

# بررسی پایداری ترانشه‌های جناح راست ساختگاه سد مسجد سلیمان از دیدگاه

## زمین‌شناسی مهندسی

آرام میرزایی\* دانشجوی کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

غلامرضا شعاعی استادیار گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس

## چکیده

امروزه، اجرای ترانشه‌های سنگی در بسیاری از ساختگاه پروژه‌ها امری ضروری و اجتناب ناپذیر می‌باشد و موضوع پایداری آن‌ها در طول بهره‌برداری از پراهمیت‌ترین موضوعات حال حاضر در تمامی ساختگاه پروژه‌ها می‌باشد، زیرا ممکن است مسیر جاده، خطوط راه‌آهن، ساختگاه سدها و معادن روباز در دامنه چین ترانشه‌هایی قرار بگیرد. از این رو هرگونه ناپایداری در این ترانشه‌ها می‌تواند دارای اثرات مخرب زیادی بر روی ایمنی این سازه‌ها ایجاد کند. که نیاز به بررسی و ارزیابی دارند. ترانشه‌های موجود در جناح راست سد مسجد سلیمان در اثر ایجاد فشار منفذی بین سنگ و شاتکریت، ترک‌های طولی و عرضی در سطوح شاتکریت دیواره‌ها بوجود آمده است که در برخی نقاط باعث ترک خوردن سطوح شاتکریت و حتی ریزش آن شده است. در این مطالعه، بررسی پایداری ترانشه‌های جناح راست ساختگاه سد مسجد سلیمان از دیدگاه زمین شناسی مهندسی با استفاده از روش‌های عددی انجام گرفت و نتایج مدل‌سازی عددی در تطابق مناسبی با قرائت کشیدگی‌سنج‌ها بود که صحت و اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی را تایید می‌کند.

## مقدمه

ترانشه‌ها به فرورفتگی‌ها یا برش خوردگی‌های مصنوعی در سطح زمین گفته می‌شود که در مسیر جاده، راه‌آهن، سدها، معادن روباز و در بسیاری از پروژه‌های دیگر اجرا و ساخته می‌شوند، مسئله پایداری آن‌ها بعد از اجرا، یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مسائل زمین شناسی مهندسی می‌باشد که در صورت عدم بررسی و عدم توجه به آن، می‌تواند خسارات و مشکلات جبران ناپذیری ناشی از گسیختگی آن، بر جای بگذارد. عوامل متعددی مانند ساختارهای زمین شناسی (گسل، درزه، لایه‌بندی)، شکل هندسی، شرایط هیدرولوژی، وضعیت توپوگرافی، مورفولوژی، جریان آب‌های زیرزمینی، هوازدگی و نیروهای دینامیکی مثل زلزله بر پایداری ترانشه‌ها تاثیر می‌گذارند و می‌توانند باعث ایجاد لغزش شوند. گسیختگی در ترانشه‌های سنگی با توجه سابقه موضوع به شکل سقوط سنگ، زمین لغزش و ناپایداری کلی رخ می‌دهد [۷]. به عنوان نمونه در سال ۱۹۶۳ زمین لغزش در جناح چپ سد وایونت در ایتالیا خسارت اقتصادی فراوانی به بار آورده و منجر به مرگ بسیاری شد [۵].

مشاهده شدن آثار ناپایداری چون ترک‌های ایجاد شده در سطح شاتکریت مشرف به برم‌های ترانشه (شکل ۱) و حتی ریزش برم و از بین رفتن راکبوت‌ها در بخش‌هایی از ترانشه، ضرورت انجام مطالعه پایداری ترانشه موجود در این بخش از سد را می‌رساند.



شکل ۱. ترک‌های ایجاد شده روی سطح شاتکریت به همراه ریزش بخش‌هایی از برم‌های مشرف به ترانشه

ساختگاه سد مسجد سلیمان در استان خوزستان در جنوب غربی ایران بر روی رودخانه کارون در بخش شمالی منطقه زمین ساخت زاگرس واقع شده است، از دیدگاه زمین شناسی، ساختگاه سد در بخش فوقانی سازند آغاچاری و سازند بختیاری با میان لایه‌های بسیار نازک رسی در پهنه زاگرس چین خورده واقع شده است، که ترانشه مورد مطالعه در بخش سازند بختیاری آن قرار گرفته است، سازندهای بختیاری مربوط به دوره پلیستوسن تا کواترنری است که ویژگی رسوبات آبرفتی و کوهپایه‌ای حاصل از فرسایش ارتفاعات را دارد که بیش‌تر شامل کنگلومرا و ماسه‌سنگ آهکی است، گاهی به صورت هم شیب و گاهی به صورت دگرشیبی زاویه دار بر روی سازندهای قدیمی‌تر، (بخش لهری سازند آغاچاری) نهشته شده است، حد بالایی آن رسوبات آبرفتی کوارترنری می‌باشد، این سازند از توالی نامنظم لایه‌های رس‌سنگ، لای‌سنگ، ماسه‌سنگ و کنگلومرا بوجود آمده که در آن با حرکت به سمت بالا، دانه‌بندی‌ها درشت‌تر می‌شود [۱]. گسل اندیکا با امتداد شمال غرب – جنوب شرق و شیب به سمت شمال شرق در فاصله حدود ۲ کیلومتری بالادست محور سد، نزدیک‌ترین گسل به محدوده ساختگاه سد است که در مرز بین سازندهای گچساران و بختیاری قرار دارد (شکل ۲). این گسل با طول حدود ۵۰ کیلومتر از نوع راندگی است که سبب رانده شدن سازند گچساران بر روی سازند جوان بختیاری شده است. [۲].



شکل ۲. عکس ماهواره‌ای از ساختگاه سد مسجد سلیمان و ساختارهای مشخص شده در اطراف آن [۲].

## مواد و روش کار

روش مطالعه شامل بازدید میدانی، برداشت ناپیوستگی‌ها، جمع آوری داده‌های آزمایشگاهی، استفاده از مدل‌سازی عددی برای تحلیل پایداری ترانشه و اعتبارسنجی مدل و تطابق نتایج آن با نتایج دستگاهای رفتارسنج نصب شده در ساختگاه می‌باشد

جدول ۱. برداشت ناپیوستگی‌ها در ساختگاه سد مسجد سلیمان

| ناپیوستگی | شیب | امتداد | طول اثر (متر) | میانگین فاصله‌داری(متر) | بازشدگی (میلی متر) |
|-----------|-----|--------|---------------|-------------------------|--------------------|
| لایه‌بندی | ۳۰  | ۰۵۴    | ۲۰<           | ۲<                      | ۵<                 |
| J1        | ۵۶  | ۲۲۹    | ۳-۲۰          | ۲                       | ۱-۵                |
| J2        | ۸۲  | ۳۱۶    | ۳-۱۰          | ۲                       | ۱-۵                |

جدول ۲. پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های ساختگاه سد مسجد سلیمان [۳].

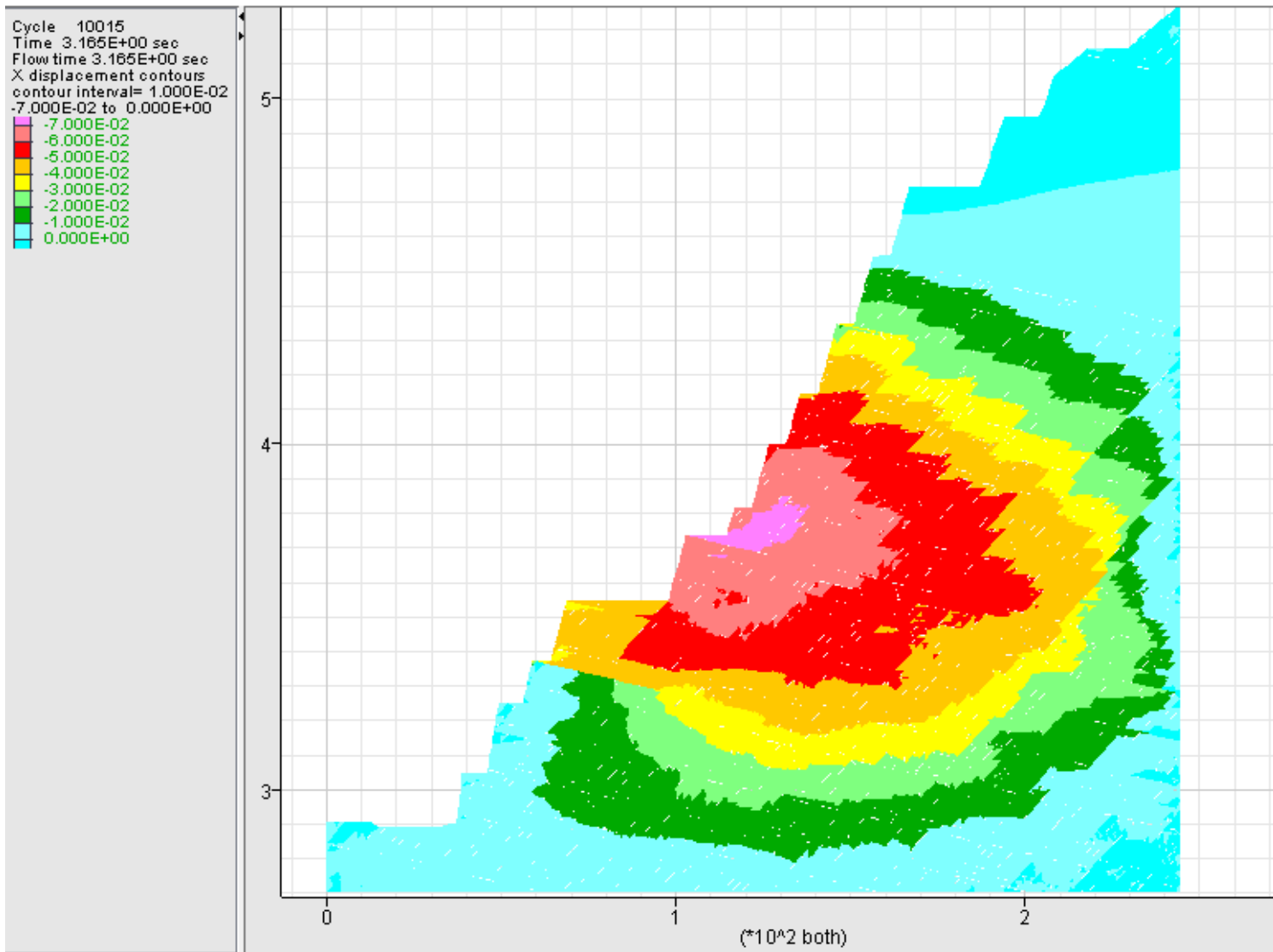
| نوع سنگ  | دانسیته (گرم بر مترمکعب) | مدول تغییر شکل‌پذیری (گیگاپاسکال) | نسبت پوانسون | زاویه اصطکاک | چسبندگی (مگاپاسکال) | مقاومت کششی (مگاپاسکال) | زاویه اتساع |
|----------|--------------------------|-----------------------------------|--------------|--------------|---------------------|-------------------------|-------------|
| کنگلومرا | ۲۵۳۰                     | ۱۵                                | ۰/۲۰         | ۴۳           | ۲/۸۷                | ۲                       | ۲۰          |
| ماسه‌سنگ | ۲۴۱۰                     | ۷                                 | ۰/۲۰         | ۳۸           | ۱/۶۷                | ۲                       | ۱۷          |
| لای‌سنگ  | ۲۳۰۰                     | ۶                                 | ۰/۲۵         | ۳۰           | ۰/۷                 | ۱                       | ۱۳          |
| رس‌سنگ   | ۲۳۰۰                     | ۶                                 | ۰/۲۵         | ۲۴           | ۰/۵                 | ۱/۵                     | ۱۳          |

جدول ۳. خصوصیات شاتکریت در نگهداری به کار رفته [۴]

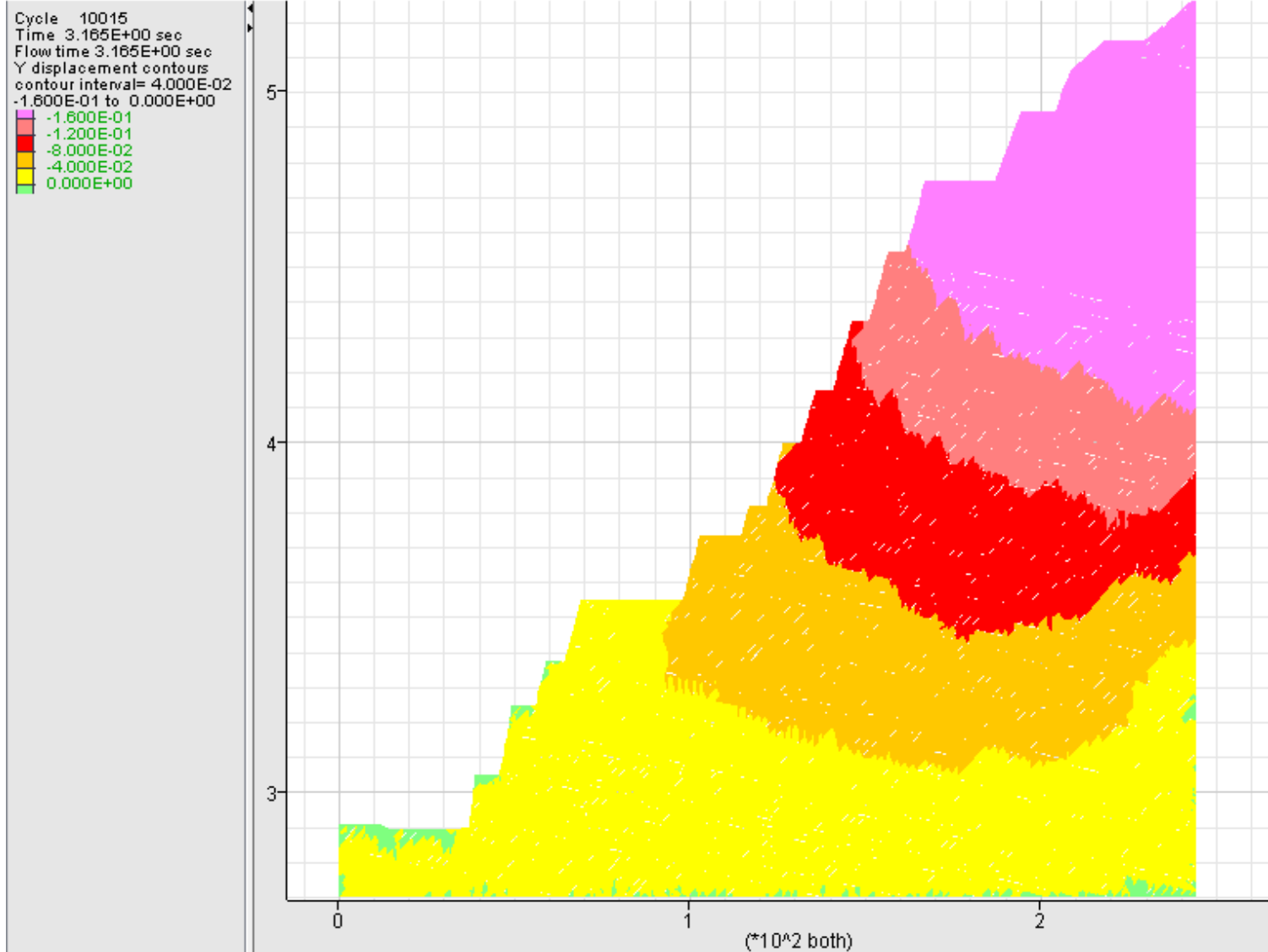
|                       |                      |
|-----------------------|----------------------|
| ضخامت                 | ۲۰ سانتی متر         |
| دانسیته               | ۲۵۰۰ کیلوگرم مترمکعب |
| ضریب پواسون           | ۰/۱۵                 |
| مدول الاستیسیته       | ۲۸ گیگ پاسکال        |
| مقاومت فشاری          | ۲۰ مگاپاسکال         |
| مقاومت کششی           | ۴۵۰ مگاپاسکال        |
| مقاومت کششی باقی ماند | ۴۵۰ مگاپاسکال        |
| زاویه اصطکاک داخلی    | ۵۰ درجه              |
| چسبندگی               | ۰/۵ مگاپاسکال        |
| مقاومت کششی فصل مشترک | ۰/۳ مگاپاسکال        |
| سختی نرمال            | ۱۰ مگاپاسکال         |
| سختی برشی             | ۱۰ مگاپاسکال         |

جدول ۴. خصوصیات میل‌مهارها در نگهداری به کار رفته [۴].

|                    |                      |
|--------------------|----------------------|
| دانسیته            | ۷۸۵۰ کیلوگرم مترمکعب |
| مدول الاستیسیته    | ۲۰۰ گیگاپاسکال       |
| تنش کششی باقی ماند | ۱۰۳۰ × ۱ پاسکال      |
| مقامت فشاری        | ۲۰ مگاپاسکال         |
| مقاومت کششی        | ۱۰ مگاپاسکال         |
| سختی گروت          | ۱۰ گیگاپاسکال        |
| مقاومت گروت        | ۱۴ مگاپاسکال         |
| طول                | ۹ متر                |
| فاصله‌داری         | ۲/۵ متر              |



شکل ۳. جابه‌جایی بدست آمده در راستای محور X (برحسب متر)



شکل ۴. جابه‌جایی بدست آمده در راستای محور Y (برحسب متر)

## بحث

برای بررسی و کنترل رفتار ترانشه تعدادی ابزار اندازه‌گیری شامل فشارسنج، بارسنج، کشیدگی‌سنج برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها، در این برم‌ها نصب شده است که جهت اعتبارسنجی، مقدار جابه‌جایی‌های بدست آمده از مدل، با مقدار جابه‌جایی ثبت شده از دستگاه کشیدگی‌سنج مورد مقایسه قرار گرفت (جدول ۵)، در مقطع مورد مطالعه ۵ دستگاه کشیدگی‌سنج به ترتیب در تراز ارتفاعی ۴۷۶، ۴۳۶، ۴۰۱، ۳۵۶، ۳۳۸ متر بالاتر از سطح دریا نصب شده‌اند، لازم به ذکر است که کشیدگی‌سنج‌های مربوط به تراز ۴۰۱ و ۳۵۶ به دلیل ریزش اتفاق افتاده در آن ناحیه از کار افتاده است [۲]. و برای ادامه بررسی جابه‌جایی‌ها در آن ترازها از نتایج مدل عددی استفاده شد و همچنین برای اعتبارسنجی داده‌ها از داده‌های مربوط به کشیدگی‌سنج‌های سالم مانده در تراز ۴۲۶، ۴۷۶، ۴۳۶ و ۳۳۸ که آخرین تاریخ قرائت داده‌های آن مربوط به اواخر سال ۲۰۱۹ می‌باشد بهره گرفته شده است.

جدول ۵. اعتبارسنجی مدل عددی-مقدار جابه‌جایی مثبت نشان دهنده جابه‌جایی به داخل ترانشه است و مقدار جابه‌جایی منفی نشان دهنده جابه‌جایی به بیرون ترانشه است

| تراز ارتفاعی               | مقدار جابه‌جایی در کشیدگی‌سنج (میلی متر) | مقدار جابه‌جایی در مدل عددی (میلی متر) |
|----------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|
| ۴۷۶ متر بالاتر از سطح دریا | +۰/۲۵                                    | +۰/۳                                   |
| ۴۴۶ متر بالاتر از سطح دریا | -۲/۸                                     | -۲/۸/۸                                 |
| ۴۰۱ متر بالاتر از سطح دریا | از کار افتاده                            | -۵/۸/۳                                 |
| ۳۵۶ متر بالاتر از سطح دریا | از کار افتاده                            | -۵/۹                                   |
| ۳۳۸ متر بالاتر از سطح دریا | -۳/۶/۷۸                                  | -۳/۸/۶                                 |

طبق نتایج بدست آمده از مدل عددی نشان دهنده ادامه روند جابه‌جایی‌ها داشته و حاکی از وجود یک ناپایداری در این محدوده می‌باشد، بر اساس ارزیابی‌های صورت گرفته و نتایج حاصل از کشیدگی‌سنج‌ها، مشخص شد که اگر تمام طول کشیدگی سنج در کنگلومرا قرار گرفته، ابزار جابه‌جایی بسیار کمی نشان داده ولیکن اگر بخشی و یا تمام طول کشیدگی‌سنج در رس‌سنگ قرار گرفته باشد، جابه‌جایی قابل توجهی را ثبت کرده است، شاید بتوان منشأ آن را به رفتار خزشی رس‌سنگ و افزایش حجم آن به دلیل جذب آب که منجر به جابه‌جایی می‌شود، نسبت داد. بیش از ۹۰ درصد کنگلومرای سازند بختیاری دارای ترکیبات آهکی است که امکان کارستی شدن خصوصاً در مجاورت گسلنگ(لای‌سنگ، رس‌سنگ) یا هر عنصر غیر قابل نفوذ دیگری در آن‌ها وجود دارد، نفوذ آب در بین شکستگی‌ها و درزه‌ها باعث نهشته‌شدن ترکیبات سیلیسی مانند چرت شده است، در بخش‌هایی که لنزهای رسی وجود دارد، جریان آب زیرزمینی باعث فرسایش شده و منجر به افزایش تراوایی در کنگلومرا و بروز ناپایداری می‌شود، نشت آب از طریق ترک‌های ایجاد شده در کف برم و سطح دیواره باعث بازشدگی بیشتر ترک‌ها، سست شدن و شسته شدن خاک بین سطح دیواره، شاتکریت و در نتیجه جدا شدن، ترک خوردن بیشتر لایه‌های شاتکریت می‌شود، جهت جلوگیری از این امر ترک‌های موجود در کف بعضی از برم‌ها با ملات ماسه و سیمان پوشیده شده است، هرچند در بعضی از برم‌ها تعدادی از این ترک‌های ترمیم شده مجدداً باز شده‌اند، با گذشت زمان و تحت تاثیر بارندگی‌ها و افزایش فشار منفذی، ترک‌های طولی و عرضی در کف برم و در سطوح دیواره‌ها بصورت مویی یا با بازشدگی نسبتاً زیاد و عمیق بوجود آمده که در برخی نقاط باعث ترک خوردن سطوح شاتکریت و حتی ریزش آن شده است، تقریباً در تمامی برم‌های ترانشه جناح راست ترک‌های طولی و عرضی در کف برم یا سطوح دیواره بصورت مویی یا با بازشدگی نسبتاً زیاد وجود دارد.

## نتیجه گیری

مهم‌ترین عامل ناپایداری ترانشه‌های جناح راست سد مسجد سلیمان بارش‌های جوی و افزایش فشار منفذی و خصوصاً تورم در لایه‌های رس‌دار است، آب‌های ناشی از بارندگی پس از نفوذ در لایه‌های مختلف در صورت عدم زهکشی مناسب، منجر به افزایش فشار منفذی و کاهش مقاومت برشی لایه‌ها می‌شود، این امر خصوصاً در مجاورت لایه‌های دارای رس باعث تورم و افزایش فشار بر سطوح شاتکریت شده و نهایتاً موجب ترک خوردگی آن می‌شود، نکته دیگر آنکه، حضور لایه‌های رس‌دار مانند لای‌سنگ و رس‌سنگ در بین لایه‌های سنگی با مقاومت بیشتر مانند کنگلومرا و ماسه‌سنگ سبب وقوع فرسایش تفریقی و خالی شدن بستر لایه‌های مقاوم و درنهایت ریزش این لایه‌ها می‌شود.

## منابع

- [۱] آقاباتی، س. ع.، (۱۳۸۳)، زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور ص. ۴۰۹-۴۱۰.
- [۲] شرکت سد و تونل پارس، ۱۳۹۸، گزارش بررسی کارکرد و اصلاح سیستم مانیتورینگ و ابزار دقیق تکیه گاه راست سد مسجد سلیمان
- [۳] گروه ژئوتکنیک شرکت مشاوران، ۱۳۸۰، تحلیل برگشتی معار طرح توسعه.
- [۴] معاونت سد و نیروگاه‌های برق آبی، ۱۳۷۹، گزارش طراحی سیستم نگهداری و ابرار بندی سد و مزارهای طرح توسعه.
- [5] Petley, D. (2008). The Vajont (Vajont) landslide of 1963. The Landslide Blog.
- [6] Raghuvanshi, T.K. (2019), Plane failure in rock slopes – A review on stability analysis techniques, Journal of King Saud University – Science, 31, 101–109.
- [7] Wyllie, D. Mah, C. w. (2004). Rock Slope Engineering, Fifth Edition. P 3-4.