

بررسی تاثیر وجود سفره‌های آب معلق تشکیل شده در تکیه‌گاه سدها بر میزان پایداری سازه در طول دوره بهره‌برداری و راهکار پایداری سازی (مطالعه موردی: ساختگاه سد مسجد سلیمان)

آرام میرزایی^۱، غلامرضا شعاعی^{۲*}

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۴

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳

چکیده

ساختگاه سد مسجد سلیمان به دلیل وجود لایه‌های رسی نفوذناپذیر و شرایط تشکیل سفره‌های آب معلق از اهمیت قابل توجهی برخوردار است، در این پژوهش تاثیر وجود سفره‌های آب معلق تشکیل شده در تکیه‌گاه سدها بر میزان پایداری سازه در طول دوره بهره‌برداری پروژه تحت اثر رفتار هیدرومکانیکی بررسی شد، ابتدا مطالعات زمین‌شناسی مهندسی از ساختگاه شامل مطالعات دفتری، بازدید میدانی، برداشت ناپیوستگی‌ها، مطالعات تفصیلی صورت گرفت، سپس با استفاده از نرم‌افزار UDEC (روش عددی) به تحلیل پایداری و مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی پرداخته شد و نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی در تطابق مناسبی با قرائت دستگاه‌های کشیدگی سنج بود که صحت و اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی را تایید می‌کند، طبق نتایج مدل‌سازی عددی، شرایط هیدروژئولوژی ساختگاه باعث تشکیل سفره‌های آب معلق در داخل لایه‌های کنگلومرا و ماسه‌سنگ نموده است که مرز زیرین آن را لایه‌های رسی نفوذناپذیر تشکیل می‌دهد. به دلیل اینکه شیب لایه‌بندی مورب و جهت آن به طرف داخل شیب است، جریان آب زیرزمینی به راحتی زهکشی نمی‌شود که به مرور زمان، آب معلق قرار گرفته در بالای لایه‌های رسی به دلیل خاصیت جذب آب در مواد ریزدانه به تدریج جذب رس‌سنگ شده و باعث بروز تورم (افزایش حجم)، تولید و افزایش فشار به سمت دیواره‌های تکیه‌گاه و نهایتاً موجب ترک خوردگی و ریزش آن می‌شود. در این مواقع استفاده از زهکش‌های ثقیلی قائم در بالای شیب با عمق بیشتر به طوری که تمام لایه‌های نفوذناپذیر (رس‌سنگ) را قطع کرده باشد و همچنین استفاده از زهکش‌های ثقیلی افقی در پایین شیب با طول بیشتر حداقل تا رسیدن به مرز لایه‌بندی در جهت پایداری سازی سازه می‌تواند کارساز باشد.

کلمات کلیدی: سفره‌های آب معلق، سد مسجد سلیمان، تحلیل هیدرومکانیکی، روش عددی

^۱ کارشناسی ارشد زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس kurdmanmirzaei@gmail.com

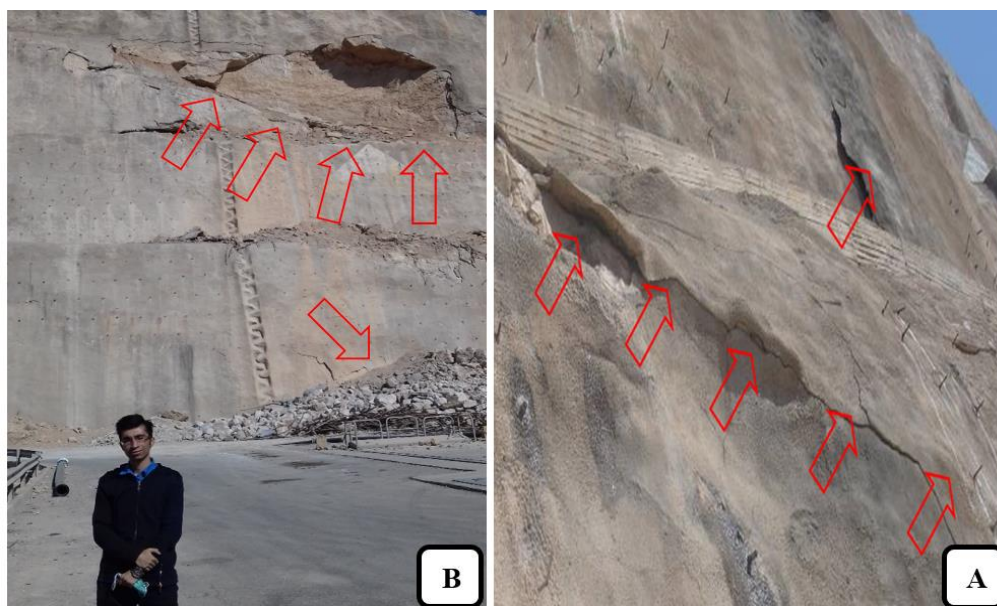
^۲ استادیار گروه زمین شناسی مهندسی دانشگاه تربیت مدرس shoaei@modares.ac.ir

۱. مقدمه

سفره آب زیرزمینی یا آبخوان به لایه یا منطقه قابل نفوذی در زیر سطح زمین گفته می‌شود که آب در آن می‌تواند جریان یابد و زمانی که جریان آب به یک لایه نفوذناپذیر می‌رسد جریان آب پایین‌تر از آن لایه نمی‌رود و تشکیل سفره‌های آب معلق را می‌دهد، از بین ساختارهای موجود در توده‌سنگ‌ها، ناپیوستگی‌ها بیشترین تاثیر در هدایت جریان آب‌های زیرزمینی دارند، زیرا جریان آب می‌تواند از طریق آن‌ها با سرعت بیشتری نسبت به تخلخل درون سنگ جریان پیدا کند و باعث بروز ناپایداری شود (حسنی ساطحی، ۱۳۹۵)، مهم‌ترین اصل در پایداری شیب‌های سنگی، تعداد کمتر ناپیوستگی‌ها و فاصله بیشتر آن‌ها از هم می‌باشد و مقاومت درونی سنگ بکر از تاثیر کمتری برخوردار است (Piteau, 1972)، هم زمان با پیشرفت کامپیوتر در سال ۱۹۷۹ میلادی برای بررسی فرآیندهای گسیختگی در شیب‌های سنگی درزه‌دار، روش‌های عددی چون المان مجزا توسعه یافتند که از مزایای این روش توان مدل‌سازی مواد ناهمگن و روشی بسیار کارآمد برای نشان دادن تغییر شکل‌های بزرگ می‌باشد (Cundall and Strack, 1979)، در مطالعاتی که با هدف تعیین دلایل ناپایداری شیب‌های سنگی

در مسیر، خطوط ریلی واشنگتن دی سی انجام شد، معلوم شد که حدود ۷۰ درصد ناپایداری شیب‌های سنگی، مربوط به وجود آب در شیب‌ها است و همچنین بر اساس همین مطالعات، حدود ۱۷ درصد ناپایداری‌ها مربوط به وجود شکستگی‌ها، درزه‌ها و جهت آن در شیب‌های سنگی بود (Peckover, 1998).

امروزه اهمیت نگهداری و بهره‌برداری از سدها به صورت دقیق و برنامه‌ریزی شده، امری ضروری و اجتناب ناپذیر می‌باشد، اگر چه طراحی و ساخت سازه‌های عظیمی همچون سدها کاری بسیار زمان‌بر و دشوار است، اما مهم‌تر از آن کنترل و پایش منظم رفتار بدنه سد و سازه‌های مجاور آن می‌باشد، اهمیت این موضوع از آنجا آشکار می‌گردد که در صورت بروز هر گونه نقص و اشکالی که منجر به آسیب به این سازه و یا ناپایداری آن گردد، علاوه بر از بین رفتن سرمایه هنگفت، ممکن است جان و مال انسان‌های بسیاری در معرض نابودی قرار گرفته و فاجعه عظیم رخ دهد، در ساختگاه مورد مطالعه آثار ناپایداری نظیر ایجاد ترک روی سطح شاتکریت اجرا شده (شکل ۱، A) و حتی ریزش برم (شکل ۱، B)، در بخش‌هایی از تکیه‌گاه راست سد مورد مطالعه مشاهده شده است.



شکل ۱. A) ترک‌های ایجاد شده روی سطح شاتکریت (B) ریزش بخشی از تکیه‌گاه راست

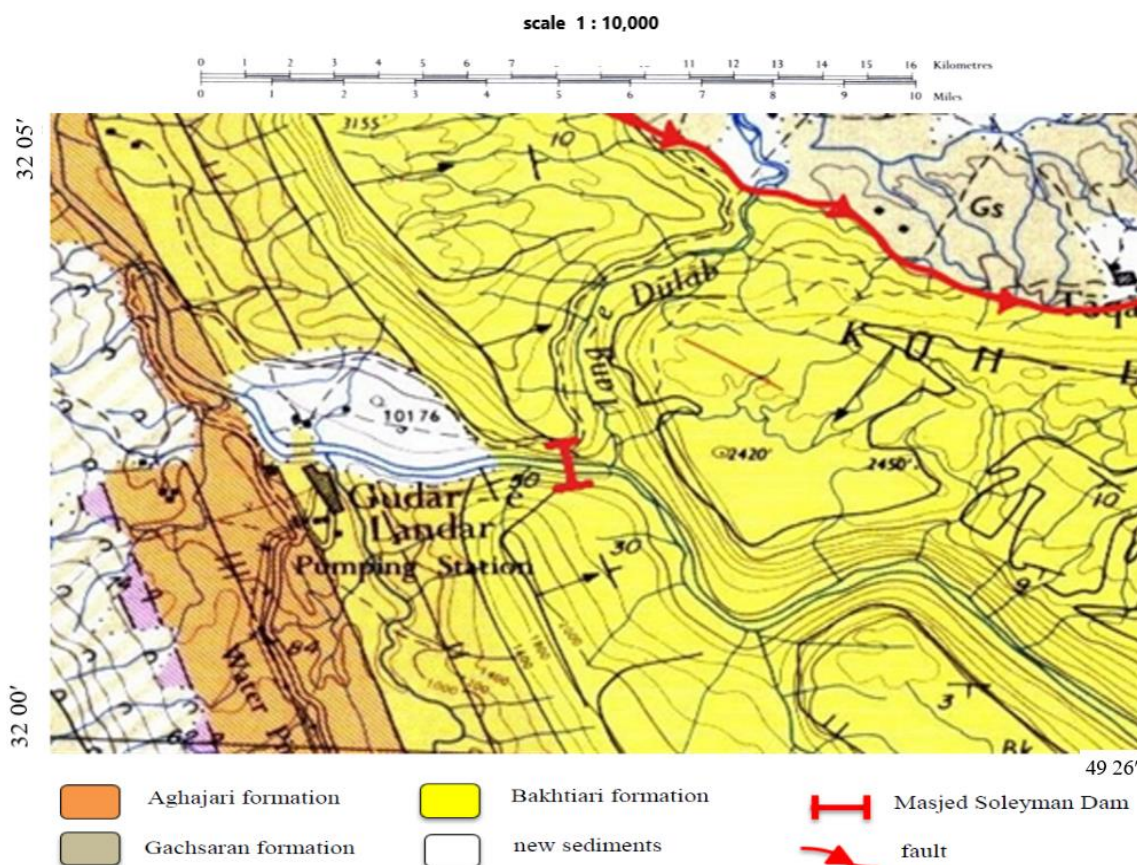
ارتفاعات را دارد که گاهی به صورت هم شیب و گاهی به صورت دگرشیبی زاویه‌دار بر روی سازندهای قدیمی تر (بخش لهری سازند آغاچاری)، نهشته شده است، حد بالایی آن رسوبات آبرفتی کواترنر قرار دارد. این سازند از توالی نامنظم لایه‌های رس‌سنگ، لای‌سنگ، ماسه‌سنگ و کنگلومرا بوجود آمده است، گسل اندیکا با امتداد شمال غرب - جنوب شرق در فاصله حدود ۲ کیلومتری بالادست محور سد، نزدیک‌ترین گسل به محدوده ساختگاه سد است، این گسل با طول حدود ۵۰ کیلومتر از نوع رانگی است که سبب رانده شدن سازند گچساران بر روی سازند جوان بختیاری شده است، در بیش‌تر مواقع، رخنمون این سازند را به صورت ناودیس می‌توان دید (آقنابتی، ۱۳۸۳).

۲. معرفی و موقعیت

ساختگاه سد مسجد سلیمان در استان خوزستان در جنوب غربی ایران بر روی رودخانه کارون با هدف تولید برق، در تراز ۲۰۰ متر بالاتر از سطح دریا و حد فاصل آذر ماه، ۱۳۷۹ تا مرداد ماه ۱۳۸۱، ساخته و آبیگری شده است.

۳. زمین شناسی منطقه

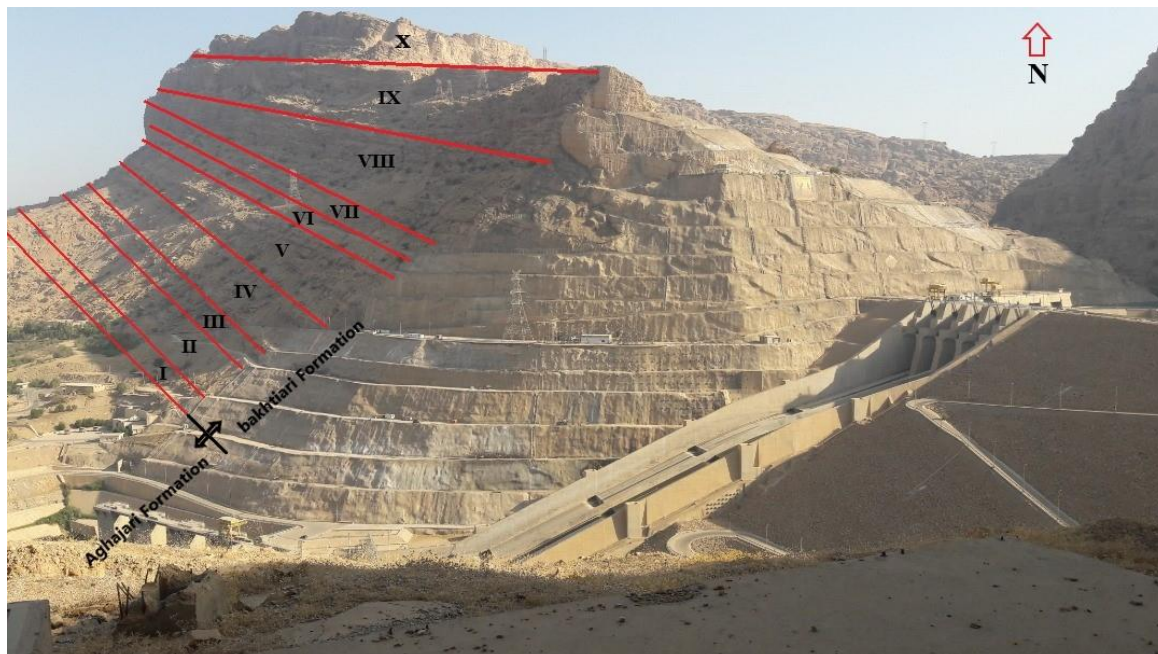
بر اساس نقشه زمین شناسی (شکل ۲)، ساختگاه سد در بخش سازند بختیاری در پهنه زاگرس چین خورده قرار گرفته است، سازند بختیاری مربوط به دوره پلیستوسن تا کواترنری است که ویژگی رسوبات آبرفتی و کوهپایه‌ای حاصل از فرسایش



شکل ۲. نقشه زمین شناسی از ساختگاه سد مسجد سلیمان (اقتباس از سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۳)

دارای مقادیر زیادتری از لایه‌های رس سنگی و واحدهای بالاتر دارای کنگلومرای بیشتری هستند. که در جناح راست سد مسجد سلیمان (شکل ۳)، ۱۰ واحد ابتدایی آن را تشکیل داده است.

سازند بختیاری به ۱۴ واحد سنگ شناسی کوچک‌تر به ترتیب از قدیم به جدید (از واحد I تا واحد XIV) با نسبت‌های متفاوتی از رس سنگ، لای سنگ، ماسه سنگ و کنگلومرا تقسیم‌بندی گردیده است (آقانباتی، ۱۳۸۳)، واحدهای پایین‌تر



شکل ۳. جداسازی واحدهای تشکیل دهنده سازند بختیاری در جناح راست سد مسجد سلیمان (شرکت سد و تونل پارس، ۱۳۹۷)

لایه‌بندی در پایین دست محور سد حدود ۵۶ درجه است که به سمت بالادست سد به تدریج کاهش می‌یابد، جهت شیب لایه‌بندی‌ها بین ۰۵۰ تا ۰۸۰ درجه و به طور متوسط ۰۶۵ درجه است. در بررسی‌ها و پیمایش‌های انجام شده، دو دسته درزه در محدوده ساختگاه سد شناخته شده است. جهت داری هر کدام از ناپیوستگی‌ها برداشته شد (جدول ۱)، یکی از این دسته درزه‌ها دارای امتداد موازی با لایه‌بندی (درزه طولی، J1) و دیگری عمود بر لایه‌بندی (درزه عرضی، J2) است (شکل ۴).

۴. روش مطالعه

روش مطالعه شامل بازدید میدانی، برداشت ناپیوستگی‌ها، جمع آوری داده‌های آزمایشگاهی، استفاده از مدل‌سازی عددی برای تحلیل هیدرومکانیکی و اعتبارسنجی نتایج می‌باشد.

۴-۱. بازدید میدانی

سد مسجد سلیمان بر روی یال جنوب غربی یک ناودیس واقع شده است که جهت لایه‌بندی تقریباً عمود بر امتداد رود کارون و شیب آن به سوی شمال شرق (بالادست) است، شیب

جدول ۱. امتداد و شیب ناپیوستگی‌ها در ساختگاه حاصل از میانگین ۱۵ برداشت میدانی

Joins set	dips	dip Direction
bedding	30	054
J ₁	56	229
J ₂	82	316



شکل ۴. ناپیوستگی‌های موجود در ساختگاه سد مسجد سلیمان

در لای سنگ‌ها و رس سنگ‌ها میزان ترک خوردگی متوسط تا شدید است، فاصله آن‌ها کمتر از ۲ متر و تداوم آن‌ها بیش از ۲۰ متر است، بازشدگی درزه‌ها کمتر از ۱ میلی متر و اکثر درزه‌ها در این ناحیه بسته هستند.

۲-۴. جمع‌آوری داده‌های آزمایشگاهی

محققین مختلف زیادی با توجه به نوع و تعداد تست‌های انجام شده خلاصه‌ای از خواص مقاومتی سنگ دست نخورده در طول سالیان گذشته بدست آوردند که در گزارشی که شرکت مشاور (سد و تونل پارس) در سال ۱۳۹۷ برای پارامترهای توده‌سنگ منتشر کرد، مقادیر اندازه‌گیری شده مورد بازنگری قرار گرفت و نتایج آن در (جدول ۲) ارائه شده اس

مهم‌ترین پارامترهای ساختاری ناپیوستگی‌ها عبارت‌اند: از طول اثر، فاصله‌داری، بازشدگی که تاثیر به سزایی در عبور جریان آب و تحلیل هیدرومکانیکی دارند، در کنگلومرا عموماً فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها از ۲ متر بیشتر است، بازشدگی درزه‌ها بزرگتر از ۵ میلی متر، و تداوم آن‌ها در محدوده ۳ تا ۱۰ متر است، در ماسه‌سنگ‌ها فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها در حد متوسط (۲ متر) است، و این بیشتر به درصد رس موجود در آن بستگی دارد. زیاد بودن درصد رس در ماسه‌سنگ به رفتار پلاستیک‌تر و در نتیجه به فاصله‌داری کمتر در موارد وجود تنش تکنونیک (ساختاری) می‌انجامد بازشدگی درزه‌ها بین ۱ تا ۵ میلی متر و تداوم آن‌ها نیز از ۱ تا ۳ متر بیشتر نمی‌شود.

جدول ۲. پارامترهای ژئومکانیکی بدست آمده از سنگ‌ها (شرکت سد و تونل پارس، ۱۳۹۷)

Rock Mass	Density (kg/m ³)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Friction angle	Cohesion (MPa)	Tensile strength (MPa)	Dilation angle
Conglomerate	2530	15	0/20	43	2/87	1/32	20
sandstone	2410	7	0/20	38	1/67	0/68	17
Siltstone	2300	6	0/25	30	0/7	0/24	13
clayStone	2300	6	0/25	24	0/5	0/15	13

۳-۴. مدل سازی عددی

امروزه روش های متنوعی از تحلیل پایداری وجود دارد، با توجه به پیچیدگی های هندسی مدل، از جمله روش هایی که در صورت تعریف دقیق پارامترهای رفتاری توده سنگ و مدل سازی مناسب، می تواند تحلیلی درست از پایداری شیب در اختیار قرار دهد، استفاده از مدل سازی عددی می باشد، روش های عددی بر اساس تغییرات فیزیکی و نوع محیط به سه گروه ناپیوسته، پیوسته و ترکیبی تقسیم بندی می شوند (Eberhardt, 2003)، مدل سازی پیوسته برای شیب هایی که از سنک بکر متراکم، سنگ های ضعیف، توده های سنگی شبیه خاک یا به شدت خرد شده، مناسب هستند. برای شبیه سازی رفتار توده سنگ هایی که دارای تعداد زیادی درزه هستند، از روش های ناپیوسته استفاده می شود، تفاوت یک محیط پیوسته با غیر پیوسته، در وجود سطوح تماس محل های برخورد و فصل مشترک بلوک های مجزایی است که سیستم بلوک را تشکیل می دهند و از روش های ترکیبی زمانی استفاده می شود که محیط مورد مطالعه حالت مابین پیوسته و ناپیوسته قرار گیرد (Sakurai, 2016).

مدل سازی ناپیوسته یکی از پرکاربردترین روش های عددی در تحلیل پایداری شیب های سنگی می باشد و در حال حاضر یکی از شیوه های معمول در مهندسی معدن، عمران و زمین شناسی مهندسی می باشد، و برای بررسی محیط هایی شامل شکست مجزا مثل گسل و سطوح لایه بندی مناسب تر است، روش های ناپیوسته محیط مسئله را به صورت مجموعه ای از بلوک های مجزا که تحت بارهای خارجی قرار گرفته و عمل متقابل بر یکدیگر دارند و همچنین جابه جایی های بسیار مهمی نسبت به زمان دارند، در نظر می گیرد که در تحلیل پایداری شیب ها به سه زیر مجموعه شامل روش های المان مجزا، تغییر شکل ناپیوسته و کدهای جریان ذرات تقسیم بندی می شود (Azarafza et al., 2020).

با توجه به بازدهی های صورت گرفته از ساختگاه و برداشت ناپیوستگی ها نوع محیط ناپیوسته تعیین شد بدین منظور نرم افزار UDEC که بر پایه ی روش المان مجزا عمل می کند و

برای تحلیل محیط های ناپیوسته مناسب تر است، از مجموعه نرم افزارهای گروه ITASCA انتخاب شد.

نرم افزار UDEC که یک نرم افزار تحلیل گر عددی دوبعدی می باشد که بر اساس روش المان مجزا برای مدل سازی محیط های ناپیوسته استفاده می شود. این نرم افزار محیط های ناپیوسته (مانند توده سنگ درزه دار) را در حالت های استاتیکی و دینامیک مدل سازی می کند. ناپیوستگی موجود در مدل را بعنوان شرایط مرزی بین بلوک ها در نظر گرفته می شود. UDEC بر اساس روش حل الگوریتم کار می کند (Kalililo and Xia, 2020)، از جمله کاربردهای این نرم افزار، توانایی بالا در مدل کردن ناپیوستگی ها، بررسی پایداری، محاسبه میزان جابه جایی ها و همچنین این نرم افزار توانایی مدل سازی جریان سیال از شکستگی های موجود در یک مجموعه بلوک های نفوذ ناپذیر را دار می باشد (Ning et al., 2019).

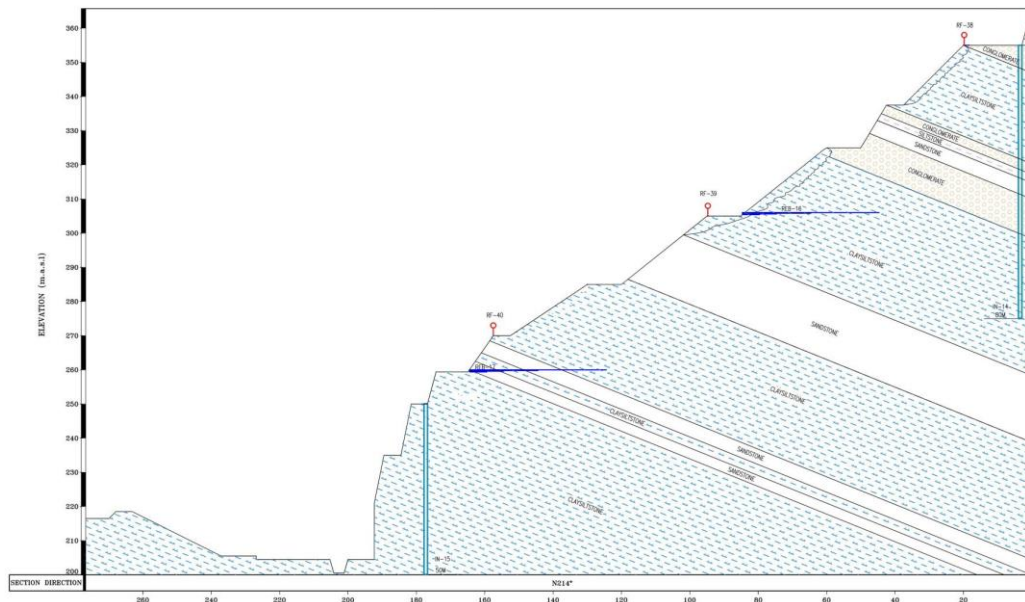
برای مدل سازی عددی یک مقطع عمود بر تکیه گاه سد (شکل ۵)، در زاویه ۲۱۴ درجه نسبت به شمال جغرافیایی گرفته شد و ملاک انتخاب مقطع مورد مطالعاتی در واقع قرار گرفتن دستگاه های کشیدگی سنج در یک راستا برای تطابق آن با مدل عددی جهت اعتبارسنجی مدل می باشد، در مقطع انتخاب شده دو دستگاه کشیدگی سنج به نام های REB-16 و REB-17 به ترتیب در ترازهای ۳۰۶ و ۲۵۲ قرار دارند که نتایج هر یک این کشیدگی سنج ها به ترتیب در شکل های ۶ و ۷ نشان داده شده است. مقطع تهیه شده را به همراه خصوصیات ناپیوستگی ها و پارامترهای توده سنگ وارد محیط نرم افزار UDEC کرده، سپس به منظور برآورد تنش های قائم (σ_v)، افقی (σ_h) و فشار آب منفذی (p) به ترتیب از رابطه های ۱، ۲، ۳ تعریف شده در منابع مکانیک سنگ (Duncan and Wyllie, 2018) استفاده شد.

$$\sigma_v = \gamma_r \times g \times h \quad (1)$$

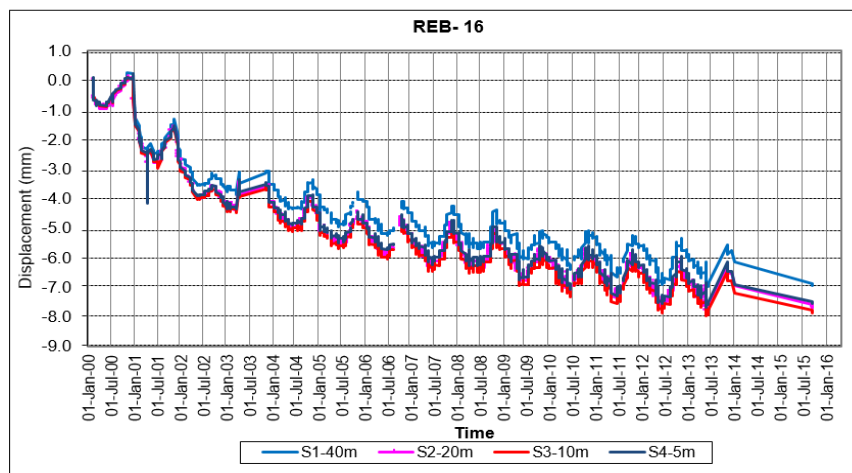
$$\sigma_h = \sigma_v \times k \quad (2)$$

$$p = \gamma_w \times g \times h \quad (3)$$

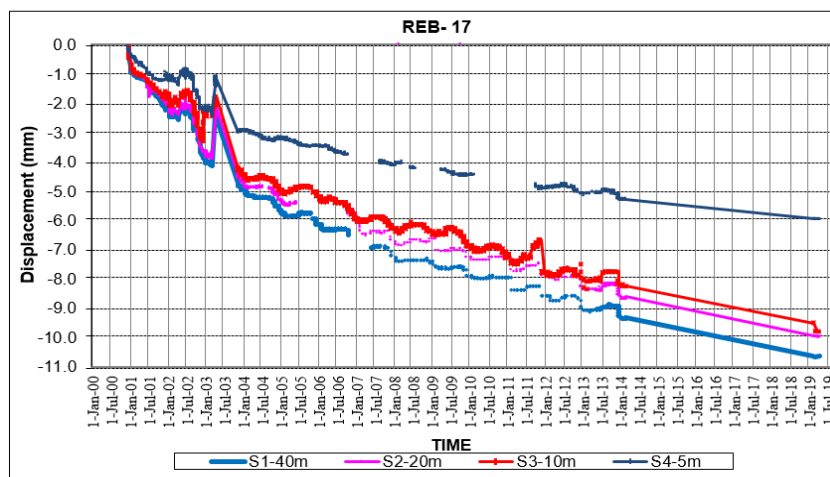
در رابطه های بالا γ_r : چگالی سنگ، γ_w : چگالی آب، g : نیروی گرانش زمین، k : نسبت تنش قائم به تنش افقی، h : ارتفاع می باشد.



شکل ۵. مقطع انتخابی برای مدل‌سازی عددی به همراه جنس لایه‌های آن (شرکت سد و تونل پارس، ۱۳۹۸)



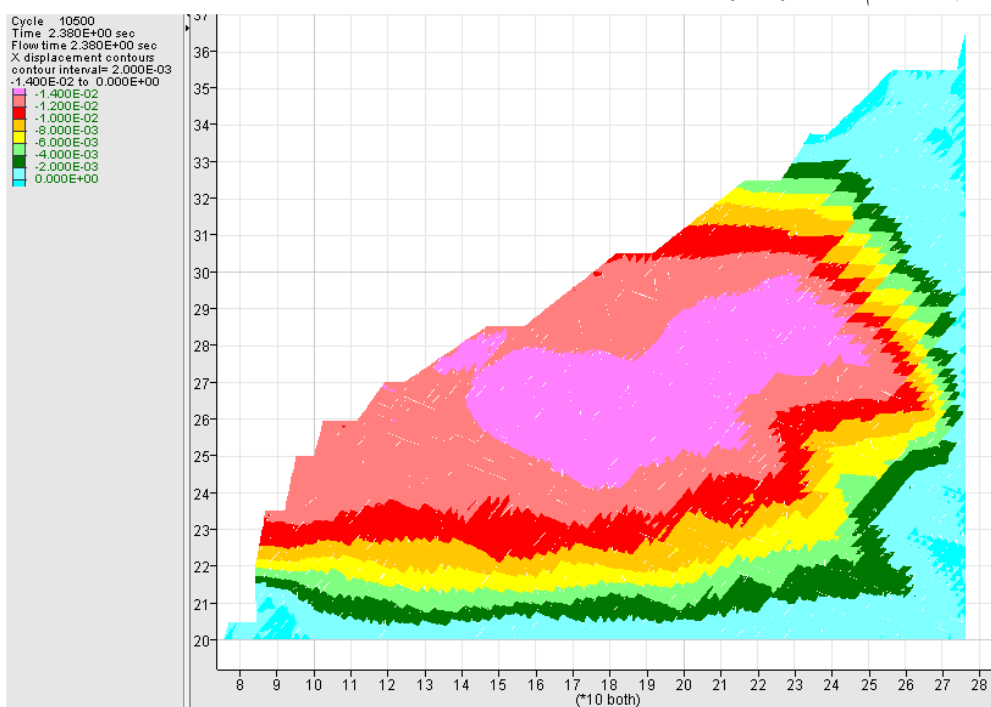
شکل ۶. نتایج قرائت کشیدگی سنج REB-16 در مقطع انتخابی (شرکت سد و تونل پارس، ۱۳۹۸)



شکل ۷. نتایج قرائت کشیدگی سنج REB-17 در مقطع انتخابی (شرکت سد و تونل پارس، ۱۳۹۸)

فشار منفذی متناسب با ارتفاع آب و مقدار سرعت در لایه‌ها که متناسب با میزان همگنی و تعداد ناپوستگی‌ها تغییر می‌یابد، استفاده شد، سپس مدل اجرا می‌شود و خروجی آن با خروجی مشاهده شده در نمونه اصلی مقایسه می‌شود، این کار تا بهترین حالت تطابق بین دو خروجی ادامه می‌یابد. که در نهایت مدل لغزشی نهایی (شکل ۸) و مدل جریان آب زیرزمینی (شکل ۹) را در پارامترهای مربوط به مدل ۷، موجود در جدول ۳ کالیبره شد، که روند تغییرات در پارامترها و کالیبره کردن آن در (جدول ۳) نشان داده شده است.

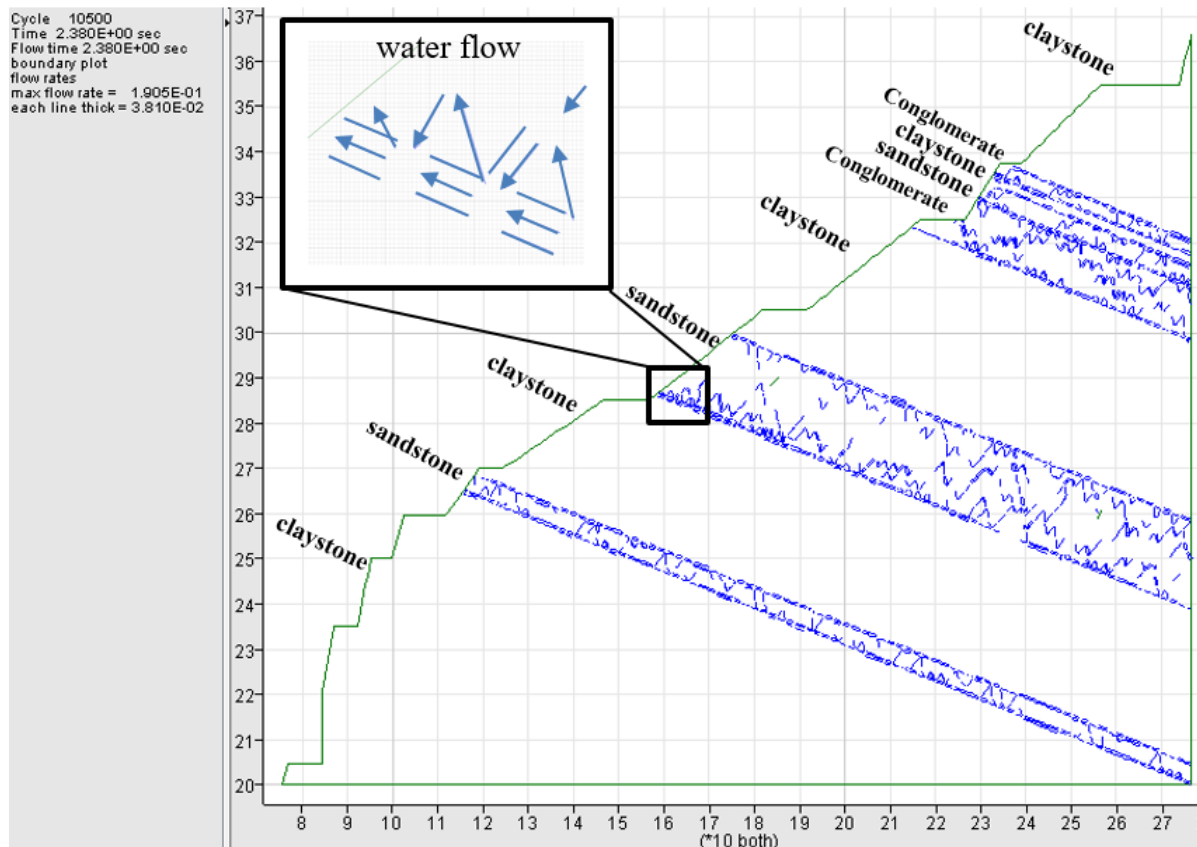
مدل مورد نظر را متناسب با یک دوره بیست ساله مدل‌سازی شد که به منظور کالیبره کردن مدل، تغییراتی در پارامترهای آن اعمال شد (به مجموعه تغییرات اعمال شده در پارامترها که جهت نزدیکی و سازگاری مدل پیش بینی شده در تولید داده‌هایی همانند مدل واقعی یا نمونه اصلی را تنظیم مدل یا کالیبراسیون گفته می‌شود، هدف از کالیبراسیون حداقل کردن اختلاف بین خروجی پیش‌بینی شده و مشاهده شده است) در این پژوهش برای کالیبراسیون از پارامترهای تغییر پذیر نظیر مقدار تنش‌ها متناسب با حجم روبار قرار گرفته روی آن، مقدار



شکل ۸. مدل لغزشی کالیبره شده تکیه‌گاه راست سد مورد مطالعه (برحسب متر)

جدول ۳. مراحل کالیبره‌سازی مدل

model	σ_v (MPa)	σ_h (MPa)	Water level (m)	Pore water pressure (MPa)	Velocity in rock layers (mm/s)
1	4/07	2/03	366	3/59	Conglomerate=1 sandstone=2 silestone=3 claystone=3
2	4	1/9	360	3/53	Conglomerate=1 sandstone=3 silestone=4 claystone=4
3	3/80	1/8	355	3/48	Conglomerate=0/5 sandstone=4 silestone=5 claystone=5
4	3/60	1/5	350	3/43	Conglomerate=0/3 sandstone=4 silestone=6 claystone=6
5	3/40	1/4	345	3/38	Conglomerate=0/3 sandstone=5 silestone=7 claystone=7
6	3/30	1/3	340	3/33	Conglomerate=0/2 sandstone=5 silestone=7 claystone=8
7	3/20	1/2	340	3/33	Conglomerate=0/2 sandstone=6 silestone=7 claystone=9



شکل ۹. مدل جریان آب زیرزمینی در تکیه‌گاه راست (m/s).

۴-۴. تحلیل هیدرومکانیکی

بر اساس جریان آب زیرزمینی مدل‌سازی شده در مقطع انتخاب شده، جریان آب در داخل لایه‌های ماسه‌سنگ و کنگلومرا با سرعت متوسط $5/7 \times 10^{-2}$ متر بر ثانیه (نفوذپذیری توده‌سنگ) جریان دارد که بیشترین مقدار آن در مرزهای لیتوژی به مقدار $1/9 \times 10^{-1}$ متر بر ثانیه می‌رسد و همان‌طور که از شکل ۹ مشاهده می‌گردد، جریان آبی از داخل لایه‌های رسی به طرف پایین حرکت نکرده و فقط در امتداد مرزهای لایه‌بندی جریان یافته است که علت آن را می‌توان به بسته بودن درزه‌ها در این لایه‌ها دانست و همچنین به دلیل اینکه شیب لایه‌بندی مورب به طرف داخل شیب است، آب به خوبی زهکشی نمی‌شود. پس از مدل‌سازی عددی و کالیبره کردن آن نتایج مربوط به جابه‌جایی‌های حاصله از مدل عددی در ترازهایی که

کشیدگی سنج‌ها در آن قرار دارند، بدست آورده و نتایج مربوط به آن در مقابل نتایج کشیدگی سنج‌ها قرار داده شد که در (جدول ۴) ارائه شده است (جابه‌جایی + نشان دهنده جابه‌جایی به سمت داخل شیب است و جابه‌جایی - نشان دهنده جابه‌جایی به سمت بیرون شیب است). طبق نتایج بدست آمده از مدل عددی نتایج حاکی از روند جابه‌جایی‌ها به بیرون از شیب بوده بیشترین جابه‌جایی رخ داده بین ترازهای ۲۳۰ تا ۳۱۰ متر به حدود ۱۴ میلی‌متر رسیده است که نشان دهنده وجود ناپایداری در این محدوده است. که باید از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی بیشتر مورد توجه قرار گیرد. چون بیشترین حجم ناپایداری‌ها و ریزش‌ها در این ناحیه قرار دارد که دلیل آن می‌توان قرارگیری بیشتر لایه‌های رسی در این ناحیه دانست.

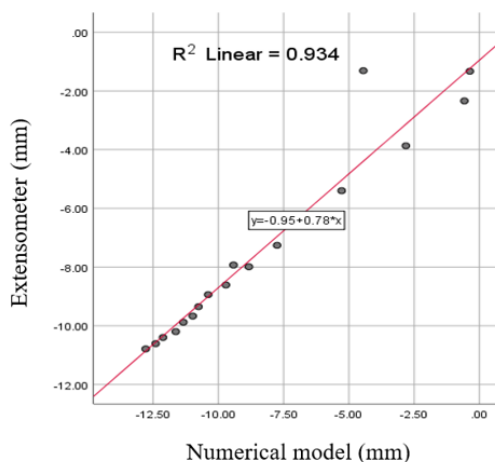
جدول ۴. مقدار جابه‌جایی در هر یک از ترازهای مقطع.

Time	Height level 252		Height level 306	
	Extensometer (mm)	Numerical model (mm)	Extensometer (mm)	Numerical model (mm)
2000	-1/33	-0/37	-0/87	-0/53
2001	-2/34	-0/58	-3	-2/20
2002	-3/87	-2/82	-4/23	-3/88
2003	-1/31	-4/45	-4/33	-5/23
2004	-5/40	-5/28	-5/09	-6/16
2005	-6/23	-6/40	-5/44	-6/67
2006	-6/36	-7/35	-6/04	-7/09
2007	-7/26	-7/75	-6/22	-7/42
2008	-7/40	-8/37	-6/26	-7/82
2009	-7/99	-8/83	-6/29	-8/04
2010	-7/93	-9/42	-7/29	-8/23
2011	-8/61	-9/71	-7/56	-8/45
2012	-8/94	-10/39	-7/83	-8/73
2013	-9/35	-10/76	-7/93	-9/08
2014	-9/67	-10/98	-7/81	-9/23
2015	-9/88	-11/34	-7/88	-9/62
2016	-10/20	-11/63	-	-9/82
2017	-10/40	-12/12	-	-10/03
2018	-10/61	-12/40	-	-10/24
2019	-10/79	-12/87	-	-10/43
2020	-	-13/18	-	-10/68

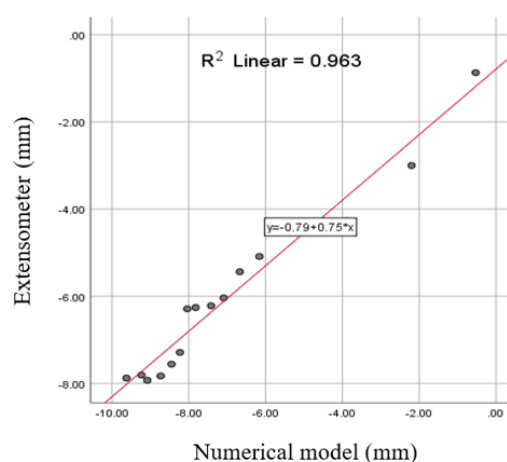
سطح معناداری تعریف می‌شود (Duncan and Wyllie, 2014) که برای این کار از نرم‌افزار SPSS که به طور اتوماتیک نمودار را رسم و مقدار ضرایب را محاسبه می‌کند (شکل ۱۰) استفاده شد.

۴-۵. اعتبارسنجی مدل

روش‌های متنوعی برای اعتبارسنجی مدل وجود دارند، یکی از این روش‌ها استفاده از نمودارهای رگرسیونی بین نتایج مدل‌سازی شده و اندازه‌گیری شده است که بر حسب این نمودار برای معتبر بودن مدل، ضرایب چون ضریب تعیین و



Height level 252
Extensometer - Numerical model
 $R^2 = 0/934$
 $sig = 0/05 > 0$



Height level 306
Extensometer - Numerical model
 $R^2 = 0/963$
 $sig = 0/05 > 0$

شکل ۱۰. اعتبارسنجی مدل عددی از روی نتایج کشیدگی سنج در محیط نرم افزار SPSS

دارند که به عنوان یک لایه نفوذناپذیر عمل کرده و جریانی از خود عبور نمی‌دهند که به مرور زمان تمامی جریانات به داخل درزه‌های مربوط به لایه‌بندی تخلیه می‌شوند. در واقع شرایط هیدروژئولوژی ساختگاه باعث تشکیل سفره‌های آب معلق در داخل کنگلومرا و ماسه‌سنگ نموده است که مرز زیرین آن را لایه‌های رسی نفوذناپذیر تشکیل می‌دهد. در حقیقت حضور ناپیوستگی‌های باز شده بر روی سطح و بالای شیب سبب نفوذ و جریان آب ناشی از بارش‌های جوی در این واحدها می‌شود که آب بارش‌های جوی را جمع‌آوری نموده و سپس با گذشت زمان، آب را بصورت تدریجی از طریق درزه‌های لایه‌بندی به سمت لایه‌های زیرین که از شکستگی کمتری برخوردارند، انتقال می‌دهد.

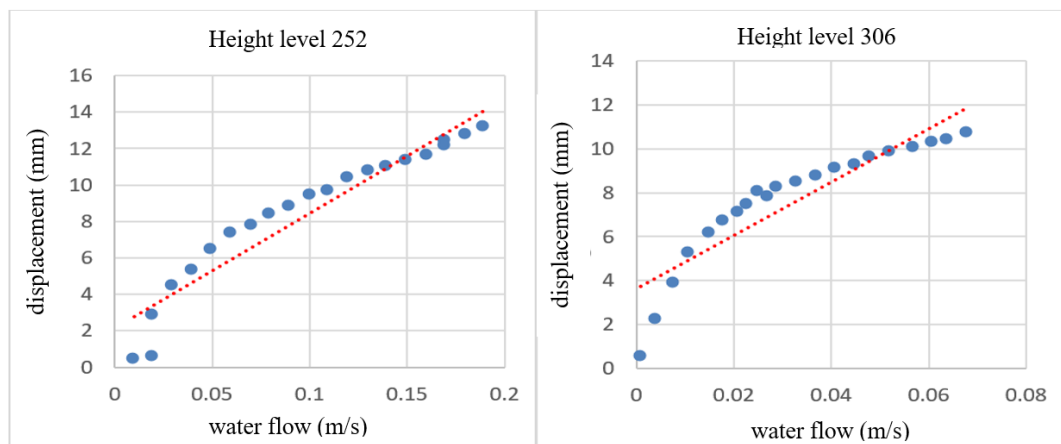
۵-۱. ارتباط بین وجود سفره‌های آب معلق با جابه‌جایی‌های رخ داده

طبق نتایج بدست آمده از مقدار جابه‌جایی‌های رخ داده با مقدار جریان آب از هر یک ترازهای مربوط به کشیدگی سنج‌ها (تراز ۳۰۶ و تراز ۲۵۲) رابطه خطی مستقیمی بین دو پارمتر ذکر شده وجود دارد به طوری که در هر یک ترازها هر چقدر توزیع آب بیشتری در واحد سطح لایه‌های ریزدانه وجود داشته باشد، به مرور زمان جابه‌جایی‌های ناشی از رفتار تورمی بیشتری نیز رخ می‌دهد (شکل ۱۱).

ضریب تعیین (R^2): اندازه‌گیری آماری نزدیکی داده‌ها به خط رگرسیون برازش شده می‌باشد که مقدار آن بین صفر تا یک است، هر چقدر ضریب به عدد یک نزدیک‌تر باشد نتایج پیش‌بینی شده به نتایج واقعی نزدیک‌تر می‌باشد. سطح معناداری (sig) در واقع حد معیاری برای قبولی نتایج مدل‌سازی شده می‌باشد، که باید مقدار آن کوچک‌تر از ۰/۰۵ باشد و اگر بزرگ‌تر از ۰/۰۵ باشد، نتایج قابل قبول و معنادار نیست.

۵. بحث

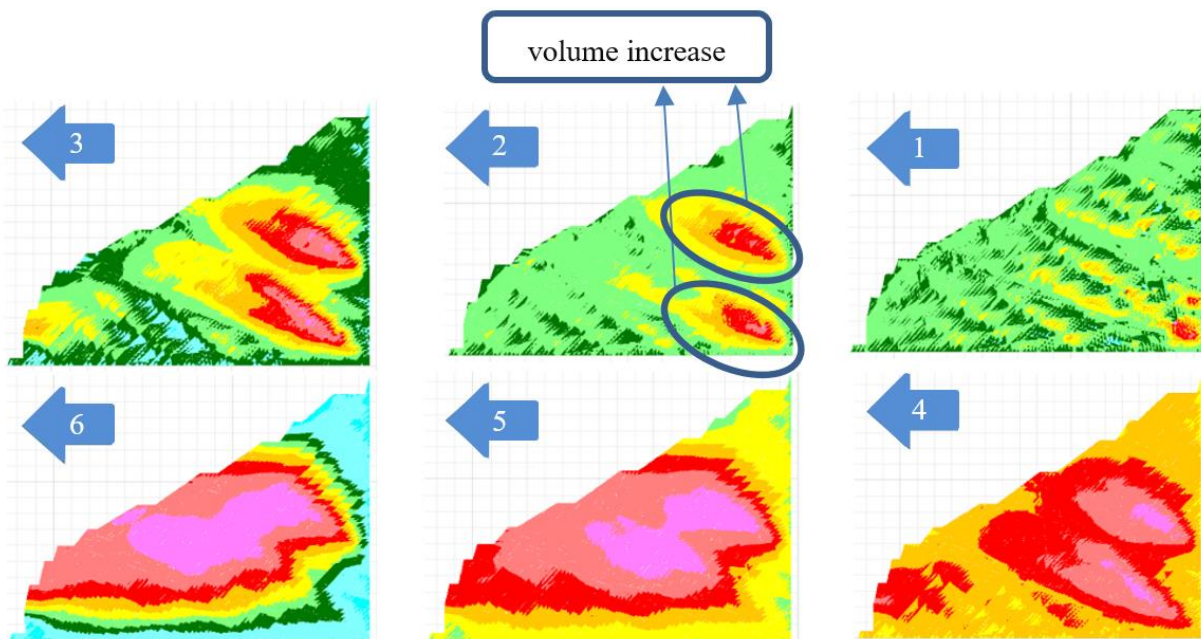
نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی با داشتن ضریب تعیین بالا ($<0/90$) و سطح قابل قبول ($>0/05$) در قرائت مناسبی با مقدار اندازه‌گیری شده توسط کشیدگی‌سنج‌ها می‌باشد که صحت و اعتبارسنجی مدل‌سازی عددی را تایید می‌کند، در مقطع مدل‌سازی شده، جریان آب از بالا به پایین از داخل کنگلومرا و ماسه‌سنگ عبور نموده و در مرز لایه‌های رسی به طرف پایین‌تر حرکت نکرده است، بلکه در راستای مرزهای لایه‌بندی جریان یافته و به درون عمق نفوذ کرده‌اند که بیشترین جریان آب عبوری در ناپیوستگی‌های مربوط به لایه‌بندی به دلیل طول اثر (بزرگتر از ۲۰ متر) و بازشدگی (بیش از ۵ میلی‌متر) برقرار می‌باشد، درزه‌های درون لایه‌های رسی به دلیل رفتار پلاستیسته و فشار روبار زیاد روی آن، حالت بسته شده



شکل ۱۱. رابطه بین وجود سفره‌های آب معلق با جابه‌جایی‌ها نسبت به زمان

به دلیل سطح تماس بیشتر لایه‌های رسی با جریان آب رفتار تورمی خاصی در مقطع مدل‌سازی شده به خوبی قابل مشاهده می‌باشد، در دو ناحیه از شکل ۱۲ جایی که لایه‌های رسی قرار دارند، افزایش حجمی (ناحیه قرمز رنگ)، مشاهده می‌شود که به

سمت خارج شیب در حال حرکت هستند که در نهایت این دو افزایش حجم در ناحیه‌ی خاصی با یکدیگر برخورد و ترکیب شده و به سمت بیرون شیب حرکت نموده که باعث افزایش فشار به لایه شاترکریت و ریزش آن می‌شوند.



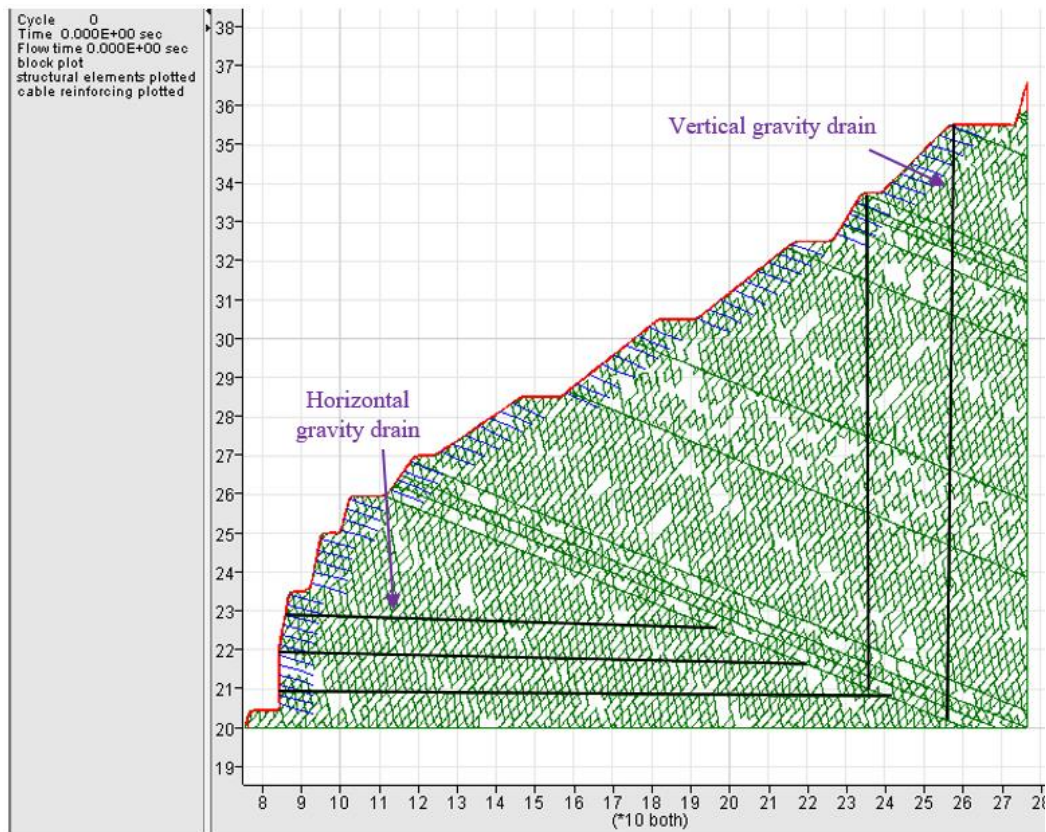
شکل ۱۲. شکل‌گیری رفتار تورمی (افزایش حجم) در مقطع مدل‌سازی شده

۲-۵. راهکار پایداری

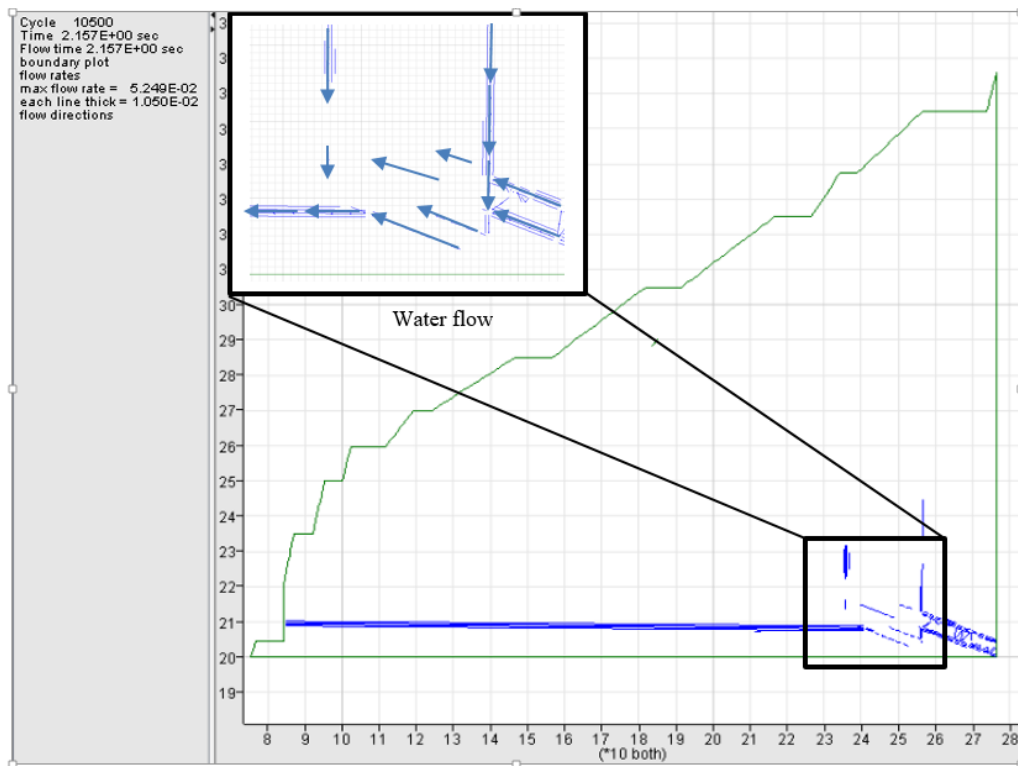
بر اساس مدل جریان آب زیرزمینی بدست آمده، مشخص شدن راستای حداکثر و حداقل مؤلفه‌های نفوذپذیری و شناسایی شکستگی‌هایی که بیشترین تأثیر را در این امر دارند، اقدامات زیر برای کاهش، خارج کردن سطح آب زیرزمینی و جلوگیری از بروز رفتار تورمی لایه‌های رسی در مقطع مدل‌سازی شده (شکل ۱۳) استفاده شد.

(۱) استفاده از زهکش‌های ثقلی قائم در بالای شیب با عمق بیشتر به طوری که تمام لایه‌های رسی را قطع

کرده باشد (برای کاهش سطح آب زیرزمینی به دلیل آنکه جریان آبی از داخل لایه رسی عبور نمی‌کند).
 (۲) استفاده از زهکش‌های ثقلی افقی در پایین شیب مدل با طول بیشتر حداقل تا رسیدن به مرز لایه‌بندی (برای خارج کردن آب از شیب به دلیل آن که بیشترین مقدار آب در داخل ناپیوستگی‌های لایه‌بندی جریان دارد و تمام جریان آب زیرزمینی در داخل آن تخلیه می‌شود).



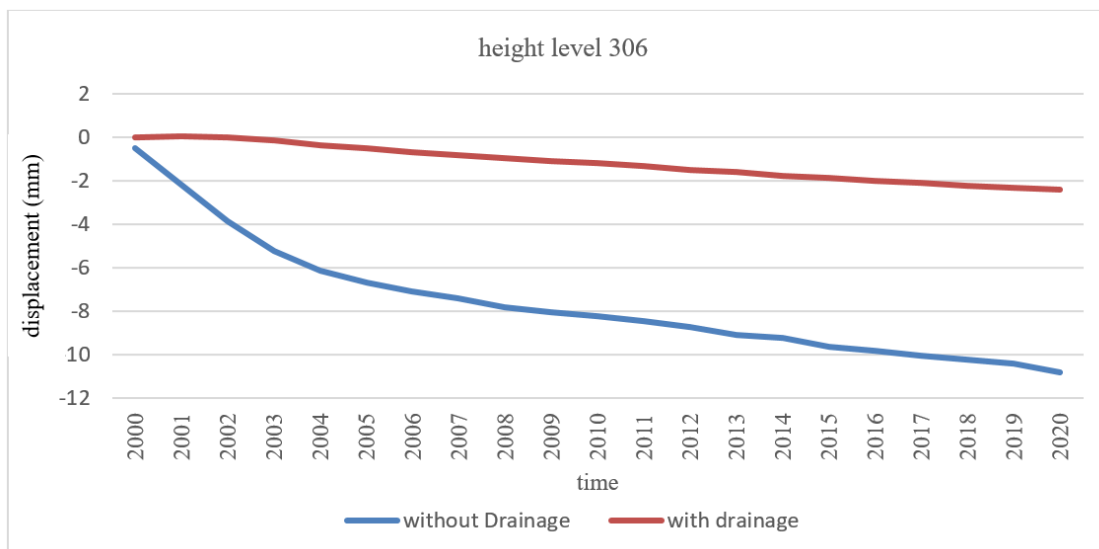
شکل ۱۳. جانمایی زهکش‌های اعمال شده در هندسه مدل



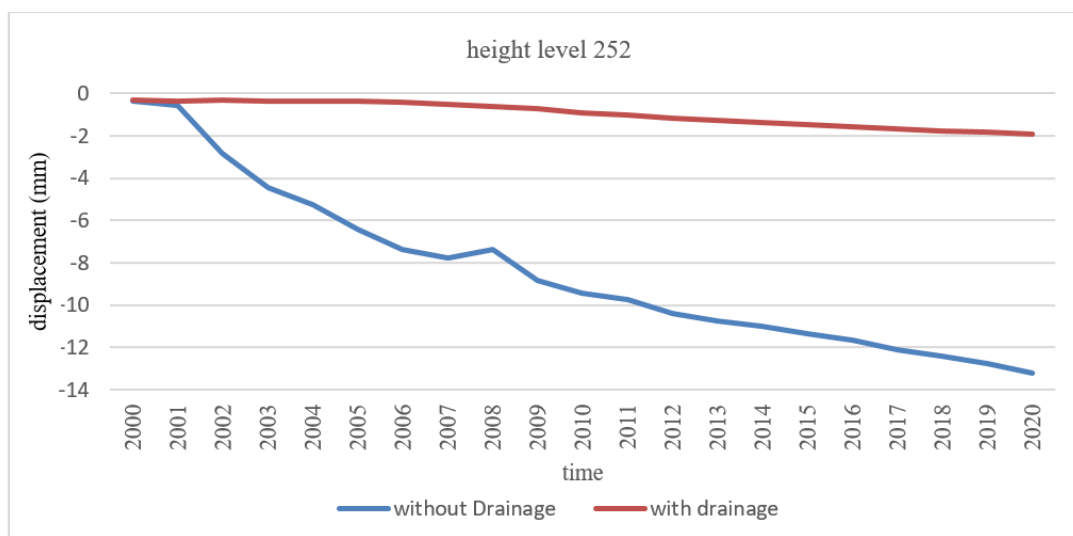
شکل ۱۴. مدل جریان آب زیرزمینی در حالت سیستم زهکشی جدید

همان طور که از نتایج شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، پس از اعمال سیستم زهکشی جدید در مدل، جریان آب از طریق زهکش‌های ثقلی قائم به طرف پایین هدایت شده و از طریق زهکش‌های ثقلی افقی از داخل شیب خارج شده است، همچنین برای بررسی میزان تاثیر زهکش‌های جدید طراحی شده در کاهش

میزان جابه‌جایی‌ها در مدل، نتایج مربوط به جابه‌جایی‌ها در هر کدام از ترازهای مقطع در نظر گرفته شده (شکل ۱۵ و شکل ۱۶) در دو حالت بدون سیستم زهکشی جدید و با سیستم زهکشی جدید مورد مقایسه قرار گرفت.



شکل ۱۵. نتایج مقدار جابه‌جایی در تراز ۳۰۶ در دو حالت بدون سیستم زهکشی جدید و با سیستم زهکشی جدید



شکل ۱۶. نتایج مقدار جابه‌جایی در تراز ۲۵۲ در دو حالت بدون سیستم زهکشی جدید و با سیستم زهکشی جدید

شود که در طول زمان بهره‌برداری پروژه، آب معلق قرار گرفته در بالای لایه‌های رسی به تدریج جذب رس سنگ شده (به دلیل قابلیت جذب آب در مواد ریزدانه) و این امر باعث بروز تورم (افزایش حجم)، تولید و افزایش فشار به سمت دیواره‌های تکیه‌گاه و نهایتاً موجب ترک خوردگی و ریزش آن می‌شود. در نهایت به مرور زمان تأثیری منفی بر پایداری سازه ایجاد می‌کند که باید هر چه سریع‌تر برای خارج کردن آب و جلوگیری از بروز رفتار تورمی اقدام کرد، در این مواقع استفاده از زهکش‌های ثقلی قائم در بالای شیب با عمق بیشتر به طوری که تمام لایه‌های نفوذناپذیر (رس سنگ) را قطع کرده باشد و استفاده از زهکش‌های ثقلی افقی در پایین شیب با طول بیشتر حداقل تا رسیدن به مرز لایه‌بندی در جهت پایداری سازی سازه می‌تواند کارساز باشد.

قدردانی:

در این پژوهش از مساعدت جناب مهندس آقای عباس ذوالفقاری و همچنین تمامی مهندسين مشاور شرکت سد و تونل پارس بابت راهنمایی‌های ارزنده تشکر می‌شود.

همان طور که از نتایج مقدار جابه‌جایی‌ها در هر دو حالت ذکر شده (شکل ۱۵ و شکل ۱۶) مشاهده می‌گردد، سیستم زهکشی اعمال شده در مدل مقطع در نظر گرفته شده، تأثیر قابل توجهی در کاهش مقدار جابه‌جایی‌ها داشته است و همچنین نتایج حاکی از آن است که حدود ۸۰ درصد جابه‌جایی‌های رخ داده ناشی از وجود جریان آب زیرزمینی (سفره‌های آب معلق) در داخل شیب و حدود ۲۰ درصد باقی مانده مربوط به سایر عوامل می‌باشد.

۶. نتیجه‌گیری

در سازندهایی که وجود لایه‌های رسی باعث تشکیل سفره‌های آب معلق می‌شود، در حالتی که شیب لایه‌بندی مورب و جهت آن به طرف داخل شیب است، جریان آب زیرزمینی به خوبی زهکشی نمی‌شود، با توجه به قرارگیری تکیه‌گاه‌های سد مسجد سلیمان در یال ناودیس، شیب لایه‌ها مورب و به طرف داخل شیب است که این امر در زمان طراحی زهکشی ساختگاه به آن توجه نشده است، در نتیجه وجود سفره‌های آب معلق در لایه‌های مختلف در صورت عدم زهکشی مناسب، می‌تواند منجر به افزایش فشار منفذی و کاهش مقاومت برشی لایه‌ها

منابع

- آقاناتی، س.ع، (۱۳۸۳)، زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور ص ۴۰۹-۴۱۰.
- حسینی ساطحی.ح، (۱۳۹۵) مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی در توده‌سنگ‌های درزه‌دار (مطالعه موردی: ساختگاه سد خرسان ۳)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد.
- سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۹۳)، نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ لالی.
- شرکت سد و تونل پارس، ۱۳۹۷، گزارش ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدروژئولوژی ساختگاه سد مسجد سلیمان.
- شرکت سد و تونل پارس، ۱۳۹۸، گزارش بررسی کارکرد و اصلاح سیستم مانیتورینگ و ابزار دقیق تکیه‌گاه راست سد مسجد سلیمان.
- Azarafza, M., Akgun, H., Feizi-Derakhshi, M.R., Azarafza, M., Rahnamarad, J., Derakhshani, R. (2020). Discontinuous rock slope stability analysis under blocky structural sliding by fuzzy key-block analysis method. *Heliyon*, 6(5), e03907.
- Cundall, P.A., Strack, O.D., (1979), A discrete numerical model for granular assemblies, *geotechnique*, 29(1), 47-65.
- Duncan, C., Wyllie, D., (2014), Calibration of rock fall modeling parameters, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 67, 170-180.
- Duncan, C, Wyllie, D, (2018), *Rock Slope Engineering*, CRC Press, 5 Ed.
- Eberhardt,, E., (2003), *Rock Slope Stability Analysis - Utilization of Advanced Numerical Techniques*, Geological Engineering/Earth and Ocean Sciences.
- Kalililo, M., Xia, Y. (2020). UDEC-based stability analysis of jointed bedding slope and slope parameter optimization suggestions: a case study. *SN Applied Sciences*, 2(12), 1-21.

-
- Ning, Y., Tang, H., Zhang, G., (2019), Sensitivity analysis of toppling deformation for interbedded anti-inclined rock slopes based on the Grey relation method, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 78, 6017-6032.
- Peckover, F.L., (1998), "Treatment of rock falls on railway lines, American Railway Engineering Association, 76, 471-503.
- Piteau, D.R., (1972), "Engineering geology considerations and approach in assessing the stability of rock slopes", *Bulletin 653, Association of Engineering Geology* 9.
- Sakurai, S., (2016), *Back analysis in rock engineering*, CRC Press, 4 Ed,