بررسی پایداری دامنه‌های سازند گچساران واقع در مخزن سد گتوند تحت تأثیر آبگیری مخزن و انحلال مصالح نمکی

بهمن بقاءدشتکی، ماشااله خامه‌چیان:
گروه زمین‌شناسی‌مهندسی دانشگاه تربیت‌مدرس
khamechm@modares.ac.ir
سید محمد حسن نظری : شرکت مهاب قدس

تاریخ: دریافت ۸۹/۲/۷ **پذیرش** ۸۹/۱۲/۴

چکیده

مخزن سد گتوند با طولی بیش از نود کیلومتر را سازندهای گچساران، میشان، آغاجاری و بختیاری احاطه کرده‌اند. مسئلهٔ مهم در مخزن سد حضور سازند گچساران است که حاوی حجم چشم‌گیری از نمک است و به فاصلهٔ چهار کیلومتر، در بالادست محور سد قرار دارد. شور شدن آب سد در نتیجهٔ انحلال نمک در آب مخزن می‌تواند عوارض جدی زیست محیطی به همراه داشته باشد. علاوه بر انحلال مستقیم نمک در تماس با آب مخزن، ناپایداری دامنه‌ای نیز می‌تواند بر این فرایند تأثیرگذار باشد. لغزش‌های احتمالی در دامنه‌های حاوی نمک، حجم چشم‌گیری از نمک را در مدت زمان کوتاهی در تماس با آب مخزن قرار خواهد داد. در این تحقیق به منظور بررسی فرایند زمین‌لغزش در محدودهٔ مخزن، و همچنین تأثیر انحلال لایه‌های نمکی بر لغزش، ویژگی‌های مهندسی مصالح غالب سازنده توده‌های سنگی با استفاده از آزمایش‌های مکانیک سنگ تعیین شد. سپس نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های سنگ بکر و روش GSI برای برآورد پارامترهای مهندسی توده سنگ استفاده شد. از طرف دیگر برای تعیین تأثیر انحلال لایه‌های نمکی بر لغزش، نمونه‌هایی از نمک به آزمایشگاه منتقل و با استفاده از روش سیرکولاسیون میزان انحلال‌پذیری آن در شرایط مختلف

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

بررسی شد، و نتایج به شرایط مخزن تعمیم داده شد. در نهایت شرایط پایداری دامنه با توجه به ترازهای مختلف آب‌گیری مخزن، و همچنین تأثیر انحلال لایه‌های نمکی، با مدل‌سازی حالت‌های مختلف در نرم‌افزار SLIDE تجزیه و تحلیل شد. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که لغزش‌ها در محدودهٔ مخزن بیش‌تر کم‌عمق هستند و تحت تأثیر انحلال لایهٔ نمکی ایجاد می‌شوند.

واژه‌های کلیدی: سد گتوند، زمین لغزش، انحلال پذیری، نرم افزار SLIDE، سیرکولاسیون

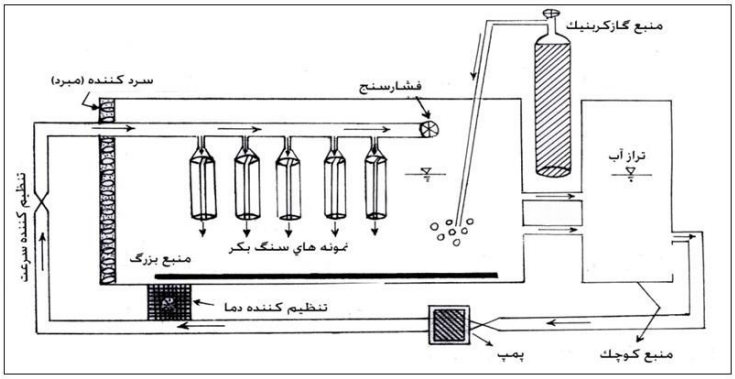
مقدمه

امروزه سدها از سازه‌های آبی مهمی به‌شمار می‌آیند که در همه نواحی جهان به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه خشک برای مدیریت آب‌های سطحی احداث می‌شوند. این سازه‌ها در ارتباط تنگاتنگ با شرایط زمین‌شناسی هستند که در آن ساخته شده‌اند. لذا باید تمامی خطرهای موجود در محدودهٔ سد و مخزن بررسی شده و تا حد امکان رفع یا تقلیل یابند. اگر سد در مناطقی که از سنگ‌های تبخیری تشکیل شده باشد ساخته شود مورد تهدید پدیدهٔ کارستی شدن، انحلال، نشست ساختگاه و در مواقعی خورندگی آب‌های عبوری قرار می‌گیرند[۱]. پدیدهٔ انحلال به عوامل متعددی از جمله ویژگی‌های حلال و مادهٔ حل شونده، حجم و سرعت جریان حلال درگیر، سطح در معرض تماس، دما، فشار، اسیدیته محیط و تأثیر مواد محلول بستگی دارد [۲]. شاید اولین کسانی که در این مورد پژوهش‌های نسبتاً جامعی را شروع کردند کالکانو و آلزورا باشند که در سال ۱۹٦۷ پدیدهٔ انحلال‌پذیری در سنگ‌های سولفاته را بررسی کرده و از دیدگاه مهندسی مورد بحث قرار دادند[۳]. انحلال ژیپس می‌تواند عامل خطراتی در ارتباط با نشست و ریزش باشد. ژیپس، سولفات کلسیم آب‌دار یک مادهٔ انحلال‌پذیر است جایی که لایهٔ ضخیمی از آن وجود داشته باشد غارهای انحلالی بزرگی در آن توسعه می‌یابد که با سیمای کارستی سنگ‌های کربناته و دولومیتی قابل مقایسه است [٤]. در این تحقیق به منظور بررسی ویژگی‌های انحلال‌پذیری تودهٔ نمکی موجود در ساخت‌گاه سد گتوند نمونه‌های استوانه‌ای تهیه، و پس از آماده‌سازی، با روش سیرکولاسیون آزمایش شده است. به‌طور کلی در

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

این آزمایش آب از یک مخزن به درون نمونهٔ مورد نظر پمپ می‌شود و دوباره به مخزن باز می‌گردد. تکرار این این عمل باعث انحلال نمونهٔ مورد نظر می‌شود[۵]. طرح کلی دستگاه تعیین انحلال‌پذیری سنگ‌ها(آزمایش سیرکولاسیون) در شکل ۱ نشان داده شده است[٦].



شکل ۱. طرح کلی دستگاه تعیین انحلال‌پذیری سنگ‌ها[٦]

علاقه زیادی برای فهم و پیش‌بینی پدیده‌های فاجعه‌بار از قبیل سیل، زلزله و بهمن وجود دارد که به‌صورت نادر یا متناوب اتفاق می‌افتند و نتایج فاجعه‌بار محیطی به بار می‌آورند[۷]. زمین‌لغزش وقتی خطرناک می‌شود که از طرف فعالیت‌های بشری از بیرون تحریک شود. از جمله فاکتورهای محرک می‌توان به باران شدید، حرکات زلزله، تغیرات آب زیرزمینی و جریان‌های فرسایشی سریع که باعث کاهش مقاومت برشی در مواد تشکیل دهندهٔ دامنه می‌شود اشاره کرد که تأثیر منفی در پایداری دامنه دارند [۱]. زمین‌لغزش از آب‌گیری مخزن نیز تأثیر می‌پذیرد و می‌تواند تهدیدی برای سد و عامل تلفات جانی باشد [۸]. یکی از مثال‌های بارز در این زمینه فاجعهٔ مخزن سد واینت ایتالیا بر روی رودخانه پیاو است که در اکتبر سال ۱۹٦۳ اتفاق افتاد. برای کاهش این نوع تلفات عظیم جانی و مالی ارزیابی آب‌گیری مخازن دارای خطر زمین‌لغزش به منظور پیش‌گیری از وقوع زمین لغزش مهم و مفید خواهد بود [۹]. مدل‌های ژئوتکنیکی یک روش مهم در ارزیابی زمین‌لغزش‌هاست و دارای تحلیل‌های خاص منطقه و دامنه از نظر شرایط مهندسی است [۱]. روش‌های بررسی پایداری دامنه در سابقه و تئوری با هم متفاوتند بنا بر این نتایج تحلیل به تئوری روش وابسته است. در واقع مکانیسم

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

شکست دامنه با جمع‌آوری اطلاعات و مشاهدات صحرایی تعیین می‌شود و سپس روش مناسب تحلیل انتخاب می‌گردد. بسیار مهم است که برای درک بهتر روش‌های تحلیل شکست دامنه تحقیق کنیم، نقاط ضعف و قوت آن‌ها را بشناسیم و جنبهٔ اجرایی بودن روش‌های تحلیل را ارائه کنیم [۱۰]. تفاوت اساسی روش تعادل حدی و المان محدود این است که روش تعادل حدی بر اساس تعادل استاتیکی و روش المان محدود بر پایه رابطه تنش-کرنش قرار دارد. روش‌های تعادل حدی سال‌هاست که تثبیت شده‌اند و بنا بر این هنوز در کارهای اجرایی تحلیل پایداری استفاده می‌شوند. سادگی و ارتباط خوب نتایج از مزایای این روش‌ها به‌شمار می‌رود [۱۱].

مخزن سد گتوند با طولی بیش از نود کیلومتر را سازندهای گچساران، میشان، آغاجاری، لهبری و بختیاری احاطه کرده‌اند. مسئلهٔ مهم در مخزن سد گتوند حضور سازند گچساران است که شامل لنزهای ضخیم نمکی است. حل شدن حجم چشم‌گیری نمک در آب مخزن پس از آب‌گیری سد، تهدیدی جدی برای کیفیت آب به‌شمار می‌رود. هر گونه لغزش در دامنه‌های متعلق به سازند گچساران علاوه بر انتقال حجم چشم‌گیری از مصالح به درون مخزن، باعث خواهد شد که رخ‌نمون‌های جدیدی از مواد انحلال‌پذیر در معرض تماس با آب سد قرار گیرد. انحلال مداوم رخ‌نمون‌های جدید نمکی در پیشانی دامنه به طور مکرر لغزش در دامنه را به طور فزاینده‌ای تحریک خواهد کرد. با توجه به تأثیر متقابل انحلال و لغزش، تحلیل پایداری دامنه پیچیده خواهد بود[۱۲].

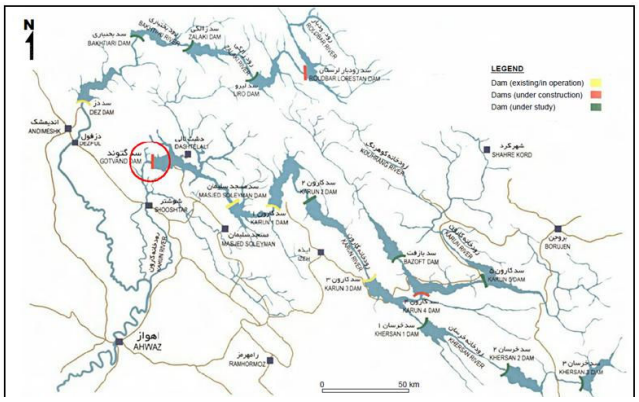
منطقهٔ پژوهش

در این تحقیق شرایط پایداری دامنه‌های متعلق به سازند گچساران، واقع در ساحل چپ مخزن سد گتوند بررسی شده است. طرح سد و نیروگاه گتوند علیا یکی از طرح‌های بزرگ عمرانی کشور است. ساختگاه سد در میان طول‌های جغرافیایی '۴۹ °۴۸ تا '۵۷ °۴۸ شرقی و عرض‌های جغرافیایی '۱۲ °۳۲ تا '۱۷ °۳۲ شمالی قرار دارد که برروی رودخانه کارون در کیلومتر ۳۸۲/۸ از مصب رودخانه و در ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان شوشتر در حال احداث

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

می‌باشد. سدگتوند پایین‌ترین سد مخزنی است که بر روی رودخانهٔ کارون ساخته می‌شود. شکل ۲ موقعیت سد گتوند و دیگر سدهای منطقه را نشان می‌دهد.



شکل۲. موقعیت سد گتوند و دیگر سدهای منطقه [۱۳]

روش انجام تحقیق

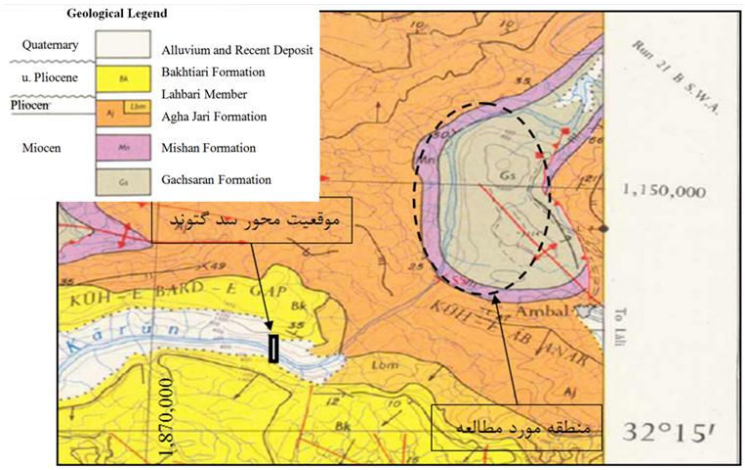
در این تحقیق به منظور دست‌یابی به پارامترهای ژئوتکنیکی تودهٔ مورد نظر، برای انجام تحلیل پایداری دامنه، بررسی‌ها در دو بخش جداگانه شامل، پژوهش‌های صحرایی(زمین شناسی و زمین‌شناسی‌مهندسی) و آزمایشگاهی صورت گرفته است. سپس نتایج این بررسی‌ها در مدل‌های نرم‌افزاری وارد شده و در ارتباط با عوامل مؤثر دیگر در ناپایداری دامنه، تحلیل شده است.

زمین‌شناسی عمومی منطقه

سازندهای زمین‌شناسی که در مخزن سد گتوند قرار دارند، در برگیرندهٔ سازندهای گروه فارس هستند که در بخشی از زاگرس موسوم به فرو افتادگی دزفول قرار گرفته است. این تشکیلات جوان‌ترین تشکیلات زاگرس محسوب می‌شوند. این سازندها از قدیم به جدید شامل سازندهای گچساران، میشان، آغاجاری و کنگلومرای بختیاری است [۱٤]. شکل۳ نقشهٔ زمین‌شناسی منطقه همراه با موقعیت محل بررسی شده و محور سد را نشان می‌دهد.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]



شکل۳. نقشه زمین‌شناسی منطقه (موقعیت محور سد و منطقهٔ بررسی شده)

شکل ٤ نیز موقعیت سازند گچساران و دیگر سازندها را در مخزن سد گتوند نشان می‌دهد.

شکل٤. موقعیت سازندهای زمین‌شناسی در مخزن سد گتوند

چنان‌که در شکل٤ نیز قابل مشاهده است قسمت‌های سطحی سازند گچساران بیش‌تر شامل انیدریت و ژیپس است که هوازدگی شدیدی را متحمل شده و در طول دو کیلومتر در در مخزن سد گسترش یافته است. سازند گچساران در این محدوده با طولی حدود ۲/۵ کیلومتر در تماس با آب مخزن قرار خواهد گرفت.

بررسی‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق به منظور تعیین پارامترهای مهندسی مصالح سازندهٔ توده، نمونه‌هایی از مارن، انیدریت وهالیت حاصل از مغزه‌های حفاری برای انجام آزمایش‌های مکانیکی و تعیین

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

خصوصیات فیزیکی استفاده شده است. علاوه بر این، و با توجه به تأثیر فرایند انحلال در ناپایداری دامنه در محدودهٔ سد، آزمایش‌های انحلال‌پذیری نیز بر روی نمونه‌های نمکی انجام شده که جزئیات مربوط به این آزمایش‌ها در ادامه آمده است. جدول۱ نتایج آزمایش‌های خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

جدول۱. نتایج آزمایش‌های تعیین خصوصیات فیزیکی

نام گمانه	عمق نمونه (m)	نوع نمونه	دانسیته (gr/cm^3)			تخلخل
			خشک	طبیعی	اشباع	(٪)
SA-8	۷۷/۷۵–۷۸	Anydrite	۲/٦۹	۲/۷۰		
SA-9	۷۲/۳۰–۷۲/٦۰	Marl	۱/۹۷	۲/۱۳		
	۸۰/٦۵–۸۱	Salt	۲/۱۷	۲/۱۷		
	۱٤۱/۷۰–۱٤۲	Salt	۲/۲۰	۲/۲۰		
SA-10	۲۰/۵۰–۲۰/۸۵	Marl	۱/۸۱	۱/۸۷		
	٤۱/۵۰–٤۱/۸۰	Marl	۱/۹۲	۲/۰۲		
	۲۷–۳۰–۲۷/٦۰	Salt	۲/۱۰	۲/۱٤		
	۵٤–۵٤/٤	Salt	۲/۲۰		۲/۳۳	۱۲/٦۱
	٦۰/۵۰–٦۰/۸۰	Marl	۱/۹٦	۲/۰۵		
	۱٤۳/۲۰–۱٤۳/٤۵	Marl	۲/۵۸		۲/۷۰	۱۲/۱۲
SA-11	۹۲–۹۲/٤۰	Salt	۲/۱۸	۲/۱۸		
SA-13	۲٤/٤۰–۲۵	Salt	۲/۱۵	۲/۱۵		
	۹۲/۸۰–۹۳/۲۰	Salt	۲/۱٤	۲/۱۵		
SA-14	٤۹/۲۰–٤۹/۵۰	Salt	۲/۱٤	۲/۱٤		
	۵٦/۳۰–۵٦/۷۰	Anhydrite	۲/٦۰		۲/۷۰	۹/۰۲
	۷۰–۷۰/٤۰	Anhydrite	۲/٦۰		۲/۷٤	۹/۹۳
SA-15	۳۱/۳۰–۳۱/۷۰	Marl	۱/۹٦	۲/۱۹		

جدول ۲ نیز نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک محورهٔ انجام شده روی مصالح سازنده توده را نشان می‌دهد.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

جدول۲. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوره

نام گمانه	عمق نمونه	نوع نمونه	ابعاد نمونه (cm)			مقاومت فشاری تک محوره (MPa)
			طول	قطر	قطر/ طول	
SA-8	۱۵/۵۰–۱۶	Salt	۱۴/۰۳	۶/۱	۲/۳	۲۵/۷
	۹۳/۱۰–۹۳/۴۰	Salt	۱۴/۳	۵/۷	۲/۵	۲۷/۷
SA-9	۸۰/۶۵–۸۱	Salt	۱۵/۵	۵/۹	۲/۶	۲۷/۹
	۱۴۷–۱۴۷/۳۵	Marl	۱۵/۵	۶/۳	۲/۵	۰/۷۸
SA-11	۹۲–۹۲/۴۰	Salt	۱۳/۷	۵/۸	۲/۴	۲۳/۹
	۱۰۴/۳۰–۱۰۴/۷۰	Salt	۱۴/۲	۵/۹	۲/۴	۲۷/۶
SA-12	۷۷/۵۰–۷۷/۸۰	Anhydrite	۱۵	۶/۳	۲/۴	۳۹/۸
SA-13	۵۹/۳۵–۵۹/۹۰	Marl	۱۴/۴	۶/۳	۲/۳	۱/۱
SA-14	۲۳–۲۳/۳۵	Marl	۱۴/۷	۶/۱	۲/۴	۰/۶۷
	۶۳/۲۰–۶۳/۶۰	Salt	۱۴/۸	۵/۹	۲/۵	۳۰
SA-15	۳۱/۳۰–۳۱/۷۰	Marl	۱۴/۷	۶/۱	۲/۴	۰/۶
	۳۹/۳۰–۳۹/۶۰	Marl	۱۵	۶	۲/۵	۰/۹
	۶۰/۶۰–۶۱	Anhydrite	۱۶/۴	۶/۳	۲/۶	۳۷/۲

تعیین پارامترهای توده سنگ

نتایج حاصل از آزمایش بر روی نمونه‌های سنگ بکر و روش GSI برای تعیین پارامترهای توده سنگ استفاده شد. با توجه به شرایط زمین‌شناسی تودهٔ سنگ مقدار عدد GSI برای مصالح مارنی و انیدریتی در محدوده دایره A و برای مصالح نمکی در محدودهٔ دایره B تعیین شد (شکل ۵).

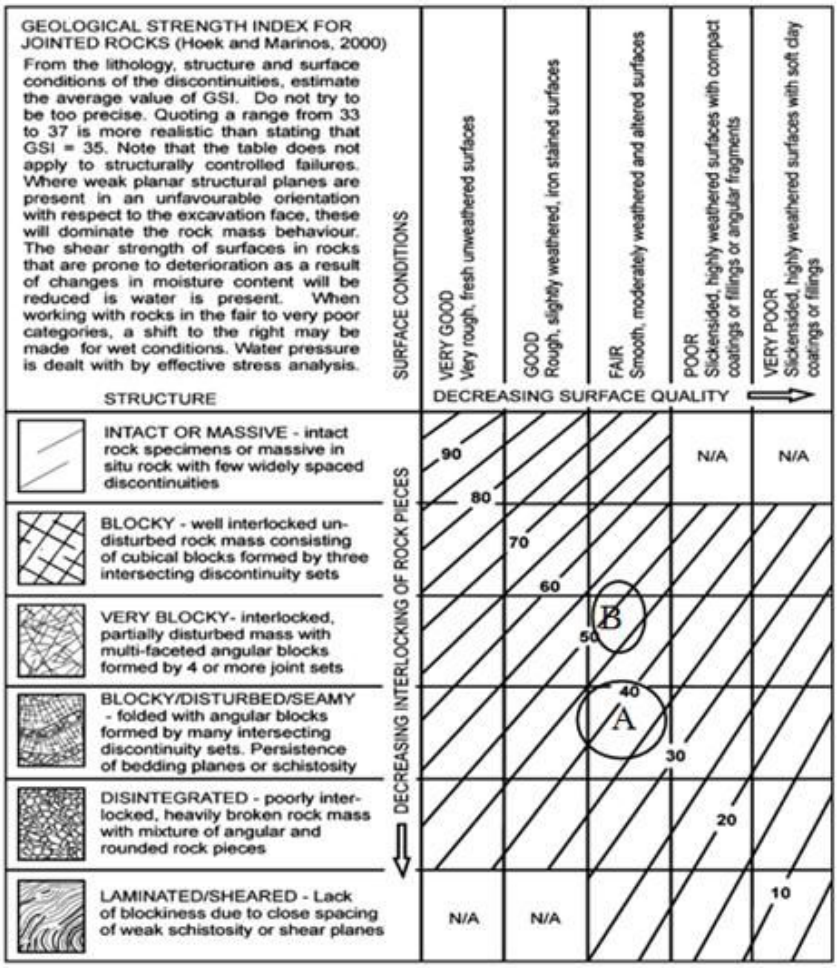
سپس با وارد کردن عدد GSI مصالح مختلف و همچنین نتایج حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی در نرم‌افزار Rockdata پارامترهای توده سنگ برای مصالح مختلف تعیین شد. جدول ۳ پارامترهای توده سنگ برای مصالح مختلف سازند گچساران را نشان می‌دهد.

چنان که قبلاً نیز ذکر شد حل شدن لایه‌های نمکی موجود در سازند گچساران و در نتیجه حذف این لایه‌ها از دامنه بر فرآیند زمین‌لغزش در دامنه تأثیرگذار است. در این تحقیق به منظور تعیین میزان انحلال نمک موجود در مخزن، نمونه‌هایی استوانه‌ای از نمک تهیه، و پس از آماده‌سازی تحت تأثیر آب کارون و با روش سیرکولاسیون آزمایش شده است.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

سیرکولاسیون یکی از روش‌های تعیین انحلال‌پذیری سنگ‌ها است که با به گردش در آوردن حلال از میان یک مجرای باریک با ابعاد مشخص در یک نمونه میزان انحلال‌پذیری آن با زمان تعیین می‌شود. . این روش از آن رو که اندازه‌گیری غلظت مواد حل شده، بدون خارج کردن نمونه‌ها و بر هم زدن سامانه مقدور است، حائز اهمیت است [۱۵]. شکل ٦ مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها و نحوهٔ انجام آزمایش انحلال‌پذیری را نشان می‌دهد.



شکل۵. تعیین عدد GSI برای مصالح سازند گچساران

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

جدول۳. پارامترهای توده سنگ برای واحدهای مختلف سازند گچساران

واحدهای توده سنگ	پارامترهای ورودی			پارامترهای توده سنگ				
				معیار هوک - براون			معیار مور- کولمب	
	GSI	mi	(MPa) Sigci	m_b	s	a	C (MPa)	φ(°)
مارن	٤٠	٧	٠/٧	٠/٨٢١	٠/٠٠١٣	٠/٥١١	٠/٠٢٦	٢٥
انیدریت	٤٠	١٣	٣٦	١/٥٢٥	٠/٠٠١٣	٠/٥١١	١/٦٦٢	٣٠
نمک	٥٠	١٢	٢٧/١	٢/٠١٢	٠/٠٠٣٩	٠/٥٠٦	١/٤٢٦	٣٢

شکل٦. مراحل آماده سازی نمونه‌ها (راست) و نحوه انجام آزمایش انحلال‌پذیری(چپ)

جدول ٤ نتایج آزمایش‌های انحلال‌پذیری را نشان می‌دهد.

جدول٤. نتایج آزمایش‌های انحلال‌پذیری

شمارهٔ نمونه	کاهش وزن (g)	سرعت آب (cm/s)	حجم آب (لیتر)	زمان آزمایش (min)	حجم حفرهٔ انحلالی (cm^3)	سطح جانبی نهایی استوانه معادل (cm^2)	قطر نهایی استوانه معادل (cm)
١	١٤٨/٢٤	٤٠٧/٦٤	١	٢٦	٦٩	٩٠/٧٣	٣/٠٤
٢	٨٨/٦	٥/١	١	١٢	١٥	٣١/٥٩	١/٨٩
٣	١٧٥/٥٣	٨٥/١	١	٣٣	٨٧	٩٩/١٦	٣/٥١
٤	٤٢/٣٨	١٤٢/٦٧	١	٤٠	١٠٣	١١٦/٥٤	٣/٥٣
٥	٢١٣/٩٥	١٢٨/٩	١	٤٠	١٠٠	١١٢/٠٧	٣/٥٧
٦	٣٢٩/٩	١٣٩/١	٣	٤٠	١٤٨	١٣٦/٣٤	٤/٣٤
٧	٢٣٨/٨٩	١٣٦	١	٤٠	١٠٨	١١٣/٥٢	٣/٨٠
٨	٢١٤/٣٨	١٢٧/٣٨	١	٤٠	٨٥	١٠٣/٣٢	٣/٢٩
٩	٢٣٤/١٣	١٢٧/٣٨	١	٤٠	١٠٩	١١١/٠٢	٣/٩٣
١٠	٢٣٩/١٧	١٢٤/٨	١	٤٠	١١٣	١١٤/٨٨	٣/٩٣
١١	٢٠٧	٥٤/٥	٣	٤٠	٩٨	١١٠/٩٥	٣/٥٣

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

قطر نهایی استوانه معادل (cm)	سطح جانبی نهایی استوانه معادل (cm^2)	حجم حفرهٔ انحلالی (cm^3)	زمان آزمایش (min)	حجم آب (لیتر)	سرعت آب (cm/s)	کاهش وزن (g)	شمارهٔ نمونه
۳/۴۲	۱۰۷/۴۹	۹۲	۴۰	۳	۷۶/۴۳	۱۹۲/۵۷	**۱۲**
۳/۷۸	۱۱۸/۶۱	۱۱۲	۴۰	۳	۹۵/۲۸	۲۴۳/۲۷	**۱۳**
۲/۸۱	۷۹/۵۶	۵۶	۴۰	۲	۱۶/۱۵	۱۱۹/۵۸	**۱۴**
۳/۹۶	۱۲۴/۲۹	۱۲۳	۴۰	۲	۹۸/۳۴	۱۹۳/۸	**۱۵**
۳/۷۴	۱۱۷/۵۴	۱۱۰	۴۰	۲	۱۰۱/۹۱	۲۴۳/۸۴	**۱۶**
۴/۵۳	۱۲۸/۰۳	۱۴۵	۴۰	۳	۱۶۳/۰۵	۳۱۷/۹۵	**۱۷**
۳/۵۴	۷۲/۲۸	۶۴	۴۰	۱	۷۷/۹۶	۱۴۰/۴۳	**۱۸**
۳/۶۴	۳۹/۴۶	۳۱	۷۵	۱	۱/۶۹	۶۰/۴۶	**۱۹**
۲/۸۲	۷۰/۸۸	۵۰	۷۵	۱	۲/۸۸	۹۸/۸۲	**۲۰**
۲/۵۷	۶۱/۷۹	۳۲	۷۵	۲	۱/۵	۶۸/۸۴	**۲۱**
۲/۵۴	۶۷/۷۵	۴۳	۷۵	۱	۳/۹۸	۱۴۴/۲۳	**۲۲**
۲/۹۷	۷۷/۶۵	۴۸	۷۵	۱	۱	۹۶/۳۴	**۲۳**
۳/۱۲	۴۱/۱۸	۲۷	۷۵	۱	۱	۵۶/۸۹	**۲۴**
۲/۷۶	۷۳/۷۹	۵۱	۷۵	۱	۱۰	۱۴۴/۲۳	**۲۵**
۲/۶۶	۱۰۸/۴۲	۷۲	۷۵	۱	۱۰	۱۴۲/۲۳	**۲۶**
–	۸۶/۰۱	۵۸/۹	۲۴۰	۱	۰	۱۵۸/۶۵	**۲۷**
–	۲۹/۹۹	۱۰/۲۳	۲۴۰	۱	۰	۱۷۵/۶۶	**۲۸**
–	۶۶/۱۱	۵۸	۲۴۰	۱	۰	۱۴۱/۵۲	**۲۹**
–	۱۰۵/۶۷	۸۸/۹	۲۴۰	۳	۰	۲۷۲/۹۷	**۳۰**

میزان خوردگی لایه‌های نمکی نیز با استفاده از نتایج آزمایش‌های انحلال‌پذیری انجام شده با سرعت حدود ۱ سانتی‌متر بر ثانیه (سرعتی که برای گردش آب در مخزن سد در نظر گرفته می‌شود) برآورد شده است و در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول۵. تعیین میزان خوردگی لایه‌های نمکی

میزان خوردگی در روز (cm)	میزان خوردگی در ۷۵ دقیقه (cm)	میانگین قطر نهایی (cm)	میانگین قطر اولیه (cm)
۲۴/۶۷	۱/۲۸۵	۳/۰۷	۰/۵

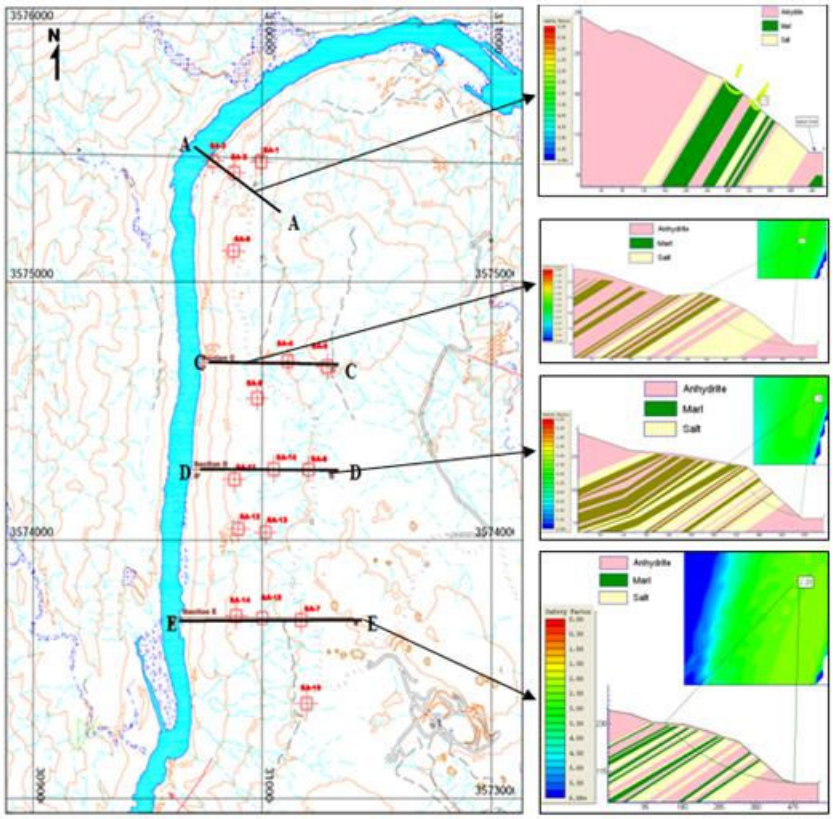
تحلیل پایداری دامنه

تحلیل‌های پایداری دامنه با رسم مقطع زمین‌شناسی تودهٔ مورد نظر و با توجه به ترازهای مختلف آب مخزن انجام شده است. به‌طور کلی چهار مقطع در چهار منطقه از تودهٔ مورد نظر

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

رسم شده و تحلیل پایداری در امتداد آن‌ها صورت گرفته است. شکل ۷ نقشهٔ تودهٔ مورد نظر و همچنین موقعیت گمانه‌های حفر شده در توده و راستای مقاطع زمین‌شناسی را نشان می‌دهد.



شکل۷. نقشه موقعیت توده همراه با راستای مقاطع زمین‌شناسی

در بین مقاطع نشان داده شده در شکل ۷ مقطع C-C با جزئیات بیش‌تر بررسی می‌شود. اما نتایج مربوط به تحلیل پایداری مقاطع دیگر نیز در جدول ٦ نشان داده شده است. اثر انحلال نمک نیز با توجه به فرض ۰/۵ متر آب‌گیری سد در هر روز، و برآورد مدت زمانی که لایه‌های نمک در مقاطع مختلف در تماس با آب مخزن قرار خواهد گرفت در تحلیل وارد شده است. از دیگر پارامترهایی که در تحلیل مورد نظر قرار گرفته است تأثیر جنبش‌های دینامیکی ناشی

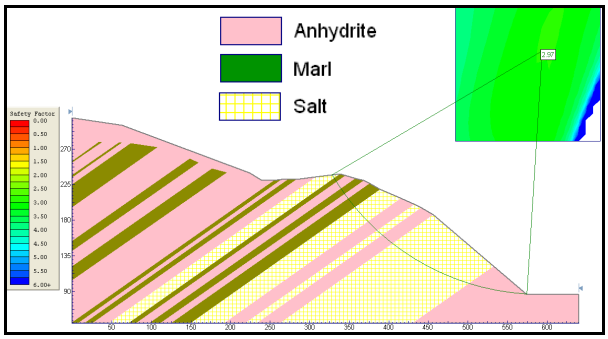
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

از زلزله است که با توجه به شتاب طرحg ۰/۱۶ (بر اساس **بررسی‌های** لرزه‌خیزی محل سد [۱۲]) که برای ساخت‌گاه سد گتوند تعیین شده است در تحلیل‌ها مدل می‌شود. گذشته از این یکی از پیش‌بینی‌هایی که در مورد سد گتوند انجام می‌شود، افت تراز آب مخزن از ۲۳۰ به ۱۸۵ متر است که در اثر استفادهٔ نیروگاه سد از آب مخزن در فصول خشک سال ایجاد می‌شود. اثر این افت نسبتاً سریع‌تراز آب مخزن نیز تحلیل شده است. تحلیل پایداری دامنهٔ مقطع C-C برای شرایط مختلف آب‌گیری مخزن به‌عنوان نمونه در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

الف) شرایط بدون آب‌گیری

با توجه به شکل دامنه در این حالت پایدار است و ضریب ایمنی بیش‌تر از یک محاسبه شده است (شکل ۸).



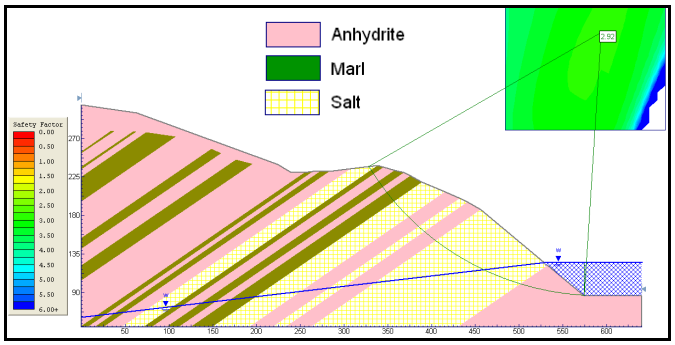
شکل۸. شرایط پایداری دامنه در حالت بدون آب‌گیری(مقطع C-C)

ب) تراز آب‌گیری ۱۲۵

با آب‌گیری سد تا تراز ۱۲۵ تغییری در ضریب ایمنی این مقطع مشاهده نمی‌شود، که دلیل آن بالا بودن تراز لایه نمکی است. در این تراز آب‌گیری، آب به ابتدای اولین لایهٔ نمکی رسیده و در اثر آن در لایهٔ نمکی ۱/۵ متر انحلال رخ داده است. با توجه به پایین بودن میزان عقب‌نشینی دامنه در اثر انحلال، و مقاومت لایهٔ نمکی ضریب ایمنی دامنه در مقایسه با حالت بدون آب‌گیری تغییری نداشته است (شکل ۹).

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

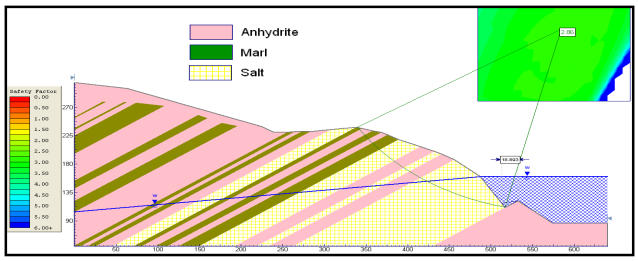
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]



شکل۹. شرایط پایداری دامنه در تراز آب‌گیری ۱۲۵(مقطع C-C)

ج) تراز آب‌گیری ۱۶۰

برای رسیدن سطح آب سد از تراز ۱۲۵ به تراز ۱۶۰ به هفتاد روز زمان نیاز است (با فرض ۰/۵ متر آب‌گیری در روز) که با توجه به مقدار خوردگی لایهٔ نمکی در روز (۲۴/۶۷ cm) میزان انحلال در سطح زیرین لایهٔ نمکی همراه با میزان انحلال در مرحلهٔ قبل ۱۸/۷۵ متر خواهد بود. در این شرایط انحلال نمک سطح لغزش حداقل را تحت تأثیر قرار داده است. به‌طوری که سطح لغزش در پنجه پرت‌گاه انحلالی خاتمه می‌یابد (شکل ۱۰). با توجه به مقاومت لایهٔ نمکی انحلال تأثیر زیادی بر ضریب ایمنی دامنه نداشته است.



شکل۱۰. شرایط پایداری دامنه در تراز آب‌گیری ۱۶۰(مقطع C-C)

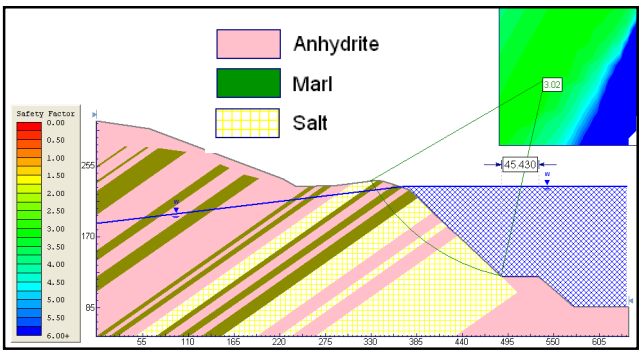
د) تراز آبگیری ۲۳۰

از زمان آب‌گیری سد در تراز ۱۶۰ تا آب‌گیری آن در تراز ۲۳۰ سطح زیرین اولین لایهٔ نمکی ۱۴۰ روز دیگر در تماس با آب مخزن قرار خواهد گرفت که میزان انحلال در این ناحیه همراه با انحلال مراحل قبل به حدود ۵۳/۳ متر خواهد رسید. در اثر این انحلال میان لایه‌های

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

انیدریتی و مارنی به درون مخزن فرو ریخته و احتمالاً بخشی از پاشنهٔ لایهٔ نمکی زیرین را خواهد پوشاند اما بخش باقیماندهٔ دامنه پایدار است و لغزش عمیقی در آن اتفاق نخواهد افتاد (شکل ۱۱). میزان انحلال لایه‌های نمکی دیگر نیز با توجه به تراز قرارگیری آن‌ها در حاشیهٔ مخزن محاسبه و در جدول ٦ نشان داده شده است.



شکل ۱۱. شرایط پایداری دامنه در تراز آب‌گیری ۲۳۰ (مقطع C-C)

چنان که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، قرار گرفتن واریزه‌های بالادست روی سطح لایهٔ نمکی پایین‌دست احتمالاً انحلال در پنجه را تا حدودی متوقف خواهد کرد. این شرایط با محاسبه حجم مواد دارای قابلیت لغزش در بالادست و اضافه کردن آن به پنجهٔ دامنه ایجاد شده است. حضور آب مخزن در جلو دامنه با ایجاد فشار جانبی، ضریب ایمنی دامنه را بالا برده است. به جز لغزش‌های سطحی ناشی از حذف لایهٔ نمکی احتمال لغزش عمیق در دامنه وجود ندارد (اگرچه همین لغزش‌های سطحی نیز از لحاظ حجم قابل توجه هستند اما با توجه به حل تدریجی نمک به صورت دفعی اتفاق نمی‌افتند). جدول ٦ نتایج تحلیل پایداری دامنه در مقاطع مختلف را به طور خلاصه نشان می‌دهد.

بررسی اثر افت نسبتاً سریع آب مخزن بر روی ناپایداری دامنه

چنان که قبلاً نیز ذکر شد انتظار می‌رود که تراز آب مخزن در اثر استفاده نیروگاه، در فصول خشک سال افت نسبتاً سریعی را متحمل شود. در این حالت فشار جانبی ناشی از آب مخزن از روی دامنه برداشته شده ولی آب درون دامنه فرصت کافی برای زه‌کشی نخواهد داشت و با ایجاد فشار آب منفذی باعث ناپایداری دامنه می‌شود. در مقایسه با حالت بدون

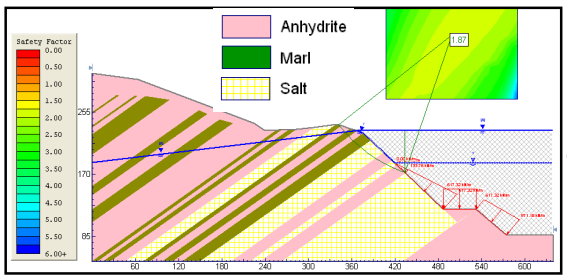
[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

افت، پایین آمدن تراز آب مخزن ضریب ایمنی دامنه را تقریباً به نصف کاهش داده است. اما همچنان ضریب ایمنی بالاتر از یک قرار دارد و دامنه پایدار است. شکل ۱۲ شرایط پایداری دامنه همراه با افت تراز آب در مقطع C-C را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که این تحلیل در مقاطع دیگر نیز نتایج مشابهی به‌دست داده است.

جدول٦. نتایج تحلیل پایداری دامنهٔ مقاطع مختلف

نام مقطع	تراز آب مخزن	خوردگی لایه‌های نمکی از ابتدای آب‌گیری (m)						ضریب ایمنی		ضریب ایمنی با اثر زلزله (0.16 g)	
		لایه اول		لایه دوم		لایه سوم					
		زیر	بالا	زیر	بالا	زیر	بالا	BSM	M-P	BSM	M-P
A-A	۸۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱/۷۳	۱/۷۲	۱/۳٤	۱/۳۳
	۱۲۵	۱۷/۷٦	۰/۲٤	۰	۰	۰	۰	۲/۳۳	۲/۵۵	۱/٦٦	۱/۹۳
	۱٦۰	۳۵	۱۷/۵۰	۱۱	۷/۹	۰	۰	۱/٤۳	۱/٤۳	۱/۳٤	۱/۵۲
	۲۳۰	٤۰	۵۲	٤۵	٤۲	۲۱	۱۸	۱/٦۷	۱/٦۷	۱/۱۲	۱/۱۱
C-C	۸۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۹۷	۲/۹۷	۲/۲٤	۲/۲٦
	۱۲۵	۱/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۹۲	۲/۹٤	۲/۱۷	۲/۲۰
	۱٦۰	۱۸/۷۵	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۸٦	۲/۸۹	۲/۱	۲/۱۵
	۲۳۰	۵۳/۳	۲۱/۳٦	۱٦/۷۷	۱٤/۵۷	/۱۰	/٤۷	۳/۰۲	۳/۰۹	۲/۰۲	۲/۱۱
D-D	۸۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۸۹	۲/۹٤	۱/۹۲	۲/۰۹
	۱۲۵	۱/۹۷	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۷٤	۲/۷۸	۱/۸٤	۲/۰۲
	۱٦۰	۱۹/۲	۸/۸۸	۰	۰	۰	۰	۲/۵٦	۲/٦۸	۱/۸۸	۲/۰۵
	۲۳۰	۵۳/۷۸	٤۳/٤۱	۳۳/۷۹	۲۸/۹۱	۲۱	/۳	۲/۷۷	۲/۸۵	۱/۸۳	۱/۹۵
E-E	۸۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۲۰	۲/۳۱	۱/۵۵	۱/٦۹
	۱۲۵	۰/۵٦	۰	۰	۰	۰	۰	۲/۱۳	۲/۲۳	۱/٤۷	۱/٦٦
	۱٦۰	۱۷/۸۳	۹/۳۷	۳/۹٦	۱/۲۱	۰	۰	۲/۲	۲/۲۱	۱/۵۹	۱/۵۹
	۲۳۰	۱۲/۱۳	۱۲	۲۰	۱۷	۲۲	۱٤	۲/۸٦	۲/۹۵	۱/٦٤	۱/۷۷



شکل۱۲. شرایط پایداری دامنه با افت تراز آب مخزن(مقطع C-C)

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به منظور تحلیل پایداری دامنه‌های مربوط به سازند گچساران در محدودهٔ سد گتوند، و همچنین تأثیر انحلال لایه‌های نمکی بر پایداری دامنه، **بررسی‌ها**یی برای تعیین انحلال‌پذیری مصالح نمکی و خصوصیات مهندسی سنگ‌های سازندهٔ توده به صورت جداگانه انجام شده است. سپس نتایج حاصل از این آزمایش‌ها برای تعیین خصوصیات تودهٔ سنگ تعمیم داده شده، و در نهایت شرایط پایداری دامنه با توجه به تأثیر متقابل انحلال و زمین لغزش در شرایط مختلف آب‌گیری مخزن و تأثیر عوامل جانبی دیگر، در نرم افزار SLIDE مدل‌سازی شده و تجزیه و تحلیل شده است. بر اساس نتایج تحقیق با در نظر گرفتن سرعت حدود یک سانتی‌متر بر ثانیه برای گردش آب در مخزن، میزان خوردگی در محل لایه‌های نمکی ۲٤/٦۷ سانتی‌متر در روز خواهد بود. لغزش‌های ایجاد شده در دامنه معمولاً کم عمق و در اثر انحلال لایهٔ نمکی زیرین ایجاد می‌شوند در نتیجه تغییر شکل دامنه به صورت تدریجی صورت خواهد گرفت. این تغییر شکل نرم احتمالاً باعث خواهد شد لغزش عمیق در دامنه اتفاق نیفتد. با در نظر گرفتن تأثیر زمین لرزه بر ناپایداری دامنه، ضریب ایمنی تا حدود ۵۰ درصد کاهش می‌یابد اما در عین حال ضریب ایمنی دامنه بالاتر از یک محاسبه شده است. افت نسبتاً سریع تراز آب مخزن باعث کاهش ضریب ایمنی دامنه می‌شود؛ اما باعث ایجاد لغزش عمیق در دامنه نخواهد شد.

منابع:

1. Wang, H. B. *Hazard assessment by 3D stability analysis of landslides due to reservoir impounding*, Landslides vol 4 (2007) 381–388.
2. Mel Nikova, Z. M., Moshkina, I. A.“Solubility of Anhydrite and Gyosum in the System Na-Mg-Ca-Cl-So4-H2o” Izv. Sib. Otdel. ANSSSR, (4) / 214 / Ser. Khim. Nauk. (2)/7626 (1973).
3. James, A. N., Binne, and Partners, *Solution parameters of carbonate rocks*" Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. No. 24 (1981)19-25.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]

4. Thierry, P., Prunier-Leparmentier, A., Lembezat,C., *3D geological modelling at urban scale and mapping of ground movement susceptibility from gypsum dissolution: The Paris example (France)*, Engineering Geology 105 (2009) 51–64.

5. James, A. N., *Solution parameters of carbonate rocks*, Bull. Int. Assoc. Eng. Geol. Vol. 9 (1981) 19-25.

۶. قبادی، م. ح.، *زمین‌شناسی مهندسی کارست*، انتشارات دانشگاه بوعلی همدان، ۱۶۰ص (۱۳۸۸).

7. Sornettea, D., Helmstetter, A., Andersen, J.*V., Gluzmanc, S., Grasso, J., Pisarenkof, V., Towards landslide predictions: two case studies,* Physica A 338 (2004) 605-632.

8. LOO, H. "Reactivation of An Old Landslide in Response to Reservoir Impoundment and Fluctuations" Ph.D Thesis, Hong Kong University (2006).

۹. توکلی، ب.، *مبانی زمین‌شناسی مهندسی*، انتشارات دانشگاه پیام نور، (۱۳۸۲).

10. Albataineh, N. "Slope Stability Analysis Using 2D and 3D Methods, M.Sc. Thesis, University of Akron (2006).

11. Krishna, P.A. "Slope Stability Evaluations by Limit Equilibrium and Finite Element Methods", Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology (2006).

۱۲. شرکت مهاب قدس،*گزارش مطالعات زمین شناسی مهندسی توده نمکی عنبل*، مطالعات مرحله سوم طرح گتوند (۱۳۸۷).

۱۳. شرکت توسعه و منابع آب و نیروی ایران، جانمایی طرح‌های حوضه‌های کارون و دز (۱۳۸۵).

۱٤. آقانباتی، س.ع. ، *زمین شناسی ایران*، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۵).

15. James, A. N., Lupton, A. R. R., *Gypsum and anhydrite in foundations of hydraulic structures*", Geotechnique Vol. 28 No. 3 (1978) 249-272.

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

[DOR: 20.1001.1.22286837.1389.4.1.3.1]