بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی‌مهندسی پی‌آبرفتی ساخت‌گاه سد مخزنی چپرآباد با نگرشی ویژه به مسئلهٔ آب‌بندی

قدرت برزگری، علی ارومیه‌ای: گروه زمین‌شناسی‌مهندسی، دانشگاه تربیت‌مدرس

تاریخ: دریافت ۸٤/۱۲/۱۷ **پذیرش** ۸٦/۲/۱۵

چکیده

توجـه به‌مسئلهٔ نشت زیر پی و انتخاب روش مناسب آب‌بندی، یکی از بخش‌های مهم در طـرح‌هـای سدسـازی بـه‌شـمار مـی‌رود. بررسـی ایـن‌مسـئله، ارتباط تنگاتنگی با ویژگی‌های زمیـن‌شناسـی‌مهندسی ساخت‌گاه دارد. سد چپرآباد، از نوع خاکی با هسته رسی و ارتفاع ۴۴/۵ مـتر از پی با ظرفیت مخزن ۱۲۷ میلیون مترمکعب است که در ۷۵ کیلومتری جنوب شهرستان ارومـیه واقـع در اسـتان آذربایجـان غربی در حال اجراست. ساخت‌گاه سد در قسمت بستر از رسـوبات آبرفتـی بـا ضـخامتی حـدود۶۰ مـتر تشـکیل شـده اسـت و تکـیه‌گاه‌های آن روی سـنگ‌هـای‌آهکـی و شیسـتی بـا سـن پرکامبرین و اینفراکامبرین قرار می‌گیرد. در این مقاله با بررسـی ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی ساخت‌گاه، همچنین روش‌های مختلف آب‌بندی پی آبرفتـی از جملـه امکان استفاده از پرده و دیوار آب‌بند، پوشش‌آب‌بند، گودبرداری و استفاده از ژئوسینتتیک مورد بررسی قرارگرفته است. در این رابطه از نرم‌افزار Plaxis برای آنالیز تراوش و ارائـهٔ الگوی طراحی استفاده شده است. نتیجهٔ بررسی‌ها نشان می‌دهد علی‌رغم مناسب بودن دیـوارآب‌بـند، بـه‌دلیل وجود لایه‌های روان‌گرا، استفاده از روش پردهٔآب‌بند اولولیت بیش‌تری دارد.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شناسی‌مهندسی، روش‌های‌آب‌بندی، سد چپرآباد، پردهٔ آب‌بند

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

مقدمه

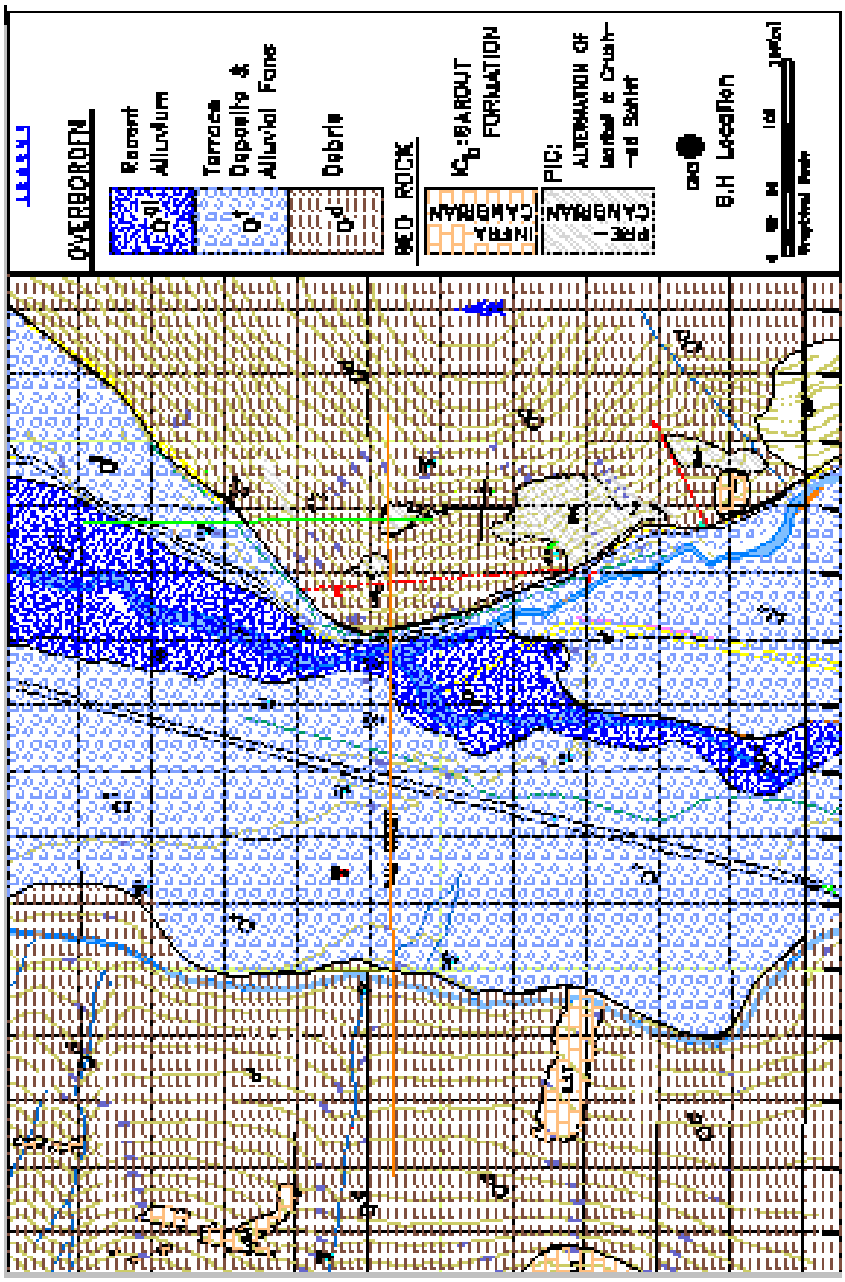
یکی از دلایل اصلی گسیختگی سدهایی که بر روی نهشته‌های آبرفتی قرار دارند فرسایش درونی است. آبی که در خاک جریان می‌یابد نیرویی در جهت جریان به تودهٔ خاک وارد می‌سازد، مقدار این‌نیرو متناسب با شیب‌های هیدرولیکی است. اگر نیروی نشت به اندازه‌ای باشد که بر نیروی مقاوم خاک غلبه کند پدیدهٔ فرسایش در خاک اتفاق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

زمین‌شناسی عمومی منطقه

گسترهٔ سد چپرآباد از دیدگاه زمین‌ساختی، بنا بر تقسیم‌بندی نبوی(۱۳۵۵) در واحد "خوی- مهاباد" واقع شده است[٦]. در یک دسته‌بندی کلی از دیدگاه زمین‌شناسی‌مهندسی، لیتولوژی تشکیل‌دهنده ساخت‌گاه سد را می‌توان به دو قسمت رسوبات ناپیوستهٔ سطحی در قسمت بستر و طبقات سنگی(از جنس آهک و شیست وشیل خردشده) در تکیه‌گاه‌ها تقسیم‌بندی کرد. امتداد کلی طبقات زمین‌شناسی به‌صورت شمالی غربی- جنوب شرقی بوده و به دلیل قدیمی بودن سازندها و تحمل فازهای تکتونیکی متفاوت، عوامل زیادی سبب ایجاد تغییرشکل‌ها و شکستگی‌ها شده و حضور آب‌های نفوذی در مناطق سطحی باعث گسترش خردشدگی‌ها در قالب هوازدگی سطحی شده است. نهشته‌های کواترنر در این محدوده گسترش زیادی دارند. به طوری که تشکیل دهندهٔ عمدهٔ ساخت‌گاه سد چپرآباد به شمار می‌روند. گسترش واحدهای مختلف زمین‌شناسی مختلف ساخت‌گاه سد چپرآباد در شکل۱ نشان داده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]



شکل ۱. نقشهٔ زمین‌شناسی ساخت‌گاه سدچپرآباد

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

از گسل‌های عمدهٔ نزدیک به ساخت‌گاه سد می‌توان به گسل‌های اشنویه و شیوه‌برو اشاره کرد. گسل اشنویه با طولی حدود۲۰ کیلومتر و فاصله ۷ کیلومتر تا محل ساخت‌گاه، دارای امتداد شمال‌شرقی- جنوب‌غربی بوده و در کواترنر دارای پیشینه لرزه‌خیزی است. گسل شیوه‌برو با فاصلهٔ حدود ۱٦ کیلومتر تا ساخت‌گاه، دارای امتداد تقریبی شرقی- غربی بوده و آثار حرکت جوان در آن دیده نشده است.

ویژگی‌های زمین‌شناسی‌مهندسی 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 تشکیل‌دهندهٔ ساخت‌گاه را به دوگونهٔ درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم کرد. بخش عمدهٔ 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 ماسهٔ سیلتی و رسی تبدیل می‌شوند و در گروه SM و SC قرار می‌گیرند. در شکل۲ 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)

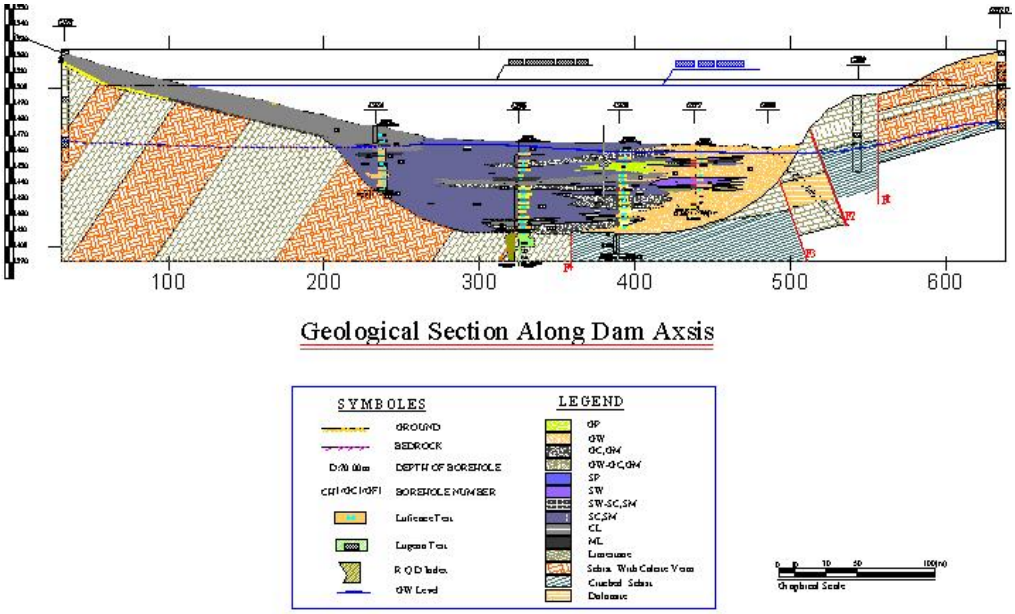
لای (ML)

ضخامت حداکثر این نهشته‌ها در مقطع محور سد حدود۵۹ 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. شکل۳ مقطع زمین‌شناسی‌مهندسی موازی محور سد را نشان می‌دهد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

شکل۲. تغییرات تدریجی دانه‌بندی نهشته‌های آبرفتی ساخت‌گاه
الف) **به‌طرف جناح چپ** ***ب)*** **به طرف جناح راست**



شکل۳. مقطع زمین‌شناسی‌مهندسی 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 اثرلرزه‌های متناوب حاصل از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

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 نهشتهٔ خاکی با ترکیبی از ویژگی‌های خاک، عوامل محیطی و ویژگی‌های زلزله محتمل کنترل می‌شود[۱۴]. در این میان ویژگی‌های دانه‌بندی هر نهشتهٔ 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 شدهٔ آقایان پروفسور یود و ادریس(۱۹۹٦)، استفاده شده است[۱۷]. در این روش نسبت تنش سیکلیک پیش‌بینی شده از زلزله(CSR[1]) به تنش لازم برای ایجاد روان‌گرایی(CRR[2]) 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 شدهٔ سید و ادریس(۱۹۷۱)، قابل محاسبه است[۱۵].

$$CSR = \left(\frac{Tav}{\sigma'_v}\right) = 0.65\left(\frac{a_{\max}}{g}\right)\left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\right)rd$$ رابطه۱

در رابطه یاد شده:

$a_{\max}$: شتاب حداکثر ناشی از زلزله

σ_v : تنش سربار کل

σ'_v : تنش سربار مؤثر

rd : ضریب کاهش تنش

محاسبه ضریب کاهش تنش با استفاده از رابطه۲ ارائه توسط بلیک(۱۹۹٦) امکانپذیر است[۱۰].

$$r_d = \frac{1.0 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5}}{1.0 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.00121z^{2}}$$ رابطه۲

در این رابطه z عمق موردنظر برحسب متر است.

1. Cyclic Stress Ratio
2. Cyclic Resistance Ratio

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

یکی از روش‌های بدست آوردن نسبت تنش لازم برای ایجاد روان‌گرایی(CRR)، استفاده از عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده $(N_1)_{60}$ طبق رابطه (رابطه۳) (راچ، ۱۹۹۸) است[۱۲]. که با استفاده از ضریب مقیاس بزرگی[3] برای بزرگی متناظر با زلزله طرح تصحیح می‌شود. که بر اساس توصیه ICDL، حداکثر بزرگای محتمل[4] در نظر گرفته می‌شود. برای سد چپرآباد شتاب حداکثر ناشی از زلزله (a_{max}) برابر با شتاب حداکثر بزرگای محتمل طرح یعنی g ۰/٤٤ و حداکثر بزرگای محتمل برابر با ۷/٤ ریشتر در نظر گرفته شد.

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

$(N1)_{60cs}$ 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 رابطهٔ ۴ محاسبه شد.

$$(N_1) = \alpha + \beta (N_1)_{60}$$ رابطه٤

ضرایب α و β رابطه۴ بصورت زیر محاسبه و اعمال می‌شوند:

$$\alpha = 0 \quad \text{for } FC \le 5\%$$
$$\alpha = \exp[1.76 - (190/FC^2)] \quad \text{for } 5\% < FC < 35\%$$
$$\alpha = 5.0 \quad \text{for } FC \ge 35\%$$
$$\beta = 1.0 \quad \text{for } FC \le 5\%$$
$$\beta = [0.99 + (FC^{1.5}/1000)] \quad \text{for } 5\% < FC < 35\%$$
$$\beta = 1.2 \quad \text{for } FC \ge 35\%$$

در رابطهٔ ۳، $CRR_{M=7.5}$، نسبت تنش لازم برای ایجاد روان‌گرایی برای زلزله با بزرگای ۷/۵ ریشتر است. برای بزرگای کوچک‌تر از ۷/۵، ضریب تصحیحی به صورت رابطهٔ۵ پیشنهاد شده است(یود و همکاران ،۲۰۰۱)[۱۷].

3.Magnitude Scaling Factor
4. Maximum Credible 4 - Magnitude Scaling Factor
4. M Earthquake

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

$$MSF = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}}$$ 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 رابطهٔ۶ محاسبه شد:

$$CRR = CRR_{M=7.5} * MSF$$ رابطه٦

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

$$FS_L = \frac{CRR}{CSR}$$ رابطه۷

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 جدول۱ 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 به‌طـوری که از خیلی کم($۱۰^{-۷}$cm/s) تا خیلی زیاد($۱۰^{-۲}$cm/s) در نقاط مختلف تغییر می‌کند، با این‌حال ضریب تراوایی در گمانه‌های اکتشافی بیش‌تر در محدوده $۱۰^{-۳}$ cm/s تا $۱۰^{-۵}$ است. همچنین به دلیل هوازدگی و خردشدگی بسیار زیاد قشر سطحی سنگ بستر با ضخامتی در حدود ۱۰متر (از عمق ۵۹ تا ۶۰ متری سطح زمین) و نفوذپذیری بیش از ۱۰۰ لوژون در این قسمت، این بخش از سنگ‌بستر نیز جزو آبرفت به شمار رفته و لایهٔ نفوذپذیر با ضخامتی درحدود 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 حدود۴۰ متری بیش از ۱۰۰ لوژن و بعد از آن با روند کاهشی در عمق ۵۰ متری به ۱۶ لوژن می‌رسد[۲]. در شکل٤ مقطع هم‌نفوذپذیری موازی محورسد،

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

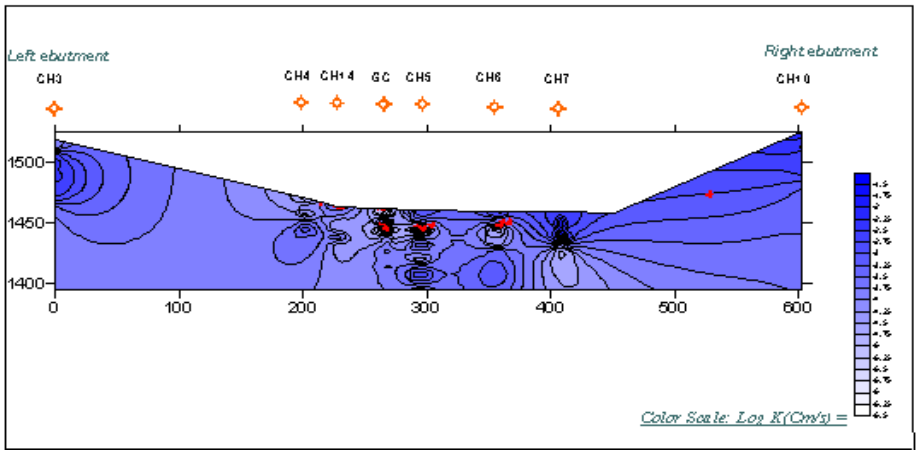
[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

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

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

Borehole	Depth(m)	$(N1)_{60}$	FC <0.076mm	alfa	beta	$(N1)_{60cs}$	rd	CSR	MSF	CRR	FS_l
CH4	7	22.08	-	0	1	22.08372	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	0.266861	1.038	0.104	0.403
	16	10.49	-	0	1	10.49	0.728	0.255036	1.038	0.117	0.478
	27.75	14.88	-	0	1	14.88192	0.517	0.214183	1.038	0.159	0.770
CH5	5	18.37	-	0	1	18.37421	0.965	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
	35.5	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
CH7	14	12.22	1	0	1	12.21789	0.794	0.342359	1.038	0.133	0.404
	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	0.581	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	0.869358	1.021623	9.056932	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	3.256982	0.471	0.233352	1.038	0.060	0.267



شکل٤. مقطع هم‌نفوذپذیری موازی با محور سد چپرآباد (بستر آبرفتی)

۳. ویژگی‌های پی آبرفتی از دیدگاه آب‌بندی

از دیدگـاه آب‌بـندی، در داخـل مخزن سد چپرآباد، کف‌بندی[5] طبیعی با نهشته‌هایی از نوع سیلتی‌ـ رسی وجود دارد که در سراسر بستر مخزن گسترش دارد و می‌تواند در آب‌بندی مخزن و پی‌آبرفتی بستر مخزن تأثیر به‌سزایی داشته باشد. پیوستگی این کف‌بند طبیعی در بعضی نقاط از جملـه محـدودهٔ محور، به‌دلیل شستگی و فرسایش از بین رفته است. با اجرای کف‌بند رسی در زیـر پوسـتهٔ بالادسـت سـد می‌توان این قسمت از کف‌بند طبیعی موجود را ترمیم کرد و بر کارآیی آن افزود.شکل۵ نمایی از گسترش کف‌بند طبیعی مخزن سد چپرآباد را نشان می‌دهد.

شکل۵. نمایی از گسترش کف‌بند طبیعی در بستر مخزن (دید به‌سمت جنوب از تکیه‌گاه راست)

5.Clay Blanket

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

مسئلهٔ 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 پردهٔآب‌بند که در سمت چپ پی‌آبرفتی حفاری شدند آرتزین کردند. پدیدهٔ آرتزین، نشانهٔ وجود سفره‌های تحت‌فشار در پی است. آرتزین این گمانه‌ها پایدار بوده و جندین روز با دبی‌های مختلف(در بعضی گمانه‌ها حدود۱۰ لیتر در دقیقه) ادامه داشت. عمق آرتزین شدن این گمانه‌ها در محدودهٔ بین ۲۵ تا ۳۵متری قرار داشت. وجود شرایط آب‌زیرزمینی فوق در پی سد چپرآباد، نویدبخش وجود کف‌بند طبیعی در عمق حدود۳۰ 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 بهینهٔ 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؛ به‌عبارت دیگر در شبکهٔ جریان تعداد خطوط افت پتانسیل در مقایسه با حالت نبود پوشش، افزایش می‌یابد. برای محاسبهٔ ابعاد پوشش، روابط مختلفی وجود دارد از آن جمله می‌توان به‌روش بنت[۶] اشاره کرد. معادله اصلی بنت در رابطه (۳-۸) ارائه شده است[۹].

$$a = \sqrt{\frac{K_b}{K_f . Z_f . Z_b}}$$ رابطه۸

6. Bennet

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

در رابطه ۸:

K_b : نفوذپذیری کف‌بند، که معادل با هسته‌رسی و برابر ۱×۱۰^{-۶} (سانتی‌متر بر ثانیه) است.

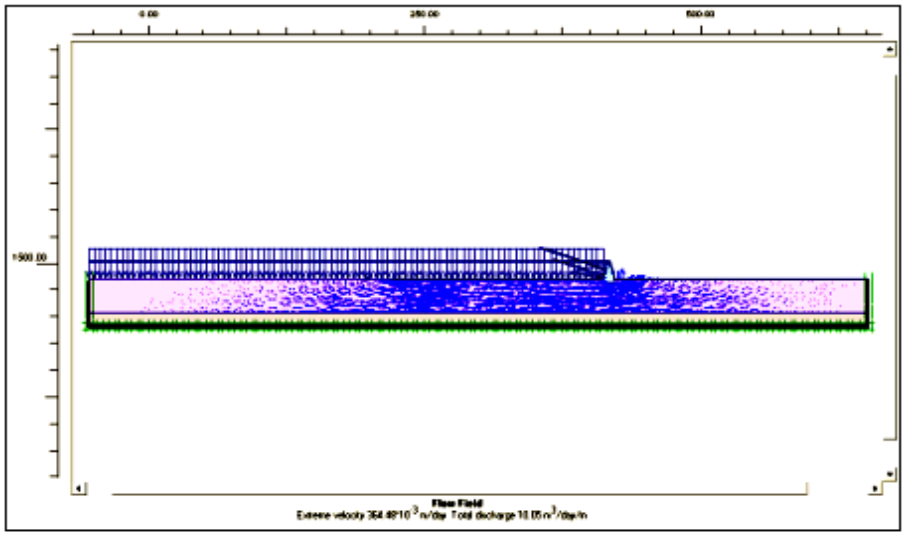
Z_b : ضخامت کف‌بند، که معادل ۱/۵ متر در نظر گرفته شد.

K_f : نفوذپذیری پی‌آبرفتی که به‌طور متوسط، ۳×۱۰^{-۳} (سانتی‌متر بر ثانیه) منظور شد..

Z_f : ضـخامت شالوده نفوذپذیر از کف هسته‌رسی که در حدود۶۴= ۶-۷۴ متر منظور شد (۶ متر از پی برداشته می‌شد).

a: پارامتری که جهت تعیین طول موثر کف‌بنداستفاده می‌شود.

بـا ایـن روش، ابعاد پوشش‌نفوذناپذیر لازم برای ساخت‌گاه سد چپرآباد، طولی حدود ۷۰۰ مـتر بدسـت مـی‌آیـد. بـرای بررسی تأثیر پوششی با این طول، از نرم‌افزارPlaxis استفاده شد. نتایج تحلیل نشان داد با به‌کارگیری این‌روش،میزان نشت از ۲۵ به۱۰ مترمکعب در روز کاهش می‌یابد و عامل ایمنی مصالح در برابر شیب هیدرولیکی خروجی در پایین‌دست از ۰/۸۳ به ۲/۷ مـی‌رسـد(شـکل٦). عـلاوه بـر هزیـنهٔ سنگین اجرای این روش، به دلیل شیب زیاد تکیه‌گاه‌ها بـه‌خصـوص تکـیه‌گـاه راست، امکان اجرای پوشش‌آب‌بند وجود ندارد و در صورت امکان با هزینهٔ زیادی همراه خواهد بود.



شکل٦. بررسی تأثیر پوشش‌آب‌بند در کاهش نشت با استفاده از نرم‌افزار Plaxis

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

۱-۲. استفاده از ژئوسنتتیک‌ها[7]:

ژئوممبرآن‌ها به‌عنوان نوع خاصی از ژئوسنتتیک‌ها در هرجایی که کنترل جریان آب یا سایر مایعـات مدنظر باشد کاربرد دارند. این‌مواد به‌دلیل طبیعت پلیمری خود، نفوذپذیری و ضخامت اندکی دارند. به همین دلیل کاربردهای گسترده‌ای در سازه‌های کنترل جریان آب، یافته است[۴]. اسـتفاده از ژئوممـبرآن‌ها به دو صورت آب‌بند قائم و افقی در ساخت‌گاه سد چپرآباد می‌تواند گزیـنهٔ قـابل بحثـی باشد. نتایجی که در طراحی پوشش‌آب‌بند با استفاده از روش بنت به‌دست آمـد نشان داد ابعاد لازم برای آب‌بندی با پوشش کاملاً نفوذناپذیر(ژئوممبران)، حدود ۵۰۰ متر اسـت. اجـرای ژئوممـبران بـا ایـن طول، به دلیل وسیع‌تر بودن مخزن در بالادست، ابعاد بسیار زیـادی را شـامل می‌شود. هزینهٔ لازم برای اجرای این روش به‌خصوص در ساخت‌گاه‌هایی که مصالح ریزدانه رسی در دسترس باشد اقتصادی به نظر نمی‌رسد.

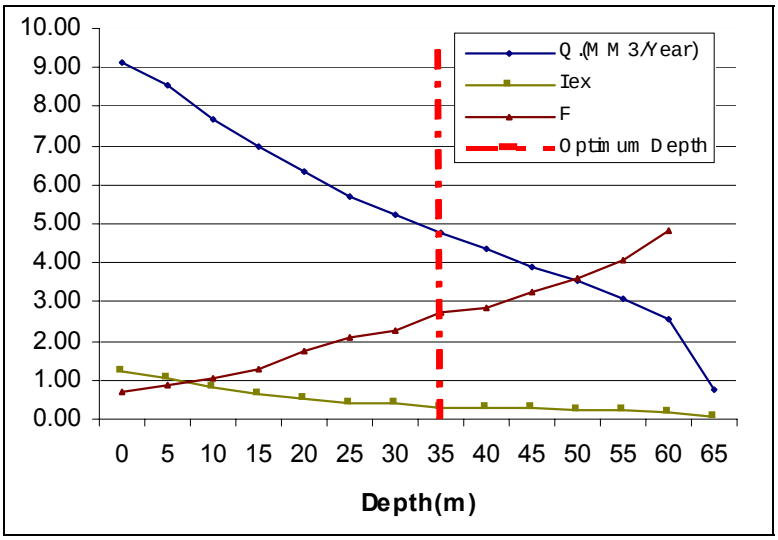
۲. آب‌بندهای قائم

در طراحـی این‌نوع آب‌بندها در لایه‌های نفوذپذیر با ضخامت زیاد، یکی از عوامل مؤثر در کیفیـت طراحـی و هزینه‌های اجرای آن، عمق لازم برای آب‌بندی است. تصمیم‌گیری در مورد بـه‌کارگـیری آب‌بـند کـامل یـا معلـق و بدست‌آوردن عمق بهینهٔ در آب‌بندهای معلق، یکی از مـراحل اساسی در طراحی این نوع آب‌بندها به‌شمار می‌رود. به همین‌منظور از آنالیز تراوش با اسـتفاده از بـرنامهٔ اجـزای محـدود Plaxis اسـتفاده شد. در این بررسی با مدل‌سازی دو نوع آب‌بـند قـائم بـا نفوذپذیـرهای در حد(cm/s) ۱×۱۰^{-۵} و ۱×۱۰^{-۷}، به ترتیب برای پرده‌آب‌بند و دیـوارآب‌بند و با فرض محتاطانهٔ نفوذپذیری پی در حد(cm/s) ۱×۱۰^{-۲}، میزان کاهش نشت با افـزایش عمـق آب‌بـندی و تأثیر آن در افزایش ضریب اطمینان نهشته‌های پایین‌دست در مقابل نـیروهـای مخـرب نشـت(پایپیـنگ) مورد تحلیل قرار گرفت. شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب نتایج بررسی در حالت استفاده از پردهٔ آب‌بند و دیوار آب‌بند را نشان می‌دهد.

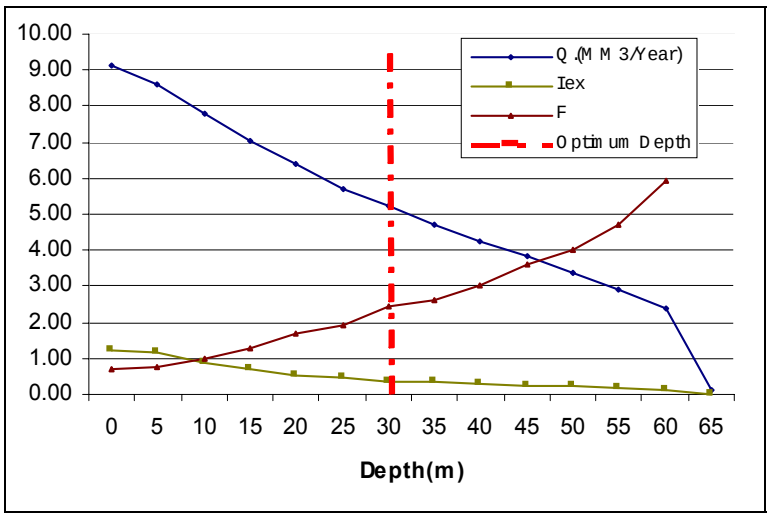
7. Geosynthetics

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]



شکل۷. تغییرات مقدار نشت، شیب هیدرولیکی خروجی و ضریب اطمینان در مقابل Piping با افزایش عمق آب‌بند قائم

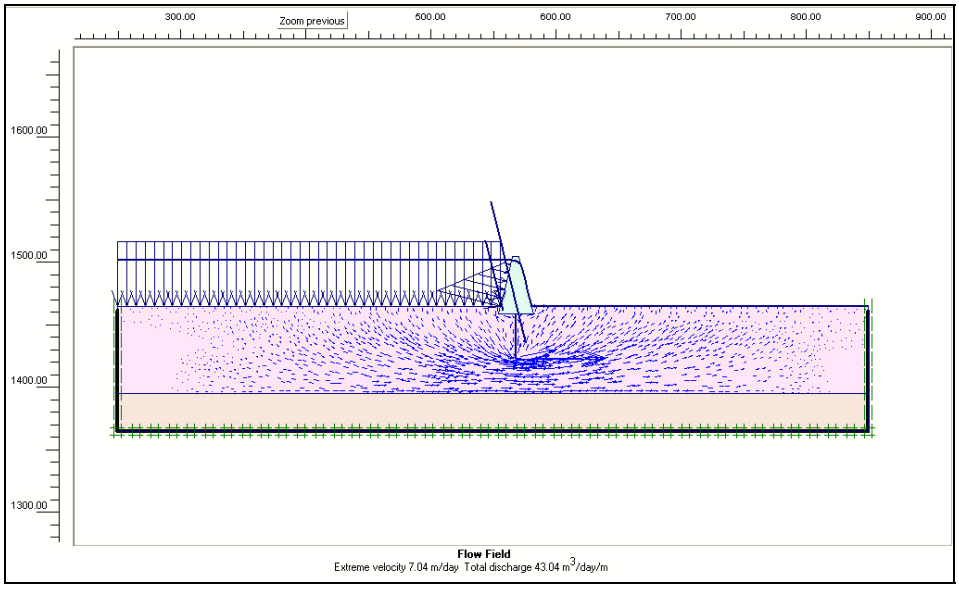


شکل۸. تغییرات مقدار نشت، شیب هیدرولیکی خروجی و ضریب اطمینان در مقابل Piping با افزایش عمق دیوارآب‌بند و عمق بهینه

باتوجه به شکل‌های (۴-۲ و۴-۳)، عمق بین ۳۰ تا ۳۵ متری عمق بهینه‌ای برای آب‌بندهای قـائم اسـت. در ایـن عمـق، عـلاوه بر این‌که میزان نشت به نصف رسیده و به حدود ۴ درصد

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

مخـزن کـاهش یافـته اسـت. ضریب اطمینان در مقابل نیروی مخرب نشت نیز در این عمق، با فرض شیب هیرولیکی بحرانی در حدیک، از ۰/۶۹ به بیش از ۲/۵ رسیده است. که با به‌کارگیری زهکـش و فیلـتر در پاییـن‌دسـت مـی‌تـوان این ضریب را به بیش از ۴ (حد موردنیاز و ایمن) افزایش داد. شکل۹ میزان تأثیر آب‌بند قائم با عمق ۳۵ متری را نشان می‌دهد.



شکل۹. تأثیر پردهٔ آب‌بند با عمق ۳۵ متری در افزایش مسیر جریان با برنامهٔ Plaxis

۲-۱. روش گودبرداری یا ترانشه‌زنی[8]:

این روش در جایی به کار برده می‌شود که ضخامت نهشته‌های آبرفتی یا نفوذپذیر کم‌تر از ارتفاع سد و کم‌تر از ۳۵ متر باشد. در این‌حالت این نهشته‌ها برداشته شده و مصالح نفوذناپذیر مناسب جای‌گزین می‌شود.

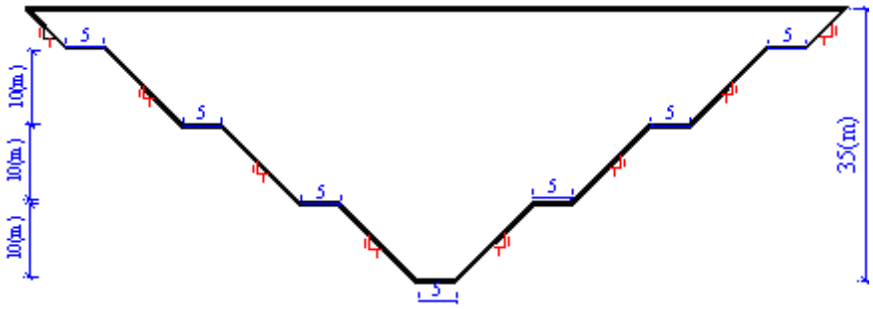
در سـاخت‌گـاه سـدچـپرآباد به دلیل قرارگیری سطح آب‌زیرزمینی در عمق حدود ۵ متری سـطح زمیـن، اجـرای عملـیات ترانشـه‌زنی بسیار مشکل و پرهزینه خواهد بود؛ زیرا در صورت

8. Open Trench

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

بـه‌کارگـیری ایـن‌روش با عمق حدود ۳۵ متری و با مقطع فرضی نشان داده شده در شکل۱۰، حداقـل حـدود نـیم میلـیون متر مکعب گودبرداری و جای‌گزینی با مصالح مناسب لازم است. هزینهٔ انجام چنین عملیاتی با توجه به لزوم عملیات زهکشی و توجه به محدودیت فصل کاری منطقه، غیراقتصادی و تقریباً غیرممکن است.



شکل۱۰. مقطع اولیه و فرضی برای اجرای عملیات گودبرداری با عمق ۳۵ متری

۲-۲. روش پردهٔ 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 پی‌آبرفتی سد چپرآباد است. از این روش در ایران در سد حنا در۳۰ کیلومتری شهرستان سمیرم استفاده شده است و پرده‌ای با عمق حدود ۳۰ متر اجرا شده است[۳]. استفاده از این روش، در پی‌آبرفتی به دلیل زمان‌بر بودن، خورند بیش‌تر و همچنین هزینهٔ تهیه و نصب مانشت تیوب نسبت به تزریق معمولی با هزینهٔ بسیار زیادی همراه است، ولی در مقایسه با روش‌هایی چون ترانشه‌زنی و پوشش‌آب‌بند کم‌هزینه‌تر و مناسب‌تر است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

۲-۳. روش دیوارآب‌بند:

زمانی‌که ضخامت نهشته‌های آبرفتی و یا نفوذپذیر بیش از۳۵متر باشد، ترانشه‌ای به صورت بسته در طول محل تماس هسته سد با پی و با عمق تعیین شده، برای رسیدن به لایهٔ 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 هیدروفرز که قادر است در زمانی بسیار کوتاه‌تر پانل‌های دیوار آب‌بند را تا اعماق زیادی به صورت قائم وکنترل شده حفاری کند، تزریق با مانشت تقریباً منسوخ شده است؛ اما در ساخت‌گاه سد چپرآباد به دلیل روان‌گرایی نهشته‌های پی آبرفتی، استفاده از این‌روش 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 این‌حال ضریب تراوایی در گمانه‌های اکتشافی، بیش‌تر در محدودهٔ 10^{-3} cm/s تا 10^{-5} است. مقطع هم‌نفوذپذیری در امتداد موازی با محور سد، کاهش عمومی نفوذپذیری مصالح با افزایش عمق را نشان می‌دهد.

۳. مقایسهٔ 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 هزینهٔ آن، روش دیوار آب‌بند را روش مناسب نشان می‌دهد. اما انتخاب و اجرای این‌روش به دلیل

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

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

۴. با توجه به‌مقاطع هم‌نفوذپذیری، زمین‌شناسی‌مهندسی و نتایج آنالیز تراوش، احداث پردهٔ آب‌بند معلق با عمق متوسط ۳۵ متر به‌همراه فیلتر و پردهٔ 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 حدود۱۰۰ 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 چپرآباد، نشان می‌دهد در صورت وقوع زلزله با بزرگای بیشینهٔ 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 روانگونگی 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. «*تزریق آبرفت پردهٔ آب‌بند سد حنا*»، مجموعه مقالات کمیتهٔ ملی سدهای بزرگ ایران(۱۳۷۸).

۴. فیضی ماسوله، ش. «*کاربرد ژئوممبران در دیوارهای آب‌بند*»، سومین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه نیرو، تهران(۱۳۸۱).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

۵. کمیتهٔ ملی سدهای بزرگ ایران. «*تراوش در پی سد و شیوه‌های کنترل آن*» انتشارات دفتر فنی آب- وزارت نیرو، نشریهٔ شمارهٔ۶(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" Tanse, 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 ofGeotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(10) 817-833.

11. Kunitomo, N. "Design and Construction of Embankment Dams" Dept.of Civil Eng., Aichi Inistitute 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,

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]

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 1998NCEER/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" J*ournal 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 Reportfrom the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of LiquefactionResistance of Soils" *Journal of Geotechnical and Geoenviro –nmental Engineering,* ASCE,127(10).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.1.1.1]