

صلى الله عليه وسلم



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش تونل و فضاهاى زیرزمینی

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل انحراف سد پیر تقی اردبیل با استفاده

از روش‌های کنترل ساختاری

نگارنده: غفار کهوری زاده

استاد راهنما:

دکتر مجید نیکخواه

استاد مشاور:

دکتر شکراله زارع

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۴۶۴۶۴۰۸۲  
تاریخ: ۹۶/۱۱/۲۹

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای غفار کهوری زاده با شماره دانشجویی ۹۴۱۵۰۵۴ رشته مهندسی معدن گرایش تونل و فضاهای زیرزمینی تحت عنوان تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل انحراف سد پیرتقی اردبیل با استفاده از روش های کنترل ساختاری که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: خوب) ☒ مردود ☐  
نوع تحقیق: ☐ نظری ☒ عملی

| عضو هیأت داوران           | نام و نام خانوادگی          | مرتبه علمی | امضاء |
|---------------------------|-----------------------------|------------|-------|
| ۱- استاد راهنمای اول      | دکتر مجید نیکخواه           | استادیار   |       |
| ۲- استاد راهنمای دوم      |                             |            |       |
| ۳- استاد مشاور            | دکتر شکرالله زارع           | دانشیار    |       |
| ۴- نماینده تحصیلات تکمیلی | دکتر مهدی نوروزی            | استادیار   |       |
| ۵- استاد ممتحن اول        | دکتر احمد رمضان زاده        | استادیار   |       |
| ۶- استاد ممتحن دوم        | دکتر مرتضی جوادی اصطهباناتی | استادیار   |       |

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

۹۶/۱۱/۲۹

تیسره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر در رشته تحصیلی می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



## به پدر و مادر عزیزم

آنان که وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر.  
 توانشان رفت تا به توانایی برسم و موهایشان سپید کشت تا رویم سپید بماند.  
 آنان که فروغ محاکشان، گرمی کلامشان و روشنی روشنیشان سرمایه های جاودانی زندگی من است.  
 آنان که راستی قائم در سنگینی قاشقان تجلی یافت.  
 در برابر وجود کرامیشان زانوی ادب بر زمین می نهم  
 و با قلبی ملو از عشق، محبت و خضوع بردستهایشان بوسه میزنم.

## به همسر

که میخ و ارباب صبرش در تمامی لحظات رفیق راه بود.

سر و وجودشان همیشه سرسبز و مستدام باد.

## پاسکزاری

شکر و سپاس بی پایان مخصوص خدایی است که بشر را آفریده و به او قدرت اندیشیدن داده و توانایی های بالقوه را در وجود انسان قرار داده و او را امر به تلاش و کوشش نموده و راهنمایی برای هدایت بشر فرستاده.

ایزدمنان را سپاس می گویم که توفیق گذراندن این دوران تحصیلی را به من عنایت فرمود و سپس مراتب سپاس خویش را به تمامی عزیزانی که در انجام مراحل مختلف این تحقیق مرایای نمودند کسب نمودن این راه جز با مساعدت و بهکاری آن ها ممکن نبود، شایسته است تقدیر ویژه خود را به این بزرگواران تقدیم نمایم.

- استاد ارجمند جناب آقای دکتر محمد یکنخواه که در طول تحصیل و تحقیق پیوسته راهنمایم بوده اند و با سلیبایی و درایت ایشان مشکلات تحقیق یکی پس از دیگری پشت سر گذاشته ام.

- استاد ارجمند جناب آقای دکتر شکرالذراع که از مشاورت ایشان در مدت تحقیق بهره برده ام.

- از جناب آقای Xiaolong Cheng که نرم افزار Easy.kbt را در اختیار قرار دادند شکر و قدردانی می گردد.

## تعهدنامه

اینجانب **غفار کهوری زاده** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تونل و فضاهای زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه با موضوع تحلیل پایداری و طراحی سیستم نگهداری تونل انحراف سد پیر تقی اردبیل با استفاده از روش‌های کنترل ساختاری تحت راهنمایی دکتر مجید نیکخواه متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود هست و مقالات مستخرج با نام **دانشگاه صنعتی شاهرود** و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ :

امضاء دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

## چکیده

تأثیر نیروهای محیط بر سنگ‌ها سبب ایجاد سطوح ضعف در آن‌ها می‌شود و تقاطع این صفحات با یکدیگر است، که توده سنگ را به صورت بلوک‌های مجزایی تبدیل می‌نماید. اساسی‌ترین عامل تعیین کننده شرایط ناپایداری توده سنگ در برابر ساخت و سازه‌های درون سنگی وضعیت تکیه‌گاهی هر بلوک است. احداث سازه‌ای مانند تونل در توده سنگی با چندین دسته ناپیوستگی می‌تواند سبب رها شدن بلوک‌های سنگ با اندازه‌های متفاوت گردد. بلوک‌هایی که کم‌ترین سطح تکیه‌گاهی در اختیار دارند از بحرانی‌ترین نحوه استقرار برخوردارند. سقوط و لغزش بلوک‌ها سبب تخریب پیرامون تونل خواهد شد. یکی از معروف‌ترین روش‌های تعادل حدی استفاده شده در سی سال گذشته، روش تحلیل بلوک‌های کلیدی یا تئوری بلوکی می‌باشد. تئوری بلوکی به بررسی جابجایی بلوک‌های سنگی و تحلیل تعادل حدی این بلوک‌ها از سطح حفريات مختلف می‌پردازد. در این تحقیق روش تئوری بلوک برای تحلیل ساختاری بلوک‌های تونل انحراف سد پیر تقی مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور با استفاده از ناپیوستگی‌های ساختاری توده سنگ در راستا تونل، توسط نرم‌افزار KBT. easy ضریب اطمینان، مد شکست و حجم بلوک‌ها به دست می‌آیند و در ادامه بلوک‌های کلیدی شناسایی می‌شوند. راستای حفر یک ساز زیرزمینی در سنگ درزه‌دار راستایی است که در آن کم‌ترین حجم از بلوک‌های ناپایدار در دیواره و سقف سازه وجود داشته باشد. به این منظور تحلیل تئوری بلوک برای ۷ راستا که این راستاها داری اختلاف (  $\pm 30^\circ$  ) نسبت به راستای انتخابی توسط مهندس مشاور طرح هستند، انجام گرفته است. با توجه به حجم بلوک‌های ناپایدار تشکیل شده در هر راستا و همچنین در نظر گرفتن کاربری تونل، بهینه‌ترین راستا برای تونل انحراف آب سد پیر تقی از نقطه نظر تشکیل بلوک‌های ناپایدار راستای N35 پیشنهاد شده است.

تحلیل احتمالاتی منجر به درک بهتری از پایداری می‌شود و اطلاعات کامل‌تری در رابطه با پایداری حفاری‌ها ارائه می‌کند. برای تحلیل احتمالاتی پایداری بلوک از نرم‌افزار Crystall ball که یک نرم‌افزار آماری بر پایه روش مونت کارلو است، استفاده می‌شود. تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی بلوک‌ها با نتایج روش تئوری بلوک مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد علی‌رغم اینکه روش تئوری بلوک اشاره به پایداری بلوک‌های سنگی دارد اما نتایج روش احتمالاتی گسیختگی بلوک‌ها را با احتمال خاص نشان می‌دهد. در نهایت تحلیل ساختاری بلوک با نرم‌افزار UNWEDGE بر روی مسیر بهینه پیشنهادی انجام گرفته و بزرگترین گوه‌های ناپایدار شناسایی شدند. سپس برای پایدار سازی این گوه‌ها سیستم نگهداری طراحی شده است. نتایج نشان می‌دهد با اجرای شاتکریت با ضخامت 5cm در نیمه بالایی تونل و همچنین اجرای میل‌مهارهای مکانیکی با طول ۶ متر و فاصله داری ۱,۲\*۱,۲ در سقف تونل به صورت موضعی باعث پایداری گوه‌های ناپایدار تشکیل شده در سقف تونل، در این راستا می‌شود.

کلیدواژه‌ها: تئوری بلوک، تحلیل پایداری، نرم‌افزار easy.KBT، روش احتمالاتی مونت کارلو، نرم‌افزار

UNWEDGE

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

کهوری زاده، غفار، مجید نیکخواه، شکرالله زارع. ۱۳۹۶. « تحلیل پایداری ساختاری و بلوکی- مطالعه

موردی تونل انحراف آب سد پیر تقی اردبیل» پنجمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران و توسعه

شهری تهران.

## فهرست مطالب

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| ۱- فصل اول: کلیات .....                                           | ۱  |
| ۱-۱ مقدمه .....                                                   | ۲  |
| ۲-۱ ضرورت انجام تحقیق .....                                       | ۳  |
| ۳-۱ روش تحقیق .....                                               | ۴  |
| ۴-۱ ساختار پایان نامه .....                                       | ۵  |
| ۲- فصل دوم: تعاریف و مبانی نظری .....                             | ۷  |
| ۱-۲ مقدمه .....                                                   | ۸  |
| ۲-۲ تئوری بلوکی .....                                             | ۸  |
| ۱-۲-۲ فرضیات تئوری بلوک .....                                     | ۹  |
| ۲-۲-۲ طبقه‌بندی بلوک‌ها .....                                     | ۱۰ |
| ۳-۲-۲ روش‌های توصیف بلوک .....                                    | ۱۱ |
| ۴-۲-۲ مفهوم هرم .....                                             | ۱۲ |
| ۵-۲-۲ تصویر استریوگرافیک یک نیم فضا .....                         | ۱۵ |
| ۶-۲-۲ تقاطع نیم فضاهایی که هرم‌های درزه را به وجود می‌آورند ..... | ۱۷ |
| ۷-۲-۲ قضایای مربوط به کاربردهای تئوری بلوک .....                  | ۱۸ |
| ۱-۷-۲-۲ تئوری محدودیت .....                                       | ۱۹ |
| ۲-۷-۲-۲ تئوری قابلیت جابجایی .....                                | ۱۹ |
| ۳-۷-۲-۲ تئوری قضیه محور تونل .....                                | ۲۰ |

|    |                                                                             |
|----|-----------------------------------------------------------------------------|
| ۲۱ | ..... تحلیل تعادل حدی ۴-۷-۲-۲                                               |
| ۲۳ | ..... بلند شدن و سقوط ۵-۷-۲-۲                                               |
| ۲۴ | ..... لغزش بر روی یک سطح ۶-۷-۲-۲                                            |
| ۲۴ | ..... لغزش بر روی دو سطح ۷-۷-۲-۲                                            |
| ۲۵ | ..... قضیه ناحیه ماکزیمم قابل جابجایی در مقطع تونل ۸-۲-۲                    |
| ۲۷ | ..... مقدمه‌ای بر روش‌های احتمالاتی تحلیل ساختاری بلوک ۳-۲-۲                |
| ۲۹ | ..... روش‌های طراحی احتمالاتی ۱-۳-۲                                         |
| ۲۹ | ..... تابع توزیع ۱-۱-۳-۲                                                    |
| ۳۰ | ..... احتمال گسیختگی ۲-۱-۳-۲                                                |
| ۳۱ | ..... جمع‌بندی ۴-۲                                                          |
| ۳۳ | ..... فصل سوم: مرور ادبیات ۳-۳                                              |
| ۳۴ | ..... مقدمه ۱-۳                                                             |
| ۳۴ | ..... تحلیل پایداری تونل سنگی ۲-۳                                           |
| ۴۶ | ..... جمع‌بندی ۳-۳                                                          |
| ۴۷ | ..... فصل چهارم: تحلیل پایداری و کنترل ساختاری تونل انحراف آب سد پیرتقی ۴-۴ |
| ۴۸ | ..... مقدمه ۱-۴                                                             |
| ۴۸ | ..... زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه ۲-۴                                      |
| ۴۹ | ..... مشخصات کلی رودخانه قزل اوزون ۱-۲-۴                                    |
| ۵۰ | ..... موقعیت جغرافیایی و دسترسی ۲-۲-۴                                       |

|     |                                                                                       |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------|
| ۵۰  | ..... ۳-۲-۴ تونل انحراف                                                               |
| ۵۱  | ..... ۳-۴ تحلیل پایداری ساختاری و بلوکی                                               |
| ۵۳  | ..... ۱-۳-۴ ناپیوستگیهای مسیر تونل انحراف                                             |
| ۵۳  | ..... ۱-۱-۳-۴ بررسی سیستم ناپیوستگی سطحی در تکیه‌گاه جناح چپ                          |
| ۵۴  | ..... ۲-۱-۳-۴ بررسی سیستم ناپیوستگیهای درون گالریهای اکتشافی                          |
| ۵۶  | ..... ۳-۱-۳-۴ تحلیل سیستم ناپیوستگیهای تکیه‌گاه چپ سد با نرم‌افزار DIPS 6.008         |
|     | ..... ۴-۱-۳-۴ آزمایش مقاومت برشی مستقیم بزرگ‌مقیاس آزمایشگاهی بر روی سطوح             |
| ۵۸  | ..... ناپیوستگی                                                                       |
|     | ..... ۲-۳-۴ شناسایی بلوک‌های قابل جابجایی در راستای اصلی تونل با استفاده از نرم‌افزار |
| ۶۰  | ..... Easy.kbt                                                                        |
| ۶۴  | ..... ۳-۳-۴ انتخاب راستای بهینه تونل بر اساس تحلیل ساختاری بلوک‌ها                    |
| ۷۸  | ..... ۴-۴ جمع بندی                                                                    |
| ۷۹  | ..... ۵- فصل پنجم: تحلیل پایداری احتمالاتی و سیستم نگهداری بلوکهای تونل               |
| ۸۰  | ..... ۱-۵ مقدمه                                                                       |
| ۸۰  | ..... ۲-۵ تحلیل احتمالاتی بلوک‌های قابل جابجایی                                       |
| ۸۱  | ..... ۱-۲-۵ انتخاب تابع توزیع مناسب پارامترهای ورودی                                  |
| ۸۲  | ..... ۲-۲-۵ محاسبه SF                                                                 |
| ۸۴  | ..... ۳-۲-۵ تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی با روش مونت کارلو                              |
| ۱۰۰ | ..... ۳-۵ تحلیل گوه ای                                                                |

|             |                                                                  |     |
|-------------|------------------------------------------------------------------|-----|
| ۱-۳-۵       | معرفی نرم افزار Unwedge                                          | ۱۰۱ |
| ۲-۳-۵       | استفاده از نرم افزار Unwedge برای تحلیل پایداری گوه های ناپایدار | ۱۰۲ |
| ۳-۳-۵       | طراحی سیستم نگهداری                                              | ۱۰۵ |
| ۴-۵         | جمع بندی                                                         | ۱۰۹ |
| ۶- فصل ششم: | نتیجه گیری و پیشنهادها:                                          | ۱۱۱ |
| ۱-۶         | نتیجه گیری                                                       | ۱۱۲ |
| ۲-۶         | پیشنهادها                                                        | ۱۱۵ |
|             | منابع                                                            | ۱۱۷ |

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲ طبقه‌بندی انواع بلوکها بر اساس قرارگیری آنها در تونل ..... ۱۰
- شکل ۲-۲ مثالی از بلوک محدود در حالت دوبعدی ..... ۱۳
- شکل ۳-۲ مثالی از هرم حفاری در یک تونل استوانه ای به وسیله صفحات مماس ..... ۱۵
- شکل ۴-۲ تصویر استریو گرافیک نیم فضاهاى صفحه  $P_i$  با نقطه کانونی پایینی ..... ۱۷
- شکل ۵-۲ تصویر استریو گرافیک هرم های درزه با نقطه کانونی پایینی ..... ۱۸
- شکل ۶-۲ مثالی از بلوک مخروطی و یک بلوک دارای قابلیت جابجایی، مثال دو بعدی ..... ۲۱
- شکل ۷-۲: دیاگرام نیروی بر روی سطح لغزشی یک بلوک ..... ۲۲
- شکل ۸-۲ حالت های جابجایی بلوک ..... ۲۴
- شکل ۹-۲ ماکزیمم منطقه قابل جابجایی ..... ۲۵
- شکل ۱۰-۲ تصویر jz در مقطع تونل ..... ۲۶
- شکل ۲-۴ پلان موقعیت ساختگاه سد و نیروگاه پیرتقی ..... ۵۰
- شکل ۳-۴ پلان موقعیت تونل های انحراف در جناحین سد ..... ۵۲
- شکل ۴-۴ نگاره قطبی تکیه گاه چپ (حاصل تلفیق ناپیوستگی های موجود در گالری های اکتشافی) ..... ۵۴
- شکل ۵-۴ نگاره قطبی تکیه گاه چپ سد ..... ۵۵
- شکل ۶-۴ نگاره قطبی تکیه گاه چپ (حاصل تلفیق ناپیوستگی های موجود در گالری ها اکتشافی و برداشت های سطحی جناح چپ) ..... ۵۶
- شکل ۷-۴ نگاره قطبی تکیه گاه چپ سد (حاصل تلفیق ناپیوستگی های موجود در گالری های اکتشافی و برداشت های سطحی جناح چپ) ..... ۵۷
- شکل ۸-۴ صور ساختاری تکیه گاه چپ سد (حاصل تلفیق ناپیوستگی های موجود در گالری های

- اکتشافی و برداشت های سطحی تکیه گاه چپ ) ..... ۵۸
- شکل ۹-۴ تصویر استریوگراف دسته درزه ها و جهت گیری تونل (تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N65^\circ$ )) ..... ۶۱
- شکل ۱۰-۴ شکل سه بعدی و جانمایی بلوک های ناپایدار در تونل ..... ۶۳
- شکل ۱۱-۴ تصویر استریوگراف دسته درزه ها و جهت گیری تونل (تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N55^\circ$ )) ..... ۶۶
- شکل ۱۲-۴ تصویر استریوگراف دسته درزه ها و جهت گیری تونل (تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N45^\circ$ )) ..... ۶۸
- شکل ۱۳-۴ تصویر استریوگراف دسته درزه ها و جهت گیری تونل (تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N35^\circ$ )) ..... ۷۰
- شکل ۱۴-۴ تصویر استریوگراف دسته درزه ها و جهت گیری تونل (تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N75^\circ$ )) ..... ۷۲
- شکل ۱۵-۴ تصویر استریوگراف دسته درزه ها و جهت گیری تونل (تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N85^\circ$ )) ..... ۷۳
- شکل ۱۶-۴ تصویر استریوگراف دسته درزه ها و جهت گیری تونل (تونل انحراف با راستای جنوب شرقی - شمال غربی (امتداد  $N95^\circ$ )) ..... ۷۵
- شکل ۱-۵ نمودار توزیع احتمال ضریب اطمینان بلوک ۰۰۱۱ ..... ۸۶
- شکل ۲-۵ نمودار تحلیل حساسیت ضریب ایمنی نسبت به پارامترهای ورودی ..... ۸۷
- شکل ۳-۵ نمودار توزیع احتمال ضریب اطمینان بلوک ۱۰۱۱ ..... ۸۷
- شکل ۴-۵ نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای تصادفی نسبت به ضریب ایمنی بلوک ۱۰۱۱ ..... ۸۸
- شکل ۵-۵ نمودار توزیع احتمال ضریب اطمینان بلوک با کد ۱۱۰۱ ..... ۸۹
- شکل ۶-۵ نمودار توزیع احتمال ضریب ایمنی بلوک با کد ۱۱۱۰ ..... ۹۰

- شکل ۵-۷ نمودار توزیع احتمال ضریب ایمنی بلوک با کد ۰۱۰۱ ..... ۹۱
- شکل ۵-۸ نمودار توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک با کد ۰۰۰۱ ..... ۹۲
- شکل ۵-۹ نمودار توزیع احتمال ضریب ایمنی بلوک ۰۰۱۰ ..... ۹۳
- شکل ۵-۱۰ نمودار توزیع احتمال ضریب ایمنی بلوک ۱۰۰۱ ..... ۹۴
- شکل ۵-۱۱ نمودار توزیع احتمال ضریب ایمنی بلوک ۱۰۱۰ ..... ۹۵
- شکل ۵-۱۲ نمودار تحلیل حساسیت ضریب اطمینان بلوک ۱۰۱۰ ..... ۹۶
- شکل ۵-۱۳ نمودار توزیع احتمال ضریب اطمینان بلوک ۱۱۰۰ ..... ۹۷
- شکل ۵-۱۴ نمودار تحلیل حساسیت ضریب ایمنی بلوک ۱۱۰۰ ..... ۹۷
- شکل ۵-۱۵ مشخصات گوه های تشکیل شده از تقاطع سه دسته درزه ۱، ۲ و ۳ ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱۶ مشخصات گوه های تشکیل شده از تقاطع سه دسته درزه ۱، ۲ و ۴ ..... ۱۰۳
- شکل ۵-۱۷ مشخصات گوه های تشکیل شده از تقاطع سه دسته درزه ۱، ۳ و ۴ ..... ۱۰۴
- شکل ۵-۱۸ مشخصات گوه های تشکیل شده از تقاطع سه دسته درزه ۲، ۳ و ۴ ..... ۱۰۵
- شکل ۵-۱۹ بلوک های پایدار شده با اجرای سیستم نگهداری ..... ۱۰۸

## فهرست جداول

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| جدول ۱-۲ روش‌های توصیف بلوک .....                                                                               | ۱۲ |
| جدول ۲-۲ توصیف مکانیکی بلوک با توجه به شرایط آن .....                                                           | ۲۳ |
| جدول ۳-۲ تعداد بلوک‌ها و انواع مختلف آن‌ها در تونل .....                                                        | ۲۷ |
| جدول ۱-۴ نتایج درزه نگاری حاصل از برداشت سطحی ناپیوستگی‌ها در تکیه‌گاه چپ .....                                 | ۵۴ |
| جدول ۲-۴ نتایج تلفیق درزه نگاری در گالری‌های اکتشافی LG1 و LG2 .....                                            | ۵۵ |
| جدول ۳-۴ نتایج تلفیق درزه نگاری در گالریهای اکتشافی LG1 و LG2 و برداشت سطحی .....                               | ۵۶ |
| جدول ۴-۴ نتایج درزه نگاری تکیه‌گاه چپ (نرم‌افزار Dips 6.008) .....                                              | ۵۷ |
| جدول ۶-۴ مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش .....                                                                     | ۵۹ |
| جدول ۵-۴ نتایج آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی درزه طبیعی - سد و نیروگاه پیر تقی - گالری LG1 .....          | ۵۹ |
| جدول ۷-۴ داده‌های ورودی نرم‌افزار Easy kbt .....                                                                | ۶۰ |
| جدول ۸-۴ نتایج شرایط بلوکهای قابل جابجایی تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد N65 درجه) .....   | ۶۲ |
| جدول ۹-۴ نتایج شرایط بلوک های قابل جابجایی تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد N55 درجه) .....  | ۶۷ |
| جدول ۱۰-۴ نتایج شرایط بلوک های قابل جابجایی تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد N45 درجه) ..... | ۶۹ |
| جدول ۱۱-۴ نتایج شرایط بلوک های قابل جابجایی تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد N35 درجه) ..... | ۷۰ |
| جدول ۱۲-۴ نتایج شرایط بلوک‌های قابل جابجایی تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد N75 درجه) ..... | ۷۲ |

|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| جدول ۴-۱۳ نتایج شرایط بلوک‌های قابل جابجایی تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد N85)..... | ۷۴  |
| جدول ۴-۱۴ نتایج شرایط بلوک‌های قابل جابجایی تونل انحراف با راستای جنوب شرقی - شمال غربی (امتداد N95)..... | ۷۶  |
| جدول ۴-۱۵ نتایج تحلیل بلوک‌های ناپایدار در ۷ راستای انتخابی .....                                         | ۷۷  |
| جدول ۵-۱ پارامترهای تابع توزیع بتا برای شیب، جهت شیب و زاویه اصطکاک دسته درزه‌ها.....                     | ۸۲  |
| جدول ۵-۲ جهت لغزش و ضریب ایمنی هر بلوک .....                                                              | ۸۴  |
| جدول ۵-۳ شرایط بلوکهای ناپایدار در راستاهای انتخابی در دو روش احتمالاتی و روش قطعی..                      | ۹۸  |
| جدول ۵-۴ مشخصات بزرگترین گوه ها با پتانسیل ناپایداری در اطراف تونل با راستای بهینه انتخاب شده .....       | ۱۰۵ |
| جدول ۵-۵ مشخصات بزرگترین گوه ها با پتانسیل ناپایداری در اطراف تونل با راستای بهینه انتخاب شده .....       | ۱۰۷ |
| جدول ۵-۶ مشخصات بزرگترین گوه ها با پتانسیل ناپایداری قبل و بعد از نصب سیستم نگهداری .....                 | ۱۰۸ |

## فصل اول

# کلیات

توده سنگ به عنوان یک ماده طبیعی کاملاً متغیر بوده و مواد سنگی داخل زمین رفتارهای مکانیکی مختلفی را از خود نشان می دهند. سنگ ها با بسیاری از مواد دیگر که ساخته دست بشر هستند، کاملاً تفاوت دارند، حضور درزه ها و نقاط ضعف متعدد سبب ناپیوستگی در سنگ و تقسیم آن به قسمت هایی با رفتارهای متفاوت می گردد. توده سنگ ها عموماً دارای سطوح ضعف بسیاری هستند که بلوک های مجزا از هم را به صورت کامل درگیر با یکدیگر، در کنار هم قرار می دهند. این ناپیوستگی توده سنگ را به بلوک هایی تقسیم می کنند. توده سنگ جدا شده توسط تقاطع تعدادی ناپیوستگی (صفحه درزه) و یا سطوح حفاری شده (سطح آزاد) می تواند یک بلوک را تشکیل دهد. اگر بلوک تعیین شده حرکت، لغزش و یا حتی سقوط کند، اولین اقدام جهت کنترل بلوک باید بر روی ناپیوستگی های خاص صورت گیرد. بنابراین این بلوک ها به طور بالقوه خطرناک هستند و می توان قبل از اینکه حرکت کنند پایداری آن ها را تضمین کرد، پس هر بلوکی از هر جا نمی تواند حرکت کند، این اصل تئوری بلوک است (Goodman, 1980). با توصیف و تحلیل بلوک های مورد نیاز با یک رویکرد سه بعدی، تئوری بلوک قادر است که قابلیت حرکت و پایداری بلوک های سنگی و همچنین مکان یابی بلوک کلیدی که بالقوه قابلیت جابجایی دارند را تعیین کند. تئوری بلوک به طور معمول از دو روش بردار ریاضی و طرح گرافیکی استریونت به تجزیه و تحلیل می پردازد (فلک ناز، ۱۳۷۹). در تحلیل پایداری تونل همواره عدم قطعیت هایی وجود دارند که عمدتاً ناشی از عدم قطعیت موجود داده های بدست آمده برای ویژگی های توده سنگ است؛ بنابراین انتخاب یک مقدار قطعی برای پارامترها نمی تواند رفتار سنگ را کاملاً بیان کند. به منظور اعمال این عدم قطعیت ها در محاسبات تحلیل پایداری و طراحی تونل، استفاده از روش های احتمالاتی مانند روش مونت کارلو<sup>۱</sup>، لاتین هیپر کیوب<sup>۲</sup> و .. رونق یافته است. اصول کلی این روش ها برآورد تابع چگالی احتمال، فاکتور ایمنی و سپس محاسبه احتمال شکست با توجه به آن است

---

<sup>۱</sup> Monte carlo

<sup>۲</sup> Latin hypercube

(نجفوند و همکاران، ۱۳۹۵). تونل‌ها از جمله کارهای زیرزمینی بزرگ عمرانی و معدنی محسوب می‌شوند. به منظور دسترسی به مناطق مختلف حمل و نقل، دفاع در برابر هجوم دشمنان، پناهگاه، کاریز، انتقال آب و معدنکاری حفر می‌شوند. راستای حفاری و پایداری تونل ارتباط زیادی با جهت‌گیری و وضعیت بلوک‌های مسیر تونل داشته و از طرفی راستا انتخاب شده برای حفر تونل تأثیر بسزایی در هزینه‌های حفاری و نگهداری آن تونل خواهد داشت. جابجایی یک بلوک، فضایی را به وجود می‌آورد که موجب حرکت بلوک‌های محدودشده دیگر می‌گردد. بدین ترتیب ممکن است گسیختگی شدیدی به صورت پیش‌رونده اتفاق افتد که گاهی بسیار سریع است (موسوی و خسروی، ۱۳۷۸). هدف استفاده از تئوری بلوک در تونل انحراف سد پیرتقی جهت شناخت بلوک‌های کلیدی که بالقوه قابلیت حرکت دارند، تشخیص انواع بلوک‌ها و تحلیل پایداری آن‌ها با استفاده از تئوری بلوک با یک رویکرد احتمالاتی است. همچنین انتخاب جهت بهینه تونل از اهم اهداف این تحقیق است.

## ۲-۱ ضرورت انجام تحقیق

در یک فضای زیرزمینی خودنگهدار حالت اولیه تنش تغییر یافته و تنش در اطراف فضای مورد نظر به نحوی تمرکز و جریان می‌یابد که سبب بسته‌شدن و قفل شدن صفحات درزه در یکدیگر می‌گردد. جابجایی بلوک‌ها در اثر ریزش بلوک‌های کلیدی، سبب بازشدگی و سست شدن درزه‌ها می‌شود که در نهایت منجر به سیستم نگهداری فوق‌العاده پرهزینه خواهد شد. در مورد فضاهای زیرزمینی تئوری بلوک امکان طراحی شکل، اندازه و جهت یافتگی و در صورت لزوم سیستم نگهداری را به نحوی فراهم می‌کند که هزینه پایدارسازی آن در حداقل ممکن باشد. تئوری بلوک به بررسی حرکت بلوک‌های درزه‌ای می‌پردازد که در اثر حفر فضا، آزاد می‌شوند. هدف روش تئوری بلوک این است که اگر بلوک اولیه در جای خود نگهداری شود، چنین ریزش‌هایی به وجود نخواهد آمد. بدین ترتیب نیازی به تحلیل و بررسی توده سنگ بزرگ و پیچیده که بالقوه قابل تخریب است نبوده و تنها کافی است که بلوک اولیه و اصلی مورد مطالعه قرار گیرد. با استفاده از تئوری بلوک می‌توان تحلیل پایداری تونل‌ها

بدون پوشش را برای تمام عمر آن‌ها انجام داد. در تونل‌های پوشش‌دار از تئوری بلوک برای محاسبه زمان نصب پوشش استفاده می‌شود. پوشش این تونل‌ها برای پایداری و کاهش زبری دیواره آن اعمال می‌گردد. بلوک‌های سنگی برای تعیین بارهای ناشی از آن‌ها و توزیع آن بر روی پوشش تونل تحت تأثیر نیروهای دینامیکی نظیر انفجار و زمین‌لرزه مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرند. نیروی اینرسی بلوک کلیدی به نیروی لغزندگی آن افزوده شده و بلوک سنگی به سیستم نگهداری فشار وارد می‌آورد. در تونل‌های آبی تحت فشار نیروهای ناشی از آب وارد بر بلوک‌ها نیز باید مد نظر قرار گیرد. همچنین در زمان جابجایی هر بلوک، حرکت بلوک‌های جدید را امکان‌پذیر ساخته و ضمن گسترش ترک‌های جدید، سبب تغییر بارهای اعمال‌شده و تنش سنگ می‌گردد. اگرچه نظریه تئوری بلوک کلیدی، پایداری سنگ قبلاً مورد استفاده قرار گرفته‌اند، با این حال تجزیه و تحلیل احتمال شکست در بلوک‌های کلیدی ناشی از حفر تونل کم‌تر بررسی شده است. این یک مسئله بسیار مهم در مرحله برنامه‌ریزی و ساخت تونل است.

### ۳-۱ روش تحقیق

در راستای رسیدن به اهداف تحقیق در ابتدا داده‌های برداشت درزه‌ها و درزه‌نگاری منطقه مسیر تونل انحراف سد پیر تقی با استفاده از نرم‌افزار *Dips* که یک نرم‌افزار تخصصی برای تحلیل درزه‌ها بوده مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. سپس با کمک گرفتن از نرم‌افزار *easy.KBT* که یک نرم‌افزار طراحی‌شده بر طبق نظریه بلوک است، انواع بلوک‌ها (محدود، قابل حرکت) ایجاد و بلوک‌های که بالقوه ناپایدار هستند در راستای مسیر تونل شناسایی شده است. در مرحله بعد با استفاده از تجزیه و تحلیل حرکتی برای هر بلوک بالقوه ناپایدار انجام می‌شود. این تحلیل تئوری بلوک برای ۷ راستای انتخابی با اختلاف  $\pm 30^\circ$  نسبت به راستای انتخاب‌شده توسط مهندس مشاور طرح انجام می‌شود و بهترین راستا را با توجه به حجم بلوک‌های کلیدی و ضریب اطمینان آن‌ها تعیین می‌شود. در مرحله بعد با استفاده از روش احتمالاتی مونت کارلو به تحلیل پایداری بلوک و در پی آن پایداری بلوک‌های تشکیل‌شده در تونل پرداخته می‌شود. اصول کلی این روش برآورد تابع چگالی احتمال فاکتور ایمنی و

سپس محاسبه احتمال شکست با توجه به آن خواهد بود. در این تحقیق سه پارامتر شیب، جهت شیب و زاویه اصطکاک دسته‌درزه‌ها به عنوان متغیرهای تصادفی در تحلیل ضریب اطمینان بلوک‌ها مورد استفاده قرار گرفته است و درصد احتمال پایداری هر بلوک مشخص می‌شود. در نهایت با توجه به تحلیل احتمالاتی و تئوری بلوک راستای بهینه تونل انتخاب می‌شود و با استفاده از نرم‌افزار UNWEDGE سیستم نگهداری این راستا طراحی می‌شود.

## ۴-۱ ساختار پایان‌نامه

این تحقیق در ۶ فصل تهیه و تنظیم گردیده است که به ترتیب عبارت‌اند از:

فصل اول: در این فصل ابتدا در مقدمه‌ای به بیان مسئله مورد تحقیق در پایان‌نامه پرداخته شده است. سپس در مورد اهداف و روش تحقیق موضوع بحث شده است.

فصل دوم: خلاصه‌ای از مبانی روش تئوری بلوک آورده شده است، همچنین قضایای مورد استفاده تئوری بلوک در تونل نیز آورده شده است. در آخر نیز خلاصه‌ای در مورد روش احتمالاتی مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است.

فصل سوم: این فصل مرور ادبیات است. تحقیقات انجام‌شده در زمینه تئوری بلوک در فضای سطحی و زیرزمینی و همچنین تحقیقات انجام‌شده در زمینه تئوری بلوک بر مبنای رویکرد احتمالاتی نیز آورده شده است.

فصل چهارم: در قسمت اول این فصل خلاصه‌ای در مورد زمین‌شناسی مطالعه موردی آورده شده است سپس درزه‌های برداشت‌شده با نرم‌افزار DIPS تحلیل شده و دسته‌درزه‌های اصلی شناسایی می‌شوند. در قسمت بعد با استفاده از نرم‌افزار easy.KBT که نرم‌افزاری بر پایه تئوری بلوک است به شناسایی بلوک‌های ناپایدار تشکیل شده پرداخته می‌شود و در آخر این تحلیل برای راستاهای مختلف انجام می‌شود و راستای بهینه برای تونل پیشنهاد می‌شود.

فصل پنجم: در این فصل ابتدا تابع توزیع پارامترهای تصادفی مورد استفاده در رابطه‌ای ضریب

اطمینان بلوک با استفاده از نرم افزار Easy fit تعیین شده است. سپس با استفاده از نرم افزار Crystalball به تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی بلوک ها پرداخته شده است. در قسمتی دیگر با توجه به حجم تشکیل شده بلوک ها در راستاهای مختلف و درصد احتمال ناپایداری بلوک راستای بهینه تونل انتخاب شده است. در نهایت تحلیل کنترل ساختاری برای راستای بهینه با نرم افزار UNWEDGE انجام شده است و سیستم نگهداری مورد نیاز برای این راستا طراحی شده است.

فصل ششم: در این فصل نتایج و پیشنهادها تحقیق آورده شده است.

فصل دوم:

# تعاريف و مباني نظري

## ۱-۲ مقدمه

حفاری‌هایی که در توده‌های سنگی دارای چندین دسته درزه انجام می‌شود، باعث رها شدن بلوک‌های سنگ با اندازه‌های مختلف گردد. جابجایی بلوک‌هایی که بحرانی‌ترین وضعیت را دارند، باعث سست شدن بلوک‌های مجاور می‌گردد و سقوط و لغزش این بلوک‌ها می‌تواند برای فعالیت‌های مهندسی تهدیدکننده باشد. در مقابل اگر این بلوک‌ها شناسایی شوند و از پایداری آن‌های اطمینان حاصل شود کل حفاری ایمن خواهد بود. حفاری تونل ارتباط زیادی با جهت قرار گرفتن بلوک‌های سنگی تشکیل‌دهنده زمین داشته و از طرفی راستا انتخاب‌شده برای حفر تونل تأثیر بسزایی در هزینه‌های حفاری و نگهداری آن تونل خواهد داشت. تونل‌های دسترسی به آب و تونل‌های انحراف آب سدها را در سنگ‌های خوب احداث می‌کنند. استفاده از نظریه بلوکی برای شناسایی بلوک‌های کلیدی تا پایان عمر تونل امکان‌پذیر خواهد بود، اما در زمانی که برای حفظ پایداری تونل‌ها با ایجاد سطوح صاف و هیدرولیکی جدارهای آسترکاری شده، استفاده از نظریه بلوکی محدود به زمان حفر تونل تا ساخت آن است. در ادامه تحلیل تئوری بلوک برای شناسایی بلوک‌ها و تحلیل پایداری تونل انحراف سد تشریح می‌شود.

## ۲-۲ تئوری بلوکی<sup>۱</sup>

یک بلوک سنگی که از تقاطع ناپیوستگی‌ها و سطح فضای حفر شده حاصل می‌شود (بدون توجه به اینکه چند وجه دارد)، می‌تواند به یکی از حالات زیر جابجا شود:

❖ سقوط (ناشی از نیروی ثقل)

❖ لغزش بر روی یک وجه (صفحه)

❖ لغزش بر روی دو وجه (با ترکیبی از چرخش و لغزش)

وقوع هر یک از این حرکات، نیاز به سطوح لغزش خاصی دارد از این رو نخستین نشانه جابجایی و

---

<sup>۱</sup> Block theory

<sup>۳</sup> Key blocks

<sup>۵</sup> Limit Equilibrium analysis

حرکت بلوک، بازشدگی درزه‌های خاص می‌باشد. حال اگر بلوکهای بالقوه خطرناک، پیش از حرکت آنها شناسایی و پایدار شوند، هیچ جابجایی رخ نخواهد داد. این موضوع همان اصل اساسی «نظریه بلوکی» است (Godman, 1985). بلوک‌هایی که خطرناک‌ترین وضعیت استقرار را دارند بلوک‌های کلیدی نامیده می‌شوند. توصیف و تحلیل این بلوک‌ها نیازمند یک رویکرد سه‌بعدی است، تئوری بلوک این توانایی را دارد که بلوک‌هایی که قابلیت جابجایی را دارند شناسایی و پایداری آنها را بررسی کند. همچنین این روش قادر است بلوک‌هایی که بالقوه قابلیت جابجایی دارند (بلوک کلیدی) را تشخیص دهد. تحلیل‌های تئوری بلوک به‌طور معمول با استفاده از روش‌های برداری و تصاویر استریوگرافیک<sup>۱</sup> انجام می‌شوند. به‌طور کلی روش برداری این اجازه را می‌دهد که راه حل به وسیله نرم‌افزارهایی کامپیوتری سریع انجام شود. روش دیگر، تصاویر استریوگرافیک درک دقیقی از لحاظ هندسی و فیزیکی ارائه می‌کنند (فلک ناز، ۱۳۷۹). تئوری بلوکی به بررسی جابجایی بلوک‌های سنگی و تعادل حدی این بلوک‌ها از سطح حفريات مختلف می‌پردازد. در خصوص ترانشه‌های سطحی و فضا‌های زیرزمینی با پایداری دائمی، تئوری بلوک امکان طراحی شکل، اندازه، جهت‌یافتگی و در صورت لزوم سیستم نگهداری را به نحوی فراهم می‌سازد که هزینه پایدارسازی آنها در حداقل ممکن باشد.

## ۱-۲-۲ فرضیات تئوری بلوک

۱. سطح تمام درزه‌ها مسطح است. این فرض بر بسیاری از درزه‌ها و گسل‌ها همراه با واقعیت است. اما برای سطوح لایه‌بندی نظیر آنچه در یال چین‌ها اتفاق می‌افتد، کاملاً اشتباه است.
۲. سطوح درزه‌ها در تمام حجم مورد بررسی، به‌طور کامل گسترش یافته باشند. این بدان معنی است که هیچ یک از ناپیوستگی‌ها به ناحیه داخل بلوک کلیدی محدود نمی‌شوند.

---

<sup>۱</sup> Stereographic projection

۳. بلوک‌های حاصل از تقاطع درزه‌ها صلب<sup>۱</sup> باشند. در این صورت تغییر شکلی در بلوک به

وجود نیامده و شکل اولیه آن تغییر نخواهد کرد.

۴. سطوح ناپیوستگی‌ها و سطح استخراج، پارامترهای ورودی مسئله بوده و باید قبلاً تعیین

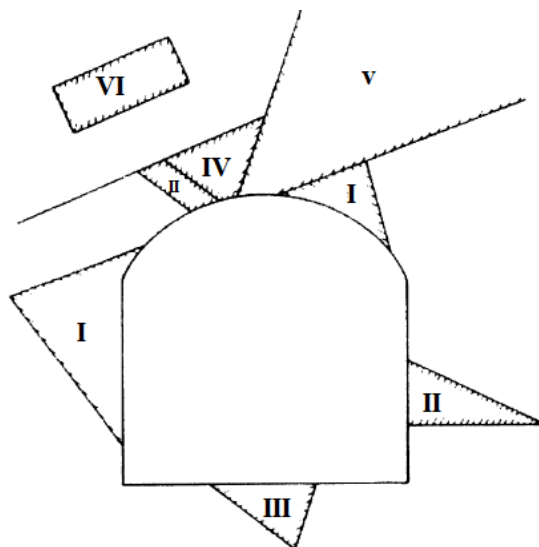
شده باشند (Goodman, and Shi, 1985).

## ۲-۲-۲ طبقه‌بندی بلوک‌ها

تقاطع‌ی که به وسیله دسته‌درزه‌های ساختاری مختلف و سطوح حفاری شده ایجاد شده‌اند، تشکیل بلوک می‌دهند. تئوری بلوک این بلوک‌های تشکیل شده را به گروه‌های مختلف بلوک تقسیم می‌کند.

بر اساس معیارها و اهمیت آن‌ها شش گروه بلوک به صورت زیر تعریف می‌شود (Goodman, and Shi, 1985; Fu et al., 2002).

تقسیم‌بندی انواع بلوک‌ها در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ طبقه‌بندی انواع بلوک‌ها بر اساس قرارگیری آن‌ها در تونل (Goodman, and Shi, 1985)

بلوک VI که به سطح آزاد راه ندارد در واقع پشت جبهه کار قرار دارد پس پایدار است. بلوک نوع V

نامحدود<sup>۲</sup> بوده و تا زمانی که درون آن درزه‌ای ایجاد نشود، هیچ خطری برای فضای استخراجی ندارد.

بلوک‌های محدود به دو نوع فاقد قابلیت جابجایی و باقابلیت جابجایی تقسیم می‌شوند. بلوک

<sup>۱</sup> Rigid

<sup>۲</sup> Infinite

نامحدودی که در آن درزه‌ای وجود نداشته باشد فاقد قابلیت جابجایی است این در حالی است که بلوک محدود<sup>۱</sup> نیز ممکن است به دلیل شکل مخروطی خود (نوع IV) فاقد جابجایی باشد بلوک مخروطی قابلیت جابجایی ندارد، مگر آنکه یکی از بلوک‌های مجاور آن جابجا شود (Choi Yam Ming, 2006). بلوک‌های محدود غیر مخروطی قابلیت جابجایی دارند. اما همه آن‌ها برای پایداری فضای استخراجی که تحت تأثیر شرایط بارگذاری معین قرار دارد، بحرانی نمی‌باشند، بلوک‌هایی با قابلیت جابجایی به سه دسته تقسیم می‌شوند: (۱): بلوک نوع III که نسبت به نیروی برآیند، از موقعیت مناسبی برخوردار بوده و حتی بدون حضور نیروی اصطکاک بر روی سطوح آن پایدار می‌ماند. هرچند امکان بلند کردن این بلوک از جای خود وجود دارد، اما در صورتی که تنها تحت تأثیر نیروی جاذبه قرار گیرد، دچار ریزش نشده و حرکت مجازی آن به سمت دور شدن از فضای استخراجی است. (۲): بلوک نوع II، که بالقوه ناپایدار است و تمایل به حرکت به سمت فضای حفاری داشته است. تا زمانی که مقاومت اصطکاکی روی سطح لغزش بالقوه بلوک نوع II به میزان زیادی کاهش نیابد و یا آنکه بارهای غیر از وزن به آن اعمال نشود، پایدار خواهد بود. این نوع بلوک را بلوک کلیدی بالقوه می‌نامند. (۳): بلوک نوع I که یک نوع بلوک کلیدی است و نه تنها قابلیت جابجایی دارد، بلکه به شکل خطرناکی قرار گرفته است و در صورت عدم کنترل آن، تمایل به حرکت به سمت فضای حفاری دارد. این نوع بلوک باید قبل از آنکه حفر فضای استخراجی منجر به جدا شدن کامل آن گردد، توسط سیستم نگهداری مهار گردد (Yam Ming, 2006).

## ۳-۲-۲ روش‌های توصیف بلوک

به‌طور کلی بلوک‌های سنگی بر اساس موقعیت و نحوه تقاطع صفحه‌های تشکیل‌دهنده بلوک توصیف می‌شوند. سه روش برای توصیف بلوک وجود دارد (جدول ۲-۲): روش مستقیم، روش شماره‌گذاری و

<sup>۱</sup> Finite

روش نشانه گذاری. (Goodman, and Shi, 1985; Fu et al., 200).

جدول ۱-۲ روش های توصیف بلوک (Goodman, and Shi, 1985; Fu et al., 200)

| روش ها                  | اصل (قانون)                                                                                                                                                                                                                                   | مثال و کاربرد                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ۱<br>روش<br>مستقیم      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>U_i</math> فضای بالای صفحه <math>P_i</math></li> <li>• <math>L_i</math> فضای پایین صفحه <math>P_i</math></li> </ul>                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• اگر بلوک <math>B_1</math> از فضای پایین صفحات <math>P_1, P_2, P_3</math> و فضای بالای صفحه <math>P_4</math> تشکیل شده باشد بلوک <math>B_1</math> را به صورت <math>U_4 L_3 L_2 L_1</math> نمایش داده می شود.</li> </ul>                                      |
| ۲<br>روش<br>شماره گذاری | <ul style="list-style-type: none"> <li>• "۰" محدوده از بلوک در نیم فضای بالایی صفحه</li> <li>• "۱" محدوده ای از بلوک در نیم فضایی پایینی بلوک</li> <li>• "۲" صفحه که در محدوده ای صفحات بلوک نباشد</li> <li>• "۳" صفحات موازی بلوک</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• اگر بلوک <math>B_1</math> از فضای پایین صفحات <math>P_1, P_2, P_3</math> و فضای بالای صفحه <math>P_4</math> تشکیل شده باشد بلوک <math>B_1</math> را به صورت 0001 نمایش داده می شود.</li> <li>• کد صفحه ای درزه نامیده می شود.</li> </ul>                    |
| ۳<br>روش نشانه گذاری    | <ul style="list-style-type: none"> <li>"+1" محدوده از بلوک در نیم فضای بالایی صفحه</li> <li>"-1" محدوده ای از بلوک در نیم فضایی پایینی بلوک</li> <li>"0" صفحه که در محدوده ای صفحات بلوک نباشد</li> <li>"±1" صفحات موازی بلوک</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• اگر بلوک <math>B_1</math> از فضای پایین صفحات <math>P_1, P_2, P_3</math> و فضای بالای صفحه <math>P_4</math> تشکیل شده باشد بلوک <math>B_1</math> را به صورت +۱-۱-۱-۱ نمایش داده می شود.</li> <li>• اغلب برای تحلیل های کامپیوتری استفاده می شود.</li> </ul> |

## ۴-۲-۲ مفهوم هرم<sup>۱</sup>

بلوک ها به وسیله نیم فضاهای صفحات درزه و سطوح آزاد تا حدی شناخته می شوند. چندین نوع

مفهوم هرم به وسیله تقاطع زیرمجموعه صفحات در بلوک وجود دارد: (Goodman, and Shi, 1985)

❖ هرم درزه<sup>۲</sup> (jp): به وسیله ساختار نیم فضاهای صفحات درزه تشکیل می شود.

<sup>۱</sup> pyramid

<sup>۲</sup> Joint pyramid

❖ هرم حفاری<sup>۱</sup> (EP): به وسیله تقاطع نیم فضاهای صفحات آزاد (استخراجی) تشکیل می‌شود.

❖ هرم فضایی<sup>۲</sup> (SP): هرمی که خارج از هرم حفاری است. همچنین این فضا به وسیله تقاطع

نیم فضاهای صفحات آزاد (استخراجی) تشکیل شده است.

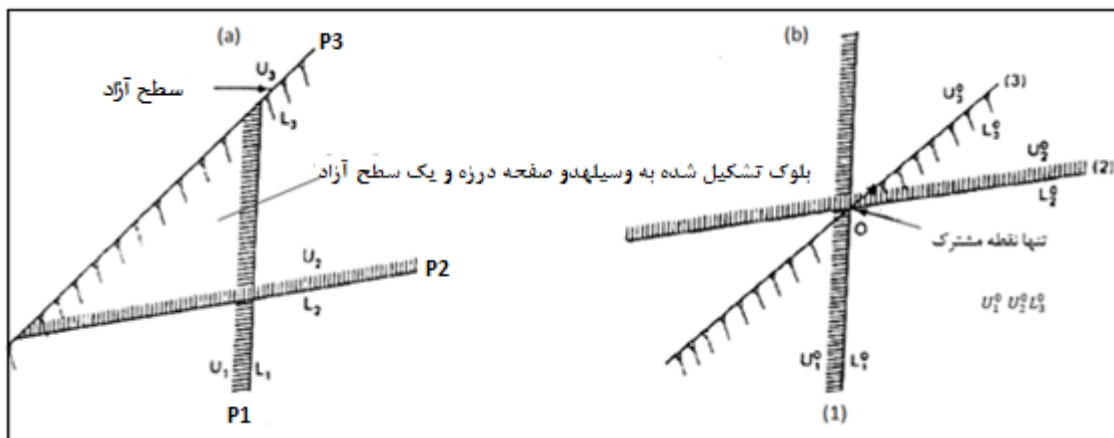
❖ هرم بلوک (BP): از تقاطع هرم حفاری با هرم درزه برای یک بلوک خاص، تشکیل شده است.

برای مثال در شکل ۲-۲ توده سنگ حفاری شده به وسیله‌ی سطح آزاد  $p_3$  نشان داده شده است.

همچنین این توده سنگ حاوی دو صفحه درزه  $p_1$  و  $p_2$  که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است.  $U_2^0$

$U_1^0$  نشان دهنده هرم درزه (JP)،  $L_3^0$  نشان دهنده هرم حفاری (EP) و  $U_3^0$  نشان دهنده هرم

فضایی (SP) می‌باشند.



شکل ۲-۲ مثالی از بلوک محدود در حالت دوبعدی (Goodman, and Shi, 1985)

سطح تونل منحنی است، بنابراین هرم‌های حفاری (EP) خیلی پیچیده‌تر از حالت عادی آن است. برای

تحلیل بلوک‌های خمیده در تونل‌ها، مرز استوانه تونل به صورت  $m$  صفحه مماس بر آن در نظر گرفته

می‌شود (شکل ۳-۲). ابتدا تعداد  $m$  نقطه را بر روی مرز منحنی شکل مقطع تونل انتخاب می‌شود:

$Q(\theta_1)$ ،  $Q(\theta_2)$ ، ..... و  $Q(\theta_m)$ . سپس در هر نقطه خطی مماس بر مرز تونل رسم می‌شود. بدین

ترتیب چند صفحه مسطح جایگزین سطح منحنی شکل تونل می‌گردد (شکل ۳-۲). در شکل (۲-۲)

<sup>۱</sup> Excavation pyramid

<sup>۲</sup> Space pyramid

(۳-۱) (a)، بجای منحنی مرز تونل از دو صفحه مماس استفاده شده است، که حالت نامناسبی است. در شکل (۳-۲) (b) از سه صفحه مماس و در شکل (۳-۲) (c) از چهار صفحه مماس استفاده شده است. حالت اخیر تقریب نزدیک‌تری برای منحنی یکنواخت سطح تونل است.

فرض کنید  $B_i$  نقطه تقاطع صفحات مماس بر  $Q(\theta_i)$  و  $Q(\theta_{i+1})$  باشد. در اینصورت منحنی مرز تونل توسط مکان هندسی زیر مشخص می‌شود:

$$Q(\theta_1)B_1Q(\theta_2)B_2Q(\theta_3)\dots B_{m-1}Q(\theta_m) \quad (۱-۲)$$

بلوک سنگی مرکب بین  $Q(\theta_1)$  و  $Q(\theta_m)$ ، اجتماع  $m$  بلوک سنگی محدب می‌باشد که هرم‌های بلوک عبارتند از:

$$BP_i = U(\hat{n}(\theta_i)) \cap JP, i = 1, \dots, m \quad (۲-۲)$$

در اینصورت برای هرم استخراجی بلوک مرکب داریم:

$$EP = \bigcup_{i=1}^m U(\hat{n}(\theta_i)) \cap JP \quad (۳-۲)$$

همچنین می‌دانیم که یک بلوک قابل جابجایی است اگر  $JP \neq \phi$  و  $JP \cap EP = \phi$  باشد.

فرض کنید  $Q(\theta_1)$  نقطه انتهایی قطعه منحنی مورد نظر از مرز تونل و در خلاف جهت عقربه‌های ساعت باشد. در این صورت با زیاد شدن  $i$  مقادیر تمام  $\theta_i$  ها بطور یکنواخت افزایش می‌یابد. به این ترتیب برای تمام  $\theta_i$  زاویه‌ای کوچک و مثبت خواهد بود. اگر  $\theta_m - \theta_1$  بزرگتر یا مساوی  $180^\circ$  باشد، در اینصورت  $EP$  بدست آمده از رابطه (۳-۲) تمام فضا را در بر گرفته و  $JP \cap EP = JP = \phi$  خواهد بود. لذا چنین بلوک‌هایی نمی‌توانند جابجا شوند. از شکل (۳-۲) (d) ملاحظه می‌شود که اگر  $\theta_m - \theta_1 < 180^\circ$  باشد، آنگاه:

$$EP = \bigcup_{i=1}^m U(\hat{n}(\theta_i)) = U(n(\theta_1)) \cup U(n(\theta_m)) \quad (۴-۲)$$

اگر  $m$  آنقدر زیاد شود که قطعات مماس بر مرز محدب مورد نظر تقریباً بر مرز فضای مورد حفاری منطبق گردند، باز هم رابطه فوق صادق خواهد بود. این مسئله منجر به قضیه مهم برای بلوک‌های

خمیده می‌گردد.

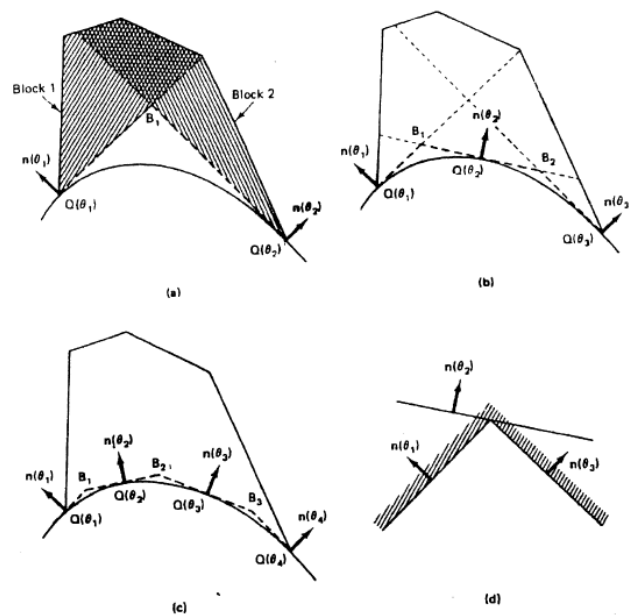
قضیه:

شرط‌های لازم برای قابلیت جابجایی بلوک‌هایی که سطح منحنی شکل تونل را قطع می‌کنند عبارت‌است از:

$$\begin{aligned} JP &\neq \phi \\ EP \cap JP &= \phi \end{aligned} \quad (5-2)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} EP &= U(\hat{n}(\theta_1)) \cup U(\hat{n}(\theta_m)) \\ \theta_m - \theta_1 &\leq 180^\circ \end{aligned} \quad (6-2)$$



شکل ۳-۲ مثالی از هرم حفاری در یک تونل استوانه‌ای به وسیله صفحات مماس (Goodman, and Shi, 1985)

## ۵-۲-۲ تصویر استریوگرافیک یک نیم فضا

هرم درزه عبارت است از دسته‌ای از نقاط مشترک که در نیم‌فضاهای محدودشده به صفحات بلوک در حالتی که همه آن‌ها از یک مبدأ مشترک عبور می‌کنند، تعریف می‌شود. تمام صفحات

درزه‌ای که در تصویر استریوگرافیک رسم می‌شوند، این شرط را دارا می‌باشند و از مرکز کره مرجع می‌گذرند. بنابراین از تصاویر استریوگرافیک می‌توان برای نمایش هرم درزه استفاده کرد. فرض کنید  $p_i$  صفحه درزه‌ای باشد. که از نقطه  $(0,0,0)$  عبور می‌کند. هر برداری که از نقطه  $(0,0,0)$  عبور کند و در صفحه‌ای  $p_i$  نباشد، در یکی از دو سمت آن یا به عبارتی در یکی از دو نیم‌فضای صفحه  $p_i$  قرار خواهد داشت. اگر صفحه‌ای  $p_i$  دارای شیب  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ ) در جهت  $\beta$  ( $0 \leq \beta \leq 360^\circ$ ) باشد، بردار نرمال یکه آن عبارت است از (Goodman, and Shi, 1985):

$$\hat{n}_i = (\sin \alpha \cos \beta, \sin \alpha \sin \beta, \cos \alpha) \quad (7-2)$$

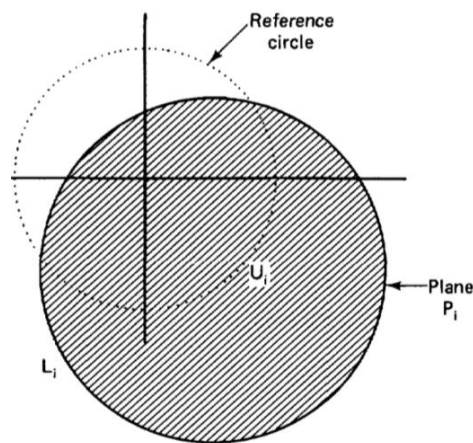
در اینجا فقط  $\cos \alpha \geq 0$  است. بدین ترتیب  $\hat{n}_i$  به سمت بالا یا افقی خواهد بود. از آنجا که  $p_i$  از نقطه  $(0,0,0)$  می‌گذرد. معادله آن  $n_i \cdot \chi = 0$  است. نیم فضای بالایی ( $U_i$ ) صفحه  $p_i$ ، گروهی از بردارهای  $x$  هستند که در رابطه زیر صدق می‌کنند:

$$n_i \cdot \chi \geq 0 \quad (8-2)$$

به‌طور مشابه نیم‌فضای پایینی ( $L_i$ ) صفحه  $p_i$ ، گروهی از بردارهای  $x$  هستند که در رابطه زیر صدق می‌کنند:

$$n_i \cdot \chi \leq 0 \quad (9-2)$$

تصویر استریوگرافیک صفحه‌ای مانند  $p_i$ ، یک دایره عظیمه است. مطابق آنچه فرض شد، اگر نقطه کانونی در پایین کره باشد، نیم فضای  $U_i$  که حاصل همه بردارهای عبور کرده از مبدأ به نقاط بالای صفحه  $p_i$  است، ناحیه داخل دایره مربوط به این صفحه خواهد بود (شکل ۲-۴). به‌طور مشابه نیم فضای پایینی صفحه  $p_i$  تمام نواحی خارج از دایره عظیمه مربوط به این صفحه است (Goodman, and Shi).



شکل ۴-۲ تصویر استریو گرافیک نیم فضاهای صفحه  $P_i$  با نقطه کانونی پایینی (Goodman, and Shi, 1985)

## ۶-۲-۲ تقاطع نیم فضاهایی که هرم های درزه را به وجود می آورند

$n$  دسته درزه غیر موازی که با صفحه  $P_i$  (عبور کرده از مبدأ) مشخص می شود را در نظر

بگیرید. صفحات  $P_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) کره را به هرم های که رأس آن ها در  $(0,0,0)$  است، تقسیم

می کند. تقاطع هر یک از این صفحات با کره مرجع به صورت یک دایره عظیمه است و تصویر

استریو گرافیک آن نیز یک دایره عظیمه است. مطابق شکل (۵-۲) تقاطع این دایره ها با یکدیگر، نواحی

مختلفی روی صفحه تصویر به وجود می آورد. این نواحی، روی شکل به صورت اختیاری شماره گذاری

شده اند. دایره مرجع (دایره نقطه چین) به عنوان بخشی از نواحی محدود شده نیست و فقط به خاطر

روشن شدن مطلب رسم شده است. هر یک از این نواحی شماره گذاری شده را می توان به صورت

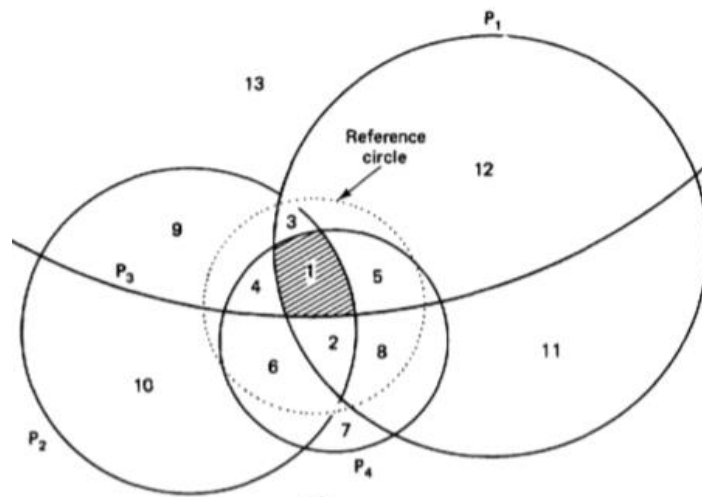
گروهی از بردارهای شعاعی که داخل هرم درزه مربوطه قرار دارند تصور نمود. بنابراین خم های دایروی

محدود کننده هر ناحیه، تصویر سطوح هرم درزه می باشند. برای مثال ناحیه یک در شکل (۵-۲)، هرم

درزه ای است که در اثر تقاطع نیم فضاهای  $U_1, U_2, U_3$  و  $U_4$  ایجاد شده است. همچنان طبق

قواعدی که در جدول (۲-۱) گفته شد می توان کد هرم درزه برای این ناحیه به صورت (۰۰۰۰) تعریف

کرد (Goodman, and Shi, 1958).



شکل ۲-۵ تصویر استریو گرافیک هرم های درزه با نقطه کانونی پایینی (Goodman, and Shi, 1985)

## ۲-۲-۷ قضایای مربوط به کاربردهای تئوری بلوک

چهار قضیه عمده برای آزمایش بلوک‌های محدب در تونل وجود دارد، که به صورت زیر برای بلوک

کلیدی طبقه‌بندی می‌شوند (Yam Ming, 2006; Goodman, and Shi, 1985)

- تئوری محدودیت<sup>۱</sup>
- تئوری قابلیت جابجایی<sup>۲</sup>
- تئوری محور تونل<sup>۳</sup>
- تحلیل تعادل حدی

به‌طور کلی بخشی از شناسایی بلوک کلیدی، بلوک کلیدی حداکثر بحرانی است، که این بلوک برای پیدا کردن بزرگ‌ترین نیروی نگهداری است. بلوک کلیدی ماکزیمم بزرگ‌ترین بلوکی است که بزرگ‌تر از آن دیگر قابل جابجایی نیست. این مفهوم در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. برای تشخیص این بلوک قضیه زیر مورد استفاده قرار گرفته است.

<sup>۱</sup> Theorem of Finiteness

<sup>۲</sup> Theorem for Removability

<sup>۳</sup> Tunnel Axis Theorem

- قضیه حداکثر محدوده قابل جابجایی<sup>۱</sup> در مقطع یک تونل:

۲-۷-۱ تئوری محدودیت

تئوری محدودیت: یک بلوک محدب<sup>۲</sup>، محدود است اگر هرم بلوک آن تهی باشد و بالعکس نامحدود است اگر هرم بلوک آن تهی نباشد. بنابراین هرم بلوک (BP) اشتراک هرم درزه ( $\Omega$ ) و هرم استخراجی است (فلک ناز ۱۳۷۹):

$$BP = JP \cap EP \quad (۱۰-۲)$$

شرط محدود بودن بلوک تهی بودن هرم آن است. یک بلوک محدود است اگر و فقط اگر:

$$BP = JP \cap EP = \emptyset \quad (۱۱-۲)$$

این مسئله را می‌توان با روش دیگری و با تعریف هرم فضایی (SP) به صورت نیم فضاها مکمل EP، نیز بیان نمود. لذا در مورد SP وجود دارد:

$$SP = \square EP \quad (۱۲-۲)$$

بدین ترتیب رابطه (۲-۱۱) معادل آن است که بگوییم یک بلوک محدود است اگر و فقط اگر هرم درزه آن به‌طور کامل در هرم فضایی قرار گیرد، یعنی اگر و فقط اگر:

$$JP \subset SP \quad (۱۳-۲)$$

یک بلوک محدود است اگر از تئوری محدودیت پیروی کند.

۲-۷-۲ تئوری قابلیت جابجایی

تئوری قابلیت جابجایی: یک بلوک محدب قابل جابجایی و برداشتن است اگر هرم بلوک آن تهی و هرم درزه آن غیر تهی باشد. یک بلوک محدب قابل جابجایی نیست (مخروطی) اگر هرم بلوک تهی و همچنین هرم درزه آن نیز تهی باشد (Goodman, and Shi, 1985). بنابراین برای یک بلوک مخروطی

<sup>۱</sup> Theorem on the Maximum Removable Area

<sup>۲</sup> Convex block

داریم:

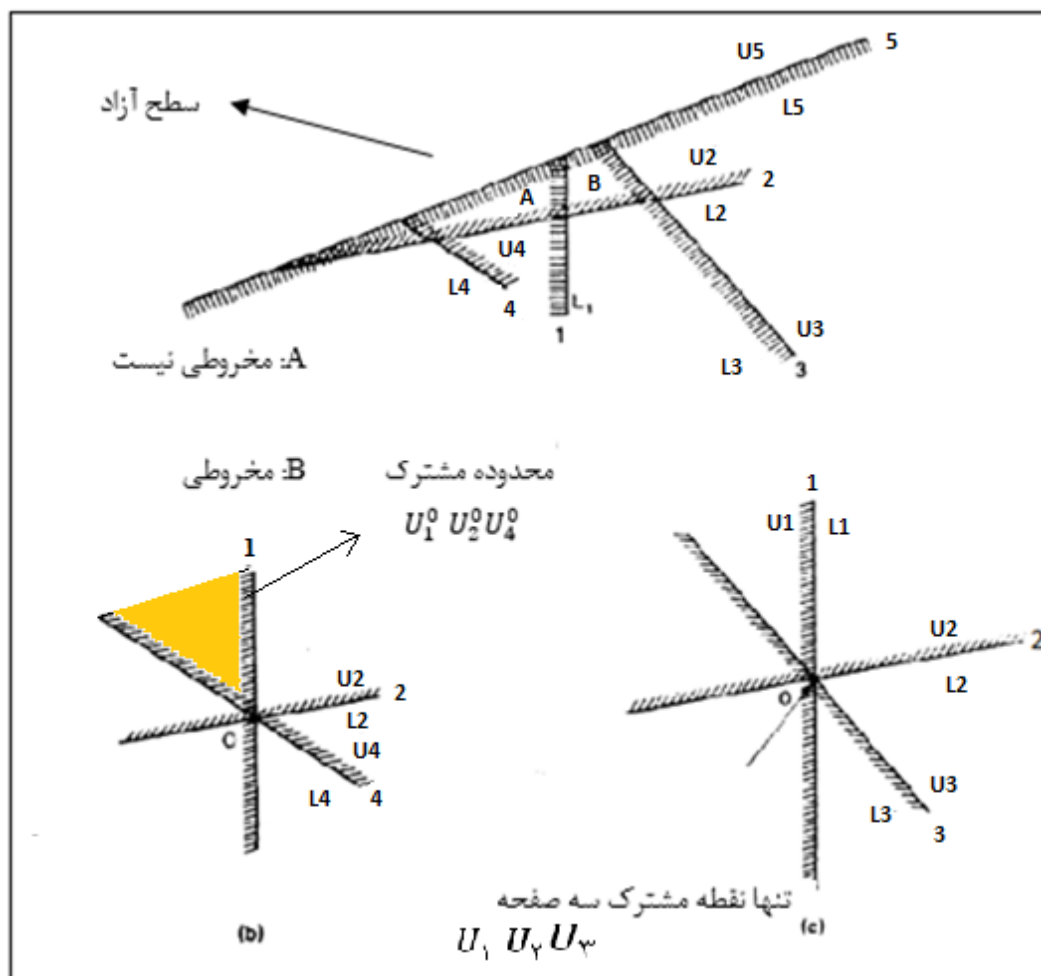
$$BP = JP \cap EP = \phi, JP = \phi \quad (۱۴-۲)$$

برای مثال، سنگ حفاری شده به وسیله تنها سطح آزاد P5 و چهار صفحه درزه P1, P2, P3 و P4 در شکل ۶-۲ نشان داده شده است. در این مثال بلوک A از هرم درزه  $U_1 U_2 U_4$  و هرم بلوک  $U_4 L_5$  تشکیل شده است. یک محدوده متداول برای این نیم فضای متداول وجود دارد که  $jp_A$  تهی نیست ولی  $BP_A$  تهی است. بنابراین بلوک A قابل جابجایی است. فرض کنید بلوک B دارای JP،  $U_3$ ،  $L_1 U_2$  و BP،  $L_1 U_2 U_3 L_5$  است. تنها نقطه مشترک نیم فضاهای منتقل شده مبدأ است. بنابراین  $jp_B$  تهی بوده و  $Bp_B$  نیز تهی است. لذا با توجه به تئوری قابلیت جابجایی بلوک B فاقد قابلیت جابجایی است. از آنجا که این بلوک محدود، است، لذا الزاماً مخروطی است.

## ۲-۲-۳-۷ تئوری قضیه محور تونل

تئوری قضیه محور تونل: JP، یک بلوک قابل جابجایی در تونل است اگر و فقط اگر  $\vec{a} \notin jp$  یعنی محور تونل در jp قرار نگیرد. محور تونل متعلق است به هر نیم فضایی که اجتماع این نیم فضاهای EP را تعیین می کند، و بنابراین  $EP \cap JP$  باید a را در برگیرد و با توجه به این قضیه تهی نیست (Choi Yam Ming, 2006).

اگر  $a \in jp$  یا  $-a \in jp$  سپس  $JP \cap EP \not\subset \pm a$  بنابراین  $jp \cap EP \neq \phi$  اما این یک تضاد است و بلوک نمی تواند حرکت کند.



شکل ۶-۲ مثالی از بلوک مخروطی و یک بلوک دارای قابلیت جابجایی، مثال دو بعدی (Goodman and Shi 1985)

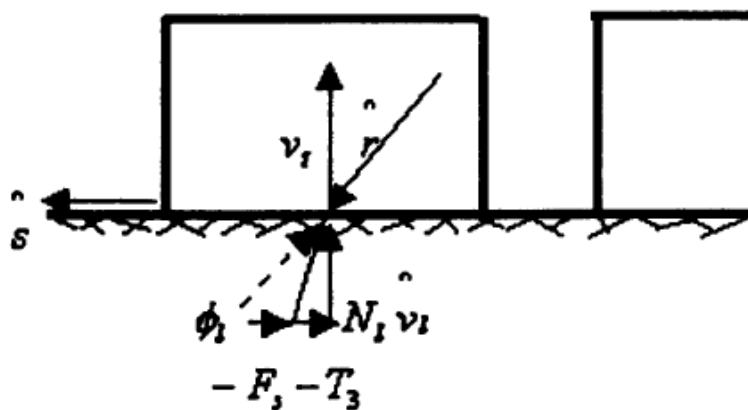
#### ۴-۷-۲-۲ تحلیل تعادل حدی

بر اساس جهت‌گیری‌های نسبی از درزه و محیط احاطه‌کننده بلوک، تحلیل تعادل حدی می‌تواند بلوک‌های قابل جابجایی و بالقوه ناپایدار را تعیین کند. اساس تحلیل به جهت لغزش<sup>۱</sup>، تمایل سقوط<sup>۲</sup>، نیروی برآیند<sup>۳</sup> و تمیز دادن بلوک‌ها بستگی دارد. تحلیل تعادل حدی با در نظر گرفتن زاویه اصطکاک بر روی صفحات بلوک را ایجاد و نیروی نگهداری مورد نیاز را تعیین می‌کند. مفهوم شکل برداری این تحلیل در شکل ۷-۲ نشان داده شده است (Yam Ming, 2006).

<sup>۱</sup> Sliding

<sup>۲</sup> Falling

<sup>۳</sup> Resultant force



شکل ۷-۲: دیاگرام نیروی بر روی سطح لغزشی یک بلوک (Yam Ming, 2006)

برآیند نیروهای مؤثر وارد بر بلوک ( $r$ ) شامل وزن، نیروی ناشی از تراوش آب یا فشار خارجی آب<sup>۱</sup>، نیروی اینرسی<sup>۲</sup> و نیروی نگهداری ناشی از میل مهارها<sup>۳</sup> می‌باشند.  $r$  نیروی برآیند فعال<sup>۴</sup> نامیده می‌شود.  $N_l$  نیروی عکس‌العمل در سطح لغزش است (Goodman and Shi, 2006).

$$\vec{N} = \sum_l N_l \vec{V}_l \quad (15-2)$$

که  $v_l$  بردار نرمال واحد صفحه  $l$  ساختاری بلوک و  $N_l$  نیروی عکس‌العمل نرمال در سطح لغزش  $l$  برآیند نیروهای اصطکاکی مماسی است در رابطه (۱۵-۲) داریم:

$$\vec{T} = \sum_l \tan \varphi_l \vec{s} \quad (16-2)$$

که  $\varphi_l$  زاویه اصطکاک صفحه ساختاری و  $\vec{s}$  جهت حرکت بلوک، با توجه به مؤلفه‌های نیرو در بالا وضعیت مکانیکی بلوک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\vec{F} = \vec{r} + \sum_l N_l \vec{V}_l - T \vec{s} \quad (17-2)$$

<sup>۱</sup> External water pressure

<sup>۲</sup> Inertia force

<sup>۳</sup> Rock bolts

<sup>۴</sup> Active resultant force

جدول ۲-۲ توصیف مکانیکی بلوک با توجه به شرایط آن (Goodman and Shi, 2006)

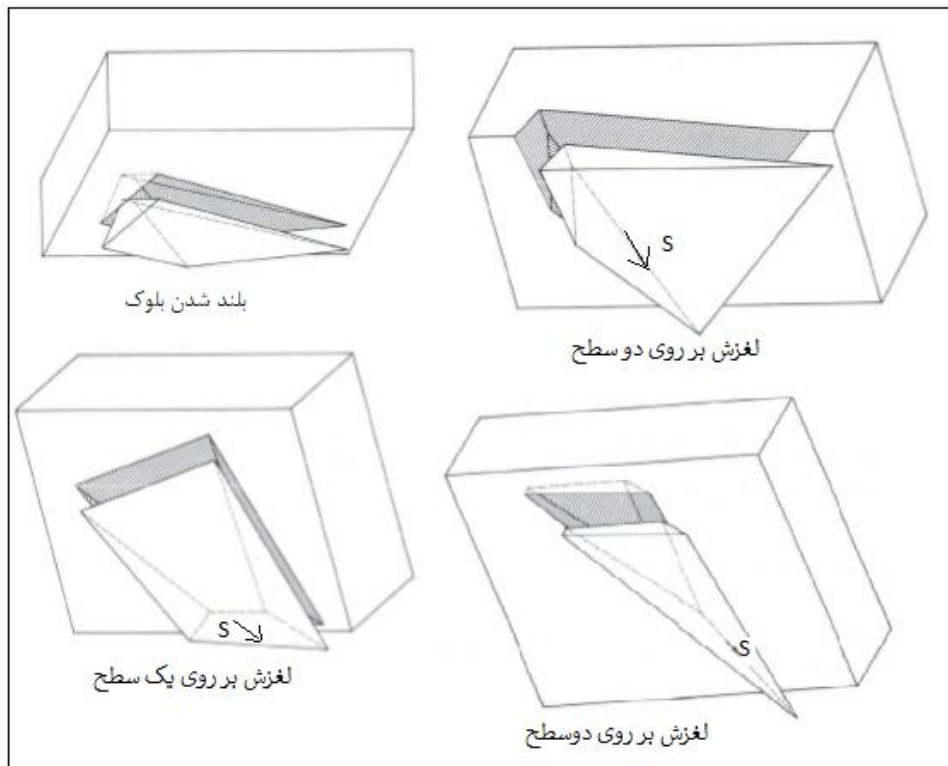
| شرایط | توصیف وضعیت بلوک                                                         |
|-------|--------------------------------------------------------------------------|
| ۱     | $F > 0$<br>در این شرایط بلوک مورد نظر به عنوان بلوک کلیدی شناخته می‌شود. |
| ۲     | $F = 0$<br>در این شرایط بلوک در وضعیت بحرانی قرار دارد.                  |
| ۳     | $F < 0$<br>در این شرایط بلوک در وضعیت پایدار می‌باشد.                    |

بلوک‌ها به‌طور کلی به چند حالت جابجا می‌شوند: (۱) بلند شدن / سقوط (۲) لغزش روی یک سطح (۳) لغزش روی دو سطح (۴) ترکیبی از لغزش و چرخش که در شکل ۲-۸ نشان داده شده‌اند (نوروزی ۱۳۸۸).

۲-۲-۷-۵ بلند شدن و سقوط

هنگامی که هیچ یک از سطوح بلوک با سنگ دربرگیرنده آن در تماس نباشد حالت گسیختگی به صورت سقوط است. این حرکت بلوک مستقل از هر صفحه درزه است. جهت  $\vec{S}$  کاملاً با جهت نیروی  $r$  برابر است.

$$\vec{S} = \vec{r} \quad (2-18)$$



شکل ۲-۸ حالت های جابجایی بلوک (نوروزی ۱۳۸۸)

#### ۲-۲-۶-۷-۲-۲ لغزش بر روی یک سطح

بلوک تنها بر روی یک صفحه درزه لغزش دارد. بلوک از سطح های دیگر جدا شده و تنها بر روی

یک سطح لغزش می کند و جهت نیروی تماسی سطح در جهت نیروی لغزش است.

$$\vec{S} = \vec{S}_i \text{ و } \vec{V}_i \cdot \vec{r} \leq 0, \text{ در اینجا } \vec{S}_i = \frac{(\vec{n}_i \times \vec{r}) \times \vec{n}_i}{|\vec{n}_i \times \vec{r}|} \quad (19-2)$$

که  $\vec{n}_i$  بردار یکه نرمال بر صفحه،  $\vec{S}_i$  تصویر استریوگراف  $r$  در صفحه  $i$  است.

#### ۲-۲-۷-۷-۲-۲ لغزش بر روی دو سطح

هنگامی بلوک می توان بر روی دو صفحه غیر موازی لغزش کند که در آن جهت لغزش بلوک بر

روی فصل مشترک دو صفحه باشد، در این صورت لغزش بر روی دو سطح اتفاق می افتد.

$$\vec{V}_i \cdot \vec{S}_j \leq 0, \vec{V}_j \cdot \vec{S}_i \leq 0, \vec{S}_i = \frac{\vec{n}_i \times \vec{n}_j}{|\vec{n}_i \times \vec{n}_j|} \text{Sign}[(\vec{n}_i \times \vec{n}_j) \times \vec{r}] \quad (20-2)$$

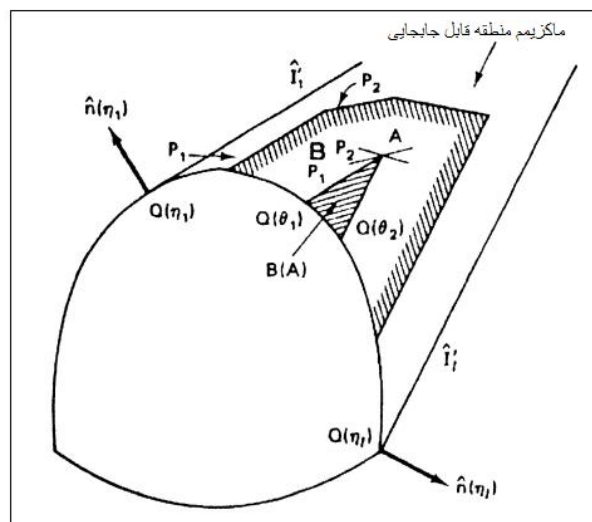
که  $\vec{n}_i$  و  $\vec{n}_j$  بردار یکه نرمال صفحات درزه  $i$  و  $j$  می باشند. همچنین  $\vec{S}_i$  و  $\vec{S}_j$  تصویر بردار  $\vec{r}$  در

صفحات درزه  $i$  و  $j$  هستند.

## ۸-۲-۲ قضیه ناحیه ماکزیمم قابل جابجایی در مقطع تونل

همان‌طور که در شکل ۹-۲ نشان داده شده است، "حداکثر ناحیه قابل جابجایی" فقط در صورتی که  $jp$  به وسیله صفحات مماسی و مقطع منحنی شکل تونل محدود شده باشد وجود دارد. فرض کنید  $\{U(\vec{n}, Q)\}$  بیانگر نیم‌فضای در برگیرنده  $\vec{n}$  باشد که مرز آن از نقطه  $Q$  می‌گذرد. بدین ترتیب اگر بلوک  $B$  یک بلوک قابل جابجایی برای  $JP$  در استوانه تونل باشد، در این صورت  $B$  به ناحیه قابل جابجایی ماکزیمم  $JP$  تعلق خواهد داشت (Yam Ming, 2006). یعنی:

$$BC\{U(-\vec{n}(\eta_1), Q(\eta_1)) \cap U(-\vec{n}(\eta_l), Q(\eta_l))\} \quad (21-2)$$

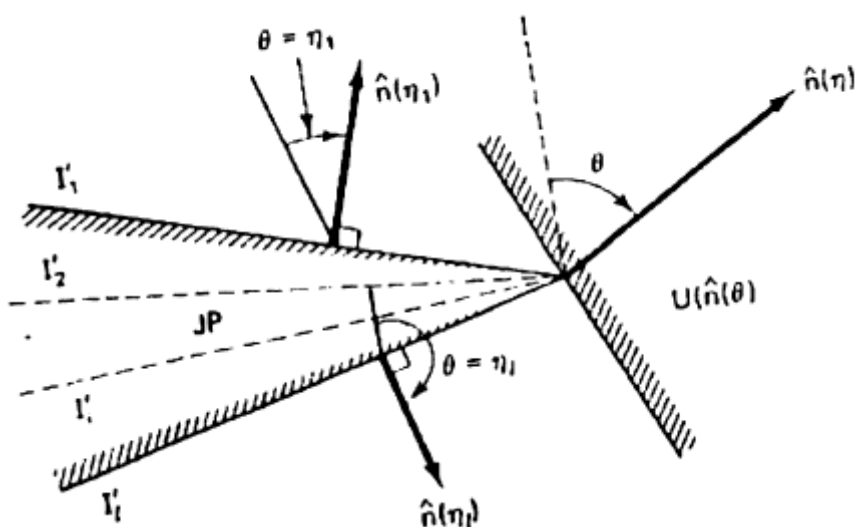


شکل ۹-۲ ماکزیمم منطقه قابل جابجایی (Yam Ming, 2006)

شکل ۱۰-۲ مقطعی عمود بر  $\vec{a}$  را نشان می‌دهد. بلوک قابل جابجایی  $B$  از  $JP$  وجود خواهد داشت به‌طوری‌که تصویر  $B$  روی مقطع عمود بر  $\vec{a}$  دقیقاً با تصویر ناحیه قابل جابجایی ماکزیمم از  $JP$  برابر باشد. این بلوک، بلوک کلیدی ماکزیمم است. در این شکل  $\vec{I}_1$  و  $\vec{I}_l$  (تصویر ارتوگرافیک لبه‌های فرین  $jp$ ) مماس‌هایی بر مقطع تونل در نقاط  $Q(\eta_1)$  و  $Q(\eta_l)$  هستند. ناحیه بین این مماس‌ها و دیواره تونل، ناحیه قابل جابجایی ماکزیمم است.  $B$  یک بلوک قابل جابه‌جایی بوده و تا جایی امکان بزرگ شدن

<sup>۱</sup> Extreme eddges

دارد که لبه‌های انتهایی آن به  $\vec{l}_1$  و  $\vec{l}_l$  برسد. ناحیه مشابهی نظیر  $A$ ، که بین خطوط موازی با  $\vec{l}_1$  در  $Q(\theta_1)$  و  $\vec{l}_l$  در  $Q(\theta_2)$  محدود شده است، تنها وقتی می‌تواند قابل جابجایی باشد که  $\theta_1$  و  $\theta_2$  بین  $\eta_1$  و  $\eta_l$  قرار گیرند ( $\eta_1 < \theta_1 < \theta_2 < \eta_l$ ).



شکل ۱۰-۲ تصویر jp در مقطع تونل (Goodman and Shi, 1985).

Goodman و shi در سال ۱۹۸۵ تعداد بلوک‌ها را با شرایط مختلف تقسیم‌بندی کردند این تقسیم‌بندی در جدول (۴-۲) آمده است. مشاهده‌های متعددی وجود دارد:

❖ همیشه برای حالتی که دسته‌درزه تکراری نداشته باشیم تنها دو بلوک نامحدود وجود دارد و

برای بقیه موارد بلوک نامحدود وجود ندارد.

❖ طبق قضیه محور تونل، jp معرف یک بلوک نامحدود خواهد بود اگر و فقط اگر  $\vec{a} \in jp$  یا

$-\vec{a} \in jp$  باشد. از آنجا که  $\vec{a}$  در تصویر استریوگرافیک به صورت یک نقطه است، لذا فقط یک

jp وجود خواهد داشت که شامل  $\vec{a}$  باشد. همزاد این jp،  $-\vec{a}$  را در بر می‌گیرد.

جدول ۳-۲ تعداد بلوک‌ها و انواع مختلف آن‌ها در تونل (Goodman and Shi, 1985)

| تعداد کل ترکیبات ممکن از نیم-فضاها تمام هرم‌ها                               | تعداد هرم‌های درزه غیر تکراری | تعداد بلوک‌های مخروطی | تعداد بلوک‌های قابل جابجایی | تعداد بلوک‌های نامحدود | شرایط             |
|------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------|
| بدون درزه تکراری                                                             | $n^2 - n + 2$                 | $2^n - (n^2 - n + 2)$ | $n^2 - n$                   | 2                      | $n \geq 1$        |
| تنها یک دسته درزه تکرار شده باشد.                                            | $2(n-1)$                      | $n(2^{n-1} - 2(n-1))$ | $2(n-1)$                    | 0                      | $n \geq 2$        |
| تکرار هر یک از درزه‌ها به شرط تکرار یک درزه در هر مرتبه                      | $2n(n-1)$                     | $n[2^{n-1} - 2(n-1)]$ | $2n(n-1)$                   | 0                      | $n \geq 2$        |
| تنها دو درزه تکرار شده باشد                                                  | 2                             | $2^{n-2} - 2$         | 2                           | 0                      | $n \geq 3$        |
| تکرار هر دو درزه از کل درزه‌ها به شرط تکرار فقط دو درزه در هر مرتبه          | $n(n-1)$                      | $n(n-1)(2^{n-3} - 1)$ | $n(n-1)$                    | 0                      | $n \geq 3$        |
| تنها m درزه تکرار شده باشد                                                   | 0                             | $2^{n-m}$             | 0                           | 0                      | $n \geq m \geq 3$ |
| تکرار m درزه از کل درزه‌ها به شرط آنکه در هر مرتبه فقط m درزه تکرار شده باشد | 0                             | $c_n^m \cdot 2^{n-m}$ | 0                           | 0                      | $n \geq m \geq 3$ |

### ۳-۲ مقدمه‌ای بر روش‌های احتمالاتی تحلیل ساختاری بلوک

اخیراً در کشور سازه‌های زیرزمینی مانند تونل، مغارهای ذخیره‌سازی انرژی و نیروگاه‌های زیرزمینی به طور گسترده‌ای در حال توسعه می‌باشند. در چنین حفاری‌هایی مانند تونل یکی از مهم‌ترین مشکل‌ها سقوط اتفاقی بلوک‌های سنگی که بر روی سطح تونل به وسیله ناپیوستگی‌های توده‌سنگ

تشکیل می‌شوند، است. برای پیش‌بینی لغزش یا سقوط بلوک سنگی به تحلیل قابلیت جابجایی بلوک‌های سنگی بر اساس پارامترهای ناپیوستگی در توده‌سنگ اطراف تونل نیاز است. یکی از تحلیل‌های شاخص که بلوک‌های قابل جابجایی را در تونل تشخیص می‌دهد تئوری بلوک است. تئوری بلوک تحلیل پایداری بلوک‌های سنگی اطراف تونل را انجام می‌دهد. یک روش نسبتاً ساده که از جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها (شیب و جهت شیب) و زاویه اصطکاک هر دسته‌درزه را به عنوان پارامترهای ورودی استفاده می‌کند. ولی این نظریه چندین فرضیه داد: (۱) فرض می‌شود که سطوح درزه‌ها در تمام حجم مورد بررسی (بلوک کلیدی)، به‌طور کامل گسترش یافته باشند. بنابراین بر اساس این روش نمی‌توان نوع خاصی از حالت شکست را بر روی این تئوری اعمال کرد. (۲) یک جهت به عنوان نماینده چندین درزه در نظر گرفته می‌شود، بنابراین اگر جهت‌گیری مجموعه درزه‌ها در برخی موارد به شدت پراکنده باشند، یکی را به عنوان شاخص انتخاب شود، نتایج بسیار متفاوت از واقعیت خواهند بود (Mauldon, 1993). پایداری حفاری‌های سنگی به عوامل متعددی نظیر خواص مکانیکی توده سنگ، جهت‌گیری‌ها، خصوصیات شکست سنگ، شرایط هیدرولوژی، هندسه حفاری و غیره بستگی دارد. در تحلیل پایداری حفاری، این پارامترها با استفاده از تحقیقات برجا و یا آزمایشگاهی بدست می‌آیند. این پارامترها یک مقدار منحصر به فرد ندارند و در یک محدوده معین دارای تغییرات بالایی می‌باشند. با استفاده از تحلیل تعادل حدی از میانگین مقادیر این پارامترها برای بدست آوردن ضریب ایمنی قطعی جهت نشان دادن پایداری حفاری استفاده می‌کنند. با این وجود توصیف قطعی پایداری حفاری عدم قطعیت را شامل نمی‌شود. بنابراین اغلب کافی نیست یا نادرست و گاهی هم گمراه‌کننده است. برخی از محققان به این عدم قطعیت‌ها در پایداری حفاری‌های سنگی پرداخته‌اند (Tyler, et al, 1991; Hatzor and Goodman, 1992; Rethati, 1988; Piteau, 1977). بسیاری از این محققان با استفاده از تحلیل احتمالاتی به این نتیجه رسیدند که تحلیل احتمالاتی درک بهتری از پایداری حفاری را نسبت به روش‌های قطعی دارد.

### ۱-۳-۲ روش‌های طراحی احتمالاتی

طراحی احتمالاتی، روشی اصولی برای بررسی اثر تغییر هر پارامتر بر پایداری فضاها و زیرزمینی است. پس از آن که توزیع احتمال ضریب اطمینان محاسبه شد، از روی آن می‌توان، احتمال گسیختگی بلوک‌های تشکیل شده در فضای زیرزمینی را تعیین نمود. برای بکارگیری تحلیل احتمالاتی در طراحی، لازم است که بازه‌های قابل قبول احتمال گسیختگی در شرایط مختلف ساختاری، آن چنان که ضریب اطمینان هم وجود دارد در نظر گرفته شوند (طاهری، ۱۳۹۳).

#### ۱-۳-۲-۱ تابع توزیع

در تحلیل احتمالاتی، محدوده‌ای از مقادیر تعریف شده با تابع چگالی احتمال به هر پارامتر غیرقطعی تخصیص داده می‌شود. توابع توزیع مناسب در کاربردهای ژئوتکنیکی، مثلاً، نمایی منفی، بتا و نرمال می‌باشند. در این تحقیق از تابع توزیع بتا برای متغیرها استفاده شده است. توزیع بتا، توزیع احتمالی پیوسته‌ای است که بر بازه ۰ تا ۱ تعریف می‌شود و دارای دو پارامتر شکل<sup>۱</sup>  $\alpha \geq 0$  شکل (حقیقی) و  $\beta \geq 0$  شکل (حقیقی) است. این توزیع حالت خاصی از توزیع دریکله می‌باشد. تابع چگالی توزیع بتا عبارت است از (Gbur, 1981):

$$\frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}, 0 \leq x \leq 1 \quad (22-2)$$

که مقدار میانگین آن

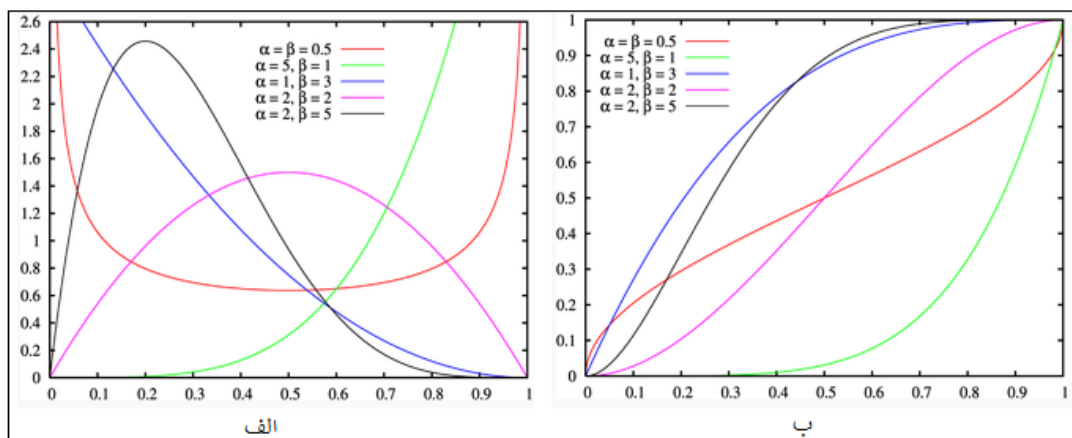
$$\frac{\alpha}{\alpha + \beta} \quad (23-2)$$

و واریانس برابر است با

$$\frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)} \quad (24-2)$$

<sup>۱</sup> در علم آمار و احتمالات پارامتر شکل به پارامتری گفته می‌شود که با تغییر آن، شکل تابع توزیع احتمالی تغییر می‌نماید.

از آن جهت که داده‌های ژئوتکنیکی در بیشتر موارد، در محدوده خیلی بیش‌تر یا کم‌تر پیرامون مقدار مقداری معین واقعی نیستند. در چنین شرایطی توزیع بتا مناسب است که نقاط حداکثر و حداقل آن معین بوده و می‌تواند یکنواخت، متمایل به چپ یا راست، به شکل J و U باشد (طاهری، ۱۳۹۳). در شکل ۲-۱۱ الف و ب نمودار چگالی و توزیع تابع بتا را با مقادیر پارامترهای متفاوت نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۱ الف) چگالی تابع بتا با مقدار متفاوت پارامترهای  $\alpha, \beta$  ب) تابع توزیع بتا با مقدار متفاوت پارامترهای  $\alpha, \beta$

## ۲-۱-۳-۲ احتمال گسیختگی

احتمال گسیختگی همانند ضریب اطمینان با توجه به نسبت نیروهای محرک به نیروهای مقاوم تعیین می‌شود. یکی از روش‌های رایج در محاسبه ضریب قابلیت اطمینان روش مونت کارلو است. روش مونت-کارلو یک الگوریتم محاسباتی است که از نمونه‌گیری تصادفی برای محاسبه نتایج استفاده می‌کند. روش‌های مونت-کارلو معمولاً برای شبیه‌سازی سیستم‌های فیزیکی، ریاضیاتی و اقتصادی استفاده می‌شوند. از طرف دیگر روش مونت کارلو یک طبقه از الگوریتم‌های محاسبه‌گر می‌باشند که برای محاسبه نتایج خود بر نمونه‌گیری‌های تکرارشونده تصادفی اتکا می‌کنند (طاهری ۱۳۹۳). روش‌های مونت کارلو اغلب زمان انجام شبیه‌سازی یک عملیات ریاضیاتی یا فیزیکی استفاده می‌شوند. به دلیل اتکای آن‌ها بر محاسبات تکراری و اعداد تصادفی یا تصادفی کاذب، روش‌های مونت کارلو اغلب به گونه‌ای تنظیم می‌شوند که توسط رایانه اجرا شوند. گرایش به استفاده از روش‌های مونت کارلو

زمانی بیشتر می‌شود که محاسبه پاسخ دقیق با کمک الگوریتم‌های قطعی ناممکن یا ناموجه باشد.  
(Hubbard , 2007).

مزیت خاص تحلیل مونت کارلو قابلیت استفاده از آن برای انواع مختلف توزیع و هر تعداد متغیر مستقل یا غیرمستقل است. تحلیل مونت کارلو از چهار مرحله زیر تشکیل می‌شود:

- ۱- توزیع احتمالاتی برای هر پارامتر ورودی مشخص می‌شود.
- ۲- مقادیر تصادفی هر پارامتر ایجاد می‌گردد.
- ۳- مقادیر نیروهای مقاوم و محرک محاسبه و تعیین می‌گردد که آیا نیروی مقاوم بیش از نیروی محرک می‌باشد یا خیر.
- ۴- این روند،  $N$  بار تکرار و سپس احتمال گسیختگی برای هر بلوک تعیین می‌شود.

## ۲-۴ جمع‌بندی

در این فصل ابتدا مبانی تئوری بلوک بیان شده است و سپس روابط اصلی تئوری بلوک برای شناسایی انواع بلوک و همچنین بدست آوردن بردار جهت لغزش هر بلوک بررسی شده است. در پایان بر اساس نیروی لغزش بدست آمده در مورد پایداری بلوک تصمیم گرفته می‌شود. اگر این نیرو کمتر از صفر باشد بلوک پایدار است و اگر بزرگ‌تر از صفر باشد ناپایدار و اگر برابر با صفر باشد بلوک در شرایط بحرانی قرار دارد. تعداد بلوک‌های تشکیل شده در تونل در شرایط مختلف نیز بررسی شده است. در آخر نیز روش احتمالاتی مورد استفاده در این تحقیق آورده شده است.



فصل سوم

# مرور ادبیات

در دوران پیشرفت فناوری که اخیراً ابزارهای تحلیلی دقیق و قوی در اختیار است، آرزوی خلق اصول بنیادی در مهندسی سنگ، بسیار معقول است. اما هنوز باید با واقعیت‌های سخت و پیچیده‌ای برخورد نمود که کار را دشوار می‌سازد. اولاً سنگ به عنوان یک ماده مهندسی کاملاً متغیر بوده و مواد سنگی داخل زمین رفتارهای مختلف مکانیکی ممکن را از خود نشان می‌دهند. ثانیاً، سنگ‌ها با بسیاری از مواد دیگر که ساخته دست بشر هستند، تفاوت کامل دارند و حضور ترک‌ها و نقاط ضعف متعدد سبب ناپیوستگی در سنگ و تقسیم آن به قسمت‌هایی با رفتارهای متفاوت می‌گردد. سنگ‌ها عموماً دارای سطوح ضعیف بسیاری هستند که بلوک‌های مجزا را به صورت کاملاً درگیر با یکدیگر، در کنار هم قرار می‌دهند. چنین سنگ‌هایی را سنگ‌های ناپیوسته<sup>۱</sup> می‌نامیم (Goodman, 1985). در این فصل تحقیق کارهای انجام شده در زمینه تئوری بلوک و همچنین تئوری بلوکی احتمالاتی به صورت خلاصه آورده شده است.

### ۳-۲ تحلیل پایداری تونل سنگی

شرایط زمین‌شناسی در طول تونل اغلب غیرقابل پیش‌بینی و ممکن است غیرعادی باشد. میزان دقت اطلاعات و داده‌های محدوده مشخص نیست. توده سنگی که داخل آن حفاری صورت می‌گیرد تا زمانی که جبهه کار حفاری به آن نرسیده، پنهان است. با این حال این پارامترهای غیرقابل پیش‌بینی معمولاً نقش مهمی در بودجه و کنترل ریسک دارند. برای بررسی این عدم قطعیت‌های ذاتی و طراحی خاص بر روی این پارامترها بسیاری از روش‌های عددی، تحلیلی، تجربی و مشاهداتی توسعه یافته است (Yam Ming 2006).

مرسوم‌ترین روش در طراحی مهندسی سنگ مبتنی بر طبقه‌بندی توده سنگ است. در سیستم کمی از طریق تخمین کیفیت و کمیت پارامترهای معین بر روی توده سنگ خاص، حداقل امتیاز به

---

<sup>۱</sup> Discontinuous rocks

ضعیف‌ترین سنگ و حداکثر امتیاز نیز به توده سنگ عالی نسبت داده می‌شود. سپس خروجی آن به صورت حداکثر زمان پابرجایی دهانه فعال<sup>۱</sup> یا درجه کیفیت کلی سنگ و غیره است (Bineniawki, 1988, Lauffer, 1989). در حفاری‌های زیرزمینی نیز این روش‌ها به کاررفته است (Bineniawki, 1974, etc; Barton, Lien and Lunde, 1973). به‌طور کلی سیستم طبقه‌بندی توده سنگ یک طبقه‌بندی ژئومکانیکی است، رتبه‌بندی توده سنگ (RMR) توسط بیناویسکی در سال ۱۹۷۳ و سیستم Q به وسیله بارتون و همکاران در سال ۱۹۷۴ پیشنهاد شده‌اند. بسیاری از محققین با استفاده از خلاصه از این تحقیقات این سیستم‌ها را بروز کرده‌اند و تعدادی هم از ارتباط این دو پیشنهاد کرده‌اند، مانند گریمستاد و بارتن ۱۹۹۳، بیناویسکی ۱۹۸۹، گوئل و همکاران ۱۹۹۶، سینگ و همکاران ۱۹۹۲ و غیره (Yam Ming, 2006). بعضی از ترکیب این سیستم‌ها نمودارهای جهت تخمین میزان فشار وارده بر توده سنگ با کیفیت‌ها و هندسه‌های مختلف حفاری فراهم کرده‌اند (Barton et al., 1974, 1975; Goel et al., 1996). با توجه به سادگی و طبیعت این روش‌ها، امروزه به‌طور گسترده در صدها پروژه تونلی به کار می‌روند. با استفاده از آن‌ها مهندس طراح می‌تواند نگهدارنده I را اجرا کند، خصوصاً اگر یک تغییر ناگهانی در طول حفاری اتفاق بیفتد. به‌طور کلی روش‌های طبقه‌بندی توده سنگ قابل اعتماد به نظر می‌رسند. با این حال محدودیت‌هایی وجود دارد که این روش‌ها به‌طور کلی پایداری بلوک‌های خاص را نادیده می‌گیرند. در حقیقت تقاطع ناپیوستگی‌های معین با توجه به هندسه مانند جهت‌گیری، فاصله‌داری، زاویه شیب و جهت شیب دسته‌درزه‌ها به‌شدت بر روی پایداری و جابجایی بلوک‌های که قابلیت جابه‌جایی دارند تأثیرگذار است. بلوک‌های قابل جابجایی پشت جبهه کار حفاری دارای رفتار کنترلی می‌باشند که ممکن است باعث گسیختگی‌های بزرگ شود.

---

<sup>۱</sup> active span

### ۳-۳ تحقیق‌های انجام شده در زمینه تئوری بلوکی

در سال ۱۹۸۱ گودمن و شی یک روش تحلیلی به نام تئوری بلوک معرفی کردند تا این فاکتورها را در نظر بگیرد. نظریه بلوکی با استفاده از ابزار فرمول‌های ریاضی مهندس را قادر می‌سازد که پایداری و قابلیت جابجایی بلوک‌های که به وسیله تقاطع ناپیوستگی‌ها به وجود می‌آیند را تعیین کند. پس از شناسایی طرح از ترکیب دسته‌درزه‌های معین در سه جهت، این نظریه می‌تواند تعیین کند که کدام ترکیب نیم فضاها بلوکی که قابلیت جابجایی را دارد تشکیل می‌دهد. بلوکی که امکان مواجهه با آن وجود دارد بلوک کلیدی می‌نامند. این تئوری متعاقباً اندازه، شکل و حالت‌های احتمالی شکست را نیز پیش‌بینی می‌کند. همانند روش‌های طبقه‌بندی توده سنگ نگهداری مورد نیاز بلوک‌ها در اثر فشارهای وارده را تعیین می‌کند؛ بنابراین تصمیم می‌گیرد که کدام بخش خاص تونل به نگهداری نیاز دارد. تفاوت روش‌های طبقه‌بندی توده‌سنگ با تئوری بلوک در مرحله برنامه‌ریزی پروژه می‌تواند در راستای انتخاب جهت‌گیری بهینه تونل به کار رود. هدف این است که کوچک‌ترین بلوک کلیدی ماکزیمم در یک توده سنگ مشخص ایجاد کنیم (Goodman and Shi, 1981; Kuzmaul, 1998). این کار تا حد زیادی در جهت تخمین بودجه و نگهداری‌های پیش‌نیاز کمک می‌کند. از این رو تئوری بلوک به‌طور گسترده‌ای در تحلیل پایداری فضاها و زیرزمینی پیشنهاد و به کار برده شده است (Hatzor et al, 2002; Fu et la., 2002). در سال ۱۹۸۹ ریچارد گودمن و شی به بررسی بلوک‌های کلیدی که از خط اثر درزه‌ها در نقشه‌های توسعه‌یافته دیواره‌های تونل ایجاد شده‌اند پرداختند. در این تحقیق از یک روش کلی جهت تحلیل بلوک کلیدی برای سطوح استوانه‌ای با تولید خط اثر به صورت واقعی و آماری استفاده شده است. در تحلیل انجام‌شده برای انحنای تونل طول خط اثرها بی‌نهایت در نظر گرفته شده است. سپس با استفاده از تئوری بلوک تعمیم‌یافته، ماکزیمم بلوک کلیدی که از بررسی اثرات درزه در روی نقشه به وجود می‌آید مورد بررسی قرار گرفته است. روش‌های بحث شده در اینجا برای تونل استوانه‌ای از هر شکل مقطع و هر جهت شامل تونل‌های شیب‌دار و چاه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. به‌طور کلی با توجه به این تحقیق این روش در موارد زیر کاربرد

دارد (Goodman, 1989):

(۱) مطالعات پارامتری اثرات درزه‌ها برای بلوک کلیدی و پوشش تونل، این پارامترها عبارت‌اند از:

میانگین فاصله‌داری درزه‌ها، طول درزه‌ها، اتصال درزه‌ها و اندازه تونل

(۲) مطالعات طراحی اولیه پوشش تونل، در مرحله برنامه‌ریزی یا طراحی اولیه ماکزیمم بلوک کلیدی

می‌تواند از پارامترهای آماری درزه‌ها که از پارامترهای درزه اطراف حفاری‌های اکتشافی یا گمانه

بدست آمده‌اند، محاسبه می‌شود.

(۳) بازرسی سطح تونل در طول ساخت، از بروزسانی درزه‌های آماری سطح استخراجی تونل می‌-

توان برای محاسبه دقیق اندازه بلوک کلیدی استفاده نمود. بر اساس بررسی درزه‌های واقعی، و

بررسی نقشه نمای سه‌بعدی می‌توان طراحی نمود، و بلوک‌های قابل جابجایی را شناسایی کرد

نگهداری مورد نظر را طراحی کرد.

در سال ۱۳۷۸ موسوی و خسروی از نظریه بلوکی برای تشریح راستا جهت بهینه تونل استفاده کردند.

احداث سازه‌ای مانند تونل در توده‌سنگی با چندین دسته ناپیوستگی می‌تواند سبب رها شدن

بلوک‌های سنگ با اندازه‌های متفاوت گردد. بلوک‌هایی که کم‌ترین سطح تکیه‌گاهی را در اختیار دارند

از بحرانی‌ترین نحوه استقرار برخوردارند. سقوط و لغزش بلوک‌ها سبب تخریب پیرامون تونل خواهند

شد. سازوکارهای فنی و اقتصادی انتخاب جهتی برای حفر تونل که در آن کم‌ترین بلوک ناسازگار با

حالت تعادل شکل گیرد یا بلوک‌های دربرگیرنده پیرامون تونل ضمن داشتن حجم کم‌تر به واسطه

نحوه قرارگیری تمایل کم‌تری به سقوط یا لغزش داشته باشد، از دیدگاه سیستم نگهداری‌های اولیه و

ثانویه به ویژه در به کار بردن پیچ‌سنگ‌ها و رسیدن به زمان حداکثر خود ایستایی بسیار حائز اهمیت

است. لذا با در نظر گرفتن فرضیات نظریه بلوکی و به کمک شبکه‌های استریوگراف و نرم‌افزارهای

رایانه‌ای می‌توان حالت بهینه‌ای از ساخت و ساز درون سنگی را یافت که در آن نا ایستایی پیرامون

حفاریات به واسطه سقوط با لغزش بلوک‌ها از کم‌ترین احتمال نسبت به حالات دیگر برخوردار

است(موسوی و خسروی، ۱۳۷۸).

فلکاناز در سال ۱۳۷۹ تحلیل پایداری تکیه‌گاه‌های سد کارون ۴ را با استفاده از نظریه‌ی بلوکی انجام دادند. بدین منظور با استفاده از گسستگی‌های ساختاری توده‌ی سنگ، ابتدا بلوک‌های کلیدی شناسایی شده و سپس برآیند تنش‌های اعمال‌شده از طرف بدنه‌ی سد، نیروی آب، وزن بلوک‌ها و نیروی زلزله با استفاده از روش‌هایی چون تصاویر استریوگرافیک و تعادل حدی، به دست آمد است. با به کارگیری این داده‌ها در نظریه‌ی بلوکی، حالت‌های شکست و بزرگی نیروی لازم برای گسیختگی، به صورت تابعی از زاویه‌ی اصطکاک موجود در سطح گسستگی‌ها تعیین و در نهایت ضریب ایمنی محاسبه گردیده است. از بررسی‌های انجام‌شده مشاهده شده که کلیه‌ی بلوک‌های شناسایی‌شده در هر دو تکیه‌گاه سد کارون ۴، با مفروضات در نظر گرفته شده پایدار هستند. نتایج این بررسی نیز با روش تعادل حدی Hock&Bary مقایسه و مشاهده شده که ضریب ایمنی به‌دست‌آمده از نظریه‌ی بلوکی پایین‌تر از مقادیر بدست آمده از روش تحلیل تعادل حدی بوده و لذا حساسیت این روش به تغییر فاکتورهای مؤثر بر پایداری بلوک‌ها، بیشتر است(فلکاناز، ۱۳۷۹).

در سال ۲۰۰۳ اعتبارسنجی دو روش تئوری بلوک و تحلیل سه‌بعدی تغییرشکل ناپیوستگی‌ها(DDA) برای تحلیل پایداری گوه توسط Yeung و Jiang با استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی انجام شده است. نتایج نشان داد که روش تحلیل سه بعدی تغییر شکل نسبت به روش تئوری بلوک مناسب‌تر است.

YAM MING بر اساس مجموعه از داده‌های آماری به دست آمده از حفر تونلی در سنگ گرانتیت در کشور هنگ‌کنگ به تحلیل پایداری، جهت بهینه و نگهداری مورد نیاز تونل با استفاده از تئوری بلوک پرداخت. برای تحلیل تئوری بلوک داده‌های ورودی که شامل جهت‌گیری، فاصله‌داری و مقاومت اصطکاکی مجموعه دسته‌درزه‌ها و جهت‌گیری جبهه‌کار حفاری تونل می‌باشند، نیاز است. بنابراین این تئوری برای جایی که هندسه به وضوح تعریف شده باشد قابل اجراست. برای نشان دادن استفاده از نظریه بلوکی در مرحله بررسی سایت و مرحله ساخت یک تونل اکتشافی ثبت و برای نشان دادن

تصاویر استریو گرافیک انتخاب شده است. پس از ترسیم تراکم قطب‌ها در استریوگراف، ناپیوستگی‌ها از سه راه مختلف برای اطلاعات ورودی در تحلیل شناسایی شده‌اند.

۱. عمده ناپیوستگی‌های آماری تونل

این داده‌های ناپیوستگی نشان دهنده شرایط عمومی حفاری تونل است. تحلیل خروجی باید بیشترین شاخصه‌ها را در نظر بگیرد. که این می‌تواند در ارزیابی مجدد انتخاب جهت بهینه تونل به کار گرفته شود. مقایسه مختصری با شرایط میدانی موجود انجام گرفته که این برآورد با واقعیت همخوانی داشته است.

۲. با توجه به شرایط زمین‌شناسی در معرض، تحلیل احتمالاتی می‌تواند بر روی داده‌های موجود انجام شود، و بعد از آن تحلیل بلوک کلیدی انجام شود. سپس تحلیل‌های بعدی برای بخش دیگر ۲۲۱۹ متر آخر انجام شود.

تحلیل به صورت مجزا در سه بخش انجام شده است (Yam Ming, 2006).

۱. ارزیابی مجدد تونل هنگ‌کنگ

۲. آزمون برای انطباق بلوک با پیش‌بینی شرایط مورد استفاده

۳. ارزیابی مجدد برای انتخاب راستا بهینه تونل

علیرضا یاراحمدی بافقی و همکاران در سال ۱۳۸۶ از روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار را در تحلیل پایداری شیب سنگ‌های درزه‌دار مورد بررسی قرار داده که نشان می‌دهد روش گروه کلیدی جهت‌دار به جای بلوک کلیدی پایه به منظور یافتن گروه‌های بحرانی‌تر از بلوک‌های کلیدی در محاسبه تحلیل پایداری توده سنگ درزه‌دار استفاده می‌شود.

Wangsa از دو روش سینماتیکی<sup>۱</sup> و نظریه‌بلوکی برای تحلیل پایداری شیب سنگی جاده‌ای در مالزی

---

<sup>۱</sup> Kinematic

استفاده کرده است. از تحلیل سینماتیکی برای تحلیل پایداری برش شیب سنگی و همچنین برای بدست آوردن حداکثر زاویه شیب سنگی در جاده مورد نظر استفاده شده است. از روش تئوری بلوک کلیدی برای شناسایی انواع بلوک‌های مختلف در سطح مورد نظر استفاده شده است. در ابتدا داده‌ها به وسیله تصاویر استریونتی تحلیل شده و سپس تحلیل سینماتیکی جهت تعیین حداکثر زاویه شیب امن<sup>۱</sup> برای شیب سنگی و تئوری بلوکی برای تعیین انواع بلوک‌های کلیدی نوع ۱ و بلوک‌های کلیدی بالقوه نوع ۲ از شیب سنگی به کار می‌روند (wangsa, 2008).

در سال ۲۰۱۲ Michael روش تئوری بلوک را در سرریز سدی در شمال کالیفرنیا به کار گرفت تا بتواند بلوک‌هایی که قابلیت جابجایی و شکست دارند را شناسایی کند و به تحلیل پایداری بلوک مورد نظر بپردازد. برای نشان دادن اثر جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها بر روی بلوک‌هایی که قابلیت جابجایی دارند، نیاز است که ساختار سه‌بعدی توده سنگ با توجه به قابلیت فرسایش‌پذیری گنجانده شود (Michael, 2012).

برآورد نگهداری مورد نیاز سازه‌های زیرزمینی برای اهداف منطقی این سازه‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. Prasad با استفاده از تئوری بلوکی به تعیین فشار مورد نیاز نگهداری تونل‌ها و مغارها پرداخت. یک الگوریتمی بر مبنای روش تئوری بلوکی که پارامترهای زمین‌شناسی و مکانیکی سنگ را در نظر می‌گیرد برای تعیین فشار توسعه داده شده است. محدودیت‌های این روش این است که نباید تعداد دسته‌درزه‌ها کمتر از سه دسته‌درزه باشد، همچنین عرض بازشدگی تا ۲۵ متر باشد. این روش تمام بلوک‌هایی که از ۳ دسته‌درزه به بالا با صفحه‌ای حفاری شده تشکیل می‌شوند را تشخیص و فشار وارده از طرف سقف و دیوار را محاسبه می‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که فشار برآورده شده از تئوری بلوک برای زمین‌های غیر مچاله‌شونده<sup>۲</sup> با اطمینان خاطر برای طراحی سیستم نگهداری اولیه می‌تواند بکار رود (Prasad, 2013).

---

<sup>۱</sup> maximum safe slope

<sup>۲</sup> non-squeezing ground

زیر برش<sup>۱</sup> یک نوع از فضاهای مهم برای قرار دادن بلوک‌های معدنی درون فضای معدن زیرزمینی است. این فضا همچنین در هنگام انفجار زیرزمینی به علت اینکه بعد انفجار حجم مواد معدنی خردشده از حالت برجای آن بیشتر است به عنوان یک فضای جبران‌کننده نیز به کار می‌رود. در فرایند معدنکاری زیرزمینی در بدنه خردشده<sup>۲</sup> تحلیل پایداری بلوک‌های سه‌بعدی که در اطراف فضای زیرین تشکیل می‌شود بسیار مهم و حیاتی است. پایداری گوه‌ها عمدتاً<sup>۳</sup> به وسیله فاکتورهای هندسی و مقاومتی ناپیوستگی‌های توده سنگ و توزیع تنش درون توده سنگ کنترل می‌شود. در تحقیقی که توسط Jian-hua در سال ۲۰۱۶ انجام شده، پایداری فضای زیر برش در معدن مس و نیکل در کشور چین که به صورت زیرزمینی استخراج می‌شود، بر اساس تئوری بلوک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این‌گونه معادن که فضای زیربرش برای عملیات استخراج بکار برده شده تحلیل گوه سه‌بعدی ایجاد شده بسیار مهم است. پایداری فضای زیربرش در این معدن به وسیله تئوری بلوک و نرم‌افزار Unwedge، مورد تحلیل قرار گرفته است که نتایج نشان می‌دهد که مقدار فاکتور ایمنی جهت پایداری گوه ۱/۲ است (Jian-hua, 2016).

پایداری توده سنگ درزه‌دار به‌طور جدی برای پایداری یکپارچگی در طول ساخت و عملکرد ایمنی درازمدت مغارهای زیرزمینی در نیروگاه‌های برق‌آبی بسیار مهم است. بلوک‌های کلیدی نقش مهمی در پایداری یکپارچگی توده سنگ‌های درزه‌دار اطراف فضای مورد نظر را ایفا می‌کند، بنابراین تعیین مکان، اندازه و حالت شکست بلوک تصادفی مهم است. در سال ۲۰۱۷، Jia تحلیل پایداری توده سنگ درزه‌دار با تئوری بلوک توسعه یافته را برای مغار زیرزمینی در یک ایستگاه برق‌آبی انجام داد. در این تحقیق یک روش که از ترکیب تئوری بلوک کلیدی و الگوریتم انتقال نیرو توسعه یافته است، برای محاسبه دقیق فاکتور اطمینان احتمالی بلوک‌های کلیدی در توده‌سنگ درزه‌دار به کار گرفته است.

---

<sup>۱</sup> Undercut

<sup>۲</sup> fragment orebody

الگوریتم انتقال نیرو تعامل بین بلوک‌های داخلی را در نظر می‌گیرد. پس از بدست آوردن پارامترهای احتمالاتی درزه‌ها، از روش‌های استریوگرافی برای تعیین مکان درزه‌های خطرناک استفاده می‌شود. سپس از روش‌های تحلیل برداری برای شناسایی بلوک‌های تصادفی، جهت‌های لغزش بلوک کلیدی و فاکتور ایمنی برای تحلیل پایداری مغارهای زیرزمینی استفاده می‌شود. نتایج این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که این روش یک راهنمای قوی برای توسعه سیستم تقویتی توده‌سنگ درزه‌دار می‌باشد (Jia, 2017).

تئوری بلوک بیش از سی سال است که اختراع شده است و به تئوری پایه در مهندسی سنگ تبدیل شده است. اما هنوز نرم‌افزار بالغی مبتنی بر تئوری بلوک وجود ندارد، که یکی از محدودیت‌ها در توسعه و کاربرد این روش است. در سال ۲۰۱۷، Cheng و همکارانش یک نرم‌افزار جدید را به نام easy.KBT بر مبنای تئوری بلوک ارائه کردند. Easy.KBT برای تحلیل پایداری فضا‌های زیرزمینی و شیب‌های سنگی طراحی شده است. برای طراحی این نرم‌افزار از تئورهای پایه تئوری بلوک که توسط دکتر شی توسعه یافته‌اند استفاده شده است. خدمات این نرم‌افزار به این صورت است: اولاً ساختار برنامه بر اساس تئوری بلوک طراحی شده است و با تغییر ساختار برنامه مجدداً سازمان‌دهی می‌شود و کاربران می‌توانند از آن به‌طور پیوسته استفاده کنند، ثانیاً نرم‌افزار easy.KBT رابط کاربرپسندی را ایجاد می‌کند، که دشواری یادگیری و استفاده از نظریه بلوک را کاهش می‌دهد، ثالثاً پارامترها با جزئیات شرح داده شده‌اند، رابعاً نتایج تحلیل از مدل‌ها به‌صورت خودکار صادر می‌شود که برای کاربران مناسب است (Cheng, 2017).

### ۳-۴ تحقیق‌های انجام شده در زمینه تئوری بلوکی احتمالاتی

عدم اطمینان و تغییرپذیری در داده‌های جمع‌آوری‌شده ناپیوستگی‌ها از جمله جهت‌گیری و پارامترهای مقاومتی، طیف وسیعی از نتایج را در بر دارد. متأسفانه برای تحلیل‌های که از فاکتور ایمنی استفاده می‌کنند از پارامترهای که دارای مقداری مشخص هستند، بدون اینکه عدم قطعیت پارامتر را در نظر بگیرند، استفاده می‌کنند. بنابراین تحلیل قطعی درک درستی از عدم قطعیت‌ها و تغییرات را

ندارد و این یکی از مشکلات رایج در علوم زمین است. برای غلبه بر این مشکل روش‌های احتمالاتی بیش از یک دهه در تحلیل پایداری‌های توده‌سنگی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با این حال بیشتر تحلیل‌های احتمالاتی یک مدل قطعی را به عنوان بخشی از تحلیل قرار می‌دهند (park&west,2000). در سال ۲۰۰۰، West و Park یک رویکرد احتمالاتی را برای شکست گوه‌ها توسعه دادند. به عنوان بخشی از راه‌حل، احتمال ناپایداری سینماتیکی و جنبشی به‌طور جداگانه مورد ارزیابی قرار گرفته، و از ارزیابی این دو احتمال شکست مناسب بدست آمده است. برای ارزیابی این روش یک مطالعه موردی بر روی یکی از بزرگ‌ترین بزرگ‌راه‌های کارولینای شمالی، ایالات متحده اعمال شده است. نتایج این رویکرد احتمالاتی با حالت قطعی آن مقایسه شده است. نتایج بدست آمده کاملاً متفاوت بوده است. این تفاوت نشان می‌دهد که تحلیل قطعی، تغییرات شیب سنگ را به ویژه زمانی که پراکندگی در داده‌ها رخ می‌دهد را نشان نمی‌دهد (park&west,2000).

در سال ۲۰۰۴، Ahn و همکاران، تحلیل قابلیت جابجایی بلوک‌های سنگی را به وسیله تئوری بلوک و یک روش احتمالاتی برای پروژه‌ای مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه یک برنامه عددی برای تحلیل قابلیت جابجایی بلوک‌های سنگ با استفاده از نظریه بلوک توسعه داده شده است. این برنامه توسعه یافته پایایی درزه‌ها و تغییرات در جهت‌گیری درزه‌ها را در نظر می‌گیرد. پایایی درزه‌ها با استفاده از "مدل شکست Moldon 2D" مدل‌سازی شده است. تغییرات جهت‌گیری درزه‌ها برای بدست آوردن توزیع حجم احتمالی و توزیع فاکتورهای اطمینان احتمالی بلوک‌های سنگی در نزدیکی سطوح حفاری در نظر گرفته شده است. پس از آن برنامه عددی مورد نظر به منظور تحلیل پایداری یک مغار زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفت و نتایج آن با تحلیل بلوک‌های منحصربه‌فرد با استفاده از تئوری بلوک مقایسه شده است. در نهایت نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که روش تحلیل احتمالاتی برای بررسی رفتار بلوک‌های سنگی در یک وضعیت واقعی مناسب‌تر از نظریه بلوک بدون در نظر گرفتن بحث عدم قطعیت و احتمال پارامترهای تحلیلی بوده است. علاوه بر این می‌توان میزان حجم و

ایمینی بلوک‌های سنگی را برآورد کرد.

در سال ۲۰۱۲ CHEN تحلیل پایداری حفاری‌های سنگی را با استفاده از یک رویکرد احتمالاتی بررسی کرد. دشواری در برآورد احتمال شکست در یک حفاری زیرزمینی، پیچیدگی محاسبات ریاضی آن است. برای کاهش دشواری در محاسبات ریاضی از تقریب قابلیت اطمینان مرتبه دوم استفاده شده است. این روش احتمالاتی محاسبات را به طور قابل توجهی ساده و تحلیل پایداری نسبتاً پیچیده را آسان می‌کند. پایداری حفاری‌های سنگی، از جمله بحث‌های خاص در مورد احتمالات قابل جابجایی و احتمال شکست بلوک‌های کلیدی همان‌طور که در نظریه بلوکی تعریف شده است، است. مطالعات انجام گرفته در این روش نشان می‌دهد که توزیع مقادیر پارامترها نقش مهمی را بازی می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد بلوک‌هایی که با روش تئوری بلوکی پایدار در نظر گرفته شده‌اند یعنی فاکتور ایمینی آن‌ها بالاتر از مقدار پایه‌ای آن است، با استفاده از تحلیل احتمالاتی احتمال فروریزش یا شکست آن‌ها بالا است و این نشان می‌دهد که روش‌های احتمالاتی درک بهتری از شکست بلوک نسبت به روش تئوری بلوک بدون در نظر گرفتن بحث احتمالات دارند (CHEN, 2012).

در سال ۲۰۱۳، Zheng و همکاران تحلیل تئوری بلوک احتمالاتی برای شیب سنگی در معدنی روباز در آمریکا بررسی کردند. یک برنامه کامپیوتری جدید (pbtac)<sup>۱</sup>، توسعه یافته است. این کد هر دو تحلیل قطعی و احتمالی تئوری بلوک را انجام می‌دهد. پارامترهای جهت‌گیری و مقاومتی ناپیوستگی‌ها در این تحلیل احتمالاتی به کار گرفته شده‌اند. جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها به صورت یک تابع دومتغیره تصادفی که ارتباط بین شیب و جهت شیب را نشان می‌دهد آورده شده است. از برنامه pbtac برای تحلیل بخشی از معدن روباز در آمریکا استفاده شده است. از داده‌های زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی که از مطالعات میدانی و آزمایشگاهی بدست می‌آیند برای انجام این تحلیل استفاده می‌شود. تغییرات جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها منجر به تفاوت‌های مهمی بین تئوری بلوک احتمالاتی و قطعی شده است.

---

<sup>۱</sup> probabilistic block theory analysis code

نتایج نشان می‌دهد که انتخاب اندازه بزرگ‌ترین زاویه شیب ( $\alpha_{mssa}^1$ ) که با روش تئوری بلوک قطعی بدست آمده است، می‌تواند برای آن ناحیه ناامن باشد. به‌طور خلاصه نتایج نشان می‌دهد که تحلیل تئوری بلوک احتمالاتی از تحلیل تئوری بلوک قطعی در بدست آوردن اطلاعات اضافی و مهم با توجه به دامنه سنگ وضوح برتری دارد (Zheng, 2013).

شیب‌های سنگی از عمده نگرانی‌های پایداری ساختاری در جاده‌های کوهستانی هستند، به این دلیل که بلوک‌های سنگی در شکل و اندازه واقعی در فضای دیده شده و معمولاً پایداری شیب در دسترس نیست. ناپایداری‌های شیب سنگی به‌طور کلی به پارامترهای زمین‌شناسی و مکانیک سنگی مانند ناپیوستگی‌های درون سنگ بستگی دارد. در سال ۲۰۱۴، Quoc و Truong تحلیل پایداری شیب سنگی را با استفاده از تئوری بلوکی و رویکرد احتمالاتی بررسی کردند. در ابتدا با استفاده از روش تئوری بلوک، بلوک‌های با قابلیت جابجایی شناسایی می‌شوند و حجم، هندسه، مکان بلوک‌ها تعیین می‌شود. با این حال فاکتورهای زیادی وجود دارد که می‌تواند بر پایداری شیب‌های سنگی مؤثر باشند، مانند شیب و جهت شیب جبهه شیب سنگی، شکستگی‌ها، چسبندگی، زاویه اصطکاک ناپیوستگی‌ها و خواص مقاومتی و... عدم قطعیت پارامترهای ورودی به عنوان داده‌های در دسترس برای تحلیل احتمالاتی در نظر گرفته می‌شود. فاکتور اطمینان نهایی برای هر حالت شکست با استفاده از روش تعادل حدی بدست می‌آید (Truong & Quoc, 2014).

در سال ۲۰۱۵، Yousef Mirzaeian و همکاران تحلیل احتمالاتی ساختاری تونل (TUSPA<sup>۲</sup>) را با استفاده از اولین روش قابلیت اطمینان (FORM<sup>۳</sup>) انجام دادند. در TUSPA یک تابع عملکرد تونل بر طبق مرز بین ساختار پایدار و ناپایدار تعریف شده است. در این روش این امکان وجود دارد که فاکتور طراحی از پارامترهای وابسته یا مستقل با توزیع تصادفی احتمالاتی دلخواه در نظر گرفته شود.

---

<sup>۱</sup> Maximum safe slope angle

<sup>۲</sup> tunnel probabilistic structural analysis

<sup>۳</sup> first order reliability method

برای اعتبار سنجی TUSPA یک تونل معمولی برای مثال با جهت‌گیری درزه‌های تصادفی و همچنین خواص مکانیکی آن مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد روش TUSPA گسیختگی بلوک‌های سنگی را با احتمال خاص نشان می‌دهد (Mirzaeian et al., 2015).

ارزیابی پایداری بلوک‌های کلیدی که به وسیله حفاری تونل به وجود می‌آیند در تونلی در کشور چین با تحقیقات میدانی و تست‌های آزمایشگاهی برای بدست آوردن ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها و توده سنگ انجام شده است. بلوک‌های کلیدی و جهت لغزش آن‌ها با روش‌های تصاویر استریوگرافیک مشخص شده است. احتمال شکل‌گیری هندسی و احتمال شکست مکانیکی برای بلوک‌های کلیدی انجام شده است. این تحلیل با استفاده از روش مونت کارلو صورت گرفته است. در نهایت احتمال شکست کلی به وسیله احتمال مشترک از احتمال شکل‌گیری هندسی و احتمال شکست مکانیکی بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که سقف تونل خطرناک‌تر از قسمت‌های دیگر تونل می‌باشد و نیاز به نگهداری فوری دارد (Li et al., 2015).

### ۳-۵ جمع‌بندی

در این فصل کارهای انجام شده در زمینه تئوری بلوک و همچنین کارهای انجام شده در زمینه تئوری بلوک با رویکرد احتمالاتی بررسی شده است. با توجه به اینکه روش تئوری بلوک پایداری بلوک‌های خاص را در نظر می‌گیرد نسبت به روش‌های طبقه‌بندی توده سنگ برای تحلیل پایداری توده‌سنگ‌های درزه‌دار برتری دارد. تحلیل پایداری در روش تئوری بلوک بر اساس داده‌های قطعی است در صورتی که پارامترهای مورد استفاده در تحلیل پایداری تئوری بلوک دارای عدم قطعیت هستند. تعدادی از محققین احتمالات به بحث تئوری بلوک پایداری بلوک‌ها را بررسی کرده‌اند و به این نتیجه رسیدند که روش‌های احتمالاتی جواب‌های واقعی تری از تئوری بلوکی بدون در نظر گرفتن بحث احتمالاتی را دارا می‌باشند.

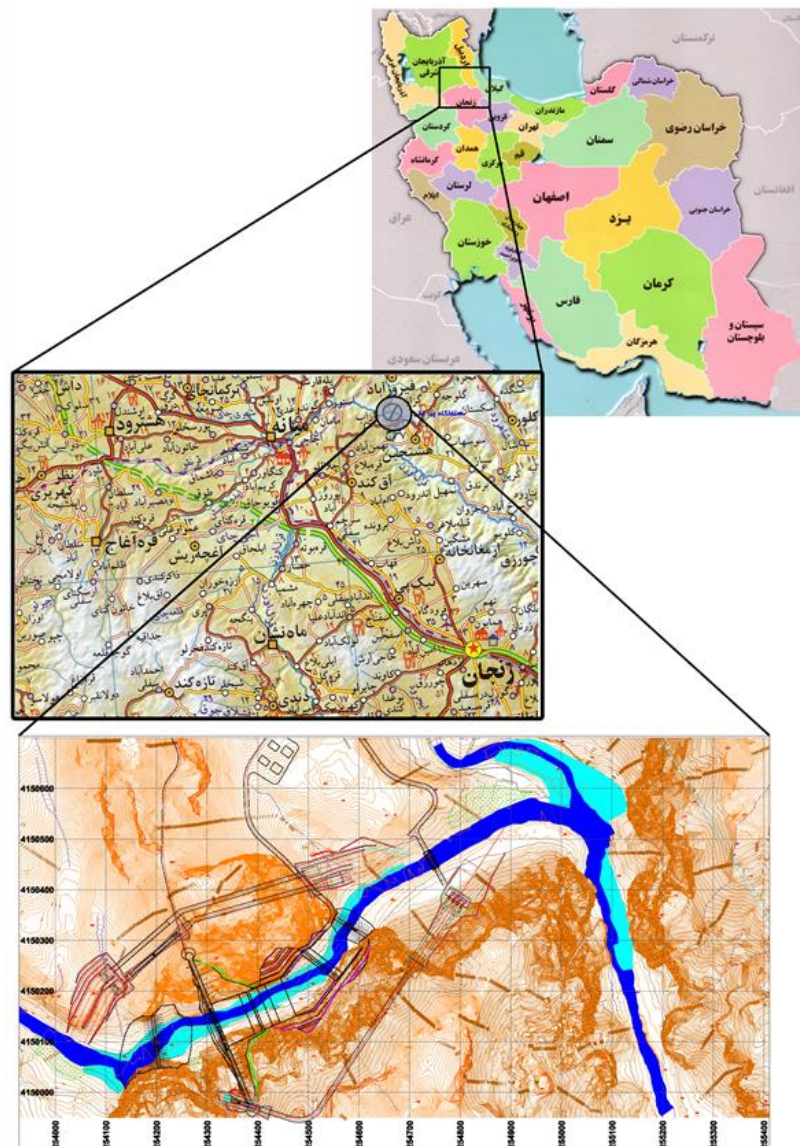
تحلیل بایرداری و کنترل ساختاری

تول انحراف آب سد سیرتقی

برای تحلیل تئوری بلوک، داده‌های ورودی شامل شیب و جهت شیب، فاصله‌داری و زاویه اصطکاک دسته‌درزه‌ها و جهت‌گیری سطح آزاد فضای حفاری شده می‌باشند. بنابراین نظریه بلوکی فقط در جایی که هندسه به وضوح تعریف می‌شود کاربرد دارد. در این فصل ابتدا به طور خلاصه در مورد زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه بحث خواهد شد. پس از آن ناپیوستگی‌های مسیر تونل شناسایی و مشخصات آن‌ها تعیین می‌گردد. پارامترهای دسته‌درزه‌ها (شیب، جهت شیب، زاویه اصطکاک و فاصله‌داری) می‌باشند که به عنوان داده‌های مورد استفاده در تئوری بلوکی می‌باشند. در مرحله بعد با تحلیل تئوری بلوک بلوک‌های ناپایدار مسیر تونل شناسایی خواهند شد، سپس تحلیل تئوری بلوک بر روی هفت مسیر مشخص شده انجام می‌گیرد و مسیر بهینه به لحاظ تشکیل بلوک‌های ناپایدار شناسایی و انتخاب می‌شود.

#### ۴-۲ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

ساختمان سد و نیروگاه پیرتقی در فاصله حدوداً ۵۰ کیلومتری شرق میانه و ۴۵ کیلومتری جنوب غرب خلخال بر روی رودخانه قزل‌اوزن در استان اردبیل واقع گردیده است که در شکل ۱-۴ مشاهده می‌شود. محدوده مورد مطالعه از نظر جغرافیایی در شمال باختر ایران و از نظر زمین‌شناسی با توجه به تقسیم‌بندی ساختاری - رسوبی ایران عمدتاً در بخشی از واحد زمین‌شناسی ایران مرکزی که آذربایجان نامیده می‌شود و بخش اندکی نیز در زون سندانج - سیرجان قرار گرفته است. از دیدگاه زمینه‌شناسی سنگ در گستره‌ای وسیع‌تر از محدوده مورد مطالعه تماماً سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری متعلق به سازند کرج و سازندهای جوان‌تر از آن (متعلق به سن ائوسن و الیگوسن) گسترش یافته‌اند. این سنگ‌ها طیف وسیعی از سنگ‌های ریولیتی و ریوداسیتی با بافت پورفیریتیک و بلورهای درشت کوارتز تا بازالت و آندزی بازالت با بافت مگاپورفیریتیک از یک سو و تناوبی از لایه‌های توف، توف برشی، ایگنمبریت و توف‌های لیتیک همراه با افق‌های شیشه ولکانیکی از سوی دیگر را شامل می‌گردند (شرکت منابع آب و نیروی ایران).



شکل ۴-۱ پلان موقعیت ساختگاه سد و نیروگاه پیرتقی (شرکت منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۳)

#### ۴-۲-۱ مشخصات کلی رودخانه قزل اوزون

حوضه قزل اوزن به عنوان دومین حوضه آبریز بزرگ ایران در محدوده تقسیمات کشوری استان کردستان، همدان، آذربایجان شرقی، اردبیل، زنجان و گیلان قرار دارد. این حوضه در مختصات جغرافیایی ۳۵ تا ۳۸ درجه عرض شمالی و ۴۶/۳۰ تا ۴۹/۱۵ درجه طول شرقی واقع شده است. رودخانه قزل اوزن با طول حدود ۶۵۰ کیلومتر از حدود شهرستان قروه در استان کردستان از ارتفاعات ۲۰۰۰ متری سرچشمه گرفته و با حرکت به طرف شمال شاخه‌های رودخانه‌های قم چمخا،

سبحاسرود، انگوران چای، زنجانرود، آجی چای، آیدوغموش، قرنقو، شهرچای، گرمرود، آرپاچای و شاهرود به آن می پیوندند. این رودخانه در انتها به مخزن سد سفیدرود می ریزد (شرکت منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۳).

#### ۲-۲-۴ موقعیت جغرافیایی و دسترسی

دسترسی به ساختگاه سد و نیروگاه پیرتقی از چهار مسیر کلی امکان پذیر است.

۱- دسترسی به محل سد از طریق اتوبان زنجان - میانه پس از طی ۸۰ کیلومتر از زنجان به طرف میانه و سپس پیمودن مسافت ۱۰۰ کیلومتر از طریق جاده جدیدالاحداث سرچم-اردبیل (در موقعیت تونل شماره ۷) امکان پذیر است (مسیر اول).

۲- مسیر دوم از شهر اردبیل به طرف سرچم (جاده جدید اردبیل - زنجان) و سپس پیمودن حدود ۳ کیلومتر در جاده خاکی متقاطع با کیلومتر ۱۲۰ جاده اردبیل - سرچم.

۳- مسیر سوم نیز از شهر خلخال به طرف شهر هشتجین پس از طی حدود ۴۵ کیلومتر و سپس دسترسی از طریق جاده سرچم مشابه مسیر اول به سایت امکان پذیر است.

۴- مسیر چهارم از طریق شهر خلخال به سمت گیوی و سپس دسترسی به سایت از طریق جاده اردبیل - سرچم مشابه مسیر دوم میسر است (شرکت منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۳).

#### ۳-۲-۴ تونل انحراف

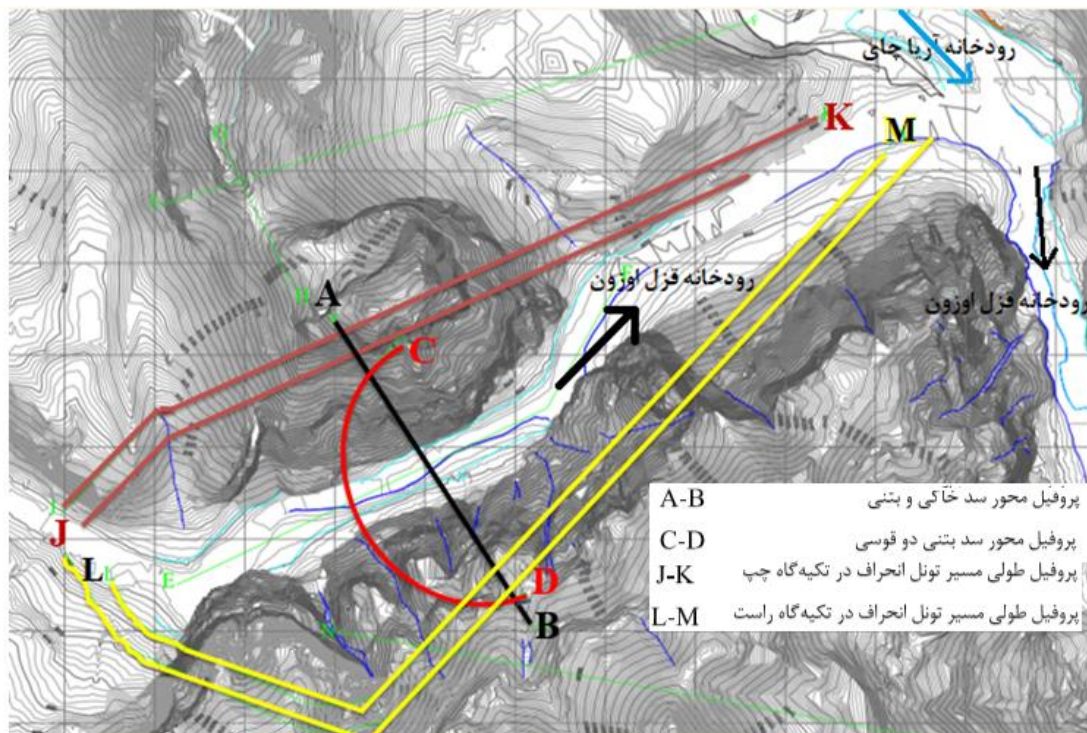
با توجه به شرایط زمین شناسی و توپوگرافی منطقه، تونل انحراف در هر دو جناح قابل جانمایی است. به دلیل تشابه نسبی خصوصیات زمین شناسی و ژئوتکنیکی تونل انحراف جناحین و همچنین با عنایت به طول کوتاه تر تونل انحراف واقع در تکیه گاه چپ نسبت به تکیه گاه راست، تونل انحراف مستقر در تکیه گاه چپ به عنوان گزینه برتر سیستم انحراف در انواع طرح بدنه سد انتخاب گردید است. پروژه در فاز مطالعاتی مرحله دوم در دست مطالعه است، گزینه برتر نوع سد و طراحی نهایی به پایان نرسیده است. طراحی سد به موازات برای دو گزینه سد بتنی دو قوسی و خاکی در دست مطالعه

است. خروجی تونل انحراف در گزینه‌های خاکی نسبت به گزینه‌های بتنی به دلیل اختلاف عرض بدنه در پی، متفاوت است. به همین دلیل طول تونل انحراف در گزینه‌های بتنی کمتر از طول آن در گزینه‌های خاکی است. تونل انحراف در گزینه‌های خاکی با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N65^\circ$ ) و طول ۴۰۰ متر و خروجی تونل انحراف در گزینه‌های بتنی با کمی چرخش به سمت داخل تنگه (امتداد  $N74^\circ$ ) و طول ۳۷۰ متر طرح شده است. لازم به توضیح است که ۱۹۰ متر ابتدایی تونل‌ها با یکدیگر مشترک هستند. تونل انحراف با مقطع دایره‌ای با توجه به وضعیت سیلاب‌ها و بهینه‌یابی انجام شده و با قطر حدود ۱۳ متر جهت تخلیه سیلاب‌ها و انحراف آورد رودخانه قزل‌اوزن طراحی شده است. بر اساس نقشه و مقاطع زمین‌شناسی تونل انحراف در تمامی گزینه‌های بدنه، تماماً در واحدهای سنگی آندزیتی الیگوسن (واحد  $OLV_1$ ) که کیفیت و شرایطی مشابه با کیفیت سنگ بستر (واحد  $OLV_1$ ) تکیه‌گاه چپ دارد حفاری خواهند شد. قسمت اعظم ترانشه ورودی هر دو تونل (مسیر تونل‌های مورد نظر تا فاصله ۱۹۰ متری از ورودی مشترک هستند) در واحد سنگی توفدار ائوسن (Et) استقرار یافته است. ترانشه خروجی تونل انحراف در گزینه بدنه خاکی در واحد سنگی  $OLV_1$  و  $OLt$  و ترانشه خروجی تونل انحراف در گزینه بدنه بتنی در توده سنگی آندزیتی الیگوسن ( $OLV_1$ ) قرار گرفته است. در این پایان نامه تونل انحراف گزینه خاکی به عنوان مطالعه موردی انتخاب و مورد مطالعه قرار گرفته است. نمایی از مقطع زمین‌شناسی مسیر تونل‌های انحراف در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود (شرکت منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۳).

#### ۳-۴ تحلیل پایداری ساختاری و بلوکی

در مرحله اول از تحلیل ساختاری و بلوکی باید دسته‌درزه‌های اصلی شناسایی شود. بدین ترتیب باید پارامترهای شیب، جهت شیب، زاویه اصطکاک و فاصله‌داری دسته‌درزه‌ها را مشخص شود. در مرحله بعد این پارامترها برای تحلیل ساختاری بلوک به عنوان ورودی در نرم‌افزار easy.KBT استفاده می‌شوند. پس از شناسایی بلوک‌ها با نرم‌افزار easy.KBT و با توجه به راستاهای مختلف بر اساس

تشکیل بزرگ‌ترین بلوک کلید و ضریب اطمینان بلوک راستای بهینه از لحاظ بلوک‌های ناپایدار تشکیل شده در مسیر تونل انتخاب می‌شود. برای این منظور مراحل زیر برای انجام تحلیل ساختاری و بلوکی صورت می‌گیرد:



شکل ۳-۴ پلان موقعیت تونل‌های انحراف در جناحین سد (شرکت منابع آب و نیروی ایران، ۱۳۹۳)

۱- شناسایی ناپیوستگی‌های مسیر تونل انحراف و تعیین زاویه اصطکاک و فاصله‌داری هر دسته‌دازه با توجه به نتایج برداشت‌ها و آزمایش‌های مهندس مشاور طرح

۲- شناسایی بلوک‌های قابل جابجایی در راستای پیشنهادی مهندس مشاور طرح با استفاده از نرم‌افزار easy.KBT

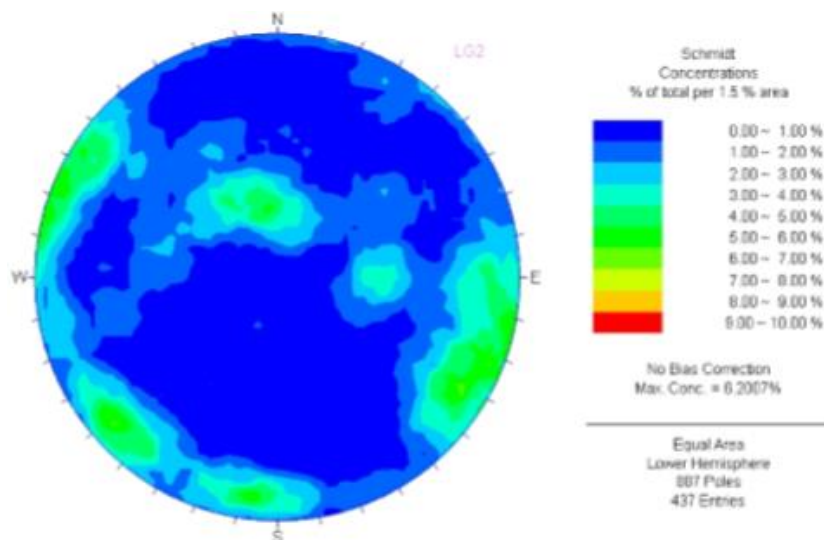
۳- انتخاب راستاهای مختلف نسبت به راستای انتخاب شده توسط مهندس مشاور طرح با شناسایی بلوک‌های ناپایدار و حجم آن‌ها در هر راستا بهینه‌ترین راستای تونل انحراف از نظر تشکیل بلوک‌های ناپایدار پیشنهاد می‌شود.

#### ۴-۳-۱ ناپیوستگی‌های مسیر تونل انحراف

با توجه به مقاطع زمین‌شناسی تونل‌های انحراف، حداقل ۲ درزه اصلی (major joint) توده سنگ مسیر تونل‌های انحراف را قطع می‌نماید. این درزه‌های اصلی می‌توانند به صورت مقطعی و موضعی پایداری توده‌های سنگی مسیر تونل را تحت تأثیر قرار دهند. موقعیت استقرار سطح آب زیرزمینی در جناح چپ به گونه‌ای است که تونل‌های هر دو گزینه بالاتر از تراز آب زیرزمینی (کف تونل در نزدیکی مرز آب زیرزمینی واقع شده است) قرار می‌گیرد (گزارش شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۳). یکی از پارامترهای تأثیرگذار در پایداری تونل‌ها وضعیت سیستم درزه و شکاف نسبت به مسیر تونل است. با توجه به استقرار تونل‌های انحراف در جناح چپ، وضعیت هندسی سیستم‌های ناپیوستگی که در تکیه‌گاه چپ سد برداشت شده‌اند، قابل‌تعمیم به توده سنگی مسیر تونل‌ها در جناح چپ نیز می‌باشند.

#### ۴-۳-۱-۱ بررسی سیستم ناپیوستگی سطحی در تکیه‌گاه جناح چپ

بنا به اهمیت شناخت ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها پی، مطالعه سطحی ناپیوستگی‌ها در ۸ ایستگاه (۵ ایستگاه اول در جناح چپ) انجام شده است. نتایج تحلیل استریونتی برداشت‌های درزه‌برداری سطحی از تلفیق ۵ ایستگاه در شکل ۴-۴ نشان داده شده و نتایج درزه نگاری آن در جدول ۴-۱ آورده شده است (گزارش شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۳). لازم به ذکر است این نتایج حاصل از مطالعات مهندس مشاور طرح است.



شکل ۴-۴ نگاره قطبی تکیه‌گاه چپ (حاصل تلفیق ناپیوستگی‌های موجود در گالری‌های اکتشافی) (گزارش شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۳)

جدول ۴-۱ نتایج درزه نگاری حاصل از برداشت سطحی ناپیوستگی‌ها در تکیه‌گاه چپ (گزارش شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۳)

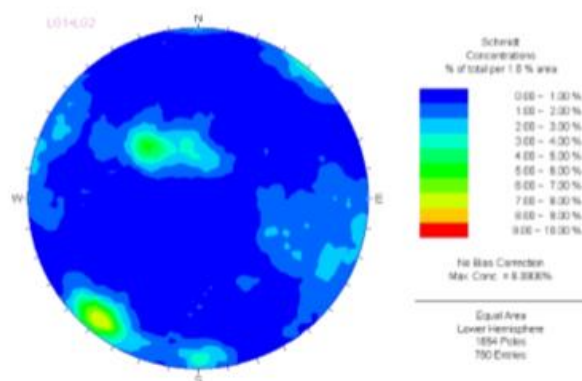
| موقعیت    | ناپیوستگی‌ها | شیب (درجه) | جهت شیب (درجه) |
|-----------|--------------|------------|----------------|
| LEFT WALL | J1           | 34         | 181            |
|           | J2           | 74         | 62             |
|           | J3           | 29         | 146            |
|           | J4           | 83         | 176            |
|           | J5           | 62         | 308            |
|           | J6           | 79         | 36             |

همان‌طور که از جدول (۴-۱) مشاهده می‌شود برای جناح چپ سد تعداد ۶ دسته‌درزه توسط مهندس مشاور طرح شناسایی شده است.

#### ۴-۳-۱-۲ بررسی سیستم ناپیوستگی‌های درون گالری‌های اکتشافی

در ساختگاه سد پیرتقی گالری‌های اکتشافی LG1 و LG2 در تکیه‌گاه چپ حفاری شده‌اند. گالری LG1 در تراز ارتفاعی ۸۷۴ متر به طول ۸۰ متر و گالری LG2 در تراز ارتفاعی ۹۲۸ متر به طول ۵۵ متر حفاری شده است. نتایج حاصل از برداشت درزه‌ها در گالری‌های اکتشافی جناح چپ (LG1 و LG2) و ترسیم نگاره قطبی در آن‌ها وجود ۶ سیستم ناپیوستگی را در این گالری‌ها نشان می‌دهد. نتایج حاصل از تحلیل و برداشت ناپیوستگی‌ها از تلفیق هر دو گالری در جناح چپ در شکل ۴-۵ و

جدول ۴-۲ نشان داده شده است (گزارش شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۳).



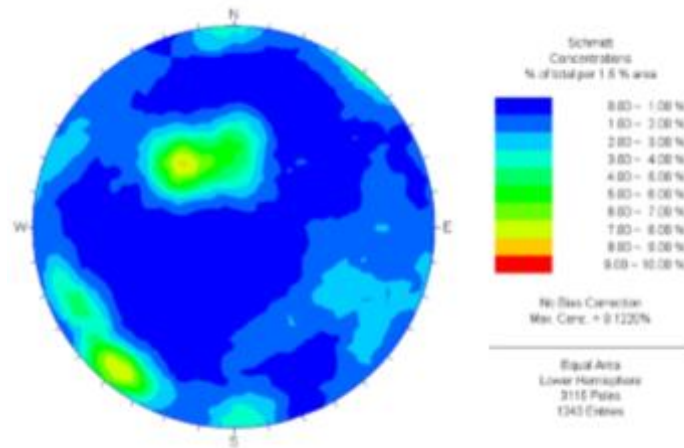
شکل ۴-۵ نگاره قطبی تکیه گاه چپ سد (حاصل تلفیق ناپیوستگی‌های موجود در گالری‌های اکتشافی) (گزارش شرکت طوس آب، ۱۳۹۳)

جدول ۴-۲ نتایج تلفیق درزه نگاری در گالری‌های اکتشافی LG1 و LG2 (گزارش شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۳)

| موقعیت      | ناپیوستگی‌ها | شیب (درجه) | جهت شیب (درجه) |
|-------------|--------------|------------|----------------|
| تکیه‌گاه چپ | J1           | ۸۳         | ۳۸             |
|             | J2           | ۸۳         | ۲۸۶            |
|             | J3           | ۳۱         | ۱۴۵            |
|             | J4           | ۸۴         | ۳۵۸            |
|             | J5           | ۴۵         | ۲۸۹            |

با مقایسه درزه برداری در گالری‌های اکتشافی این جناح مشخص می‌شود که حداکثر اختلافی در حدود  $\pm 20^\circ$  درجه در جهات شیب و همچنین میزان شیب ناپیوستگی‌ها وجود دارد. مقایسه نتایج درزه برداری در نواحی سطحی تکیه‌گاه چپ با نتایج حاصل از تلفیق درزه‌ها در گالری‌های اکتشافی این جناح حاکی از تشابه نسبی مشخصات هندسی ناپیوستگی‌هاست، بنابراین پس از تلفیق نتایج درزه برداری سطحی و گالری‌های اکتشافی تکیه‌گاه چپ نسبت به تعیین وضعیت هندسی ناپیوستگی‌ها ۵ دسته درزه در این تکیه‌گاه در نظر گرفته شده است. نتایج تلفیق برداشت‌های سطحی با گالری‌های

اکتشافی در تکیه‌گاه چپ در شکل ۴-۶ و جدول ۴-۳ نشان داده شده است (گزارش شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۳).



شکل ۴-۶ نگاره قطبی تکیه‌گاه چپ (حاصل تلفیق ناپیوستگی‌های موجود در گالری‌ها اکتشافی و برداشت‌های سطحی جناح چپ) (گزارش شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۳)

جدول ۴-۳ نتایج تلفیق درزه نگاری در گالری‌های اکتشافی LG1 و LG2 و برداشت سطحی (گزارش شرکت مهندسی مشاور طوس آب، ۱۳۹۳)

| موقعیت                     | ناپیوستگی‌ها | شیب (درجه) | جهت<br>شیب (درجه) |
|----------------------------|--------------|------------|-------------------|
| جناح چپ و دو گالری اکتشافی | J1           | ۳۱         | ۱۴۴               |
|                            | J2           | ۷۹         | ۳۸                |
|                            | J3           | ۵۷         | ۳۰۰               |
|                            | J4           | ۸۵         | ۱۷۷               |
|                            | J5           | ۶۸         | ۶۲                |

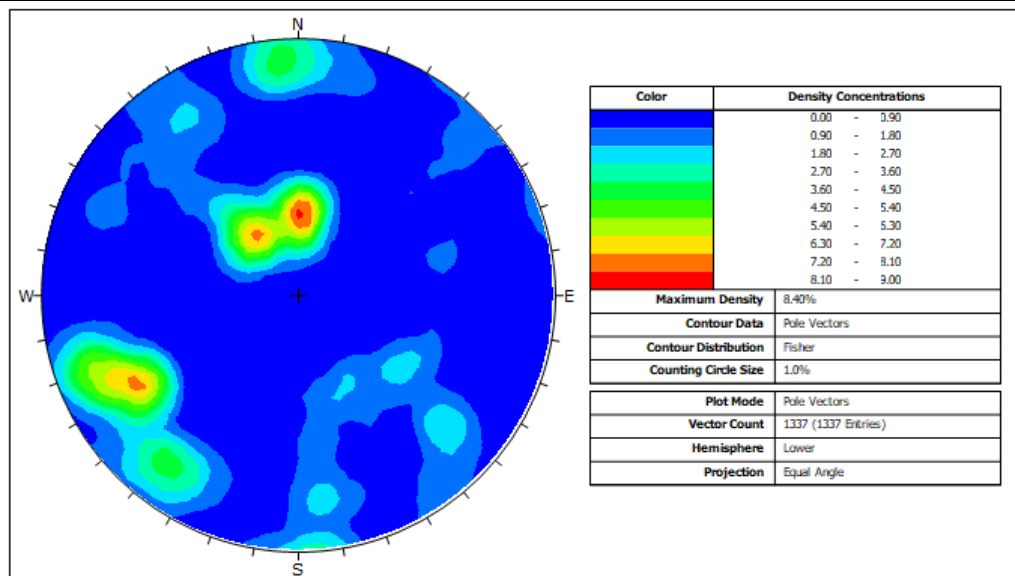
۴-۳-۱-۳ تحلیل سیستم ناپیوستگی‌های تکیه‌گاه چپ سد با نرم‌افزار DIPS 6.008

درزه‌های برداشت شده در سطح تکیه‌گاه چپ و دو گالری اکتشافی حفر شده در تکیه‌گاه چپ هر کدام جداگانه و همچنین تلفیق هر دو بررسی شد و دسته‌درزه‌های اصلی شناسایی شدند. با این حال به نظر می‌رسد که ۵ دسته‌درزه غیر واقعی باشد برای اینکه اطمینان بیشتری نسبت به تعداد دسته‌درزه‌ها داشته باشیم، تحلیل درزه‌های برداشت شده در حالت برجا و درزه‌های برداشت شده از دو گالری اکتشافی با استفاده از نرم‌افزار Dips 6.008 انجام شده است. در مجموع تعداد ۱۳۳۷ درزه برداشت

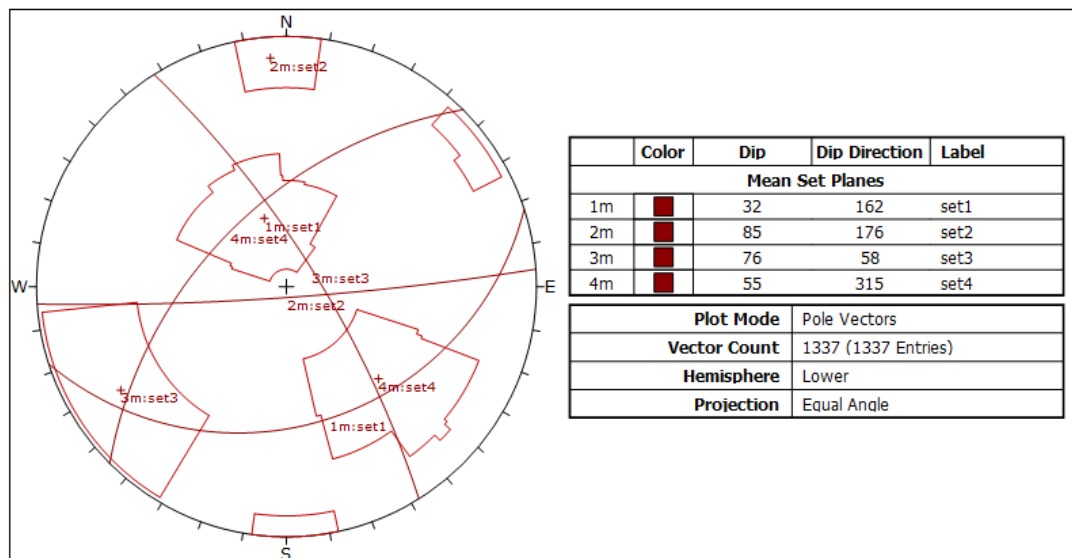
شده است. با استفاده از نرم افزار Dips 6.008، ۴ دسته درزه شناسایی شد. نتایج این تحلیل در شکل ۴-۶ و ۴-۷ و جدول ۴-۴ آمده است.

جدول ۴-۴ نتایج درزه نگاری تکیه گاه چپ (نرم افزار Dips 6.008)

| موقعیت      | دسته درزه | شیب (درجه) | جهت شیب (درجه) |
|-------------|-----------|------------|----------------|
| تکیه گاه چپ | J1        | ۳۲         | ۱۶۲            |
|             | J2        | ۸۵         | ۱۷۶            |
|             | J3        | ۷۶         | ۵۸             |
|             | J4        | ۵۵         | ۳۱۵            |



شکل ۴-۷ نگاره قطبی تکیه گاه چپ سد (حاصل تلفیق ناپیوستگی های موجود در گالری های اکتشافی و برداشت های سطحی جناح چپ)



شکل ۴-۸ صور ساختاری تکیه‌گاه چپ سد (حاصل تلفیق ناپیوستگی‌های موجود در گالری‌های اکتشافی و برداشت‌های سطحی تکیه‌گاه چپ)

۴-۱-۳-۴ آزمایش مقاومت برشی مستقیم بزرگ‌مقیاس آزمایشگاهی بر روی سطوح ناپیوستگی به منظور اندازه‌گیری مقاومت برشی و معیار گسیختگی سطوح ناپیوستگی‌ها، آزمایش برش مستقیم در دو مقیاس آزمایشگاهی و صحرایی توسعه داده شده است. در روش مرسوم آزمایش برش مستقیم در آزمایشگاه نمونه‌های با ابعاد کوچک مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در عین حال امروز ثابت شده است که میزان دگرشکل‌پذیری و مقاومت سطوح ناپیوستگی‌ها به شدت مبتنی بر اندازه نمونه است و با افزایش اندازه نمونه، مقادیر اندازه‌گیری شده به واقعیت نزدیک‌تر است. از این‌رو در این سری از آزمایش‌ها و بنا به درخواست کارفرما، از دستگاه اصلاح شده برش مستقیم با مقیاس بزرگ (آزمایشگاهی) جهت تعیین پارامترهای معیار گسیختگی درزه سنگ‌ها استفاده شده است (شرکت مهندسی مشاور طوس آب). در خصوص مشخصات نمونه‌های آزمایش در گالری اکتشافی جناح چپ و نمونه‌های که آزمایش بر روی آن امکان‌پذیر بوده است در جدول ۴-۵ ارائه شده است. نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۴-۶ آمده است.

جدول ۴-۵ مشخصات نمونه‌های مورد آزمایش

| گالری | شماره نمونه | توضیحات                                                                                                                                             |
|-------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LG1   | AP14        | ۲ نمونه با مشخصات AP13 وجود داشته است که یکی از آن‌ها AP14 بوده و با این نام گزارش شد.                                                              |
| LG1   | AP19        | ۲ نمونه با این مشخصات موجود بوده است. با هماهنگی نظارت مهندس مشاور دو نمونه با نام AP19-1 و AP19-2 گزارش شده که احتمالاً نمونه AP1، AP19-1 بوده است |
| LG1   | AP23        | سطح درزه وجود نداشته و با هماهنگی نظارت محترم از انجام آزمایش بر روی سطح اره بر صرف نظر شده است                                                     |

جدول ۴-۶ نتایج آزمایش برش مستقیم بزرگ مقیاس بر روی درزه طبیعی - سد و نیروگاه پیر تقی - گالری LG1

| نمونه‌ها | کشش برشی (مگا پاسکال) |      |      |      |      | کشش برشی پسماند (مگا پاسکال) |      |      |      |      | چسبندگی (مگاپاسکال) | زاویه اصطکاک (درجه) | گالری |
|----------|-----------------------|------|------|------|------|------------------------------|------|------|------|------|---------------------|---------------------|-------|
| AP14     | ۰/۴۱                  | ۱/۰۳ | ۱/۳۴ | ۱/۸۳ | ۲/۱۳ | ۰/۳۱                         | ۰/۸۰ | ۱/۲۴ | ۱/۶۷ | ۲/۰۴ | ۰/۰۸۵               | ۳۵/۰۰               | LG1   |
| AP15     | ۰/۴۱                  | ۱/۰۵ | ۱/۳۲ | ۱/۶۴ | ۱/۹۹ | ۰/۳۳                         | ۰/۷۶ | ۱/۱۶ | ۱/۴۱ | ۱/۸۶ | ۰/۰۱۰۷              | ۳۲/۹۰               |       |
| AP16     | ۰/۶۲                  | ۱/۳۴ | ۱/۷۰ | ۲/۰۵ | ۲/۵۵ | ۰/۵۱                         | ۱/۰۸ | ۱/۵۴ | ۱/۸۵ | ۲/۴۳ | ۰/۲۰۶۶              | ۳۷/۲۰               |       |
| AP17     | ۰/۵۰                  | ۱/۱۳ | ۱/۳۱ | ۱/۷۳ | ۲/۰۲ | ۰/۴۳                         | ۰/۸۱ | ۱/۱۱ | ۱/۴۷ | ۱/۸۰ | ۰/۱۸۸۰              | ۳۱/۲۰               |       |
| AP18     | ۰/۶۳                  | ۱/۴۳ | ۱/۸۲ | ۱/۹۹ | ۲/۲۹ | ۰/۴۷                         | ۱/۲۰ | ۱/۴۰ | ۱/۵۹ | ۲/۰۳ | ۰/۳۷۸۲              | ۳۲/۴۰               |       |
| AP19-1   | ۰/۷۴                  | ۱/۷۵ | ۲/۰۳ | ۲/۴۶ | ۲/۷۸ | ۰/۵۴                         | ۱/۳۶ | ۱/۶۶ | ۲/۰۶ | ۲/۲۵ | ۰/۴۰۳۴              | ۳۹/۲۰               |       |
| AP19-2   | ۰/۵۱                  | ۱/۱۸ | ۱/۵۰ | ۱/۸۱ | ۲/۱۲ | ۰/۳۶                         | ۱/۰۶ | ۱/۳۳ | ۱/۷۴ | ۲/۰۳ | ۰/۲۰۲۲              | ۳۲/۷۰               |       |
| AP20     | ۰/۶۸                  | ۱/۳۱ | ۱/۶۱ | ۲/۰۱ | ۲/۳۲ | ۰/۳۴                         | ۱/۱۲ | ۱/۴۴ | ۱/۸۰ | ۲/۲۱ | ۰/۳۳۵۶              | ۳۲/۳۰               |       |
| AP21     | ۰/۴۸                  | ۱/۱۳ | ۱/۶۰ | ۱/۹۸ | ۲/۲۶ | ۰/۲۹                         | ۰/۸۴ | ۱/۴۳ | ۱/۸۴ | ۲/۱۷ | ۰/۰۹۸۹              | ۳۶/۲۰               |       |
| AP22     | ۰/۵۶                  | ۱/۳۹ | ۱/۵۸ | ۱/۸۹ | ۲/۱۵ | ۰/۴۱                         | ۱/۰۴ | ۱/۴۳ | ۱/۵۳ | ۱/۸۲ | ۰/۳۲۰۱              | ۳۲/۱۰               |       |
| AP21     | ۰/۴۴                  | ۱/۲۳ | ۱/۵۳ | ۱/۹۶ | ۲/۴۶ | ۰/۲۶                         | ۱/۰۲ | ۱/۲۹ | ۱/۷۱ | ۲/۳۲ | ۰/۰۱۵۵              | ۳۸/۴۰               |       |

نتایج آزمایش برش مستقیم آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های بزرگ مقیاس از سد و نیروگاه پیر تقی در اینجا آورده شده است. چسبندگی ظاهری محاسبه شده (ناشی از ناهموازی سطوح ناپیوستگی) در کلیه نمونه‌ها ناچیز بوده و بین ۰/۰۱۰۷ تا ۰/۴۰۳۴ مگا پاسکال است. زاویه اصطکاک سطحی بین حداقل ۳۱/۲۰ درجه تا حداکثر ۳۹/۲۰ درجه متغیر است. در این تحقیق با توجه به آزمایش‌های صورت گرفته توسط مهندس مشاور و نتایج این آزمایش‌ها از چسبندگی درزه به دلیل ناچیز بودن آن صرف نظر شده است. زاویه اصطکاک برای دست درزه اول و دوم برابر با ۳۵، دسته درزه سوم ۳۶ و دسته درزه چهارم ۳۴ در نظر گرفته شده است. همچنین در این تحقیق با توجه به نتایج برداشت درزه‌ها و اندازه‌گیری فاصله‌داری آن‌ها توسط مهندس مشاور، فاصله‌داری برای دسته درزه‌های اول، سوم و چهارم ۱،۵ متر و برای دسته درزه دوم ۰/۶ متر در نظر گرفته شده است.

#### ۳-۴-۲ شناسایی بلوک‌های قابل جابجایی در راستای اصلی تونل با استفاده از نرم‌افزار Easy.kbt

با وجود آنکه بیش از ۳۰ سال از زمان ارائه تئوری بلوک می‌گذرد اما هنوز نرم‌افزار کاملی مبتنی بر این تئوری وجود ندارد. در سال ۲۰۱۷ Cheng و همکارانش نرم‌افزاری را به نام Easy.kbt بر مبنای تئوری بلوک ارائه کردند. Easy.kbt برای تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی و شیب‌های سنگی توسعه یافته است. برای طراحی این نرم‌افزار از تئورهای پایه تئوری بلوک که توسط Shi ارائه شده، استفاده شده است. ویژگی‌های این نرم‌افزار به این صورت می‌باشد که: اولاً ساختار برنامه بر اساس تئوری بلوک طراحی شده است و با تغییر ساختار برنامه مجدداً سازمان‌دهی می‌شود و کاربر می‌تواند از آن به‌طور پیوسته استفاده کند، ثانیاً نرم‌افزار Easy.kbt رابط کاربرپسندی را ایجاد می‌کند، که دشواری یادگیری و استفاده از نظریه بلوک را کاهش می‌دهد، ثالثاً پارامترها با جزئیات شرح داده شده‌اند، رابعاً نتایج تحلیل از مدل‌ها به صورت خودکار صادر می‌شود که برای کاربران مناسب است.

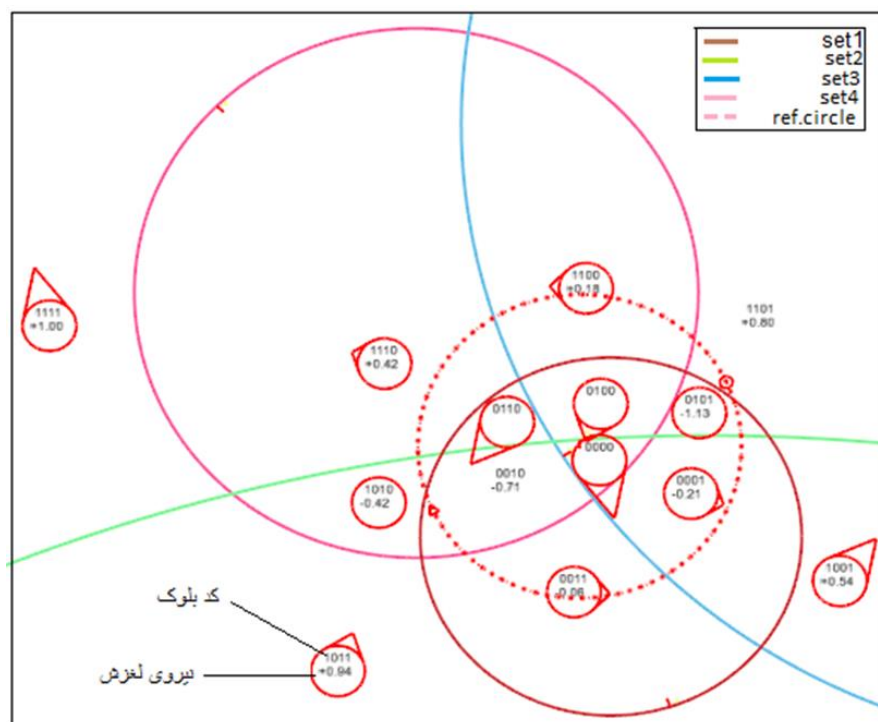
در این تحقیق تعداد کل درزه‌های برداشت شده از تلفیق داده‌های گالری‌های اکتشافی و برداشت‌های سطحی ۱۳۳۷ داده است. از آنجا که تونل انحراف در جناح چپ سد جانمایی شده است. داده‌های برداشت شده در جناح چپ به عنوان داده‌های مسیر تونل انحراف سد انتخاب می‌گردد. تحلیل درزه‌های انجام شده توسط نرم‌افزار Dips که پیش‌تر توضیح داده شد برای داده‌های ورودی این نرم‌افزار مطابق جدول ۴-۷ استفاده شده است.

جدول ۴-۷ داده‌های ورودی نرم‌افزار Easy kbt

| وضعیت       | ناپیوستگی | شیب (درجه) | جهت شیب (درجه) | زاویه اصطکاک (درجه) | فاصله‌داری (متر) |
|-------------|-----------|------------|----------------|---------------------|------------------|
| تکیه‌گاه چپ | J1        | ۳۲         | ۱۶۲            | ۲۵                  | ۱/۵              |
|             | J2        | ۸۵         | ۱۷۶            | ۲۵                  | ۰/۶              |
|             | J3        | ۷۶         | ۵۸             | ۳۶                  | ۱/۵              |
|             | J4        | ۵۵         | ۳۱۵            | ۳۴                  | ۱/۵              |

داده‌های جدول ۴-۷ به عنوان داده‌های ورودی در نرم‌افزار Easy.kbt مورد استفاده قرار می‌گیرند. توسط این نرم‌افزار که نرم‌افزار تحلیل پایداری با استفاده از تئوری بلوکی است، بزرگ‌ترین بلوک کلیدی تخمین زده می‌شود، جهت لغزش بلوک محاسبه می‌گردد و همچنین فاکتور اطمینان برای هر

بلوک تعیین می‌کند. تصویر استریوگراف ۴ دسته‌درزه و تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N65^\circ$ ) در شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود. لازم به ذکر است که راستای انتخابی با توجه به مطالعات اولیه طرح توسط مهندس مشاور طرح پیشنهاد شده است.



شکل ۴-۹ تصویر استریوگراف دسته‌درزه‌ها و جهت‌گیری تونل (تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N65^\circ$ ))

پیش‌تر در رابطه با تعداد بلوک‌های تشکیل شده در حالتی که دسته‌درزه تکراری وجود نداشته باشد بحث شد. تعداد بلوک‌های تشکیل شده در این حالت  $2^n$  است که  $n$  تعداد دسته‌درزه‌ها است. در اینجا ۴ دسته‌درزه وجود دارد که ۱۶ بلوک را تشکیل می‌دهند. بلوک‌های که دارای هرم درزه تهی می‌باشند یعنی در تصویر استریوگراف دیده نمی‌شوند بلوک‌های مخروطی می‌باشند، بلوک‌های مخروطی با توجه به نوع شکلی که نسبت به فضای آزاد دارند پایدار می‌باشند. در اینجا دو بلوک با نام‌های ۱۰۰۰ و ۱۱۱۰ که در تصویر استریوگراف دیده نمی‌شوند مخروطی هستند. سه بلوک ۰۰۰۰، ۰۱۱۰ و ۱۰۰۰ بلوک‌های قابل جابجایی هستند که تحت تأثیر نیروی جاذبه پایدار می‌مانند. دو

بلوک ۱۱۰۱ و ۰۰۱۰ به خاطر شکل تونل حذف شده اند. دیگر بلوک‌های شناسایی شده و شرایط آن‌ها مشخص شده است. این بلوک‌ها و مشخصات آن‌ها در جدول ۴-۸ آمده است.

جدول ۴-۸ نتایج شرایط بلوک‌های قابل جابجایی تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد N65

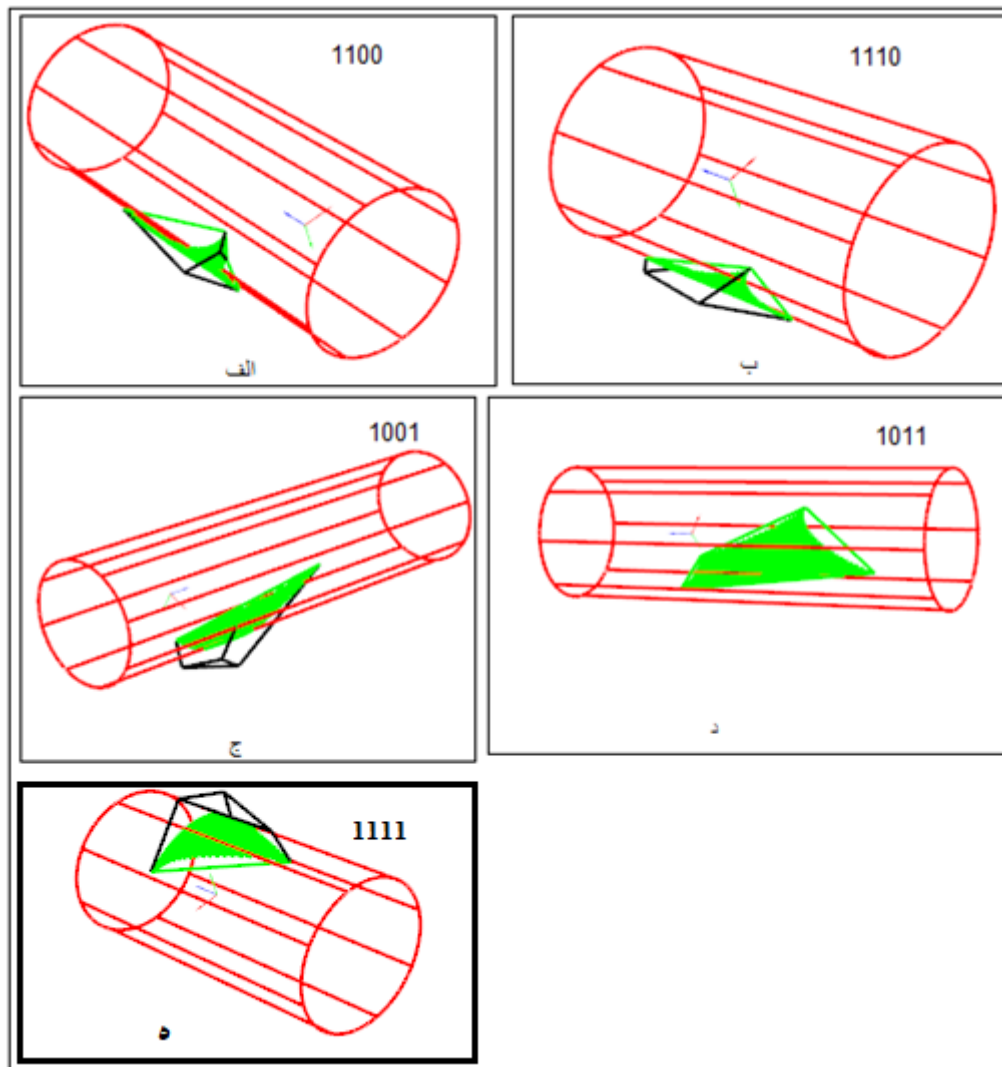
درجه)

| بلوک | هرم<br>درزه | پایداری بلوک     | نیروی<br>لغزش | ضریب<br>ایمنی | حجم بلوک<br>(متر مکعب) | جهت<br>لغزش | نوع بلوک     |
|------|-------------|------------------|---------------|---------------|------------------------|-------------|--------------|
| ۱    | ۱۱۰۰        | ناپایدار         | ۰/۱۸۰۲        | ۰/۷۶۷۴        | ۱۱/۸۱۷۵                | J3/j4       | قابل جابجایی |
| ۲    | ۱۰۱۰        | پایدار با اصطکاک | -۰/۴۱۶۴       | ۱/۶۴۱۰        | ۰/۰۰۹۷                 | J2/j4       | قابل جابجایی |
| ۳    | ۱۱۱۰        | ناپایدار         | ۰/۴۱۷۵        | ۰/۴۹۰۲        | ۱۶/۶۹۱۵                | J4          | قابل جابجایی |
| ۴    | ۰۰۰۱        | پایدار با اصطکاک | -۰/۲۰۵۶       | ۱/۴۱۰۵        | ۱۶/۶۹۱۵                | J1/j3       | قابل جابجایی |
| ۵    | ۱۰۰۱        | ناپایدار         | ۰/۵۴۰۵        | ۰/۴۲۹۰        | ۱۱۶/۸۳۷۵               | J2/j3       | قابل جابجایی |
| ۶    | ۰۱۰۱        | پایدار با اصطکاک | -۱/۱۲۹۷       | ۸/۱۶۱۸        | ۰/۰۰۹۷                 | J1/j2       | قابل جابجایی |
| ۷    | ۰۰۱۱        | پایدار با اصطکاک | -۰/۰۶۳۹       | ۱/۱۲۰۴        | ۱۱/۸۱۷۵                | J1          | قابل جابجایی |
| ۸    | ۱۰۱۱        | ناپایدار         | ۰/۹۳۵۱        | ۰/۰۶۱۳        | ۸۳/۴۲۳۳                | J2          | قابل جابجایی |
| ۹    | ۱۱۱۱        | ناپایدار         | ۱             | ۰             | ۸۵/۰۶۰۳                | -           | سقوط می‌کند  |

با توجه به نتایج بدست آمده همان‌طور که در جدول ۴-۸ مشاهده می‌شود ۸ بلوک قابل جابجایی و یک بلوک با پتانسیل سقوط برآورد شده است. هر یک از بلوک‌های تشکیل شده جهت لغزش محتمل بر روی درزه و یا فصل مشترک آن دارند که در جدول ۵-۲ آورده شده است. ۴ بلوک با نام مشخصه ۱۰۱۰، ۰۰۰۱، ۰۱۰۱ و ۰۰۱۱ با اینکه بلوک‌های هستند که قابلیت جابجایی دارند، اما به دلیل شرایط مقاومتی و اصطکاک کافی ضریب ایمنی بالاتر از یک داشته و پایدار هستند. البته بلوک ۰۰۱۱ دارای ضریب ایمنی نزدیک به یک است ولی حجم بلوک تشکیل شده قابل توجه نیست. ۴ بلوک ۱۱۰۰، ۱۱۱۰، ۱۰۰۱ و ۱۰۱۱ به دلیل اصطکاک ناکافی دارای شرایط بحرانی هستند که لازم است با سیستم‌های نگهدارنده پایدار شوند. بلوک ۱۱۱۱ بحرانی‌ترین بلوک کلیدی است و بلافاصله بعد از حفر تونل لازم است که با وسایل نگهدارنده پایدار شود. بزرگ‌ترین بلوک کلیدی در این راستای تونل بلوک ۱۰۰۱ با حجم ۱۱۶/۸۳۷۵ مترمکعب است.

یکی دیگر از ویژگی‌های تئوری بلوک این است که جانمایی و شکل سه‌بعدی بلوک‌های تشکیل شده را نیز نمایش می‌دهد. شکل سه‌بعدی و جانمایی بلوک‌های تشکیل شده در شکل ۱۰-۴ الف تا ۱۰-۴ ه آورده شده است. لازم به ذکر است که واحد حجم در تمامی جدول‌ها مترمکعب است،

همچنین نیروی لغزش هم به صورت برداری و بدون واحد است و برای شناسایی بلوک‌های کلیدی و کلیدی بالقوه محاسبه می‌شود.



شکل ۴-۱۰ شکل سه‌بعدی و جانمایی بلوک‌های ناپایدار در تونل

تئوری بلوک با استفاده از وضعیت و راستای حفاری تونل بلوک‌های تشکیل شده قابل جابجایی را تشخیص می‌دهد. در این راستای تونل بلوک کلیدی ماکزیمم بلوک ۱۰۰۱ است که نیاز به نگهداری بیشتری نسبت به سایر بلوک‌ها را دارا است. بنابراین با استفاده از نظریه بلوکی می‌توان خطرهای پنهان را با معیارهای محافظه‌کارانه کاهش داد. اینکه با روش تئوری بلوک می‌توان بزرگ‌ترین بلوک کلیدی ناپایدار را تشخیص داد یک مزیت است، یعنی قبل از اینکه تونل حفر شود می‌توان طراحی را

بر اساس بزرگ‌ترین بلوک کلیدی و اینکه در کدام قسمت مقطع تونل تشکیل می‌شود انجام داد. این کار باعث جلوگیری از ریزش‌های بزرگ در تونل می‌شود و همچنین در هزینه‌های نگهداری نیز کمک فراوانی می‌کند. یعنی قبل از حفر می‌توان تصمیم گرفت که کدام سیستم نگهداری مناسب‌تر هست که اجرا شود.

#### ۳-۳-۴ انتخاب راستای بهینه تونل بر اساس تحلیل ساختاری بلوک‌ها

توده سنگی که توسط صفحات درزه محدود شده باشد می‌تواند یک بلوک تشکیل دهد. قابل جابجایی بودن یک بلوک را می‌توان با دانستن اینکه نسبت به صفحه آزاد در چه وضعیتی باشد تشخیص داد. برای تونل، راستای تونل بسیار مهم است. Godman در سال ۱۹۸۰ اشاره کرده است که از طریق تحلیل به وسیله تئوری بلوک با راستاهای مختلف تونل کمترین اندازه بلوک کلیدی ماکزیمم می‌تواند پیدا شود. این نشانگر آن است که می‌تواند جهت بهینه‌ای برای تونل پیدا شود که کمترین نگهداری را لازم داشته باشد. با این حال یکسری محدودیت‌هایی برای مطالعه موردی که تونل انحراف آب است مانند دهانه ورودی تونل، مکان تونل و غیره وجود دارد که نمی‌توان هر راستای دلخواهی را انتخاب کرد. بنابراین برای بررسی بیشتر تنها ۷ راستا نسبت به راستای نقشه مشاور طرح با اختلاف  $\pm 30^\circ$  درجه انتخاب شده است. با استفاده از مشخصات دسته‌درزه‌ها و راستاهای مختلف تونل راستای بهینه تونل بر اساس تشکیل بزرگ‌ترین بلوک کلیدی انتخاب می‌شود. راستاهای مختلف انتخاب شده نسبت به راستای انتخابی مشاور طرح (راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N65^\circ$ )) برای تحقیق توسط نظریه بلوکی به شرح ذیل است:

۱- تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N65^\circ$ )

۲- تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N55^\circ$ )

۳- تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N45^\circ$ )

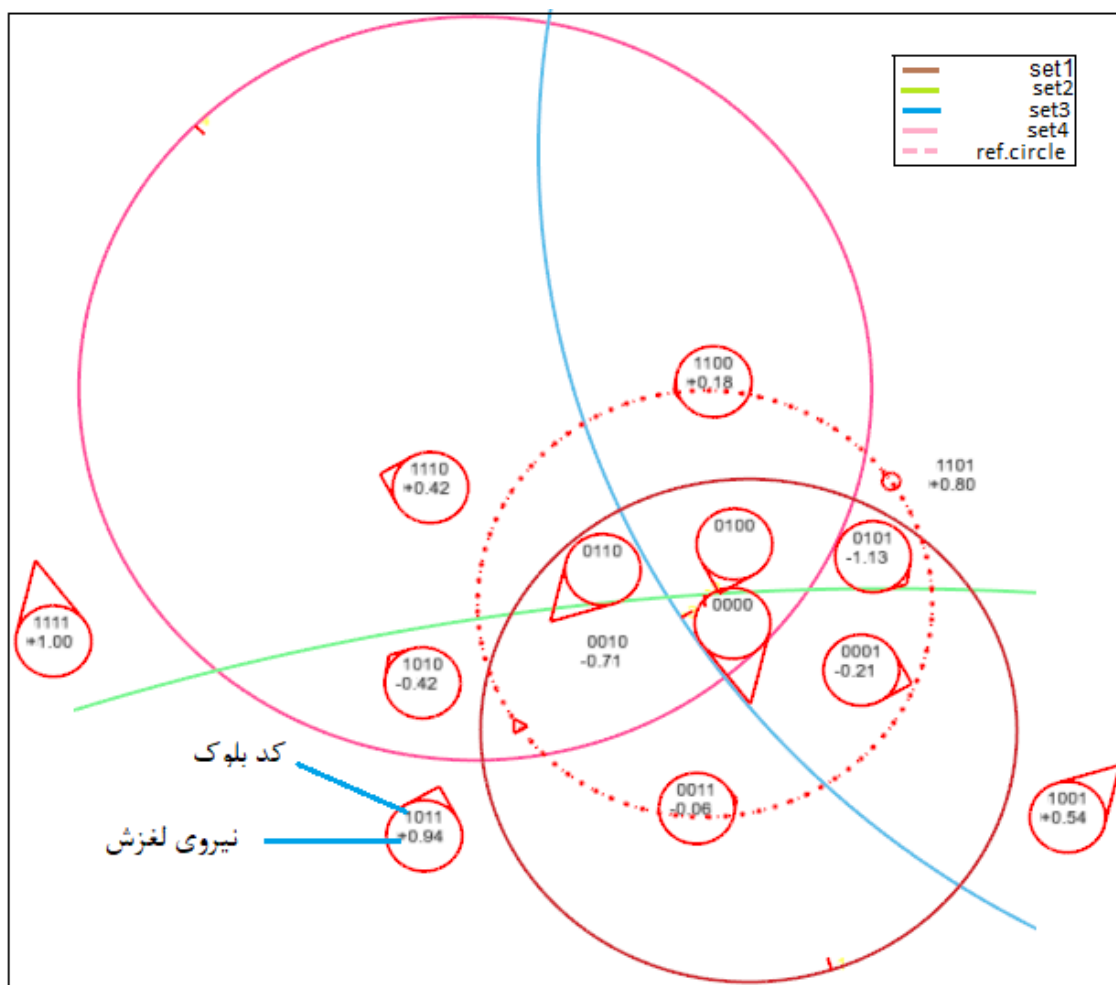
۴- تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N35^\circ$ )

۵- تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد N75)

۶- تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد N85)

۷- تونل انحراف با راستای جنوب شرقی - شمال غربی (امتداد N95)

راستای اول یعنی N65 در بخش ۱-۲-۵ تحلیل نظریه بلوک بر روی آن صورت گرفت و بلوک‌های بحرانی و بزرگ‌ترین بلوک کلیدی نیز شناسایی گردید. برای راستاهای دیگر نیز این تحلیل انجام گرفته است و بلوک‌های بحرانی و بزرگ‌ترین بلوک کلیدی نیز شناسایی شده است. داده‌های ناپیوستگی‌ها همان داده‌های به کار رفته در بخش ۱-۲-۵ می‌باشند و فقط راستای تونل تغییر می‌کند. نتایج تحلیل در راستای N55 (اختلاف ۱۰- درجه نسبت به راستای پیشنهادی مشاور طرح) در شکل ۳-۵ آمده است:



شکل ۴-۱۱ تصویر استریوگراف دسته‌درزه‌ها و جهت‌گیری تونل (تونل انحراف با راستای شمال شرقی- جنوب غربی (امتداد  $N55^{\circ}$ ))

در شکل ۴-۱۱ از تقاطع چهار دسته‌درزه و راستای تونل ۱۶ بلوک به وجود آمده است که دو بلوک ۱۰۰۰ و ۰۱۱۱ بلوک‌های مخروطی هستند که در تصویر دیده نمی‌شوند. بلوک‌های ۰۱۱۰، ۰۱۰۰ و ۰۰۰۰ بلوک‌های قابل جابجایی هستند که تحت تأثیر نیروی جاذبه پایدار هستند. بلوک‌های ۱۱۰۱ و ۰۰۱۰ به خاطر شکل تونل حذف می‌شوند. دیگر بلوک‌های تشکیل شده و شرایط آن‌ها در جدول ۴-۹ آمده است.

جدول ۴-۹ نتایج شرایط بلوک های قابل جابجایی تونل انحراف با راستای شمال شرقی- جنوب غربی (امتداد N55 درجه)

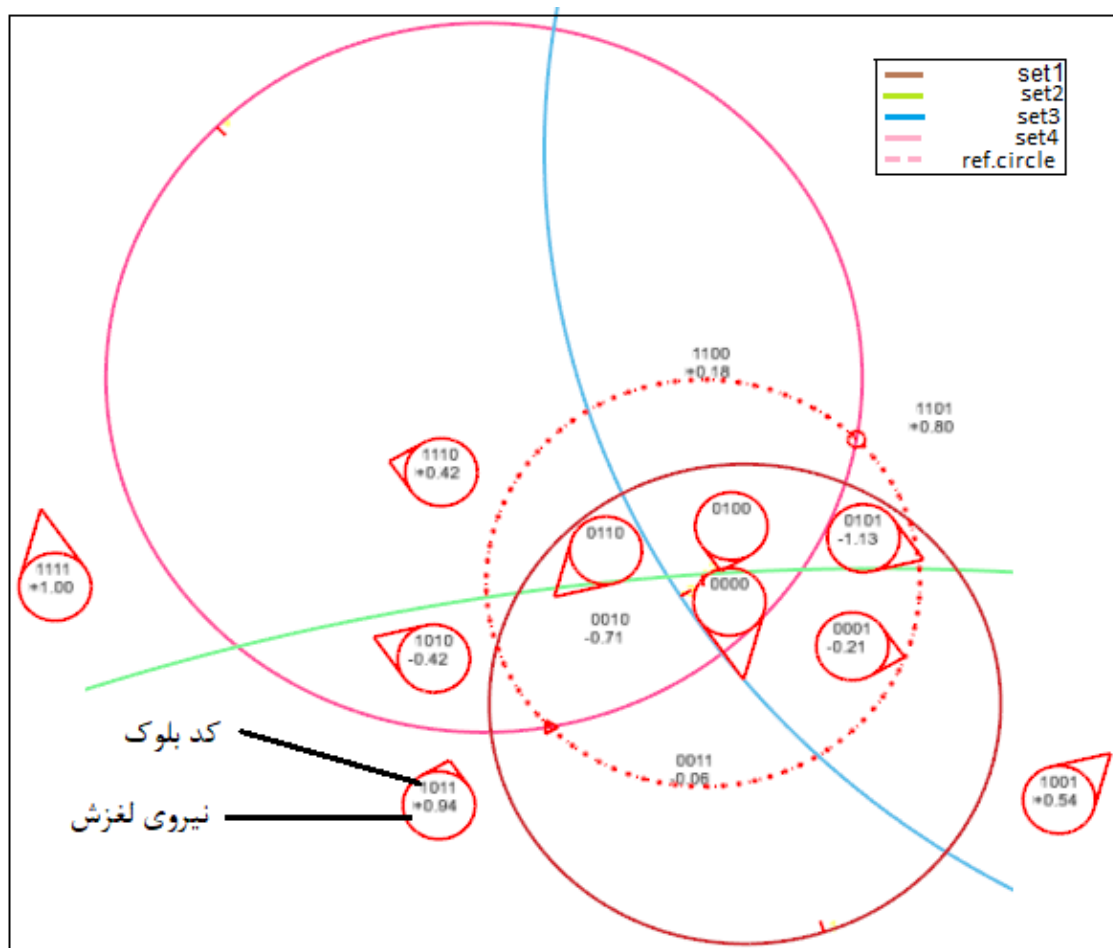
| بلوک | هرم درزه | پایداری بلوک     | تیروی لغزش | ضریب ایمنی | حجم بلوک | جهت لغزش | نوع بلوک     |
|------|----------|------------------|------------|------------|----------|----------|--------------|
| ۱    | ۱۱۰۰     | ناپایدار         | ۰/۱۸۰۲     | ۰/۷۶۷۳     | ۰/۵۵۱۰   | J3/J4    | قابل جابجایی |
| ۲    | ۱۰۱۰     | پایدار با اصطکاک | -۰/۴۱۶۴    | ۱/۶۴۱۰     | ۲/۸۴۱۶   | J2/J4    | قابل جابجایی |
| ۳    | ۱۱۱۰     | ناپایدار         | ۰/۴۱۷۵     | ۰/۴۹۰۲     | ۱۷/۰۵۹۰  | J4       | قابل جابجایی |
| ۴    | ۰۰۰۱     | پایدار با اصطکاک | -۰/۲۰۵۶    | ۱/۴۱۰۵     | ۱۷/۰۵۹۰  | J1/J3    | قابل جابجایی |
| ۵    | ۱۰۰۱     | ناپایدار         | ۰/۵۴۰۴     | ۰/۴۲۹۰     | ۴۷/۲۵۹۱  | J2/J3    | قابل جابجایی |
| ۶    | ۰۱۰۱     | پایدار با اصطکاک | -۱/۱۲۹۷    | ۸/۱۶۱۸     | ۲/۸۴۱۶   | J1/J2    | قابل جابجایی |
| ۷    | ۰۰۱۱     | پایدار با اصطکاک | -۰/۰۶۳۸    | ۱/۱۲۰۴     | ۰/۵۵۱۰   | J1       | قابل جابجایی |
| ۸    | ۱۰۱۱     | ناپایدار         | ۰/۹۳۵۱     | ۰/۰۶۱۳     | ۴۰/۴۲۷۳  | J2       | قابل جابجایی |
| ۹    | ۱۱۱۱     | ناپایدار         | ۱          | ۰          | ۷۸/۶۲۸۷  | -        | سقوط بلوک    |

با توجه به نتایج جدول ۴-۹ مشخص گردید که ۸ بلوک قابل جابجایی و یک بلوک با شرایط سقوط را دارا هستند. بلوک های ۱۰۱۰ و ۰۱۰۱ بلوک های همزاد هستند و حجم آن ها برابر است، ولی ضریب ایمنی آن ها متفاوت است. بلوک ۰۱۰۱ دارای ضریب اطمینان بالایی است ولی ضریب اطمینان بلوک ۱۰۱۰ کم تر هست و نزدیک به یک است ولی به دلیل آن که حجم کمی دارد خطری جدی برای تونل محسوب نمی شود. دو بلوک ۰۰۰۱ و ۰۰۱۱ دارای ضریب ایمنی نزدیک به یک می باشند که از لحاظ مقاومتی پایدار هستند ولی بلوک ۰۰۰۱ به دلیل اینکه حجم بیشتری دارد باید در طراحی سیستم نگهداری لازم است که به آن توجه شود. بلوک ۱۱۰۰ بلوکی ناپایدار است ولی از آن جهت که داری حجم ناچیزی است می توان از آن صرف نظر کرد. سه بلوک ۱۰۰۱، ۱۱۱۰ و ۱۰۱۱ علاوه بر این که دارای شرایط ناپایدار هستند حجم بالایی هم دارند، این نشانگر آن است که باید توجه بیشتری در طراحی به آن ها شود. در اینجا بزرگ ترین بلوک کلیدی در راستای تونل همان بلوک کلیدی دارای شرایط سقوط یعنی بلوک ۱۱۱۱ است، که حجم آن ۷۸/۶۲۸۷ مترمکعب است. این بلوک یکی از بلوک هایی است که نسبت به سایر بلوک ها در شرایط بحرانی تر قرار دارد پس لازم است بلافاصله پس از حفر نسبت به نگهداری آن اقدام گردد. با مقایسه دو راستای N55 با N65 مشاهده می شود که بلوک های ناپایدار در راستای N55 دارای حجم کمتری نسبت به راستای N66 دارند. و از

این جهت می‌توان گفت که راستای N55 راستای بهینه‌تری نسبت به راستای N65 است.

نتایج تحلیل در راستای N45 (اختلاف ۲۰- نسبت به راستای پیشنهادی مهندس مشاور طرح) در

شکل ۴-۱۲ آمده است:



شکل ۴-۱۲ تصویر استریوگراف دسته‌درزه ها و جهت‌گیری تونل (تونل انحراف با راستای شمال شرقی- جنوب غربی (امتداد  $N45^\circ$ ))

در این راستا همان‌طور که در شکل ۴-۱۲ مشاهده می‌کنید بلوک‌های که تحت جاذبه پایدار هستند

و همچنین بلوک‌های مخروطی همان بلوک‌هایی هستند که در دو راستای قبلی مشخص شدند. یکی

از تفاوت‌های که در این راستا نسبت به دو راستای قبلی دیده می‌شود تعداد بلوک‌هایی است که به

خاطر شکل تونل حذف می‌شوند. در این راستا ۴ بلوک ۱۱۰۰، ۱۱۰۱، ۰۰۱۱ و ۰۰۱۰ با توجه به

شکل و راستای تونل حذف می‌شوند سایر بلوک‌ها در جدول ۴-۱۰ آمده و نتایج آن نیز مشاهده

می‌کنید.

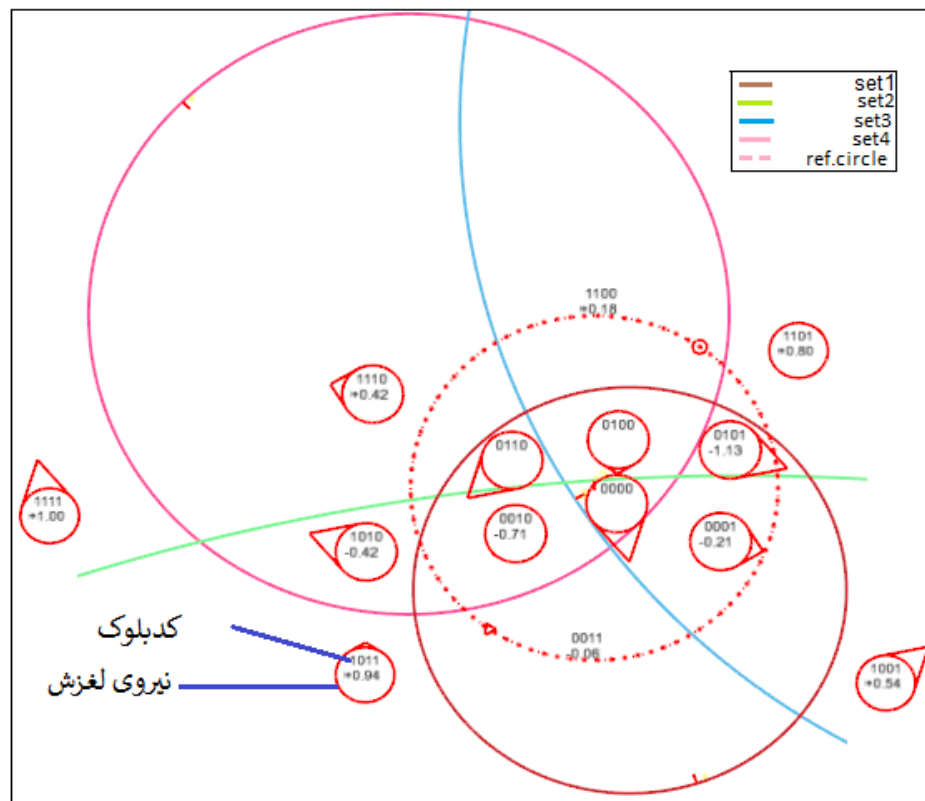
جدول ۴-۱۰ نتایج شرایط بلوک های قابل جابجایی تونل انحراف با راستای شمال شرقی- جنوب غربی (امتداد N45 درجه)

| بلوک | هرم درزه | پایداری بلوک     | نیروی لغزش | ضریب ایمنی | حجم بلوک | جهت لغزش | نوع بلوک     |
|------|----------|------------------|------------|------------|----------|----------|--------------|
| ۱    | ۱۰۱۰     | پایدار با اصطکاک | -۰/۴۱۶۴    | ۱/۶۴۱۰     | ۱۶/۸۷۶۰  | J2/J4    | قابل جابجایی |
| ۲    | ۱۱۱۰     | ناپایدار         | ۰/۴۱۷۵     | ۰/۴۹۰۲     | ۲۷/۲۶۲۵  | J4       | قابل جابجایی |
| ۳    | ۰۰۰۱     | پایدار با اصطکاک | -۰/۲۰۵۶    | ۱/۴۱۰۵     | ۲۷/۲۶۲۵  | J1/J3    | قابل جابجایی |
| ۴    | ۱۰۰۱     | ناپایدار         | ۰/۵۴۰۴     | ۰/۴۲۹۰     | ۲۷/۱۶۵۴  | J2/J3    | قابل جابجایی |
| ۵    | ۰۱۰۱     | پایدار با اصطکاک | -۱/۱۲۹۷    | ۸/۱۶۱۸     | ۱۰۶/۸۷۶۰ | J1/J2    | قابل جابجایی |
| ۶    | ۱۰۱۱     | ناپایدار         | ۰/۹۳۵۱     | ۰/۰۶۱۳     | ۳۱/۱۷۲۸  | J2       | قابل جابجایی |
| ۷    | ۱۱۱۱     | ناپایدار         | ۱          | ۰          | ۹۵/۸۰۴۵  | -        | سقوط بلوک    |

با توجه به نتایج جدول ۴-۵ مشخص گردید که ۶ بلوک قابل جابجایی و یک بلوک با شرایط سقوط را دارا هستند. بلوک ۰۱۰۱ دارای بیشترین حجم در این راستا است، ولی از آن جهت که دارای ضریب ایمنی بالایی است پس یک بلوک پایدار است. بلوک های ۱۰۱۰ و ۰۰۰۱ با توجه به اینکه ضریب ایمنی نزدیک به یک دارند و همچنین دارای حجم قابل ملاحظه ای نیز هستند لازم است به این دو بلوک با اینکه با اصطکاک کافی پایدار هستند در طراحی توجه شود. ۳ بلوک ۱۱۱۰، ۱۰۰۱ و ۱۰۱۱ به دلیل اصطکاک ناکافی دارای شرایط بحرانی هستند که لازم است با وسایل نگهدارنده پایدار شوند. بلوک ۱۱۱۱ بحرانی ترین بلوک کلیدی است که هیچ اصطکاکی ندارد و لازم است بلافاصله بعد از حفر تونل پایدار شود. در اینجا بزرگ ترین بلوک کلیدی در راستای تونل همان بلوک کلیدی دارای شرایط سقوط یعنی بلوک ۱۱۱۱ است، که حجم آن ۹۵/۸۰۴۵ مترمکعب است. بلوک ماکزیمم در این راستا با راستای دوم یعنی N65 بلوکشان یکی است ولی حجم آن در راستای N45 بیشتر است. یک از تفاوت های مهم که در این راستا نسبت به راستای قبلی قابل مشاهده است تعداد بلوک ها است. در این راستا هر چند تعداد بلوک های تشکیل شده نسبت به راستای قبلی کم تر هست ولی حجم بلوک های ناپایدار تشکیل شده بزرگ تر است. از این جهت می توان گفت که راستای N55 نسبت به این راستا بهینه تر است.

نتایج تحلیل در راستای N35 (اختلاف ۳۰- درجه نسبت به راستای پیشنهادی مشاور طرح) در

شکل ۴-۱۳ و جدول ۴-۱۱ آمده است:



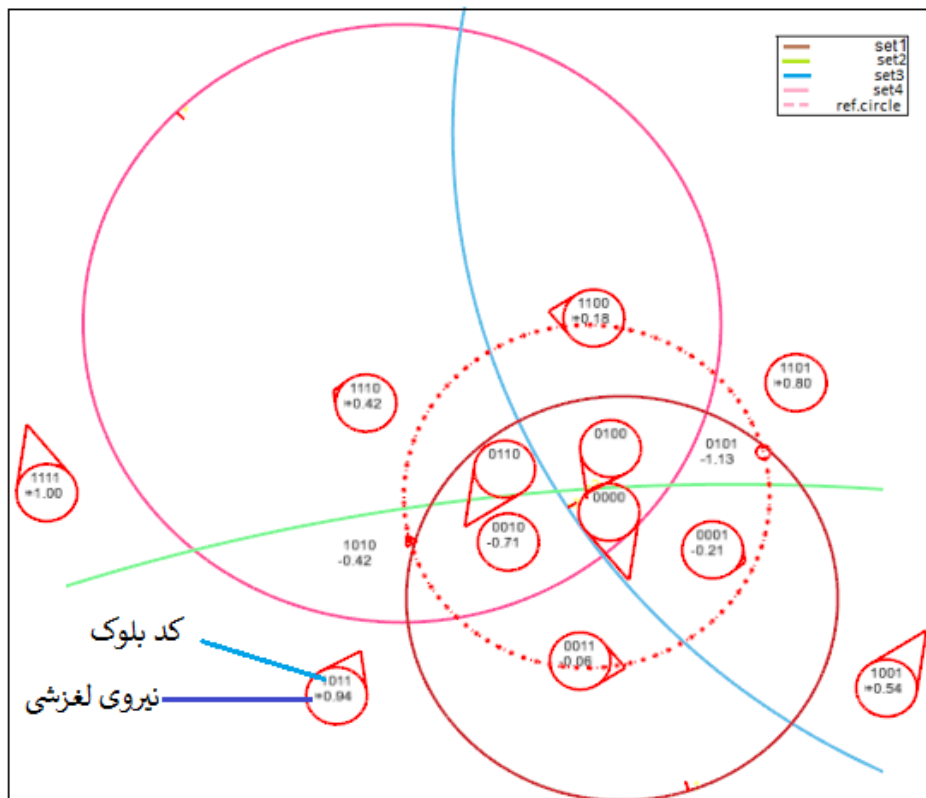
شکل ۴-۱۳ تصویر استریوگراف دسته‌درزه‌ها و جهت‌گیری تونل (تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد N35))

در این حالت نیز علاوه بر بلوک‌های که با جاذبه پایدارند و بلوک‌هایی که مخروطی هستند دو بلوک ۱۱۰۰ و ۰۰۱۱ نیز با توجه به شکل و راستای تونل حذف می‌شوند. بلوک‌های که به علت وجود جاذبه پایدار هستند جهت لغزشی برای آن‌ها وجود ندارد و همان‌طور که در تصویر می‌بینیم نیروی لغزشی نیز برای آن‌ها وجود ندارد. پیش‌تر بحث کردیم اگر نیروی لغزش کم‌تر از یک باشد بلوک پایدار و اگر بیشتر از یک باشد بلوک ناپایدار است و همچنین اگر برابر با یک باشد دارای شرایط بحرانی است. که این نیروی لغزش برای هر بلوک در تصویر مشاهده می‌شود. سایر بلوک‌ها و شرایط آن‌ها در جدول ۴-۱۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱۱ نتایج شرایط بلوک‌های قابل جابجایی تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد N35 درجه)

| بلوک | هرم درزه | پایداری بلوک     | تیروی لغزش | ضریب ایمنی | حجم بلوک | جهت لغزش | توع بلوک     |
|------|----------|------------------|------------|------------|----------|----------|--------------|
| ۱    | ۰۰۱۰     | پایدار با اصطکاک | -۰/۷۰۷۲    | ۴/۵۶۸۳     | ۹۲/۳۱۵۶  | J1/J4    | قابل جابجایی |
| ۲    | ۱۰۱۰     | پایدار با اصطکاک | -۰/۴۱۶۴    | ۱/۶۴۱۰     | ۶۹/۴۷۶۶  | J2/J4    | قابل جابجایی |
| ۳    | ۱۱۱۰     | ناپایدار         | ۰/۴۱۷۵     | ۰/۴۹۰۲     | ۱/۲۵۳۱   | J4       | قابل جابجایی |
| ۴    | ۰۰۰۱     | پایدار با اصطکاک | -۰/۲۰۵۶    | ۱/۴۱۰۵     | ۱/۲۵۳۱   | J1/J3    | قابل جابجایی |
| ۵    | ۱۰۰۱     | ناپایدار         | ۰/۵۴۰۴     | ۰/۴۲۹۰     | ۱۸/۴۶۵۷  | J2/J3    | قابل جابجایی |
| ۶    | ۰۱۰۱     | پایدار با اصطکاک | -۱/۱۲۹۷    | ۸/۱۶۱۸     | ۶۹/۴۷۶۶  | J1/J2    | قابل جابجایی |
| ۷    | ۱۱۰۱     | ناپایدار         | ۰/۸۰۰۹     | ۰/۱۷۴۶     | ۰/۰۵۰۳   | J3       | قابل جابجایی |
| ۸    | ۱۰۱۱     | ناپایدار         | ۰/۹۳۵۱     | ۰/۰۶۱۳     | ۲/۰۷۰۰   | J2       | قابل جابجایی |
| ۹    | ۱۱۱۱     | ناپایدار         | ۱          | ۰          | ۳۸/۸۰۰۲  | -        | سقوط بلوک    |

با توجه به نتایج جدول ۴-۱۱ مشخص گردید که ۸ بلوک قابل جابجایی و یک بلوک با شرایط سقوط را دارا هستند. دو بلوک ۱۰۱۰ و ۰۱۰۱ دارای حجم یکسان ۶۹/۴۷۶۶ مترمکعب می باشند و هر دو با توجه به ضریب اطمینان پایدار در نظر گرفته می شوند، اما این تصمیم در رابطه با بلوک ۱۰۱۰ به دلیل اینکه ضریب اطمینان نزدیک به یک دارد لازم است که متفاوت باشد، پس لازم است در طراحی به آن توجه شود. سه بلوک ۱۱۱۰، ۱۱۰۱ و ۱۰۱۱ دارای ضریب ایمنی کم تر از یک هستند ولی به دلیل اینکه دارای حجم ناچیزی هستند می توان از آن ها صرف نظر کرد. بلوک ۰۰۱۰ بزرگ ترین بلوک قابل جابجایی در این راستا است ولی به دلیل آن که ضریب ایمنی بالایی دارد پایدار است و نیازی به نگهداری ندارد. تنها بلوک ناپایدار در این راستا که دارای حجم قابل توجهی است بلوک بحرانی ۱۱۱۱ است که لازم است بلافاصله بعد از حفر نگهداری آن انجام شود. با توجه به شرایط بلوک های ناپایدار تشکیل شده در این راستا مشاهده می شود که بلوک های ناپایدار این راستا نسبت به راستاهایی که در قبل بررسی شد یعنی راستاهای N65, N55, N45 دارای حجم کمتری هستند. و این نشان می دهد که چه از لحاظ ناپایداری بلوک ها و چه از لحاظ تشکیل بلوک کلیدی حداکثر این راستا، راستای بهینه تری نسبت به دیگر راستاها است. نتایج تحلیل در راستای N75 (۱۰+ درجه اختلاف نسبت به راستای پیشنهادی مهندس مشاور طرح) در شکل ۴-۱۴ آمده است:



شکل ۴-۱۴ تصویر استریوگراف دسته‌درزه‌ها و جهت‌گیری تونل (تونل انحراف با راستای شمال شرقی- جنوب غربی) بلوک‌هایی که با توجه به شکل و همچنین راستای تونل تشکیل نمی‌شوند همان‌طور که در تصویر استریوگراف می‌بینید بلوک‌های ۱۰۱۰ و ۱۰۱۰ می‌باشند. همچنین بلوک ۰۰۱۰ نیز دارای حجم خیلی ناچیزی است که می‌توان گفت این بلوک هم با توجه به شکل و جهت تونل حذف می‌شود. سایر بلوک‌ها و شرایط آن‌ها در جدول ۴-۱۲ آورده شده است.

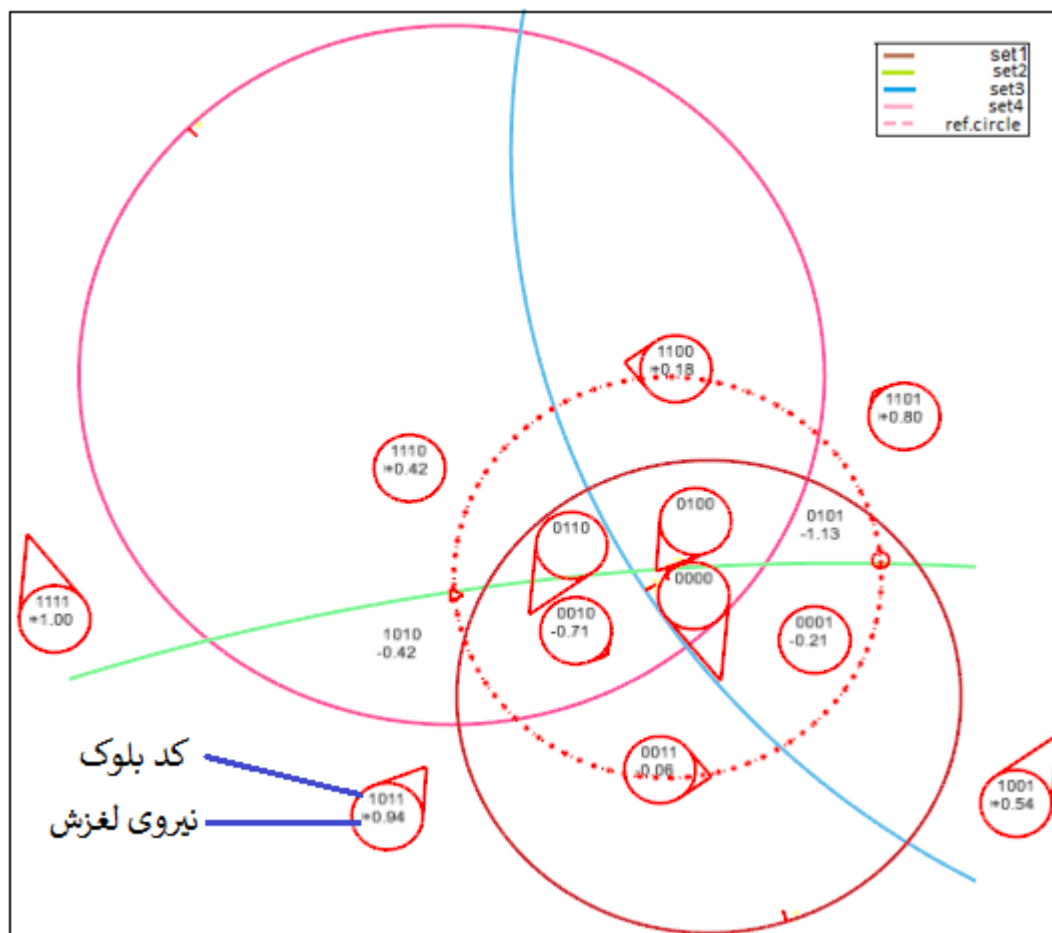
جدول ۴-۱۲ نتایج شرایط بلوک‌های قابل جابجایی تونل انحراف با راستای شمال شرقی- جنوب غربی (امتداد N75 درجه)

| بلوک | هرم درزه | پایداری بلوک     | نیروی لغزش | ضریب ایمنی | حجم بلوک | جهت لغزش | نوع بلوک     |
|------|----------|------------------|------------|------------|----------|----------|--------------|
| ۱    | ۱۱۰۰     | ناپایدار         | ۰/۱۸۰۲     | ۰/۷۶۷۴     | ۱۹/۵۹۰۴  | J3/J4    | قابل جابجایی |
| ۲    | ۱۱۱۰     | ناپایدار         | ۰/۴۱۷۵     | ۰/۴۹۰۲     | ۱/۶۴۵۴   | J4       | قابل جابجایی |
| ۳    | ۰۰۰۱     | پایدار با اصطکاک | -۰/۲۰۵۶    | ۱/۴۱۰۵     | ۱/۶۴۵۴   | J1/J3    | قابل جابجایی |
| ۴    | ۱۰۰۱     | ناپایدار         | ۰/۵۴۰۴     | ۰/۴۲۹۰     | ۳۸۵/۲۷۱  | J2/J3    | قابل جابجایی |
| ۵    | ۱۱۰۱     | ناپایدار         | ۰/۸۰۰۹     | ۰/۱۷۴۶     | ۰/۰۰۸۴   | J3       | قابل جابجایی |
| ۶    | ۰۰۱۱     | پایدار با اصطکاک | -۰/۰۶۳۸    | ۱/۱۲۰۴     | ۱۹/۵۹۰۴  | J1       | قابل جابجایی |
| ۷    | ۱۰۱۱     | ناپایدار         | ۰/۹۳۵۱     | ۰/۰۶۱۳     | ۹/۵۴۳۴   | J2       | قابل جابجایی |
| ۸    | ۱۱۱۱     | ناپایدار         | ۱          | ۰          | ۱۱۶/۹۵   | -        | سقوط بلوک    |

با توجه به نتایج جدول ۴-۱۲ مشخص گردید که ۷ بلوک قابل جابجایی و یک بلوک با شرایط سقوط

را دارا هستند. یکی از تفاوت‌های اساسی این راستا با راستاهای دیگر در تشکیل بزرگ‌ترین بلوک ناپایدار است. بزرگ‌ترین بلوک کلیدی در این راستا بلوک ۱۰۰۱ است، که حجم آن ۳۸۵/۲۷۱ مترمکعب است که نیاز به تحکیم سنگین‌تری دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تفاوت قابل توجهی در حجم بزرگ‌ترین بلوک ناپایدار وجود دارد. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در راستاهای مختلف مشاهده می‌شود که این راستا بدترین شرایط ناپایداری را در بین راستاهای بررسی شده تا اینجا را دارا است.

نتایج تحلیل در راستای N85 (۲۰+ اختلاف) در شکل ۴-۱۵ آمده است:



شکل ۴-۱۵ تصویر استریوگراف دسته‌درزه‌ها و جهت‌گیری تونل (تونل انحراف با راستای شمال شرقی- جنوب غربی (امتداد N85)) در تصویر استریوگرافیک راستای N85 همان‌طور که مشاهده می‌شود بلوک‌های که با توجه به شکل و راستای تونل حذف می‌شوند همانند راستای N75 است. بلوک‌های قابل جابجایی دارای شرایط لغزش

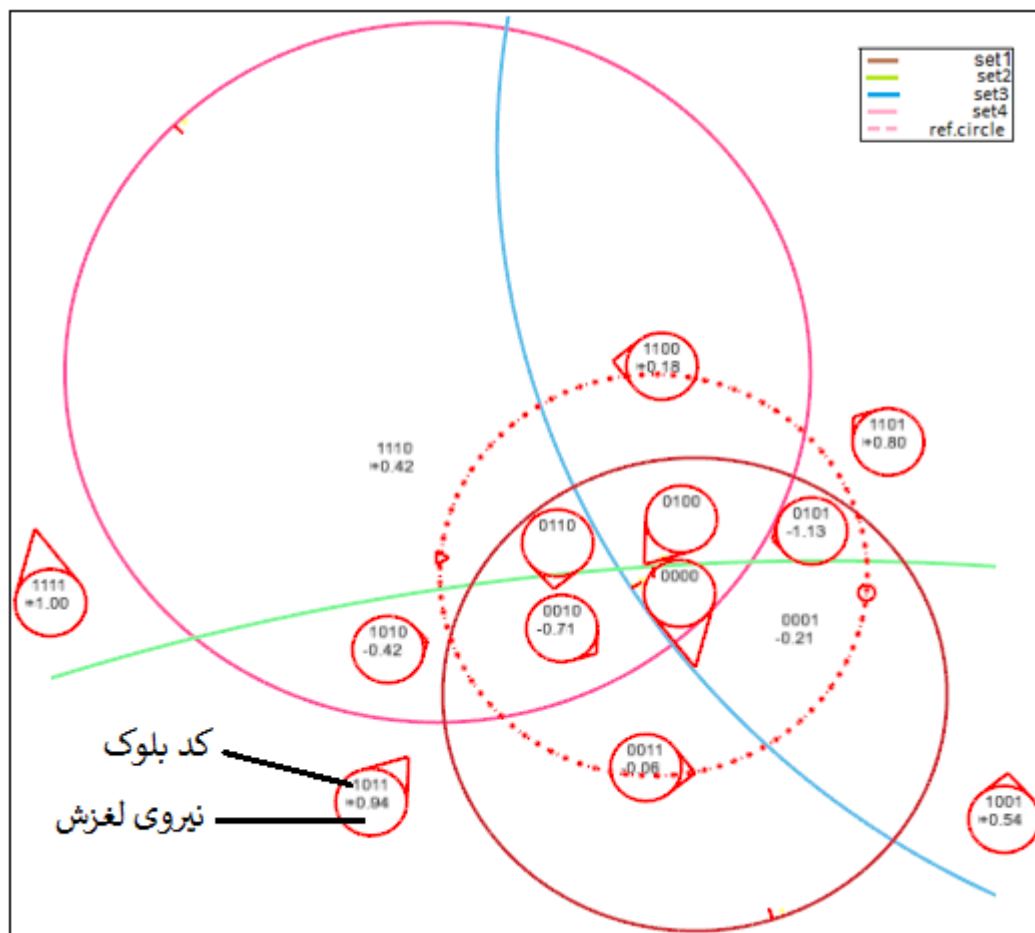
و سقوط در جدول ۴-۱۳ آورده شده و شرایط آن‌ها نیز مشخص شده است.

جدول ۴-۱۳ نتایج شرایط بلوک‌های قابل جابجایی تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد N85)

| بلوک | هرم درزه | پایداری بلوک     | نیروی لغزش | ضریب ایمنی | حجم بلوک | جهت لغزش | نوع بلوک     |
|------|----------|------------------|------------|------------|----------|----------|--------------|
| ۱    | ۱۱۰۰     | ناپایدار         | ۰/۱۸۰۲     | ۰/۷۶۷۴     | ۶/۱۴۳۹   | J3/J4    | قابل جابجایی |
| ۲    | ۰۰۱۰     | پایدار با اصطکاک | -۰/۷۰۷۲    | ۴/۵۶۸۳     | ۱/۷۴۶۵   | J1/J4    | قابل جابجایی |
| ۳    | ۱۱۱۰     | ناپایدار         | ۰/۴۱۷۵     | ۰/۴۹۰۲     | ۰/۰۱۷۳   | J4       | قابل جابجایی |
| ۴    | ۰۰۰۱     | پایدار با اصطکاک | -۰/۲۰۵۶    | ۱/۴۱۰۵     | ۰/۰۱۷۳   | J1/J3    | قابل جابجایی |
| ۵    | ۱۰۰۱     | ناپایدار         | ۰/۵۴۰۴     | ۰/۴۲۹۰     | ۶۷۹/۱۸   | J2/J3    | قابل جابجایی |
| ۶    | ۱۱۰۱     | ناپایدار         | ۰/۸۰۰۹     | ۰/۱۷۴۶     | ۱/۷۴۶۵   | J3       | قابل جابجایی |
| ۷    | ۰۰۱۱     | پایدار با اصطکاک | -۰/۰۶۳۸    | ۱/۱۲۰۴     | ۶/۱۴۳۹   | J1       | قابل جابجایی |
| ۸    | ۱۰۱۱     | ناپایدار         | ۰/۹۳۵۱     | ۰/۰۶۱۳     | ۱/۵۹۳۸   | J2       | قابل جابجایی |
| ۸    | ۱۱۱۱     | ناپایدار         | ۱          | ۰          | ۲۰۵/۸۲   | -        | سقوط بلوک    |

با توجه به نتایج جدول ۴-۱۳ مشخص گردید که ۷ بلوک قابل جابجایی و یک بلوک با شرایط سقوط را دارا هستند. هر چند از این تعداد بلوک‌های تشکیل شده در این راستا ۶ بلوک دارای حجم کم هستند اما دو بلوک ۱۰۰۱ و ۱۱۱۱ دارای حجم زیاد می‌باشند که نیاز به نگهدارنده‌های خیلی سنگین دارند. بزرگ‌ترین بلوک کلیدی دارای حجم خیلی زیاد و همچنین ضریب اطمینان پایین است که از نظر حجم تقریباً دو برابر حجم بزرگ‌ترین بلوک در راستای N75 است. همچنین بلوک ۱۱۱۱ نیز دارای حجم قابل توجهی است که بلوک با شرایط بحرانی است. با این شرایط این راستا نسبت به راستاهای که در قبل بررسی شدند دارای شرایط ناپایدارتری برای انتخاب راستای تونل است.

نتایج تحلیل در راستای N95 (+۳۰ درجه اختلاف نسبت به راستای پیشنهادی مهندس مشاور طرح) در شکل ۱۶-۴ آمده است:



شکل ۴-۱۶ تصویر استریوگراف دسته درزه ها و جهت گیری تونل (تونل انحراف با راستای جنوب شرقی - شمال غربی)

شکل ۴-۱۶ تصاویر استریو گرافیک چهار دسته درزه تکیه گاه چپ سد (به دلیل قرارگیری تونل انحراف در تکیه گاه چپ سد، این دسته درزه ها همان دسته درزه های مسیر تونل در نظر گرفته می شوند) و راستای تونل در N95 (جنوب شرقی - شمال غربی) را نشان می دهد. در اینجا سه بلوک ۰۰۰۰ و ۰۱۱۰، ۰۱۰۰ همان طور که در شکل مشاهده می شود نیروی لغزشی برای آن ها وجود ندارد یعنی این بلوک ها تحت شرایط جاذبه پایدار خواهند بود. دو بلوک ۱۰۰۰ و ۰۱۱۱ که با توجه به تصویر استریوگرافیک هرم درزه آن ها وجود ندارد، دو بلوک مخروطی می باشند. بلوک های مخروطی با توجه به نوع شکلی که دارند نسبت به فضای حفاری پایدار می باشند. دو بلوک ۱۱۱۰ و ۰۰۰۱ همان طور که در تصویر نیز مشاهده می شود با توجه به شکل و راستای تونل حذف می شوند. سایر بلوک ها و مشخصات آن ها در جدول ۴-۱۴ آمده است.

جدول ۴-۱۴ نتایج شرایط بلوک‌های قابل جابجایی تونل انحراف با راستای جنوب شرقی - شمال غربی (امتداد N95)

| بلوک | هرم درزه | پایداری بلوک     | نیروی لغزش | ضریب ایمنی | حجم بلوک | جهت لغزش | نوع بلوک     |
|------|----------|------------------|------------|------------|----------|----------|--------------|
| ۱    | ۱۱۰۰     | ناپایدار         | ۰/۱۸۰۲     | ۰/۷۶۷۴     | ۱/۴۱۱۷   | J3/J4    | قابل جابجایی |
| ۲    | ۰۰۱۰     | پایدار با اصطکاک | -۰/۷۰۷۲    | ۴/۵۶۸۳     | ۷/۲۹۰۸   | J1/J4    | قابل جابجایی |
| ۳    | ۱۰۱۰     | پایدار با اصطکاک | -۰/۴۱۶۴    | ۱/۶۴۱۰     | ۰/۹۹۵۳   | J2/J4    | قابل جابجایی |
| ۴    | ۱۰۰۱     | ناپایدار         | ۰/۵۴۰۴     | ۰/۴۲۹۰     | ۸/۲۴۵۶   | J2/J3    | قابل جابجایی |
| ۵    | ۰۱۰۱     | پایدار با اصطکاک | -۱/۱۲۹۷    | ۸/۱۶۱۸     | ۰/۹۹۵۳   | J1/J2    | قابل جابجایی |
| ۶    | ۱۱۰۱     | ناپایدار         | ۰/۸۰۰۹     | ۰/۱۷۴۶     | ۷/۲۹۰۸   | J3       | قابل جابجایی |
| ۷    | ۰۰۱۱     | پایدار با اصطکاک | -۰/۰۶۲۸    | ۱/۱۲۰۴     | ۱/۴۱۱۷   | J1       | قابل جابجایی |
| ۸    | ۱۰۱۱     | ناپایدار         | ۰/۹۳۵۱     | ۰/۰۶۱۳     | ۶۳/۸۰۲۵  | J2       | قابل جابجایی |
| ۹    | ۱۱۱۱     | ناپایدار         | ۱          | ۰          | ۳۸/۰۶۶۱  | -        | سقوط بلوک    |

با توجه به نتایج جدول ۴-۱۴ مشخص گردید که ۸ بلوک قابل جابجایی و یک بلوک قابلیت سقوط را دارا هستند. بلوک‌های ۱۱۰۰، ۱۰۰۱ و ۱۱۰۱ بلوک‌هایی هستند که ضریب اطمینان آن‌ها کمتر از یک می‌باشند یعنی ناپایدار هستند، ولی به دلیل حجم کمی که نسبت به بزرگ‌ترین بلوک کلیدی ناپایدار دارند می‌توان از آن‌ها صرف‌نظر کرد. بزرگ‌ترین بلوک کلیدی ناپایدار در این راستا بلوک ۱۰۱۱ با حجم ۶۳/۸۰۲۵ مترمکعب است که دارای ضریب اطمینان نزدیک به صفر است. که لازم است با سیستم نگهدارنده تقویت شود. دیگر بلوک ناپایدار در این راستا بلوک ۱۱۱۱ است که دارای شرایط بحرانی سقوط است که لازم است تقویت شود. از لحاظ مقایسه پایداری این راستا با راستاهای قبل از لحاظ حجم بزرگ‌ترین بلوک کلیدی تشکیل شده نسبت به راستاهای مختلف بررسی شده N85، N75، N65، N55، N45 بزرگ‌ترین بلوک تشکیل شده در این راستا دارای حجم کم‌تری است. اما بزرگ‌ترین بلوک تشکیل شده در این راستا نسبت به راستای N35 دارای حجم بیشتری است. اگر بخواهیم بر اساس بزرگ‌ترین بلوک کلیدی راستای تونل را مشخص کنیم و راستاها را از این لحاظ رتبه‌بندی کنیم این راستا بعد از راستای N35 در رتبه دوم قرار می‌گیرد.

نتایج تحلیل‌های انجام شده برای شناسایی بلوک‌های ناپایدار در راستاهای انتخابی در جدول ۴-۱۵ آمده است و در نهایت با توجه به ضریب اطمینان و حجم بلوک راستای بهینه انتخاب می‌شود.

جدول ۴-۱۵ نتایج تحلیل بلوک‌های ناپایدار در ۷ راستای انتخابی

| راستاهای<br>انتخابی (اختلاف<br>نسبت به<br>راستای مشاور<br>طرح) | بلوک‌های ناپایدار<br>در راستای انتخابی | ضریب<br>اطمینان (قطعی<br>از روش تئوری<br>بلوک) | حجم (متر<br>مکعب) | بلوک دارای شرایط<br>سقوط |                   |
|----------------------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------|
|                                                                |                                        |                                                |                   | کد بلوک                  | حجم (متر<br>مکعب) |
| N35(-30)                                                       | ۱۰۰۱                                   | ۰/۴۳                                           | ۱۸/۴۶             | ۱۱۱۱                     | ۲۸/۸              |
| N45(-20)                                                       | ۱۱۱۰                                   | ۰/۴۹                                           | ۲۷/۲۶             | ۱۱۱۱                     | ۹۵/۸۰             |
|                                                                | ۱۰۰۱                                   | ۰/۴۳                                           | ۲۷/۱۶             |                          |                   |
|                                                                | ۱۰۱۱                                   | ۰/۰۶                                           | ۳۱/۱۷             |                          |                   |
| N55(-10)                                                       | ۱۱۱۰                                   | ۰/۴۹                                           | ۱۷/۰۵             | ۱۱۱۱                     | ۷۸/۶۲             |
|                                                                | ۱۰۰۱                                   | ۰/۴۳                                           | ۴۷/۳۵             |                          |                   |
|                                                                | ۱۰۱۱                                   | ۰/۰۶                                           | ۴۰/۴۳             |                          |                   |
| N65(0)                                                         | ۱۱۰۰                                   | ۰/۷۷                                           | ۱۱/۸۱             | ۱۱۱۱                     | ۸۵/۰۶             |
|                                                                | ۱۱۱۰                                   | ۰/۴۹                                           | ۱۶/۶۹             |                          |                   |
|                                                                | ۱۰۰۱                                   | ۰/۴۳                                           | ۱۱۶/۸             |                          |                   |
|                                                                | ۱۰۱۱                                   | ۰/۰۶                                           | ۸۳/۴۲             |                          |                   |
| N75(+10)                                                       | ۱۰۰۱                                   | ۰/۴۳                                           | ۳۸۵/۲             | ۱۱۱۱                     | ۱۱۶/۹۵            |
|                                                                | ۱۱۰۰                                   | ۰/۷۷                                           | ۱۹/۵۹             |                          |                   |
| N85(+20)                                                       | ۱۰۰۱                                   | ۰/۴۳                                           | ۶۷۹/۱             | ۱۱۱۱                     | ۲۰۵/۸             |
| N95(+30)                                                       | ۱۰۱۱                                   | ۰/۰۶                                           | ۶۳/۸              | ۱۱۱۱                     | ۳۸/۰۶             |

با تغییرات راستای تونل  $\hat{a}$  بلوک‌های مختلفی با توجه به راستا و شکل تونل تشکیل و حذف می‌شوند. تعداد بلوک‌های قابل جابه‌جایی به بخش‌های خاصی از تونل محدود می‌شوند. با تغییرات جهت‌گیری تونل  $\hat{a}$ ، زاویه نسبی بین  $\hat{a}$  و لبه‌های بلوک محدود مختلف است. بر طبق این اختلاف شکل، حجم، جهت لغزش و ماکزیمم بلوک‌های کلیدی تغییر می‌کنند. این تغییرات عمدتاً به دلیل تغییر اندازه بلوک کلیدی در جهت‌های مختلف تونل  $\hat{a}$  است. بر طبق نظریه تئوری بلوک اگر ضریب اطمینان بلوک بالاتر از یک باشد بلوک پایدار است پس بلوک‌های که ضریب ایمنی آن‌ها بالاتر از یک باشد در انتخاب راستای بهینه برای تونل نقشی ندارند. اگر کاربری تونل که تونل انحراف آب است به ما اجازه انتخاب اختلاف ۳۰ درجه نسبت به راستای پیشنهادی بدهد راستای بهینه با توجه به اطلاعات جدول ۴-۱۵ راستای N35 است. در این راستا دو بلوک ناپایدار تشکیل شده است بلوک ۱۱۱۱ که بلوکی با شرایط سقوط در تمامی راستاها است کم‌ترین حجم خود در دو راستای N35 و N95 است. بلوک ناپایدار

دیگر در راستای N35 بلوک ۱۰۰۱ با ضریب ایمنی ۰/۴۳ است که نسبت به راستاهای دیگر دارای حجم کمتری است. با توجه به اینکه تونل مورد مطالعه تونل انحراف سد و به سمت پایین دست است پس نمی‌توان اختلاف زیادی با راستای پیشنهادی مهندس مشاور طرح داشته باشد. پس اگر کاربری تونل اجازه انتخاب اختلاف ۳۰ درجه را ندهد هر چند با این اختلاف راستای N35 دارای شرایط پایداری بهتری نسبت به سایر راستاها است اما بر طبق این شرایط نمی‌توان تونل را در این راستا حفر کرد پس باید سایر راستاهای انتخاب شده را بررسی و بهترین را انتخاب نمود. یکی از بلوک‌های ناپایدار که در دیگر راستاها بلوک با کد ۱۰۰۱ است که در راستاهای N65، N75 و N85 دارای حجم بالاتری نسبت به دو راستای دیگر یعنی N45 و N55 است پس برای انتخاب راستا بهینه باید به بررسی بلوک‌های ناپایدار دو راستا N45 و N55 پرداخته شود. بلوک‌های ناپایدار تشکیل شده در این دو راستا مانند هم هستند تنها حجم این بلوک‌ها در راستای N45 کمتر است. پس در نهایت مسیر بهینه تونل با توجه به نظریه بلوکی و با توجه به شرایط کاربری تونل N45 پیشنهاد می‌شود.

#### ۴-۴ جمع بندی

یک توده سنگ که به وسیله صفحات درزه محدود شده است می‌تواند تشکیل بلوک دهد. قابلیت جابجایی یک بلوک می‌تواند به وسیله شناخت صفحات آزاد بلوک تعریف کرد. برای تونل راستای تونل پارامتری بحرانی برای صفحات آزاد است. از طریق تحلیل تئوری بلوک با راستاهای مختلف تونل می‌توان کم‌ترین اندازه بلوک کلیدی ماکزیمم را برآورد کرد. بنابراین با این کار برای راستای بهینه تونل نیاز به نگهداری پایین‌تری داریم. با این حال محل ساخت، محل دهانه و هدف (کاربری) تونل آزادی در طراحی و راستای تونل را تا حدی محدود می‌کند. با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل تئوری بلوک در مسیرهای مختلف مشخص شد که اگر اختلاف ۳۰ درجه با راستای انتخابی مهندس مشاور طرح محدودیت نداشته باشد راستای N35 بهینه‌ترین راستا از نقطه نظر تشکیل بلوک‌های ناپایدار می‌باشد.

# تحلیل بایرداری احتمالاتی و سیستم

## نگهداری بلوک های توئل

## ۵-۱ مقدمه

مکانیزم ناپایداری‌های ساختاری عمدتاً در توده سنگ‌های نسبتاً درزه‌دار که در آن حفاری صورت می‌گیرد بررسی می‌شود. به‌طور کلی تحلیل‌های پیشین در این‌گونه فضاها بر اساس روش‌های طبقه‌بندی توده سنگ انجام گرفته است. این روش‌ها تشکیل بلوک‌های قابل جابجایی در توده سنگ را نمی‌توانند در نظر بگیرند که این یک مشکل اساسی است. ناپایداری بلوک به هیچ کدام از طبقه‌بندی‌های توده سنگ وابسته نیست. تئوری بلوک، بلوک‌هایی که از تقاطع دسته‌درزه‌ها در پشت سطح آزاد حفاری و از ترکیب نیم فضاها درزه به وجود می‌آیند، بلوک‌های قابل جابجایی، هندسه بلوک، جهت لغزش احتمالی یا سقوط و فاکتور اطمینان بلوک با استفاده از یک رویکرد قطعی تعیین می‌کند. روش تئوری بلوک ویژگی‌های توده سنگ را به عنوان پارامترهای قطعی در نظر می‌گیرد. با این حال درک از پایداری ساختاری تونل، علی‌رغم فرض‌های موجود بهبود یافته است. بسیاری از ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ مانند شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها و خواص مکانیکی آن‌ها در یک محدوده متفاوت می‌باشند. تحقیقات محدودی بر روی تحلیل احتمالاتی ناپایداری‌های ساختاری بلوک در فضاها زیرزمینی صورت گرفته است. در این تحقیق تحلیل احتمالاتی ساختاری بلوک با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو صورت گرفته است.

## ۵-۲ تحلیل احتمالاتی بلوک‌های قابل جابجایی

تحلیل انجام شده با نظریه بلوکی برای شناسایی بلوک‌های ناپایدار بر اساس پارامتر ضریب ایمنی (SF) است به عبارت دیگر اگر ضریب ایمنی بیشتر از ۱ باشد بلوک مورد نظر پایدار و اگر کمتر از ۱ باشد ناپایدار است. پارامترهای استفاده شده جهت محاسبه SF معمولاً بر اساس مقادیر قطعی پارامترهای ورودی است. اما این پارامترها متغیرهای تصادفی بوده یعنی دارای مقدار دقیق و قطعی نیستند. از آنجائی که پارامترهای ورودی محاسبه ضریب ایمنی دارای عدم قطعیت هستند، مقادیر ضریب ایمنی بدست آمده نیز قطعی نیست. توزیع تصادفی پارامترهای مکانیکی توده سنگ، باعث به وجود آمدن عدم قطعیت در ارزیابی پایداری بلوک‌های سنگی می‌شود. در این ارزیابی پارامترهای که

از درجه اهمیت بالاتری در پایداری و ایجاد شرایط ساختاری بلوک هستند در نظر گرفته شده تا نتایج ارزیابی به واقعیت نزدیکتر باشد. در این مطالعه زاویه اصطکاک درزه ( $\varphi$ )، زاویه شیب درزه ( $\alpha$ ) و زاویه جهت شیب درزه ( $\beta$ ) به عنوان متغیرهای تصادفی انتخاب شده اند. برای تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی بلوک‌ها مراحل زیر انجام شده است:

- ۱- انتخاب تابع توزیع مناسب برای هر پارامتر با استفاده از نرم‌افزار Easy fit
- ۲- نوشتن روابط مورد نیاز برای بدست آوردن ضریب ایمنی با استفاده از نرم‌افزار Excel
- ۳- تحلیل روش مونت کارلو بر روی ضریب ایمنی بلوک‌ها با استفاده از نرم‌افزار Crystalball

#### ۵-۲-۱ انتخاب تابع توزیع مناسب پارامترهای ورودی

در نظریه آمار و احتمالات تابع توزیع احتمال بیانگر احتمال هر یک از مقادیر متغیر تصادفی (در مورد متغیر گسسته) و یا احتمال قرار گرفتن متغیر در یک بازه مشخص (در مورد متغیر تصادفی پیوسته) است. در این تحقیق برای بدست آوردن تابع توزیع پارامترها از نرم‌افزار Easyfit استفاده شده است. Easyfit نرم‌افزاری است که برای تجزیه و تحلیل داده‌های آماری و بررسی قابل اطمینان داده‌ها و انتخاب بهترین مدل، طراحی شده است. توسط این نرم‌افزار می‌توان خیلی راحت و سریع، بهترین توزیع احتمال متناسب با داده‌ها را انتخاب کرده و زمان تجزیه و تحلیل را نسبت به روش‌های دستی، حدود ۷۰-۹۵ درصد، کاهش داد. ویژگی‌های متعددی برای این نرم‌افزار طراحی شده است که در صرفه‌جویی در وقت، جلوگیری از اشتباهات تجزیه و تحلیل، و کمک به تصمیم‌گیری‌های بهتر کمک به سزایی خواهد نمود. از ویژگی‌های کلیدی دیگر این نرم‌افزار می‌توان به قابلیت تطبیق خودکار بیش از ۵۵ توزیع برای داده‌های ساده و امکان انتخاب بهترین مدل، اشاره کرد.

سه متغیر تصادفی زاویه اصطکاک، شیب و جهت شیب درزه برای تحلیل آماری و بررسی توزیع آماری آن‌ها انتخاب شده است. در این مطالعه همان‌طور که قبلاً بیان گردید، ۴ دسته‌درزه وجود دارد، که تابع‌های توزیع شیب و زاویه شیب هر کدام از دسته‌درزه‌ها به طور جداگانه و تابع توزیع زاویه اصطکاک نیز برای هر دسته‌درزه بدست آمده است. در این تحقیق از تابع توزیع بتا برای متغیرها استفاده شده است. تابع توزیع بتا در فصل دوم بررسی شده است. پارامترهای تابع توزیع بتا برای متغیرها در جدول ۵-۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱ پارامترهای تابع توزیع بتا برای شیب، جهت شیب و زاویه اصطکاک دسته درزه‌ها

| پارامترهای تابع بتا |            |       |       | متغیرها   | میانگین (درجه) | دسته - درزه‌ها |
|---------------------|------------|-------|-------|-----------|----------------|----------------|
| $\alpha_2$          | $\alpha_1$ | b     | a     |           |                |                |
| ۸/۴۴                | ۴/۰۵       | ۷۲/۵  | ۱۲/۶  | $\alpha$  | ۳۲             | $J_1$          |
| ۲/۷۲                | ۱/۹۳       | ۱۸۴   | ۱۴۷   | $\beta$   | ۱۶۲            |                |
| ۱/۹۷                | ۱/۸۹       | ۳۹/۶  | ۳۰/۶  | $\varphi$ | ۲۵             |                |
| ۳/۳۷                | ۲/۱۳       | ۱۱۴/۵ | ۷۱/۸  | $\alpha$  | ۸۵             | $J_2$          |
| ۲/۰۷                | ۱/۵۷       | ۱۹۸   | ۱۶۴   | $\beta$   | ۱۷۶            |                |
| ۱/۹۷                | ۱/۸۹       | ۳۹/۶  | ۳۰/۶  | $\varphi$ | ۲۵             |                |
| ۳/۳۴                | ۲/۳۳       | ۱۰۱/۳ | ۵۹/۳  | $\alpha$  | ۷۶             | $J_3$          |
| ۳/۸۸                | ۲/۶        | ۸۲/۹  | ۴۱/۳  | $\beta$   | ۵۸             |                |
| ۱/۹۹                | ۱/۹۱       | ۴۰/۵۷ | ۳۱/۵۹ | $\varphi$ | ۲۶             |                |
| ۳/۴۱                | ۲/۱۷       | ۸۱/۸۲ | ۳۸/۸  | $\alpha$  | ۵۵             | $J_4$          |
| ۲/۵۰                | ۱/۷۱       | ۳۳۶   | ۳۰۰   | $\beta$   | ۳۱۵            |                |
| ۱/۹۷                | ۱/۸۷       | ۳۸/۵۷ | ۲۹/۶۰ | $\varphi$ | ۲۴             |                |

در جدول ۵-۱ زاویه شیب دسته‌درزه،  $\beta$  زاویه جهت شیب دسته‌درزه و  $\varphi$  زاویه اصطکاک دسته‌درزه هستند.

## ۵-۲-۲ محاسبه ضریب ایمنی

برای بررسی پایداری بلوک‌ها و محاسبه ضریب اطمینان آن‌ها ابتدا جهت لغزش‌های مربوط به بلوک‌ها طبق نظریه بلوک بررسی می‌شود. روابط مربوط به جهت لغزش در فصل دوم آورده شده است. جهت لغزش بلوک‌ها توسط نرم‌افزار Easy.kbt تعیین شده است. سپس با توجه به اینکه لغزش

بر روی هر یک از صفحات یا تقاطع صفحات اتفاق بیفتد فاکتور اطمینان مربوطه محاسبه می‌گردد. در حالت کلی رابطه ضریب ایمنی به صورت زیر تعریف می‌شود (CHEN,2013):

$$SF = R/T \quad (5-1)$$

که در آن  $R$  نیروی مقاوم بلوک است که برای دو حالت لغزش بر روی یک صفحه و لغزش بر روی دو صفحه به صورت زیر بدست می‌آید.

در حالت لغزش بر روی یک صفحه (Godman,1985):

$$R = N_i \tan \varphi_i \quad (5-2)$$

که در آن  $\varphi_i$  زاویه اصطکاک سطح دسته‌درزه  $i$  بوده و  $N_i$  نیروی عکس‌العمل تکیه‌گاهی است که طبق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$N_i = -r \cdot V_i \quad (5-3)$$

که در آن  $r$  برآیند بردار نیرو مؤثر بر بلوک (در این تحقیق تنها نیروی ثقل در جهت  $z$  در نظر گرفته شده است) و  $V_i$  بردار یکه نرمال بر صفحه درزه  $i$  و به سمت بلوک است و از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$V_i = -\hat{n}_i \text{sign}(\hat{n}_i \cdot r) \quad (5-4)$$

که در آن  $n_i$  بردار یکه نرمال بر صفحه درزه  $i$  و رو به بالا است که طبق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$n_i = ((\sin \alpha_i \times \sin \beta_i), (\sin \alpha_i \cos \beta_i), (\cos \alpha_i)) \quad (5-5)$$

که در آن  $\alpha_i$  زاویه شیب دسته‌درزه  $i$  و  $\beta_i$  زاویه جهت شیب دسته‌درزه  $i$  است.

در حالت لغزش بر روی تقاطع دو صفحه:

$$R = N_i \tan \varphi_i + N_j \tan \varphi_j \quad (5-6)$$

که در آن  $\varphi_i$  و  $\varphi_j$  زاویه اصطکاک سطح دسته‌درزه‌های  $i$  و  $j$  می‌باشند.  $N_j$  و  $N_i$  نیروهای نرمال صفحات درزه  $i$  و  $j$  می‌باشند که طبق روابط زیر محاسبه می‌شوند (Godman,1985):

$$N_i = \frac{|(r \times \hat{n}_j) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)|}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|^2} \quad (5-7)$$

$$N_j = \frac{|(r \times \hat{n}_i) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)|}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|^2} \quad (5-8)$$

T نیروی محرک بلوک کلیدی بالقوه (داری قابلیت جابجایی) است و از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$T = r \cdot \hat{s} \quad (5-9)$$

که در آن  $\hat{s}$  بردار جهت لغزش بلوک است. در نهایت با توجه به نوع لغزش بلوک کلیدی بالقوه با استفاده از نیروی مقاوم و نیروی محرک بدست آمده برای هر بلوک ضریب ایمنی (SF) محاسبه می‌شود. ضریب ایمنی بدست آمده از این روابط برای هر بلوک با توجه به مقادیر میانگین پارامترهای استفاده شده در روابط SF در جدول ۵-۱۱ آورده شده است. این نتایج با نتایج نرم‌افزار Easy kbt نیز مقایسه شده است که نتایج یکسان بوده است.

جدول ۵-۲ جهت لغزش و ضریب ایمنی هر بلوک

| نوع بلوک     | ضریب ایمنی | کد بلوک | بردار جهت لغزش |        |        | جهت لغزش |
|--------------|------------|---------|----------------|--------|--------|----------|
|              |            |         | z              | y      | x      |          |
| قابل جابجایی | ۱,۱۲       | ۰۰۱۱    | -۰,۵۳          | -۰,۸۰۷ | ۰,۲۶۲  | S1       |
| قابل جابجایی | ۰,۰۶       | ۱۰۱۱    | -۰,۹۹۶         | -۰,۰۸۶ | ۰,۰۰۶  | S2       |
| قابل جابجایی | ۰,۱۷۵      | ۱۱۰۱    | -۰,۹۷          | ۰,۱۲۸  | ۰,۲۰۵  | S3       |
| قابل جابجایی | ۰,۴۹       | ۱۱۱۰    | -۰,۸۱۹         | ۰,۴۰۶  | -۰,۴۰۶ | S4       |
| قابل جابجایی | ۸,۱۶       | ۰۱۰۱    | -۰,۱۵۸         | ۰,۰۵۵  | ۰,۹۸۶  | S12      |
| قابل جابجایی | ۱,۴۱       | ۰۰۰۱    | -۰,۵۰          | -۰,۶۶  | ۰,۵۶   | S13      |
| قابل جابجایی | ۴,۵۷       | ۰۰۱۰    | -۰,۱۹۸         | -۰,۵۸۸ | -۰,۷۸۴ | S14      |
| قابل جابجایی | ۰,۴۳       | ۱۰۰۱    | -۰,۹۴۷         | -۰,۰۶۱ | ۰,۳۱۶  | S23      |
| قابل جابجایی | ۱,۶۴       | ۱۰۱۰    | -۰,۶۴۹         | -۰,۱۱  | -۰,۷۵۳ | S24      |
| قابل جابجایی | ۰,۷۷       | ۱۱۰۰    | -۰,۷۷۵         | ۰,۶۱۳  | -۰,۱۵۵ | S34      |
| سقوط         | ۰          | ۱۱۱۰    | -w             | ۰      | ۰      | f        |

### ۵-۲-۳ تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی با روش مونت کارلو

در روش تئوری بلوک میانگین یا بهترین مقدار تخمینی برای هر پارامتر طراحی فرض شده است.

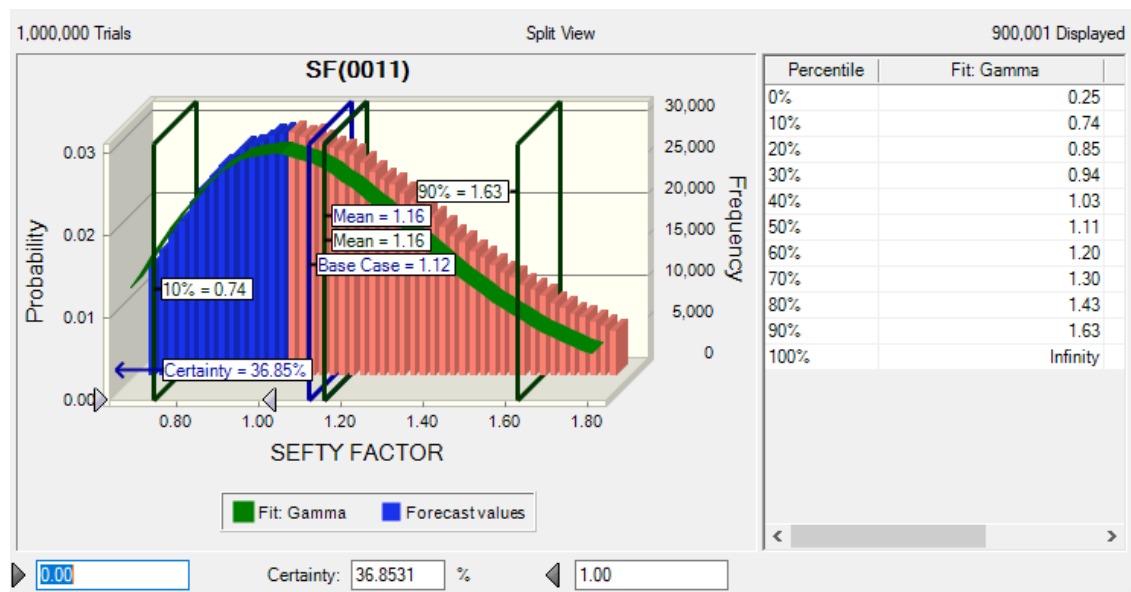
در واقع، هر پارامتر به دلایلی نظیر تغییرات ذاتی، تغییرات با گذشت زمان و عدم قطعیت در تعیین مقادیر گسترده است. بنابراین می‌توان به صورت واقع بینانه ضریب اطمینان را به جای یک مقدار با توزیع احتمال تعیین کرده و این عدم قطعیت را هنگام طراحی با لحاظ قضاوت در خصوص ضریب اطمینان سازگار با تغییرپذیری / عدم قطعیت داده‌ها به حساب آورد. به طوری که وقتی مقادیر پارامترها به خوبی مشخص نباشد، ضریب اطمینان بالایی به کار می‌رود. از طرف دیگر می‌توان عدم قطعیت را با انجام تحلیل احتمالاتی نظیر تحلیل مونت کارلو برای محاسبه احتمال گسیختگی تعیین نمود. هدف از تحلیل احتمالاتی ارائه شده در این تحقیق تعیین محدوده محتمل برای ضریب اطمینان به دلیل ماهیت عدم قطعیت پارامترهای ورودی است. یکی از نرم‌افزارهایی که بر مبنای روش مونت کارلو نوشته شده است، نرم‌افزار کریستال بال<sup>۱</sup> است که در این تحقیق از این نرم‌افزار استفاده شده است. برای تحلیل احتمالاتی پارامتر SF بلوک‌ها با این نرم‌افزار به تابع توزیع متغیرهای به کار رفته در رابطه SF نیاز است. پیش‌تر در مورد رابطه SF بحث شد و مقادیر قطعی SF محاسبه گردید. در این مطالعه سه پارامتر شیب، جهت شیب و زاویه اصطکاک دسته‌درزه به عنوان متغیرهای تصادفی در رابطه SF انتخاب شده‌اند. تابع توزیع این پارامترها قبلاً بررسی شده و پارامترهای تابع توزیع بدست آمده است. این پارامترها داده‌های ورودی در نرم‌افزار کریستال بال می‌باشند. در جدول ۴-۱۷، ۱۰ بلوک دارای جهت لغزش هستند، در این بخش تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی برای ۱۰ بلوک بررسی می‌شود. برای هر بلوک تابع SF در نرم‌افزار EXCEL نوشته شده است. بطوریکه در نرم‌افزار کریستال بال، ۱۰ تابع پیش‌بینی تعریف شده و تحلیل احتمالاتی بر روی آن صورت گرفته است.

✓ تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک با کد ۰۰۱۱ و جهت لغزش S1:

شکل ۵-۱، نتایج تحلیل پایداری احتمالاتی بلوک ۰۰۱۱ حاصل از نرم‌افزار Crystalball را نشان می‌دهد. شکل ۵-۱، توزیع ضریب اطمینان با روش مونت کارلو را نشان می‌دهد که از ۱۰۰۰۰۰۰

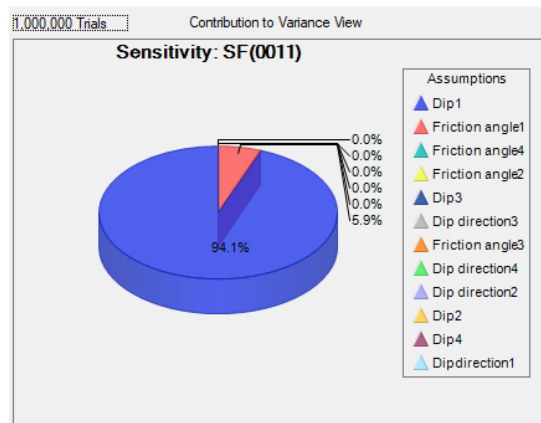
<sup>۱</sup> Crystalball

بار تکرار بر اساس مقادیر تصادفی انتخاب شده از توزیع پارامترهای ورودی بدست آمده است. نمودار نشان می‌دهد که ضریب اطمینان متوسط، حداکثر و حداقل به ترتیب ۱/۱۶، ۱/۶۳ و ۰/۷۴ است. همچنین احتمال اینکه ضریب اطمینان کم‌تر از یک باشد ۳۶/۸۵ درصد است بنابراین احتمال شکست ۳۶/۸۵ درصد خواهد بود. همان‌طور که پیش‌تر ضریب اطمینان بلوک‌ها را بر اساس مقدار میانگین تمامی پارامترهای ورودی بدست آوردیم مقدار ضریب اطمینان برای این بلوک ۱/۱۲ است.



شکل ۵-۱ نمودار توزیع احتمال ضریب اطمینان بلوک ۰۰۱۱

این مقدار تقریباً نزدیک به مقدار میانگین بدست آمده از نمودار است. در فصل چهارم در خصوص اینکه کدام بلوک و با چه حجمی و در کدام راستای تونل تشکیل می‌شود، بحث شد. بلوک ۰۰۱۱ در راستاهای مختلف بررسی شده N55، N65، N75، N85 و N95 تشکیل شده و به ترتیب در این راستاها دارای حجم ۰/۵۵، ۱۱/۸۱، ۶/۱۹، ۱۴/۵۹ و ۱/۴۲ مترمکعب هستند. بلوک ۰۰۱۱ تنها در راستاهای N65، N75 دارای حجم آن قابل‌ملاحظه است. همان‌طور که از تحلیل احتمالاتی مشخص شد احتمال گسیختگی این بلوک ۳۶/۸۵ درصد است، بنابراین باید در راستاهای N65 و N75 که طبق تئوری بلوک، بلوک ۰۰۱۱ را پایدار در نظر گرفتیم، با توجه به درصد احتمال گسیختگی نسبتاً بالا توجه ویژه‌ای شود. نتایج تحلیل حساسیت ضریب ایمنی نسبت به پارامترهای ورودی در شکل ۵-۲ آمده است:

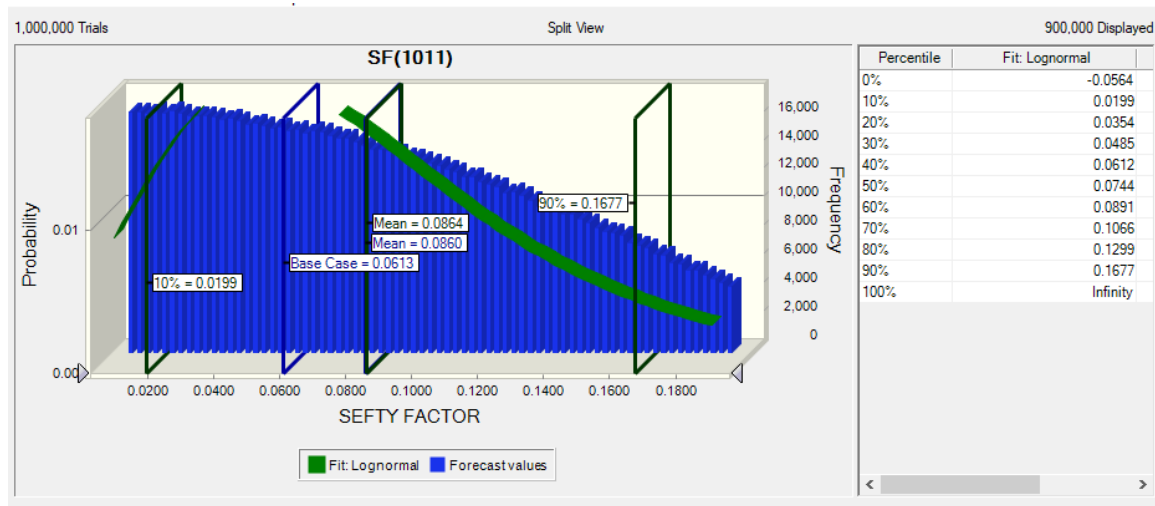


شکل ۲-۵ نمودار تحلیل حساسیت ضریب ایمنی نسبت به پارامترهای ورودی

با توجه به شکل ۲-۵ مشاهده می‌شود که پارامتر شیب دسته‌درزه اول بیشترین تأثیر بر روی ضریب ایمنی داشته است.

✓ تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک با کد ۱۰۱۱ و جهت لغزش S2:

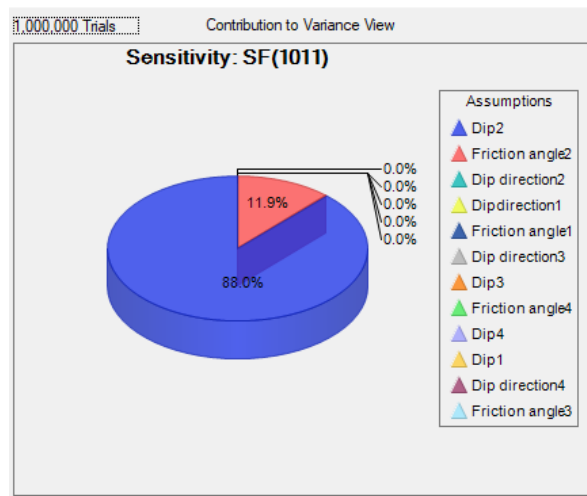
نتایج تحلیل احتمالاتی مربوط به بلوک با کد مشخصه ۱۰۱۱ در شکل ۳-۵ آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۳-۵ مشاهده می‌شود تابع توزیع احتمال ضریب اطمینان از تابع توزیع لاگ نرمال پیروی می‌کند.



شکل ۳-۵ نمودار توزیع احتمال ضریب اطمینان بلوک ۱۰۱۱

با توجه به نمودار احتمال ضریب اطمینان که با روش مونت کارلو بدست آمده و مقدار ضریب اطمینان متوسط، حداکثر و حداقل به ترتیب ۰/۰۸۶، ۰/۱۶۷ و ۰/۰۱۹۹ است. مقدار ضریب اطمینان قطعی

که از روش تئوری بلوک برای بلوک ۱۰۱۱ بدست آمده ۰/۰۶۱۳ است که از مقدار متوسطی که از تابع توزیع احتمال بدست آمده است کم‌تر است. از آن جهت که تمام مقادیر SF برای این بلوک با توجه به نمودار دارای مقادیر بین صفر و یک هستند یعنی با احتمال ۱۰۰ درصد ضریب اطمینان بلوک ۱۰۱۱ کم‌تر از یک خواهد بود. با توجه به ضریب اطمینان بسیار پایین بلوک ۱۰۱۱ می‌توان گفت این بلوک یکی از بحرانی‌ترین بلوک‌های تشکیل شده در تونل خواهد بود. بلوک ۱۰۱۱ در تمامی راستاهای بررسی شده برای انتخاب راستای بهینه تونل تشکیل می‌شود. حجم این بلوک برای راستاهای N35، N45، N55، N65، N75، N85، N95 به ترتیب ۲/۰۷، ۳۱/۱۷، ۴۰/۴۳، ۸۳/۴۲، ۹/۵، ۱/۵۹ و ۶۳/۸ مترمکعب است. بر اساس مقادیر حجم بلوک‌ها مشخص می‌شود که این بلوک برای راستاهای N35، N75 و N85 دارای حجم ناچیزی است که راستای پایدارتری برای راستا تونل نسبت به این بلوک خواهند بود. تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی در فاکتور ایمنی در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود.



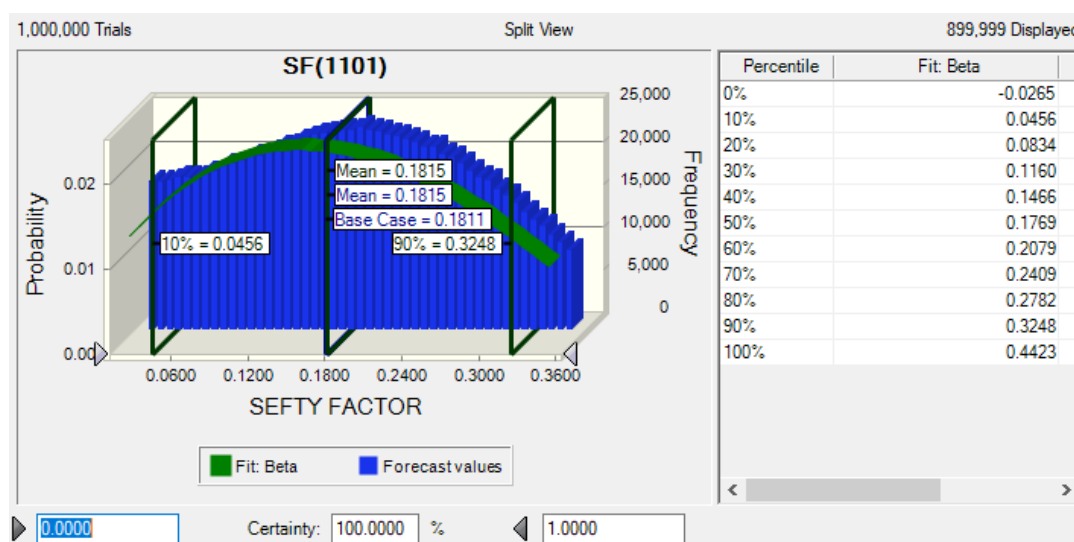
شکل ۴-۵ نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای تصادفی نسبت به ضریب ایمنی بلوک ۱۰۱۱

همان‌گونه که در شکل ۴-۵ مشاهده می‌شود پارامتر شیب دسته‌درزه دوم بیشترین تأثیر و بعد از آن زاویه اصطکاک دسته‌درزه دوم نسبت به فاکتور اطمینان را دارا می‌باشند.

✓ تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک با کد ۱۱۰۱ و جهت لغزش S3:

همان‌طور که در شکل ۵-۵ دیده می‌شود، تابع ضریب اطمینان از تابع توزیع بتا پیروی می‌کند. مقدار

متوسط ضریب اطمینان که در شکل قابل مشاهده است، دارای مقدار ۰/۱۸۱۵ است که تقریباً با مقدار قطعی ضریب اطمینان بدست آمده از روش تئوری بلوک برابر است. همچنین بر اساس نتایج بدست آمده احتمال ضریب ایمنی بلوک کمتر از یک باشد ۱۰۰ درصد است در نتیجه با بالاترین درصد قطعیت می توان نتیجه گرفت که بلوک ۱۱۰۱ بلوکی ناپایدار است. بلوک ۱۱۰۱ در سه راستای N75، N85 و N95 تشکیل شده و به ترتیب دارای حجم ۰/۰۰۸۴، ۱/۷۴ و ۷/۲۹ مترمکعب است. چنانچه مشخص است بلوک ۱۱۰۱ در این راستاها داری حجم ناچیزی بوده پس خطر جدی برای تونل محسوب نمی شود.

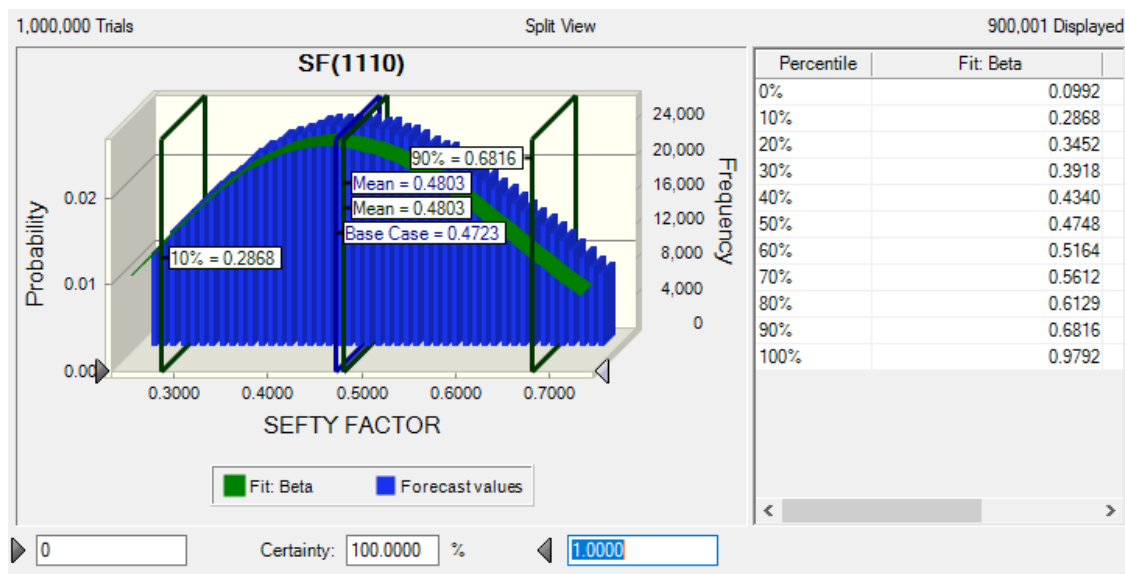


شکل ۵-۵ نمودار توزیع احتمال ضریب اطمینان بلوک با کد ۱۱۰۱

✓ تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک با کد ۱۱۱۰ و جهت لغزش S4:

مشابه سایر بلوکها، نتایج تحلیل احتمالاتی انجام شده برای بلوک با کد ۱۱۱۰ در شکل ۵-۶ آورده شده است. با توجه به شکل ۵-۶ توزیع احتمال ضریب ایمنی از تابع توزیع بتا پیروی می کند. طبق تابع توزیع بتا در شکل ۵-۶ با احتمال ۹۰ درصد مقدار ضریب ایمنی کمتر از ۰/۶۸۱۶ بدست آمده است. برای این بلوک احتمال آنکه ضریب ایمنی کمتر از یک باشد، ۱۰۰ درصد است. به بیان دیگر بلوک ۱۱۱۰ طبق این شرایط ایمنی با درصد قطعیت ۱۰۰ درصد ناپایدار است. این بلوک جزء

بلوک‌هایی است که دارای شرایط کامل لغزش است. بلوک ۱۱۱۰ در ۷ راستای مختلف تونل که تحلیل تئوری بلوک روی آن‌ها صورت گرفته است تنها در راستای N95 تشکیل نمی‌شود. حجم بلوک ۱۱۱۰ در راستاهای N85، N75 و N35 دارای حجم ناچیزی بوده و برای پایداری تونل مشکلی ایجاد نخواهد کرد با این حال برای سه راستای دیگر یعنی N45، N55 و N65 دارای حجم به ترتیب ۲۷/۲۶، ۱۷/۵۹ و ۱۶/۶۹ بوده که لازم است راهکارهای نگهداری برای این بلوک در این سه راستا صورت گیرد.

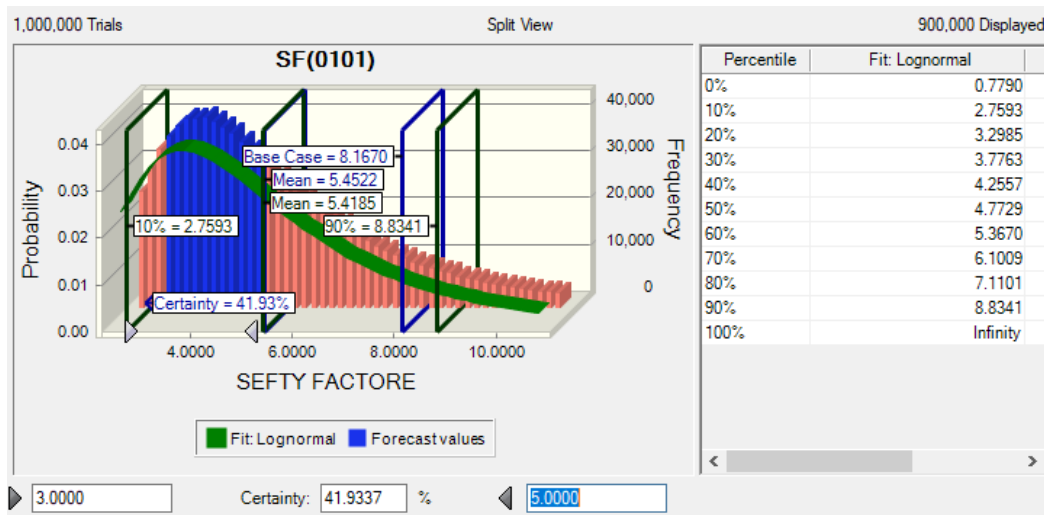


شکل ۵-۶ نمودار توزیع احتمال ضریب ایمنی بلوک با کد ۱۱۱۰

✓ تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک با کد ۰۱۰۱ و جهت لغزش S12:

برای بلوک ۰۱۰۱ نیز توسط نرم‌افزار Crystalball تحلیل احتمالاتی انجام گرفته که نتیجه آن در شکل ۵-۷ آمده است. همان‌طور که در شکل ۵-۷ مشاهده می‌شود. مقدار متوسط ضریب ایمنی طبق نمودار توزیع احتمال که از توزیع لاگ نرمال پیروی می‌کند ۵/۴۵ است، در حالی که مقدار ضریب ایمنی قطعی که از روش تئوری بلوک محاسبه شده است ۸/۱۶ بوده است. طبق نمودار در محدوده آبی رنگ که تغییرات SF از ۳ تا ۵ است، بر اساس نتایج بدست آمده احتمال اینکه ضریب اطمینان در این بازه قرار گیرد ۴۱/۹۳ درصد است که قابل توجه است. همچنین احتمال اینکه ضریب ایمنی کمتر ۲/۷۵ باشد ۱۰ درصد است، به عبارت دیگر احتمال اینکه ضریب ایمنی بیشتر یک باشد ۹۰ درصد است. بنابراین بلوک ۰۱۰۱ با درصد قطعیت بالای ۹۰ درصد پایدار است. پیش‌تر طبق نظریه بلوک

مشخص شد که بلوک ۰۱۰۱ در دو راستای N45 و N35 دارای حجم به ترتیب ۱۰۶/۸۷ و ۶۹/۴۷ مترمکعب است هر چند بلوک با این حجم برای تونل خطرساز هستند اما همان‌طور که در شکل ۵-۷ مشاهده شد این بلوک با درصد قطعیت بالای ۹۰ پایدار بوده و برای ناپایداری تونل نگرانی ایجاد نمی‌کند.

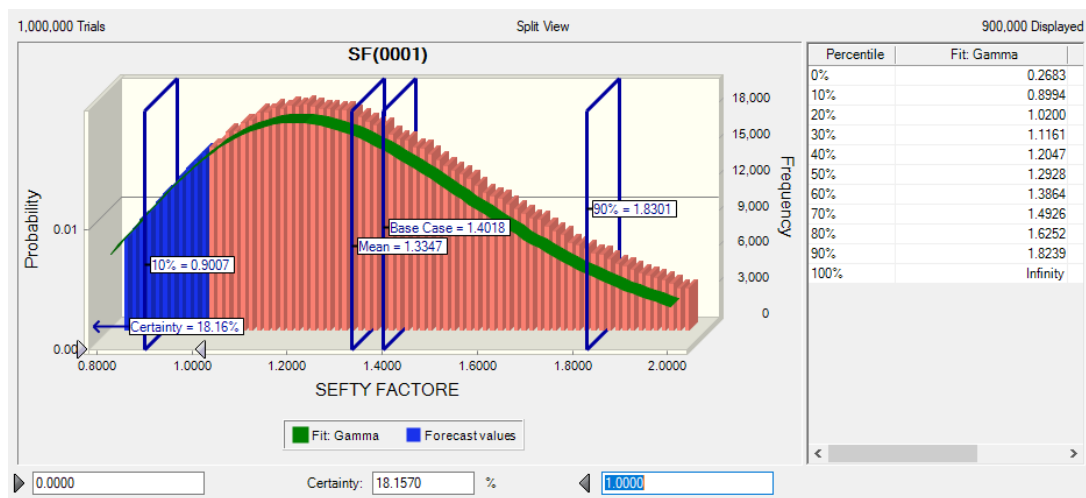


شکل ۵-۷ نمودار توزیع احتمال ضریب ایمنی بلوک با کد ۰۱۰۱

#### ✓ تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک با کد ۰۰۰۱ و جهت لغزش S13:

نتایج تحلیل احتمالاتی بلوک با کد ۰۰۰۱ در شکل ۵-۸ آورده شده است. نتایج تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک ۰۰۰۱ نشان می‌دهد احتمال اینکه ضریب ایمنی بلوک ۰۰۰۱ کمتر از یک باشد، یعنی احتمال اینکه بلوک دچار ناپایداری شود ۱۸/۶ است. که این میزان درصد باعث می‌شود درصد قطعیت برای پایداری بلوک پایین بیاید. هرچند احتمال اینکه ضریب ایمنی بلوک بیشتر از یک باشد بیشتر از احتمال این است که کمتر از یک باشد با این حال نمی‌توان تصمیم قطعی در رابطه با پایداری بلوک گرفت. از طرفی دیگر احتمال اینکه ضریب ایمنی بلوک کمتر از ۱/۸ باشد ۹۰ درصد است یعنی مرز بین پایداری با ناپایداری بلوک خیلی نزدیک به هم است. بنابراین با این شرایط لازم است با توجه به اینکه این بلوک در کدام راستا تشکیل می‌شود، نسبت به طراحی سیستم نگهداری این بلوک اقدام شود.

بلوک ۰۰۰۱ در تمامی راستاهای انتخابی به جز راستای N95 تشکیل می‌شود. از آنجا که حجم بلوک در سه راستای N85، N75، N35 دارای حجم ناچیزی می‌باشند پس می‌توان از پایداری این بلوک در این راستاها صرف نظر کرد. حجم بلوک در سه راستای دیگر یعنی N45، N55 و N65 به ترتیب ۲۷/۲۶، ۱۷/۰۵ و ۱۶/۶۹ مترمکعب است بنابراین لازم است نسبت به طراحی نگهداری این بلوک‌ها در صورتیکه تونل در این راستاها حفاری شود اقدام شود.

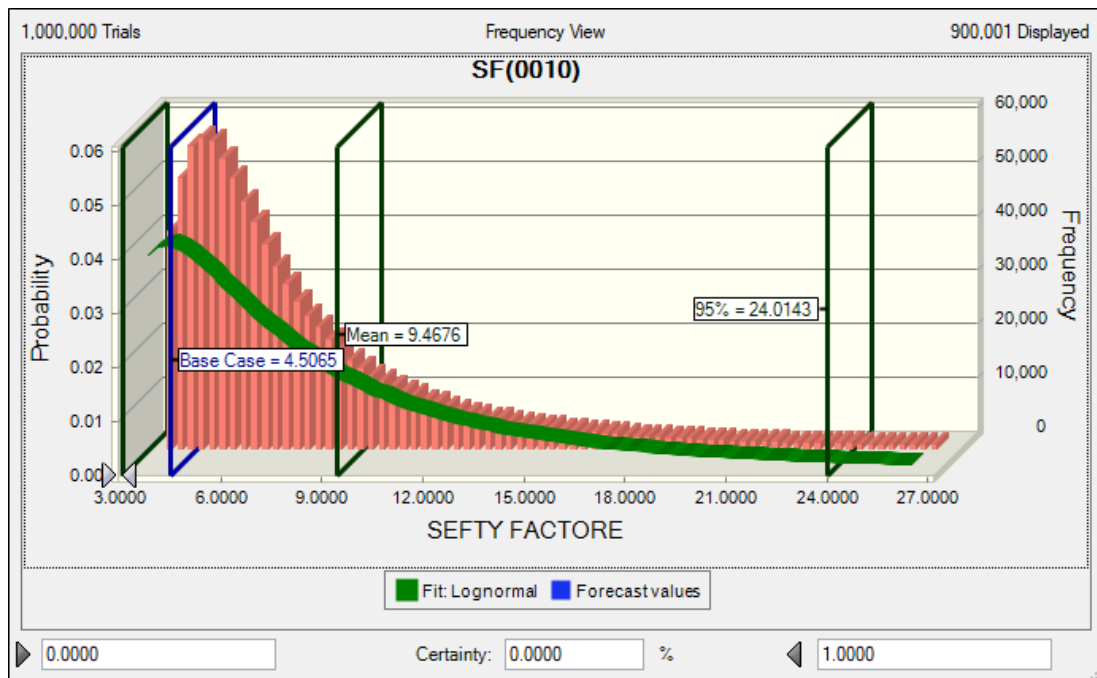


شکل ۵-۸ نمودار توزیع احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک با کد ۰۰۰۱

✓ تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک با کد ۰۰۱۰ و جهت لغزش S14:

نتایج تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی بلوک با کد ۰۰۱۰ در شکل ۵-۹ آورده شده است. شکل ۵-۹ توزیع ضریب اطمینان با روش مونت کارلو را نشان می‌دهد که از ۱۰۰۰۰۰۰ بار تکرار بر اساس مقادیر تصادفی انتخاب شده از توزیع پارامترهای ورودی بدست آمده است. همانطور که از شکل پیداست مقدار متوسط ضریب اطمینان ۹/۴۶ بدست آمده است. ضریب اطمینان قطعی که قبلاً برای بلوک ۰۰۱۰ محاسبه شده است ۴/۵۰ است که از مقدار میانگین روش احتمالاتی کمتر است. همان‌طور در شکل مشاهده می‌شود، احتمال اینکه ضریب ایمنی بلوک کمتر از یک باشد صفر است به عبارت دیگر احتمال اینکه ضریب ایمنی بالاتر از یک باشد ۱۰۰ درصد خواهد بود و این نشانگر آن است که بلوک ۰۰۱۰ با بالاترین درصد قطعیت پایدار است. تنها راستای که در آن راستا بلوک ۰۰۱۰ در آن راستا دارای حجم قابل ملاحظه‌ای است راستای N35 است که حجم بلوک ۹۲/۳ مترمکعب بدست آمده.

طبق این تحلیل این نتیجه گرفته می‌شود که بلوک ۰۰۱۰ برای تونل در راستاهای انتخابی خطری ایجاد نمی‌کند.

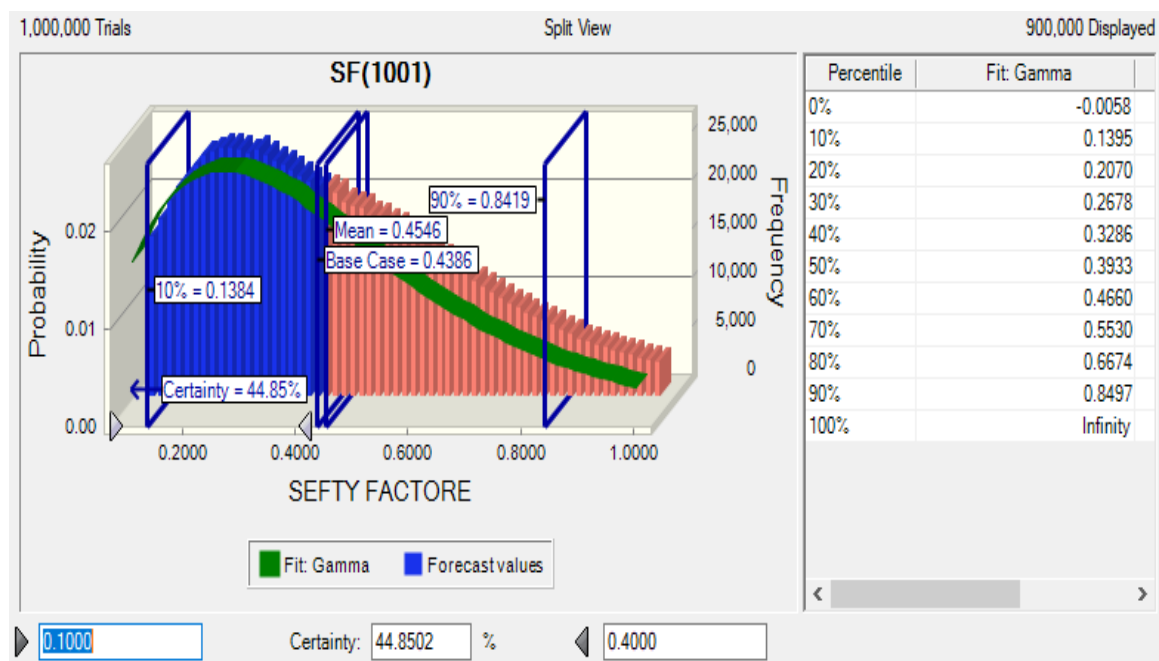


شکل ۵-۹ نمودار توزیع احتمال ضریب ایمنی بلوک ۰۰۱۰

✓ تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک با کد ۱۰۰۱ و جهت لغزش S23:

نتایج تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی بلوک با کد ۱۰۰۱ در شکل ۵-۱۰ آورده شده است. نتیجه تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی بلوک ۱۰۰۱ نشان می‌دهد که ضریب اطمینان متوسط ۰/۴۵۴ است که با مقدار قطعی ضریب ایمنی تقریباً برابر است. با توجه به شکل ۵-۱۰ احتمال اینکه ضریب اطمینان بلوک ۱۰۰۱ در بازه ۰/۱ تا ۰/۴ قرار گیرد ۴۴/۸۵ درصد است که درصد نسبتاً بالایی است. همچنین احتمال اینکه ضریب ایمنی این بلوک کمتر از ۰/۸۴ باشد ۹۰ درصد است. یعنی با درصد قطعیت بالا و ۹۰ درصد، می‌توان گفت که بلوک ۱۰۰۱ بلوکی ناپایدار است، که لازم است با توجه به اینکه در کدام راستا و با چه حجمی تشکیل می‌شود، سیستم نگهداری مورد نیاز برای پایدارسازی آن اجرا شود. همان‌طور که در تحلیل‌های تئوری بلوک در قبل ذکر گردید که بلوک ۱۰۰۱ در تمامی راستاهای انتخابی تشکیل می‌شود. این بلوک تنها در راستای N95 دارای

حجم کمتری نسبت به راستاهای دیگر تونل است. بلوک ۱۰۰۱ در راستاهای N55، N45، N35، N65، N75 و N85 به ترتیب دارای حجم ۱۸/۴، ۲۷/۱۶، ۴۷/۳، ۱۱۶/۸، ۳۸۵، ۶۷۹ مترمکعب است. با توجه به اینکه این بلوک طبق تحلیل احتمالاتی درصد ناپایداری آن بالغ بر ۹۰ درصد است و همچنین در تمام راستاها تشکیل شده است، می‌توان گفت یک بلوک مهم در انتخاب راستای بهینه تونل است. این بلوک در دو راستای N85 و N75 دارای حجم بزرگی است بنابراین لازم است در این راستاها طراحی نگهداری برای این بلوک صورت گیرد.

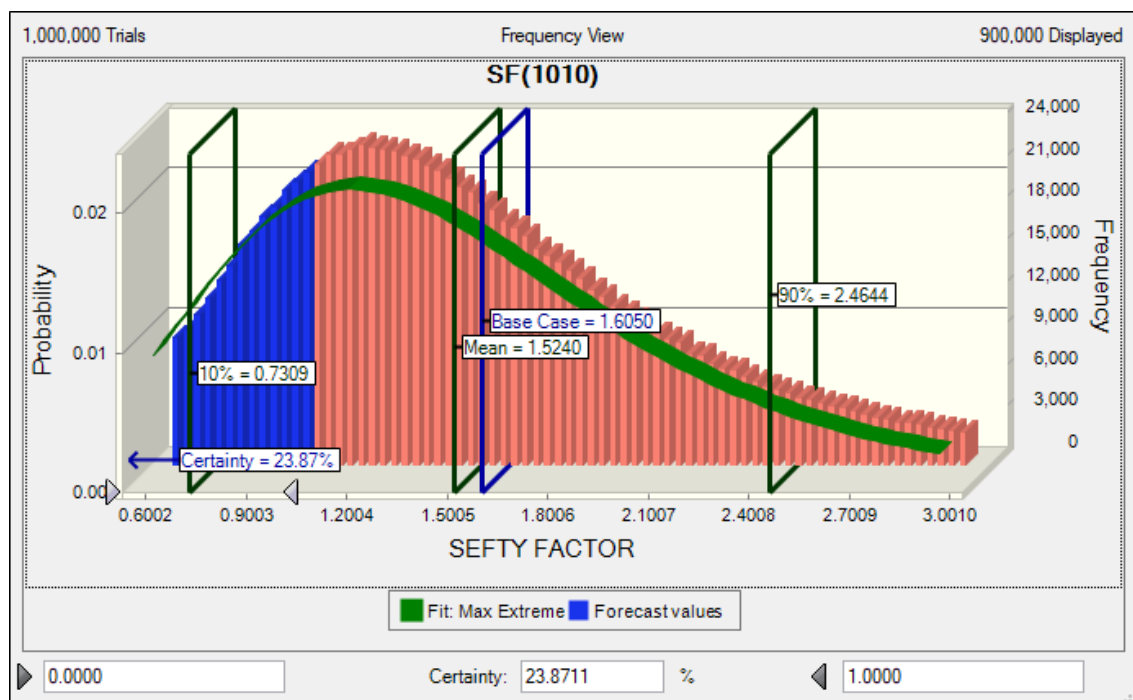


شکل ۵-۱۰ نمودار توزیع احتمال ضریب ایمنی بلوک ۱۰۰۱

تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک با کد ۱۰۱۰ و جهت لغزش S24:

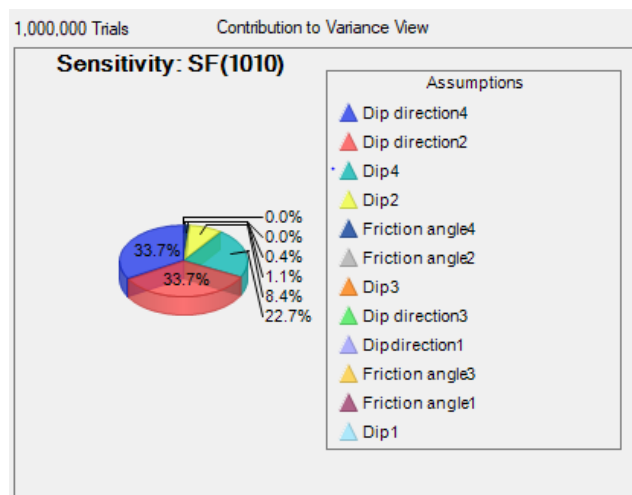
نتایج تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی بلوک با کد ۱۰۱۰ در شکل ۵-۱۱ آورده شده است. چنانچه در شکل ۵-۱۱ قابل مشاهده است، احتمال اینکه ضریب ایمنی بلوک در سطح فراوانی ۲۱۰۰۰ کمتر از یک باشد، ۲۳/۸۷ درصد است، این به معنای آن است احتمال اینکه بلوک ۱۰۱۰ دچار گسیختگی شود ۲۳/۸۷ درصد است. طبق روش تئوری بلوک ضریب اطمینان برای بلوک ۱۰۱۰، ۱/۶ محاسبه شده است، بنابراین این بلوک در این شرایط با ضریب ایمنی ۱/۶ پایدار است. درحالی‌که روش احتمالاتی بیانگر آن است که احتمال اینکه مقدار ضریب اطمینان کمتر از یک باشد ۲۳/۸۷ درصد

است. روش احتمالاتی نگرشی قوی‌تری نسبت به پایداری بلوک ترسیم می‌کند، و می‌تواند کمک فراوانی در تصمیم‌گیری‌های پایداری تونل به مهندس طراح ارائه دهند. مانند این بلوک که در روش تئوری بلوک آن را پایدار در نظر می‌گیریم در حالی که روش احتمالاتی احتمال گسیختگی آن را ۲۳/۸۷ تعیین کرده است. با توجه به اینکه بلوک ۱۰۱۰ تنها در راستاهای N35 و N45 دارای حجم قابل توجهی است باید در این دو راستا تصمیم درستی راجب به سیستم نگهداری گرفته شود.



شکل ۵-۱۱ نمودار توزیع احتمال ضریب ایمنی بلوک ۱۰۱۰

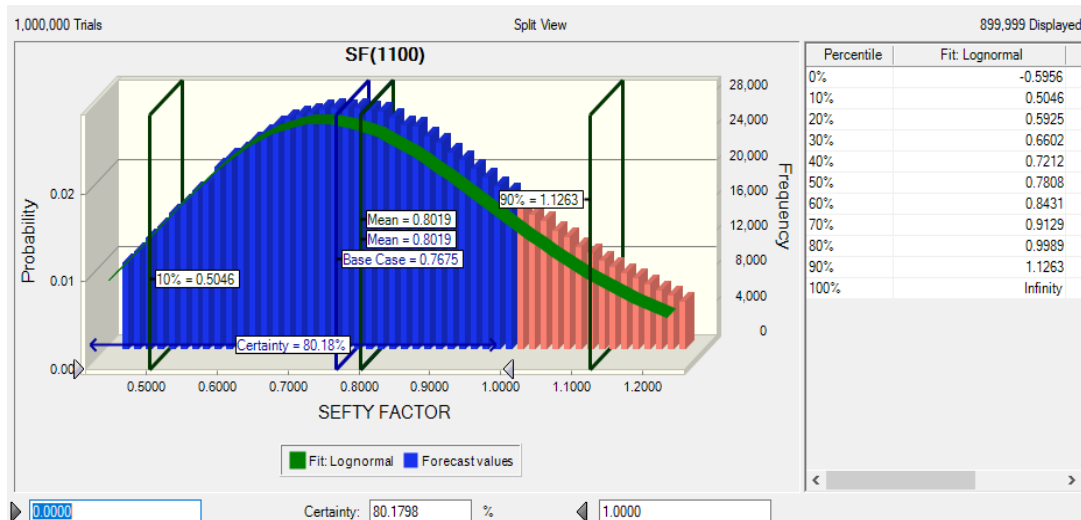
نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی نسبت به ضریب ایمنی بلوک ۱۰۱۰ در شکل ۵-۱۲ آمده است. با توجه به نمودار تحلیل حساسیت در شکل ۵-۱۲ این نتیجه گرفته می‌شود که بیشترین تأثیر، جهت شیب و بعد از آن شیب و در آخر زاویه اصطکاک دسته‌درزه‌های ۲ و ۴ بر روی ضریب ایمنی بلوک ۱۰۱۰ دارند.



شکل ۵-۱۲ نمودار تحلیل حساسیت ضریب اطمینان بلوک ۱۰۱۰

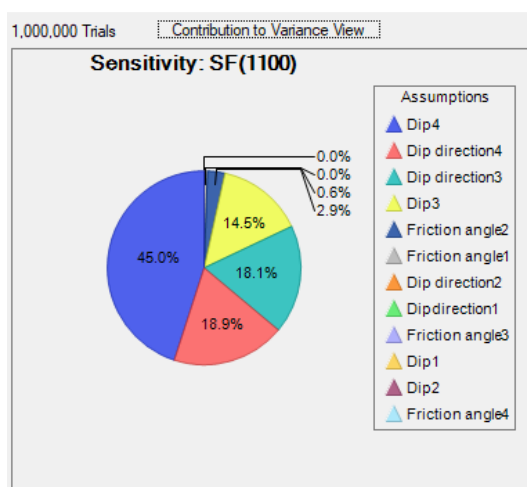
✓ تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک با کد ۱۱۰۰ و جهت لغزش S34:

نتایج تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی بلوک با کد ۱۱۰۰ در شکل ۵-۱۳ آورده شده است. شکل ۵-۱۳ توزیع ضریب اطمینان بدست آمده از روش مونت کارلو را نشان می‌دهد، که از مقادیر تصادفی انتخاب شده از توزیع پارامترهای ورودی حاصل شده است. متوسط ضریب اطمینان همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود ۰/۸ بوده که تقریباً با مقدار قطعی ضریب ایمنی که از روش تئوری بلوکی بدست آمده است همخوانی دارد. قسمت آبی‌رنگ در شکل پیش‌بینی احتمال ضریب ایمنی در بازه صفر تا یک را نشان می‌دهد. همان‌طور که در نمودار دیده می‌شود، احتمال اینکه ضریب ایمنی در بازه صفر تا یک قرار گیرد، ۸۰ درصد است، به عبارت دیگر احتمال اینکه بلوک دچار لغزش شود ۸۰ درصد است، در حالی که در روش تئوری بلوک روش قطعی این بلوک به طور کامل ناپایدار در نظر گرفته شده است. طبق این نمودار مشخص می‌شود احتمال اینکه بلوک دچار لغزش نشود ۲۰ درصد است. این بلوک در بین راستاهای انتخابی برای تونل فقط در دو راستا N35 و N45 تشکیل نمی‌شود. همچنین این بلوک در راستاهای N95، N85، N55 دارای حجم ناچیزی بوده که از بررسی ناپایداری این بلوک در این راستاها می‌توان صرف‌نظر کرد. در حالی که این بلوک در راستاهای N35 و N65 دارای حجم به ترتیب ۱۹/۵۹ و ۱۱/۸ است، می‌توان با اجرای نگهداری‌های سبک مانند شاتکریت آن‌ها را پایدار کرد.



شکل ۵-۱۳ نمودار توزیع احتمال ضریب اطمینان بلوک ۱۱۰۰

نمودار تحلیل حساسیت پارامترهای ورودی نسبت به ضریب ایمنی بلوک ۱۰۱۱ در شکل ۵-۱۴ آمده است.



شکل ۵-۱۴ نمودار تحلیل حساسیت ضریب ایمنی بلوک ۱۱۰۰

تحلیل حساسیت در کنار تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی نشان می‌دهد که شیب دسته‌درزه ۴ بیشترین تأثیر بر ضریب ایمنی و بعد از آن به ترتیب جهت شیب دسته‌درزه ۴، جهت شیب دسته‌درزه ۳، شیب دسته‌درزه ۳ و در نهایت کمترین تأثیر بر ضریب ایمنی زاویه اصطکاک دسته‌درزه سوم و چهارم را برای این بلوک بررسی شده دارا می‌باشند.

با توجه به تحلیل‌های انجام شده مبتنی بر روش احتمالاتی برای بلوک‌ها تشکیل شده در راستاهای مختلف بررسی شده و درصد ناپایداری بلوک‌ها مشخص شده است. همچنین با توجه به تحلیل‌های انجام شده در روش تئوری بلوک و اینکه کدام بلوک‌ها و با چه حجمی در راستاهای انتخابی تشکیل می‌شوند به ارزیابی انتخاب راستای بهینه تونل پرداخته شده است. نتایج این ارزیابی در جدول ۳-۵ آمده و در نهایت با توجه به وضعیت ناپایداری‌ها و حجم بلوک‌ها همچنین محدودیت‌های تونل انحراف آب از نظر هیدرولیکی بهترین راستا در بین راستاهای انتخابی پیشنهاد شده است. در جدول ۳-۵ بلوک‌های ناپایدار تشکیل شده در راستاهای مختلف بررسی شده مسیر تونل آورده شده است. برای انتخاب بهترین راستای تونل دو حالت در نظر گرفته شده است: (۱) محدودیت مسیر تونل تا اختلاف ۳۰ درجه نسبت به راستای طرح مهندس مشاور پروژه وجود نداشته باشد. (۲) برای راستای انتخابی محدودیت اختلاف ۳۰ درجه نسبت به راستای انتخابی مشاور طرح وجود داشته باشد. لذا تمام شرایط راستاها را بررسی نموده و بهترین راستا را انتخاب می‌شود. بدین ترتیب اگر حالت اول در نظر گرفته شود یعنی محدودیت انتخاب راستا تا اختلاف ۳۰+ نباشد، راستای N35 به عنوان بهینه‌ترین راستا در بین راستاهای انتخابی، تعیین می‌شود. در این راستا سه بلوک ناپایدار تشکیل می‌شود. بلوک ۱۱۱۱ همان‌طور که قبلاً بررسی شد، بلوکی با شرایط سقوط است. این بلوک دارای کم‌ترین حجم در دو راستای N35 و N95 است. چنانچه که در جدول ۳-۵ مشاهده می‌شود بلوک ۱۰۱۱ که در راستای N95 تشکیل شده است دارای حجم  $63/8$  بوده و با بالاترین درصد احتمال، بلوکی ناپایدار شناخته شده است. هر چند در راستای N35 دو بلوک ناپایدار وجود دارد ولی با توجه به اینکه درصد احتمال پایداری بلوک ۱۰۱۰ با حجم  $69/47$  بیشتر از درصد احتمال ناپایداری آن است و همچنین دیگر بلوک ناپایدار راستای N35 یعنی بلوک ۱۰۰۱ دارای حجم کم‌تری نسبت به بلوک ناپایدار راستای N95 است. لذا راستای N35 به عنوان اولین و در رتبه بعدی راستای N95 در حالت اول انتخاب می‌شوند.

جدول ۳-۵ شرایط بلوک‌های ناپایدار در راستاهای انتخابی در دو روش احتمالاتی و روش قطعی

| بلوک دارای شرایط سقوط |         | احتمال ناپایداری (درصد) | حجم (متر مکعب) | ضریب اطمینان (قطعی از روش تئوری بلوک) | بلوک‌های ناپایدار در راستای انتخابی | راستاهای انتخابی (اختلاف نسبت به راستای مشاور طرح) |
|-----------------------|---------|-------------------------|----------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------------------|
| حجم (متر مکعب)        | کد بلوک |                         |                |                                       |                                     |                                                    |
| ۲۸/۸                  | ۱۱۱۱    | ۲۳/۸۷                   | ۶۹/۴۷          | ۱/۶۴                                  | ۱۰۱۰                                | N35(-30)                                           |
|                       |         | >۹۰                     | ۱۸/۴۶          | ۰/۴۳                                  | ۱۰۰۱                                |                                                    |
| ۹۵/۸۰                 | ۱۱۱۱    | ۲۳/۸۷                   | ۱۶/۸۷          | ۱/۶۴                                  | ۱۰۱۰                                | N45(-20)                                           |
|                       |         | ۱۰۰                     | ۲۷/۲۶          | ۰/۴۹                                  | ۱۱۱۰                                |                                                    |
|                       |         | ۱۸/۱۶                   | ۲۷/۲۶          | ۱/۴۱                                  | ۰۰۰۱                                |                                                    |
|                       |         | >۹۰                     | ۲۷/۱۶          | ۰/۴۳                                  | ۱۰۰۱                                |                                                    |
|                       |         | ۱۰۰                     | ۳۱/۱۷          | ۰/۰۶                                  | ۱۰۱۱                                |                                                    |
| ۷۸/۶۲                 | ۱۱۱۱    | ۱۰۰                     | ۱۷/۰۵          | ۰/۴۹                                  | ۱۱۱۰                                | N55(-10)                                           |
|                       |         | ۱۸/۱۶                   | ۱۷/۰۵          | ۱/۴۱                                  | ۰۰۰۱                                |                                                    |
|                       |         | >۹۰                     | ۴۷/۳۵          | ۰/۴۳                                  | ۱۰۰۱                                |                                                    |
|                       |         | ۱۰۰                     | ۴۰/۴۳          | ۰/۰۶                                  | ۱۰۱۱                                |                                                    |
| ۸۵/۰۶                 | ۱۱۱۱    | ۸۰/۱۷                   | ۱۱/۸۱          | ۰/۷۷                                  | ۱۱۰۰                                | N65( 0 )                                           |
|                       |         | ۱۰۰                     | ۱۶/۶۹          | ۰/۴۹                                  | ۱۱۱۰                                |                                                    |
|                       |         | ۱۸/۱۶                   | ۱۶/۶۹          | ۱/۴۱                                  | ۰۰۰۱                                |                                                    |
|                       |         | >۹۰                     | ۱۱۶/۸          | ۰/۴۳                                  | ۱۰۰۱                                |                                                    |
|                       |         | ۳۶/۸۵                   | ۱۱/۸۱          | ۱/۲                                   | ۰۰۱۱                                |                                                    |
|                       |         | ۱۰۰                     | ۸۳/۴۲          | ۰/۰۶                                  | ۱۰۱۱                                |                                                    |
| ۱۱۶/۹۵                | ۱۱۱۱    | >۹۰                     | ۳۸۵/۲          | ۰/۴۳                                  | ۱۰۰۱                                | N75(+10)                                           |
|                       |         | ۸۰/۱۷                   | ۱۹/۵۹          | ۰/۷۷                                  | ۱۱۰۰                                |                                                    |
|                       |         | ۳۶/۸۵                   | ۱۹/۵۹          | ۱/۲                                   | ۰۰۱۱                                |                                                    |
| ۲۰۵/۸                 | ۱۱۱۱    | >۹۰                     | ۶۷۹/۱          | ۰/۴۳                                  | ۱۰۰۱                                | N85(+20)                                           |
| ۳۸/۰۶                 | ۱۱۱۱    | ۱۰۰                     | ۶۳/۸           | ۰/۰۶                                  | ۱۰۱۱                                | N95(+30)                                           |

با توجه به کاربری تونل انحراف آب که به سمت پایین دست سد است حتی اگر راستایی پایداری بالاتری هم داشته باشد، نمی‌تواند راستای انتخابی اختلاف زیادی با راستای انتخاب شده توسط مهندس مشاور طرح از نظر هیدرولیکی داشته باشد. بنابراین با این شرایط اگر نتوان اختلاف ۳۰ درجه نسبت به راستای اصلی انتخاب کرد لازم است بین راستاهای دیگر پایدارترین انتخاب شود. بدین وسیله دو راستای N35 و N95 که هر کدام ۳۰ درجه با راستای اصلی اختلاف دارند کنار گذاشته می‌شوند. در دو راستای N75 و N85 هر چند تعداد بلوک‌های ناپایدار تشکیل شده نسبت به دیگر راستاها کم‌تر است ولی بلوک ۱۰۰۱ که در این راستا تشکیل شده دارای حجم بالایی است. همچنین طبق تحلیل

احتمالاتی دارای بالاترین درصد احتمال ناپایداری بوده بنابراین این دو راستا هم نمی‌تواند راستای بهینه باشند و باید سه راستای دیگر بررسی شوند. بلوک ۱۱۱۱ گه وضعیت ناپایدار در سه راستای N45، N55، N65 دارد، دارای حجم نزدیک به هم در این راستاها درست پس باید دیگر بلوک‌های تشکیل شده ناپایدار را بررسی کرد. با توجه به حجم کم‌تر بلوک‌های ناپایدار تشکیل شده در راستای N45 این راستا به عنوان راستای بهینه برای تونل انحراف آب انتخاب شده است، که با راستای انتخابی مشاور طرح که N65 می‌باشد ۲۰ درجه اختلاف دارد.

### ۵-۳ تحلیل گوه ای

هنگامی که یک سازه در توده سنگی حفر می‌شود که دارای چندین دسته ناپیوستگی است، ممکن است با بلوک‌های سنگی مواجه شود که دارای اندازه‌های متفاوتی در سطوح مختلف خود است. جابجایی بالقوه بلوک‌هایی که بحرانی‌ترین نحوه استقرار را دارند، می‌توانند بلوک‌های مجاور خود را سست کنند و سقوط و لغزش آن‌ها می‌تواند برای فضای مورد نظر تهدید کننده باشد. اگر سازه بدون نگهداری باشد، جابجایی بلوکی می‌تواند پیرامون فضا را در حد غیر قابل قبولی تغییر دهد و خود بلوک‌ها بر حسب مورد می‌توانند سبب خسارت مالی یا آسیب جانی شوند. اگر در سازه مورد نظر از سیستم نگهداری استفاده شود، روند جابجایی بلوک باعث می‌شود تا تنش‌های قابل ملاحظه‌ای به سیستم نگهداری منتقل شود و اگر این سیستم برای مقابله با بارهای طراحی نشده باشد، ممکن است دچار گسیختگی شود. به دلیل آنکه معمولاً خود سنگ کاملاً مقاوم است، باید سقوط و لغزش بالقوه بلوک‌ها را ملاک طراحی قرار داد و اگر معلوم شود که وجود این بلوک‌ها نامحتمل است، می‌توان از پایداری سازه اطمینان حاصل کرد. مراحلی که برای تحلیل پایداری چنین مسائلی مورد نیاز هستند، عبارتند از:

(۱) تخمین شیب و جهت شیب متوسط سیستم‌های اصلی ناپیوستگی‌های توده سنگ

(۲) تشخیص گوه‌های بالقوه‌ای که می‌توانند از سقف یا دیواره‌های فضا لغزش یا سقوط کنند

۳) محاسبه فاکتور ایمنی این گوه‌ها بر اساس نحوه گسیختگی آن‌ها

۴) محاسبه میزان نگهداری مورد نیاز جهت رساندن ضریب ایمنی گوه‌های منفرد تا سطح قابل

قبول

اندازه و شکل گوه‌های بالقوه در توده سنگ در برگیرنده یک فضای زیرزمینی به ابعاد، شکل، جهت‌داری فضا و همچنین جهت‌داری دسته درزه‌های اصلی منطقه بستگی دارد. هندسه سه بعدی مسئله نیاز به محاسبات بسیار زیادی دارد. این محاسبات را می‌توان به روش دستی انجام داد اما بهتر است برای بالا بردن راندمان از برنامه‌های کامپیوتری استفاده کرد. یکی از این برنامه‌ها Unwedge هست که برای سازه‌های زیر زمینی در سنگ‌های سخت توسعه یافته است (Hoek&Brown,1980).

### ۵-۳-۱ معرفی نرم‌افزار Unwedge

Unwedge نرم‌افزاری است برای تجسم و تحلیل ساختاری گسیختگی گوه‌ای در اطراف سازه‌های زیرزمینی به کار می‌رود. این برنامه به کاربر اجازه می‌دهد که شکل مقطع عرضی یک سازه زیرزمینی را همراه با جهت‌داری‌های شیب و امتداد صفحات ناپیوستگی که احتمالاً باعث ایجاد ناپایداری می‌شوند به عنوان ورودی برنامه وارد نمایند. سپس این برنامه می‌تواند تا شش گوه احتمالی که به وسیله تقاطع یک فضا و سه دسته‌درزه تشکیل می‌شود را به طور اتوماتیک محاسبه کرده و نمایش دهد.

نمایش گوه‌ها موجب توانایی کاربر، جهت تجسم و تشخیص هر شش گوه شده و اطلاعات لازم در مورد نحوه گسیختگی بالقوه را فراهم می‌سازد و همچنین ضریب اطمینان را برای هر گوه محاسبه می‌کند. سپس کاربر می‌تواند گوه‌های ناپایدار را برای تحلیل دقیق‌تر انتخاب کند. وقتی که کاربر ناپایداری بالقوه گوه انتخاب شده را ارزیابی کرد، می‌تواند اثر سیستم نگهداری (راک بولت و شاتکریت) را بررسی کند. راک بولت‌ها در دیده‌های عرضی و افقی روی پنجره‌ها مکان‌یابی می‌شوند. این راک بولت‌ها به طور اتوماتیک در همه دیده‌ها، همراه با تصاویر پرسپکتیو، نشان داده می‌شوند. سپس با به دست آوردن ظرفیت راک بولت‌های نصب شده، این برنامه ضریب اطمینان را نسبت به لغزش یا سقوط گوه

محاسبه می‌کند (رمضان‌زاده، ۱۳۷۶).

اکنون با توجه به مشخصات سیستم‌های ناپیوستگی‌ها که در فصل چهارم بررسی شدند به بررسی پایداری تونل انحراف آب می‌پردازیم.

### ۵-۳-۲ استفاده از نرم‌افزار Unwedge برای تحلیل پایداری گوه‌های ناپایدار

همانگونه که در قبل اشاره شد اولین مرحله تحلیل پایداری گوه‌های دارای پتانسیل ریزش، مشخص کردن جهت‌داری دسته‌درزه‌های اصلی توده سنگ منطقه است. مشخصات ناپیوستگی‌های توده سنگ مسیر تونل پیش‌تر بررسی شده است. در مرحله بعد باید با استفاده از امکانات گرافیکی برنامه، شکل تونل و جهت‌داری آن را وارد برنامه نمود تا مرحله ورود اطلاعات کامل شود.

پس از وارد کردن این اطلاعات، برنامه به تخمین موقعیت و ابعاد بزرگترین گوه‌هایی که می‌توانند در سقف و کف دیواره تونل تشکیل شوند، می‌پردازد. در روش محاسبه‌ای که برای تخمین این گوه‌ها استفاده می‌شود، فرض شده که ناپیوستگی‌ها در تمام توده سنگ وجود دارند. همچنین فرض شده است که درزه‌ها پیوسته بوده و دیواره آن‌ها کاملاً صاف و مسطح است. این شرایط نشان‌دهنده این است که در تحلیل انجام شده بزرگترین گوه‌هایی که امکان تشکیل دارند تخمین زده می‌شوند.

در منطقه مورد مطالعه یعنی مسیر تونل انحراف آب سد پیر تقی، ۴ دسته درزه اصلی شناسایی شده است. با توجه به اینکه نرم‌افزار Unwedge تنها بلوک‌های تشکیل شده از سه دسته درزه را شناسایی می‌کند بنابراین باید از ترکیب‌های این چهار دسته درزه برای تحلیل پایداری استفاده کرد. این تحلیل برای راستا بهینه انتخاب شده تونل انحراف آب پیر تقی توسط نظریه بلوکی یعنی راستای شمال غربی – جنوب شرقی (N35) انجام شده است. از ترکیب این چهار دسته درزه، چهار حالت امکان دارد که سه دسته درزه با هم برخورد کرده و تشکیل بلوک دهند. این حالت‌ها به شرح ذیل است:

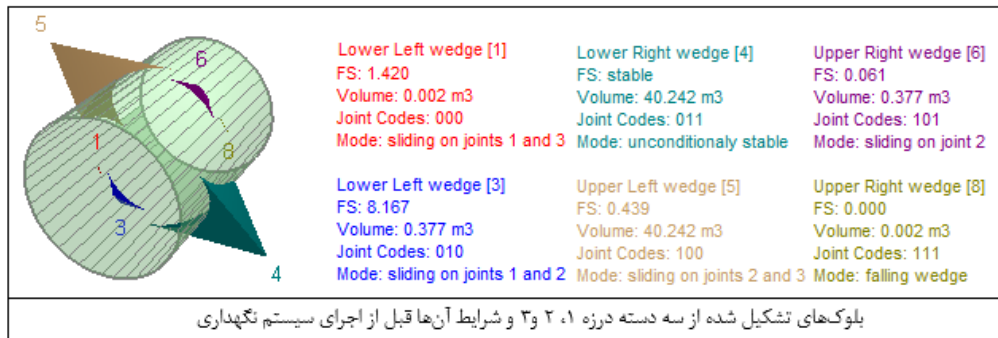
(۱) ترکیب سه دسته درزه ۱، ۲ و ۳

(۲) ترکیب سه دسته درزه ۱، ۲ و ۴

۳) ترکیب سه دسته درزه ۱، ۳ و ۴

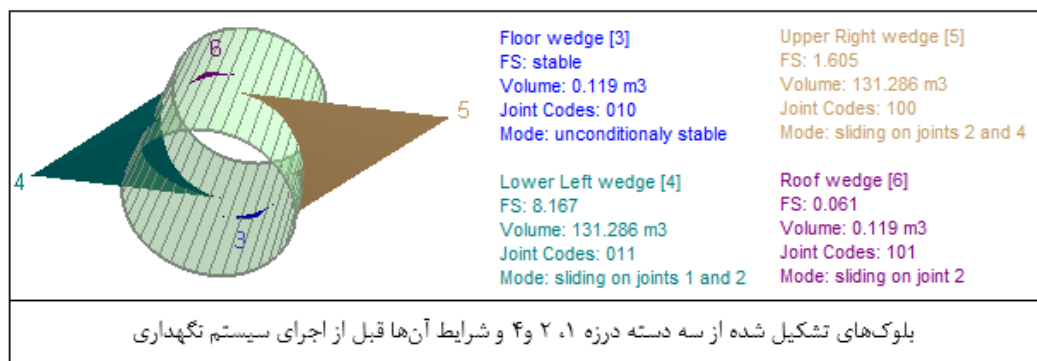
۴) ترکیب سه دسته درزه ۲، ۳ و ۴

نتایج تحلیل با نرم افزار Unwedge برای حالات فوق در اشکال ۵-۱۵ تا ۱۸-۵ آورده شده است.



شکل ۵-۱۵ مشخصات گوههای تشکیل شده از تقاطع سه دسته درزه ۱، ۲ و ۳

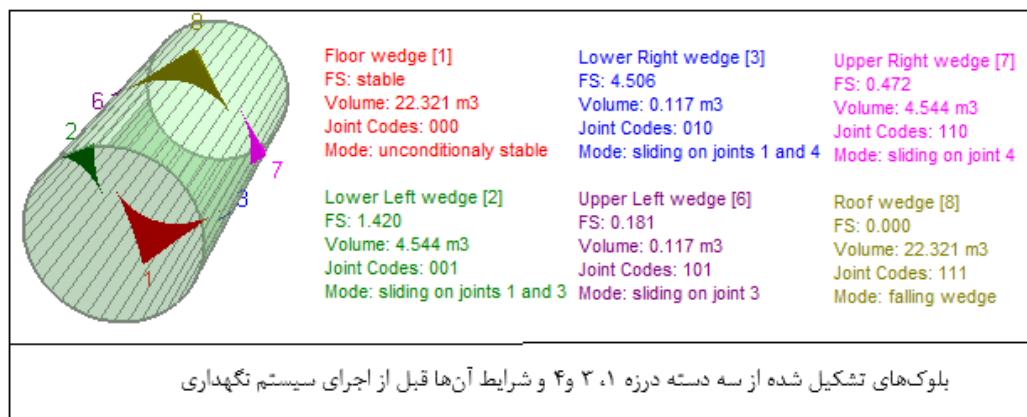
در شکل ۵-۱۵ مشاهده می شود که از تقاطع سه دسته درزه ۱، ۲ و ۳ شش گوه تشکیل شده است. در شکل جانمایی، ضریب ایمنی، حجم، کد درزه و جهت لغزش هر گوه نمایش داده شده است. ۴ گوه ۱، ۳، ۶ و ۸ همان طور که در شکل مشاهده می شود دارای حجم ناچیزی می باشند که می توان با لق گیر آنها را حذف و یا با نگهداری سبک مانند یک لایه شاتکریت نازک آنها را پایدار کرد. گوه شماره ۴ با توجه به نحوه قرارگیری آن در تونل پایدار می باشد. گوه شماره ۵ بحرانی ترین گوه در این حالت می باشد که در بخش ۵-۳-۳ سیستم نگهداری برا آن طراحی می شود.



شکل ۵-۱۶ مشخصات گوههای تشکیل شده از تقاطع سه دسته درزه ۱، ۲ و ۴

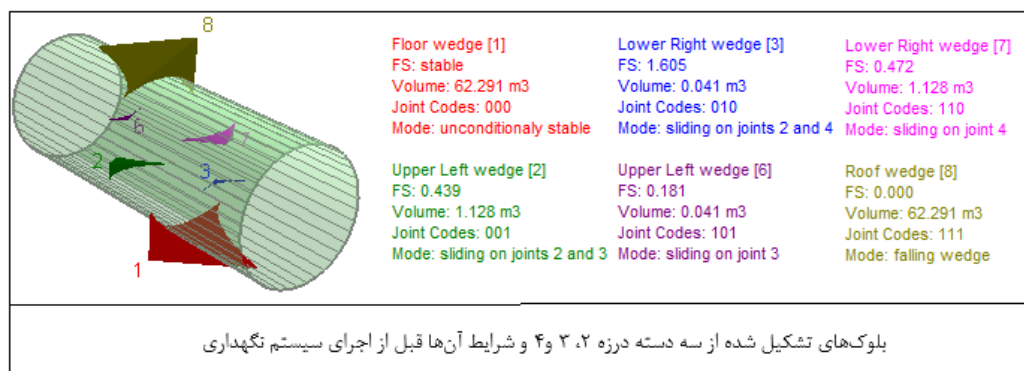
با توجه به شکل دو گوه شماره ۳ و ۶ دارای حجم ناچیزی هستند که می توان در لق گیرهای تونل

حذف شوند یا اینکه با یک لایه نازک از شاتکریت پایدار شوند. گوه شماره ۴ دارای حجم بالایی می باشد ولی ضریب اطمینان آن به دلیل اصطکاک سطح دسته درزه ها بالا است و نیاز به نگهداری ندارد. گوه شماره ۵ نیز دارای حجم بالایی می باشد و ضریب اطمینان نزدیک به مرز پایداری و ناپایداری نیز دارا می باشد. لازم است در طراحی سیستم نگهداری به این بلوک هم توجه شود و با نصب سیستم نگهداری برای آن ضریب ایمنی آن بالا رود.



شکل ۵-۱۷ مشخصات گوه های تشکیل شده از تقاطع سه دسته درزه ۱، ۳ و ۴

همان طور که در شکل ۵-۱۷ مشاهده می شود از تقاطع سه دسته درزه ۱ و ۳ و ۴ شش گوه تشکیل می شود. گوه شماره ۱ به دلیل نحوه جانمایی آن که در کف تونل تشکیل می شود پایدار است. دو گوه شماره ۲ و ۷ دارای حجم نسبتاً پایینی هستند که در دیواره تونل جانمایی شده اند که باید پایداری آن ها انجام شود. بلوک شماره ۸ بحرانی ترین بلوک در این حالت می باشد که در سقف تونل تشکیل می شود که احتمالاً بعد از حفر دچار سقوط می شود که باید بلافاصله پس از حفر سیستم نگهداری برای آن اجرا شود.



شکل ۵-۱۸ مشخصات گوه‌های تشکیل شده از تقاطع سه دسته درزه ۲، ۳ و ۴

با توجه به شکل ۵-۱۸ از برخورد نیم‌فضاهای سه دسته درزه ۲، ۳ و ۴ شش گوه تشکیل می‌شود. که بلوک ناپایدار دارای حجم قابل ملاحظه بلوک شماره ۸ می‌باشد که در سقف تونل تشکیل می‌شود و احتمالاً بعد از حفر دچار سقوط شود که لازم است بلافاصله نسبت به اجرای نگهداری آن اقدام شود.

### ۵-۳-۳ طراحی سیستم نگهداری

نتایج حاصل از انجام تحلیل ناپایداری کنترل ساختاری با نرم افزار Unwedge نشان داد که جهت پایدار سازی سقف و دیواره تونل انحراف آب سد پیرتقی لازم است سیستم نگهداری مناسبی طراحی شود. بر اساس مطالعات انجام شده توسط مهندس مشاور طرح در رابطه با طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ، مشخص شده که سیستم نگهداری تونل ترکیبی از بولت و شاتکریت باشد. بر این اساس سیستم نگهداری تونل انحراف آب پیر تقی طراحی می‌شود. طبق نتایج حاصل از تحلیل ناپایداری کنترل ساختاری با استفاده از نرم‌افزار Unwedge که بر روی مسیر بهینه انتخابی (راستای شمال غربی جنوب شرقی (N35)) انجام گرفت بزرگترین گوه‌های ناپایدار که در سقف و دیواره تونل تشکیل می‌شود مطابق جدول ۵-۴ است.

جدول ۵-۴ مشخصات بزرگترین گوه‌ها با پتانسیل ناپایداری در اطراف تونل با راستای بهینه انتخاب شده

| گوه                                           | ویژگی | وزن (ton) | سطح (مترمربع) | ضریب اطمینان | ارتفاع گوه (متر)  | محل تشکیل                   | نوع گسیختگی |
|-----------------------------------------------|-------|-----------|---------------|--------------|-------------------|-----------------------------|-------------|
| گوه شماره ۸ حاصل از تقاطع دسته درزه ۲ و ۳ و ۴ | ۱۶۸   | ۴۷/۹۴     | ۰             | ۴/۴۲         | سقف               | ریزش                        |             |
| گوه شماره ۵ حاصل از تقاطع دسته درزه ۱ و ۲ و ۳ | ۱۰۸   | ۲۲/۵۹     | ۰/۴۲۹         | ۵/۹۲         | سقف و دیواره غربی | لغزش روی دسته درزه ۲ و ۳    |             |
| گوه شماره ۵ حاصل از تقاطع دسته درزه ۱ و ۲ و ۴ | ۲۵۴   | ۴۴/۱۰     | ۱/۶           | ۱۰/۸۵        | سقف و دیواره شرقی | لغزش بر روی دسته درزه ۲ و ۴ |             |

با توجه به جدول ۴-۵، برای رعایت کافی ایمنی در طراحی سیستم نگهداری سقف مغار، مبنای محاسبات، بر مبنای بیشترین فشار وارده بر سیستم نگهداری در سیستم گسیختگی بلوک‌های ریزشی می‌باشد که متعلق به گوه شماره ۸ که از تقاطع دسته درزه‌های ۲، ۳ و ۴ تشکیل می‌شود، است. با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته برای پایداری تونل با نرم‌افزار Unwedge از ترکیب میل‌مهار و شاتکریت برای پایداری گوه‌های سقفی و برای دیواره‌ها شاتکریت در نظر گرفته شده است که مشخصات آن‌ها به شرح ذیل است:

طول بولت‌ها، با توجه به شکل گوه و ابعاد آن و نیز قضاوت مهندسی تعیین می‌شود. بادر نظر گرفتن این جوانب، با توجه به اینکه ارتفاع گوه در سقف ۴/۴۳ متر است طول میل‌مهار باید یک متر بیشتر از این مقدار باشد بنابراین طول بولت ۶ متر در نظر گرفته شده است. جهت تعیین فاصله‌داری بولت‌ها از روابط تجربی نیاز به آگاهی از میزان ظرفیت میل‌مهاری می‌باشد. ظرفیت باربری بولت با مهار مکانیکی با توجه به نرم افزار Unwedge، ۱۰ تن گرفته شده است. بر طبق ظرفیت باربری بولت فاصله داری میل‌مهاری محاسبه می‌شود.

$$s = \left(\frac{A}{N}\right)^{0.5} \quad (10-5)$$

که در آن A سطح ایجاد شده گوه در درون فضای مورد نظر و N تعداد میل‌مهاری است که از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$N = \frac{w \cdot f}{B} \quad (11-5)$$

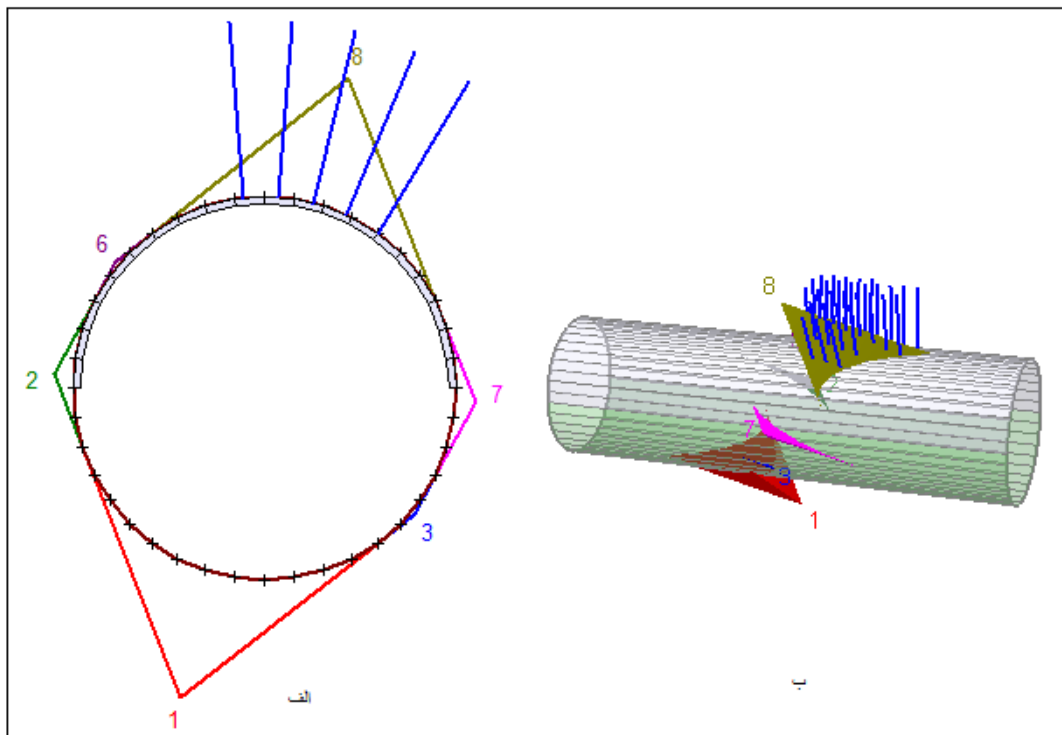
که در آن W وزن گوه ناپایدار، f فاکتور ایمنی که معمولاً بین ۲-۵ در نظر گرفته می‌شود. و B ظرفیت باربری بولت است.

طراحی برای میل‌مهار بر اساس بحرانی‌ترین بلوک ناپایدار که در سقف تونل تشکیل می‌شود انجام گرفته است. وزن و سطح حفاری شده این بلوک برای محاسبه فاصله داری استفاده می‌شود. در جدول ۵-۵ فاصله داری بولت‌ها برای دو ضریب اطمینان ۲ و ۲/۵ آورده شده است.

جدول ۵-۵ مشخصات بزرگترین گوه‌ها با پتانسیل ناپایداری در اطراف تونل با راستای بهینه انتخاب شده

| فاصله‌داری | W(ton) | N  | A(m <sup>2</sup> ) | B(ton) | SF  |
|------------|--------|----|--------------------|--------|-----|
| 1/2*1/2    | 168    | 34 | 48                 | 10     | 2   |
| 1*1        | 168    | 42 | 48                 | 10     | 2/5 |

با توجه به نتایج جدول ۵-۵ اجرای راک بولت با طول ۶ متر و فاصله‌داری ۱٫۲\*۱٫۲ به صورت موضعی برای پایداری گوه شماره ۸ که در سقف تونل تشکیل و دچار ریزش می‌شود کافی می‌باشد. اجرای شاتکریت به ضخامت 5cm و مقاومت برشی ۲۰۰ تن بر متر مربع برای نیمه بالایی تونل پیشنهاد می‌شود. با اجرای این دو سیستم نگهداری برای تونل انحراف با راستای شمال شرقی- جنوب غربی (N35) تمام گوه‌ها ناپایدار در تمام حالات مورد بررسی به ضریب اطمینان در حد پایداری می‌رسند. در شکل ۵-۱۹ طراحی این سیستم نگهداری برای حالتی که گوه بحرانی در سقف تشکیل شده را در دو حالت دو بعدی و سه بعدی و در جدول مشخصات گوه‌های ناپایدار، قبل و بعد از نصب نگهداری مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۱۹: بلوک‌های پایدار شده با اجرای سیستم نگهداری

جدول ۵-۶: مشخصات بزرگترین گوه‌ها با پتانسیل ناپایداری قبل و بعد از نصب سیستم نگهداری

| گوه                                                | ویژگی | وزن (تن) | سطح مقطع<br>(متر مربع) | حجم (متر<br>مکعب) | ضریب ایمنی<br>قبل از نگهداری | ضریب ایمنی<br>بعد از نگهداری |
|----------------------------------------------------|-------|----------|------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|
| گوه شماره ۸ حاصل از تقاطع<br>سه دسته درزه ۲، ۳ و ۴ |       | ۱۶۸      | ۴۸                     | ۶۲                | ۰                            | ۲/۵۸                         |
| گوه شماره ۵ حاصل از تقاطع<br>سه دسته درزه ۱، ۲ و ۳ |       | ۱۰۸      | ۲۳/۶                   | ۴۰                | ۰/۴۳۹                        | ۴/۰۷                         |
| گوه شماره ۵ حاصل از تقاطع<br>سه دسته درزه ۱، ۲ و ۴ |       | ۲۵۴      | ۴۴                     | ۱۳۱               | ۱/۶                          | ۲/۵۹                         |

همانطور که در جدول ۵-۶ مشاهده می‌شود، گوه شماره ۸ قبل از نصب سیستم نگهداری، دارای ضریب اطمینان صفر است که احتمال سقوط آن به داخل تونل بسیار بالا است و نیاز به پایدار سازی دارد. برای پایدارسازی این گوه، همانطور که در شکل ۵-۱۸ مشاهده می‌شود، از ترکیب شاتکریت و میل‌مهرهای مکانیکی در نرم‌افزار Unwedge استفاده شده است. پس از تحلیل، ضریب اطمینان افزایش می‌یابد و بلوک پایدار می‌شود. بلوک شماره ۵ که از تقاطع دسته درزه‌های ۱، ۲ و ۳ تشکیل

شده است، قبل از نصب سیستم نگهداری دارای ضریب اطمینان ۰,۴۳۹ است که از نظر قضاوت مهندسی و روش تئوری بلوک ناپایدار است و نیاز به پایدار سازی دارد. برای پایدار سازی این بلوک فقط از سیستم شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی متر استفاده شده است که ضریب اطمینان آن پس از نصب سیستم نگهداری به ۴,۰۷ رسیده است. بلوک شماره ۵ که از تقاطع دسته درزه های ۱، ۲ و ۴ تشکیل شده است، قبل از نصب سیستم نگهداری دارای ضریب اطمینان ۱,۶ است که طبق تئوری بلوک پایدار است اما به دلیل داشتن حجم بالا باید ضریب اطمینان آن افزایش یابد. ضریب اطمینان این بلوک نزدیک به مبنای ضریب ایمنی پایداری می باشد، از آن جهت که این بلوک حجم بالایی دارد و در دیواره تونل هم قرار دارد پس برای تونل خطرساز است. بنابراین از سیستم شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی متر استفاده شده و ضریب اطمینان آن ۲,۵۹ شده است. هر چه حجم بلوک ناپایدار بیشتر باشد، پایدار سازی آن سخت تر است. به عبارت دیگر گوه های شماره ۵ که در جدول ۵-۶ درج شده اند دارای ضریب اطمینان متفاوت هستند و از یک سیستم نگهداری مشابه (شاتکریت با ضخامت ۵ سانتی متر) برای پایدار سازی آنها استفاده شده است. ضریب اطمینان بلوکی که دارای حجم بیشتر بوده (تقریباً سه برابر)، حدوداً ۲ برابر شده و بلوک کوچکتر، ۹ برابر شده است.

#### ۴-۵ جمع بندی

افزایش ایمنی و بهینه نمودن هزینه ها از اهداف اصلی هر طرح عمرانی است. بر این اساس علوم روز نیز به منظور نیل به این اهداف در این راستا گسترش یافته اند. روش های تحلیل و طراحی سازه های ژئوتکنیکی عموماً بر اساس تئوری های حالت حدی و استفاده از معیار ضریب اطمینان صورت می پذیرد. در این تحقیق در ابتدا پایداری بلوک با استفاده از روش تئوری بلوک قطعی بررسی شده و بلوک های ناپایدار شناسایی شدند. از آن جهت که داده های مورد استفاده برای محاسبه ضریب اطمینان در تئوری بلوک داده های قطعی نیستند یعنی دارای عدم قطعیت هستند بنابراین بهتر است است که این تحلیل با استفاده از روش های آماری که عدم قطعیت را بررسی می کنند انجام داد. بدین

منظور در این فصل از روش مونت کارلو برای تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی بلوک‌ها استفاده شده است. برای بلوک‌های که طبق نظریه بلوکی جهت لغزش مشخص شده است تحلیل احتمالاتی ضریب ایمنی برای آن‌ها انجام شد و بر اساس ملاک‌های موجود برای انتخاب راستای بهینه بهترین راستا برای حفر تونل پیشنهاد شد. همچنین در انتهای این فصل راستای N35 که پایدارترین مسیر تونل انتخاب شد، بلوک‌های ناپایدار این مسیر به وسیله نرم‌افزار Unwedge نیز شناسایی شده و برای پایدار سازی آن‌ها سیستم نگهداری طراحی شده است.

# نتیجہ گیری و مشہادہ

## ۶-۱ نتیجه گیری

نظریه بلوکی در چند سالی که از معرفی آن می‌گذرد بیشتر برای حفاری‌های سطحی مورد استفاده قرار گرفته است. در این تحقیق کارایی این روش در تونل مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور نتایج حاصل از روش تئوری بلوک در تونل انحراف با راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N65^{\circ}$ ) که راستای پیشنهادی مشاور طرح می‌باشد، به شرح ذیل است:

(۱) تعداد بلوک‌های قابل جابجایی تشکیل شده در راستای شمال شرقی - جنوب غربی (امتداد  $N65^{\circ}$ ) که در این راستا تشکیل شده‌اند ۹ بلوک می‌باشند. بر اساس روش تئوری بلوک، بلوک‌هایی که دارای نیروی لغزش منفی (ضریب ایمنی بزرگ‌تر از یک) را دارا باشند، بلوک‌هایی هستند که با توجه به اینکه اصطکاک کافی دارند پایدار هستند. بنابراین ۴ بلوک با نام مشخص ۰۰۱۱ و ۱۰۱۰، ۰۰۰۱، ۰۱۰۱ با توجه به اینکه ضریب ایمنی بالاتر از یک دارند پایدار هستند.

(۲) طبق نظریه بلوک اگر نیروی لغزش بلوک مثبت (ضریب ایمنی کمتر از یک) باشد، این بلوک به علت نداشتن اصطکاک کافی ناپایدار است. ۴ بلوک با نام مشخص ۱۱۱۰، ۱۱۱۰، ۱۰۰۱ و ۱۰۱۱ به دلیل داشتن ضریب ایمنی کمتر از یک بلوک‌های ناپایدار شناسایی شده‌اند. دو بلوک ۱۰۰۱ و ۱۰۱۱ در بین بلوک‌های ناپایدار به علت داشتن حجم نسبتاً بالا در طراحی سیستم نگهداری باید به آن‌ها توجه ویژه‌ای شود و لازم است طراحی و اجرای سیستم نگهداری در نظر گرفته شود.

(۳) بلوک‌هایی که دارای سطح لغزش نیستند، یعنی هیچ اصطکاکی ندارند و در سقف فضای حفاری شده تشکیل می‌شوند دارای شرایط بحرانی می‌باشند. اگر بلافاصله بعد از حفاری نسبت به نصب سیستم نگهداری برای این بلوک‌ها اقدامی نشود سقوط خواهند کرد. در اینجا بلوک ۱۱۱۱ هست که دارای شرایط سقوط است و به علت داشتن حجم بالا بلافاصله پس از حفر لازم است با سیستم نگهداری پایدار شود.

در کارهای فنی و اقتصادی انتخاب راستایی برای حفر تونل که در آن کمترین بلوک ناسازگار با حالات تعادل شکل گیرد (بلوک‌های در بر گیرنده پیرامون تونل ضمن داشتن حجم کمتر به واسطه نحوه قرارگیری تمایل کمتری به سقوط داشته باشند) از دیدگاه استفاده از سیستم نگهداری اولیه و ثانویه بسیار حائز اهمیت است. لذا با در نظر گرفتن فرضیات نظریه بلوکی و به کمک نرم‌افزار Easy.kbt می‌توان حالت بهینه‌ای از راستای تونل‌های درون سنگی یافت که در آن به واسطه سقوط یا لغزش بلوک‌ها از کمترین احتمال نسبت به حالات دیگر برخوردار باشد. بدین منظور ۷ راستای مختلف با نرم‌افزار Easy.kbt مورد تحلیل قرار گرفته است که نتایج آن به شرح ذیل است:

راستای انتخابی برای تونل نسبت به راستای انتخاب شده توسط مهندس مشاور طرح داری اختلاف  $\pm 30$  درجه اختلاف دارند. خود راستای انتخابی مشاور یعنی N65 نیز جزء این ۷ راستا می‌باشد. اگر کاربری تونل که تونل انحراف آب به سمت پایین دست تکیه‌گاه سد می‌باشد با اختلاف ۳۰ درجه نسبت به راستای انتخابی مهندس مشاور طرح مشکلی ایجاد نشود. یعنی تا اختلاف ۳۰ درجه بتوان انتخاب کرد، راستای N35 (شمال شرقی - جنوب غربی) به عنوان بهترین راستا و راستای N95 (جنوب شرقی - شمال غربی) در رتبه بعدی با توجه به نتایج ذیل پیشنهاد می‌گردد:

- در راستای N35، ۵ بلوک ناپایدار تشکیل می‌شود. سه بلوک ۱۱۱۰، ۱۱۰۱، ۱۰۱۱ به دلیل داشتن حجم ناچیز از آن‌ها صرف‌نظر می‌شود. بلوک ۱۱۱۱ که بلوکی با شرایط سقوط در تمامی راستاها است داری کمترین حجم خود در دو راستای N35 و N95 است. بلوک ناپایدار دیگر در راستای N35 بلوک ۱۰۰۱ با ضریب ایمنی ۰/۴۳ است که نسبت به راستاهای دیگر دارای حجم کمتری می‌شود.
- یکی از تفاوت‌های اساسی که باعث برتری راستای N35 نسبت به راستای N95 می‌شود حجم بلوک ناپایدار ۱۰۱۱ است که نسبت به بلوک ناپایدار ۱۰۰۱ تشکیل شده در راستای N95 بیشتر است.

تحلیل پایداری فضا‌های زیرزمینی که در توده سنگ ایجاد می‌شوند اغلب با استفاده از روش‌های تحلیل حدی و با استفاده از معیار ضریب اطمینان قطعی انجام می‌گیرد. ضریب اطمینان هر پروژه نیز بر اساس عدم قطعیت‌های موجود، اهمیت پروژه و قضاوت مهندسی صورت می‌گیرد. مهندسین طراح اغلب برای طراحی سازه‌های با درجه اهمیت بالا اغلب با در نظر گرفتن ضریب اطمینان‌های بزرگ سعی در پوشاندن عدم قطعیت‌ها می‌نمایند. این در حالی است که علی‌رغم استفاده از ضرایب اطمینان بالا و صرف هزینه بیشتر، به دلیل کمی نبودن اثرات عدم قطعیت‌ها، از قابلیت اعتماد کافی برخوردار نیستند. با توجه به محدودیت‌های روش‌های مرسوم به نظر می‌رسد استفاده از روش‌های احتمالاتی کارای مناسب‌تری در این زمینه‌دارند. بدین منظور در این تحقیق از روش احتمالاتی مونت کارلو برای تحلیل احتمالاتی ضریب اطمینان بلوک‌ها مورد استفاده قرار گرفت و نتایج ذیل به دست آمده است.

- علی‌رغم اینکه روش تئوری بلوک اشاره بر پایداری بلوک‌های سنگی دارد اما نتایج روش احتمالاتی مونت کارلو گسیختگی بلوک‌های سنگی را با احتمال خاص نشان می‌دهد. برای مثال بلوک ۰۰۰۱ تشکیل شده در تونل دارای ضریب ایمنی قطعی (روش تئوری بلوکی)  $1/4$  می‌باشد که از نظر روش تئوری بلوک، بلوکی پایدار است. در حالیکه روش احتمالاتی، احتمال گسیختگی این بلوک را ۱۸ درصد تعیین می‌کند.
- مقایسه بین نتایج تحلیل احتمالاتی و قطعی نشان می‌دهد که نتایج احتمالاتی از جمله نقطه طراحی و احتمال گسیختگی منطقی‌تر از فاکتور اطمینان حالت قطعی است.
- نتایج نشان می‌دهد که توزیع مقادیر پارامترها نقش مهمی در پایداری بلوک‌های تشکیل شده در تونل دارد، که در روش قطعی تئوری بلوک دیده نمی‌شود. پراکندگی مقادیر پارامترها منجر به احتمال شکست‌های مختلف می‌شود. برای مثال بلوک ۱۰۱۰ تشکیل شده در تونل در تحلیل تئوری بلوک به علت داشتن ضریب اطمینان بیشتر از یک پایدار در نظر گرفته می‌شود، این در حالی است که تحلیل احتمالاتی احتمال ناپایداری این بلوک را ۲۳ درصد تعیین می‌کند که درصد نسبتاً بالایی است.

در تحلیل گوه‌ای که با نرم‌افزار Unwedge انجام گرفته است نتایج ذیل بدست آمده است.

- سه گوه ناپایدار که داری حجم قابل ملاحظه بودند شناسایی شدند. گوه شماره ۸ که از تقاطع سه دسته درزه ۲، ۳ و ۴ تشکیل شده است در سقف تونل جانمایی شده است و دارای شرایط ریزشی می‌باشد. دو بلوک دیگر دارای شرایط لغزش هستند که در دیواره‌های تونل تشکیل شده‌اند.

- برای پایدارسازی گوه‌های ناپایدار از دو سیستم نگهداری شاتکریت و میل‌مهار استفاده شده است. برای پایدار کردن این گوه‌ها در ابتدا یک لایه شاتکریت به ضخامت ۵ سانتیمتر در نمیه بالایی تونل پیشنهاد شده است، همچنین برای پایداری بلوک‌های ریزشی در سقف تونل از میل‌مه‌ارهای مکانیکی به طول ۶ متر و فاصله داری ۱،۲\*۱،۲ به صورت موضعی پیشنهاد شده است که برای پایدار سازی گوه‌های ناپایدار در راستای بهینه انتخاب شده کافی می‌باشد.

## ۲-۶ پیشنهادها

- در این تحقیق تنها نیروی گرانش در نظر گرفته شده است. با گنجانیدن نیروی زلزله در تحلیل تعادل حدی بلوک‌ها، امکان دارد بلوک‌های کلیدی بیشتری تولید شود. این نیروها قادرند که به نیروی لغزش بلوک کمک کرده و پایداری آن را تحت تأثیر قرار دهند، لذا پیشنهاد می‌گردد تحت بار گذاری زلزله نیز تحلیل انجام گردد.
- در این تحقیق تحلیل احتمالاتی بر روی ضریب اطمینان بلوک‌ها با در نظر گرفتن سه پارامتر متغیر شیب، جهت شیب و زاویه اصطکاک دسته درزه انجام شد. از آنجایی که پارامترهایی که در تعیین حجم بلوک به کار می‌روند نیز دارای عدم قطعیت هستند. لذا پیشنهاد می‌گردد که تحلیل احتمالاتی هندسی بلوک‌ها با در نظر گرفتن دو پارامتر متغیر فاصله‌داری و طول دسته درزه نیز انجام شود.

•

## منابع

---

- رمضان زاده، احمد، ۱۳۷۶. «طراحی و تحلیل پایداری مغار نیروگاه هیدروالکتریک کارون ۳» پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس تهران.
- طاهری، سیدرضا، مترجم. ۱۳۹۳. مهندسی دیواره‌های شیب‌دارسنگی. نوشته کریستوفر، انتشارات دانشگاهی کیان.
- فلک ناز، نوشین، ۱۳۷۹. «تحلیل پایداری تکیه‌گاههای سد بتونی کارون ۴ با استفاده از نظریه بلوکی» پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه امیر کبیر تهران.
- گزارش نهایی زمین شناسی و مهندسی طرح سد و نیروگاه پیرتقی در حوضه قزل اوزون، مطالعات مرحله اول، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران، اردیبهشت ۱۳۹۳.
- گزارش زمین شناسی و مهندسی طرح سد و نیروگاه پیرتقی در حوضه قزل اوزون، شرکت مهندس طوس آب، ۱۳۹۳.
- موسوی، سید جلال و آرش خسروی، ۱۳۷۸، انتخاب جهت بهینه حفر تونل با استفاده از نظریه بلوکی، اولین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، تهران، دانشکده فنی دانشگاه تهران.
- میبدی، عنایت‌الله، یاراحمدی‌بافقی، علیرضا و سالاری‌راد، حسین، ۱۳۸۶، روش گروه‌های کلیدی جهت-دار در تحلیل پایداری شیب سنگ‌های درزه‌دار، نشریه علمی- پژوهشی مهندسی معدن.
- نجفوند، شهریار، حسین محمدی، و جلال کاسب زاده. ۱۳۹۳. «بهینه‌سازی و افزایش ایمنی پایداری گود با استفاده از تحلیل قابلیت اعتماد» دومین کنفرانس بین‌المللی دستاوردهای نوین پژوهشی در عمران، معماری و مدیریت شهری، تهران.
- نوروزی، مهدی. ۱۳۸۸. «توسعه سه بعدی روش گروه‌های کلیدی برای تحلیل پایداری دیواره واقع در بلوک تکتونیکی ۲ معدن چغارت» پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Ahn, S. H., & Lee, C. I. (2004). Removability analysis of rock blocks by block theory and a probabilistic approach. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, 378-383.

Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Rock mechanics*, 6(4), 189-236.

Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineer in South Africa*, 15(12).

Changdong Li; et al. "Failure Probability Analysis on Key Blocks Applied to Tunnel Excavation: A Case Study of Zhenjiang Subway in China", 2015

Cheng, X. L., Wang, Y., Xue, J., Xiao, J., & Miao, Q. H. (2017, August). A New Software for Block Theory and Its Applications in Rock Engineering. In *51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association.

Choi, Y. K. (2006). Use of block theory in tunnel stability analysis. (Thesis). University of Hong Kong, Pokfulam, Hong Kong SAR.

Fu Helin, Li Liang, Liu Baochen, K-H. Lux, 2002, Modification of Block Theory and its Application, The Electronic Journal of Geotechnical Engineering EST. 1996

GANG, CHEN, 2013 "PROBABILISTIC APPROACH FOR THE ANALYSIS OF ROCK EXCAVATION STABILITY" Department of Mining and Geological Engineering, University of Alaska Fairbanks Fairbanks, AK 99775-5800, USA, 2021

Gbur, E. (1981). Probability and Statistics in Engineering and Management Science.

George, M. F., & Sitar, N. (2012). Block theory application to scour assessment of unlined rock spillways. *University of California Report No UCB GT*, 12-02.

Goodman R.E, 1980, Introduction to Rock Mechanics. John Wiley Sons. Wiley.

Goodman R.E., Shi G. 1985, Block theory and its application to rock engineering.

Haswanto, W. A., & Abd-Ghani, R. (2008). Kinematic and block theory applications to rock slope stability analysis at Fraser's hill Pahang Malaysia. *Elect J Geotech Eng*, 13.

Hatzor, Y., & Goodman, R. E. (1992). Application of block theory and the critical key block concept in tunneling; two case histories. In *Proc. Int. Soc. Rock Mech. conf. on fractured and jointed rock masses* (pp. 632-639).

Hu, J. H., Chun, Y. A. N. G., Zhou, K. P., Li, J. L., & Feng, G. A. O. (2016). Stability of undercut space in fragment orebody based on key block theory. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(7), 1946-1954.

Hubbard, D. W. (2014). *How to measure anything: Finding the value of intangibles in business*. John Wiley & Sons.

Jia, C., Li, Y., Lian, M., & Zhou, X. (2017). Jointed Surrounding Rock Mass Stability Analysis on an Underground Cavern in a Hydropower Station Based on the Extended Key Block Theory. *Energies*, 10(4), 563.

Kuszmaul, J. S. (1999). Estimating keyblock sizes in underground excavations: accounting for joint set spacing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(2), 217-232.

Kuszmaul, J. S. (1999). Estimating keyblock sizes in underground excavations: accounting for joint set spacing. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 36(2), 217-232.

Mauldon, M. (1993, December). Variation of joint orientation in block theory analysis. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 30, No. 7, pp. 1585-1590). Pergamon.

Mirzaeian, Y., Shahriar, K., & Sharifzadeh, M. (2015). Tunnel Probabilistic Structural Analysis Using the FORM. *Journal of Geological Research*, 2015.

Nguyen, Q., & Phi, T. (2014). Rock slope stability analysis using Block Theory and probabilistic approach: An application at national road No. 6, Vietnam.

Park, H., & West, T. R. (2001). Development of a probabilistic approach for rock wedge failure. *Engineering Geology*, 59(3), 233-251.

Prasad, V. V. R., Dwivedi, R. D., & Swarup, A. (2013). Determination of support pressure for tunnels and caverns using block theory. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 37, 55-61.

Yeung, M. R., Jiang, Q. H., & Sun, N. (2003). Validation of block theory and three-dimensional discontinuous deformation analysis as wedge stability analysis methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(2), 265-275.

Zheng, J., Kulatilake, P. H. S. W., Shu, B., Sherizadeh, T., & Deng, J. (2014). Probabilistic block theory analysis for a rock slope at an open pit mine in USA. *Computers and Geotechnics*, 61, 254-265.

## Abstract

The effect of environmental forces on rocks causes to create weakness levels in them, and the intersection of these plates is with each other that converts rock mass into separate blocks. The most basic factor determining the instability situations of the rock mass against the structures and construction within the rock is the reliance situation of each block. The construction of a structure such as a tunnel in a rock mass with several discontinuities can cause rock blocks to be released in different sizes. The blocks with the lowest level of reliance have the most critical of deployment way. The collapse and slipping the blocks will cause destruct to the spaces around the tunnel. One of the most well-known partial equilibrium methods used in the past thirty years is the method of key blocks analysis or block theory. The block theory examines the displacement of rocky blocks and the partial equilibrium analysis of these blocks from different excavation surfaces. The block theory method for structural analysis of deflection tunnels blocks of Pir Taqi Dam has been investigated in this study. For this purpose, the confidence coefficient, the fracture pattern, and the volume of the blocks are obtained and then the key blocks are identified using the structural discontinuities of the rock mass along the tunnel by Easykbt software.

Direction to drill an underground structure in a jointed rock is the direction in which we encounter the least volume of unstable blocks in the wall and ceiling of the structure. For this purpose, block theory analysis has been carried out for 7 directions, which they have difference ( $\pm 30$ ) relative to the direction selected by the project's consultant engineer. The most optimal direction for the water diversion tunnel of Pir Taqi Dam has been proposed considering the volume of unstable blocks formed in each direction N35 and also considering the use of the tunnel .

Probabilistic analysis leads to a better understanding of sustainability and provides complete information on the stability of drilling excavations. One of the difficulties in estimating the probability of failure in underground excavations is the complexity of mathematical calculations. The Crystall Ball software that is a statistical software based on the Monte Carlo method is used in order to analyze the probability of block stability. The probabilistic analysis of the safety coefficient of blocks is compared with the results of the block theory method. The results show that despite the fact that the block theory method refers to the stability of rocky blocks, but the results of the probabilistic method show the failure of blocks with a particular probability. Ultimately, the structural analysis

of the block was performed with the Unwedge software on the proposed optimal path and the largest unstable wedges were identified. The maintenance system has been then designed to stabilize these wedges. The results show that with the execution of a 5cm thick Shotcrete in the upper half of the tunnel, as well as the execution of mechanical rock bolts with a length of 6 meters and a  $1.2 * 1.2$  distance in the tunnel roof, cause to the stability of the unstable wedges in this direction.

**Keywords:** Block theory, Stability analysis, easy.KBT Software, Monte Carlo probabilistic method, Unwedge software



**Shahrood University of Technology**

**Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering**

**MSc Thesis in Tunnel and Underground Spaces  
Engineering**

Stability analysis and support system design of Pirtaghi dam  
diversion tunnel using structural control methods

By: Ghaffar Kahoorizadeh

Supervisor:

Majid Nikkhah

Advisor:

Shokrollah Zare

January 2018

