نشریه زمین‌شناسی ژئوتکنیک
سال ۹ (۱۳۹۲)، شماره ۳: ۱۸۵-۱۶۹
www.geo-tech.ir

تحلیل پایداری دامنه‌های سنگی درزه‌دار به روش بلوک‌های کلیدی (مطالعه موردی: محدوده فلرهای گاز فازهای ۶ تا ۸ مجتمع گاز پارس جنوبی)

محمد آذرافزا*[۱]، علیرضا یاراحمدی[۲]، ابراهیم اصغری کلجاهی[۳]، غلامرضا بهمن‌نیا[۴] و محمدرضا مشرفی‌فر[۵]

۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه یزد، m.azarafza.geotech@gmail.com
۲) استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالوژی، دانشگاه یزد، ayarahmadii@yazd.ac.ir
۳) استادیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، e-asghari@tabrizu.ac.ir
٤) دکترای مهندسی انرژی و محیط زیست، شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی، bahmannia@nigc.ir
٥) استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه یزد، moshrefy@yazd.ac.ir
*) عهده‌دار مکاتبات

دریافت: ۱۳۹۲/۲/۳ ؛ دریافت اصلاح شده: ۱۳۹۲/٤/۱؛ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۱۷؛ قابل دسترس در تارنما: ۱۳۹۲/۹/۳۰

چکیده

تحلیل پایداری و محاسبه ضریب اطمینان دامنه‌های سنگی به خصوص دامنه‌های سنگی درزه‌دار، از مهم‌ترین مسائل مورد توجه در تحلیل پایداری دامنه‌ها محسوب می‌شود. امروزه مدل‌سازی‌های عددی، به طور گسترده‌ای توسط مهندسین برای تحلیل پایداری دامنه‌های سنگی و خاکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش، برای تحلیل دامنه‌های کمپلکس، از مدل‌سازی ژئوتکنیکی بر پایه دو زیرمدل هندسی و مکانیکی مبتنی بر الگوریتم پیشنهادی تهیه شده در محیط نرم‌افزاری **Mathematica**، استفاده شده است. مدل‌سازی بر روی یکی از دامنه‌های کمپلکس موجود در سایت فلرهای مجتمع گاز پارس جنوبی صورت گرفته است. فلرها در دامنه‌های تاقدیس عسلویه متشکل از سنگهای مارنی و آهکی سازندهای میشان و آغاجاری قرار دارند. دامنه S_{TR}**-01** به دلیل شرایط خاص و سیستم ناپیوستگی موجود، برای تحلیل پایداری انتخاب شده است. بدنه اصلی این دامنه به دو بخش کاملاً مجزا با خواص مکانیکی متفاوت تقسیم گردیده است. بخش S_{TR}**-01-1**، به دلیل خرد شدگی بالا، درزه‌داری فراوان و فاصله‌داری کم، به حالت شبه خاکی در آمده است. در این بخش هنوز ساختمان کلی توده سنگ حفظ شده اما ساختار خرد شده ای دارد، بنابراین به صورت توده خاکی در نظر گرفته شده و تحلیل می‌گردد. بخش S_{TR}**-01-2** مانند بخش S_{TR}**- 01-1** خرد شده نیست و به صورت توده سنگ درزه‌دار مطالعه و تحلیل می‌گردد. الگوریتم پیشنهادی، توانایی و دقت بالایی را در تحلیل دامنه دارا می‌باشد. در نهایت جهت کنترل مدل تهیه شده، نتایج حاصل از این روش با نتایج روش تحلیل بلوک‌های کلیدی پایه و روش عددی اجزای مجزا، توسط نرم‌افزار **UDEC** و برای حالت دامنه شبه خاک از روش عددی تفاضل محدود به وسیله نرم-افزار **Flac/slope**، مقایسه شدند. بر این اساس، نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی، تطابق خوبی با نتایج حاصل از روش‌های عددی دارد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل پایداری، ضریب اطمینان، دامنه‌های سنگی درزه‌دار، روش تحلیل بلوک‌های کلیدی، تاقدیس عسلویه.

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

هدف از تحلیل پایداری دامنه‌ها، ارائه ضریب اطمینان مناسب برای تأمین پایداری آنها می‌باشد. روش‌های استاتیکی یا تعادل حدی به علت سادگی و سرعت بالا، در تحلیل پایداری دامنه‌های سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های تحلیل عددی پیشرفت‌های بیشتری نسبت به روش‌های تعادل حدی دارند، اما روش‌های حدی را می‌توان پایه و اساس روش‌های عددی در نظر گرفت. امروزه بسیاری از مدل-سازی‌های عددی برای تحلیل دامنه‌ها، با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری ارائه شده به خصوص نرم‌افزار UDEC (Itasca 2008) و Flac/slope (Itasca 2006)، انجام می‌شود. سؤال این است که آیا این نرم‌افزارها پاسخ گوی تمام موارد و پوشش دهنده کلیه‌ی ساختارهای زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه می‌باشند یا خیر (؟). این سوالی است که به سختی می‌توان جواب قاطع به آن داد. زیرا ساختار زمین‌شناسی و زمین‌شناسی مهندسی ساختگاه‌ها بسیار متفاوت و پیچیده می‌باشد، لذا این نرم‌افزارها قابلیت پاسخ‌گویی را ندارند (Fenton 2002, Griffiths & Smith 1991). هنوز روش-های استاتیکی یا تعادل حدی به علت سادگی و سرعت بالا، در تحلیل پایداری دامنه‌های سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Yarahmadi Bafghi Verdel 2003). معروف‌ترین روش استاتیکی استفاده شده در تحلیل توده سنگ‌های درزه‌دار، روش تحلیل بلوک‌های کلیدی یا تئوری بلوکی می‌باشد. در طول ۳۰ سال اخیر، روش تحلیل بلوک‌های کلیدی یا تئوری بلوکی، در تحلیل دامنه‌های سنگی به خصوص دامنه-های سنگی درزه‌دار موفق بوده است. علت سادگی این روش در مقایسه با تحلیل پیوسته یا ناپیوسته توسط برنامه‌های کامپیوتری است (آذرافزا، ۱۳۹۲). روش بلوک‌های کلیدی، براساس تحلیل تعادل حدی بلوک‌هایی بنا شده که در صورت عدم نگهداری، ناپایدار شده و باعث ناپایداری دیگر بلوک‌ها به صورت پیش رونده می‌شود (Yarahmadi-Bafghi & Verdel, 2003). روش برداری واربورتن (Warburton, 1981) و روش ترسیمی توسعه یافته گودمن- شی (Goodman & Shi 1985)، روش‌های اصلی برای تحلیل بلوک‌های کلیدی می‌باشند. بر اساس تئوری بلوکی، دامنه درزه‌دار درصورت عدم نگهداری، به طور پیش رونده باعث ناپایداری دیگر بلوک‌ها می‌شود. به عبارت دیگر، حرکت بلوک کلیدی، باعث ناپایداری سایر بلوک‌ها می‌گردد. به این دسته از بلوک‌ها که سبب ناپایداری بلوک‌های دیگر می‌شوند، بلوک کلیدی گفته می‌شود. بلوک‌های مذکور برونزد داشته و به وسیله سطوح ناپیوستگی از توده جدا می‌شوند، از نظر هندسی امکان جابجایی دارند (متحرک هستند) و کلید حرکت دیگر بلوک‌ها محسوب می‌شوند.

اغلب تحلیل‌ها به روش بلوک‌های کلیدی، بر اساس روش برداری واربورتون (Warburton 1981) و یا روش گرافیکی گودمن ـ شی (Goodman & Shi 1985) بنا شده‌اند. اخیراً، روشی جهت توسعه و تعمیم روش بلوک‌های کلیدی پیشنهاد شده است. این روش یک تکنیک گروه‌بندی بر مبنای تحلیل تمام بلوک‌های همسایه یک بلوک کلیدی است که به جستجوی یک گروه کلیدی ناپایدارتر از بلوک‌های کلیدی مجزا می‌پردازد. این روش بر اساس یک تحلیل پایداری پیشرونده اجرا می‌شود که به روش گروه‌های کلیدی معروف است (Mauldon et al. 1997). تحلیل تعادل حدی هر بلوک کلیدی، می‌تواند ارزیابی مناسبی از وضعیت مکانیکی آن بلوک (بلوک‌های متحرک و یا بلوک‌های پایدار) داشته باشد. ناپایداری بلوک‌های کلیدی می‌تواند باعث ناپایداری کل دامنه شود که این یک فرآیند افزایشیِ پیشرونده است (Eberhardt 2003). با توجه به روش کلید بلوک، فرض بر آن است که بلوک‌ها سفت و سخت بوده و سطوح آن‌ها کاملاً مسطح و صفحه‌ای است (Yarahmadi-Bafghi & Verdel 2004).

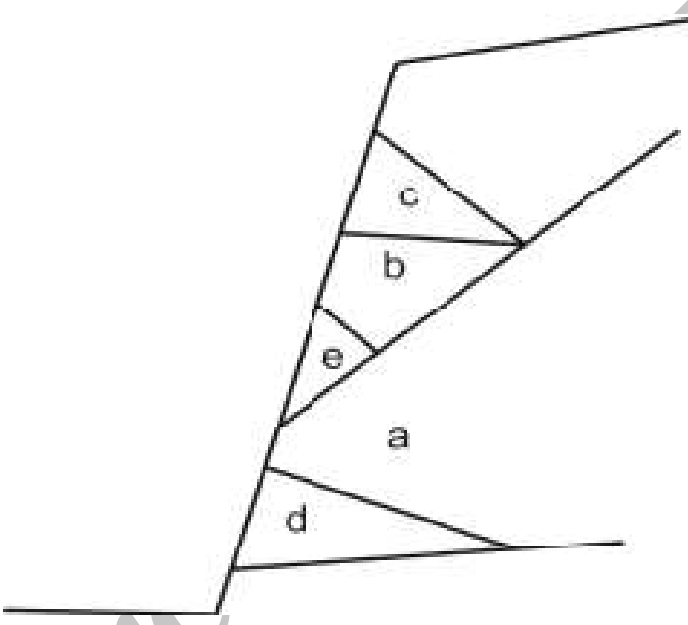
یکی از مسائل مهم و اساسی مطرح در روش‌های تحلیل استاتیکی (تعادل حدی) به ویژه در گروه‌های کلیدی، تعیین سطح بحرانی لغزش است. این مسئله نیازمند تعین تمامی بلوک‌ها و بررسی قابلیت جابجایی هندسی و مکانیکی آن‌ها می‌باشد (آذرافزا، ۱۳۹۲). روش‌های عددی در تحلیل پایداری برای تعیین سطح بحرانی لغزش با توجه به روش‌های مورد استفاده (Finite Element Method (FEM), Boundary Element Method (BEM), Finite Difference Method (FDM), Distinict Element Method (DEM))، دارای مفروضاتی می‌باشند که بدون درنظر گرفتن آن‌ها تحلیل دامنه، بسیار پیچیده گردیده و ممکن است مشکلاتی را به همراه داشته باشند (Fenton 2002). این روش‌ها عبارتند از: روش تفاضل محدود (Warburton 1981) و روش آنالیز تغییرشکل ناپیوسته (Brady & Brown 1993, Yeung 1991) و روش آرامش پیشنهادی بردی و براون (Brady & Brown 1993) که بسیار پیچیده و وقت‌گیر می‌باشند.

۲- تحلیل پایداری به روش تئوری بلوکی

تئوری بلوکی، برای تحلیل دامنه‌های درزه‌دار معرفی و گسترش یافته است. پایه اصلی تحلیل پایداری به روش بلوکی (Goodman & Shi 1985)، شامل واحدی بنام «بلوک کلید» است. ساده‌ترین مثالی که برای درک تئوری بلوکی می‌توان ارائه کرد، دامنه نامحدودی است که به چند بلوک کوچک تقسیم شده است (تصویر ۱). با توجه به تصویر ۱، بلوک (a) یک بلوک نامحدود تیپ V می‌باشد و تا زمانی که ترک

Archive of SID
www.SID.ir

خوردگی داخلی و ناپیوستگی ایجاد نشود، خطرناک نمی‌باشد. بلوک‌های نامحدود به بلوک‌های متحرک و مقاوم (non-removable and removable blocks) تقسیم می‌شوند (Jeongi-gi & Kulatilake 2001). بلوک‌های محدود را می‌توان در سه نوع بنام‌های type I, type II, type III دسته‌بندی کرد. شناسایی این بلوک نقش مهمی در طراحی دامنه‌های سنگی دارد. بلوک (b)، یک نمونه کامل از تیپ IV می‌باشد. این بلوک محدود بوده و به دلیل شکل موجود، امکان حرکت آزادانه را ندارد، بنابراین به آن بلوک قفل شده نیز گفته می‌شود (آذرافزا، ۱۳۹۲). بلوک (c) در تصویر ۱، یک بلوک type III بدون اصطکاک پایداری که تنها تحت نیروی می‌باشد، را نشان می‌دهد. بلوک (d) نشان دهنده یک بلوک type II می‌باشد. این بلوک می‌تواند تا زمانی که نیروی محرکت کمتر از مقاومت برشی آن باشد، پایدار بماند. تحت تأثیر گرانش (وزن توده)، فقط بلوک‌های type II پایدار می‌باشند. اگر بر این تیپ بلوک‌ها، نیرویی بیش از مقاومت برشی وارد گردد، بلوک حرکت خواهد کرد. بلوک‌های type II، به «بلوک‌های بالقوه کلیدی» و بلوک (e) به بلوک کلیدی معروف است. این بلوک به راحتی تحت نیروی گرانش (وزن توده) به سمت پایین شیب حرکت می‌کند. در صورتی که این بلوک توسط سازه‌های نگهدارنده تثبیت نگردد، می‌تواند باعث اپایداری بلوک‌های دیگر گردد. به‌طور کلی، بررسی و شناسایی بلوک‌های کلیدی، بخش بسیار مهمی در تحلیل پایداری دامنه‌های سنگی درزه‌دار می‌باشد (Yarahmadi-Bafghi & Verdel 2003).



تصویر ۱ – نمایی از یک دامنه سنگی درزه‌دار فرضی، (a) بلوک نامحدود، (b) بلوک قفل شده، (c) بلوک پایدار، (d) بلوک بالقوه، (e) بلوک کلیدی (Eberhardt 2003).

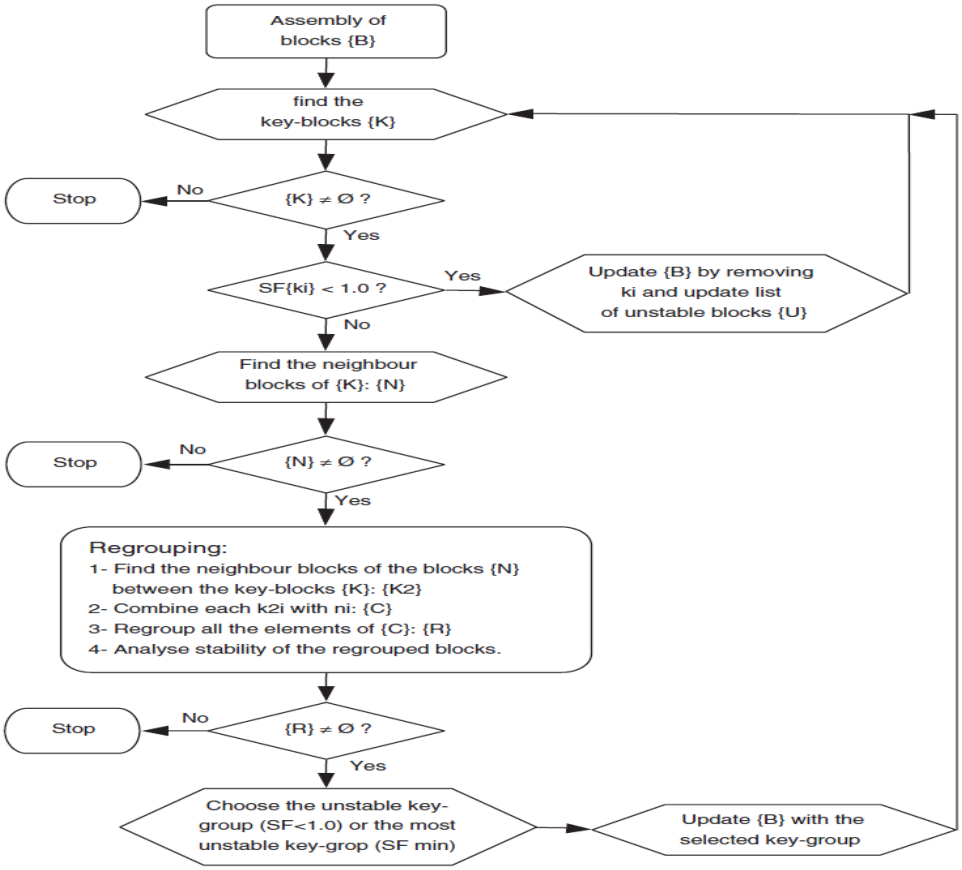
برای تحلیل پایداری بلوک‌ها بر پایه تئوری بلوکی به روش قطعی (غیر احتمالاتی)، وجود مدل هندسی قطعی بلوک‌ها، مدل مکانیکی (شامل میانگین خواص فیزیکی و مکانیکی توده)، روابط رفتاری و معیار شکست حاکم، نیاز است (Shi 1988). قابلیت حرکت و امکان شکست، از مقایسه ضریب اطمینان محاسباتی با ضریب اطمینان استاندارد (F.S) تعیین می شود که در رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$F.S = \frac{R_n}{R_s} \qquad \text{رابطه (۱)}$$

به عبارت دیگر، هرگاه ضریب اطمینان محاسبه شده از مقدار استاندارد کمتر باشد، سیستم ناپایدار در نظر گرفته می شود. در این رابطه، R_n برآیند نیروهای مقاوم و R_s برآیند نیروهای مخرب یا محرک است. در روش بلوک‌های کلیدی (KBM)، ابتدا باید قابلیت هندسی حرکت بلوک‌های فعال مشخص گردد. سپس نیروهای موثر بر این بلوک‌ها تعیین و پس از آن اثرات متقابل این نیروها برروی پتانسیل حرکت تحلیل می‌گردد. اگر برآیند نیروهای محرک و مقاوم برای ایجاد یک حرکت کافی باشد، فرض می‌شود که این حرکت به صورت نامحدود ادامه خواهد یافت (ناپایداری پیشرونده). بدین ترتیب می توان نتیجه گرفت که بلوک بطور کامل ناپایدار است. به طور کلی، دو روش؛ روش برداری واربورتن (Warburton 1981) و روش ترسیمی توسعه یافته گودمن ـ شی (Goodman & Shi 1985)، برای تحلیل

www.SID.ir

پایداری بلوک‌های کلیدی ارائه شده اند. روش گرافیکی گودمن ـ شـی، در تحلیل پایداری بلوک‌های کلیدی، روشی قانونمنـد، مفیـد و معقـول است، اما استفاده از آن بسیار پیچیده و دشوار مـی‌باشـد. روش تحلیـل برداری واربورتن به دلیل سهولت برنامه نویسی کـامپیوتری، بـه عنـوان مبنای محاسبات در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفـت. فلوچـارت محاسبات لازم برای تعیین وضعیت پایـداری و ناپایـداری یـک بلـوک کلیدی در تصویر ۲ نشان داده شده است.



تصویر ۲- فلوچارت محاسبات لازم برای تعیین وضعیت پایداری و ناپایداری یک بلوک کلیدی (Yarahmadi-Bafghi Verdel 2003)

۳- مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی عددی مورد استفاده در تحلیل پایداری دامنه‌ها، در سه گروه اصلی مدل‌سازی پیوسته، ناپیوسته و مدل‌سازی هیبریدی، دسته-بندی می‌شوند. مدل‌سازی پیوسته، بهترین راه برای تحلیل دامنه توده‌ای یکپارچه، دست نخورده، توده‌های سنگ به شدت درزه‌دار (شبه خاک) و خاک می‌باشد. مدل‌سازی ناپیوسته برای دامنه‌هایی که رفتار آنها توسط ناپیوستگی‌های موجود در دامنه‌سنگی کنترل می‌گردد، مناسب می‌باشد. این مدل‌سازی برای تحلیل پایداری دامنه‌های سنگی درزه‌دار، راه‌حل مناسبی است. مدل‌سازی هیبریدی یک روش جدید در تحلیل دامنه‌ها می‌باشد (Frank & Pouget 2008). کدهای ترکیبی شامل ترکیب این دو روش (پیوسته و ناپیوسته) برای افزایش کارایی تحلیل پایداری و تطابق بیشتر و بهتر با محیط ساختگاه سازه‌ها می‌باشند (آذرافزا ۱۳۹۲).

روش‌های ترکیبی در تحلیل پایداری دامنه‌های سنگی توسط کدهای ترکیبی مبتنی بر روش‌های عددی، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند (Liang & Yamin 2009). روش ترکیبی ممکن است شامل ترکیب روش تحلیلی تعادل حدی با روش تحلیل المان مجزا به همراه اعمال جریان آب زیرزمینی (Geo-Slope 2000) و یا شامل ترکیب روش تحلیلی تعادل حدی با روش تحلیل تفاضلات محدود به همراه تحلیل استرس (Noroozi et al. 2011) باشد. امروزه، مدل‌های عددی هیبریدی بسیار قوی‌تری برای تحلیل دامنه‌ها در محیط کمپلکس (ناپیوستگی و پیوسته)، توسط زبان برنامه‌نویسی Mathematica (Wolfram 1999) سطح بالا انجام گرفته است. مدل‌های عددی هیبریدی، در تحلیل توده‌های سنگی سطحی و زیرسطحی، کاربردهای قابل توجهی در زمین‌شناسی و ژئومکانیک دارند (Rockfield 2001). این مهم بر پایه ترکیب روش‌های عددی مانند ترکیب المان مرزی/

www.SID.ir

محدود، یا ترکیب المان مرزی/ تفاضلات محدود می‌باشد. اخیراً، روش ترکیبی بین جریان ذرات و آنالیز تفاضلات محدود با استفاده از نرم-افزار PFC3D، توسعه یافته است (Itasca 2011). مدل‌های عددی هیبریدی، توان و قدرت تحلیل بالایی را در شناسایی و تحلیل پدیده-هایی مانند شکست زهکش‌های درون دامنه، تاثیر فشار آب زیرزمینی در شکست دامنه‌های سنگ ضعیف و همچنین تحلیل دامنه‌های پیچیده یا کمپلکس دارا می‌باشند (Eberhardt et al. 2002). در این پژوهش بر پایه تئوری بلوکی و بر پایه مدل‌های عددی هیبریدی، تحلیل دامنه‌ها در محیط کمپلکس ناپیوستگی و پیوسته توسط زبان برنامه‌نویسی سطح بالای ریاضی (Wolfram 1999) انجام گرفته است. الگوریتم پیشنهادی، انعطاف‌پذیری بالایی در تحلیل پایداری دامنه‌های سنگی درزه‌دار و دامنه‌های شبه خاک و خاکی دارد. از این الگوریتم برای تحلیل پایداری دامنه‌ی پیچیده موجود در محدوده فلر ٦، فازهای ٧،٦ و ٨ مجتمع گاز پارس جنوبی استفاده شده است. نتایج حاصل از این روش پیشنهادی با نتایج روش گروه‌های کلیدی پایه و روش عددی اجزای مجزا بوسیله نرم‌افزار UDEC (Itasca 2008) و برای حالت دامنه شبه خاک از روش عددی تفاضل محدود به وسیله نرم‌افزار Flac/slope (Itasca 2006)، مقایسه شده است. نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی، تطابق خوبی با نتایج حاصل نشان می‌دهد.

این الگوریتم در زبان برنامه‌نویسی سطح بالای Mathematica (Wolfram 1999) کدنویسی شده و توسعه یافته است.

۴- الگوریتم پیشنهادی گروه کلیدی

در تحلیل پایداری توده‌سنگ‌های درزه‌دار، اگر بجای بررسی بلوک-های منفرد کلیدی ترکیبی از بلوک‌ها مورد توجه قرار گیرند، می‌توانند گروه‌های کلیدی را به وجود آورند که بالقوه خطرناک‌تر از یک بلوک کلیدی تنها باشند. فرآیند گروه‌بندی بر اساس الگوریتم پیشنهادی شامل شناسایی بلوک‌های کلیدی، حذف بلوک‌های کلیدی ناپایدار، شناسایی بلوک‌های همسایه بلوک‌های کلیدی باقیمانده، تشکیل گروه‌های ممکن متشکل از بلوک‌های کلیدی و همسایگانشان، تحلیل پایداری گروه‌ها و حذف گروه‌های ناپایدار (F.S<1) یا گروهی با کمترین پایداری ($F.S_{min}$) در بین گروه‌های تشکیل شده، تکرار مجدد تحلیل بر اساس هندسه و توپوگرافی جدید بلوک‌ها، سطح لغزشی (سطحی که لغزش بر روی آن اتفاق می‌افتد)، سطح آزاد (سطحی که به فضای آزاد راه دارد و یا سطح استخراجی) و سطح غیرلغزشی (سطوحی غیر از سطوح لغزشی و آزاد) می‌باشد.

در تصویر ۳ از یک الگوریتم پیشنهادی جهت تشریح سیستم مدل استفاده شده است. این تصویر دامنه سنگی فرضی به همراه یک گروه کلیدی واقع بر سطح شیب آن را نشان می‌دهد. بلوک‌هایی که با شماره‌های ٢٤، ٦٤، ٨١ و ٩٨ مشخص شده‌اند (تصویرa-٣)، بلوک‌های کلیدی می‌باشند. با حرکت این بلوک‌ها، کلید اولیه محیط برای حرکت بلوک‌های همسایه‌شان مناسب می‌گردد (تصویرb-٣). حرکت این گروه کلیدی باعث فعال شدن گروه ١٤٧ و بلوک‌های کلیدی ١ و ١٠١ می-گردد (تصویر c-٣). ادامه حرکت این گروه و بلوک‌های کلیدی، باعث فعال شدن پیشرونده بلوک ١٧٧ می‌گردد (تصویر d-٣).

۵- تحلیل پایداری دامنه سنگی درزه‌دار سایت فلرهای گاز پارس جنوبی

برای طراحی مدل ژئوتکنیکی دامنه S_{TR}-01، از الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر روش گروه کلیدی به منظور تحلیل پایداری دامنه و محاسبه F.S آن استفاده شده است. برای دست یافتن به این مهم، سه مرحله مدل‌سازی هندسی، تعریف مدل رفتاری و تخصیص خواص و مرحله مدل‌سازی مکانیکی و تحلیل پایداری، انجام شده است.

۵-۱- مدل‌سازی هندسی

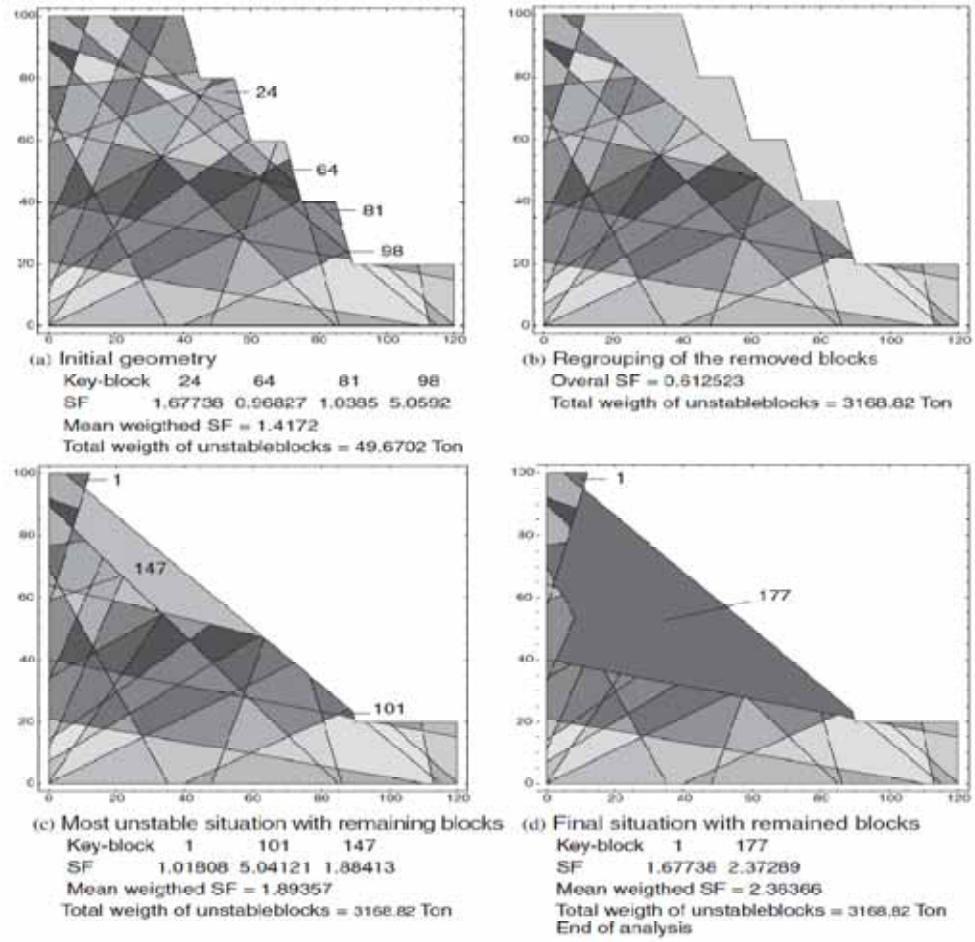
برای شبیه‌سازی هندسی ناپیوستگی‌های توده‌سنگی می‌توان از دو روش سیستم ناپیوستگی‌های نامحدود و ترتیبی و روش سیستم ناپیوستگی‌های دیسک‌های تصادفی استفاده کرد (Sarma 1979).

در روش ناپیوستگی‌های نامحدود و ترتیبی، ناپیوستگی‌ها نامحدود بوده و در صورت عدم وجود تسلسل و ترتیب ایجاد، تا مرزهای مدل ادامه می‌یابند و در صورت وجود تسلسل، دسته درزه‌های غالب مرز مدل را قطع و دسته درزه‌های ثانویه به ناپیوستگی‌های اولیه محدود می‌شوند. البته عدم توجه به گسترش ابعاد درزه‌ها، از جمله معایب این سیستم بوده که باعث تولید تعداد غیرواقعی بلوک در مجموعه بلوکی حاصل از شبیه‌سازی می‌شود (Yarahmadi-Bafghi & Verdel 2005). شبیه سازی به روش دیسک‌های تصادفی با جانمایی درزه‌ها بر اساس تابع توزیع پواسون شروع و سپس با فرض دیسکی بودن شکل صفحات، جهت‌داری (شیب و جهت شیب)، گسترش (قطر) و ... هر دیسک شبیه‌سازی می‌شود. در این شبیه‌سازی، مراکز دیسک‌ها توسط فرایند سه بعدی پواسون، جهت‌داری توسط تابع توزیع فیشر و ابعاد درزه توسط تابع توزیع لاگ نرمال انتخاب می‌گردند. در این سیستم شبیه‌سازی، تمام درزه‌ها مستقل از یکدیگر فرض شده و هر موقعیت مکانی برای درزه محتمل می‌باشد این مسأله از عمده‌ترین عیوب این روش می‌باشد (Yarahmadi-Bafghi & Verdel 2005).

بر اساس مشخصات هندسی شبکه ناپیوستگی توده‌سنگ دامنه سنگی، مشخص شد که در محدوده فلر ٦ و تحلیل‌های انجام شده، روش

Archive of SID
www.SID.ir

نامحدود و ترتیبی به عنوان روش مدل‌سازی این دامنه انتخاب شد. لازم به ذکر است که به دلیل نامعلوم بودن تسلسل و ترتیب درزه‌ها در این مرحله، مدل‌سازی نامحدود غیرترتیبی انجام گرفته است. بر این اساس و به کمک نرم‌افزارهای PKGM و FORM که در محیط Mathematica اجرا می‌شود، عملیات مدل‌سازی هندسی دامنه S_{TR}-01-1 محدوده فلر ٦ در ٢ مقطع صورت گرفته است. بخش S_{TR}-01-1، به دلیل شدت بالای خردشدگی و مقاومت کم سیمان دامنه، به صورت دامنه خاکی مدل و تحلیل می‌گردد. زیرا به علت عدم وجود چسبندگی کافی بین درزه‌ها، مدل نمودن آن در محیط‌های ژئومکانیکی امری نادرست و غیرواقعی و بدون اطمینان خواهد بود. بخش S_{TR}-01-2، بصورت دامنه سنگی درزه‌دار، مدل و تحلیل می‌گردد (ابعاد مدل‌ها بر اساس برداشت‌های سطحی مساوی با ابعاد دامنه انتخاب و بر حسب متر ارائه شده‌اند). توانایی این الگوریتم پیشنهادی در تحلیل دو دامنه با شرایط کاملاً مختلف، مشهود می‌باشد (آذرافزا ١٣٩٢).



تصویر ٣- یک دامنه سنگی فرضی به همراه یک گروه کلیدی (Yarahmadi -Bafghi & Verdel, 2003)

٥-٢- تعریف مدل رفتاری و تخصیص خواص

بعد از طراحی کامل مدل هندسی، اقدام به تعریف مدل رفتاری و اختصاص خواص و پارامترهای ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی به مدل گردید. این اقدامات در ادامه تشریح می‌گردند.

٥-٢-١- قوانین حاکم بر مقاومت و رفتار توده

روابط حاکم بر مقاومت و رفتار، معمولاً روابط تجربی شناخته شده‌ای هستند که مولفه‌های مقاومتی توده‌سنگ با استفاده از خواص ماده سنگ، به وسیله فرمول‌های تجربی تعیین می‌گردند (Hack 1998). به عنوان مثال می‌توان رابطه تجربی هوک و براون (Hoek & Brown 1980, Hoek et al. 2002) برای تعیین مقاومت توده‌سنگ نام برد که در آن مولفه‌های مقاومتی توده‌سنگ با استفاده از امتیاز طبقه‌بندی RMR و مولفه‌های مقاومتی ماده سنگ مشخص می‌شوند (Bieniawski 1989).

٥-٢-٢- رفتار حاکم بر توده‌سنگ منطقه فلرها

در دامنه مورد نظر، ریزش عناصر ساختاری عامل اصلی رفتار حاکم بر توده سنگ‌ها می‌باشد. به عبارتی درزه‌ها نقش اساسی در ناپایداری

www.SID.ir

دارند، لذا رفتار حاکم بر توده‌سنگ، رفتار ناپیوستگی ها می‌باشد. بر این اساس، معیارهای انتخاب شده برای تحلیل پایداری، معیارهای رفتاری درزه‌ها می‌باشد. به دلیل کم بودن تنش‌های برجا و در دست نبودن اطلاعات دقیق از مقادیر پارامترهای مکانیکی ماده‌سنگ در هر بلوک، در این مرحله رفتار ماده سنگ بصورت صلب و تغییرشکل-ناپذیر در نظر گرفته شده است. معیارهای رفتاری استفاده شده برای بدست آوردن خواص مقاومتی و تحلیل رفتار درزه‌ها شامل معیار موهر- کولمب می‌باشد. از معیار بارتن- باندیس، برای جبران بخشی از کمبودهای (هنگام ساخت فلرها لازم بوده صورت گیرد)، استفاده شد. بر اساس معیار شکست موهر- کولمب، ضریب اطمینان یک لغزش صفحه‌ای ساده (بلوک خشک بدون توجه به نیروهای لرزه‌ای و مقاومت کششی) به صورت رابطه (۲) می‌باشد.

$$F.S = \frac{CA + R_n \tan\varphi}{R_t}$$

رابطه (۲)

در این رابطه، C چسبندگی درزه‌ها، A مساحت سطح لغزش، φ زاویه اصطکاک داخلی درزه، R_n و R_t مولفه‌های نرمال و مماسی نیروهای برآیند اعمال شده بر سطح لغزش (R) می‌باشند. معادله ضریب اطمینان حرکت چرخشی بلوک نیز به صورت رابطه (۳) می‌باشد (Lin & Fairhurst 1988).

$$F.S = \frac{M_n}{M_t} = \frac{R_n \times d_n}{R_t \times d_t} = \frac{d_n \times R\cos\alpha}{d_t \times R\cos\alpha} = \frac{\frac{d_n}{d_t}}{\tan\alpha}$$

رابطه (۳)

در این رابطه، M_n گشتاور نرمال (مقاوم)، M_t گشتاور مماسی (محرک)، a زاویه سطح پایه بلوک نسبت به افق (سطح یا مجموعه سطوحی که وزن بلوک روی آن قرار می‌گیرد)، d_n و d_t به ترتیب فاصله عمودی بین تکیه‌گاه بلوک و مولفه‌های عمودی R_n و مماسی R_t بردار برآیند (R) می‌باشند (Lin & Fairhurst 1988).

۵-۳- مدل‌سازی مکانیکی و تحلیل پایداری

روش تحلیل استفاده شده در مدل مکانیکی پیشنهادی، روش گروه-های کلیدی (Yarahmadi-Bafghi & Verdel 2003) است که مبنای آن تحلیل تعادل حدی می‌باشد. پس از تعیین مشخصات هندسی درزه‌ها به صورت آماری، مدل‌سازی هندسی 2D به روش آماری در محیط برنامه‌نویسی Mathematica انجام شد (Wolfram 1999). مدل مکانیکی مقاطع نیز بر روی مدل هندسی قرار گرفت و تحلیل به صورت استاتیکی (تعادل حدی) بر مبنای تئوری بلوکی انجام شد. مدل احتمالاتی دامنه‌ها نیز جهت بررسی و تقلیل ابهامات موجود، در مدل مکانیکی ساخته شد. متغیرهای مورد توجه در این مدل شامل گشتاورهای آماری مرتبه اول و دوم (میانگین و انحراف معیار) پارامترهای مقاومتی سطح درزه‌ها (C و φ) و وزن مخصوص ماده سنگ (γ_b) و مقادیر کواریانس دو به دو این مولفه‌ها می‌باشند. این اطلاعات بر اساس داده‌های آماری این پارامترها تعیین و در تحلیل مورد استفاده قرار گرفت. از مدل‌سازی FORM و PKGM نیز جهت تحلیل قابلیت اعتماد استفاده شد.

جدول ۱- معیار مقایسه در تحلیل ضریب اطمینان دامنه‌های سنگی

ردیف‌بندی شیب	ردیف‌بندی اهمیت سازه	نوع شیب	معیار ۱	معیار ۲	معیار ۳
			حداقل مجاز F.S0	حداکثر مجاز احتمال ریزش (F.S <1) (%)	حداکثر مجاز احتمال ریزش (F.S <1.5) (%)
۱	غیر مهم	موقت	۱/۳	۱۰	۲۰
۲	مهم	نیمه پایدار	۱/۶	۱	۱۰
۳	خیلی مهم	دائم	۲	۰/۳	۵

جدول ۲- راهنمای رفتار دامنه در تحلیل ضریب اطمینان

ردیف	معیارها	پایداری	تفسیر
۱	هر سه معیار رضایت بخش می‌باشد	Stable	پایدار
۲	اولین و یکی از دو معیار نامطلوب باشند	Need attention	نیازمند رسیدگی فوری
۳	هیچ کدام از معیارها رضایت بخش نباشند	Unstable	ناپایدار

Archive of SID

www.SID.ir

همان طور که بیان گردید، برای تحلیل پایداری دامنه‌ی S_{TR}-01، از الگوریتم پیشنهادی کدنویسی شده در نرم‌افزار Mathematica (Wolfram 1999)، استفاده شده است. دامنه S_{TR}-01 به دلیل شرایط ساختمانی و زمین‌شناختی، یک دامنه مرکب می‌باشد. در نتیجه، این دامنه به دو بخش با ساختارهای متفاوت تقسیم شده که بر اساس رفتار حاکم بر آن بخش تحلیل می‌گردد.

در تصویر ٤ نمایی از دامنه S_{TR}- 01 نشان داده شده است.

تصویر ٤- نمایی از دامنه S_{TR}-01

جدول ۳- مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ و ناپیوستگی ها استفاده شده در تحلیل

پارامتر	C	φ	ρ	E	G	K	T	υ	Kn	Ks
واحد	MPa	degree	kg/m^3	GPa	MPa	MPa	MPa	-	GPa	GPa
مقدار	1.10	28.9	1670	69.63	28.08	44.63	-0.097	0.24	3.9	25

جدول ٤- طبقه‌بندی مهندسی توده

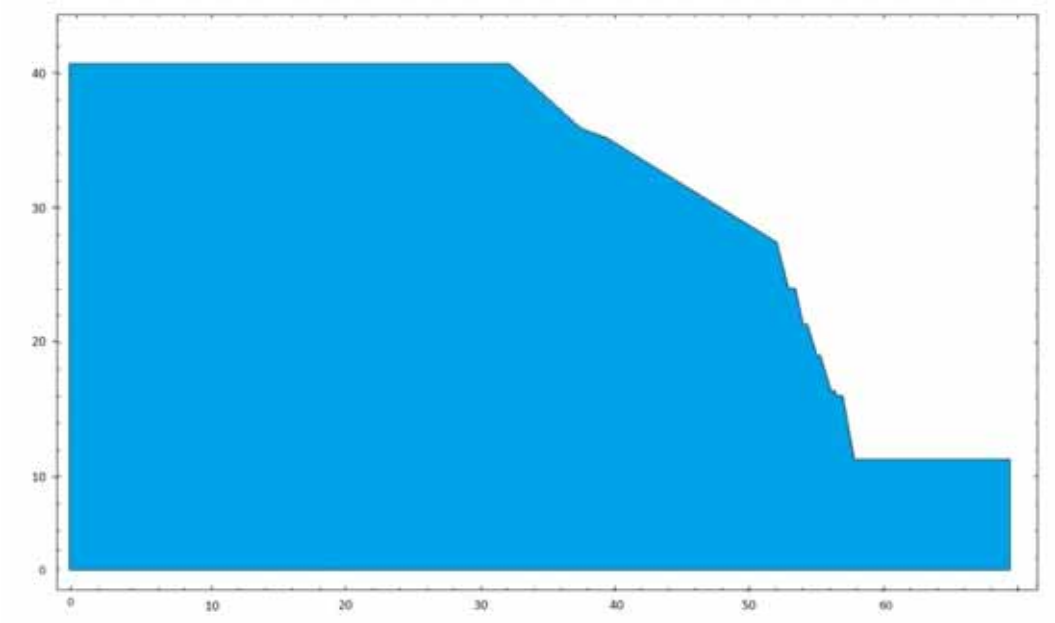
طبقه بندی	USCS (Budhu 2010)	RMR (Bieniawski 1989)	SMR (Romana et al. 2003)
توصیف	CL to CH	43 (IV)	55.6 (IIIa)

۵-۳-۱- مقطع S_{TR} - 01-1

دامنه مورد نظر، از نوع دامنه شبه خاکی می‌باشد که به دلیل میزان درزه‌های زیاد، به شدت گسیخته شده است. بر پایه نتایج حاصل از تحلیل پایداری صورت گرفته روی مدل ژئوتکنیکی تهیه شده به روش FORM، این دامنه در حالت «نیازمند رسیدگی فوری» قرار دارد. روش آنالیز پایداری دامنه در محیط پیوسته (مانند محیط خاکی اما خاک نیست) می‌باشد، این بخش بسیار درزه‌دار و به شدت خرد شده است. اثر درزه‌های متقاطع نیز باعث ایجاد بلوک‌های سنگی بسیار کوچک شده است. بر اثر بارش، آبرفت‌های بالا دستی شسته شده و در محدوده گوه شکستگی (تصویر ٤) مربوط به این بخش تجمع پیدا کرده‌اند. وجود مواد پرکننده نرم و همچنین چسبندگی پایین، پتانسیل بالای لغزش را برای این بخش فراهم می‌کند. بر اساس مطالعات زمین-شناسی و زمین‌شناسی مهندسی، سطح احتمالی لغزش در محیط، به صورت لغزش ذرات بصورت حرکت دانه‌ای مشخص گردید. لذا برای

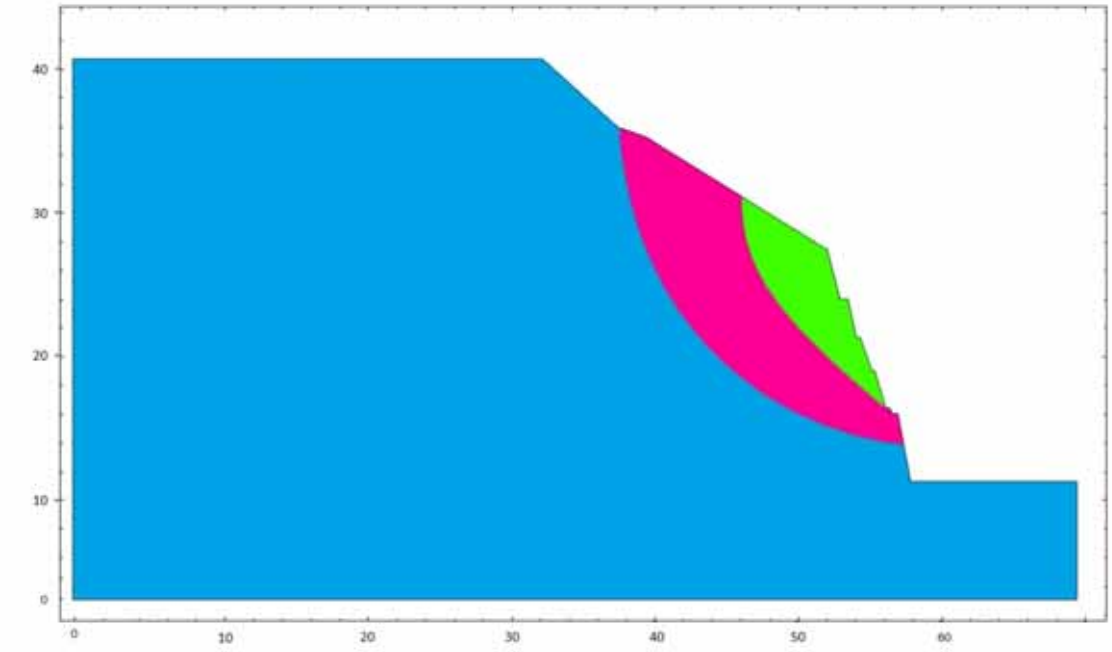
Archive
www.SID.ir

تحلیل این دامنه از دستور FORM که برای تحلیل محیط‌های خاکی ارائه شده، استفاده می‌گردد. مدل هندسی بخش S_{TR} - 01-1، در تصویر ۵ نشان داده شده است.



تصویر ۵- مدل‌سازی هندسی بخش S_{TR} – 01-1

بر پایه بررسی‌های صحرایی و مدل‌سازی هندسی صورت گرفته برای بخش S_{TR}-01-1، ریزش محتمل این دیواره چرخشی برآورد گردیده است. سطح لغزش اکثراً به صورت نامنظم تشکیل شده و در امتداد آن حرکت رخ می‌دهد. اگر توده سنگی همگن باشد، این سطح لغزش دایره‌ای خواهد بود. در سایت مطالعاتی، به علت تماس بین دو توده سنگی با ماهیت متفاوت، حرکت توده مربوط به مقطع S_{TR}-01-1 در راستای فصل مشترک این تماس خواهد بود. نتیجه تحلیل ضریب اطمینان به روش FORM با استفاده از مدل تهیه شده به روش گروه-های کلیدی، در تصویر ٦ نشان داده شده است. همچنین نتیجه تحلیل قابلیت اعتماد به روش تئوری گروه کلیدی برای گروهی با کم‌ترین ضریب ایمنی در جدول ۵ ارائه شده است.



تصویر ٦- نتایج تحلیل پایداری مقطع S_{TR} - 01-1 به روش تئوری گروه کلیدی

www.SID.ir

جدول ۵- نتیجه تحلیل ضریب اطمینان به روش تئوری گروه کلیدی مقطع S_{TR} - 01-1

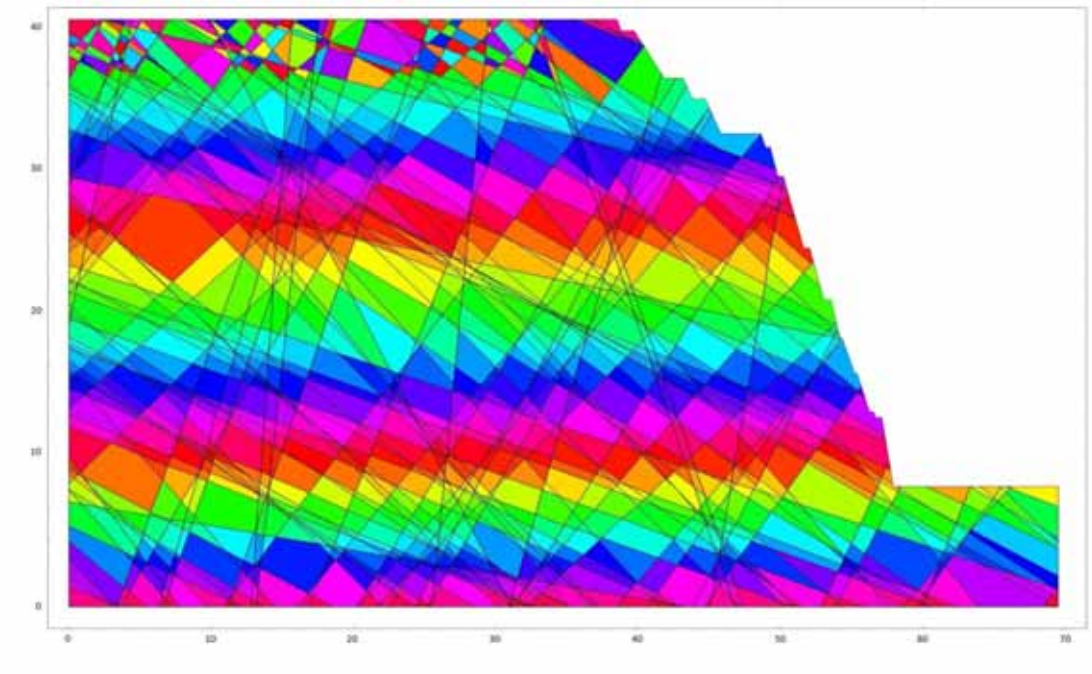
روش تحلیل	Factor of Safety (F.S)	P(F.S<1.0)	P (F.S<1.5)	Safety Index (F.S<1.0)	Stability	نوع لغزش
FORM	1.287	0.999977	1	-6.565	Need attention	موضعی
FORM	1.458	0.0989157	0.997768	1.287	Need attention	کلی

ریزش ایجاد شده در این مقطع لغزش، قاشقی می‌باشد. عملکرد سیستم دسته درزه‌ها، باعث کوچک شدن بلوک‌ها شده است. عملکرد سه دسته درزه‌ی متقاطع و درزه‌های غیرسیستماتیک بر اثر پدیده انتشار ترک، باعث تولید بلوک‌های زیاد و بسیار ریز شده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته، به علت بارش‌های رخ داده، توده سنگی کاملاً هوازده شده و بصورت برشی با سیمان با مقاومت پایین درآمده است. بنابراین باید محیط خاکی را برای آن فرض کرد.

بر اساس آنالیزهای صورت گرفته برای کنترل پایداری دامنه، می‌توان گفت که دامنه نیازمند رسیدگی فوری است. تطابق بسیار خوبی بین مدل شبیه‌سازی شده و واقعیت دامنه مشاهده می‌گردد. در این بخش، احتمال وقوع روانه گلی به دلیل مقاومت پایین، بسیار بالا می‌باشد.

۵-۳-۲- مقطع S_{TR} -01-2

دامنه مورد نظر از نوع شیب سنگی درزه‌دار می‌باشد و در توده‌های سنگی مارنی درزه‌دار سازند آغاجاری قرار دارد. بر پایه نتایج حاصل از تحلیل پایداری صورت گرفته بر روی مدل ژئوتکنیکی تهیه شده به روش PKGM & FORM، این دامنه در حالت «نیازمند رسیدگی فوری» قرار دارد. مدل هندسی بخش S_{TR}-01-2، در تصویر ۷ نشان داده شده است.



تصویر ۷- مدل‌سازی هندسی دامنه S_{TR} -01-2

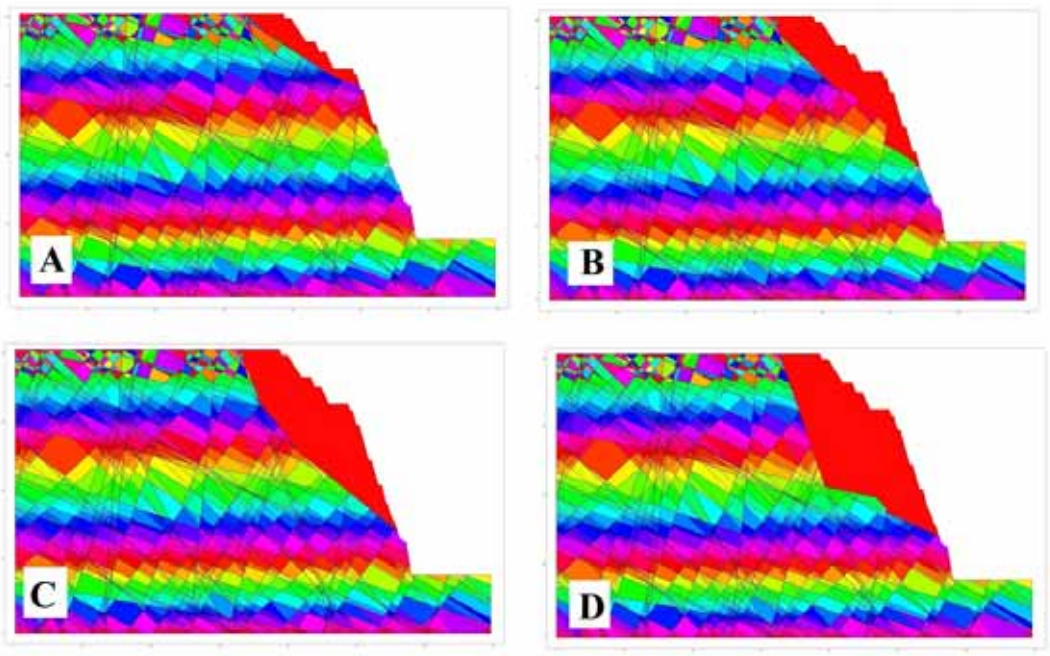
بر پایه بررسی‌های صحرایی و مدل‌سازی هندسی صورت گرفته برای دامنه S_{TR}-01-2، ریزش محتمل این دیواره گوه‌ای برآورد گردید، اما با توجه به مدل‌سازی دو بعدی، ریزش روی صفحه‌ای به موازات فصل مشترک تحلیل می‌گردد. درصورتی که حداقل دو دسته درزه وجود داشته باشد و تقاطع آن‌ها طوری باشد که زاویه خط برخورد صفحات ناپیوستگی باهم نسبت به افق (ψ_i) از زاویه اصطکاک داخلی (φ) بزرگ‌تر باشد، لغزش گوه‌ای خواهد بود (خانلری و همکاران ۱۳۸٦). پارامترهای مقاومتی سطح درزه‌ها با استفاده از اطلاعات حاصل از برداشت درزه‌ها و آزمایشات انجام شده تعیین گردید (جدول ٦).

www.SID.ir

جدول ٦- مولفه‌های استفاده شده در تحلیل استاتیکی و روش محاسبه آن‌ها

پارامترها	روش محاسبه	واحد	مقدار میانگن	انحراف معیار	توزیع
RMR	طبقه بندی مهندسی سنگ (Bieniawiski 1989)		٤٣	–	–
مدول الاستیسیته معادل	$E_s = 10^{(\frac{RMR-10}{40})}$ (Bieniawiski 1973)	MPa	٥/٦٢٣٤١	–	–
وزن حجمی ماده سنگ	آزمایش	Kg/m^3	١٦٧	–	نرمال
چسبندگی سطح درزها	تعیین خواص مقاومتی معیار بارتن ـ باندیس	MPa	٠/٠٠٥	٠/٠٠١	نرمال
زاویه اصطکاک درزه ها	تعیین خواص مقاومتی معیار بارتن ـ باندیس	درجه	٣٥/٥	٣/٣٨	نرمال
کواریانس φj و Cj	Cov[φj, C0]		٠/٢٧٦	–	

نتیجه تحلیل ضریب اطمینان به روش PKGM & FORM، با استفاده از مدل تهیه شده با روش گروه‌های کلیدی، در تصویر ٨ نشان داده شده است. بر این اساس، بدنبال ناپایداری بلوک‌های کلیدی اولیه و لغزش آنها (تصویر A–٨)، بلوک‌های همسایه نیز حرکت می‌نمایند (تصویرB–٨). حرکت این گروه کلیدی باعث فعال شدن گروه‌ها و بلوک‌های کلیدی دیگر می‌گردد (تصویرC–٨). ادامه حرکت این گروه و بلوک‌های کلیدی، باعث فعال شدن پیشرونده بلوک می‌گردد (تصویرD–٨). همچنین، نتیجه تحلیل قابلیت اعتماد به روش تئوری گروه کلیدی برای گروهی با کم‌ترین ضریب ایمنی، در جدول ٧ ارائه شده است.



تصویر ٨- نتایج تحلیل پایداری مقطع S_{TR}-01-2 بروش تئوری گروه کلیدی

جدول ٧- نتیجه تحلیل ضریب اطمینان به روش تئوری گروه کلیدی مقطع S_{TR}-01-2

روش تحلیل	Factor of Safety (F.S)	P(F.S<1.0)	P(F.S<1.5)	Weight of unstable group (Ton)	پایداری
PKGM & FORM	1.2082	0.9957	0.000854168	6.8221	Need attention

www.SID.ir

ریزش ایجادی در این مقطع گوه‌ای، در جهت خط فصل مشترک می‌باشد ولی در این تحلیل که 2D است، معمولاً ریزش‌ها بر روی صفحه‌ای با شیب و جهت شیب فصل مشترک فرض می‌گردد. به عبارت دیگر، ریزش ایجادی در این دامنه بصورت گوه‌ای است. عملکرد سیستم دسته درزه‌ها، باعث کوچک شدن بلوک‌ها شده است. عملکرد سه دسته درزه‌ی متقاطع و درزه‌های غیرسیستماتیک بر اثر پدیده انتشار ترک، باعث تولید بلوک‌های زیاد و بسیار ریز شده است. بر اساس مطالعات صورت گرفته، به علت بارش‌های رخ داده، توده سنگی کاملاً هوازده شده و بصورت برشی با سیمان با مقاومت پایین درآمده است. بر اساس آنالیزهای صورت گرفته برای کنترل پایداری دامنه می‌توان گفت که دامنه نیازمند رسیدگی فوری است. البته شرایط زمین‌شناسی منطقه نباید نادیده گرفته شود. زیرا بر اثر بارش در فصول بارانی، احتمال حرکت در دامنه بصورت گوه‌ای در جهت خط فصل مشترک و ایجاد زهکش در بدنه دامنه وجود دارد.

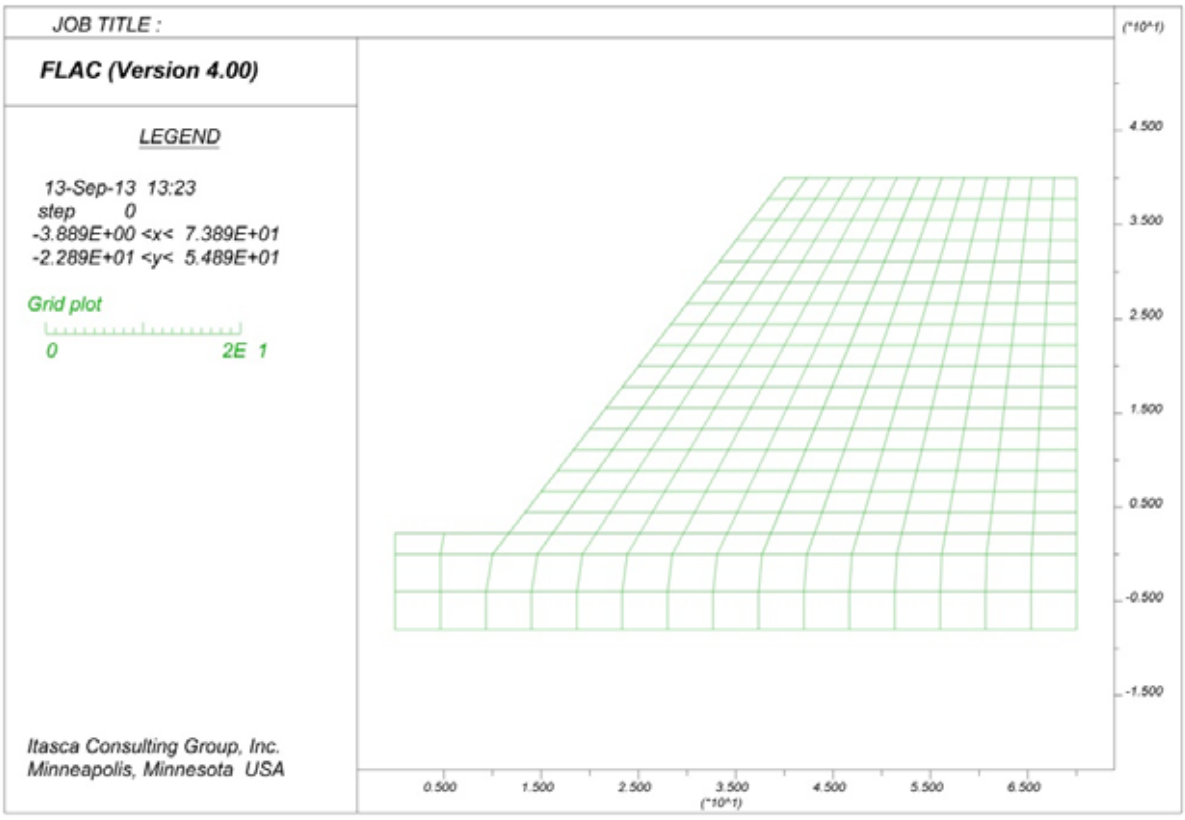
۶- کنترل دقت روش پیشنهادی

برای کنترل دقت روش پیشنهادی، نتایج حاصل از تحلیل با روش عددی المان مجزا در محیط نرم‌افزاری UDEC(Itasca 2008) و روش عددی تفاضلات محدود در محیط نرم‌افزاری Flac/Slope (Itasca 2006) که در حال حاضر به عنوان یک روش کاربردی در تحلیل دو بعدی دامنه‌های سنگی درزه‌دار مرسوم است، مقایسه شدند.

۶-۱- مقطع S_{TR} - 01-1

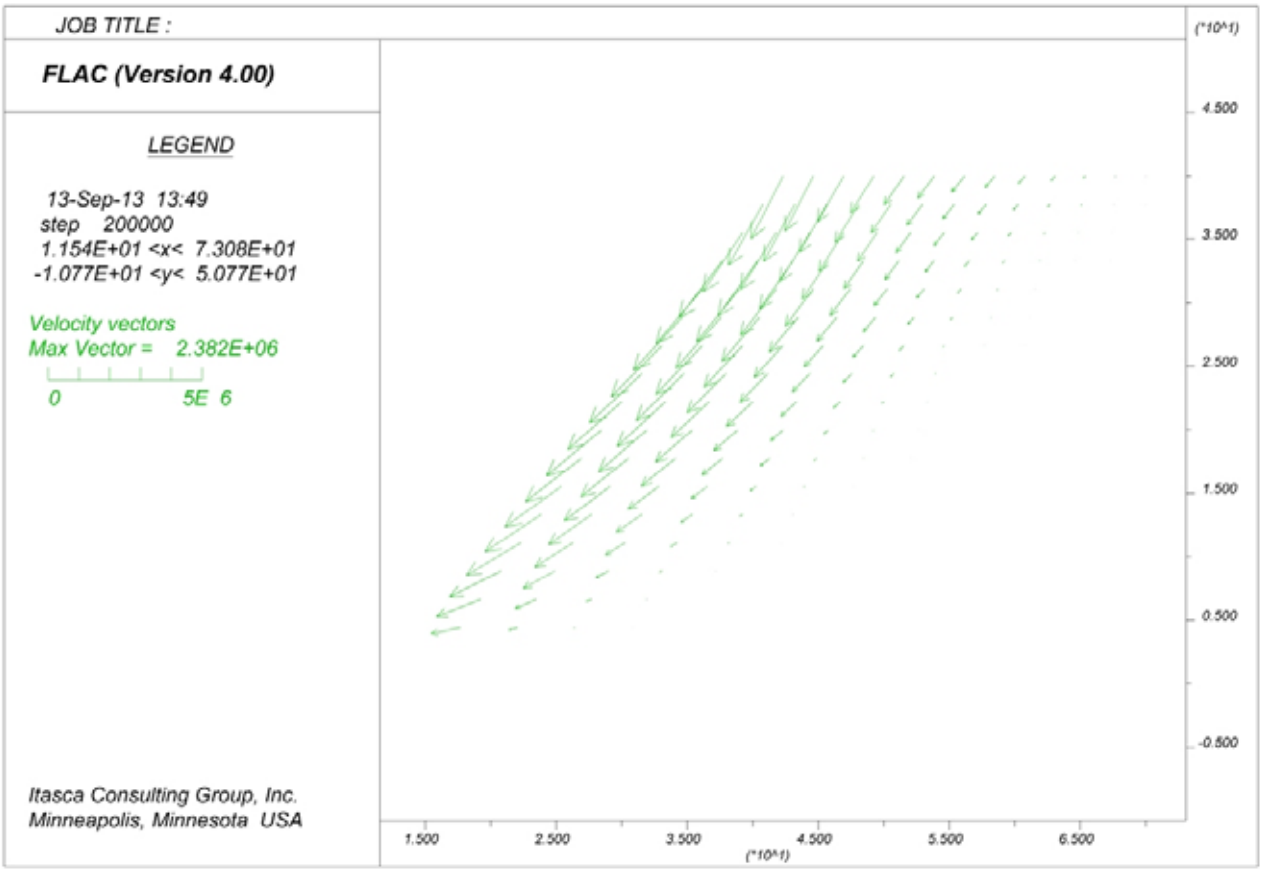
با توجه به پارامترهای زمین‌شناسی مهندسی حاصل از نتایج جدول ۳ و ٤، اقدام به تحلیل این دامنه در محیط نرم‌افزاری Flac/Slope (Itasca 2006) گردید. ابتدا مدل هندسی دامنه بر اساس شکل، سیستم درزه و ناپیوستگی‌ها طراحی گردید. سپس مدل رفتاری و خواص ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مهندسی دامنه اختصاص داده به مدل شد. در نهایت، قابلیت اعتماد دو بعدی دامنه تحلیل گردید. مدل هندسی بخش S_{TR}- 01-1 در تصویر ۹ نشان داده شده است. ایجاد توپوگرافی اصلی توده مانند مدل Mathematica در نرم‌افزار Flac/Slope، با مشکلات بسیار و خطاها زیادی همراه بوده که برای بهبود تحلیل‌ها باید مدنظر قرار گیرد.

در این پژوهش، بخش محتمل بحرانی را سقف پایه دامنه در نظر گرفته و تحلیل نمودیم. در تصویر ۱۰، مدل بردار سرعت و مدل استرس اصلی بخش S_{TR}-01-1 نشان داده شده است. در تصویر ۱۱ نیز مدل مکانیکی بخش S_{TR}-01-1 به همراه نتیجه تحلیل قابلیت اعتماد دو بعدی آن نشان داده است.

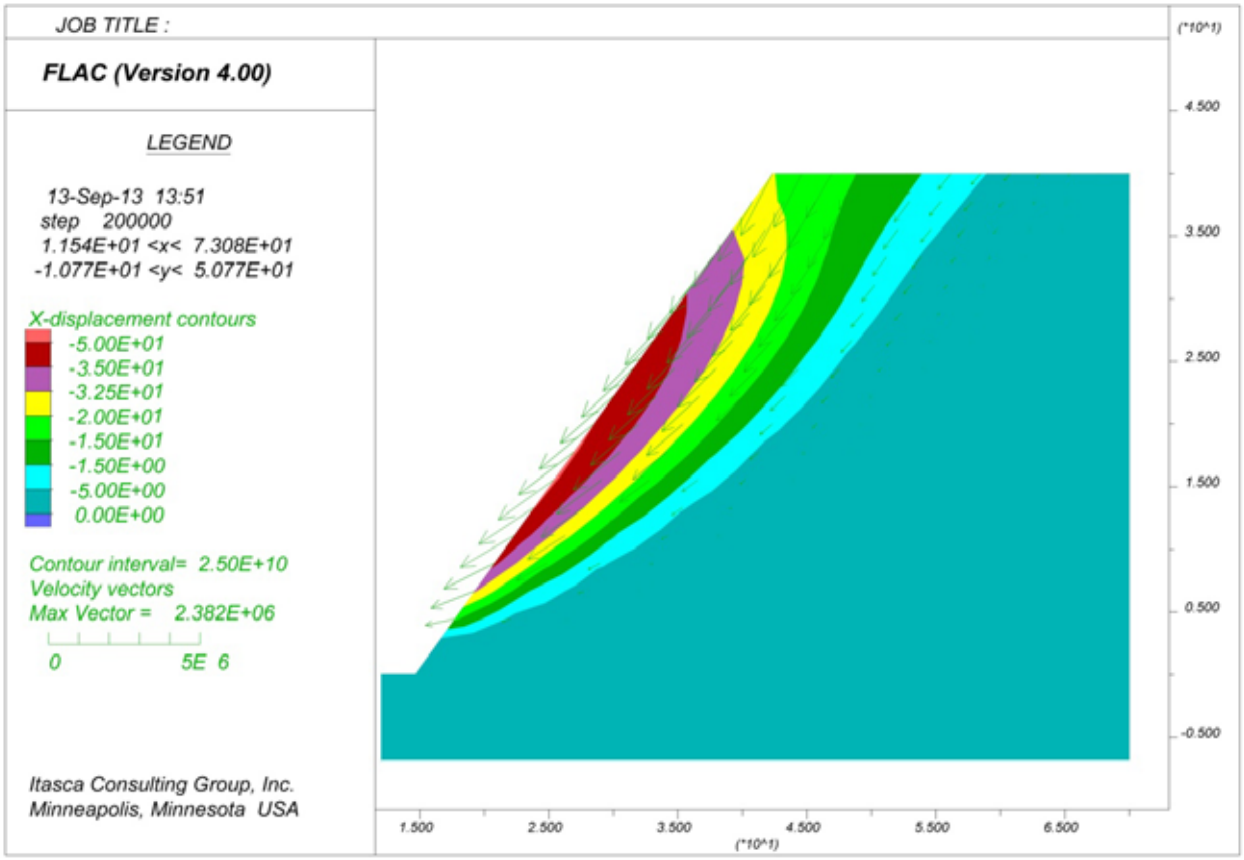


تصویر ۹- مدل هندسی بخش S_{TR} -01-1 طراحی شده در محیط نرم افزار Flac/Slope

www.SID.ir



تصویر ۱۰- مدل بردار سرعت بخش S_{TR}-01-1 در محیط نرم افزار Flac/Slope



تصویر ۱۱- مدل مکانیکی بخش S_{TR}-01-1 در محیط نرم‌افزار Flac/Slope

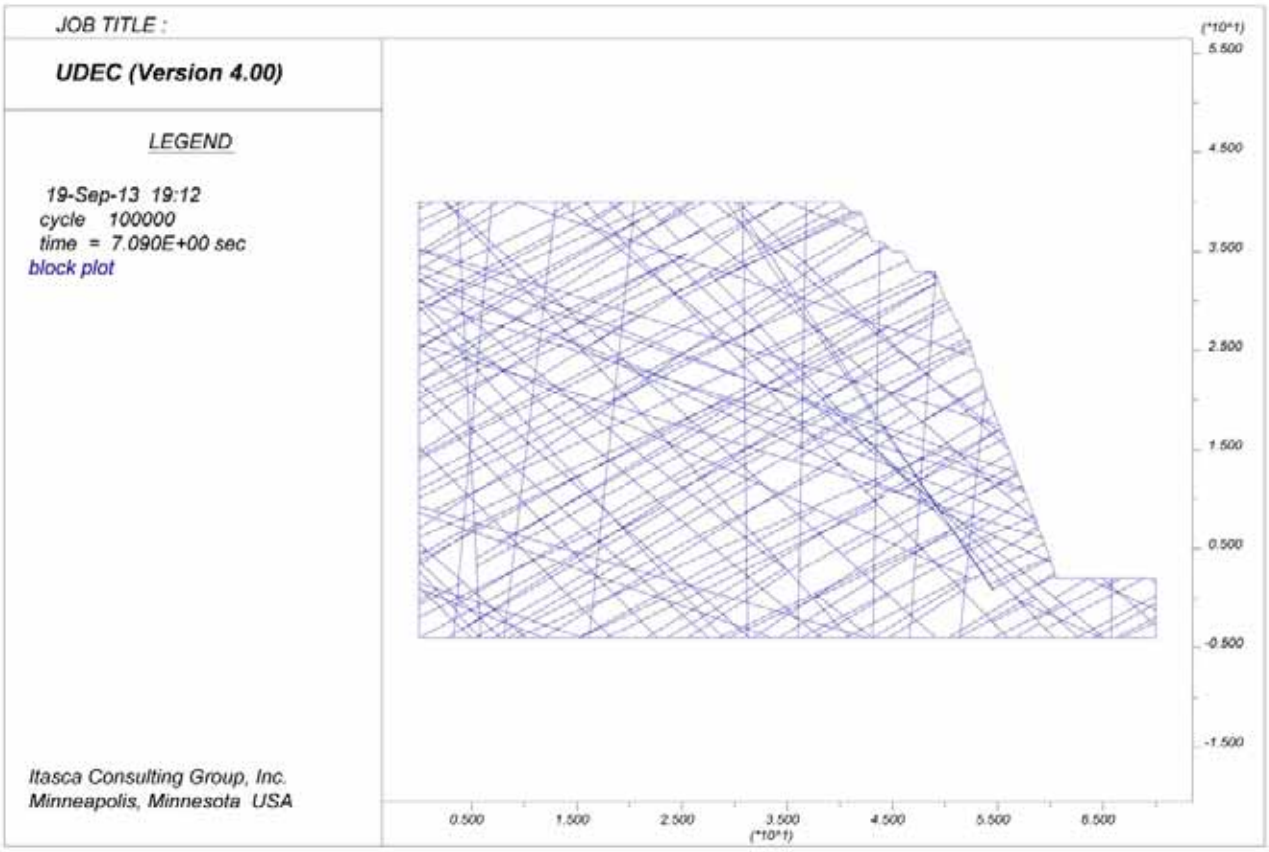
www.SID.ir

۶-۲- مقطع S_{TR} - 01-2

بر اساس پارامترهای زمین‌شناسی مهندسی (جداول ۳ و ٤)، اقدام به تحلیل این دامنه در محیط نرم‌افزاری UDEC (Itasca 2008) گردیده است. ابتدا مدل هندسی دامنه بر اساس شکل، سیستم درزه و ناپیوستگی‌ها طراحی گردیده و سپس مدل رفتاری و خواص ژئومکانیکی و زمین‌شناسی مهندسی دامنه اختصاص داده به مدل شد. در نهایت تحلیل قابلیت اعتماد دو بعدی دامنه صورت پذیرفت.

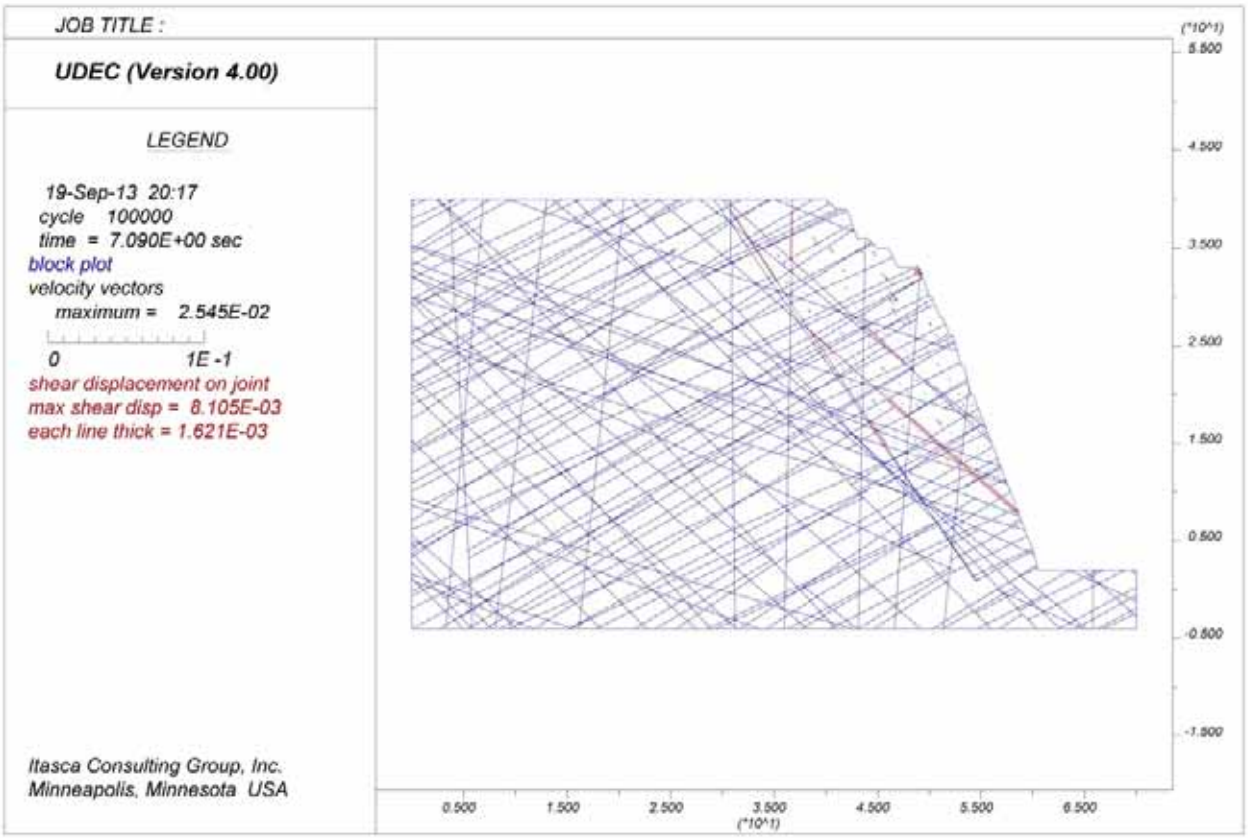
یکی از مزایای نرم‌افزار UDEC امکان رسم سطح توپوگرافی ظاهری دامنه می‌باشد. اما تولید سطح توپوگرافی با دقت بالا، نیازمند ساخت درزه‌های منفرد زیادی (برای ایجاد مرز حفاری) است که این عمل بر پیچیدگی و وقت‌گیری آن می‌افزاید. در ضمن نرم‌افزار UDEC، بسیار حساس بوده و نیازمند دقت بالا در روند ورودی، دستور نویسی و بررسی تعادل دارد. بنابراین، عملیات با خطای بالا، کمترین انحراف را دارا می‌باشند. مدل هندسی بخش S_{TR}-01-2 در تصویر ۱۲ نشان داده شده است. تحلیل‌های آماری بر روی نتایج درزه‌نگاری، برداشت صحرایی و پیمایش ژئومکانیکی نشان می‌دهند که توزیع درزه‌ها برپایه تابع توزیع نرمال و فیشر می‌باشند. اما به دلیل نبود این توانایی در نرم-افزار UDEC به صورت پیش فرض، تابع توزیع یکنواخت پایه تحلیل‌ها قرار گرفت. این توانایی در الگوریتم پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفت. در تصویر ۱۳، مدل بردار سرعت و سطح برشی مقطع S_{TR}- 01-2 و در تصویر ١٤، مدل مکانیکی بخش S_{TR}-01-2 بعد از تخصیص خواص و مدل رفتاری به همراه نتیجه تحلیل قابلیت اعتماد دو بعدی دامنه، نشان داده شده است.

بر این اساس، تطابق خوبی بین نتایج حاصل از تحلیل های عددی با مدل پیشنهادی وجود دارد. علاوه بر این، برتری الگوریتم پیشنهادی برای تحلیل زون بحرانی لغزش و ریزش پیشرونده فراتر از توان تحلیل توسط روش‌های عددی ذکر شده است. همچنین الگوریتم پیشنهادی، توانایی تحلیل دو نوع لغزش دامنه را با مکانیسم کاملاً متفاوت دارا می‌باشد. با توسعه چنین الگوریتم‌هایی، توانایی تحلیل دامنه‌های سنگی و تطابق آنها با واقعیت بیشتر می‌گردد. سرعت فرآیند تحلیل پایداری توسط الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر روش گروه کلیدی، بسیار بیشتر از روش‌های عددی می‌باشد.

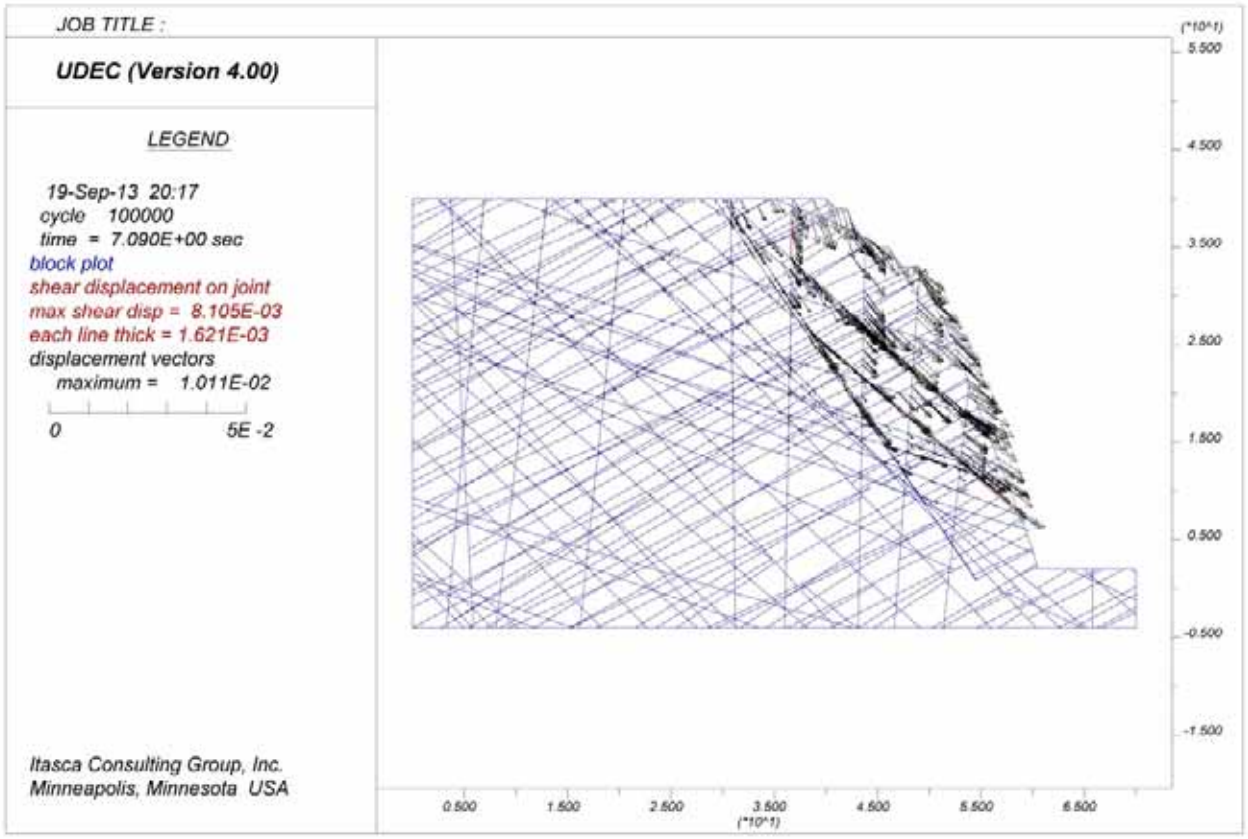


تصویر ۱۲- مدل هندسی بخش S_{TR} -01-2 طراحی شده در محیط نرم افزار UDEC

www.SID.ir



تصویر ۱۳- مدل بردار سرعت و سطح برشی مقطع S_{TR} -01-2 طراحی شده در محیط نرم افزار UDEC



تصویر ١٤- نتایج تحلیل پایداری مقطع S_{TR} -01-2 در محیط نرم افزار UDEC

www.SID.ir

۷- نتیجه گیری

با توجه به مطالب مطرح شده می‌توان نتایج و پیشنهادات زیر را ارائه نمود:

روش گروه کلیدی و الگوریتم پیشنهادی، با توجه به دقت نسبتاً بالا در تحلیل و همخوانی خوب نتایج حاصله با نتایج روش تحلیل عددی، می‌تواند به عنوان جایگزین یا مکمل دیگر روش‌ها، در مواردی که شرایط استفاده از تحلیل‌های استاتیکی موجود باشد، مورد استفاده قرار گیرد. مقایسه بین الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر روش گروه کلیدی و روش تفاضلات محدود انجام شده به وسیله Flac/Slope، تشابه زیاد بین هندسه سطح احتمالی لغزش را نشان می‌دهد. اما مزیت اصلی استفاده از الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش تفاضلات محدود را می‌توان سرعت فرآیند تحلیل و ایجاد زون لغزشی پیشرونده بحرانی آن دانست. مقایسه بین الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر روش گروه کلیدی و روش المان‌های مجزای انجام شده به وسیله UDEC، تشابه زیاد بین هندسه ریزش را نشان می‌دهد. مزیت اصلی استفاده از الگوریتم پیشنهادی نسبت به روش المان‌های مجزا، در سرعت فرآیند تحلیل و تحلیل ریزشی پیشرونده آن است. در روش گروه کلیدی، تمامی گروه‌های قابل حرکت مورد بررسی قرار می‌گیرند، بنابراین امکان از دست دادن گروه کلیدی ریزشی وجود ندارد.

تشکر و قدردانی

از مدیریت محترم پالایشگاه چهارم و فازهای ٦، ٧ و ٨ شرکت مجتمع گاز پارس جنوبی، به خاطر حمایت و همکاری در انجام مطالعات، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

آذرافزا م.، ۱۳۹۲، "بررسی مخاطرات ژئوتکنیکی ساختگاه فلرهای گاز فازهای ٧،٦ و ٨ مجتمع گاز پارس جنوبی"، *پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، ۳۸۲ ص.*

خانلری، غ.، مومنی، ع ا. و عبدی‌لر، ی.، ۱۳۸٦، "زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک"، *انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ٤٥٠ ص.*

Bieniawski, Z.T., 1973, "Engineering classification of jointed rock masses", Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs, Vol. 15: 335-344.

Bieniawski, Z.T., 1989, "Engnieering rock mass classifications", *Wiley, New York, 251 pp.*

Brady, B. H. G. & Brown, E. T., 1993, "Rock Mechanics for Underground Mining", Chapman & Hall: London, *614 pp.*

Budhu, M., 2010, "Soil mechanics and foundations", *3rd edition, Wiley, 780 pp.*

Eberhardt E., 2003, "Rock Slope Stability Analysis-Utilization of Advanced Numerical Techniques", *Geological Engineering/Earth and Ocean Sciences, UBC, 6339 Stores Rd., Vancouver, BC, V6T 1Z4, CANADA.*

Eberhardt, E., Stead, D., Coggan, J. & Willenberg, H., 2002, "An integrated numerical analysis approach to the Randa rockslide", *In: Rybár et al. (eds.), Landslides in the Central Europe, Proceedings of the 1st European Conference on Landslides, Prague. Swets & Zeitinger, The Netherlands.*

Fenton, G. A., 2002, "Risk Assessment & Management", *Course Notes EMGM4675/6675, Dalhousie University, Canada.*

Frank, R. & Pouget, P., 2008, "Experimental pile subjected to long duration thrusts owing to a moving slope", *Géotechnique, Vol. 58 (8): 645–658.*

Geo-Slope, 2000, "Geo-Slope Office (Slope/W, Seep/W, Sigma/W, CTran/W, Temp/W)", *Geo-Slope International Ltd., Calgary, Canada.*

Goodman, R. E. & Shi G., 1985, "Block theory and its application to rock engineering", *Prentice-Hall, New Jersey.*

Griffiths, D. V. & Smith, I. M., 1991, "Numerical Methods for Engineers", *Blackwell, Oxford, England.*

Hack, H. R. G. K., 1998, "Slope Stability Probability Classification", *Vol. 43, ITC Delft Publication, Netherlands, Enschede, 273 pp.*

Hoek, E. & Brown, E. T., 1980, "Empirical strength criterion for rock masses", *J. Geotech Eng Div ASCE 1980, Vol. 106 (9): 1013–35.*

Hoek, E., Carranza-Torres, C. & Corkum, B., 2002, "Hoek-Brown Failure criterion-2002 edition", *In Proceedings of the North American Rock Mechanics Symposium Toronto.*

Itasca, 2006, "FLAC/Slope-Fast Lagrangian Analysis of Continua in two-dimensions", *Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis. FLAC/Slope Version 4.00, USA.*

Itasca, 2008, "UDEC - Universal distinct element code", *Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis. UDEC Version 4.00, USA.*

Itasca, 2011, "PFC3D (Particle Flow Code in 3 Dimensions) three-dimensions", *Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis. FLAC/Slope Version 4.00, USA.*

Jeongi-gi, U. M. & Kulatilake, P. H. S. W., 2001, "Kinematic and block theory analyses for shiplock slope of the three gorges dam site in china", *Geotechnical and Geological Eng., Vol. 19: 21-42.*

Lin, D. & Fairhurst, C., 1988, "Static Analysis of the Stability of Three-Dimensional Blocky systems around excavations in Rock", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 25 (3): 139-147.*

Liang, R. Y. & Yamin, M. M., 2009, "Three-dimensional finite element study of arching behavior in slope/drilled shafts system", *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech., Vol. 34 (11): 1157–1168.*

Mauldon, M., Chou, K. C. & Wu, Y., 1997, "Limit Anaslysis of 2-D Tunnel Key blocks", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 34 (3-4): 379-397.*

Noroozi, M., Jalali, S. E. & Yarahmadi-bafghi, A. R.,

Archive of SID

www.SID.ir

2011, "3D key-group method for slope stability analysis", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 36 (16): 1780-1792.*

Rockfield, 2001, "ELFEN 2D/3D Numerical Modelling Package (version 3.0)", *Rockfield Software Ltd, Swansea.*

Romana, M., Serón, J. B. & Montalar, E., 2003, "SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation", *ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy.*

Sarma, S. K., 1979, "Stability Analysis of Embankmemts and Slope", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 105 (GT12): 1511-1524.*

Shi, G., 1988, "Discontinuous deformation analysis: a new numerical method for the statics and dynamics of block systems", *Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.*

Warburton, P. M., 1981, "Vector Stability Analysis of an Arbitrary Polyhedral Rock Block with any Number of Free Faces", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 18: 415-427.*

Wolfram, S., 1999, "The Mathematica Book", *4th Ed., Wolfram Media - Cambridge University Press.*

Yarahmadi-Bafghi, A. R. & Verdel, T., 2003, "The key-group method", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 27 (6): 495-511.*

Yarahmadi-Bafghi, A. R. & Verdel, T., 2004, "The probabilistic key-group method", International Journal for *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 28 (9): 899-917.*

Yarahmadi-Bafghi, A. R. & Verdel, T., 2005, "Sarma-based key-group method for rock slope reliability analyses", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 29 (10):1019-1043.*

Yeung, M. R., 1991, "Application of Shi's discontinuous deformation analysis to the study of rock behaviour", *Ph.D. Thesis, University of California, Berkeley.*

Archive of SID

www.SID.ir