

## تحلیل پایداری شیروانی سنگی مشرف به نیروگاه برق - آبی سد سیمره با استفاده از روش المان مجزا

بهروز فرشادبخت<sup>۱</sup>، کاوه آهنگری<sup>۲</sup>، عباس کمالی بندپی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد استخراج معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات

۲- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات تهران

۳- کارشناس ارشد، مهندسی معدن، شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس

\* B.farshadbakht@yahoo.com

دریافت: ۸۹/۱۲/۸ پذیرش: ۹۰/۴/۲۲

### چکیده

با توجه به اهمیت سدها به عنوان منابع حیاتی تأمین آب هر کشور و لزوم رعایت آئین‌نامه‌ها و مقررات مربوطه در احداث سدها، موضوع ایمنی این‌گونه سازه‌ها از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک اهمیت بسیاری دارد. در این راستا، موضوع مطالعه شیروانی‌های خاکی و یا سنگی موجود در ساختگاه سد از اهمیت بالایی برخوردار بوده و می‌تواند به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مسائل در طراحی و بهره‌برداری از سد به شمار آید. برای تحلیل پایداری، روش‌های مختلفی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به روش‌های مبتنی بر تحلیل‌های ریاضی، روش‌های تجربی و مدل‌سازی‌های عددی اشاره کرد. از میان روش‌های ارائه شده جهت تحلیل پایداری شیب‌های سنگی، مدل‌سازی عددی می‌تواند از کارایی بهتری برخوردار باشد. روش عددی برای مدل‌سازی، بر اساس ساختاری یا غیر ساختاری بودن نوع شکست و با توجه به پیوسته یا ناپیوسته بودن محیط می‌تواند متفاوت باشد. به‌دلیل اینکه محل در نظر گرفته شده جهت احداث نیروگاه سد سیمره به دامنه شیبدار دارای پتانسیل ریزش نزدیک می‌باشد، لذا تحلیل پایداری این شیروانی و تأمین ایمنی محل احداث نیروگاه ضروری می‌باشد. در این تحقیق با توجه به وضعیت محیط از نظر ناپیوستگی‌ها، تحلیل پایداری به کمک روش عددی المان مجزا و با استفاده از نرم‌افزار UDEC (V.4.0) انجام شده است. تحلیل فوق در دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک برای شیروانی مورد نظر صورت پذیرفته است. با توجه به نتایج حاصل، فاکتور ایمنی محاسبه شده بزرگتر از فاکتور ایمنی مجاز بوده، بنابراین شیروانی مورد مطالعه پایدار ارزیابی می‌شود.

واژه های کلیدی: تحلیل پایداری، شیروانی سنگی، سد سیمره، مدل‌سازی عددی، المان مجزا، UDEC

### مقدمه

می‌باشد. نوع تحلیل انتخابی به شرایط منطقه و نوع شکست بالقوه بستگی دارد [۹]. روش المان مجزا<sup>۱</sup> که توسط کاندال<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۱ پیشنهاد شد و در سال ۱۹۷۹ توسط کاندال و استرک<sup>۳</sup> توسعه یافت، از جمله رایج‌ترین روش‌های مدل‌سازی عددی جهت تحلیل پایداری شیروانی‌ها می‌باشد. در این روش ناحیه تحت مطالعه به المان‌های مجزا با شکل‌های قراردادی تقسیم گردیده و اثر متقابل این المان‌ها هنگامی که نیروهای داخلی به تعادل برسند، نشان داده می‌شود. توالی محاسبات به‌طور متناوب از حاصل جمع نیروهای فعال روی یک المان و از قانون نیرو-جابجایی در سراسر درزه‌ها، و کاربرد قانون دوم نیوتن برای پیدا کردن تغییر مکان‌ها، سرعت‌ها و شتاب‌های المان انجام می‌گردد. با استفاده از این روش محیط به‌صورت ناپیوسته مدل شده و در نتیجه اثر عوارض ساختاری نظیر درزه‌های سنگی،

بسیاری از شیب‌های سنگی با گذشت زمان دچار حرکت می‌شوند. ممکن است این حرکات در طی سال‌ها و یا قرن‌ها بدون اینکه گسیختگی اتفاق افتد، ادامه یابد، ولی در مواردی یک حرکت ابتدایی و جزئی ممکن است به تسریع حرکت و فروریختن شیب منجر گردد. تحلیل پایداری سازه‌های زیرزمینی و روباز به‌علت تغییر در نوع سنگ و خاک، تغییر در ساختار زمین‌شناسی، شرایط تنش‌های منطقه، مراحل حفاری ایجاد یک فضا از یک محل به محل دیگر، امری مشکل و پیچیده است. بنابراین باید روش‌های مختلفی برای تحلیل پایداری یک سازه در نظر گرفته شود و با مقایسه بین نتایج به‌دست آمده، تحلیل مناسبی از سازه مورد نظر، به عمل آید [۹]. امروزه روش‌های مختلف عددی در زمینه تحلیل پایداری وجود دارد که پیش‌نیاز استفاده از هرکدام از این روش‌ها، داشتن تعدادی از پارامترهای ژئومکانیکی و تعیین وضعیت زمین‌شناسی صحیح منطقه مورد مطالعه

1 Distinct Element Method

2 Cundall

3 Strack

سنگ‌های شکل‌پذیر و فرسایش‌پذیر مارنی و گچی انباشته شده‌اند. بیشینه ارتفاعات در قسمت‌های جنوبی ناحیه مورد مطالعه و در طاق‌دیس بزرگ کبیرکوه با ارتفاع حدود ۲۷۰۰ متر و کمینه ارتفاعات منطقه، دشت‌های محصور بین طاق‌دیس‌ها و منطبق بر مسیر رودخانه سیمره با ارتفاع حدود ۶۰۰ متر می‌باشد. الگوی زهکشی<sup>۴</sup> مشخص شده برای منطقه مورد مطالعه برای سنگ‌های فرسایش‌پذیر و شکل‌پذیر مارنی و گچی به- صورت شاخه‌ای<sup>۵</sup> و بر روی سنگ‌های مقاوم آهکی به- صورت راست‌گوشه<sup>۶</sup> می‌باشد [۲]. جهت تولید برق، ۳ واحد نیروگاه سطحی در پایین‌دست بدنه سد و در فاصله ۱/۵ کیلومتری ورودی سازه آبگیر و جناح چپ رودخانه در حال احداث می‌باشد. شیروانی سنگی مشرف به نیروگاه در حال احداث سد سیمره، شامل سنگ‌های آهک، آهک مارنی و مارلستون بوده و دارای ارتفاعی حدود ۸۰ متر، گسترش طولی ۱۰۰ متر و شیب ۴:۱ می‌باشد. ارزیابی شاخص کیفی توده سنگ نیز نشان دهنده مقادیر RQD بالاتر از پنجاه درصد در محدوده مورد نظر می‌باشد [۷]. شکل ۱ نمایی از شیروانی مشرف به نیروگاه برق- آبی سد سیمره را نشان می‌دهد.

#### تحلیل پایداری با نرم‌افزار UDEC

نرم‌افزار UDEC یک برنامه عددی دوبعدی است که بر اساس روش المان مجزا برای مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته تهیه شده است. نرم‌افزار مذکور در ابتدا برای تحلیل پروژه‌های مهندسی سنگ طراحی گردید و کاربرد آن در مطالعه گسیختگی پیش‌رونده در شیب‌های سنگی تا برآورد تأثیر درزه‌ها، گسل‌ها و صفحات لایه‌بندی بر روی حفاری‌های زیرزمینی گسترش یافت [۸]. این نرم‌افزار می‌تواند عکس‌العمل یک محیط ناپیوسته را در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی شبیه-سازی می‌کند.

لایه‌بندی، گسل‌ها و انواع ناپیوستگی‌ها قابل بررسی است [۴]. در این پژوهش با تکیه بر مطالعات زمین شناسی مهندسی و نتایج حاصل از آزمایش‌های ژئوتکنیکی و با بهره‌گیری از روش عددی المان مجزا توسط نرم‌افزار UDEC (V.4.0)، پایداری شیروانی سنگی مشرف به نیروگاه سد سیمره در دو حالت الاستیک و الاستوپلاستیک مورد بررسی قرار گرفته و نتایج به‌دست آمده مقایسه گردیده است. سد سیمره در ۱۰۶ کیلومتری جنوب‌شرقی استان ایلام واقع شده و یکی از بزرگترین سدهای بتنی ایران است. بررسی پایداری شیروانی مذکور با توجه به نزدیکی محل در نظر گرفته شده جهت احداث سه واحد نیروگاهی به دامنه شیب‌دار دارای پتانسیل ریزش و لزوم ایمنی کامل این سه واحد نیروگاهی و ساختمان و تأسیسات نیروگاه ضروری می‌باشد. همچنین تنوع جنس سنگ‌های دربرگیرنده شیروانی مذکور و نقش ناپیوستگی‌ها در پایداری بر اهمیت انجام چنین تحقیقی و نتایج حاصل از آن می‌افزاید.

#### مطالعات زمین‌شناسی ساختگاه سد و شیروانی

##### سنگی مشرف به نیروگاه سد سیمره

سد بتنی دو قوسی سیمره، حد فاصل دو استان ایلام و لرستان و ۴۰ کیلومتری شمال غربی شهرستان دره شهر بر روی رودخانه سیمره در حال احداث می‌باشد. موقعیت شیروانی سنگی مشرف به نیروگاه برق- آبی سد سیمره در فاصله حدود ۲/۵ کیلومتری پائین دست محور سد (روبروی روستای تلخاب) در ساحل چپ و در یال جنوبی طاق‌دیس راوندی قرار دارد. نحوه اعمال نیروها و واکنش توده‌سنگ در منطقه به‌صورتی بوده که در محدوده ساختگاه، طاق‌دیزی نامتقارن ایجاد نموده است. محدوده مورد مطالعه از دیدگاه زمین‌شناسی ناحیه‌ای، در زون زاگرس چین خورده و در بخش جنوب غربی آن واقع شده است. این زون از دیدگاه زمین ریخت شناسی از رشته کوه‌های نسبتاً مرتفع با روند کلی شمال غرب - جنوب شرق تشکیل شده است و توالی پشته‌های سنگی (طاق‌دیس‌ها) و نواحی پست و کم ارتفاع (ناودیس‌ها) در منطقه به وفور یافت می‌شود. به‌طوری‌که طاق‌دیس‌ها از سنگ‌های مقاوم آهکی و ناودیس‌ها از

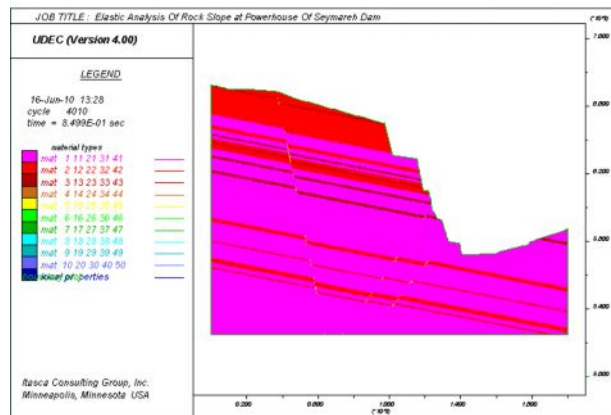
4 Drainage Pattern

5 Dendritic

6 Rectangular



شکل ۱- نمایی از شیروانی مشرف به نیروگاه سد سیمره [۷]



شکل ۲- هندسه شیروانی مدل سازی شده با UDEC

جدول ۱- پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ شیروانی [۲]

پارامتر	آهک	مارن	آهک مارنی
دانسیته ( $t/m^3$ )	۲/۶۸	۲/۶	۲/۶۵
چسبندگی (Mpa)	۰/۴	۰/۰۷	۰/۲۵
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۴۵	۲۰	۳۵
مدول تغییر شکل (Gpa)	۷	۲/۸	۵
نسبت پواسون	۰/۲	۰/۳	۰/۲۵
مدول حجمی (Gpa)	۲/۹۲	۱/۰۸	۲
مدول برشی (Gpa)	۳/۸۹	۲/۳۳	۳/۳۳

برای تغییر شکل ها و جابجایی های بزرگ مورد مطالعه قرار گرفته است و برای مدل های با چند هزار بلوک، با سرعت بالا طراحی شده است. حل مسائل توسط این نرم افزار با پیشرفت در دوره های زمانی<sup>۱۱</sup> صورت می گیرد [۵].

#### مدل های رفتاری، مشخصات مصالح و ناپیوستگی -

##### های شیروانی مورد مطالعه

در نرم افزار UDEC می توان مدل های رفتاری تماس نقطه ای لغزش کولمب<sup>۱۲</sup>، تماس سطح درز لغزش کولمب<sup>۱۳</sup>، تماس سطحی لغزش کولمب با در نظر گرفتن مقاومت باقیمانده<sup>۱۴</sup>، مدل تسلیم پیوسته<sup>۱۵</sup>، و مدل درزه بارتن- بندیس<sup>۱۶</sup> را برای ناپیوستگی ها در نظر گرفت. همچنین مدل های رفتاری تهی<sup>۱۷</sup>، الاستیک، پلاستیک موهر- کولمب<sup>۱۸</sup>، پلاستیک دراگر- پراگر<sup>۱۹</sup>، درزه در همه جا موجود<sup>۲۰</sup>، کرنش سختی- نرمی<sup>۲۱</sup> و تسلیم دوگانه<sup>۲۲</sup> می توانند برای بلوک ها تعریف شوند [۶]. با توجه به مدل های رفتاری ذکر شده، در تحلیل پایداری شیروانی سنگی مشرف به نیروگاه سد سیمره، از مدل رفتاری لغزش موهر- کولمب برای تعریف ناپیوستگی ها استفاده گردید. همچنین با توجه به جنس سنگ های تشکیل دهنده بلوک ها، شیروانی مذکور در دو حالت رفتاری برای بلوک ها تحلیل گردید و نتایج آن ها مقایسه شد. مدل الاستیک و مدل الاستیک- پلاستیک با معیار لغزش موهر- کولمب در تحلیل مورد نظر، برای بلوک های شیروانی در نظر گرفته شدند. مدل الاستیک پلاستیک رفتار سنگ در بخش الاستیک را نفی نمی کند، بلکه در حالتی که رفتار سنگ از حالت الاستیک خارج می شود و به منطقه پلاستیک می رسد، این بخش را نیز شامل می گردد.

محیط ناپیوسته به صورت مجموعه ای از بلوک های مجزا تعریف می شود که در آن ناپیوستگی ها به عنوان شرایط مرزی بین بلوک ها عمل نموده و جابجایی های بزرگ در امتداد ناپیوستگی ها صورت می گیرد. بلوک های منفرد می توانند به صورت صلب یا شکل پذیر عمل نمایند. استفاده از بلوک های صلب تنها در مسائلی است که رفتار توده سنگ فقط به وسیله ناپیوستگی ها اداره می شود، یعنی بلوک تأثیری در جابجایی ندارد و درزه و ناپیوستگی های دیگر باعث جابجایی می شوند. چنین شرایطی معمولاً در محیط های کم تنش یا در محیط هایی که سنگ بکر از قابلیت دگرشکل پذیری پایینی برخوردار است، در نظر گرفته می شود. در حالتی که بلوک ها شکل پذیر هستند، رفتار المان ها بر اساس قوانین تنش- کرنش خطی یا غیرخطی بوده و حرکت نسبی ناپیوستگی ها تحت تأثیر روابط نیرو- جابجایی خطی یا غیرخطی مربوط به حرکت در جهات افقی و قائم کنترل می شود. همچنین برای یافتن حرکت بلوک ها، از قانون دوم نیوتن استفاده می شود. نرم افزار UDEC دارای چندین مدل رفتاری برای مواد تشکیل دهنده بلوک ها و ناپیوستگی ها می باشد که مدل سازی ناپیوستگی را با شرایط زمین شناسی موجود ممکن می سازد. بیشترین اطلاعات مورد نیاز در استفاده از نرم افزار UDEC اطلاعات مربوط به ناپیوستگی هایی است که محیط را بلوک بندی می نماید و چون ناپیوستگی ها در رفتار بلوک ها به عنوان شرایط مرزی عمل می نمایند، خواص مربوط به آن ها تأثیر مهمی در کیفیت نتایج خواهد داشت. مهمترین این خواص برای تعریف ناپیوستگی ها زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، سختی برشی ناپیوستگی<sup>۷</sup> و سختی نرمال ناپیوستگی<sup>۸</sup> می باشند. جهت تعریف مصالح تشکیل دهنده بلوک ها نیز از خواصی مانند دانسیته، مدول تغییرشکل حجمی<sup>۹</sup>، مدول تغییرشکل برشی، زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی توده سنگ استفاده می شود که این خصوصیات برای مواد سازنده هر بلوک ممکن است متفاوت باشد. این نرم افزار بر اساس روش محاسبه لاگرانژین<sup>۱۰</sup> بوده که

<sup>11</sup> Time Step

<sup>12</sup> Point Contact Coulomb Slip Model

<sup>13</sup> Joint Area Contact Coulomb Slip Model

<sup>14</sup> Joint Area Contact Coulomb Slip Model with Residual Strength

<sup>15</sup> Continuously Yielding Model

<sup>16</sup> Barton-Bandis Joint Model

<sup>17</sup> Null Model

<sup>18</sup> Mohr-Coulomb Plasticity Model

<sup>19</sup> Drucker-Prager Plasticity Model

<sup>20</sup> Ubiquitous joint Model

<sup>21</sup> Strain-hardening/softening Model

<sup>22</sup> Double-Yield

<sup>7</sup> Discontinuity Shear Stiffness

<sup>8</sup> Discontinuity Normal Stiffness

<sup>9</sup> Bulk Modulus

<sup>10</sup> Lagrangian Method

در این شرایط به جای استفاده از پارامترهای سنگ بکر برای بلوک‌ها، از پارامترهای توده‌سنگ استفاده شده است و اثر درزه‌ها با استفاده از GSI به محیط اعمال شده و ناپیوستگی‌ها از نوع گسل و لایه‌بندی در نرم‌افزار وارد شده است، در شکل ۳ ناپیوستگی‌های برداشت شده که توسط نرم‌افزار Dips به‌دست آمده، نمایش داده شده است.

هم‌چنین پارامترهای ورودی به نرم‌افزار برای ناپیوستگی‌ها با توجه به مدل رفتاری تعریف شده شامل، سختی نرمال<sup>۲۴</sup>، سختی برشی<sup>۲۵</sup>، زاویه اصطکاک داخلی ناپیوستگی و چسبندگی ناپیوستگی می‌باشد. در جدول ۲ مشخصات ژئومکانیکی سطوح ناپیوستگی بیان شده است.

به دلیل عدم انجام آزمون‌های برجا جهت به‌دست آوردن پارامترهای الاستیسیته تا زمان تهیه این گزارش، ناگزیر از نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی استفاده گردید.

در ادامه شرایط مرزی و اولیه که عمدتاً شامل بارگذاری‌ها، شرایط مربوط به جهات آزادی مرزها و هم‌چنین در نظر گرفتن تنش‌های برجای منطقه است، به مدل اعمال می‌گردد. به این منظور پس از تعریف خواص، با تحقق شرایط مرزی (مرز پایینی در راستای محور  $y$  و مرزهای جانبی در راستای محور  $x$ ، ثابت گردیدند) و اعمال شرایط بارگذاری (اعمال نیروی ثقل و تنش‌های برجای منطقه)، مدل برای اجرا به تعادل رسانده می‌شود. در انتها با اعمال دستور مربوط به مش-بندی، مدل به‌طور اتوماتیک توسط شبکه‌ای از زون‌های تفاضل محدود مثلی شکل پر می‌گردد. در این مطالعه برای مش‌بندی بلوک‌ها از مش‌بندی نوع مثلی با ابعاد مناسب برای هر بلوک استفاده گردیده است.

#### نتایج حاصل از تحلیل با استفاده از نرم‌افزار UDEC

شکل ۴ بردارهای جابجایی بیشینه را در حالت الاستیک و شکل ۵ بردارهای جابجایی بیشینه را در حالت تحلیل پلاستیک نشان می‌دهد.

#### مراحل مدل‌سازی شیروانی سنگی مشرف به

##### نیروگاه سد سیمره با استفاده از نرم‌افزار UDEC

در این تحقیق، روش اصلی مورد استفاده برای تحلیل پایداری شیروانی سنگی مشرف به نیروگاه سد سیمره، استفاده از روش المان مجزا می‌باشد. به این منظور با توجه به شرایط ساختاری و زمین‌شناسی منطقه و تطابق آن با اصول کلی روش المان مجزا، از نرم‌افزار UDEC (V.4.0) استفاده گردیده است. مراحلی که برای مدل‌سازی شیروانی مورد مطالعه با نرم‌افزار UDEC طی گردیده است، در ادامه بیان شده است.

به‌منظور ایجاد مدل دارای بلوک‌های مشخص، ابعاد مدل به همراه لایه‌بندی‌ها و سیستم ناپیوستگی، تعریف می‌شود. شیروانی مورد مطالعه دارای ارتفاعی حدود ۱۴۸ متر و گسترش طولی ۲۰۰ متر می‌باشد. شکل ۲ هندسه شیروانی مدل‌سازی شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

در مرحله بعدی بعد از تعریف هندسه مدل با توجه به مدل‌های رفتاری تعریف شده برای بلوک‌ها و ناپیوستگی‌ها، خواص مربوط به آن‌ها اختصاص داده می‌شود. خواص اختصاص یافته به بلوک‌ها در این حالت شامل، وزن مخصوص، مدول حجمی، مدول برشی<sup>۲۳</sup>، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی و مقاومت کششی می‌باشد. برای بیان خواص الاستیکی در UDEC بهتر است از مدول برشی ( $G$ ) و مدول حجمی ( $K$ ) به جای مدول الاستیک و ضریب پواسون استفاده گردد. برای محاسبه مدول حجمی و مدول برشی می‌توان از روابط (۱) و (۲) که ارتباط بین مدول تغییر شکل‌پذیری و ضریب پواسون با مدول حجمی و برشی را بیان می‌کنند، استفاده نمود [۶].

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

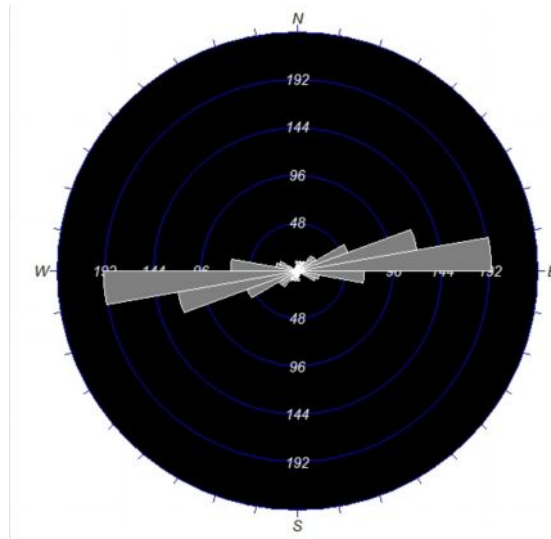
در جدول ۱ مشخصات ژئومکانیکی مصالح سنگی لایه-های شیروانی بیان گردیده است [۷].

به دلیل وجود ۲ دسته درزه با فاصله‌داری کم، و لایه-بندی در منطقه مورد مطالعه، مدل مورد تحلیل طبق نظر پالمستروم به شرایط محیط پیوسته نزدیک می‌شود.

<sup>24</sup> Discontinuity Normal Stiffness

<sup>25</sup> Discontinuity Shear Stiffness

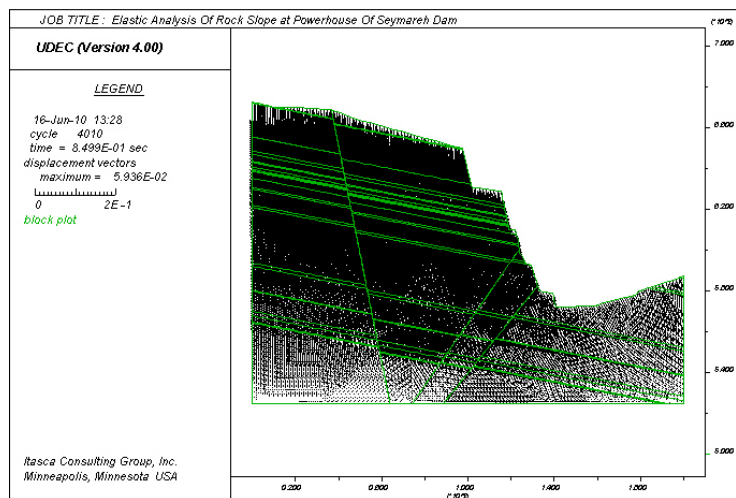
<sup>23</sup> Shear Modulus



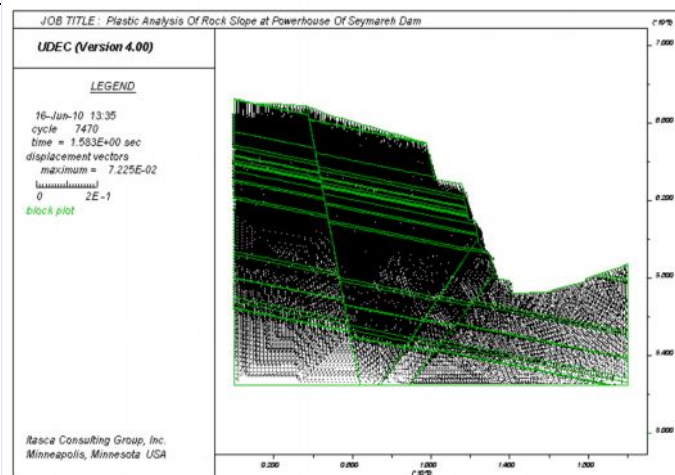
شکل ۳- رزیدیاگرام ناپیوستگی های منطقه

جدول ۲- پارامترهای ژئومکانیکی سطوح ناپیوستگی [۲]

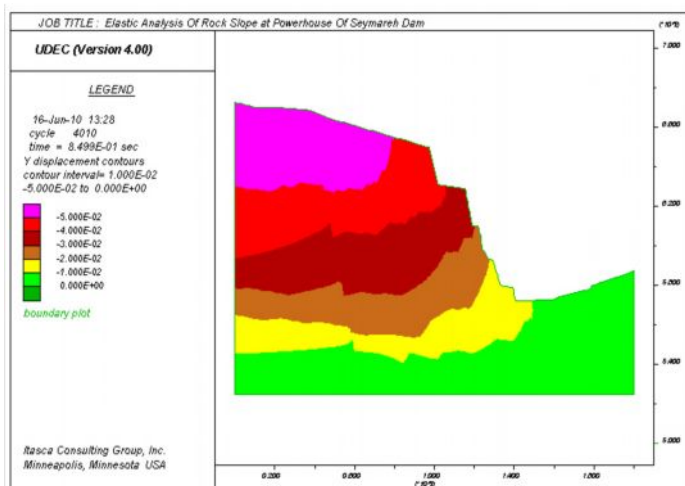
زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (Mpa)	سختی برشی (Gpa)	سختی نرمال (Gpa)	سطح ناپیوستگی
۲۸/۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۷	گسل
۲۷	۰/۱۴	۰/۵	۲	لایه بندی
۲۰	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۷	سطح تماس مارن با سنگ های پیرامون
۲۴	۰/۱	۰/۳	۱/۳	سطح تماس آهک مارنی با سنگ های پیرامون



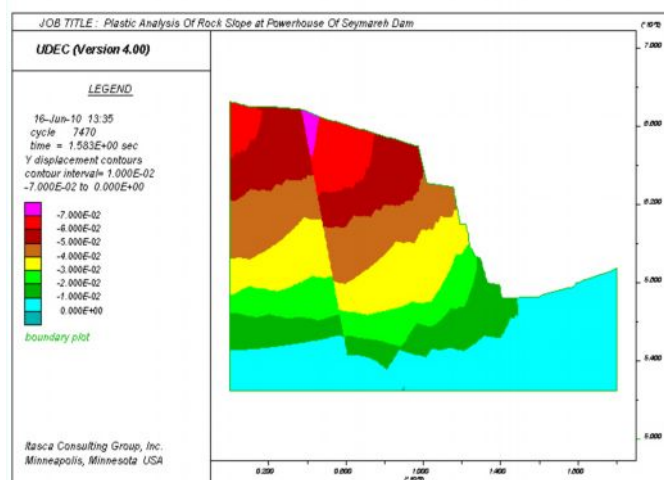
شکل ۴- بردارهای جابجایی بیشینه در حالت الاستیک



شکل ۵- بردارهای جابجایی بیشینه در حالت پلاستیک



شکل ۶- بیشینه جابجایی در جهت قائم برای وضعیت الاستیک



شکل ۷- بیشینه جابجایی در جهت قائم برای وضعیت پلاستیک

گاه به طور کامل صفر نمی‌گردد. هنگامی که بیشینه نیروی نامتعادل کننده نسبت به نیروی کلی به کار رفته در مسئله کمتر از ۰/۰۱ درصد بیشینه نیروی آغازین باشد، مدل به حالت تعادل رسیده است [۶].

همچنین در این تحقیق میزان جابجایی‌های قائم و افقی در چهار نقطه واقع در پله اول، دوم، سوم و چهارم شیروانی مذکور در دو حالت الاستیک و پلاستیک مورد تحلیل قرار گرفت و نتایج به دست آمده با استفاده از هر دو مدل رفتاری مقایسه گردید. موقعیت نقاط مشاهده‌ای برای بررسی میزان جابجایی‌ها در شکل ۱۶ نشان داده شده است. با بررسی نمودارهای مربوط به حداکثر جابجایی قائم و افقی در هر دو حالت رفتاری الاستیک و پلاستیک در نقاط مشاهده‌ای منتخب، مشاهده گردید همه این نقاط در وضعیت پایدار قرار دارند و جابجایی‌های آن‌ها با گذشت زمان ثابت گردیده است. خلاصه نتایج این بررسی در جدول ۴ بیان شده است.

در نرم‌افزار UDEC سرعت بلوک‌های صلب یا نقاط گرهی را در بلوک‌های شکل پذیر، می‌توان با پلات‌گیری از سرعت در کل محدوده شیروانی یا در نقاط مشاهده‌ای منتخب در مدل با استفاده از دستورات مربوطه تعیین نمود. اگر پلات هیستوری<sup>۲۷</sup> سرعت‌ها به صفر هم‌گرا شوند (در مقایسه با مقادیر اولیه‌شان) نشان از حالت تعادل و پایداری می‌باشد [۵]. در این مطالعه با بررسی پلات‌های مربوط به هیستوری سرعت‌ها، برای کل محدوده شیروانی و همچنین در نقاط منتخب، مشاهده گردید که نمودارهای فوق به سمت صفر هم‌گرا شده‌اند که نشان دیگری بر پایداری شیروانی مزبور می‌باشد.

با توجه به اینکه فاکتور ایمنی در بدترین حالت در مقطع مذکور بزرگتر از ۲ می‌باشد. همچنین براساس ماکزیمم زلزله مبنای طرح (MDL) و مقدار ضریب شتاب افقی زلزله ۰/۱۸ و ضریب شتاب عمودی زلزله ۰/۰۶، در نظر گرفتن بار لرزه‌ای طبق تحلیل‌های صورت گرفته حداکثر ۲۰ تا ۳۰ درصد موجب کاهش فاکتور ایمنی می‌گردد [۱]. بنابراین با علم به اینکه تحلیل لرزه‌ای در مواقعی که فاکتور ایمنی در مرز حالت تعادل (۱/۳) برای شیب‌های موقت و ۱/۵ برای شیب‌های دائم)

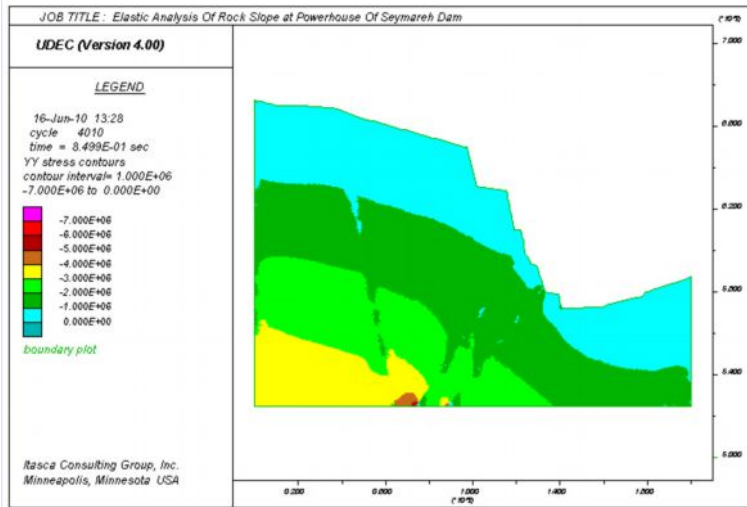
شکل‌های ۶ و ۷ بیشینه جابجایی در جهت قائم را به ترتیب در دو حالت تحلیل در شرایط الاستیک و پلاستیک نشان می‌دهند. با توجه به این اشکال مشاهده می‌گردد که بیشینه جابجایی قائم در شرایط تحلیل پلاستیک ۴۰ درصد نسبت به تحلیل الاستیک افزایش یافته است. میزان تنش عمودی وارد بر مدل در دو حالت الاستیک و پلاستیک در اشکال ۸ و ۹ مشاهده می‌شود. این اشکال نشان دهنده یکسان بودن حداکثر تنش عمودی در هر دو حالت تحلیل می‌باشند. دو شکل ۱۰ و ۱۱ نیز مربوط به میزان کرنش برشی حالت‌های الاستیک و پلاستیک در تحلیل پایداری شیروانی سنگی مشرف به نیروگاه سد سیمه می‌باشند. در شکل ۱۲ مقدار و محل وقوع حداکثر جابجایی برشی در حالت الاستیک نشان داده شده است. جابجایی برشی در حالت تحلیل الاستیک بر روی پله اول، دوم، سوم و چهارم اتفاق افتاده است. در شکل ۱۳ همین پارامتر در حالت تحلیل با مدل رفتاری پلاستیک مشاهده می‌شود که در این وضعیت جابجایی برشی بر روی پله دوم و چهارم واقع گردیده است.

نتایج حاصل از تحلیل عددی مذکور با استفاده از نرم‌افزار UDEC، در جدول شماره ۳ بیان گردیده است. آن چه در این نرم‌افزار به عنوان مبنای پایداری یا ناپایداری در نظر گرفته می‌شود، نیروی نامتعادل<sup>۲۶</sup> می‌باشد. چنانچه این نیرو به سمت صفر حرکت کند، نشان از وضعیت پایداری با گذشت زمان دارد. اما در صورتی که این نیرو در حال نوسان باشد و به سمت صفر هم‌گرا نشود، دلالت بر ناپایداری و حرکت در طی زمان دارد [۶]. در شکل ۱۴ نوسانات نیروی نامتعادل در حالت الاستیک و در شکل ۱۵ نوسانات این نیرو در حالت پلاستیک، برای بررسی پایداری یا ناپایداری شیروانی مورد مطالعه نشان داده شده است.

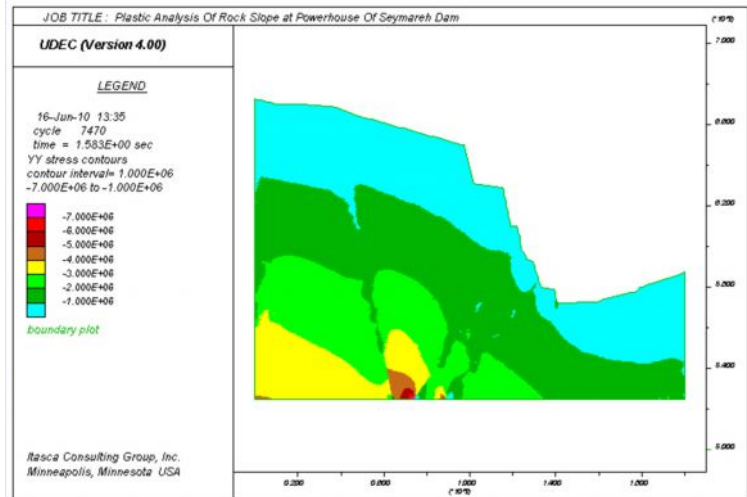
همان‌طور که از نمودارهای مذکور مشاهده می‌شود، این نیرو در هر دو حالت تحلیل صورت گرفته برای شیروانی مورد مطالعه، به سمت صفر هم‌گرا شده که پایداری شیروانی را نتیجه می‌دهند. لازم به یادآوری است که در آنالیزهای عددی، نمودار نوسانات نیروی نامتعادل هیچ-



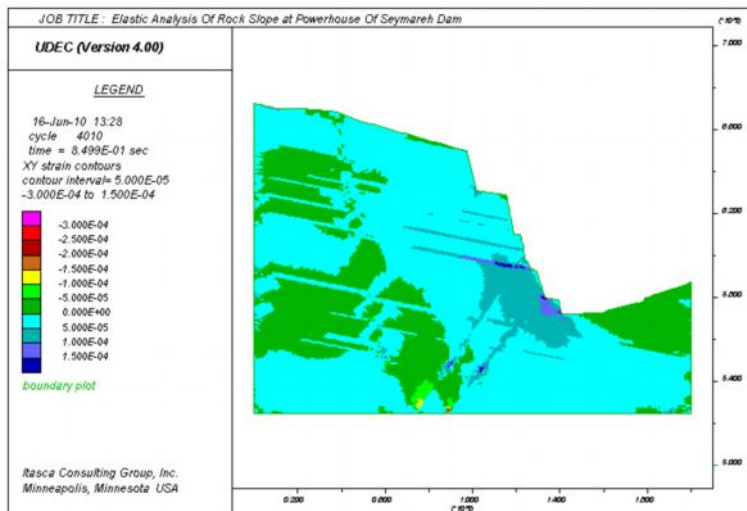
قرار دارد توجیه پیدا می کند، در این تحقیق نیازی به تحلیل دینامیکی احساس نشد.



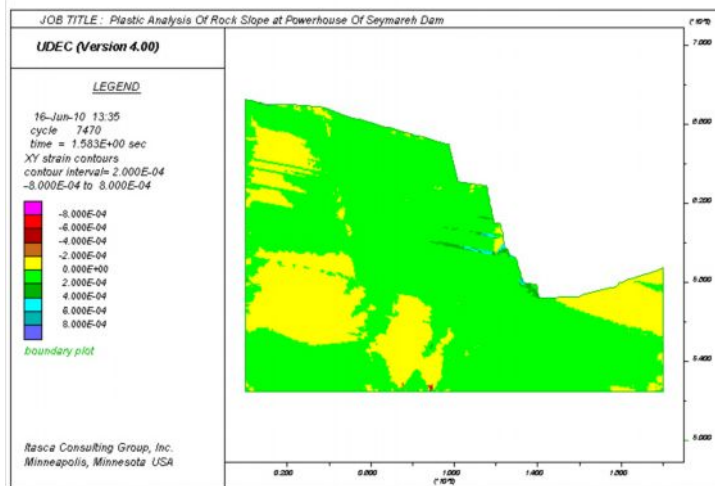
شکل ۸- میزان تنش عمودی وارد بر مدل در حالت تحلیل الاستیک



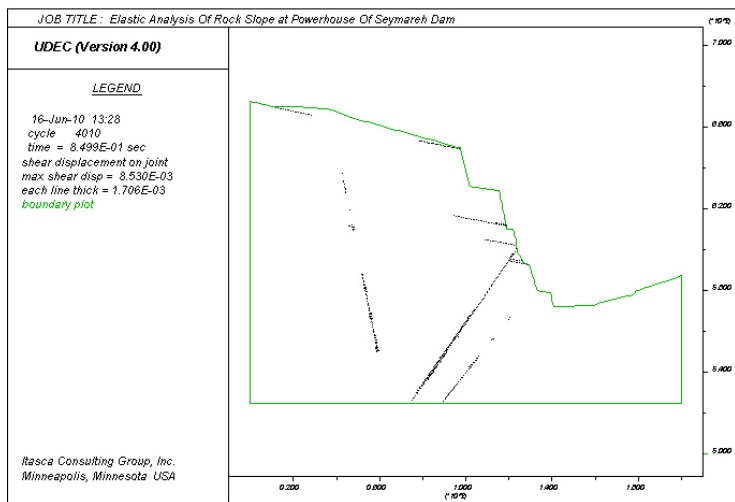
شکل ۹- میزان تنش عمودی وارد بر مدل در حالت تحلیل پلاستیک



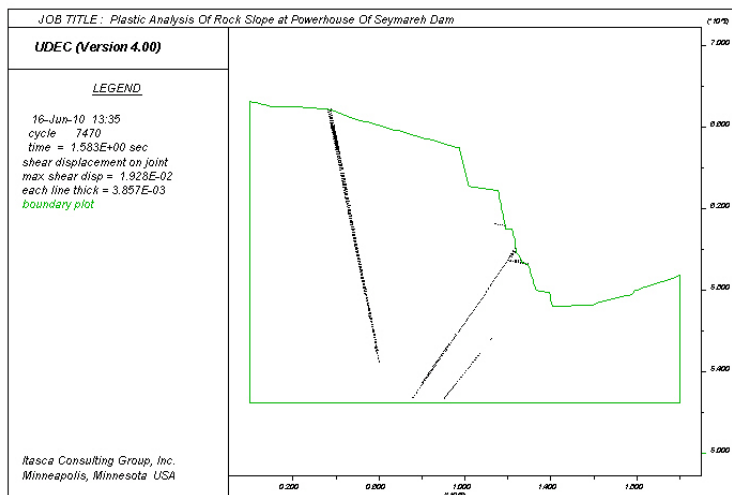
شکل ۱۰- میزان کرنش برشی در حالت الاستیک



شکل ۱۱- میزان کرنش برشی در حالت پلاستیک



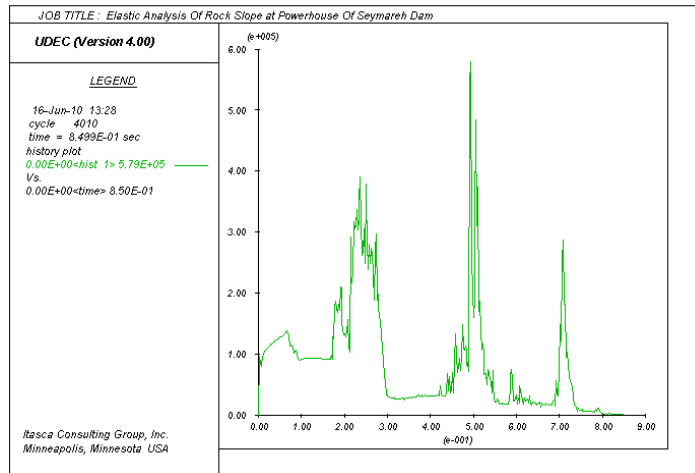
شکل ۱۲- حداکثر جابجایی برشی در وضعیت الاستیک



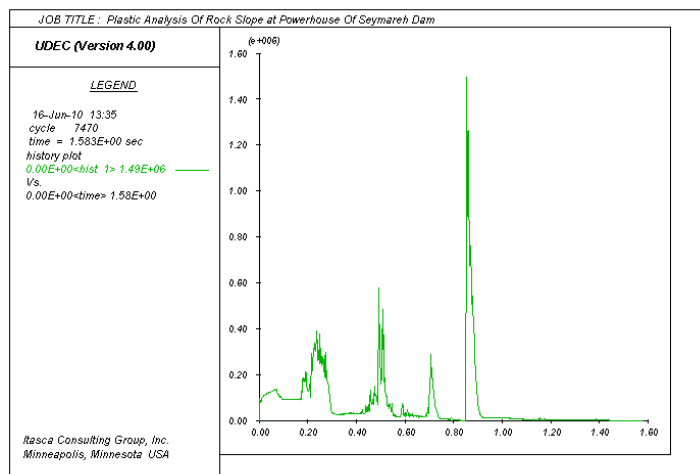
شکل ۱۳- حداکثر جابجایی برشی در وضعیت پلاستیک

جدول ۳- خلاصه نتایج تحلیل عددی

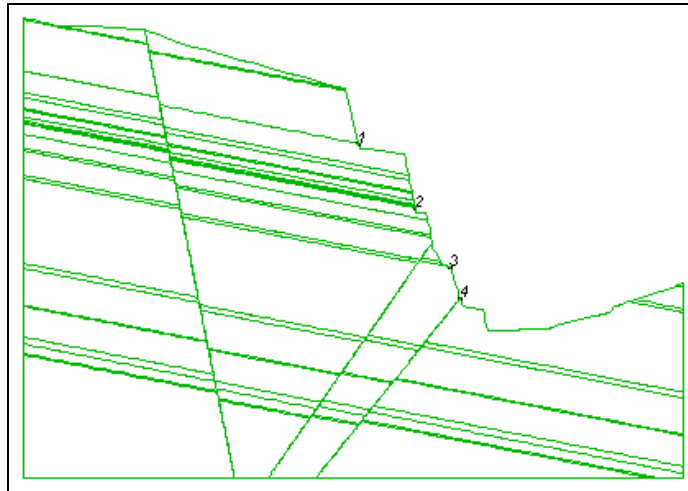
پارامترها	نتایج تحلیل در حالت الاستیک	نتایج تحلیل در حالت پلاستیک
حداکثر جابجایی کلی بلوک‌ها (سانتی‌متر)	۵/۹۳	۷/۲
حداکثر جابجایی قائم (سانتی‌متر)	۵	۷
حداکثر جابجایی افقی (سانتی‌متر)	۰/۶	۲
حداکثر تنش عمودی (مگاپاسکال)	۳/۵	۳/۵
حداکثر تنش افقی (مگاپاسکال)	۱/۲	۱/۵
حداکثر کرنش برشی	۲e-۴ تا ۱/۵e-۴	۴e-۴ تا ۸e-۴
جابجایی برشی (میلی‌متر)	روی پله اول: ۲/۶ روی پله دوم: ۳/۸ روی پله سوم: ۳/۸ روی پله چهارم: ۳/۶	روی پله دوم: ۴/۴ روی پله چهارم: ۱۵
حداکثر بازشدگی (میلی‌متر)	۱/۱۷ (روی پله اول)	۳/۷ (روی پله اول)
فاکتور ایمنی	بزرگتر از ۲	بزرگتر از ۲



شکل ۱۴- نوسانات نیروی نامتعادل در حالت الاستیک



شکل ۱۵- نوسانات نیروی نامتعادل در حالت پلاستیک



شکل ۱۶- موقعیت نقاط مشاهده‌ای مورد بررسی

جدول ۴- نتایج میزان جابجایی‌ها در نقاط مشاهده‌ای

پارامتر	نتایج تحلیل در حالت الاستیک	نتایج تحلیل در وضعیت پایداری	وضعیت پایداری
میزان جابجایی قائم در نقطه اول (سانتی‌متر)	۱/۶	۱	پایدار
میزان جابجایی قائم در نقطه دوم (سانتی‌متر)	۲	۱/۰۸	پایدار
میزان جابجایی قائم در نقطه سوم (سانتی‌متر)	۳/۳	۱/۱۵	پایدار
میزان جابجایی قائم در نقطه چهارم (سانتی‌متر)	۴/۵	۱/۱	پایدار
میزان جابجایی افقی در نقطه اول (سانتی‌متر)	۰/۴۹	۲/۲۴	پایدار
میزان جابجایی افقی در نقطه دوم (سانتی‌متر)	۰/۵۴	۳/۲	پایدار
میزان جابجایی افقی در نقطه سوم (سانتی‌متر)	۰/۷۸	۲/۵	پایدار
میزان جابجایی افقی در نقطه چهارم (سانتی‌متر)	۰/۴۱	۳/۸۷	پایدار

### نتیجه گیری

باشد، و نیز زاویه اصطکاک داخلی ۲۰ تا ۲۷ درجه‌ای لایه‌ها، ناپایداری محتمل نمی‌باشد که با بررسی نمودارهای مربوط به میزان جابجایی‌ها، تنش‌ها، نمودار نوسانات نیروی نامتعادل کننده و همچنین نمودار سرعت در کل محدوده شیروانی و در نقاط مشاهده‌ای منتخب مشخص گردید شیروانی مورد نظر در هر دو وضعیت رفتاری منتخب پایدار می‌باشد. با توجه به نتیجه به‌دست

برای تحلیل پایداری شیروانی سنگی مشرف به نیروگاه برق- آبی سد سیمره با توجه به شرایط ساختاری و زمین‌شناسی منطقه، از نرم‌افزار UDEC استفاده شده است. تحلیل پایداری شیروانی مذکور در دو حالت مدل رفتاری الاستیک و مدل رفتاری الاستوپلاستیک کولمب به‌طور جداگانه انجام شد. با در نظر گرفتن این مسئله که شیب لایه‌بندی در این مقطع حدوداً ۱۴ درجه می

آمده از این تحقیق مبنی بر پایداری شیروانی فوق، اعمال سیستم نگهداری نیاز نمی باشد ولی نظر به وجود لایه های مارلستون در شیروانی مورد مطالعه و با توجه به مقاومت پایین مارلستون در برابر هوازدگی، بهتر است طبق نظر ویکهام<sup>۲۸</sup> و تایمن<sup>۲۹</sup> شاکریت به ضخامت ۶/۵ سانتی متر خصوصاً بر لایه های مارلستونی روی دیواره اجرا گردد تا از هوازدگی مصالح شیروانی جلوگیری به عمل آید.

### مراجع

- [۱] فرشادبخت، بهروز، ۱۳۸۹، "تحلیل پایداری شیروانی سنگی مشرف به نیروگاه برق-آبی سد سیمره با استفاده از مدل سازی عددی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران.
- [۲] شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۲، "گزارش زمین شناسی مهندسی سد و نیروگاه سیمره".
- [۳] شرکت مهندسی مشاور مهتاب قدس، ۱۳۸۱، مطالعات فاز دوم، جلد ۱/۴، "گزارش مطالعات مکانیک سنگ".
- [4] Aberra, D.K., 2003, "Discrete Element Method for Slope Stability Analysis", Master of Science Thesis, Addis Ababa University.
- [5] Hart, R.D., 1993, "A Introduction to Distinct Element Modeling for Rock Engineering", Pergamon Press Ltd., Vol. 2, pp. 245-261.
- [6] Itasca Consulting Group Inc, 1998, "Universal Distinct Element Code (UDEC)", User's Manual, Version 4.0.
- [7] Mahab Ghodss Consulting Engineers, 2006, "Basic Design Report of Rock Foundation Geotechnical Parameters Evaluation in Seymareh Hydro Electric Power Plant".
- [8] Stead, D., Eberhardt, E., Coggan, J., and Benko, B., 2001, "Advanced Numerical Techniques in Rock Slope Stability Analysis – Application and Limitations", UEF International Conference on Landslides, Switzerland, pp. 615-624.
- [9] Wyllie, D.C., Mah, C.W., 2004, "Rock Slope Engineering Civil and Mining", Fourth Edition, Spon Press, New York, 431 p