

تحلیل پایداری شیروانی‌های بالا دست و پایین دست جاده مشرف به سد هراز

مهرداد شاقلائی لور^۱؛ رضا شکور شهابی^{۲*}؛ میر رئوف هادئی^۲؛ مرتضی رحیمی دیزجی^۳؛ علی ابوالقاسم اصفهانی^۴

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۲- استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

۳- مدیر ژئوتکنیک و تونل، گروه مهندسی سپاسد

۴- دانش آموخته کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱

چکیده

با توجه به احداث سد هراز، حدود ۹ کیلومتر از جاده هراز در محدوده مخزن سد قرار می‌گیرد؛ لذا احداث مسیر جایگزین در تراز بالاتر ضروری است. در این دست‌نوشته، پایداری شیروانی‌های سنگی پرتال تونل در محدوده دره پرن واقع در مسیر جاده جایگزین مشرف به سد هراز، با استفاده از روش‌های سینماتیکی، تجربی و روش عددی تحلیل گردید و مدل سازی عددی آن با نرم‌افزار 3DEC انجام و سیستم نگهداری پیشنهادی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور ابتدا با تحلیل سینماتیک، احتمال هر سه نوع گسیختگی صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی در شیب‌های بالا دست و پایین دست جاده مشخص گردید و در ادامه با تحلیل پایداری شیب‌ها با روش تجربی SMR، مشخص گردید که توده سنگ در برخی موارد در رده‌بندی خیلی بد قرار می‌گیرد و در همه حالات نیاز به سیستم نگهداری است. مدل سازی عددی پایداری شیروانی با استفاده از نرم‌افزار 3DEC، حداکثر جابه‌جایی بلوک‌های شیروانی ۸/۴۲ سانتی‌متر برآورد گردید و ضریب اطمینان شیروانی مورد مطالعه ۱/۳۹ محاسبه گردید که از ضریب اطمینان مجاز برای دیوارهای سنگی میان و بلند مدت (۱/۵) پایین‌تر است. طبق نتایج تحلیل عددی و بررسی نتایج SMR، بهترین سیستم نگهداری پیشنهادی نصب پیچ سنگ به صورت موضعی و بتن پاشی با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر است. بر اساس نتایج مدل سازی عددی در 3DEC، با اجرای سیستم نگهداری پیشنهادی پیچ سنگ و شاتکریت، حداکثر جابه‌جایی به ۱/۰۵۳ سانتی‌متر و ضریب اطمینان شیروانی به ۱/۵۵ افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی

پایداری شیب، شیروانی سنگی، سد هراز، مدل سازی عددی، دره پرن، نرم‌افزار 3DEC

۱- مقدمه

امروزه مطالعه و بررسی پایداری شیروانی‌ها در سنگ‌های درزه‌دار دیواره مشرف به سازه‌ها یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مسائلی است که در اجرای سازه‌های مهندسی نظیر سدهای خاکی و بتنی، راه‌ها و بزرگراه‌ها، خطوط راه‌آهن، تونل‌ها، کانال‌های آب‌رسانی، تونل‌های انتقال آب، مناطق مسکونی، حفاری معادن روباز و حتی توسعه جنگل‌ها و مراتع طبیعی صورت می‌گیرد. در میان محققین مختلف

پیتائو^۱ از اولین کسانی است که در مورد اهمیت ساختار در پایداری شیروانی‌های سنگی بحث کرده است. او پیشنهاد کرد که: «اصل تعیین‌کننده در پایداری شیروانی‌های سنگی نبود ناپیوستگی در ساختمان توده سنگ است و مقاومت ذاتی سنگ تأثیر کمتری دارد» (Piteau, D.R., 1972). بررسی پایداری شیروانی سنگی به عنوان یکی از موضوعات مهندسی سنگ، توسعه قابل توجهی در بیست سال گذشته نسبت به روش برآورد مقاومت برشی سنگ ناپیوسته و روش‌های تجزیه و تحلیل نشان داده است. این موضوع توسط هوک

^۱ Piteau

الف- تعیین نقش پارامترهای طراحی نظیر زاویه شیب ترانشه، ارتفاع و شیروانی و تعداد پله ها

ب- تعیین زمان بهینه بین عملیات گودبرداری و عملیات اجرایی

پ- تعیین نوع سیستم تقویت شامل سیستم زهکشی، دیوار حائل و انکرهای تقویت کننده توده سنگ

۳- تکنیک‌های تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی

۳-۱- تحلیل سینماتیکی

تحلیل سینماتیکی یا استریوگرافیک که با استفاده از شبکه استرونت صورت می‌گیرد و با استفاده از تکنیک تصاویر استریوگرافیک، توجیه فضایی ناپیوستگی‌ها مشخص می‌شود (و بحرانی‌ترین وضعیت تعیین گردیده و مکانیسم ریزش‌هایی که از نظر سینماتیکی امکان وقوع دارند تعیین می‌گردد (Yilmaz et al, 2012). روش سینماتیکی عمدتاً به عنوان پیش نیاز تکنیک های دیگر و مقدم بر آنها انجام می‌گیرد و وابستگی نتایج تحلیل به دقت برداشت های صحرایی از مشکلات این روش است (ترابی، ۱۳۹۰). بر این اساس با به دست آوردن پارامترهای لازم از قبیل شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها و دیواره‌ها و شیب اصطکاک داخلی ناپیوستگی، احتمال ریزش و گسیختگی و نوع گسیختگی احتمالی مشخص می‌گردد. بعد از مشخص شدن نوع گسیختگی می‌توان یکی از سه روش تجربی، تعادل حدی و عددی را برای بررسی پایداری انتخاب نمود و راهکارهای مناسب جهت مقابله با ناپایداری پیشنهاد می‌گردد.

۳-۲- روش‌های تجربی

روش‌های تجربی بر پایه طبقه‌بندی‌های مهندسی توده سنگ^۲ بنا شده‌اند. مهمترین طبقه‌بندی‌های مهندسی برای تعیین کیفیت توده‌های سنگی شامل طبقه‌بندی RQD^3 ، طبقه‌بندی RMR^4 و طبقه‌بندی Q می‌باشد. طبقه‌بندی توده سنگ به روش SMR^5 توسط رومانا در سال ۱۹۸۵ برای ارزیابی پایداری شیروانی‌های سنگی با استفاده از ۲۸ مورد تاریخی لغزش سنگ گردیده است. به طوری که پس از تعیین RMR_b برای توده سنگ بر مبنای پنج پارامتر مقاومت مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر، کیفیت مغزه حفاری (RQD)، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، شرایط ناپیوستگی (تأثیر بازشدگی، تداوم یا امتداد یافتگی، زبری سطح، هوازدگی دیواره و مواد پرکننده درزه‌ها) و شرایط آب زیرزمینی می‌توان مقدار SMR از

(۱۹۹۸)، هوک و بری (۱۹۸۱)، یلی و نوریچ (۱۹۹۶) و جیانی (۱۹۹۲) ارائه شده است (Sayao, A. S. F. & Ortigao, J. A. R., 2011). شیروانی‌های سنگی ناپایدار که در برش‌های سنگی دیواره های مشرف به انواع سدها وجود دارند از جمله پتانسیل‌های خطر برای این سازه‌ها به شمار می‌آیند.

سد هراز به عنوان بزرگ‌ترین سد مخزنی تأمین آب شرب و کشاورزی شمال ایران است. سد مخزنی هراز در جنوب استان مازندران، در نزدیکی جنوب شهر آمل واقع شده است. پس از آبگیری مخزن سد، حدود ۹ کیلومتر از جاده اصلی آمل به تهران زیر آب می‌رود. لذا طرح ترکیبی جاده و تونل برای مسیر جایگزین ارائه شده است که در ناحیه مشرف به سد هراز عمدتاً به صورت تونلی به طول ۱۶۰۰ متر است. با توجه به طول زیاد مسیر و بررسی‌های انجام شده، نیاز به استفاده از روش‌های مناسب جهت تحلیل پایداری شیروانی‌های بالا دست و پایین دست در قسمت جاده ضروری می‌باشد که بر اساس نظر مهندسین پروژه و مشاور و همچنین موقعیت، ارتفاع، شیب و ... و موجود بودن اطلاعات درزه نگاری محدوده دره پرن، پرتال تونل در محدوده دره پرن انتخاب گردید. پس از درزه نگاری‌های انجام شده در محدوده دره پرن و رسم منحنی تجمعی آن‌ها، ناپیوستگی‌های موجود در شیروانی‌های منطقه، شامل سه دسته‌دازه و یک لایه‌بندی تشخیص داده شد و با توجه به برداشت‌های صحرایی صورت گرفته، پایداری شیروانی‌های بالا دست و پایین دست جاده جایگزین در پرتال تونل محدوده دره پرن با استفاده از نرم‌افزار $Dips$ و روش تجربی SMR تحلیل گردید و با تحلیل سینماتیکی، احتمال هر سه نوع گسیختگی صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی در شیب‌های بالا دست و پایین دست جاده بررسی گردید در ادامه، پایداری شیروانی‌های بستر جاده جایگزین محور هراز با استفاده از نرم افزار $3DEC$ مدل‌سازی گردید. برای صحت سنجی نتایج مدل‌سازی عددی، مقایسه خروجی ها با روش‌های دیگر تحلیل پایداری انجام گرفت.

۲- مبانی تحلیل

یکی از اساسی‌ترین مسائل مهندسی سنگ، تحلیل و تعیین پایداری سطوح شیب‌دار با هدف تشخیص پایداری یا عدم پایداری شیروانی و در صورت نیاز تقویت آن به منظور بالا بردن ضریب اطمینان آن است. تحلیل پایداری مقدماتی اغلب به منظور تعیین پارامترهای بحرانی مؤثر در پایداری صورت می‌گیرد. ارزیابی پارامترهای هندسی و فیزیکی مؤثر بر پایداری شیروانی و تعیین نقش هر یک از آن‌ها نیازمند تحلیل‌های دقیق‌تر و ترکیب روش‌ها است. مهم‌ترین اهداف انجام تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی به شرح زیر می‌باشند (فریدونی، ۱۳۹۴):

^۲ Engineering Rock Mass Classification

^۳ Rock Quality Designation

^۴ Rock Mass Rating

^۵ Slope Mass Rating

(۱) مشخص می شود. روش‌های تجربی یا روش‌های مبتنی بر استفاده از طبقه‌بندی‌های مهندسی توده سنگ در تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی نیازمند قضاوت مهندسی و تجربه بالای فرد استفاده کننده می‌باشند. از این رو در استفاده از این روش‌ها باید دقت داشت تا صحت نتایج آمده ارزیابی و تضمین گردد. (فریدونی، ۱۳۹۴).

$$SMR = RMR_b + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (1)$$

طریق رابطه شماره ۱ نمود. (Romana, 1985) ارائه مقدار SMR نیز مانند RMR از ۰ تا ۱۰۰ متغیر است. توماس و همکارانش در ۲۰۰۷ برای مقادیر اختلاف امتداد سطح شیروانی با امتداد سطح ناپیوستگی (F_1)، شیب ناپیوستگی (F_2) و تفاوت شیب سطح شیروانی با شیب ناپیوستگی‌ها (F_3) روابطی را بیان کردند و همچنین نوع شیروانی و روش انفجار (F_4) ضرایب را تصحیح نمودند که مقدار آن از ۸- تا ۱۵+ متغیر است. (Tomas et al, 2007)

پس از محاسبه مقدار SMR امکان تحلیل اولیه پایداری تعیین نوع گسیختگی محتمل و نیز نیاز به سیستم نگهداری طبق جدول شماره

جدول ۱: رده‌های مختلف توده سنگ بر اساس مقادیر SMR (Romana, 1985)

رده (Class)	I	II	III	IV	V
مقدار SMR	۸۱ - ۱۰۰	۶۱ - ۸۰	۴۱ - ۶۰	۲۱ - ۴۰	۰ - ۲۰
توصیف توده سنگ	خیلی خوب	خوب	عادی	بد	خیلی بد
وضعیت پایداری	کاملاً پایدار	پایدار	نسبتاً پایدار	ناپایدار	کاملاً ناپایدار
نوع گسیختگی	بعضی بلوک‌ها ناپایدارند	گسیختگی صفحه‌ای در طول بعضی درزه‌ها و گسیختگی گوه‌ای	گسیختگی صفحه‌ای یا گسیختگی گوه‌ای در مقیاس بزرگ	گسیختگی صفحه‌ای یا گسیختگی دایره‌ای شبیه خاک‌ها	انواع مختلف گسیختگی
احتمال گسیختگی	۰	۰/۲	۰/۴	۰/۶	۰/۹
سیستم نگهداری	نیاز ندارد	گاهی اوقات نیاز دارد	سیستماتیک	اصلاح شیروانی	حفاری مجدد

۳-۳- روش‌های تحلیل عددی

شیروانی در یک محیط سنگی ناپیوسته مد نظر بود لذا از نرم افزار تحلیل محیط‌های ناپیوسته تحت عنوان $3DEC$ از مجموعه نرم افزارهای شرکت *Itasca* استفاده شد. با توجه به ماهیت سه بعدی تحلیل پایداری ساختاری شیروانی سنگی در بررسی واژگونی گوه‌ای در این پژوهش از نرم افزار عددی سه بعدی $3DEC$ استفاده شده است.

در جدول مروری بر تحقیقات گذشته صورت گرفته است که در آن‌ها تحلیل پایداری شیروانی بر اساس روش‌های عددی بخصوص روش اجزاء مجزا ارائه شده است. بر این اساس تکنیک اجزای مجزا در تحلیل نگهداری و پایداری شیروانی‌های سنگی درزه دار کارایی مناسبی دارد.

هم‌زمان با پیشرفت تکنولوژی کامپیوتر و قابلیت دسترسی آن برای اکثر مهندسين و محققين، روش‌های عددی برای تحلیل مسائل مهندسی در طول سه دهه اخیر توسعه یافته‌اند. اساس روش‌های عددی تبدیل یک محیط با بینهایت درجه آزادی به محیطی با تعداد درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط است. چنان که اثر نیرو و بارگذاری در این نقاط بررسیو پس از تعیین میزان تغییر شکل در این نقاط، برای سایر نقاط، با روش‌های میان‌یابی تغییر شکل‌ها محاسبه می‌گردد (قزوینیان، ۱۳۸۲). روش‌های عددی نسبت به روش‌های تحلیلی از قابلیت بالاتری برخوردارند، زیرا در این تحلیل‌ها امکان در نظر گرفتن ساختارهای زمین‌شناسی و آب زیرزمینی وجود دارد (فریدونی، ۱۳۹۴). در مدل سازی عددی می‌بایست پارامترهای ورودی مدل متناسب با رفتار مکانیکی واقعی مصالح در نظر گرفته شود. در این تحقیق با توجه به اینکه پایداری

جدول ۲- مروری بر تحقیقات اخیر در زمینه روش‌های تحلیل عددی پایداری شیروانی‌های سنگی

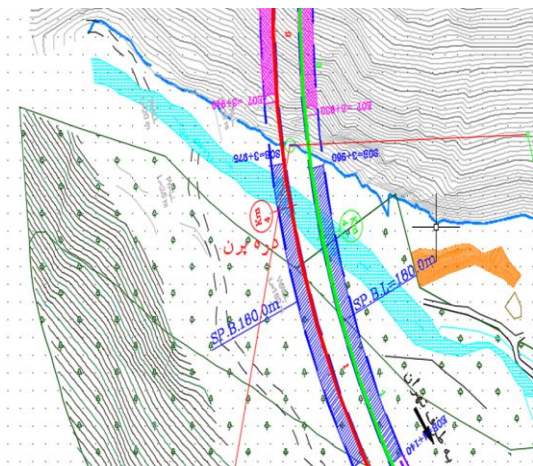
گردآورنده	تاریخ	روش تحلیل
گراسک و همکاران	۲۰۰۸	تحلیل پایداری شیب ساختمان چپ و راست سد کاپیکا در شرق ترکیه را با روش‌های سینماتیکی و عددی (Gurocak, 2008)
کولدسویک و همکاران	۲۰۰۹	تحلیل دینامیکی یک شیب سنگی در غرب نروژ به ارتفاع ۸۰۰ متر با روش اجزاء مجزا و روش بلوک لغزش نیومارک برای زلزله با دوره بازگشت ۱۰۰ و ۱۰۰۰ ساله. (Kveldsvik, 2009)
باسین و کی‌نیا	۲۰۰۴	کاربرد تحلیل اجزاء مجزا (رفتار استاتیکی و دینامیکی) در مورد یک شیروانی سنگی به ارتفاع ۷۰۰ متر در نروژ برای تخمین پتانسیل حجم سنگ جدا شده در یک گسیختگی بزرگ با استفاده از نرم‌افزار UDEC (Bhasin & Kaynia, 2004)
کرتیس و همکاران	۲۰۰۳	تحلیل دینامیکی یک سد قوسی از روش اجزاء مجزا (Curtis et al, 2003)
کرکم و مارتین	۲۰۰۲	مدلسازی تأثیر پایداری سازی شیب توسط دیوار حائل در مجاور سد ریول استوک (RevelStoke) کانادا با 3DEC (Corkum & Martin, 2002)
استید و ابرهارت	۲۰۱۳	بررسی آسیب‌های زمین لغزش‌ها، تأثیر توپوگرافی، لیتولوژی، شرایط آب، شکل بلوک‌ها و مدل سازی شیروانی‌های سنگی در محیط پیوسته و ناپیوسته (Stead & Eberhardt, 2013)
لئو و همکاران	۲۰۱۴	تحلیل پایداری یک شیروانی سنگی لایه‌ای تحت تأثیر زلزله و ارائه روشی برای تعیین ضریب اطمینان و سطح لغزش بحرانی با ترکیب اجزاء مجزا و کاهش مقاومت برشی (Liu et al, 2014)
کفایتی، باغبانان و هاشم الحسینی	۱۳۸۹	تحلیل استاتیکی و دینامیکی تکیه‌گاه سمت راست سد کارون ۴ با تحلیل اجزاء مجزا و نرم افزار UDEC (کفایتی، ۱۳۸۹)
ازهری و همکاران	۱۳۹۰	تحلیل پایداری دینامیکی بلوک‌های تکتونیک ۱ و ۲ معدن چغارت با UDEC و 3DEC

۴- مطالعه موردی (مسیر جایگزین مشرف به سد هراز)

۴-۱- وضعیت سد و جاده جایگزین

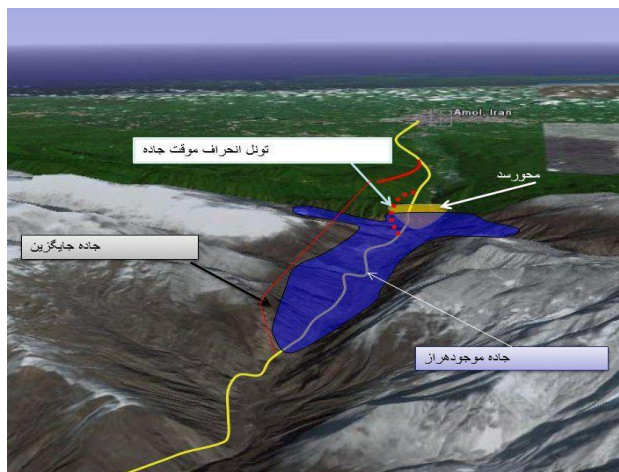
سد مخزنی هراز در جنوب استان مازندران، در فاصله ۲۵ کیلومتری جنوب شهر آمل و بر روی رودخانه هراز واقع شده است. مسیر جایگزین در مسیر جاده هراز، مشرف به سد مخزنی هراز به طول ۱۰ کیلومتر و ۳۲۵/۷۵ متر است، این مسیر به علت اینکه پس از آگیری مخزن سد، حدود ۹ کیلومتر از جاده موجود هراز زیر آب قرار می‌گیرد، در دیواره چپ سد مخزنی هراز ایجاد شده است. در این مسیر دو تونل به طول ۱۶۰۰ کیلومتر در حال احداث است. در شکل ۳ نمایی از محل قرارگیری جاده جایگزین نسبت به سد و همچنین جاده موجود را نشان می‌دهد. با توجه به طول زیاد مسیر و طبق بررسی‌های انجام شده، بر اساس نظر مهندسین پروژه و مشاور و موقعیت، ارتفاع، شیب شیروانی‌ها و همچنین موجود بودن ریز برداشت زمین‌شناسی (درزه نگاری‌ها) در محدود دره پرن، شیروانی پرتال تونل در محدوده دره پرن در این تحقیق انتخاب و مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. پلان این منطقه (پرتال تونل مشرف به دره پرن) در شکل نشان داده شده است. مطابق شکل ۳ دیواره بالا دست جاده دارای شیب کلی ۶۵ و شیب پله ۷۹ درجه و دیواره پایین دست جاده نیز دارای شیب کلی ۴۵ درجه و شیب پله ۷۹ درجه مشخص شده است. مسیر جایگزین در سمت چپ دیواره مخزن سد هراز قرار دارد. محدوده شیروانی مورد نظر در جاده جایگزین محور هراز، در دره پرن

قرار دارد. این دره در اثر عملکرد گسل بزرگ شمال البرز ایجاد شده است. با توجه به شکل ۴ و بررسی‌های زمین‌شناسی انجام شده محدوده مسیر جایگزین در ناحیه واحد سنگی $T1-DL3$ تشکیل شده است.

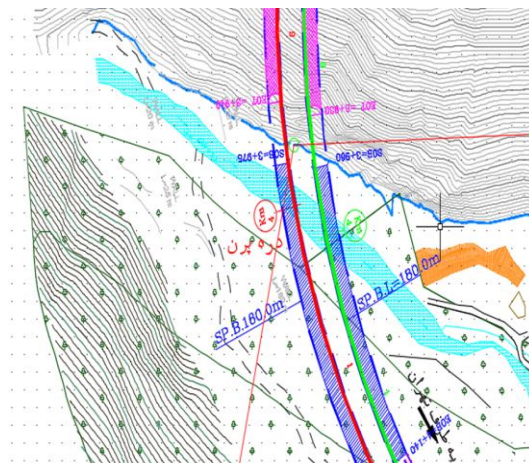


شکل ۳- توپوگرافی شیروانی مورد نظر در جاده جایگزین مشرف به سد هراز

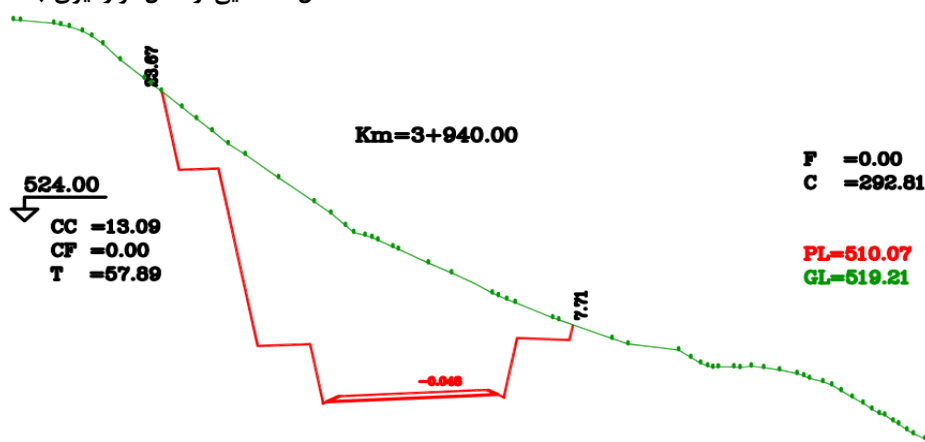
زیر واحد آهکی - دولومیتی میانی ($T1-DL3$) شامل تناوب آهک مارنی خاکستری تا کرم با دولومیت خاکستری تیره متوسط لایه است و آثاری از حفرات انحلالی که درشت‌تر از واحدهای زیرین هستند در آن دیده می‌شود. دسته‌درزه‌های با جهت شیب‌های متفاوت در این زیر واحد دیده شده که در ایجاد و گسترش این حفرات انحلالی مؤثر می‌باشند ابعاد این حفرات تا حدود ۵/۰ متر نیز می‌رسد.



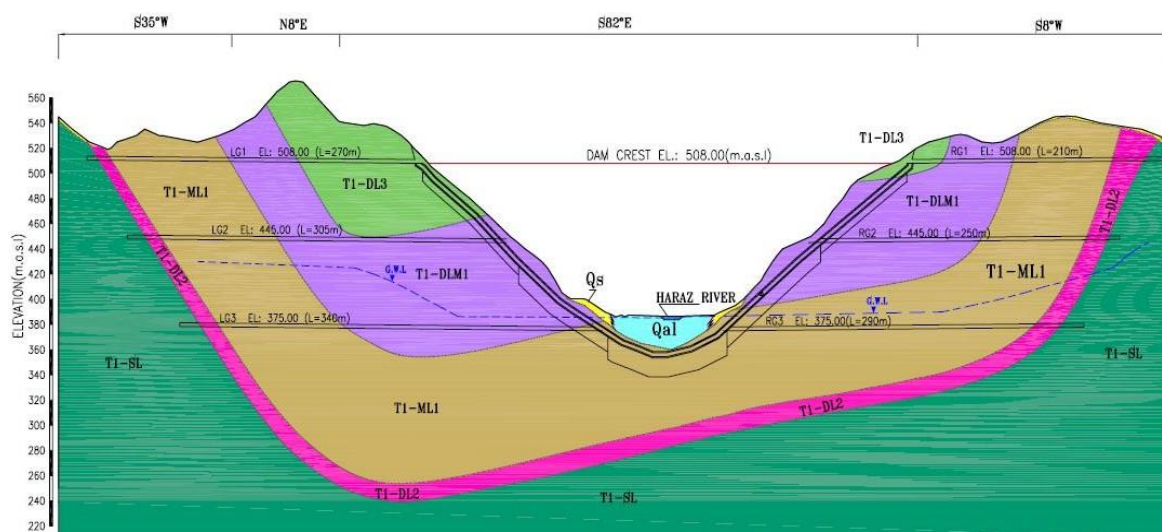
شکل ۱- نمایی از محل قرارگیری جاده جایگزین



شکل ۲- پلان مربوط به محدوده دره پرن



شکل ۳- توپوگرافی شیروانی مورد نظر در جاده جایگزین مشرف به سد هراز



شکل ۴- ناحیه بندی ژئومکانیکی پی و تکیه‌گاه‌های سد مخزنی هراز (شرکت مه‌اب قدس (ب)، ۱۳۹۳)

۱۵	۱۵						۳	۱۷	۱		دس
۱	۴	۴	۱	۴	۳	۱۸	۱۳	/	۷	۲	تهدر
۲	۱	۶	۶	۸	۶	۱	۴	۱۹	۳	۷	زه
											J1
							۲	۱۸			دس
۱	۳	۴	۱	۵	۳	۱۵	۱۳	/	۸	۶	تهدر
۶	۸	۶	۶	۱	۳	۱	۳	۱۹	۴	۴	زه
											J2
								۷۵	۲		دس
۲	۲	۵	۱	۴	۳	۱۶	۱۲	/	۶	۴	تهدر
۱	۹	۰	۹	۷	۴	۱	۵	۱۸	۳	۸	زه
											J3
								۴۵			لايه
۲	۳	۴	۲	۵	۲		۱۶	/	۲	۵	بندی
۱	۱	۸	۰	۱	۹	۲	۷	۱۹		۷	B

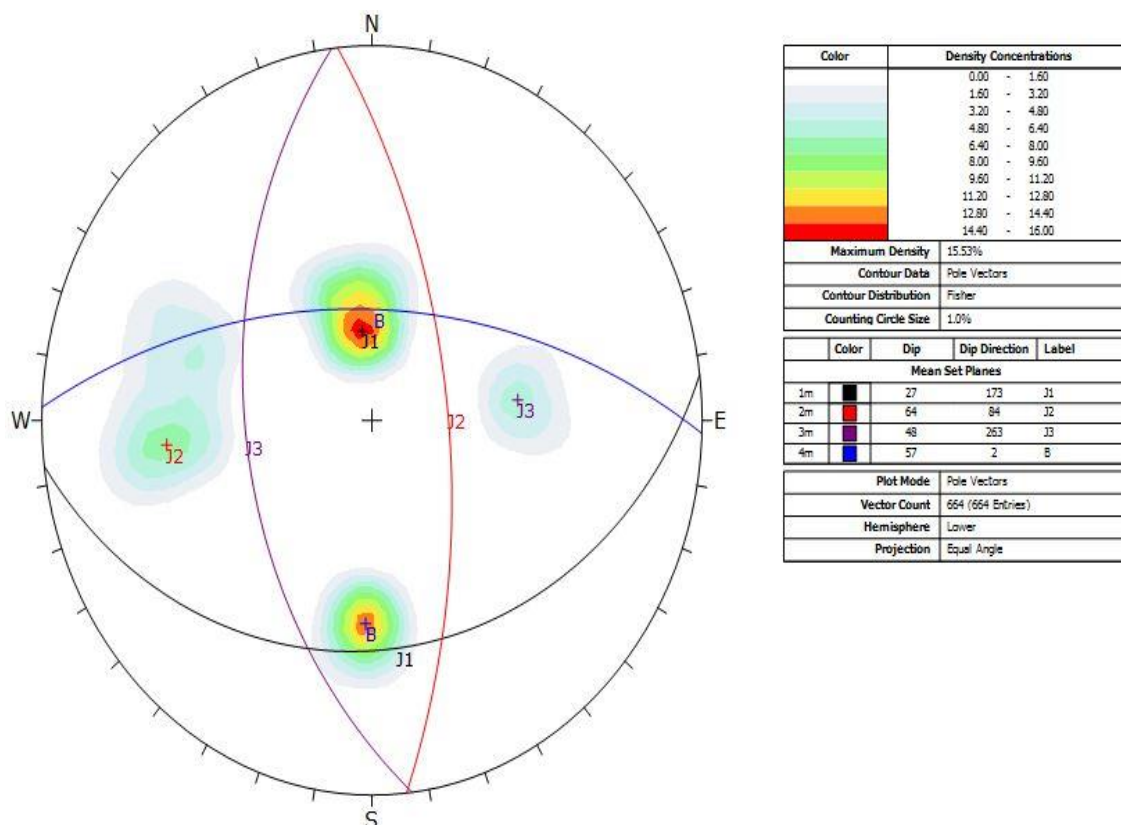
۵. نمودار پراکندگی و نحوه تقاطع ناپیوستگی‌های شیروانی‌های جاده را نشان می‌دهد که در نرم‌افزار *Dips* با استفاده از درزننگاری‌های انجام شده (داده‌های خام) به دست آمده است. همچنین در جدول ۳ مشخصات و ویژگی‌های ناپیوستگی‌های جاده جایگزین مشرف به سد هراز با توجه به اطلاعات برداشت زمین‌شناسی و درزننگاری انجام شده توسط شرکت مهندسی مشاور توسعه، آورده شده است و توزیع دسته درزه‌ها و جانمایی دسته درزه‌های اصلی به همراه زاویه لایه بندی مشخص گردیده است. به منظور تعیین پارامترهای مکانیکی سنگ، بر روی تعدادی از نمونه‌ها، آزمایش‌های آزمایشگاهی شامل: آزمایش مقاومت فشاری نامحصور (تک محوری) و سه محوری، برش، مقاومت کششی غیرمستقیم (برزلی)، صورت گرفت که خلاصه نتایج آن در جدول ۴ آورده شده است (شرکت مه‌اب قدس (ب)، ۱۳۹۳).

ترکیب سنگ‌شناسی غالب در این زیر واحد بخش‌های میانی واحد به خوبی آشکار است این زیر واحد در هر دو تکیه‌گاه سد نیز برون‌زد دارد. ستبرای کل این زیر واحد، نزدیک ۶۵ متر است. بر اساس بررسی‌های میدانی و تطابق لیتولوژیکی صورت گرفته در این مناطق، جنس سنگ‌های محدوده مورد نظر عمدتاً سنگ آهک‌های خاکستری رنگ با میان لایه‌هایی کم ضخامت از مارن و رس است که درزه‌هایی سیستماتیک مطابق با روند تنش‌های عمومی منطقه در آن مشاهده می‌شود که این موضوع نشان‌دهنده یکپارچگی بالای سنگ در محدوده است، این درزه‌ها در سطوح نزدیک به زمین با رس و سیلت (ناشی از هوازدگی لایه‌های نازک مارن) پر شده‌اند. در مسیر جایگزین در شیروانی پرتال تونل محدوده دره پرن، مجموعاً ۶۶۴ برداشت انجام شده است که از این بین ۵۳۶ درزه مربوط به دسته درزه‌ها و ۱۲۸ درزه مربوط به لایه‌بندی است. بر اساس درزه نگاری‌های انجام شده و رسم منحنی تجمعی آن‌ها، ناپیوستگی‌های موجود در شیروانی جاده جایگزین به شرح ذیل است:

- ۱- دسته‌درزه $J1$ با شیب ۲۷ درجه و جهت شیب ۱۷۳ درجه
- ۲- دسته‌درزه $J2$ با شیب ۶۴ درجه و جهت شیب ۸۴ درجه
- ۳- دسته‌درزه $J3$ با شیب ۴۸ درجه و جهت شیب ۲۶۳ درجه
- ۴- لایه‌بندی B با شیب ۵۷ درجه و جهت شیب ۲ درجه

جدول ۳- مشخصات و ویژگی‌های ناپیوستگی‌های محدوده مسیر جابگزین مشرف به سد هراز

زبر	زبری (درصد)	پرشدگی (درصد)
کمی صاف		
صاف		
Silt		
Clay and Silt		
Silty Clay		
		فاصله‌داری (متر)
		بازشدگی (میلی‌متر)
		تداوم (متر)
		جهت شیب
		شیب
		ناپوستگی‌ها



شکل ۵- نمودار پراکندگی و نحوه تقاطع ناپیوستگی‌ها در مسیر جاده (محاسبات تحقیق)

جدول ۳- مشخصات و ویژگی‌های ناپیوستگی‌های محدوده مسیر جایگزین مشرف به سد هراز

ناپیوستگی‌ها	شیب	جهت شیب	تداوم (متر)	بازشدگی (میلی‌متر)	فاصله‌داری (متر)	پرش‌دگی (درصد)			زبری (درصد)	
						Silty Clay	Clay and Silt	Silt	صاف	کمی صاف
دسته‌درزه J1	۲۷	۱۷۳	۱۹/۱۷	۴/۳۳	۱/۸	۳۶	۴۸	۱۶	۴۶	۴۱/۵
دسته‌درزه J2	۶۴	۸۴	۱۹/۱۸	۳/۲۳	۱/۵	۳۳	۵۱	۱۶	۴۶	۳۸
دسته‌درزه J3	۴۸	۲۶۳	۱۸/۷۵	۵/۲	۱/۶	۳۴	۴۷	۱۹	۵۰	۲۹
لایه‌بندی B	۵۷	۲	۱۹/۴۵	۷/۶	۲	۲۹	۵۱	۲۰	۴۸	۳۱

جدول ۴- مقادیر پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ (شرکت مه‌اب قدس، ۱۳۹۳)

آزمایش مقاومت تک محوری	پارامترهای هوک و براون سنگ	پارامترهای مقاومت برشی توده سنگ
	بکر	T1-DL3

واحد سنگی	مقاومت تک محوره (MPa)	مدول الاستیسیته (GPa)	نسبت بواسون	mi	s	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مدول تغییر شکل پذیری (GPa)
T1-DL1 T1-DL2 T1-DL3	۳۴	۲۰	۰/۲۴	۱۲/۱۸	۱	۰/۲	۴۰	۳/۳

۵- روش تحقیق

۵-۱- تحلیل پایداری با روش سینماتیکی

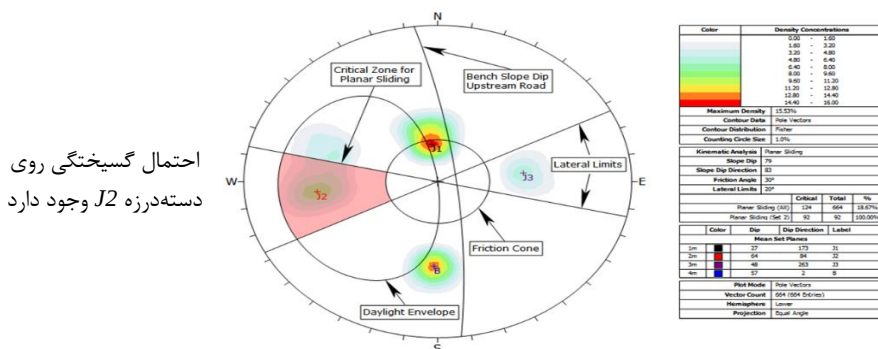
تحلیل پایداری به روش سینماتیک برای همه انواع گسیختگی‌های توده سنگ قابل استفاده است و می‌تواند به روش دستی برای برخی گسیختگی‌ها با استفاده از کالک و یا با نرم افزارهای کامپیوتری صورت گیرد (فریدونی، ۱۳۹۴). بر اساس نتایج تحلیل با نرم‌افزار *Dips*، نوع گسیختگی احتمالی روی ناپیوستگی‌ها بررسی شد. زاویه شیب شیروانی مورد نظر در بالا دست جاده دارای شیب کلی ۶۵ و شیب پله ۷۹ درجه و در پایین دست جاده دارای شیب کلی ۴۵ و شیب پله ۷۹ درجه است. همچنین، میانگین زوایای اصطکاک سطوح ناپیوستگی، به منظور نمایش استریونتی با زاویه اصطکاک ۳۰ درجه،

منظور شده است. پس از تعیین جهت‌یابی درزه‌های غالب (سه دسته‌درزه و یک صفحه لایه‌بندی) و زاویه اصطکاک داخلی ناپیوستگی‌ها (۳۰ درجه)، به ازای هر یک از شیب‌های شیروانی منطقه مورد مطالعه، احتمال وقوع انواع مختلف گسیختگی به صورت مجزا مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. تحلیل سینماتیکی گسیختگی صفحه‌ای و گوه‌ای برخی شیروانی‌ها به صورت نمونه به همراه نمودار استریوگرافیک مربوطه با استفاده از نرم‌افزار *Dips* در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج کلی بررسی همه حالات گسیختگی شیروانی‌های بالادست و پایین دست در ۱۶ حالت مختلف به ازای سه شیب متفاوت پله در جدول ۶ آورده شده است.

نتیجه تحلیل

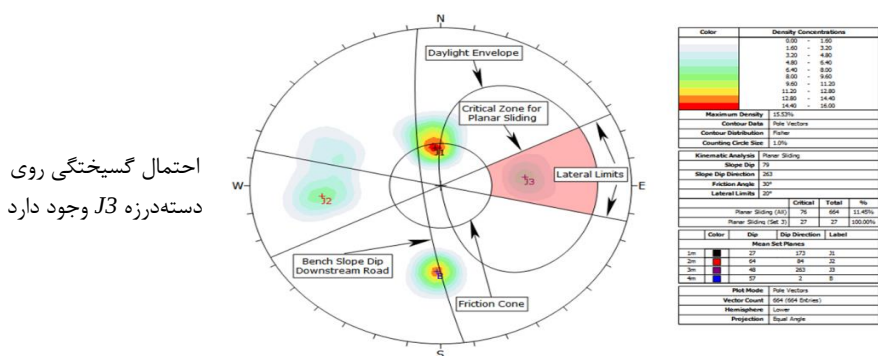
نمودار استریوگرافیک

نوع گسیختگی



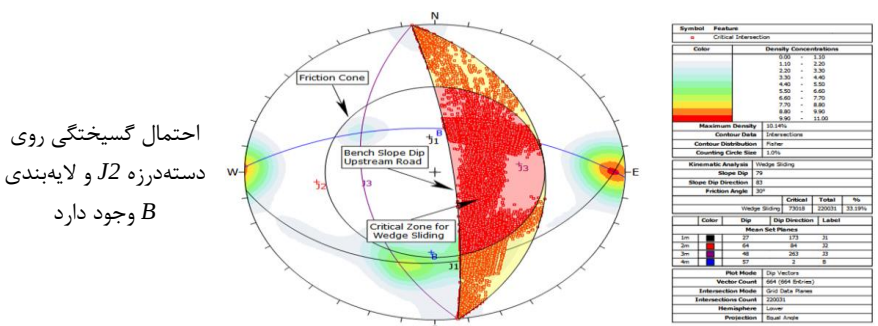
احتمال گسیختگی روی
دسته درزه $J2$ وجود دارد

گسیختگی صفحه‌ای شیروانی بالا
دست



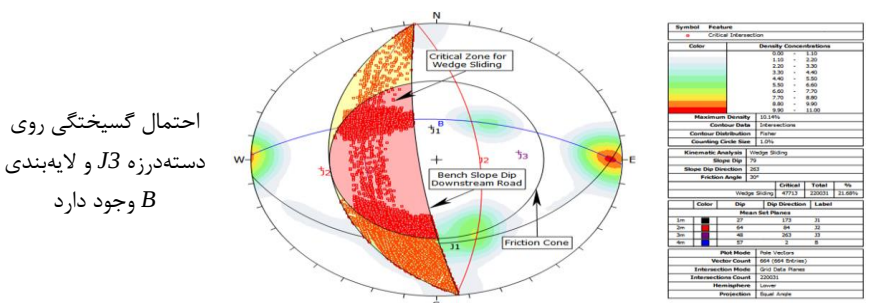
احتمال گسیختگی روی
دسته درزه $J3$ وجود دارد

گسیختگی صفحه‌ای شیروانی پایین
دست



احتمال گسیختگی روی
دسته‌درازه J_2 و لایه‌بندی
 B وجود دارد

گسیختگی گوه‌ای شیروانی بالا
دست



احتمال گسیختگی روی
دسته درزه $J3$ و لایه بندی
 B وجود دارد

گسیختگی گوه‌ای شیروانی پایین
دست

جدول ۶- نتایج تحلیل به روش سینماتیک با استفاده از نرم افزار Dips

نوع گسیختگی		نتیجه تحلیل
صفحه‌ای	بالا	شیب کلی ۶۵ درجه
	دست	شیب پله ۷۹ درجه
	پایین	شیب کلی ۴۵ درجه
	دست	شیب پله ۷۹ درجه
گوه‌ای	بالا	شیب کلی ۶۵ درجه
	دست	شیب پله ۷۹ درجه
	پایین	شیب کلی ۴۵ درجه
	دست	شیب پله ۷۹ درجه
واژگونی	بالا	شیب کلی ۶۵ درجه
	دست	شیب پله ۷۹ درجه
	پایین	شیب کلی ۴۵ درجه
	دست	شیب پله ۷۹ درجه
خمش	بالا	شیب کلی ۶۵ درجه
	دست	شیب پله ۷۹ درجه
	پایین	شیب کلی ۴۵ درجه
	دست	شیب پله ۷۹ درجه
واژگونی	بالا	شیب کلی ۶۵ درجه
	دست	شیب پله ۷۹ درجه
	پایین	شیب کلی ۴۵ درجه
	دست	شیب پله ۷۹ درجه
مستقیم	بالا	شیب کلی ۶۵ درجه
	دست	شیب پله ۷۹ درجه
	پایین	شیب کلی ۴۵ درجه
	دست	شیب پله ۷۹ درجه

۵-۲- تحلیل پایداری با روش تجربی

روند مراحل امتیازدهی طبقه‌بندی *SMR* برای دامنه سنگی مطالعه شده، به این صورت است که پس از تعیین مقدار *RMR* پایه، برای هر یک از شیب‌های بالا دست و پایین دست جاده، مقدار *SMR* برای هر یک از ناپیوستگی‌ها محاسبه گردیده است و بر اساس این روش رده سنگ، واژه توصیفی، نوع گسیختگی احتمالی، درجه پایداری و نوع نگهداری پیشنهادی مشخص شده است. به منظور تعیین ضریب *RMR* برداشت‌های صحرایی زمین‌شناسی مبنای محاسبه قرار گرفت. تعیین تمامی پارامترها به استثنای مقاومت فشاری تک محوری در هنگام حفاری و بر اساس برداشت‌های صحرایی امکان‌پذیر بوده است. با توجه به تکمیل نشدن گزارش مطالعات مرحله دوم مسیر جاده، پارامتر مقاومت فشاری تک محوری با توجه به مطالعات انجام شده در مطالعات مرحله دوم شرکت مهندسی مشاور مه‌اب قدس در پروژه سد هراز تخمین زده شد. بر این اساس مقدار *RMR* محدوده مورد مطالعه در جدول ۷ برآورد گردیده است (شرکت هراز راه، ۱۳۹۵): بر اساس مقدار *RMR* سنگ‌های منطقه دره پرن در رده سنگ‌های متوسط قرار می‌گیرند. در **Error! Reference** *source not found.* مقدار *SMR* به دو روش *Roman* و *Tomas* محاسبه شده است و در جدول ۸ تحلیل پایداری، نوع گسیختگی احتمالی و پیشنهاد سیستم نگهداری صورت گرفته است. با توجه به

نتایج به دست آمده از تحلیل به روش *SMR*، می‌توان نتیجه گرفت که در بالا دست جاده احتمال گسیختگی صفحه‌ای و گوه‌ای روی دسته‌درزه *J2* (در شیب کلی و پله) و احتمال گسیختگی واژگونی روی دسته‌درزه *J3* (در پله) وجود دارد. در پایین دست جاده نیز احتمال گسیختگی صفحه‌ای و گوه‌ای روی دسته‌درزه *J3* (در پله) و احتمال گسیختگی واژگونی روی دسته‌درزه *J2* (در پله) وجود دارد.

۵-۳- تحلیل عددی پایداری شیروانی

اصولا در تحلیل‌های عددی تلاش می‌شود تا پاسخ مکانیکی توده سنگ را که در معرض یک سری شرایط اولیه از قبیل تنش‌های برجا و شرایط حدی قرار دارند ارائه گردد و تغییرات ایجاد شده در اثر حفاری بر پارامترهای مختلف از قبیل جابجایی نقاط مشخص می‌گردد (Wyllie & Mah, 2004). اولین قدم در مدل‌سازی، انتخاب روش دو بعدی و یا سه بعدی می‌باشد. در شرایط زیر انجام تحلیل‌های سه بعدی توصیه می‌شود:

- ۱- زاویه بین امتداد ساختارهای عمده زمین‌شناسی با امتداد صفحه شیروانی بیشتر از ۲۰ تا ۳۰ درجه باشند.
- ۲- زاویه بین محور ناهمسانگردی توده سنگ با امتداد صفحه شیروانی بیشتر از ۲۰ تا ۳۰ درجه باشد.
- ۳- امتداد تنش‌های اصلی منطقه موازی یا عمود بر صفحه شیروانی

نباشد.

۴- توزیع واحدهای سنگی در راستای امتداد صفحه شیروانی باشد.

۵- هندسه مدل به گونه‌ای باشد که نتوان آن را به صورت دو بعدی مدل کرد و فرضیات تقارن و کرنش صفحه‌ای در مورد آن صادق نباشد (Lorig & Varona, 2000).

با توجه به اینکه سنگ شیروانی مورد مطالعه در جاده جایگزین مشرف به سد مخزنی هراز، دارای سه دسته‌درزه و یک لایه‌بندی است بنابراین استفاده از یک نرم‌افزار محیط ناپیوسته سه بعدی ضرورت پیدا می‌کند. از بین نرم‌افزارهای مربوطه نرم‌افزار 3DEC که یک نرم‌افزار بر پایه اجزاء مجزا است، مورد استفاده قرار گرفت. بسته به ماهیت مسئله ژئومکانیکی، مراحل مدل‌سازی شامل ساخت هندسه مدل، انتخاب تجزیه و تحلیل بلوک صلب یا تغییر شکل‌پذیر، انتخاب مدل رفتاری بلوک و درزه‌ها و نیز تعیین خواص مصالح، تبیین شرایط مرزی و اولیه و در نهایت اجرا و مدل‌سازی مرحله‌ای و در نهایت تفسیر نتایج انجام می‌گیرد که باید به صورت گام به گام طی

شود. با بررسی نقشه‌های جاده هراز، بحرانی‌ترین حالت ممکن برای هندسه مدل با توجه به ارتفاع شیروانی، حساسی منطقه و نزدیکی شیروانی به پرتال تونل در دره پرن انتخاب گردید. هندسه شیروانی مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار *Rhinoceros* و *Kubrix* و بر اساس قاعده ۳۵ و ارتفاع ۱۷/۷۵ متر ایجاد شده است و در نرم‌افزار *DEC* فراخوانی شده است که در شکل نمایش داده شده است. شیروانی مدنظر دارای ناپیوستگی‌هایی است که کنترل کننده جابه‌جایی‌های مدل هستند و شامل دسته‌های زیر می‌باشد:

- ۱- دسته‌درزه *J1* با شیب ۷ درجه و جهت شیب ۱۷۳ درجه
- ۲- دسته‌درزه *J2* با شیب ۶۴ درجه و جهت شیب ۸۴ درجه
- ۳- دسته‌درزه *J3* با شیب ۴۸ درجه و جهت شیب ۲۶۳ درجه
- ۴- لایه‌بندی *B* با شیب ۵۷ درجه و جهت شیب ۲ درجه

جدول ۷- مقدار RMR پایه جهت تحلیل به روش SMR (شرکت هراز راه، ۱۳۹۵)

پارامتر	محدوده دره پرن
مقاومت فشاری تک محوری (<i>Mpa</i>)	توصیف ۳۴ امتیاز ۴
شاخص کیفی سنگ (<i>RQD</i>)	توصیف ۵۰ درصد امتیاز ۸
فاصله‌داری درزه‌ها (میلی‌متر)	توصیف کوچکتر از ۶۰ میلی‌متر امتیاز ۵
شرایط عمومی سطوح ناپیوستگی	توصیف سطوح نسبتاً زیر و باز شده تا یک میلی‌متر، کمی هوازده امتیاز ۲۵
وضعیت آب‌های زیرزمینی	توصیف خشک امتیاز ۱۵
RMR پایه	۵۷
کلاس سنگ	III
توصیف کلاس توده سنگ	Fair Rock

فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها با بررسی درزه نگاری‌ها و قضاوت مهندسی برای لایه‌بندی، دسته‌درزه‌های *J1*، *J2* و *J3* به ترتیب برابر ۲، ۱/۸، ۱/۵ و ۱/۶ متر در نظر گرفته شده است و با کاهش منطقی پارامترهای مربوط به درزه‌ها (سختی نرمال و سختی برشی) در مدل ایجاد شده، به شرایط شیروانی در واقعیت نزدیک شده است. با درزه نگاری‌ها و داده‌های موجود از منطقه مورد مطالعه، ایجاد درزه‌ها به

حالت حالت منظم و غیرمداوم اعمال شود. عامل تداوم درزه‌ها^۶ (*P*) به ترتیب برای لایه‌بندی، دسته‌درزه *J1*، دسته‌درزه *J2* و دسته‌درزه *J3* برابر ۱، ۰/۹۸، ۰/۹۸ و ۰/۹۶ در نظر گرفته شده است در شکل ۶ هندسه مدل بعد از ایجاد ناپیوستگی‌ها نشان داده شده است.

^۶ Persistence

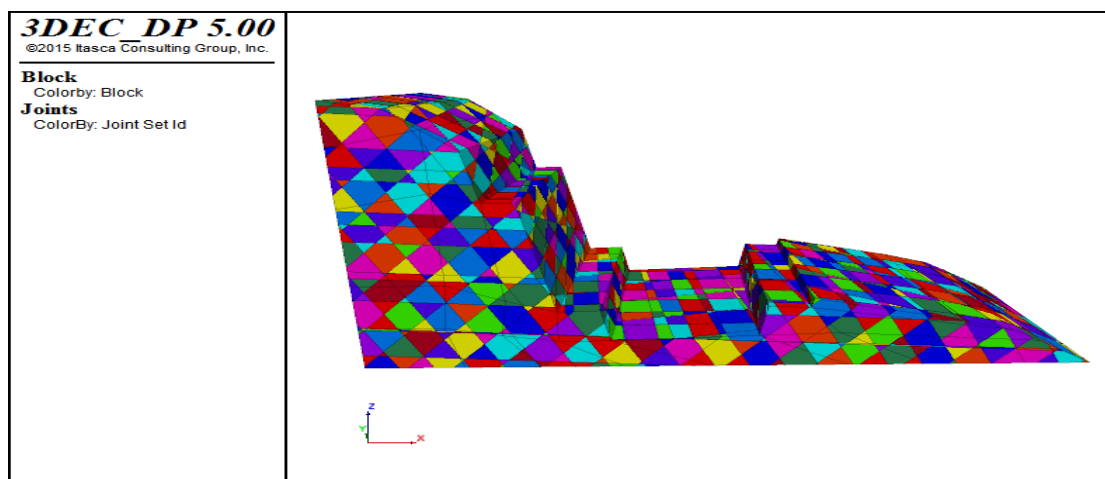
جدول ۷- مقادیر SMR به دو روش Romana و Tomas et al

شیروانی	درزه	F_1	F_2	F_3	F_4	SMR
بالا دست	J1	۰/۱۵	۱	۰	۰	Romana ۵۷
		۰/۱۴۷	۱	- ۰/۴۳۵	۰	Tomas et al ۵۶
		۱	۱	- ۵۰	۰	Romana ۷
	J2	۰/۹۸۸	۰/۹۷۵	- ۴۵	۰	Tomas et al ۱۳
		۱	۱	- ۶	۰	Romana ۵۱
		۰/۹۹۷	۱	- ۱/۳۰۴	۰	Tomas et al ۵۵
	J3	۰/۱۵	۱	- ۵۰	۰	Romana ۴۹
		۰/۱۵۳	۰/۹۶۲	- ۵۷/۶۲۵	۰	Tomas et al ۴۸
		۰/۱۵	۱	۰	۰	Romana ۵۷
	B	۰/۱۴۷	۱	- ۰/۷۲۷	۰	Tomas et al ۵۶
		۱	۱	- ۶۰	۰	Romana ۰
		۰/۹۸۸	۰/۹۷۵	- ۵۸/۷۳	۰	Tomas et al ۰
پایین دست	J1	۰/۱۵	۱	۰	۰	Romana ۴۸
		۰/۱۴۷	۱	- ۲۴/۶۹۶	۰	Tomas et al ۳۲
		۱	۱	- ۲۵	۰	Romana ۳۲
	J2	۰/۹۸۸	۰/۹۷۵	- ۵۸/۷۳	۰	Tomas et al ۳۲
		۰/۱۵	۱	- ۶۰	۰	Romana ۴۸
		۰/۱۵۳	۰/۹۶۲	- ۵۹/۱۳۲	۰	Tomas et al ۴۸
	J3	۰/۱۵	۱	۰	۰	Romana ۵۷
		۰/۱۴۷	۱	- ۰/۳۱۳	۰	Tomas et al ۵۶
		۱	۱	۰	۰	Romana ۵۷
	B	۰/۹۸۸	۰/۹۷۵	- ۰/۸۸۵	۰	Tomas et al ۵۶
		۱	۱	- ۶	۰	Romana ۵۱
		۰/۹۹۷	۰/۹۳۴	- ۶/۱۴۵	۰	Tomas et al ۵۱
پایین دست	J1	۰/۱۵	۱	۰	۰	Romana ۵۷
		۰/۱۴۷	۱	- ۰/۵۹۷	۰	Tomas et al ۵۶
		۰/۱۵	۱	۰	۰	Romana ۵۷
	J2	۰/۹۸۸	۰/۹۷۵	- ۰/۷۲۷	۰	Tomas et al ۵۶
		۱	۱	- ۲۵	۰	Romana ۳۲
		۰/۹۸۸	۰/۹۷۵	- ۲۵/۵۰۱	۰	Tomas et al ۳۱
	J3	۱	۱	- ۶۰	۰	Romana ۰
		۰/۹۹۷	۰/۹۳۴	- ۵۹/۳۸۴	۰	Tomas et al ۱
		۰/۱۵	۱	- ۲۵	۰	Romana ۵۳
	B	۰/۱۵۳	۱	- ۲۵/۳۴۶	۰	Tomas et al ۵۳

جدول ۸- نتایج تحلیل پایداری شیروانی به روش تجربی با استفاده از روش SMR

شیروانی	درزه	SMR (Romana)	رده سنگ (Tomas et al) (Class)	واژه توصیفی	نوع گسیختگی احتمالی	پایداری	نگهداری پیشنهادی
شیب کلی ۶۵ درجه	J1	۵۷	IIIa	نرمال	واژگونی	تا حدودی پایدار	جوی پای شیروانی، شبکه تور سیمی، پیچ سنگ (شبکه منظم) و بتن پاشی (به صورت موردی)
	J2	۷	Va	خیلی بد	صفحه‌ای / گوه‌ای	کاملاً ناپایدار	دیواره مهار شده یا وزنی، حفاری مجدد
	J3	۵۱	IIIa	نرمال	واژگونی	تا حدودی پایدار	جوی پای شیروانی، شبکه تور سیمی، پیچ سنگ (شبکه منظم) و بتن پاشی (به صورت موردی)
شیب کلی ۷۹ درجه	B	۴۹	IIIb	نرمال	صفحه‌ای / گوه‌ای	تا حدودی پایدار	شبکه تور سیمی، پیچ سنگ (شبکه منظم) و بتن پاشی (شبکه منظم)
	J1	۵۷	IIIa	نرمال	واژگونی	تا حدودی پایدار	جوی پای شیروانی، شبکه تور سیمی، پیچ سنگ (شبکه منظم) و بتن پاشی (به صورت موردی)
	J2	۰	Vb	خیلی بد	صفحه‌ای / گوه‌ای	کاملاً ناپایدار	دیواره مهار شده یا وزنی، حفاری مجدد
شیب کلی ۷۹ درجه	J3	۳۲	IVa	بد	واژگونی	ناپایدار	دیواره بتنی پای شیروانی، پیچ سنگ (شبکه منظم) میل مهار، بتن پاشی (شبکه منظم)
	B	۴۸	IIIb	نرمال	صفحه‌ای / گوه‌ای	تا حدودی پایدار	شبکه تور سیمی، پیچ سنگ (شبکه منظم) و بتن پاشی (شبکه منظم)
شیب کلی ۴۵ درجه	J1	۵۷	IIIa	نرمال	واژگونی	تا حدودی پایدار	جوی پای شیروانی، شبکه تور سیمی، پیچ سنگ (شبکه منظم) و بتن پاشی (به صورت موردی)
	J2	۵۷	IIIa	نرمال	واژگونی	تا حدودی پایدار	جوی پای شیروانی، شبکه تور سیمی، پیچ سنگ (شبکه منظم) و بتن پاشی (به صورت موردی)
	J3	۵۱	IIIa	نرمال	صفحه‌ای / گوه‌ای	تا حدودی پایدار	جوی پای شیروانی، شبکه تور سیمی، پیچ سنگ (شبکه منظم) و بتن پاشی (به صورت موردی)
شیب کلی ۷۹ درجه	B	۵۷	IIIa	نرمال	واژگونی	تا حدودی پایدار	جوی پای شیروانی، شبکه تور سیمی، پیچ سنگ (شبکه منظم) و بتن پاشی (به صورت موردی)
	J1	۵۷	IIIa	نرمال	واژگونی	تا حدودی پایدار	جوی پای شیروانی، شبکه تور سیمی، پیچ سنگ (شبکه منظم) و بتن پاشی (به صورت موردی)
	J2	۳۲	IVa	بد	واژگونی	ناپایدار	دیواره بتنی پای شیروانی، پیچ سنگ (شبکه منظم) میل مهار، بتن پاشی (شبکه منظم)
شیب کلی ۷۹ درجه	J3	۰	Vb	خیلی بد	صفحه‌ای / گوه‌ای	کاملاً ناپایدار	دیواره مهار شده یا وزنی، حفاری مجدد
	B	۵۳	IIIa	نرمال	صفحه‌ای / گوه‌ای	تا حدودی پایدار	جوی پای شیروانی، شبکه تور سیمی، پیچ سنگ (شبکه منظم) و بتن پاشی (به صورت موردی)

این دست



شکل ۶- هندسه مدل بعد از ایجاد ناپیوستگی‌ها در نرم‌افزار 3DEC

در این مطالعه برای تحلیل شیروانی مورد نظر بلوک‌های سنگی در حالت تغییر شکل‌پذیر در نظر گرفته شده، در ابتدا مدل رفتاری الاستیک بررسی شده و پس از حل مدل، به مدل رفتاری پلاستیسیته موهر-کمب تغییر داده شده و نتایج مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته شده است. در مورد مدل رفتاری ناپیوستگی‌ها نیز، مدل تماس صفحه‌ای لغزش کلمب در نظر گرفته شده است. با توجه به در نظر گرفتن حالت تغییر شکل‌پذیر برای بلوک‌های سنگی، نیاز به مش‌بندی مدل می‌باشد که در نرم‌افزار 3DEC انجام گرفت. همچنین مشخصات ژئومکانیکی سنگ بکر، توده سنگ و ویژگی‌های درزه‌ها مطابق جداول ۹ و ۱۰ در مدل اعمال شد. در مدل ساخته شده به منظور اینکه شرایط مرزی مدل، مشابه شرایط واقعی زمین باشد، در تعیین شرایط مرزی به گونه‌ای عمل شد که در جهت محور قائم مقدار بردار سرعت در جهت x ، در جهت y و در جهت محور افقی مقدار بردار سرعت در جهت z برابر با صفر در نظر گرفته شده است.

ثابت گرانش نیز معادل ۱۰ متر بر مجذور ثانیه لحاظ گردید. با توجه به عدم انجام آزمایش‌های برجا برای تعیین نسبت تنش‌های افقی به قائم، از قضاوت مهندسی، روابط تجربی و تحلیلی و بررسی موارد مشابه بر اساس اطلاعات موجود استفاده شده است. از جمله روابط ارائه شده توسط شئوری^۷ در سال ۲۰۰۱ مقادیر K_0 را برای توده سنگ نظیر توده سنگ‌های تشکیل دهنده شیروانی‌های سنگی مجاور سد هراز برابر ۰/۸ - ۱ برآورد می‌نماید. لذا تحلیل شیروانی‌ها می‌تواند برای بحرانی‌ترین مقدار K_0 انجام شود. برای اعمال تنش‌های اولیه از دستور این‌سیتو توپوگراف^۸ در 3DEC استفاده شده است که به طور خودکار بارگیری گرانشی (ثقلی) را در مدل‌هایی که سطح فوقانی نامنظم دارند محاسبه می‌کند. تنش‌ها بر اساس وزن مخصوص مواد روباره محاسبه گردیده و مقدار K_0 را مشخص می‌کنند. در شکل ۷ مدل پس از اعمال تنش‌های برجا و پس از اجرای یک گام محاسباتی نشان داده شده است.

^۷ Sheory

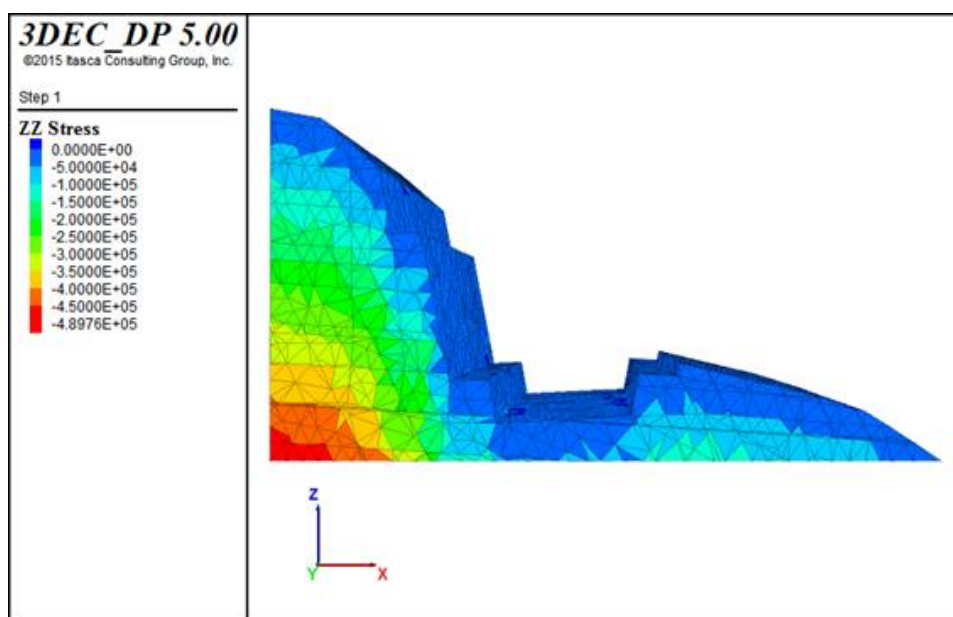
^۸ INSITU Topograph

جدول ۹- پارامترهای ژئومکانیکی سنگ بکر و توده سنگ در مدلسازی عددی

خصوصیات	چسبندگی (Mpa)	زاویه اصطکاک (درجه)	مدول تغییر شکل پذیری یانگ (Gpa)	نسبت پواسون	وزن مخصوص (kg/m ³)	مدول حجمی K (Gpa)	مدول برشی G (Gpa)
سنگ بکر	۱	۳۵	۲۰	۰/۲۴	۲۷۱۰	۱۲/۸۲	۸/۰۶
توده سنگ	۰/۲	۴۰	۳/۳	۰/۲۷		۲/۳۹	۱/۳

جدول ۱۰- خصوصیات ناپیوستگی‌های برداشت شده از مسیر جاده جایگزین مشرف به سد هراز

ناپیوستگی	شیب	جهت شیب	تعداد درزه‌ها	بازشدگی (mm)	فاصله‌داری (m)
دسته درزه J1	۲۷	۱۷۳	۲۷۸	۴/۳۳	۱/۸
دسته درزه J2	۶۴	۰۸۴	۱۸۲	۳/۲۳	۱/۵
دسته درزه J3	۴۸	۲۶۳	۰۷۶	۵/۲۰	۱/۶
لایه بندی B	۵۷	۰۰۲	۱۲۸	۷/۶۰	۲/۰



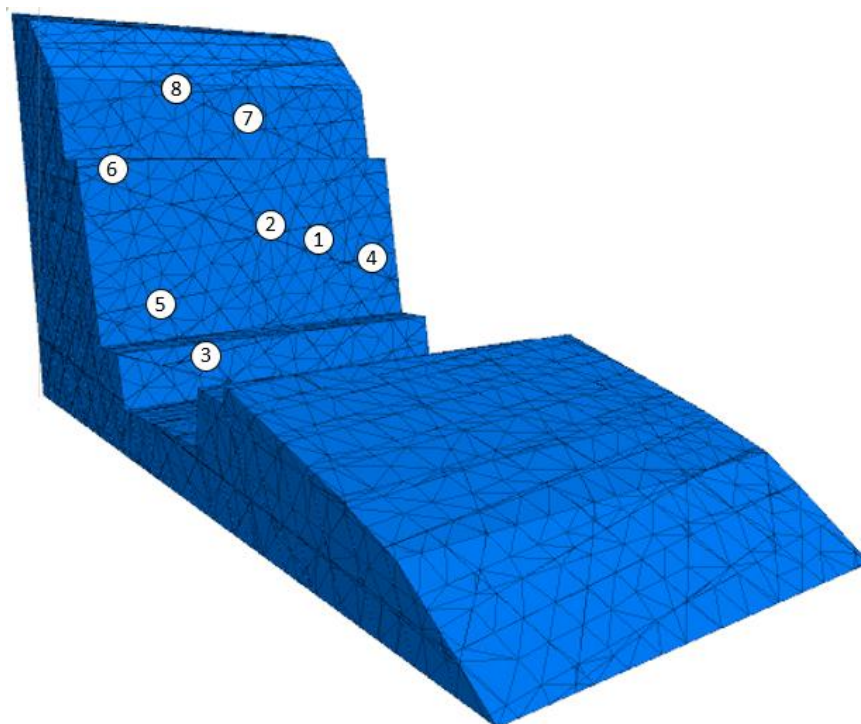
شکل ۷- نمایی از تنش‌های اولیه ایجاد شده در مدل شیروانی پرتال تونل مسیر جاده جایگزین

این تحقیق از صفر شدن نیروهای نامتعادل برای تعیین زمان تعادل اولیه مدل در حالت مدل رفتاری الاستیک استفاده شده است. پس از به تعادل رسیدن مدل، جابه‌جایی‌ها را صفر کرده و خصوصیات مدل رفتاری به خصوصیات مدل پلاستیسته موهر - کلمب تغییر داده شده است و در این حالت، از شرط ثابت شدن مقادیر جابجایی‌ها برای تعیین زمان تعادل استاتیکی مدل استفاده شده است. بدین ترتیب نقاط مختلفی بر روی سطح شیروانی مطابق شکل ۸ در نظر گرفته شده و نمایش تاریخیچه

در ادامه نوع پاسخ مدل در برابر اعمال اغتشاش (به عنوان مثال پاسخ تغییر شکل در برابر حفاری) و شرایط مرزی و اولیه، وضعیت برجا (شرایطی که قبل از هرگونه تغییر در مسئله وجود داشته است) در مدل تعیین می‌گردد. پس از اعمال این شرایط، وضعیت تعادل اولیه برای مدل بررسی می‌گردد. سپس تغییرات مورد نظر (حفاری، نگهداری، تغییر در شرایط مرزی) در مدل اعمال شده و بار دیگر مدل به تعادل رسیده و پاسخ مدل در برابر این تغییرات بررسی می‌شود (Itasca, 2013).

جابجایی‌های مختلف در این نقاط به زمان تعادل استاتیکی مدل به دست می‌آید. همچنین پس از تحلیل پایداری شیروانی در محدوده دره پرن، حداکثر جابه‌جایی کلی، افقی و قائم طبق جدول ۱۱ آورده شده است که به ترتیب در شکل

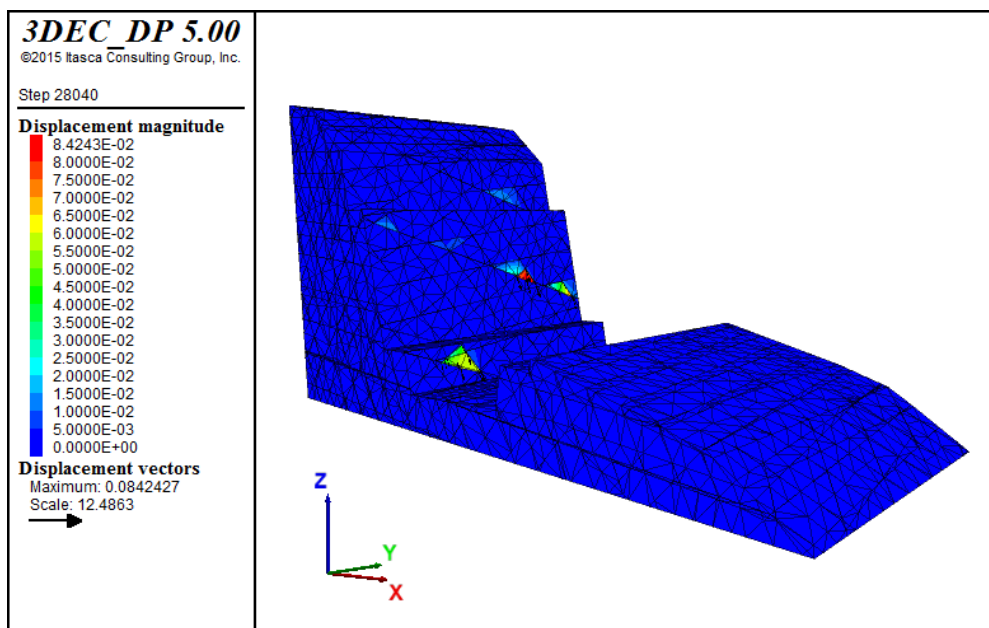
۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۲ بردار سرعت در یک مقطع عمودی و ضریب اطمینان ۱/۳۹ نشان داده شده است



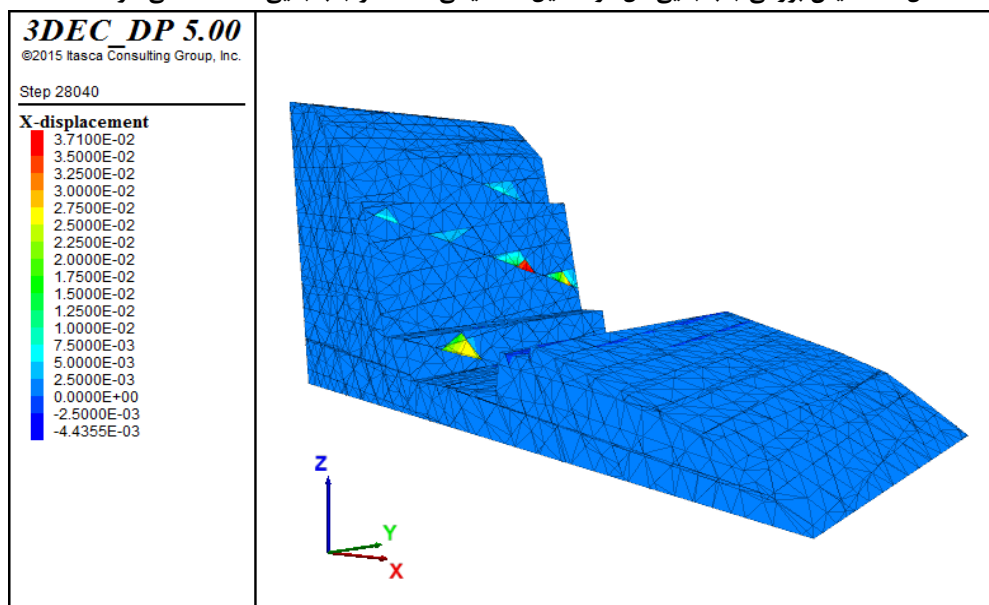
شکل ۸- محل نقاط بر روی شیب برای ثبت تاریخچه جابه‌جایی

جدول ۱۱- نتایج تحلیل استاتیکی شیروانی پرتال تونل مشرف به دره پرن

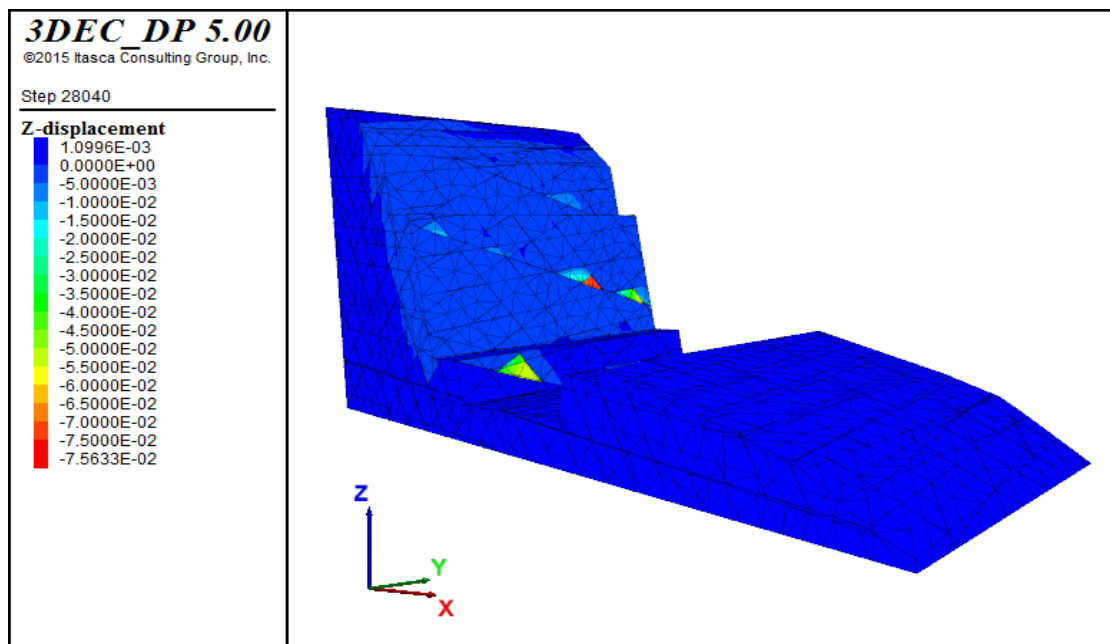
پلات‌ها	جابجایی (سانتی‌متر)
حداکثر جابه‌جایی کلی	۸/۴۲
حداکثر جابه‌جایی در جهت X (افقی)	۳/۷۱
حداکثر جابه‌جایی در جهت Z (قائم)	۷/۵۶



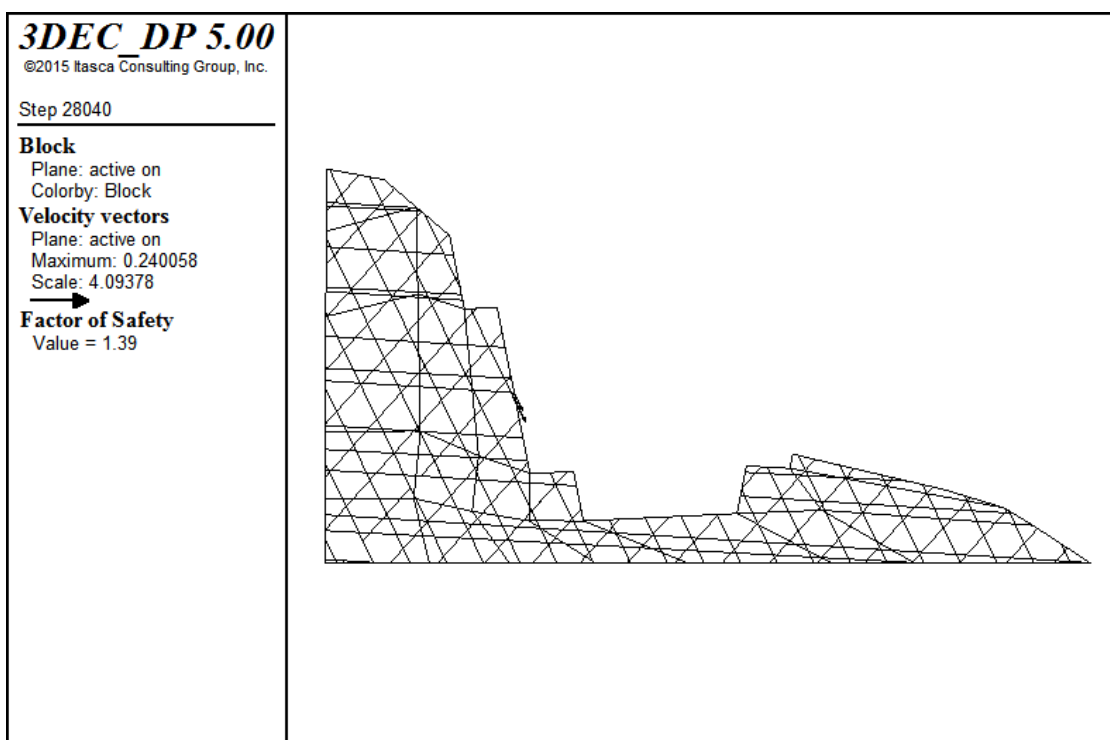
شکل ۹- نمایش بزرگی جابه‌جایی کل در تحلیل استاتیکی (حداکثر جابه‌جایی ۸/۴۲ سانتی‌متر)



شکل ۱۰- نمایش جابه‌جایی افقی در جهت محور X (حداکثر جابه‌جایی ۳/۷۱ سانتی‌متر)



شکل ۱۱- نمایش جابه‌جایی قائم در جهت محور Z (حداکثر جابه‌جایی ۷/۵۶ سانتی‌متر)



شکل ۱۲- بردار سرعت در یک مقطع عمودی از مدل و مقدار ضریب اطمینان $f_{os} = 1/39$

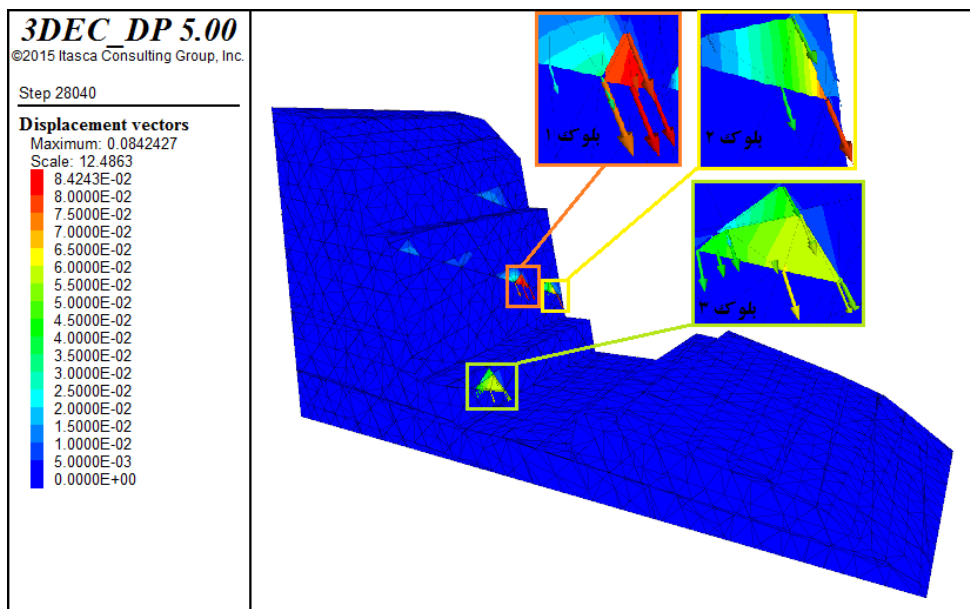
۴-۵- مدلسازی سیستم پایداری شیروانی

با توجه به شکل ۱۳، سه بلوک در شیروانی بالا دست جاده دارای بیشترین مقدار جابه‌جایی بوده و امکان رخ دادن ریزش موضعی در آنها می‌باشد که مشخصات مربوط به این بلوک‌ها

بر مبنای وزن مخصوص 2710 kg/m^3 در جدول ارائه شده است با توجه به این که نگهداری پیشنهادی بر اساس روش تجربی SMR، جوی پای شیروانی، شبکه تور سیمی، پیچ سنگ و بتن پاشی می‌باشد لذا در حالت نصب سیستم نگهداری،

جلوگیری از جریان یافتن زون‌های خرد شده، استفاده شده است. با توجه به ابهاماتی در خصوص پارامترهای سیستم نگهداری، پارامترهای مشخصه هریک از سیستم‌های پایدارسازی پیچ سنگ و شاتکریت با بررسی منابع تحقیقاتی مختلف، به ترتیب در جداول ۱۳ و ۱۴ آورده شده است.

سیستم پیچ سنگ (به صورت موضعی) و بتن پاشی (به صورت منظم) استفاده شده است. لذا برای تقویت پایداری دیواره شیروانی‌ها در مسیر جاده جایگزین از تحکیمات پیچ سنگ با قطر ۲۵ میلی‌متر، طول ۶ متر و به صورت منظم با فاصله‌بندی ۲×۲ متر به همراه شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر برای



شکل ۱۳- نمایش بلوک‌های با بیشترین مقدار جابه‌جایی

جدول ۱۲- اطلاعات مربوط به بلوک‌ها با بیشترین مقدار جابه‌جایی

بلوک‌ها	حجم بلوک (m^3)	وزن بلوک (kg)
بلوک ۱	۰/۰۳۷۳۹۰۶	۱۰۱/۳۳
بلوک ۲	۰/۰۶۸۲۵۶۱	۱۸۴/۹۷
بلوک ۳	۰/۱۰۸۶۲۸	۲۹۴/۳۸

جدول ۱۳- خصوصیات پیچ سنگ تزریقی در مدل سازی عددی (Itasca, 2013) و (Bahrani, 2017)

نوع نگهداری	سطح مقطع ^۹ (m^2)	مدول یانگ ^{۱۰} (GPa)	مقاومت کششی تسلیم ^{۱۱} (MN)	سختی دوغاب ^{۱۲} (N/m/m)	ظرفیت چسبندگی دوغاب ^{۱۳} (N/m)
پیچ سنگ	۵e-۴	۲۰۰	۰/۱۸	۰/۰۳۵e۹	۱۲e۵

^۹ cross-sectional area

^{۱۰} elastic Young's modulus

^{۱۱} tensile yield strength

^{۱۲} stiffness of the grout

^{۱۳} cohesive capacity of the grout

جدول ۱۴- خصوصیات شاتکریت در مدل سازی عددی (Itasca, 2013) و (Zhang, 2013)

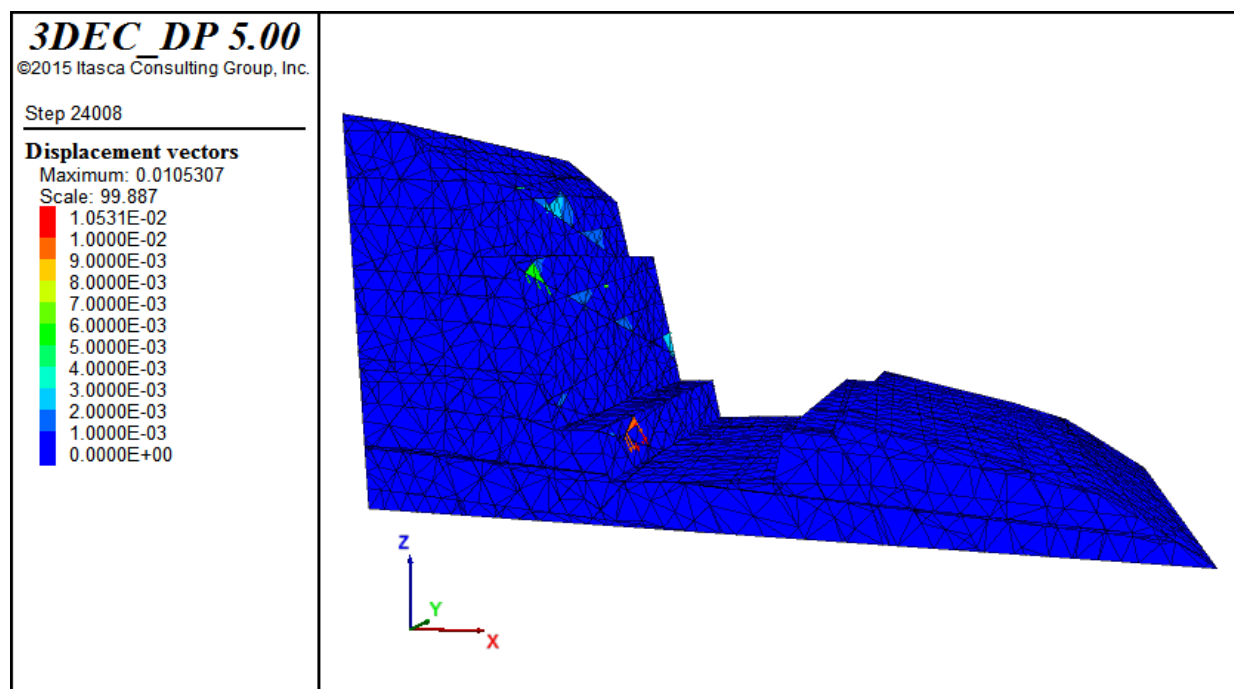
نوع نگهداری	شاتکریت							تماس بین شاتکریت و سنگ ^{۱۴}
	وزن مخصوص (Kg/m ³)	مدول الاستیسته (GPa)	ضریب پواسون	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	مقاومت کششی تسلیم (MPa)	سختی برشی (MN/m)	
شاتکریت	۲۴۰۰	۲۵	۰/۲۵	۰/۴۵	۳۰	۰/۴۵	۵/۶	سختی نرمال (MN/m)
								۱۴۰۰

با توجه به لغزش موردی در شیروانی مطابق با شکل ۹ سه پیچ سنگ در بخش‌هایی که بیشترین جابه‌جایی را دارد، نصب شد. نتایج تحلیل بعد از نصب پیچ سنگ عمود بر بلوک‌های با بیشترین مقدار جابه‌جایی، در جدول ۱۵ ارائه شده است. ضریب اطمینان در این حالت برابر با ۱,۵۵ است که با توجه به ضریب اطمینان استاندارد دیوارهای سنگی میان و بلند مدت، قابل قبول می‌باشد. از طرفی با توجه به وجود زون‌های

ضعیف خرد شده، برای جلوگیری از جریان یافتن زون‌های خرد شده بعد از نصب پیچ سنگ‌ها، از شاتکریت نیز برای نگهداری دیواره استفاده شده است. نتایج تحلیل عددی شیروانی مشرف به دره پرن در صورت نصب موضعی سیستم نگهداری پیچ سنگ به قطر ۲۵ میلی‌متر و طول ۶ متر به همراه شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی‌متر در شکل ۱۴ و مقایسه مقادیر مختلف جابه‌جایی در اثر نگهداری در جدول ۱۶ ارائه شده است.

جدول ۱۵- نتایج تحلیل مدل پس از نصب پیچ سنگ

جابه‌جایی	مقدار (سانتی متر)
حداکثر جابه‌جایی کلی	۳/۲
حداکثر جابه‌جایی در جهت X (افقی)	۱/۵۹
حداکثر جابه‌جایی در جهت Z (قائم)	۲/۴۸



شکل ۱۸- حداکثر جابه‌جایی بعد از نصب پیچ سنگ و شاتکریت (۱/۰۵۳ سانتی‌متر)

جدول ۱۶- مقایسه مقادیر جابجایی اعمال هریک از سیستم های نگهداری

نوع نگهداری	جابجایی کلی (cm)	جابجایی افقی محور X (cm)	جابجایی قائم محور Z (cm)	ضریب اطمینان
بدون سیستم نگهداری	۸/۴۲	۳/۷۱	۷/۵۶	۱/۳۹
با سیستم نگهداری پیچ سنگ	۳/۲	۱/۵۹	۲/۴۸	۱/۵۵
ترکیب پیچ سنگ و شاتکریت	۱/۰۵۳	۰/۶۶۸	۰/۹۴۵	بیشتر از ۱/۵

- تحلیل مدل به روش عددی با استفاده از نرم افزار 3DEC نتایج زیر حاصل گردید:
- در حالت بدون نگهداری، حداکثر جابه جایی بلوک های شیروانی ۸,۴۲ سانتی متر بوده و ریزش به صورت موضعی است.
- ضریب اطمینان شیروانی مورد مطالعه ۱,۳۹ است
- با توجه به نتایج تحلیل پایداری به روش تجربی می توان نتیجه گرفت که شیروانی ناپایدار می باشد همچنین با بررسی نتایج مدل تجربی SMR بهترین سیستم نگهداری پیشنهادی برای شیروانی، شبکه تور سیمی، پیچ سنگ (به صورت موضعی) و بتن پاشی می باشد.
- با توجه به تحلیل عددی صورت گرفته، سیستم نگهداری پیشنهادی، پیچ سنگ به طول ۶ متر و به صورت موضعی در بلوک های بحرانی و پاشش شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی متر می باشد. در این حالت ضریب اطمینان بیشتر از ۱,۵ بوده و مقادیر جابه جایی به طور قابل توجهی کاهش یافته است. بر اساس مدل سازی آن در نرم افزار 3DEC دارای ضریب اطمینان قابل قبولی است.

۷- سپاس گذاری

مولفان این تحقیق، کمال سپاس گذاری خود را از همکاری کارشناسان شرکت مهندسی سپاسد و مهندسین مشاور توسعه به ویژه مهندس عقیل فراهانی، مهندس مرتضی جاویدی و کارشناسان مهندسین مشاور هراز راه اعلام می دارند.

با توجه به نتایج حاصل از تحلیل عددی می توان نتیجه گرفت اگرچه شیروانی در حالت بدون سیستم نگهداری، دارای ضریب اطمینان بالاتر از یک می باشد لیکن به دلیل احتمال ریزش بلوک های خاص سنگی به ویژه در زون های خردشده، نصب سیستم نگهداری ضروری می باشد. سیستم نگهداری پیشنهادی، پیچ سنگ به طول ۶ متر و به صورت موضعی در بلوک های بحرانی و پاشش شاتکریت با ضخامت ۱۰ سانتی متر می باشد. ضریب اطمینان در حالت سیستم نگهداری ترکیبی بیشتر از ۱/۵ بوده و مقادیر جابه جایی به طور قابل توجهی کاهش یافته است؛ بنابراین استفاده از این سیستم نگهداری در شیروانی پرتال تونل دره پرن در مسیر جاده جایگزین مشرف به سد هراز، می تواند ایمنی جاده را از لحاظ پایداری استاتیکی در دیواره بالا دست و پایین دست افزایش دهد.

۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، تحلیل پایداری بالا دست و پایین دست شیروانی سنگی پرتال تونل در محدوده دره پرن واقع در مسیر جاده مشرف به سد هراز با استفاده از روش های سینماتیک، تعادل حدی، تجربی و عددی انجام شده است. مهمترین وجه تمایز این تحقیق در تلفیق تکنیک های مختلف دانست.

- نتایج حاصل از تحلیل پایداری شیروانی مورد مطالعه به روش سینماتیک (استروگرافیک)، نشان می دهد که احتمال هر سه نوع گسیختگی صفحه ای، گوه ای و واژگونی در شیب پله بالا دست و پایین دست جاده وجود دارد.