش عمق دیوار آب‌بند و عمق بهینه

باتوجه به شکل‌های (۲-۴) و (۳-۴)، عمق بین ۳۰ تا ۳۵ متری عمق بهینه‌ای برای آب‌بندهای قائم است. در این عمق، علاوه بر این‌که میزان نشست به نصف رسیده و به حدود ۴ درصد

مخزن کاهش یافته است. ضریب اطمینان در مقابل نیروی مخرب نشت نیز در این عمق، با فرض شیب هیرولیکی بحرانی در حدیک، از $0/69$ به بیش از $2/5$ رسیده است. که با به‌کارگیری زهکش و فیلتر در پایین‌دست می‌توان این ضریب را به بیش از 4 (حد موردنیاز و ایمن) افزایش داد. شکل ۹ میزان تأثیر آب‌بند قائم با عمق 35 متری را نشان می‌دهد.



شکل ۹. تأثیر پرده آب‌بند با عمق 35 متری در افزایش مسیر جریان با برنامه Plaxis

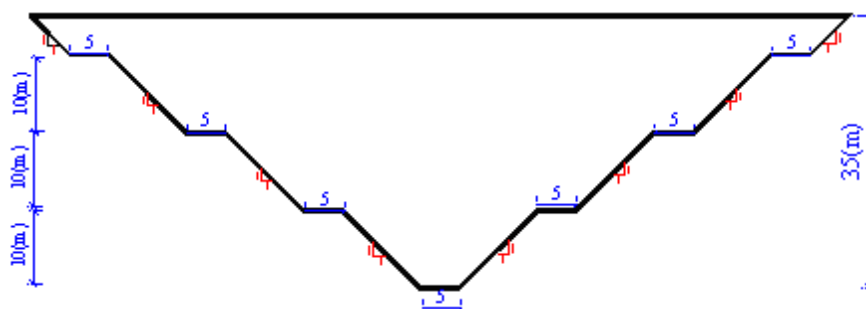
۱-۲. روش گودبرداری یا ترانشه‌زنی^۱:

این روش در جایی به کار برده می‌شود که ضخامت نهشته‌های آبرفتی یا نفوذپذیر کم‌تر از ارتفاع سد و کم‌تر از 35 متر باشد. در این حالت این نهشته‌ها برداشته شده و مصالح نفوذناپذیر مناسب جای‌گزین می‌شود.

در ساخت‌گاه سدچپرآباد به دلیل قرارگیری سطح آب‌زیرزمینی در عمق حدود 5 متری سطح زمین، اجرای عملیات ترانشه‌زنی بسیار مشکل و پرهزینه خواهد بود؛ زیرا در صورت

8. Open Trench

به‌کارگیری این‌روش با عمق حدود ۳۵ متری و با مقطع فرضی نشان داده شده در شکل ۱۰، حداقل حدود نیم میلیون متر مکعب گودبرداری و جای‌گزینی با مصالح مناسب لازم است. هزینه انجام چنین عملیاتی با توجه به لزوم عملیات زهکشی و توجه به محدودیت فصل کاری منطقه، غیراقتصادی و تقریباً غیرممکن است.



شکل ۱۰. مقطع اولیه و فرضی برای اجرای عملیات گودبرداری با عمق ۳۵ متری

۲-۲. روش پرده آب‌بند:

این‌روش زمانی کاربرد دارد که ضخامت نهشته‌های آبرفتی کم‌تر از ارتفاع سد و بیش‌تر از ۳۵ متر باشد. در این‌روش، از طریق حفر گمانه‌هایی، درز و شکاف‌ها و منافذ با دوغاب پر می‌شود و مانعی برای حرکت و جریان آب ایجاد می‌شود. برای اجرای این‌روش در سنگ و خاک روش‌های مختلفی وجود دارد. از روش‌های متداول تزریق در آبرفت، تزریق با مانشت‌تیوب است. تزریق با تیوب‌مانشت یکی از روش‌های مورد استفاده برای آب‌بندی پی آبرفتی سد چپرآباد است. از این روش در ایران در سد حنا در ۳۰ کیلومتری شهرستان سمیرم استفاده شده است و پرده‌ای با عمق حدود ۳۰ متر اجرا شده است [۳]. استفاده از این روش، در پی آبرفتی به دلیل زمان‌بر بودن، خوردن بیش‌تر و همچنین هزینه تهیه و نصب مانشت تیوب نسبت به تزریق معمولی با هزینه بسیار زیادی همراه است، ولی در مقایسه با روش‌هایی چون ترانشه‌زنی و پوشش آب‌بند کم‌هزینه‌تر و مناسب‌تر است.

۲-۳. روش دیوارآب‌بند:

زمانی که ضخامت نهشته‌های آبرفتی و یا نفوذپذیر بیش از ۳۵ متر باشد، ترانشه‌ای به صورت بسته در طول محل تماس هسته سد با پی و با عمق تعیین شده، برای رسیدن به لایه نفوذناپذیر (و یا عمق مورد نظر در صورت معلق بودن) حفر و با مصالح نفوذناپذیر پر می‌شود. استفاده از دیوار آب‌بند با بتن پلاستیک در پی آبرفتی، یکی از روش‌های متداول آب‌بندی است؛ زیرا در صورت اجرای صحیح، شکل‌پذیری آن با زمین محیط خود هماهنگ است و از تمرکز تنش و کرنش زیاد در محیط در تماس با هسته رسی سد اجتناب می‌شود [۷]. امروزه با به بازار آمدن دستگاه‌های حفاری نظیر هیدروفورز که قادر است در زمانی بسیار کوتاه‌تر پانل‌های دیوار آب‌بند را تا اعماق زیادی به صورت قائم و کنترل شده حفاری کند، تزریق با مانشت تقریباً منسوخ شده است؛ اما در ساخت‌گاه سد چپرآباد به دلیل روان‌گرایی نهشته‌های پی آبرفتی، استفاده از این روش به‌خصوص در حالت دیوارآب‌بند معلق با ریسک بسیار زیادی در هنگام زلزله همراه است.

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

۱. نهشته‌های آبرفتی با ضخامت حدود ۶۰ متر، تشکیل‌دهنده پی اصلی ساخت‌گاه سد چپرآباد است. دانه‌بندی این نهشته‌ها در بیش‌تر نقاط به‌خصوص پایین‌دست سد، از نوع سیلتی-رسی است، حساسیت این نوع مصالح در مقابل پدیده‌های مخرب نشت از جمله پایپینگ، به‌کارگیری سیستم آب‌بندی را اجتناب‌ناپذیر می‌سازد.
۲. نفوذپذیری نهشته‌های آبرفتی در امتداد افقی و عمودی بسیار متغیر است. با این حال ضریب تراوایی در گمانه‌های اکتشافی، بیش‌تر در محدوده 10^{-3} تا 10^{-5} cm/s است. مقطع هم‌نفوذپذیری در امتداد موازی با محور سد، کاهش عمومی نفوذپذیری مصالح با افزایش عمق را نشان می‌دهد.
۳. مقایسه روش‌های مختلف آب‌بندی برای ساخت‌گاه سد چپرآباد از لحاظ فنی با در نظر گرفتن سایر عوامل دخیل در شرایط اجرایی از جمله زمان اجرا و هزینه آن، روش دیوار آب‌بند را روش مناسب نشان می‌دهد. اما انتخاب و اجرای این روش به دلیل

روان‌گرایی نهشته‌های آبرفتی چندان مناسب به نظر نمی‌رسد؛ مگر این‌که قبل از اجرا نسبت به به‌سازی و اصلاح پتانسیل روان‌گرایی اقداماتی اندیشیده شود. بنا بر این استفاده از دیوار آب‌بند با بتن پلاستیک در ساخت گاه‌هایی مشابه و بدون روان‌گرا، از لحاظ فنی و اقتصادی روش مناسب برای آب‌بندی است.

۴. با توجه به مقاطع هم‌نفوذپذیری، زمین‌شناسی مهندسی و نتایج آنالیز تراوش، احداث پرده آب‌بند معلق با عمق متوسط ۳۵ متر به همراه فیلتر و پرده زهکش در پایین‌دست، می‌تواند آب‌بندی ساخت‌گاه و ایمنی نهشته‌های آبرفتی در مقابل پدیده‌های مخرب نشت همچون پایپینگ را تأمین نماید.

۵. علاوه بر استفاده از سیستم آب‌بندی اصلی ذکر شده در بند ۴، پیشنهاد می‌شود با اجرای کف‌بند رسی با طول حدود ۱۰۰ متر در زیر بدنه بالادست سد، نسبت به ترمیم و افزایش بلانکت طبیعی موجود در مخزن اقدامات لازم صورت گیرد.

۶. محاسبات روان‌گرایی نهشته‌های پی آبرفتی سد چپ‌آباد، نشان می‌دهد در صورت وقوع زلزله با بزرگای بیشینه محتمل، این مصالح دچار روان‌گرایی خواهند شد؛ لذا توصیه می‌شود قبل از احداث بدنه سد روی این پی آبرفتی، تمهیدات لازم برای اصلاح و به‌سازی ویژگی‌های ژئوتکنیکی نهشته‌های آبرفتی صورت پذیرد.

منابع

۱. جلالی، ح. «ارزیابی روانگونی خاک‌ها در زلزله»، مجموعه مقالات اولین سمینار سدسازی ایران (۱۳۶۶)
۲. سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی «طرح تأمین آب و شبکه‌ی آبیاری و زهکشی دشت نقده؛ مطالعات مرحله‌ی اول؛ جلد دوم؛ گزارش زمین‌شناسی و ژئوتکنیک» (۱۳۷۷).
۳. عابدزاده انارکی، ف. «تخریب آبرفت پرده آب‌بند سد حنا»، مجموعه مقالات کمیته ملی سدهای بزرگ ایران (۱۳۷۸).
۴. فیضی ماسوله، ش. «کاربرد ژئوممبران در دیوارهای آب‌بند»، سومین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه نیرو، تهران (۱۳۸۱).

۵. کمیته ملی سدهای بزرگ ایران. «تراوش در پی سد و شیوه‌های کنترل آن» انتشارات دفتر فنی آب-وزارت نیرو، نشریه شماره ۶(۱۳۷۵).
۶. نبوی، ح. «دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران»، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور(۱۳۵۵).
7. Baxter, D.Y. "Mechanical Behavior of Soil-Bentonite Cutoff Walls" Blacksburg, Virginia(2000).
8. Bell, F.G. "Engineering Treatment of Soils" Dept of Geology and Applied Geology, University of Natal, Durban, F.N. Spon(1993).
9. Bennet, P.T. "The Effect of Blanket on Seepage Through Pervious Foundation" Tansa, ASCE, Vol. 111(1946).
10. Blake, T.F.(1996) Personal Communication. (as cited in Youd, T.L., Idriss, I. M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., and Stokoe, K.H.(2001) "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils" Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(10) 817-833.
11. Kunitomo, N. "Design and Construction of Embankment Dams" Dept. of Civil Eng., Aichi Institute of Technology(2000)3-6.
12. Rauch, A. F. (1998) Personal Communication.(as cited in Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki,

- Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., and Stokoe, K.H. (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 127(10), 817-833
13. Seed, H.B. and Idriss, I.M. "Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake" *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE*, 93(SM3) (1967).
14. Seed, H.B. & Idriss, I.M., "Ground Motions and Liquefaction During Earthquakes" *publication no.* (1995) 75-95-2.
15. Seed, H.B. and Idriss, I.M. "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential" *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division, ASCE*, 97(SM9) (1971) 1249-1273.
16. U.S. Army Corps of Engineer Service "Seepage Control" Engineer Manual, EM 1110-2-2300, Dept. of the Army. Office of the Chief of Engineers. Washington, D.C. (2004).
17. Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Arango, I., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, W.D.L., Harder, L.F., Hynes, M.E., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F., Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B., and Stokoe, K.H. (2001) "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, 127(10).