

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه استخراج معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد

توسعه سه بعدی روش گروه‌های کلیدی

برای تحلیل پایداری دیواره واقع در بلوک تکتونیکی ۲ معدن چغارت

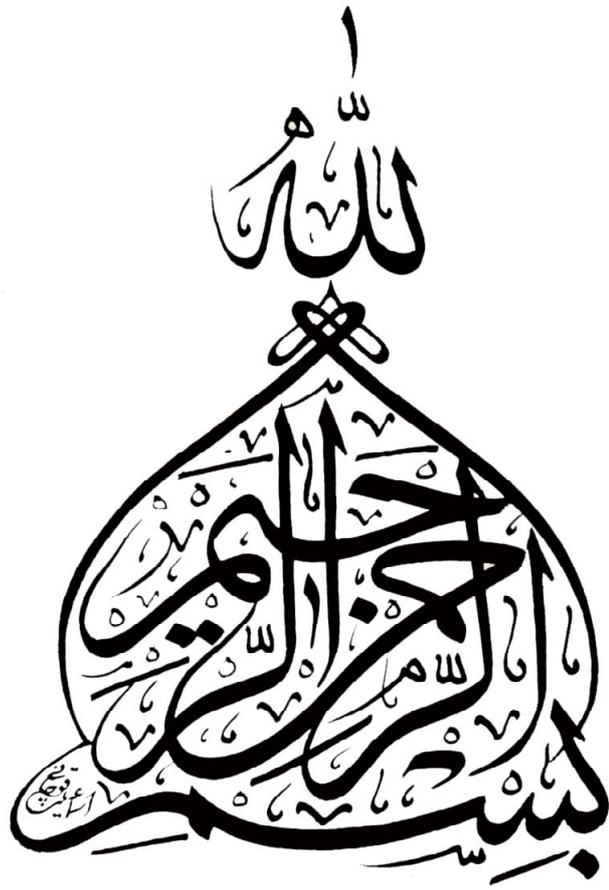
مهدی نوروزی

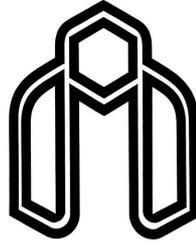
اساتید راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر علیرضا یاراحمدی بافقی

تیر ۱۳۸۸





دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک
گروه استخراج معدن

**توسعه سه بعدی روش گروه‌های کلیدی
برای تحلیل پایداری دیواره واقع در بلوک تکتونیکی ۲ معدن چغارت**

دانشجو: مهدی نوروزی

اساتید راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

دکتر علیرضا یاراحمدی بافقی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیر ۱۳۸۸



دانشگاه علمی کاربردی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره :

تاریخ :

ویرایش :

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی

ارشد خانم / آقای محمدرضا نوری رشته مکانیک گرایش ارتعاش
تحت عنوان بررسی دینامیک و لرزه‌شناسی برای تعیین ایمنی دوارهای صنعتی در تاریخ ۸۸/۰۶/۱۴ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

<input type="checkbox"/> قبول (با درجه : عالی - امتیاز ۱۹ تا ۲۰)	<input type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> مردود
--	------------------------------------	--------------------------------

۲- بسیار خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶)

۱- عالی (۲۰ - ۱۸)

۴- قابل قبول (۱۳/۹۹ - ۱۲)

۳- خوب (۱۵/۹۹ - ۱۴)

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران (a)
	استاد	دکتر محمدعلی حلاجی	۱- استاد راهنما
	-	-	۲- استاد مشاور
	دستیار	دکتر محمدعلی...	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	استاد	محمد عطایی	۴- استاد ممتحن
	استاد	فرشته سرنی	۵- استاد ممتحن

تأیید رئیس دانشکده :

تقدیم بہ:

ہمسرعزیم، بہ قلب مہربان و بی ریا و وفادارش

پدرم، بہ پاس محبت و تلاش بی وقفہ اش

مادرم، سرچشمہ جوشان مہر و فداکاری

شکر و قدردانی

پاس بی کران پرو دکار یکتارا، ستم که مرابه طریق علم و دانش ر، بنمون و به همشینی رحروان علم و دانش معنوم ساخت. اکمون که به یاری پرو دکار مهربان مراحل انجام این تحقیق به

پایان رسیده است،

از استاد راهنمای عزیزم جناب آقای دکتر سید محمد اسماعیل جلالی بخاطر راهنمایی، بهکاری صمیمانه و آموزه های فراوانشان، در کل دوران تحصیلی ام کمال پاسکزاری را دارم.

از استاد راهنمای محترم، جناب آقای دکتر علیرضا یار احمدی بانقی، به خاطر راهنمایی های ارزشمندشان کمال شکر و قدردانی را دارم.

از زحمات اساتید محترم دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک خصوصاً آقایان دکتر فرزندک سرشکی، دکتر محمد عطانی، دکتر رضا خالوکا کانی و دکتر فرامرزدولتی کمال شکر را دارم.

از کلیه دوستان خصوصاً آقایان مهندس عنایت امامی، مهندس اینی به خاطر راهنمایی های ارزنده شان و آقایان مهندس سعید یوسفی، مهندس سید محمد علی حسینی، مهندس سید مهدی حسینی

و مهندس مهدی نجفی که دوران تحصیلی خود را با آنها در فضایی دوستانه، علمی و فرهنگی گذراندم، پاسکزاری و قدردانی می کنم.

تعهد نامه

اینجانب دانشجوی دوره کارشناسی ارشد / دکتری رشته
دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه/ رساله
تحت راهنمایی متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه/ رساله 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 پایان نامه/ رساله 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 می باشد 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 پایان نامه / رساله تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه/ رساله رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه/ رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه/ رساله ، 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 :

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه/ رساله وجود داشته باشد .

چکیده

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 حفریات مختلف می‌پردازد. در روش تئوری بلوکی تنها بلوک‌های کلیدی در نظر گرفته می‌شود. اگر هیچ یک از بلوک‌ها ناپایدار نباشد، نتیجه می‌شود که مجموعه توده سنگ مورد مطالعه پایدار است، اما در واقع می‌توان گروه‌هایی از بلوک‌ها را یافت که اگر به صورت مجموعه واحد در نظر گرفته شوند، ناپایدار خواهند بود. روش گروه‌های کلیدی یک روش گروه‌بندی بر مبنای تحلیل تمام بلوک‌های همسایه یک بلوک کلیدی است که به جستجوی یک گروه کلیدی ناپایدارتر از بلوک‌های کلیدی مجزا می‌پردازد. این روش بر اساس یک تحلیل پایداری پیشرونده اجرا می‌شود و در واقع یک روش تعادل حدی دو بعدی است. به دلیل اینکه نتایج تحلیل دو بعدی معمولاً محافظه‌کارانه است، در پروژه‌های بزرگ، تحلیل سه بعدی امری ضروری است. لذا مسئله اصلی در این تحقیق، توسعه روش گروه‌های کلیدی در سه بعد می‌باشد تا امکان تحلیل‌های واقعی‌تر شیب سنگ‌های درزه‌دار بوجود آید. در این تحقیق، پس از بسط و توسعه تئوری روش گروه‌های کلیدی به سه بعد، برای کاربرد عملی این روش، برنامه کامپیوتری آن در محیط Mathematica تهیه شده است. برای اعتمادسنجی روش ارائه شده، نتایج اجرای آن بر روی چند مدل فرضی با نتایج حاصل از تحلیل عددی به روش المان‌های گسسته با استفاده از نرم افزار 3DEC که برای مدل‌سازی و تحلیل محیط-های ناپیوسته به کار می‌رود، مقایسه شده است. برای آزمایش کارایی روش در موارد واقعی، مدل هندسی بلوک تکتونیک II چغارت تهیه و تحلیل پایداری آن با استفاده از روش گروه‌های کلیدی سه بعدی انجام شده است.

کلمات کلیدی:

تئوری بلوکی، روش گروه‌های کلیدی، تحلیل پایداری، معدن چغارت

عنوان مقاله‌های مستخرج از پایان نامه:

1. Noroozi, M. & Jalali, S. E. & Bafghi, A. Y. (2009), "3D GEOMETRICAL-GEOTECHNICAL MODELING OF FRACTURED ROCK MASS USING DETERMINISTIC APPROACH", 9th International Scientific Conference, SGEM 2009, Vol 1, pp. 317-323, Bulgaria.

2. Noroozi, M. & Jalali, S. E. & Bafghi, A. Y. (2009), "A NOVEL APPROCH TO OPEN PIT LIMIT OPTIMIZATION", 9th International Scientific Conference, SGEM 2009, Vol 1, pp. 325-331, Bulgaria.

۳. نوروزی م، جلالی س.ا، یاراحمدی ع، "بهینه‌سازی محدوده نهایی معادن روباز با استفاده از نظریه گروه‌های کلیدی"، مجله علمی- پژوهشی مهندسی معدن، (پذیرفته شده برای چاپ)

4. Noroozi, M. & Jalali, S. E. & Bafghi, A. Y. (2009), "3D development of key group method", Safety Science, (Under Review).

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- سابقه و ضرورت انجام تحقیق ۴
- ۳-۱- هدف از انجام پایان نامه ۶
- ۴-۱- سازمان‌دهی پایان نامه ۷

فصل دوم: مروری بر روش گروه‌های کلیدی و مفاهیم مرتبط با آن

- ۱-۱- تئوری بلوکی ۹
- ۱-۱-۱- کلیات ۹
- ۲-۱-۲- فرضیات تئوری بلوک ۱۱
- ۳-۱-۲- انواع بلوک‌ها ۱۲
- ۴-۱-۲- بلوک کلیدی ۱۴
- ۲-۲- روش گروه‌های کلیدی ۱۶
- ۱-۲-۲- کلیات ۱۶
- ۲-۲-۲- مبانی روش گروه‌های کلیدی ۱۷
- ۳-۲-۲- روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار ۱۹

فصل سوم: مبانی تئوری مورد استفاده در الگوریتم گروه‌های کلیدی سه بعدی

- ۱-۱- کلیات ۲۴
- ۲-۳- مفهوم محدود بودن یک بلوک ۲۴
- ۳-۳- مفهوم گرافیکی قابلیت جابجایی بلوک‌ها ۲۸
- ۴-۳- تحلیل پایداری سه بعدی بلوک‌ها ۳۰
- ۱-۴-۳- تحلیل گرافیکی بلوک‌ها ۳۰
- ۲-۴-۳- تحلیل برداری بلوک‌ها ۳۱
- ۱-۲-۴-۳- تعریف ریاضی مساله ۳۱
- ۲-۲-۴-۳- شناسایی انواع حرکت بلوک ۳۳
- ۳-۲-۴-۳- تعیین حرکت بلوک چند وجهی ۴۰
- ۴-۲-۴-۳- تأثیر اصطکاک روی حرکت بلوک ۴۱
- ۵-۳- روش‌های تحلیل پایداری سه بعدی شیب ۴۴
- ۱-۵-۳- روش‌های تحلیل تعادل حدی ۴۵

۴۶	..... روش‌های مرز بالایی
۴۷	..... روش مرز بالایی
۴۹	..... سرعت پلاستیک و اتلاف انرژی
۵۰	..... حوزه سرعت در سه بعد
۵۴	..... روش انرژی
۵۵	..... روش‌های عددی
۵۶	..... محدودیت‌های کاربرد روش مرز بالایی در این تحقیق

فصل چهارم: مدل‌سازی هندسی سه بعدی بلوک تکتونیکی II معدن چغارت

۵۹	..... کلیات
۵۹	..... شبیه‌سازی حدود مدل
۶۰	..... بلوک تکتونیکی شماره II چغارت
۶۲	..... مدل‌سازی هندسی ناپیوستگی‌ها
۶۳	..... گسترش ناپیوستگی‌ها
۶۳	..... جانمایی ناپیوستگی‌ها
۶۴	..... جهت شیب و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها
۶۴	..... برداشت درزه‌ها
۶۴	..... ترسیم و دسته‌بندی درزه‌ها
۶۵	..... تحلیل آماری
۶۶	..... مدل‌سازی هندسی سه بعدی
۷۰	..... Mathematica در محیط
۷۳	..... مدل‌سازی هندسی سه بعدی بلوک II در نرم افزار 3DEC

فصل پنجم: مدل‌سازی مکانیکی با استفاده از روش گروه‌های کلیدی سه بعدی

۷۶	..... کلیات
۷۷	..... فرضیات بکار رفته در روش 3DKGM
۷۸	..... روش گروه‌های کلیدی سه بعدی (3DKGM)
۸۱	..... الگوریتم بردار نرمال یکه
۸۱	..... الگوریتم یافتن بلوک‌های همسایه یک بلوک
۸۳	..... الگوریتم ترکیب دو یا چند بلوک
۸۳	..... الگوریتم یافتن بردار نرمال سطوح بلوک
۸۷	..... الگوریتم یافتن بلوک‌های فعال

۸۷	.....	۵-۳-۶- الگوریتم محاسبه مساحت یک صفحه از بلوک
۸۹	.....	۵-۳-۷- الگوریتم محاسبه حجم بلوک
۹۲	.....	۵-۳-۸- الگوریتم تحلیل پایداری یک بلوک
۹۵	.....	۵-۳-۹- الگوریتم گروه بندی بلوک‌ها
۹۷	.....	۵-۴-۴- اعتبارسنجی الگوریتم ارائه شده با ارائه چند مثال
۹۷	.....	۵-۴-۱- مثال اول
۱۰۰	.....	۵-۴-۲- مثال دوم
۱۰۴	.....	۵-۴-۳- مثال سوم
۱۰۸	.....	۵-۵- تحلیل پایداری بلوک تکتونیکی II معدن چغارت
۱۱۲	.....	۵-۶- مشخصات نرم افزار تهیه شده

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱۱۷	.....	۶-۱- نتیجه‌گیری
۱۱۸	.....	۶-۲- پیشنهادات
۱۱۹	.....	مراجع

فهرست شکل‌ها

فصل دوم: مروری بر روش گروه‌های کلیدی و مفاهیم مرتبط با آن

- شکل ۱-۲: ناپایداری شیب سنگی ناشی از جابجایی بلوک‌ها ۱۰
- شکل ۲-۲: تقسیم بندی انواع بلوک‌ها ۱۲
- شکل ۳-۲: انواع بلوک‌ها ۱۳
- شکل ۴-۲: نمونه‌هایی از بلوک کلیدی ۱۵
- شکل ۵-۲: مثالی از روش گروه کلیدی انجام شده بر روی یک شیب سنگ درزه‌دار ۱۹
- شکل ۶-۲: یک شیب سنگ فرضی به همراه یک گروه کلیدی نشان داده شده ۲۲

فصل سوم: مبانی تئوری مورد استفاده در الگوریتم گروه‌های کلیدی سه بعدی

- شکل ۱-۳: تحدب و تقعر بلوک ۲۵
- شکل ۲-۳: استفاده از تئوری محدودیت برای تشخیص بلوک نامحدود ۲۶
- شکل ۳-۳: استفاده از تئوری محدودیت برای تشخیص بلوک محدود ۲۶
- شکل ۴-۳: بررسی قابلیت جابجایی لغزشی یک بلوک محدود ۲۸
- شکل ۵-۳: بررسی تئوری قابلیت جابجایی ۲۹
- شکل ۶-۳: تجزیه مجموع نیروهای محرک R به دو جزء برداری عمود و موازی با سطح ثابت ۳۵
- شکل ۷-۳: طرح طبقه‌بندی برای شناسایی نوع سوم حرکت بلوک در مرحله ۳ ۳۶
- شکل ۸-۳: نمونه ترکیب جهات سطوح ثابت که منجر به نوع ۳ حرکت بلوک می‌شود (منتج شده از نقاط K و M در شکل ۷-۲) ۳۹
- شکل ۹-۳: نمونه ترکیب جهات سطوح ثابت که منجر به نوع ۳ حرکت بلوک می‌شود (منتج شده از نقاط G و M در شکل ۷-۲) ۳۹
- شکل ۱۰-۳: پلان نشان داده شده از یک الگوی تقسیم‌بندی برای یک توده شکسته سه بعدی ۴۸
- شکل ۱۱-۳: نمای ایزومتریک از الگوی تقسیم‌بندی برای یک توده شکسته سه بعدی ۴۸
- شکل ۱۲-۳: امتداد بردارهای سرعت پلاستیک تعیین شده بر مبنای قانون جریان پیوسته ۵۰
- شکل ۱۳-۳: یک منشور شش وجهی ۵۱
- شکل ۱۴-۳: محاسبه سرعت یک منشور الف) حالت ۲ ب) حالت ۳ ۵۳

فصل چهارم: مدل‌سازی هندسی سه بعدی بلوک تکتونیکی II معدن چغارت

- شکل ۱-۴: محدوده نهایی پیت معدن سنگ آهن چغارت ۶۰
- شکل ۲-۴: محدوده بلوک‌بندی تکتونیکی پیت معدن چغارت ۶۱
- شکل ۳-۴: نمایی سه بعدی از بلوک تکتونیکی II معدن چغارت ۶۱

- شکل ۴-۴: نمایی دو بعدی از بلوک تکتونیکی II معدن چغارت ۶۲
- شکل ۵-۴: خطوط برداشت در بلوک II معدن چغارت ۶۴
- شکل ۶-۴: کنتور تمرکز درزه‌ها و تفکیک آنها در بلوک تکتونیکی II ۶۵
- شکل ۷-۴: تقسیم یک بلوک به دو بلوک ۶۷
- شکل ۸-۴: دسته درزه ۱ در بلوک تکتونیکی II چغارت ۷۱
- شکل ۹-۴: دسته درزه ۲ در بلوک تکتونیکی II چغارت ۷۱
- شکل ۱۰-۴: دسته درزه ۳ در بلوک تکتونیکی II چغارت ۷۲
- شکل ۱۱-۴: مدل هندسی سه بعدی بلوک تکتونیکی II چغارت با سه دسته درزه اصلی در محیط Mathematica ۷۲
- شکل ۱۲-۴: مدل هندسی سه بعدی شبیه‌سازی شده‌ی بلوک تکتونیکی II چغارت در نرم افزار 3DEC ۷۴

فصل پنجم: مدل‌سازی مکانیکی با استفاده از روش گروه‌های کلیدی سه بعدی

- شکل ۱-۵: الگوریتم روش گروه‌های کلیدی سه بعدی ۸۰
- شکل ۲-۵: الگوریتم تعیین بردار نرمال یکه ۸۱
- شکل ۳-۵: الگوریتم یافتن بلوک‌های همسایه یک بلوک ۸۲
- شکل ۴-۵: الگوریتم ترکیب چند بلوک ۸۳
- شکل ۵-۵: الگوریتم یافتن بردار نرمال سطوح بلوک ۸۵
- شکل ۵-۵ (ادامه): الگوریتم یافتن بردار نرمال سطوح بلوک ۸۶
- شکل ۶-۵: الگوریتم یافتن بلوک‌های فعال ۸۷
- شکل ۷-۵: تقسیم‌بندی یک چند ضلعی به تعدادی مثلث ۸۸
- شکل ۸-۵: نحوه محاسبه مساحت مثلث ۸۸
- شکل ۹-۵: الگوریتم محاسبه مساحت یک صفحه از بلوک ۸۹
- شکل ۱۰-۵: تقسیم چندوجهی به چهار وجهی‌ها ۹۰
- شکل ۱۱-۵: نحوه محاسبه حجم چهار وجهی ۹۰
- شکل ۱۲-۵: الگوریتم محاسبه حجم بلوک ۹۱
- شکل ۱۳-۵: الگوریتم تحلیل پایداری یک بلوک ۹۳
- شکل ۱۳-۵ (ادامه): الگوریتم تحلیل پایداری یک بلوک ۹۴
- شکل ۱۴-۵: الگوریتم گروه بندی بلوک‌ها ۹۶
- شکل ۱۵-۵: مدل مکانیکی ایجاد شده در محیط Mathematica ۹۸
- شکل ۱۶-۵: تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال اول توسط 3DKGM ۹۸
- شکل ۱۷-۵: تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال اول توسط 3DEC ۱۰۰

- شکل ۵-۱۸: تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال دوم توسط 3DKGM ۱۰۲
- شکل ۵-۱۹: تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال دوم توسط 3DEC ۱۰۳
- شکل ۵-۱۹ (ادامه): تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال دوم توسط 3DEC ۱۰۴
- شکل ۵-۲۰: مدل مکانیکی ایجاد شده در محیط *Mathematica* ۱۰۴
- شکل ۵-۲۱: تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال سوم توسط 3DKGM ۱۰۶
- شکل ۵-۲۲: تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال سوم توسط 3DEC ۱۰۷
- شکل ۵-۲۳: ناپایدارترین گروه شناخته شده توسط روش 3DKGM برای مدل مکانیکی بلوک II چغارت ۱۰۹
- شکل ۵-۲۴: بردارهای جابجایی ایجاد شده در مقطعی دو بعدی از بلوک II چغارت ۱۰۹
- شکل ۵-۲۵: ناپایداری ایجاد شده در نزدیکی دیواره سمت چپ بلوک II ۱۱۰
- شکل ۵-۲۶: موقعیت مقاطع مورد تحلیل در بلوک II چغارت ۱۱۱
- شکل ۵-۲۷: ناپایدارترین گروه مقطع سمت راست با ضریب اطمینان $1/97$ ۱۱۱
- شکل ۵-۲۸: ناپایدارترین گروه مقطع سمت چپ با ضریب اطمینان $1/03$ ۱۱۱

فهرست جدول‌ها

فصل چهارم: مدل‌سازی هندسی سه بعدی بلوک تکتونیکی II معدن چغارت

- جدول ۴-۱: سطح آگاهی و شناخت ممکن از درزه‌ها ۶۳
- جدول ۴-۲: نتایج تحلیل آماری دسته درزه‌های بلوک دو ۶۶

فصل پنجم: مدل‌سازی مکانیکی با استفاده از روش گروه‌های کلیدی سه بعدی

- جدول ۵-۱: مشخصات هندسی و مکانیکی دسته درزه‌ها برای تهیه مدل مکانیکی در مثال اول ۹۷
- جدول ۵-۲: مشخصات هندسی و مکانیکی دسته درزه‌ها برای تهیه مدل مکانیکی در مثال دوم ۱۰۱
- جدول ۵-۳: مشخصات هندسی و مکانیکی دسته درزه‌ها برای تهیه مدل مکانیکی در مثال سوم ۱۰۵
- جدول ۵-۴: مولفه‌های استفاده شده برای بلوک تکتونیکی II در مدل مکانیکی ۱۰۸
- جدول ۵-۵: دستورات برنامه نویسی بکار رفته در نرم افزار 3DKGM ۱۱۳
- جدول ۵-۶: توابع تهیه شده مورد استفاده در ساخت نرم افزار 3DKGM ۱۱۵

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

نوع خاصی از مسائل پایداری زمانی بوجود می‌آید که ناپیوستگی‌های گسترده در سنگ سخت نزدیک سطح زمین اتفاق می‌افتد. از آنجا که ناپیوستگی‌ها گسترده هستند، برخورد مکرر آنها به یکدیگر، توده سنگ را به بلوک‌هایی با شکل‌ها و اندازه‌های مختلف تقسیم می‌کند. سنگ سالم در هر بلوک، سخت است و بسیار مقاوم‌تر از ناپیوستگی است. بنابراین، تحت اثر میدان تنش پایین نزدیک سطح، تغییر شکل‌ها فقط در ناپیوستگی‌ها رخ می‌دهد و بلوک‌ها به صورت اجسامی صلب بدون تغییر شکل یا شکست حرکت می‌کنند. در چنین شرایطی موثرترین روش برای بررسی پایداری شیروانی، فرض ناپیوسته بودن محیط است که در آن بلوک‌های مجاور در ارتباط با یکدیگر دچار لغزش یا جابجایی می‌شوند.

متداول‌ترین روش تحلیل پایداری شیب، روش تحلیل تعادل حدی است. با توجه به سادگی و سرعت اجرای روش‌های استاتیکی هنوز از این روش‌ها برای تحلیل پایداری استفاده و در زمینه توسعه آنها تحقیقاتی انجام می‌شود. معروف‌ترین روش استاتیکی استفاده شده طی سی سال گذشته روش تحلیل بلوک‌های کلیدی یا تئوری بلوک است. تئوری بلوکی به بررسی جابجایی بلوک‌های سنگی و تحلیل تعادل حدی این بلوک‌ها از سطح حفريات مختلف می‌پردازد. جابجایی یک بلوک، فضایی را بوجود می‌آورد که موجب حرکت بلوک‌های محدود شده دیگر می‌گردد. بدین ترتیب ممکن است گسیختگی

شدیدی بصورت پس رونده اتفاق افتد که گاهی بسیار سریع است. برای تعمیم روش بلوک‌های کلیدی از یک روش گروه‌بندی، بر مبنای تحلیل تمام بلوک‌های همسایه یک بلوک کلیدی استفاده شده است که به جستجوی یک گروه کلیدی ناپایدارتر از بلوک‌های کلیدی مجزا می‌پردازد. این روش بر اساس یک تحلیل پایداری پیش‌رونده اجرا می‌شود که به روش گروه‌های کلیدی (KGM)¹ موسوم است. با وجود همه مزیت‌های این روش باید گفت که این روش یک روش تعادل حدی دو بعدی است که هنوز از آن استفاده می‌شود. به دلیل اینکه نتایج تحلیل دو بعدی معمولاً محافظه‌کارانه است، در پروژه‌های بزرگ، تحلیل سه بعدی امری ضروری است.

هدف اصلی در این تحقیق توسعه سه بعدی روش گروه‌های کلیدی دو بعدی است تا بدین وسیله امکان تحلیل پایداری‌ای نزدیک‌تر به واقعیت ایجاد شود. روش جدید که 3DKGM² نامیده می‌شود، روشی بر مبنای تحلیل تعادل حدی است و برای تحلیل مدل مکانیکی استفاده می‌شود. برای کاربرد عملی این روش، برنامه کامپیوتری آن در محیط Mathematica تهیه شده است.

در روش 3DKGM فرض شده که گروه‌ها صلب هستند و سطوح آنها کاملاً صفحه‌ای است، در صورتی که فرض صلبیت، عدم صحت و خطاها را در یک تحلیل گروه کلیدی افزایش می‌دهد، زیرا یک گروه کلیدی شامل بلوک‌های مجزایی است که احتمال حرکت نسبی بر روی سطوح مشترکشان را دارند. در این تحقیق، برای در نظر گرفتن نیروهای بین بلوکی در یک گروه کلیدی به روش‌های موجود برای تحلیل پایداری سه بعدی شیب‌ها اشاره و در مورد امکان‌پذیری کاربرد این روش‌ها در الگوریتم ارائه شده، بحث و بررسی می‌شود.

برای کاربرد این روش، ابتدا باید بلوک‌ها از لحاظ هندسی کاملاً مشخص و به صورت چند وجهی تعریف شده باشند. برای این منظور با شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها و تطابق آنها با بلوک بزرگ توده، یک مجموعه بلوکی مدل‌سازی شده است تا در نهایت امکان ساخت مدل سازی‌های مکانیکی و تحلیل‌های پایداری فراهم شود.

¹ . Key Group Method

² . 3 Dimensional Key Group Method

در این تحقیق، برای آزمایش کاربرد عملی این روش، بلوک تکتونیکی II چغارت به عنوان مورد مطالعاتی مورد توجه قرار گرفته است که نتایج تحلیل آن توسط روش پیشنهاد شده و نرم افزار 3DEC با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

معدن چغارت قبل از استخراج، تپه مانند بوده و حدود ۱۵۰ متر از سطح زمین مجاور خود بیرون زدگی داشته است. بالاترین تراز این محدوده در تراز ۱۱۵۰ متری و کف آن در تراز ۸۱۲/۵ متر قرار دارد. این معدن تا تراز ۱۱۰۰ متری دارای پله‌های عملیاتی ۱۰ متری و پله‌های نهایی ۳۰ متری بوده و با عمیق شدن معدن به علت نیاز به افزایش تولید، ارتفاع پله‌های عملیاتی به ۱۲،۵ متر و ارتفاع پله‌های نهایی به ۳۷،۵ متر افزایش یافته است. شیب نهایی دیواره با جانمایی پله‌های ایمنی به صورت هر سه پله یک بار به عرض ۱۰ تا ۱۲،۵ متر و جاده‌هایی با عرض ۲۰ متر طراحی شده است. با این وضعیت هندسی، دیواره‌ها با زوایای شیب حدود ۴۲ تا ۵۲ درجه شکل می‌گیرند.

۱-۲- سابقه و ضرورت انجام تحقیق

برای تحلیل پایداری توده سنگ‌های درزه‌دار، روش‌های استاتیکی و دینامیکی مختلفی وجود دارد. با توجه به سادگی و سرعت اجرای روش‌های استاتیکی این روش‌ها هنوز کاربردی بوده و قابل توسعه هستند. مقایسه نتایج بدست آمده از دو روش استاتیکی و دینامیکی بر روی یک سیستم مورد مطالعه در شرایط یکسان بارگذاری، می‌تواند به تعریف وضعیت‌هایی که تحلیل استاتیکی در کارهای عملی دارای دقت کافی باشد، کمک کند.

یکی از معروف‌ترین روش‌های تعادل حدی استاتیکی استفاده شده در سی سال گذشته روش تحلیل بلوک‌های کلیدی یا تئوری بلوکی است. به دلیل اهمیت زیاد و کاربرد گسترده، این موضوع مورد توجه محققین بسیاری بوده است.

هوک و بری^۳ مقالات بسیاری در ارتباط با توسعه این تئوری در بین سال‌های ۱۹۶۵ تا ۱۹۷۳ ارائه کرده‌اند. راه حل‌های ارائه شده یا بطور گرافیکی توسط تصاویر استروگرافی یا بطور تحلیلی توسط

³. Hock & Bray

روش‌های برداری ایجاد شده‌اند [۱]. اکثر مقاله‌ها در ارتباط با بلوک‌های چهار وجهی، یا گوه‌هایی است که یک سطح آزاد دارند و می‌توانند روی یکی از سطوحشان یا روی دو سطح بطور همزمان بلغزند. لوکاس^۴ از دیگر محققین در این زمینه است که بلوک‌های هندسی پیچیده‌تری را در نظر می‌گیرد [۲]. کرون^۵ و همکارانش آنالیز برداری و معیارهای پایداری فرموله شده را با فرض دارا بودن شکل ایده‌آل استاندارد برای چهار وجهی‌ها و پنج وجهی‌هایی که دارای یک سطح آزاد بر اثر تونل‌کاری هستند، بکار بردند [۳]. پرست^۶ روش‌های گرافیکی را بر اساس تصاویر نیمکره غیر خطی ارائه کرد. یک بلوک چهار وجهی با یک سطح آزاد برای توصیف اولیه تئوری‌اش انتخاب کرد و سپس نشان داد که چطور روش‌ها می‌توانند برای دیگر اشکال هندسی توسعه داده شوند [۴]. شیه کن هوآ^۷ پی برد که روش‌های برداری‌ای که قبلاً برای چند وجهی با یک سطح آزاد توسعه داده شده‌اند می‌توانند به شکل-های کلی بیشتری توسعه داده شوند [۵]. با این فرض معقول ساده کننده که همه سطوح بلوک‌ها مستوی هستند، تعداد ناپیوستگی‌ها و سطوح حفاری که ممکن است با یکدیگر در مکانی خاص برخورد کنند بسیار زیاد است و ایجاب می‌کند که بلوک‌ها حتماً چند وجهی در نظر گرفته شوند. بعلاوه، هر تعداد از سطوح بلوک‌ها ممکن است آزاد باشد، زیرا بلوک‌ها ممکن است بطور همزمان در معرض چندین سطح حفاری قرار گیرد (مانند پایه‌های معدنی) و ممکن است سطوحی نیز توسط جدا شدن بلوک‌های مجاور ایجاد شود [۶]. واربرتون^۸ روشی را برای تحلیل پایداری بلوک‌های چند وجهی ارائه کرد که اولاً برای هر بلوکی با هر میزان پیچیدگی قابل کاربرد است و ثانیاً از الگوریتم بسیار مناسبی برای برنامه نویسی کامپیوتری برخوردار است [۶]. به همین دلیل در این تحقیق از روش واربرتون برای تحلیل پایداری برداری بلوک‌ها استفاده شده است. گودمن و شی^۹ نیز روشی را برای

4. Lucas

5. Croney

6. Priest

7. Shih Ken-hua

8. Warburton

9. Goodman & Shi

تحلیل برداری بلوک‌ها ارائه کردند که به دو صورت گرافیکی با استفاده از تصاویر استروگرافیک و تحلیلی با استفاده از روش‌های برداری بیان شده است [۷].

روش تئوری بلوکی تنها بلوک‌های کلیدی را در نظر می‌گیرد اگر هیچ یک از بلوک‌ها ناپایدار نباشد این روش نتیجه می‌گیرد که مجموعه توده سنگ مورد مطالعه پایدار است و ضریب اطمینان بالاتر از ۱ برای هر یک از بلوک‌های تعریف شده بدست خواهد آمد. یاراحمدی و وردل^{۱۰} روشی را پیشنهاد کردند بر این اساس که گاهی می‌توان گروه‌هایی از بلوک‌ها را یافت که اگر به صورت مجموعه واحد در نظر گرفته شوند ناپایدارتر خواهند بود [۸]؛ این روش توسط امامی و همکاران^{۱۱} به منظور تعیین گروه کلیدی بهینه (سطح بحرانی ریزش) بسط و توسعه داده شد [۹].

روش گروه‌های کلیدی یک روش گروه‌بندی بر مبنای تحلیل تمام بلوک‌های همسایه یک بلوک کلیدی است که به جستجوی یک گروه کلیدی ناپایدارتر از بلوک‌های کلیدی مجزا می‌پردازد و بر اساس یک تحلیل پایداری پیشرونده اجرا می‌شود [۱۰]. این روش یک روش تعادل حدی دو بعدی است ولی به دلیل اینکه نتایج تحلیل دو بعدی معمولاً محافظه‌کارانه است، در پروژه‌های بزرگ، تحلیل سه بعدی امری ضروری است. بنابراین مسئله اصلی در این تحقیق، توسعه روش گروه‌های کلیدی از دو بعد به سه بعد است تا امکان تحلیل‌های واقعی‌تر شیب سنگ‌های درزه‌دار به وجود آید.

۳-۱- هدف از انجام پایان نامه

متداول‌ترین روش تحلیل پایداری شیب، روش تحلیل تعادل حدی است. معروف‌ترین روش استاتیکی مورد استفاده، روش تحلیل بلوک‌های کلیدی یا تئوری بلوک است. برای تعمیم روش بلوک‌های کلیدی از یک روش گروه‌بندی استفاده شده که به جستجوی یک گروه کلیدی ناپایدارتر از بلوک‌های کلیدی مجزا می‌پردازد و به روش گروه‌های کلیدی (KGM)^{۱۲} موسوم است. با وجود همه مزیت‌های این روش باید گفت که این روش یک روش تعادل حدی دو بعدی است.

¹⁰. Yarahmadi & Verdel

¹¹. Emami & et. al.

¹². Key Group Method

هدف اصلی در این تحقیق، توسعه روش گروه‌های کلیدی در سه بعد می‌باشد تا امکان تحلیل‌های واقعی‌تر شیب سنگ‌های درزه‌دار بوجود آید. از این روش برای تحلیل پایداری شیب دیواره سنگی واقع در بلوک تکتونیکی شماره دو معدن چغارت استفاده می‌شود. مدل سه بعدی بدست آمده جهت تحلیل شیب سنگ‌های درزه‌دار در سد سازی‌ها، دیواره‌های مشرف به جاده‌ها و دیواره نهایی معادن سطحی کاربرد دارد و توسعه آن امکان استفاده در فضاهای زیرزمینی را بوجود می‌آورد.

۱-۴- سازمان‌دهی پایان‌نامه

این پایان‌نامه در ۶ فصل تدوین شده است. در فصل اول به کلیات مربوط به پایداری شیب و روش بلوک‌ها و گروه‌های کلیدی ضرورت توسعه سه بعدی آن پرداخته شده است.

در فصل دوم به تئوری بلوکی و روش گروه‌های کلیدی و مفاهیم مرتبط با آن اشاره شده و به طور مختصر مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

در فصل سوم به مبانی تئوری مورد استفاده در روش جدید گروه‌های کلیدی سه بعدی پرداخته شده است.

در فصل چهارم نحوه مدل‌سازی هندسی سه بعدی شیروانی به روش قطعی با استفاده از بلوک تکتونیکی ۲ معدن چغارت توضیح داده شده است.

در فصل پنجم روش گروه‌های کلیدی سه بعدی، الگوریتم‌های مورد استفاده در آن، اعتبارسنجی روش، کاربرد عملی آن برای تحلیل پایداری بلوک تکتونیکی ۲ معدن چغارت و مشخصات نرم افزار تولید شده بیان شده است.

در فصل ششم به نتیجه‌گیری و پیشنهادات پرداخته شده است.

فصل دوم

مروری بر روش گروه های کلیدی

و

مفاهیم مرتبط با آن

۲-۱- تئوری بلوکی

برای تحلیل پایداری توده سنگ‌های درزه‌دار، روش‌های استاتیکی و دینامیکی مختلفی وجود دارد. با توجه به سادگی و سرعت اجرای روش‌های استاتیکی این روش‌ها هنوز کاربردی بوده و قابل توسعه هستند. یکی از معروف‌ترین روش‌های تعادل حدی استاتیکی استفاده شده در سی سال گذشته روش تحلیل بلوک‌های کلیدی یا تئوری بلوکی است.

۲-۱-۱- کلیات

تئوری بلوکی به بررسی جابجایی بلوک‌های سنگی و تحلیل تعادل حدی این بلوک‌ها از سطح حفریات مختلف می‌پردازد. جابجایی یک بلوک، فضایی را به وجود می‌آورد که موجب حرکت بلوک‌های محدود شده دیگر می‌شود. بدین ترتیب ممکن است گسیختگی شدیدی بصورت پس رونده اتفاق افتد که گاهی بسیار سریع است. این دسته از بلوک‌ها، **بلوک‌های کلیدی**^{۱۳} نامیده می‌شوند [۷] که با چهار شرط زیر تعریف می‌گردند:

الف- دارای تماس با سطح آزاد یا سطح استخراجی باشند (فعال باشند).

ب- تعریف شده یا محدود باشند؛ یعنی توسط ناپیوستگی‌ها و سطح آزاد محدود شده و از توده جدا شده باشند.

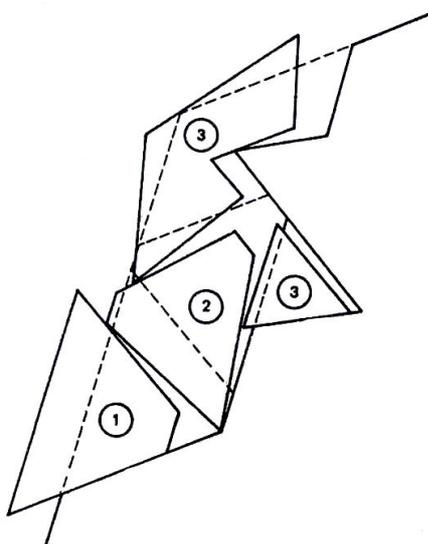
ج- از نظر هندسی امکان جابجایی در آنها وجود داشته باشد.

د- حرکت سایر بلوک‌ها به حرکت بلوک مورد نظر وابسته باشد، به عبارت دیگر، کلیدی برای حرکت بلوک‌های دیگر باشند.

ناپایداری شیب سنگی شکل ۲-۱ ناشی از جابجایی‌های همزمان چهار بلوک مختلف است که هر یک از طریق مکانیزم‌های خاصی صورت می‌گیرد. در این حالت احتمال دارد که با جلوگیری از حرکت بلوک ۱، تمام جابجایی‌ها متوقف گردد. ناپایداری‌های پیچیده‌ای نظیر این حالت را می‌توان با نگهداری

¹³ . Key blocks

یک بلوک کلیدی کنترل کرد. فرض بر این است که دسته‌ای از بلوک‌های کلیدی وجود داشته باشد به نحوی که با جلوگیری از حرکت آنها، دیگر نیازی به بررسی حالت‌های ناپایداری پیچیده ناشی از حرکت بلوک‌های کلیدی نباشد. عدم امکان جلوگیری از برخی از ناپایداری‌ها توسط روش ساده بلوک کلیدی را نمی‌توان تکذیب کرد. حالت‌هایی از گسیختگی‌ها که شرط گسیختگی در آنها تشکیل شکستگی‌های جدید در سنگ بکر است از جمله این موارد بوده و نمی‌توان آنها را توسط روش بلوک کلیدی تحلیل نمود [۷].



شکل ۱-۲: ناپایداری شیب سنگی ناشی از جابجایی بلوک‌ها [۷]

تئوری بلوکی جایگزینی برای روش تعادل حدی نیست، بلکه پیش شرط آن به شمار می‌رود و با استفاده از آن می‌توان بلوک‌های مورد نظر را برای تحلیل‌های بعدی شناسایی نمود. همچنین با استفاده از تئوری بلوک می‌توان ابعاد، مساحت وجوه، حجم بلوک‌ها و سایر پارامترهای مورد نیاز را تعیین نمود.

در خصوص ترانسه‌های سطحی، معدنکاری سطحی و فضاهای زیرزمینی با پایداری دائمی، تئوری بلوکی امکان طراحی شکل، اندازه، جهت یافتگی و در صورت لزوم سیستم نگهداری را به نحوی فراهم می‌سازد که هزینه پایدارسازی آنها کمترین مقدار ممکن باشد.

۲-۱-۲- فرضیات تئوری بلوکی

برای کاربرد روش تئوری بلوکی محدودیت‌هایی وجود دارد که ناشی از فرض‌هایی است که بر تئوری حاکم است که عمدتاً شامل هندسه بلوک و مدل مورد بررسی است. فرض‌هایی که در این روش از آنها استفاده می‌شود به شرح زیر می‌باشند [۷]:

الف) فرض می‌شود که سطح تمام درزه‌ها مسطح^{۱۴} باشد. این فرض برای بسیاری از درزه‌ها و گسل‌ها همراه با واقعیت است اما برای سطوح لایه‌بندی نظیر آنچه در یال چین‌ها اتفاق می‌افتد، کاملاً اشتباه است. فرض مسطح بودن درزه‌ها به تشریح شکل بلوک‌ها با استفاده از معادلات برداری خطی کمک می‌نماید. از طرف دیگر تعمیم تئوری برای صفحات منحنی شکل، نیز آسان است.

ب) فرض می‌شود که سطوح درزه‌ها در تمام حجم مورد بررسی (بلوک کلیدی)، بطور کامل گسترش یافته باشند. این بدان معنا است که هیچ یک از ناپیوستگی‌ها به ناحیه داخل بلوک کلیدی محدود نمی‌شود. بدین ترتیب تمام بلوک‌ها بطور کامل توسط سطوح درزه موجود مشخص شده و ایجاد هیچ گونه ترک جدیدی در جابجایی بلوک‌ها مورد بررسی قرار نخواهد گرفت.

ج) فرض می‌شود که بلوک‌های حاصل از تقاطع درزه‌ها، صلب^{۱۵} باشند. در این صورت تغییر شکلی در بلوک بوجود نیامده و شکل اولیه آن تغییر نخواهد کرد. فرمول‌بندی مسئله بلوک کلیدی، بطور کامل توسط شکل هندسی و توپولوژی آن صورت می‌گیرد. در مرحله بعد که مرحله بررسی پایداری بلوک-های کلیدی با استفاده از تئوری بلوکی است، باید پارامترهای مقاومتی ناپیوستگی‌ها معلوم باشد. در حالت واقعی، مقاومت اصطکاکی سطوح بلوک‌های کلیدی موجب تغییر شکل سطوح مزبور می‌شود.

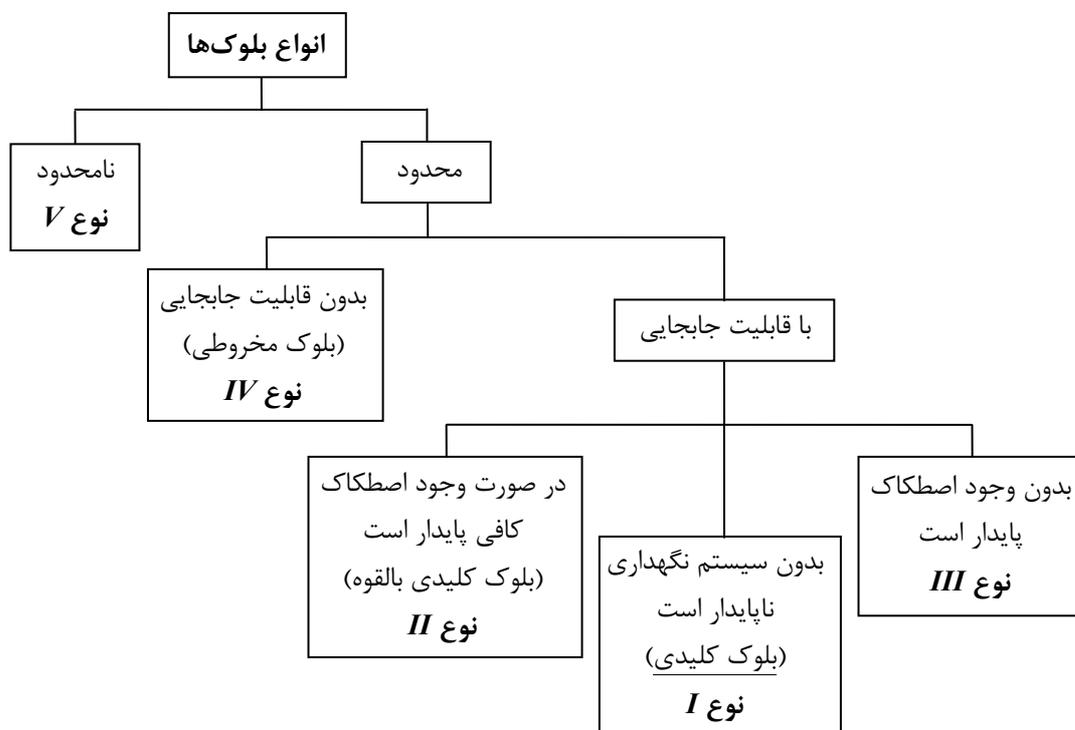
د) سطوح ناپیوستگی‌ها و سطح آزاد، پارامترهای ورودی مسئله بوده و باید قبلاً تعیین شده باشند. بطور خلاصه، تئوری بلوک بر اساس اطلاعات هندسی بدست آمده از زمین‌شناسی ساختمانی و نیز بر اساس بررسی وضعیت تعادل (با استفاده از روابط استاتیکی ساده)، بیان خواهد شد.

¹⁴ . Planar

¹⁵ . Rigid

۲-۱-۳- انواع بلوک‌ها

یک بلوک از فضای مشترک حاصل از تقاطع دسته خاصی از n نیم فضا، بوجود می‌آید. اگر فقط جهت‌یافتگی این نیم فضاها مورد توجه قرار گیرد، در این صورت 2^n فضای محصور و منحصر به فرد از تقاطع آنها ایجاد می‌شود. همه این تقاطع‌ها، بلوک‌های بحرانی بالقوه^{۱۶} بوجود نمی‌آورند. طبق تعریف، بلوک کلیدی، محدود^{۱۷} بوده و ضمن قابلیت جابجایی، بالقوه ناپایدار است. این اصطلاحات، برای تفکیک پنج نوع بلوک مختلف در شکل ۲-۲ ارائه شده است.



شکل ۲-۲: تقسیم بندی انواع بلوک‌ها [۷]

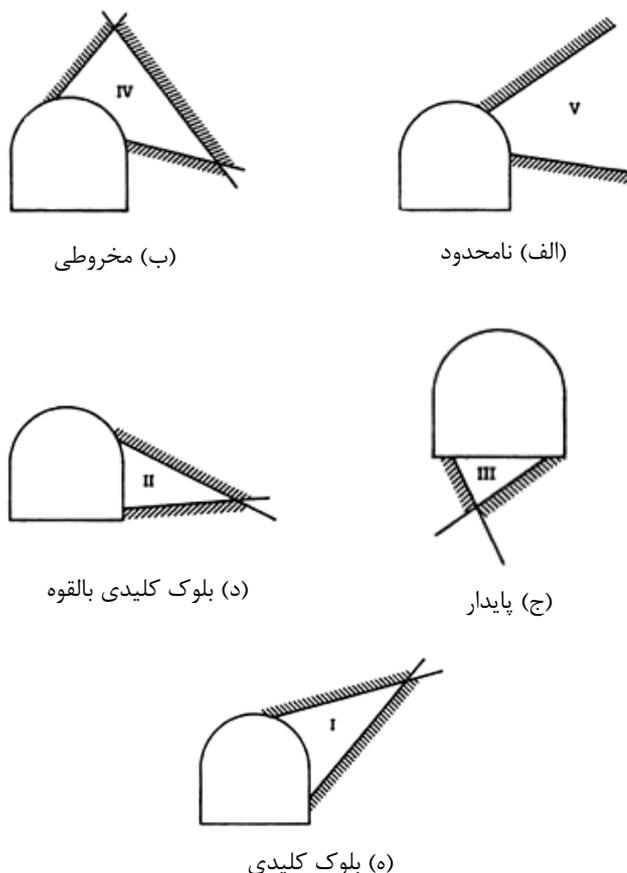
انواع بلوک‌ها به صورت گرافیکی در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. بلوک نامحدود^{۱۸} (نوع V) در شکل ۲-۳-الف) تا زمانی که درون آن ترکی ایجاد نشود، هیچ خطری برای فضای استخراجی ندارد. بلوک‌های محدود، به دو زیرمجموعه فاقد قابلیت جابجایی و با قابلیت جابجایی تقسیم می‌شوند. بلوک نامحدودی که در آن ترکی وجود ندارد، نمی‌تواند از توده سنگ جدا شود. این در حالی است که یک

¹⁶ . Potentially critical blocks

¹⁷ . Finite

¹⁸ . Infinite

بلوک محدود نیز ممکن است به خاطر شکل مخروطی^{۱۹} خود (نوع IV در شکل ۲-۳-ب)، فاقد قابلیت جابجایی باشد. بلوک‌های مخروطی قابلیت جابجایی ندارند، مگر آنکه یکی از بلوک‌های مجاور آنها جابجا شود. بلوک‌های محدود غیر مخروطی دارای قابلیت جابجایی هستند. اما همه آنها برای پایداری فضای استخراجی که تحت تأثیر شرایط بارگذاری معین قرار دارد، بحرانی نیستند.



شکل ۲-۳: انواع بلوک‌ها [۷]

بلوک‌های با قابلیت جابجایی به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف) 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 (شکل ۲-۳-ج). هر چند امکان بلند کردن این بلوک از جای خود وجود دارد، اما در صورتیکه تنها تحت تأثیر نیروی جاذبه قرار گیرد، دچار ریزش نشده و حرکت مجازی آن به سمت دور شدن از فضای استخراج شده خواهد بود.

¹⁹ . Tapered shape

ب) بلوک نوع II، که بالقوه ناپایدار است و تمایل به حرکت به سمت فضای استخراج شده دارد. اما تا زمانی که مقاومت اصطکاکی روی سطح لغزش بالقوه آن به میزان زیادی کاهش نیابد و یا آنکه بارهایی غیر از وزن بلوک به آن اعمال نگردد، پایدار خواهد بود. این نوع بلوک را بلوک کلیدی بالقوه می‌نامند (شکل ۲-۳-د).

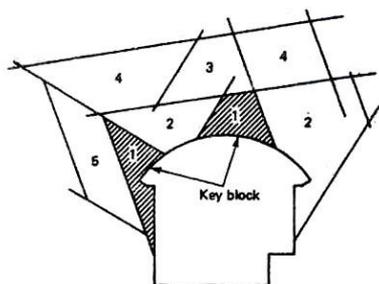
ج) بلوک نوع I که یک بلوک کلیدی است و نه تنها قابلیت جابجایی دارد، بلکه به شکل خطرناکی قرار گرفته و در صورت عدم کنترل آن، تمایل به حرکت به سمت فضای استخراج شده دارد (شکل ۲-۳-ه). این نوع بلوک باید قبل از آنکه حفر فضای استخراجی منجر به جدا شدن کامل آن گردد، توسط سیستم نگهداری مهار شود.

۲-۱-۴- بلوک کلیدی

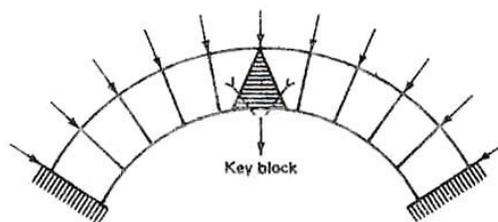
همانطور که ذکر شد هدف تئوری بلوکی، یافتن و توصیف بلوک‌های بحرانی در اطراف حفريات سنگی است. تقاطع دسته درزه‌های متعدد در توده‌سنگ، بلوک‌هایی با شکل و اندازه متفاوت به وجود می‌آورد. با ایجاد سازه سنگی مورد نظر، سطوح آن به مجموعه ناپیوستگی‌ها اضافه شده و بلوک‌های جدید زیادی تشکیل می‌گردد. بسیاری از این بلوک‌ها بخاطر شکل، اندازه یا جهت‌یافتگی خود و نیز کنترل آنها توسط سیستم‌های نگهداری، نمی‌توانند به داخل فضای آزاد حفر شده حرکت نمایند. با این حال تعدادی از بلوک‌ها بلافاصله پس از حفر جابجا شده و موجبات آزاد شدن سایر بلوک‌ها را فراهم می‌آورند.

در شکل ۲-۴-الف یک طاق سنگی نشان داده شده است. در این شکل، بلوک میانی که شکل آن متفاوت از سایر بلوک‌ها است، توسط میل‌مهار نگهداری شده است. تا زمانی که بلوک مزبور در جای خود باقی بماند، طاق پایدار خواهد بود. شکل ۲-۴-ب بلوک‌های کلیدی در اطراف یک فضای زیرزمینی را نشان می‌دهد. سست شدن دو بلوک هاشور خورده شماره ۱، ابتدا منجر به جابجایی بلوک‌های شماره ۲، سپس شماره ۳ و به همین ترتیب سایر بلوک‌ها می‌شود تا آنجا که سازه تخریب

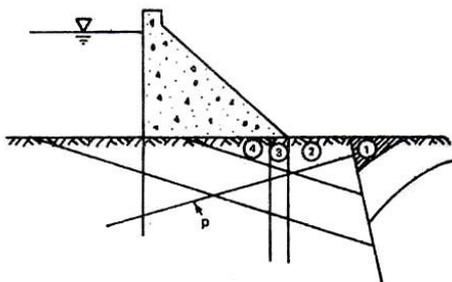
می‌گردد. پایداری شیب‌های سنگی در حفريات سطحی نیز بستگی به بلوک‌هایی دارد که در وضعیت بحرانی قرار دارند (شکل ۲-۴-ج). در شکل ۲-۴-ج، پس از ریزش بلوک ۱، تعیین ترتیب ریزش سایر بلوک‌ها، بدون استفاده از مدل‌سازی عددی و دینامیکی بطور دقیق امکان‌پذیر نیست. اما مشخص است که کنترل بلوک ۱ منجر به جلوگیری از جابجایی تمام بلوک‌های با شماره بزرگتر از ۱ خواهد شد. شکل ۲-۴-د نشان دهنده بلوک‌های کلیدی در قسمت پی یک سد است. صفحه P واقع در زیر سد می‌تواند به عنوان یک سطح لغزش به شمار آید و باید در محاسبات تعادل سد، مورد توجه قرار گیرد اما تا زمانی که بلوک ۱ جابجا نشود، سنگ واقع در روی این صفحه نیز جابجا نخواهد شد. حتی با حرکت بلوک ۱ نیز جرم سنگین پی واقع در بالای صفحه P ، تنها با حرکت رو به بالای سد می‌تواند جابجا شود، اما در صورتی که بلوک‌های ۱، ۲، ۳ و... بطور جداگانه جابجا شده یا دچار چرخش شوند، پی سد تخریب خواهد شد.



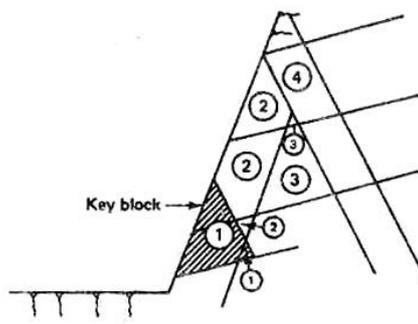
(ب) مغار زیرزمینی



(الف) قوس



(د) پی سد



(ج) ترانشه سطحی

شکل ۲-۴: نمونه‌هایی از بلوک‌های کلیدی [۷]

۲-۲- روش گروه‌های کلیدی

۲-۲-۱- کلیات

دو مشکل اساسی در استفاده از روش بلوک‌های کلیدی وجود دارد:

نخست اینکه در این روش تنها بلوک‌های کلیدی در نظر گرفته می‌شود. بنابراین اگر هیچ یک از بلوک‌ها ناپایدار نباشد، نتیجه می‌شود که مجموعه توده سنگ مورد مطالعه پایدار است و ضریب اطمینان بالاتر از یک، برای هر یک از بلوک‌های تعریف شده بدست خواهد آمد، اما در واقع می‌توان گروه‌هایی از بلوک‌ها را یافت که اگر به صورت مجموعه‌ای واحد در نظر گرفته شوند، ناپایدار خواهند بود [۱۰].

دوم اینکه تئوری بلوک‌های کلیدی بر اساس کاربرد اصول سینماتیکی و استاتیکی بنا نهاده شده است. وقتی تنش‌های برجا علاوه بر وزن بلوک به حساب آورده شوند سیستم نیروهای موثر بر پایداری بلوک بطور استاتیکی نامعین خواهد شد. در تئوری استاندارد بلوک‌های کلیدی، بلوک‌ها به صورت مجموعه-های صلب تنها متأثر از وزن خالص آنها و یا دیگر نیروهای استاتیکی موثر بر آنها منظور می‌شوند و تنش‌های برجا به حساب نمی‌آیند [۱۱].

از طرفی در بین روش‌های استاتیکی روش دقیق و صحیحی که بتواند تنش‌های برجا را به حساب آورد، وجود ندارد (مشکل دوم تحلیل‌های استاتیکی) ولی با توجه به اینکه در تحلیل‌های پایداری شیب، تنش‌های برجا در منطقه مورد مطالعه (نزدیک به سطح استخراج) بسیار ضعیف هستند لذا در اکثر موارد می‌توان از آنها صرف نظر نمود.

تعدادی از محققان سعی کرده‌اند که روش بلوک‌های کلیدی را برای پاسخ به مشکل اول مطرح شده در بالا تصحیح کنند، به عنوان مثال می‌توان به روش ویوو^{۲۰}، اشاره نمود که جستجوی بلوک‌های کلیدی مرتبه دوم را در یک تحلیل بلوک‌های کلیدی بر اساس روش گودمن-شی مورد مطالعه قرار داده است [۱۲].

²⁰. Wibowo

روش دیگری که برای تعمیم روش بلوک‌های کلیدی پیشنهاد شده، بر اساس یک شیوه گروه‌بندی بر مبنای تحلیل تمام بلوک‌های همسایه یک بلوک کلیدی بنا شده است که به جستجوی یک گروه کلیدی ناپایدارتر از بلوک‌های کلیدی مجزا می‌پردازد. این روش بر اساس یک تحلیل پایداری پیش‌رونده اجرا می‌شود، که به روش گروه‌های کلیدی (KGM) موسوم است [۸].

در این روش فرض می‌شود که بلوک‌ها صلب هستند و سطوح آنها کاملاً صفحه‌ای است بنابراین جابجایی‌ها تنها حاصل از حرکت بلوک‌های سنگی بر روی سطوح ناپیوستگی می‌باشد.

۲-۲-۲- مبانی روش گروه‌های کلیدی

همانگونه که اشاره شد تحلیل پایداری توده سنگ درزه‌دار منجر به بررسی گروه‌هایی از بلوک‌ها و نه فقط یک بلوک منفرد خواهد شد. به این صورت که اگر بلوک‌ها با یکدیگر در نظر گرفته شوند می‌توانند یک گروه کلیدی را به وجود آورند که به صورت بالقوه خطرناک‌تر از یک بلوک کلیدی تنها است. اما سوال اصلی این است که چگونه می‌توان گروه‌های کلیدی را مشخص نمود؟

یک شیوه ابتدایی، شامل بررسی همه گروه‌های ممکن دو بلوکی یا بیشتر است. ولی در این روش تعداد ترکیبات به سرعت افزایش خواهد یافت. روش دیگر شامل تعیین شرط‌های مورد نیاز برای تشکیل یک گروه کلیدی و سپس انتخاب و تحلیل گروه کلیدی نامزد بر مبنای این شرایط است.

یک گروه کلیدی باید خاصیت کلیدی داشته باشد (به عبارت دیگر فعال، محدود و از نظر هندسی قابل حرکت باشد). یک گروه کلیدی حداقل یک بلوک کلیدی اولیه را در بردارد، بنابراین در موقع جستجوی گروه‌های کلیدی، این موضوع به عنوان شرط اولیه محسوب می‌شود. دومین شرط، بیان می‌کند که هنگامی که یک بلوک کلیدی واحد اولیه (بلوکی که محدود بوده و ضمن قابلیت جابجایی، بالقوه ناپایدار باشد) انتخاب شده است، بلوک نامزد واقع در همسایگی آن برای گروه شدن باید بلوکی باشد که با حذف بلوک کلیدی، خود به یک بلوک کلیدی تبدیل شود [۱۰]. اگر چنین

نباشد، بلوک نامزد در بردارنده یک سطح غیر آزاد است که نه تنها حرکت خود بلوک را خنثی می‌کند بلکه از حرکت کل گروه جلوگیری می‌نماید.

بنابراین می‌توان فرآیندی را برای انجام یک روش ترکیب کردن بر مبنای موارد زیر وضع نمود:

۱- شناسایی بلوک‌های کلیدی.

۲- حذف بلوک‌های انفرادی ناپایدار ($SF < 1$) و ادامه آن تا آخرین بلوک با استفاده از روش بلوک-

های کلیدی

۳- تعیین همسایگان بلوک‌های کلیدی پایدار و یا بلوک‌های دارای سطوح مشترک که با حذف بلوک‌های کلیدی بطور هندسی ریزشی شوند.

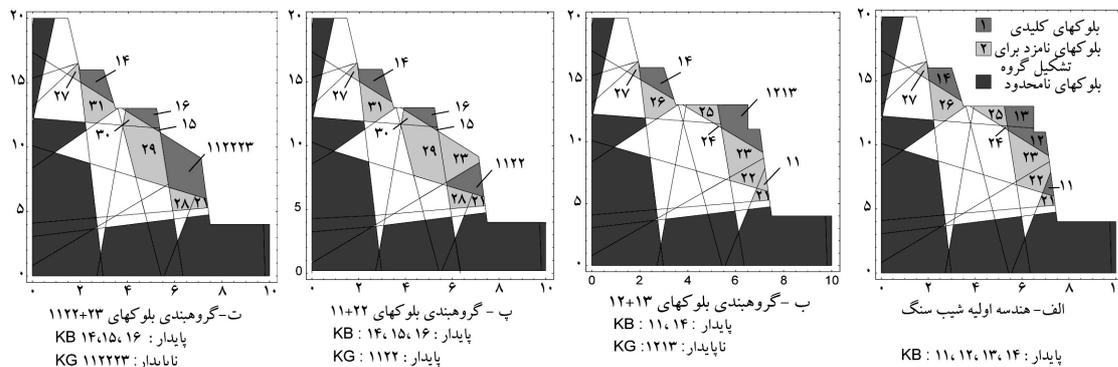
۴- تشکیل گروه‌های ممکن متشکل از بلوک‌های کلیدی و همسایه‌های آنها.

۵- تحلیل پایداری گروه‌ها و حذف گروه‌های ناپایدار ($SF < 1$) یا ترکیب گروهی با کمترین پایداری (SF_{min}) در بین گروه‌های تشکیل شده.

۶- تکرار مجدد تحلیل بر اساس هندسه و توپوگرافی جدید بلوک‌ها.

برای مثال در شکل ۲-۵ بطور شماتیک چهار مرحله از روش گروه‌بندی انجام شده بر روی یک شیب سنگ درزه‌دار فرضی نشان داده شده است. در مرحله ابتدایی (شکل ۲-۵-الف)، چهار بلوک کلیدی شناسایی و مشخص شده است. اگر از روش بلوک‌های کلیدی برای تحلیل استفاده شود، هیچ یک از بلوک‌ها ناپایدار نبوده و تحلیل در این مرحله پایان می‌یابد. اما در صورت استفاده از روش KGM پنج نامزد گروه کلیدی (۱۱+۲۲، ۱۲+۱۳، ۱۲+۲۴، ۱۲+۲۵، ۱۳+۲۵، ۱۴+۲۷) را می‌توان شناسایی نمود. بنا به فرض، در این مرحله تنها گروه کلیدی حاصل از بلوک‌های کلیدی ۱۲ و ۱۳ ناپایدار خواهد بود، بنابراین در مرحله بعد این گروه حذف خواهد شد. سپس بلوک‌های شماره ۱۱ و ۲۲ با یکدیگر ترکیب شده و گروه کلیدی ۱۱۲۲ را بوجود می‌آورد که فرض شده کمترین ضریب ایمنی را دارد (اما ناپایدار ($SF < 1$) نیست) (شکل ۲-۵-ب). در مرحله چهارم سه موقعیت گروه‌بندی با گروه ۱۱۲۲ وجود دارد (۱۱۲۲+۲۳، ۱۱۲۲+۲۸، ۱۱۲۲+۲۱) که تنها گروه ۱۱۲۲+۲۳، گروه کلیدی است. در این مرحله سه

گروه کلیدی دیگر نیز قابل تشکیل است (۱۶+۱۵، ۳۰+۱۶ و ۲۷+۱۴)، مطالعه بر روی کلیه گروه‌ها منجر به شناسایی گروه حاصل از بلوک‌های ۱۱۲۲ و ۲۳ به عنوان ناپایدارترین گروه می‌شود (شکل ۲-۵-ت).



شکل ۲-۵: مثالی از روش گروه کلیدی انجام شده بر روی یک شیب سنگ درزه‌دار

همانگونه که مشخص شد، استفاده از روش KGM به جای روش KBM منجر به در نظر گرفتن تعداد بیشتری از بلوک‌ها در تحلیل پایداری خواهد شد؛ و روش KGM حجم بزرگتری از بلوک‌های ناپایدار را نسبت به روش KBM معرفی خواهد کرد.

علیرغم توانایی‌های خوب روش گروه‌های کلیدی، مشکلاتی نیز در آن وجود دارد که در موارد مطالعاتی مختلف خود را نشان می‌دهد. یکی از مشکلات اساسی موجود در روش گروه‌های کلیدی تعیین سطح بحرانی ریزش است. این مشکل در موارد زیر بوجود خواهد آمد:

- امکان از دست دادن سطوح بحرانی با حذف گروه‌های ناپایدار بصورت مرحله‌ای.
- شروع از یک بلوک کلیدی خاص و پیشروی در مسیریایی که به گروه بهینه (سطح بحرانی) ختم نمی‌شود.

۲-۲-۳- روش گروه‌های کلیدی جهت‌دار

در کلیه روش‌های تحلیل استاتیکی بخصوص در حرکات لغزشی توده‌های سنگی، یافتن سطح ریزش از جمله مهمترین مسائل در تحلیل پایداری محسوب می‌شود، بطوریکه با تعیین نیروهای محرک و

مقاوم موجود بر روی سطح مزبور امکان یافتن ضریب اطمینان و تحلیل پایداری میسر می‌گردد. همانگونه که قبلاً اشاره شد مسئله مهم در روش گروه‌های کلیدی، چگونگی تعیین گروه کلیدی بهینه (سطح بحرانی ریزش) است. راه حل مناسب برای غلبه بر مشکلات روش گروه‌های کلیدی، یافتن تمام گروه‌های ریزشی قابل تشکیل و سپس تحلیل پایداری آنهاست تا ریزشی‌ترین گروه تعیین شود و از آن پس با حذف گروه بحرانی، الگوریتم بصورت پیشرونده اجرا شود. اما مسئله اساسی چگونگی یافتن تمامی گروه‌های قابل تشکیل ریزشی است.

امامی و همکاران روشی برای حل این مشکل پیشنهاد کرده که گروه‌های کلیدی جهت‌دار نامیده شده و بر مبنای حرکت در مسیر سطوح لغزش مختلف حاصل از یک گروه قابل حرکت بنا شده است [۱۳]. در این روش از بوجود آمدن گروه‌های غیر کلیدی جلوگیری شده است، در نتیجه بدون از دست دادن گروه‌های قابل ریزش حجم محاسبات به میزان زیادی کاهش می‌یابد. این روش نیز مانند روش گروه‌های کلیدی، بصورت مرحله‌ای و با شروع از بلوک کلیدی انجام می‌شود. تفاوت عمده در این روش، یافتن سطح یا سطوحی است که گروه ریزشی بر روی آنها می‌لغزد، با مشخص شدن این سطوح قبل از یافتن همسایگی‌های مرتبه اول گروه مورد نظر (بلوک‌های متصل به گروه) و حذف آنها از سطوحی که همسایگی‌های مرتبه اول آنها باید یافت شود، تعداد زیادی از ترکیبات غیرریزشی و مسیرهایی که منجر به این ترکیبات می‌شود حذف خواهد شد. به این معنی که با تعیین سطح یا سطوح لغزش در هر گروه در هر مرحله، سطوح غیر لغزشی مشخص شده و بلوک‌های متصل به این سطوح تعیین می‌شود.

چون این الگوریتم بصورت مرحله‌ای پیش می‌رود، امکان از دست دادن گروه یا گروه‌های ریزشی قابل تشکیل وجود ندارد، در هر مرحله تمامی گروه‌های قابل حرکت با تغییراتی که ممکن است در زاویه سطح یا سطوح لغزشی بر اثر گروه‌بندی جدید بوجود آید، لحاظ می‌شود.

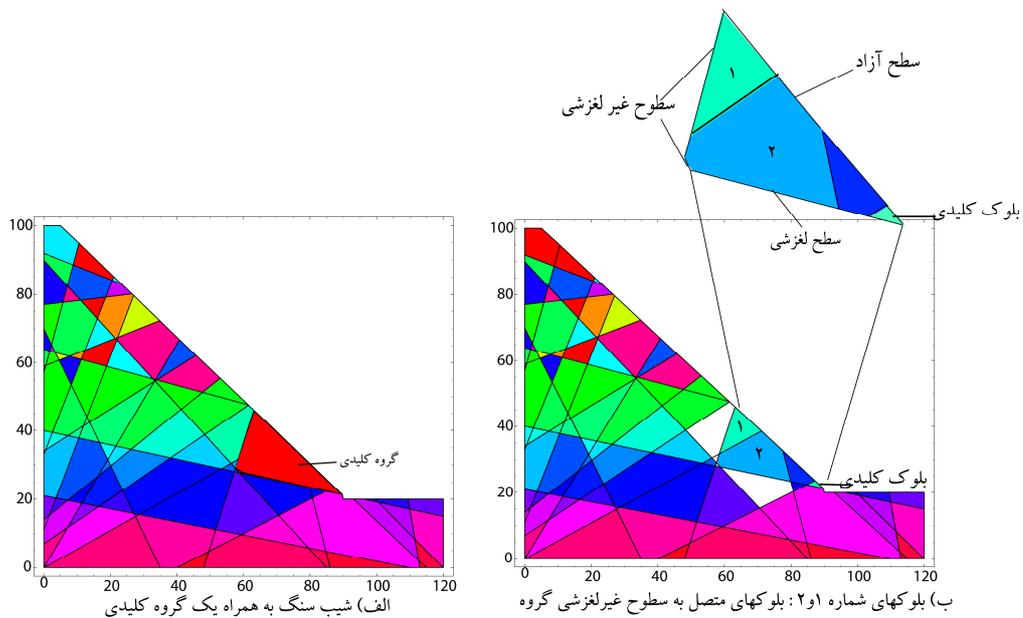
باید توجه داشت که گرچه در این روش گروه تشکیل شده در مرحله اول دارای سطح لغزش خاصی است ولی به این معنی نیست که گروه‌بندی تا مرحله آخر ملزم به رفتن در این مسیر و یا به عبارت

دیگر یافتن گروه‌های ریزشی تنها با همین سطح لغزش خاص است، بلکه گروه‌بندی در مراحل بعد (با پیشروی) امکان تشکیل روی سطوح لغزش مختلف با شیب‌های متفاوت (بسته به نوع درزه‌های موجود) را داراست و در واقع تمامی گروه‌های ریزشی موجود در تمامی سطوح مختلف را شامل خواهد شد [۱۳].

الگوریتم اجرای این روش به صورت زیر است [۱۳]:

- ۱- تعیین بلوک‌های کلیدی.
 - ۲- تعیین سطوح غیر لغزشی و غیر آزاد
 - ۳- یافتن همسایگی‌های مرتبه اول (بلوک‌های متصل به) سطوح غیر لغزشی.
 - ۴- تشکیل تمامی زیرمجموعه‌های حاصل از مجموعه بلوک‌های همسایه مرتبه اول.
 - ۵- اضافه کردن زیرمجموعه‌های مرحله قبل به بلوک یا گروه اولیه و تشکیل گروه‌های جدید.
 - ۶- انجام آزمایش قابلیت حرکت (لغزشی و واژگونی) بر روی گروه‌ها و تعیین گروه‌های قابل حرکت.
 - ۷- تکرار مراحل ۲ تا ۶ برای هر یک از گروه‌های قابل حرکت جدید تا جاییکه گروهی با قابلیت حرکت تشکیل نشود.
 - ۸- تحلیل پایداری کلیه گروه‌های بدست آمده و حذف گروه ناپایدار ($SF < 1$) یا گروهی با کمترین پایداری (SF_{min}) در بین گروه‌های تشکیل شده.
 - ۹- به روز کردن هندسه شیب سنگ، تعیین سطح آزاد جدید و رفتن به مرحله یک (۱).
- شکل ۲-۶ شیب سنگی فرضی به همراه یک گروه کلیدی واقع بر آن را نشان می‌دهد. در شکل ۲-۶-الف این گروه بصورت گسترده نشان داده شده است، که از یک بلوک کلیدی آغاز شده است و حاصل ترکیب چهار بلوک است. بلوک‌هایی که با شماره های ۱ و ۲ مشخص شده‌اند، بلوک‌هایی هستند که به سطوح غیرلغزشی گروه کلیدی متصل هستند و بلوک‌های سفید رنگ همسایه‌های مرتبه اول متصل به این بلوک‌ها هستند. به عنوان نمونه در شکل ۲-۶-ب سه بلوک در همسایگی مرتبه اول گروه مورد نظر وجود دارد (بلوک‌های سفید رنگ) که در مرحله بعد تمام زیرمجموعه‌های حاصل از

این سه بلوک تعیین می‌شود و به گروه قبل اضافه می‌شود، حال با انجام آزمایش قابلیت حرکت گروه-های جدید قابل حرکت مشخص می‌شود و تمامی این مراحل برای هر یک از گروه‌های قابل حرکت جدید تکرار می‌شود.



شکل ۲-۶: یک شیب سنگ فرضی به همراه یک گروه کلیدی نشان داده شده [۱۳]

فصل سوم

مبانی تئوری

مورد استفاده در الگوریتم گروه‌های کلیدی سه بعدی

۳-۱- کلیات

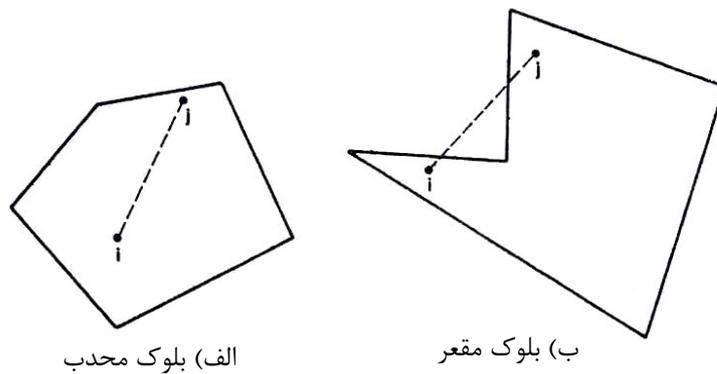
در فصل اول در تعریف بلوک کلیدی بیان شد که بلوک کلیدی محدود است و ضمن دارا بودن قابلیت جابجایی، بالقوه ناپایدار است. بنابراین در تشخیص بلوک کلیدی ابتدا باید محدودیت بلوک مورد بررسی قرار گیرد، سپس قابلیت جابجایی بلوک کنترل شود. در صورت دارا بودن دو شرط اول و دوم، تأثیر اصطکاک بر پایداری بلوک بررسی می‌شود. در این فصل ابتدا مفهوم محدود بودن بلوک با تئوری محدودیت بیان و سپس مفهوم قابلیت جابجایی بلوک‌ها بطور گرافیکی توضیح داده می‌شود. از بین روش‌های تحلیل پایداری سه بعدی بلوک‌ها، روش برداری که قابلیت برنامه نویسی کامپیوتری را دارد، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد که در آن چگونگی تشخیص قابلیت جابجایی یک بلوک و امکان لغزش آن با در نظر گرفتن اصطکاک به شیوه برداری مشخص می‌شود.

در روش بلوک کلیدی از تحلیل تعادل حدی استفاده شده است. در این روش فرض شده که بلوک‌ها صلب هستند و سطوح آنها کاملاً صفحه‌ای است، در صورتی که فرض صلبیت، عدم صحت و خطاها را در یک تحلیل گروه کلیدی افزایش می‌دهد، زیرا یک گروه کلیدی شامل بلوک‌های مجزایی است که احتمال حرکت نسبی بر روی سطوح مشترک آنها را دارد. برای در نظر گرفتن نیروهای بین بلوکی در یک گروه کلیدی به روش‌های موجود برای تحلیل پایداری سه بعدی شیب‌ها اشاره و در مورد امکان-پذیری کاربرد این روش‌ها در الگوریتم ارائه شده در این تحقیق، بحث و بررسی می‌شود.

۳-۲- مفهوم محدود بودن یک بلوک

از فرضیات تئوری بلوکی، گسترش نامحدود صفحات درزه است به همین دلیل کل بلوک‌های تشکیل شده در مدل هندسی محدب^{۲۱} می‌باشند. بلوک محدب به صورت ناحیه مشترک بین تعدادی از نیم فضاها تعریف می‌شود، به نحوی که خط بین هر دو نقطه در این ناحیه، بطور کامل در داخل بلوک قرار گیرد (شکل ۳-۱-الف). شکل ۳-۱-ب یک بلوک غیر محدب (مقعر) را نشان می‌دهد. در بلوک محدب تمام زوایای داخلی کوچکتر یا مساوی 180° هستند.

21. Convex



شکل ۳-۱: تحدب و تقعر بلوک [۷]

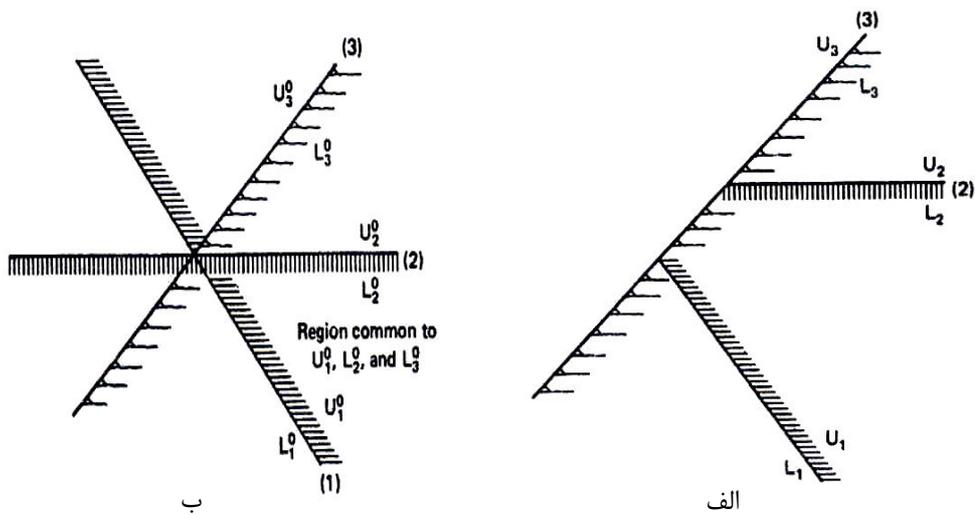
تئوری محدودیت به تشخیص محدود بودن یا نبودن یک بلوک کمک می‌نماید. فرض می‌شود یک بلوک از فصل مشترک نیم فضاهای مربوط به صفحات ۱، ۲، ... و n ساخته شده باشد. هرم بلوک^{۲۲} مربوط به این صفحات با عبور دادن آنها از مبدأ مختصات ایجاد می‌شود. تئوری محدودیت بیان می‌کند که یک بلوک محدب، محدود است اگر هرم بلوک آن تهی^{۲۳} باشد و بالعکس نامحدود است اگر هرم بلوک آن تهی نباشد [۷]. در اینجا بررسی تعدادی مثال دو بعدی برای درک بهتر موضوع، مفید به نظر می‌رسد.

شکل ۳-۲-الف یک سطح آزاد^{۲۴} (سطح شماره ۳) را همراه با دو صفحه درزه نشان می‌دهد. نیم فضای بالایی صفحه i با U_i و نیم فضای پایینی آن با L_i نمایش داده می‌شود. بلوکی که از فصل مشترک نیم فضاهای U_1, L_2, U_3 وجود می‌آید، در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است که این بلوک نامحدود است. برای استفاده از تئوری ارائه شده، هرم بلوک مربوط به $U_1 L_2 L_3$ ، توسط جابجایی بدون چرخش صفحات تشکیل دهنده نیم فضاها و عبور آنها از یک نقطه، باید مشخص شود (شکل ۳-۲-ب). هرم بلوک مورد نظر، ناحیه مشترک بین $(U_1^0$ و L_2^0) و L_3^0 در روی نمودار جابجا شده است. با توجه به آن که این نیم فضاها دارای ناحیه مشترکی هستند، لذا بلوک $U_1 L_2 L_3$ نامحدود می‌باشد.

²² . Block pyramid

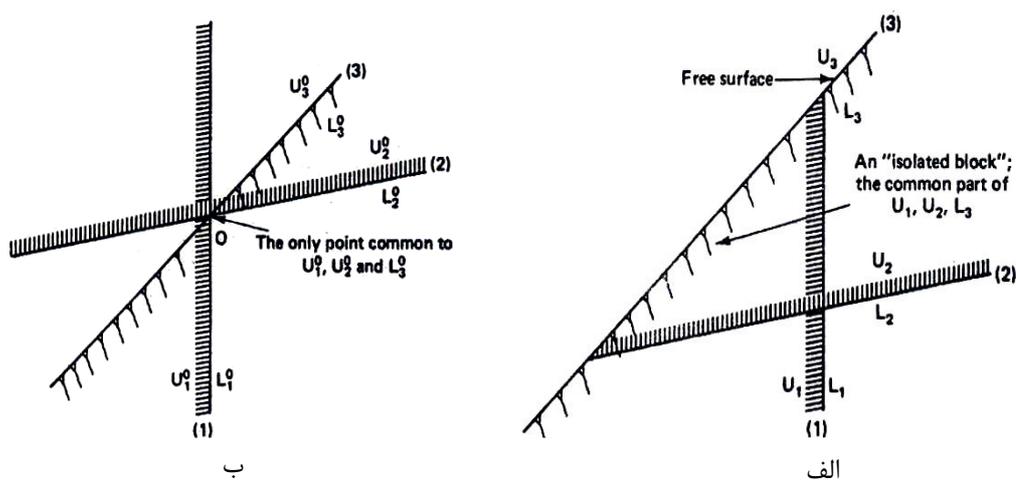
²³ . Empty

²⁴ . Free surface



شکل ۳-۲: استفاده از تئوری محدودیت برای تشخیص بلوک نامحدود [۷]

حالت عکس، یعنی وضعیتی که بلوک محدود است (بلوک $U_1 U_2 L_3$) در شکل ۳-۳ نشان داده شده است. صفحات ۱، ۲ و ۳ بدون چرخش و برای گذشتن از یک نقطه جابجا می‌شوند. ملاحظه می‌شود که ناحیه مشترک U_1^0 و U_2^0 با ناحیه L_3^0 هیچ اشتراکی بجز مبدأ ندارد. بدین ترتیب هرم بلوک $U_1^0 U_2^0 L_3^0$ هیچ لبه‌ای نداشته و تهی است. بنابراین با توجه به تئوری محدودیت، بلوک $U_1 U_2 L_3$ محدود است.



شکل ۳-۳: استفاده از تئوری محدودیت برای تشخیص بلوک محدود [۷]

در مثال‌های فوق با نگاه اول مشخص بود که بلوک‌های مورد نظر محدود هستند یا خیر. اما بررسی حالت‌های سه بعدی به این سادگی نیست. در هر صورت با کاربرد صحیح این تئوری می‌توان وضعیت محدود بودن یک بلوک را مستقیماً مشخص نمود. استفاده از تصاویر استروگرافیک کاربرد این روش را بسیار ساده می‌سازد [۷].

در مثال‌های فوق قسمتی از بلوک توسط نیم فضاهای مربوط به صفحات درزه و قسمت دیگر آن از نیم فضاهای مربوط به سطح آزاد ساخته شده است. بنابراین هرم‌های بلوک مربوطه، از صفحات موازی با سطوح درزه و سطوح آزاد بوجود آمده‌اند. فضای مشترک بین نیم فضاهای مربوط به صفحات درزه-ای که قسمتی از هرم بلوک را تشکیل می‌دهند، هرم درزه^{۲۵} (JP) نامیده می‌شود. همچنین دسته‌ای از نیم فضاهای استخراجی (نیم فضاهای حفاری) که برای تشکیل هرم بلوک جابجا شده‌اند، هرم استخراجی^{۲۶} یا هرم حفاری (EP) نامیده می‌شود.

بنابراین هرم بلوک (BP) اشتراک هرم درزه و هرم استخراجی است:

$$BP = JP \cap EP \quad (1-3)$$

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

$$JP \cap EP = \emptyset \quad (2-3)$$

این مسئله را می‌توان به روشی دیگر و با تعریف هرم فضایی^{۲۷} (SP) به صورت نیم فضاهای مکمل EP ، نیز بیان نمود. بیان ریاضی این عبارت به صورت زیر است:

$$SP = \sim EP \quad (3-3)$$

بدین ترتیب رابطه ۲-۳ معادل آن است که یک بلوک محدود است اگر و فقط اگر هرم درزه آن بطور کامل در هرم فضایی قرار گیرد، یعنی اگر و فقط اگر:

$$JP \subset SP \quad (4-3)$$

²⁵ . Joint pyramid

²⁶ . Excavation pyramid

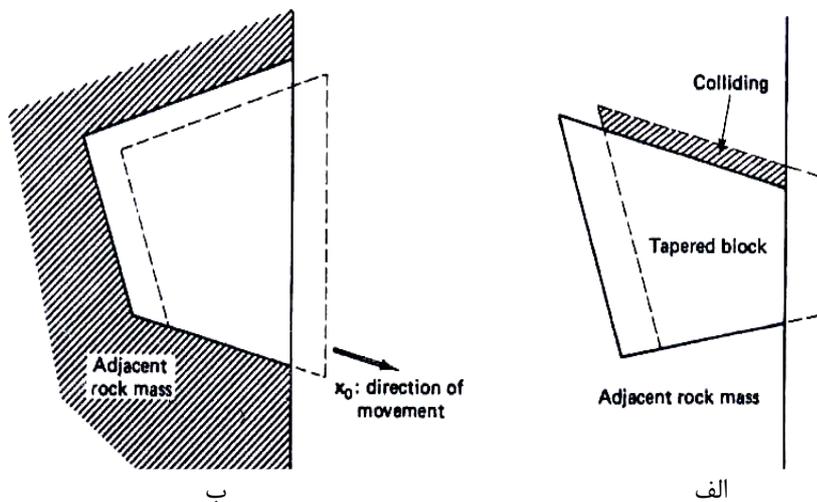
²⁷ . Space pyramid

در اینجا مثال‌های قبلی دوباره بررسی می‌شود. در شکل ۳-۲-ب، $U_1^0 L_2^0$ هرم درزه (JP)؛ L_3^0 هرم استخراجی (EP)؛ و U_3^0 هرم فضایی (SP) است. از آنجا که JP در SP قرار ندارد، بلوک نامحدود است. در شکل ۳-۳-ب، JP و SP به ترتیب عبارتند از $U_1^0 U_2^0$ و U_3^0 . با توجه به آنکه JP بطور کامل در SP قرار دارد، بلوک محدود است [۷].

۳-۳- مفهوم گرافیکی قابلیت جابجایی بلوک‌ها

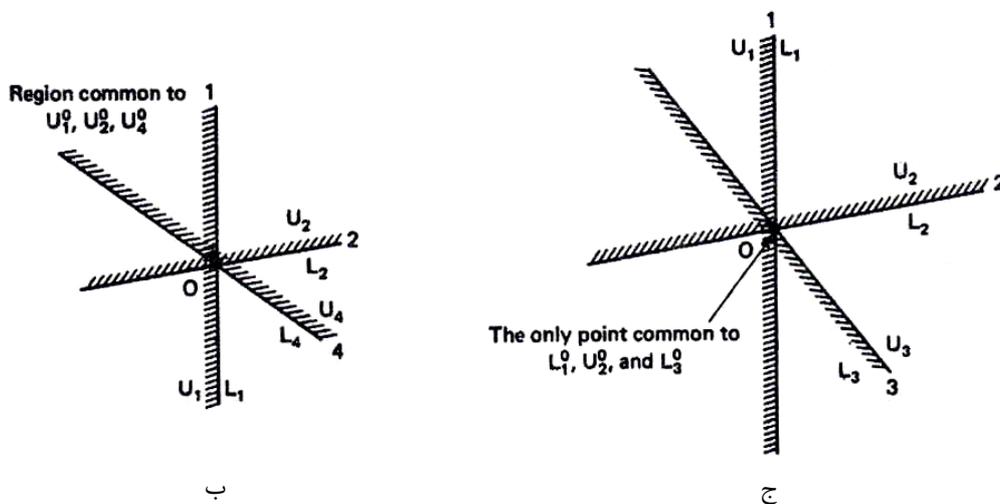
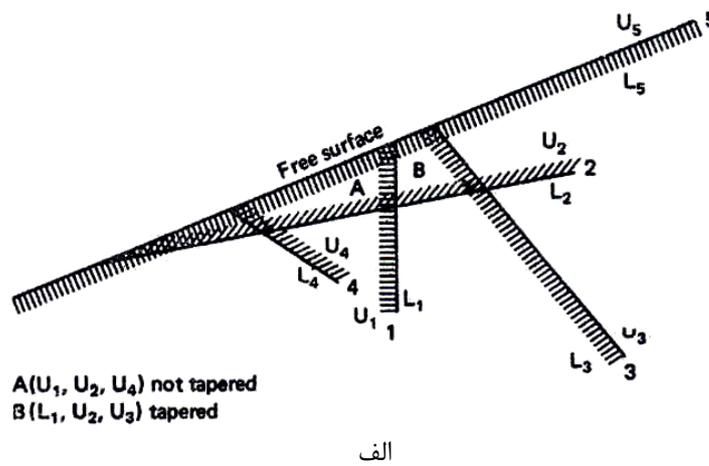
بلوک محدودی که از صفحات درزه و سطوح آزاد ساخته شده است، قابل جابجایی است اگر بتوان آن را بدون برخورد با توده‌سنگ مجاور در جهتی خاص جابجا نمود (شکل ۳-۴-الف) و غیر قابل جابجایی (مخروطی) است اگر نتوان آن را بدون برخورد با توده‌سنگ مجاور خود در هیچ جهتی جابجا نمود (شکل ۳-۴-ب).

قبلاً بلوک محدودی که قابلیت جابجایی نداشت، تحت عنوان بلوک مخروطی تعریف شد. شرایط لازم و کافی برای قابلیت جابجایی یا عدم قابلیت جابجایی یک بلوک محدود در تئوری زیر بیان شده است: یک بلوک محدب قابل جابجایی است اگر هرم بلوک آن تهی و هرم درزه آن غیر تهی باشد. برعکس، یک بلوک محدب فاقد قابلیت جابجایی است (مخروطی است) اگر هرم بلوک و هرم درزه آن هر دو تهی باشد.



شکل ۳-۴: بررسی قابلیت جابجایی لغزشی یک بلوک محدود [۷]

با توجه به تئوری محدودیت، بلوک مورد نظر در هر دو قسمت تئوری قابلیت جابجایی باید محدود باشد. برای روشن شدن مطلب، یک مثال دو بعدی مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل ۳-۵ بلوک‌هایی را نشان می‌دهد که از صفحات درزه و یک سطح آزاد (صفحه ۵) بوجود آمده‌اند.



شکل ۳-۵: بررسی تئوری قابلیت جابجایی [۷]

ابتدا بلوک A که با $U_1U_2U_4L_5$ مشخص شده است در نظر گرفته می‌شود. این بلوک، $U_1^0U_2^0U_4^0$ JP است. بنابراین JP است. مطابق شکل ۳-۵-ب ناحیه مشترکی در بین نیم فضاها منتقل شده وجود دارد. از طرف دیگر هرم بلوک $U_1^0U_2^0U_4^0L_5^0$ تهی است. بدین ترتیب با توجه به قسمت اول تئوری قابلیت جابجایی، بلوک A قابل جابجایی است، چرا که $JP_A \neq \phi$ و $BP_A = \phi$ است.

بلوک B در شکل ۳-۵-الف از نیم فضاهای $L_1U_2U_3L_5$ تشکیل شده و JP_B این بلوک، $L_1^0U_2^0U_3^0$ است. مطابق شکل ۳-۵-ج، تنها نقطه مشترک نیم فضاهای منتقل شده، مبدأ است. بنابراین JP_B تهی بوده و BP_B نیز تهی است. بدین ترتیب با توجه به قسمت دوم تئوری قابلیت جابجایی، بلوک B فاقد قابلیت جابجایی است [۷].

۳-۴- تحلیل پایداری سه بعدی بلوکها

مشابه دیگر روش‌های استاتیکی، در تحلیل بلوک‌های کلیدی ابتدا سعی بر تعیین قابلیت حرکت (جابجایی) سینماتیک (هندسی) بلوک‌های فعال (در تماس با فضای آزاد) است. سپس نیروهای موثر بر این بلوک‌ها تعریف می‌شود (بطورمثال: نیروی وزن، نیروهای مقاوم در مقابل لغزش و ...) و پس از آن اثرات این نیروها بر روی پتانسیل حرکت تحلیل می‌شود. اگر برآیند نیروهای محرک و مقاوم برای ایجاد یک حرکت کافی باشد، فرض می‌شود که این حرکت به صورت نامحدود ادامه خواهد یافت و یا به عبارت دیگر امتداد و مقدار این نیروها با حرکت تغییر نخواهد کرد. بدین ترتیب نتیجه‌گیری می‌شود که بلوک بطور کامل ناپایدار است [۱۴].

دو روش اصلی برای تحلیل پایداری بلوک‌ها وجود دارد:

الف) روش گرافیکی

ب) روش برداری

۳-۴-۱- تحلیل گرافیکی بلوک‌ها

یکی از روش‌هایی که در تجزیه و تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی به کار برده می‌شود استفاده از روش گرافیکی است. با استفاده از روش تصاویر استروگرافیک، توجیه فضایی ناپیوستگی‌ها مشخص و بحرانی‌ترین وضعیت تعیین می‌شود. به این ترتیب به سرعت می‌توان مکانیزم ریزش‌هایی که از نظر سینماتیکی امکان وقوع دارند را تعیین نمود [۷].

تصاویر استروگرافیک از جامعیت کافی برای تحلیل تعادل بلوک در روش تئوری بلوکی برخوردار است. اگرچه روش‌های گرافیکی قوانینی مفید و پذیرفتنی دارند، ولی آنها به سرعت پیچیده می‌شوند و قابلیت برنامه‌نویسی ندارند [۶]. بنابراین در این تحقیق روش‌های گرافیکی مورد توجه قرار ندارند.

۳-۴-۲- تحلیل برداری بلوک‌ها

روش‌های برداری، فرمول‌بندی نسبتاً ساده‌ای را برای تمام کمیت‌های مربوط به ریخت‌شناسی بلوک^{۲۸} ارائه می‌دهد. این کمیت‌ها شامل حجم بلوک درزه^{۲۹}، مساحت هر وجه، موقعیت رئوس^{۳۰} و موقعیت و وضعیت وجوه و لبه‌های آن می‌باشد. همچنین با استفاده از بردارها می‌توان تعادل استاتیکی و سینماتیکی بلوک‌ها را تحت تأثیر وزن بلوک، نیروهای اعمال شده، اصطکاک، اینرسی و عکس‌العمل سیستم نگهداری، مورد بررسی قرار داد. حل معادلات برداری توسط کامپیوتر مشروط بر وارد کردن آنها بر اساس مختصات دکارتی^{۳۱} بسیار آسان است. به هر حال، روش تحلیل برداری قابلیت‌ها و مزایایی نظیر امکان و سهولت برنامه‌نویسی کامپیوتری را دارد.

مطالب این بخش اساس و پایه‌ی تحلیل‌ها در روش گروه‌های کلیدی سه بعدی است.

سنگ سالم داخل هر بلوک، سخت و خیلی قوی‌تر از ناپیوستگی است. در نتیجه، می‌توان گفت تحت تاثیر میدان تنش محلی، تغییر شکل‌ها منحصراً در ناپیوستگی‌ها اتفاق می‌افتد و بلوک‌ها به صورت اجسامی صلب بدون هیچ‌گونه تغییر شکل یا شکستی حرکت می‌کنند.

همانطور که در بخش تئوری بلوکی بیان شد، در این شرایط پایداری سیستم، توسط پتانسیل حرکت بلوک‌ها به بیرون توده سنگ تعریف می‌شود و بلوک‌هایی با سطوح آزاد که در اثر شیب یا حفاری بوجود آمده‌اند از اهمیت بیشتری برخوردارند، زیرا آنها آغازگر حرکت هستند. بنابراین اولین قدم، تحلیل پایداری بلوک‌های سه بعدی منفردی است که یک یا چند سطح آزاد دارند.

²⁸ . Block morphology

²⁹ . Joint block

³⁰ . Vertices

³¹ . Cartesian

۳-۴-۲-۱- تعریف ریاضی مساله

بطور معمول در بیشتر روش‌های تحلیلی موجود برای بلوک‌های سه بعدی، به منظور ساده‌سازی فرض می‌شود که حرکت احتمالی بلوک‌ها فقط محدود به حرکت انتقالی است. چرخش و واژگونی، مستثنی می‌شود و سطوح بلوکی که در ابتدا موازی با سطوح ثابت دیگر هستند در طول حرکت بلوک موازی باقی می‌مانند. نتیجه اصلی این فرض آن است که بردار واحد \hat{m} برای توصیف جهت حرکت تمام نقاط بلوک، صرف نظر از ابعاد بلوک، کافی است.

حرکت بلوک با در نظر گرفتن تأثیر همزمان چندین عامل محدودکننده تعریف می‌شود. محدودیت‌های اولیه کاملاً هندسی و توسط سطوح ثابتی که در ابتدا با سطوح بلوک در تماس هستند، ایجاد می‌شود.

فرض می‌شود که جهت i امین سطح ثابت توسط بردار نرمال واحد \hat{n}_i ، رو به بیرون سطح (به سمت داخل بلوک) تعریف شود. سطوح ثابت، از حرکت بلوکی که مولفه مثبت در جهت عمود بر سطح دارد، جلوگیری خواهند کرد. بیان ریاضی این محدودیت هندسی بر روی \hat{m} توسط شرایط زیر بیان می‌شود:

$$\hat{n}_i \cdot \hat{m} \geq 0 \quad (5-3)$$

اگر $\hat{n}_i \cdot \hat{m} > 0$ باشد، بلوک در جهت دور شدن از سطوح حرکت می‌کند، اما اگر $\hat{n}_i \cdot \hat{m} = 0$ باشد، بلوک بطور موازی و در تماس با سطوح ثابت حرکت می‌کند و بر روی آن می‌لغزد. هر یک از سطوح ثابت محدودیت هندسی جداگانه مربوط به خود را (مانند رابطه ۳-۵) دارند و همه این شرایط به طور همزمان بکار برده می‌شود [۶].

محدودیت دیگر بر روی \hat{m} مربوط به مجموع نیروهای اعمالی، R ، است که بر روی بلوک عمل می‌کند. یکی از اجزای R وزن بلوک است که بطور قائم به سمت پایین به مرکز آن وارد می‌شود. بردار R می‌تواند دیگر اجزا مانند فشار آب، نیروی کششی بولت‌ها و دیگر نیروهای خارجی را نیز شامل شود. عکس العمل‌های نرمال سطوح ثابت نگهدارنده از اجزای R حذف می‌شوند، زیرا تأثیرشان روی \hat{m} قبلاً

در مجموعه محدودیت‌های هندسی بالا در نظر گرفته شده بود. نیروهای اصطکاکی نیز از میان اجزای R حذف می‌شوند. همانطور که دیده خواهد شد، آنها تأثیری بر روی جهت حرکت ندارند و می‌توانند تا زمان تحلیل پایداری نادیده گرفته شوند. از آنجا که فرض شده حرکت احتمالی بلوک محدود به انتقال است، در نتیجه هیچ نیروی گشتاوری بر بلوک وارد نمی‌شود و R از مرکز بلوک عبور می‌کند. از آنجا که هرگونه حرکتی برای بلوک توسط مجموع نیروهای محرک ایجاد می‌شود، حرکت باید در جهت مثبت این نیرو باشد. این موضوع محدودیتی روی \hat{m} است و به زبان ریاضی به صورت زیر قابل تعریف است:

$$R \cdot \hat{m} > 0 \quad (6-3)$$

این دو نوع محدودیت، جهات حرکت بلوک را محدود می‌کنند و حتی ممکن است از حرکت آن بطور کلی جلوگیری کنند. اگر محدودیت‌ها اجازه دهند که چند جهت برای لغزش موجود باشد، جهتی که بلوک می‌لغزد جهتی است که در آن مجموع نیروهای محرک بیشینه است. این آخرین محدودیت برای \hat{m} است. بنابراین شرایطی که یگانگی \hat{m} را تامین می‌کند به صورت زیر است:

$$R \cdot \hat{m} = \max(R \cdot \hat{m}_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (7-3)$$

با فرض آنکه بردار واحد \hat{m} در شرایط معادلات ۳-۵، ۳-۶ و ۳-۷ صدق کند، هنوز باید حرکت بلوک با اصطکاک کنترل شود. اصطکاک محدودیتی است که پس از یافتن \hat{m} اعمال می‌شود زیرا نیروهای اصطکاکی همیشه با حرکت بلوک مخالفت می‌کنند و نمی‌توانند جهت حرکت را تغییر دهند [۶].

۳-۴-۲-۲-۲- شناسایی انواع حرکت بلوک

برای شروع ابتدا فرض می‌شود که هندسه بلوک، کنترل پذیر و بلوک آزاد است و سپس سطوح ثابت متعلق به توده سنگ باقیمانده، در مراحل بعدی معرفی می‌شود. با این فرض نتیجه می‌شود که هیچ سطح ثابتی وجود ندارد، بنابراین شرایطی مانند ۳-۵ نیز وجود نخواهد داشت. در نتیجه بر اساس شرایط ۳-۶ و ۳-۷، حرکت بلوک در جهت مجموع نیروهای محرک است، یعنی:

$$\hat{m} = \hat{R} \quad (۸-۳)$$

این در واقع اولین نوع حرکت بلوک است [۶].

اکنون فرض می‌شود که تنها یک سطح ثابت (سطح ۱) معرفی شود. همانطور که در بخش قبلی توضیح داده شد، محدودیت اعمال شده از طرف سطح ثابت توسط شرط ۳-۵ و به شکل زیر بیان می‌شود:

$$\hat{n}_1 \cdot \hat{m} \geq 0 \quad (۹-۳)$$

اگر راه حلی برای تعیین \hat{m} موجود باشد، در این مورد باید شرایط ۳-۹ به علاوه ۳-۶ و ۳-۷ را ارضا کند. برای بلوکی که حرکت نوع ۱ در آن بدون وجود مانعی از سوی سطوح ثابت به وجود می‌آید، جواب \hat{m} در ۳-۸ باید ۳-۹ را ارضا کند. این موضوع به این معنی است که $\hat{n}_1 \cdot \hat{R} \geq 0$. سطح ثابتی که با معادله $\hat{n}_1 \cdot \hat{R} \geq 0$ تطبیق کند اجازه خواهد داد که حرکت نوع ۱ بلوک ادامه پیدا کند.

به وضوح عکس این قضیه نیز صادق است. اگر سطح ۱ طوری جهت‌یابی شود که $\hat{n}_1 \cdot \hat{R} < 0$ برقرار باشد، حرکت نوع ۱ بلوک تغییر خواهد کرد. بدین صورت که یا آن را به سمت جهت جدید \hat{m} که شروط ۳-۹، ۳-۶ و ۳-۷ را بطور همزمان ارضا می‌کند، منحرف می‌کند و یا بطور کلی از حرکت بلوک در شرایط عدم وجود \hat{m} ، جلوگیری می‌کند [۶].

عدم وجود \hat{m} فقط در صورتی تحقق می‌یابد که $\hat{n}_1 \cdot \hat{R} = -1$ برقرار باشد. \hat{m} ، در حقیقت در جهت تصویر قائم R روی صفحه سطح ثابت است.

مولفه برداری عمود بر سطح به صورت $(R \cdot \hat{n}_1) \hat{n}_1$ بیان می‌شود و بنابراین همانطور که در شکل ۳-۶ نشان داده شده است، مولفه برداری در جهت خط سقوط موثر به صورت زیر است:

$$f_1 = R - (R \cdot \hat{n}_1) \hat{n}_1 \quad (۱۰-۳)$$

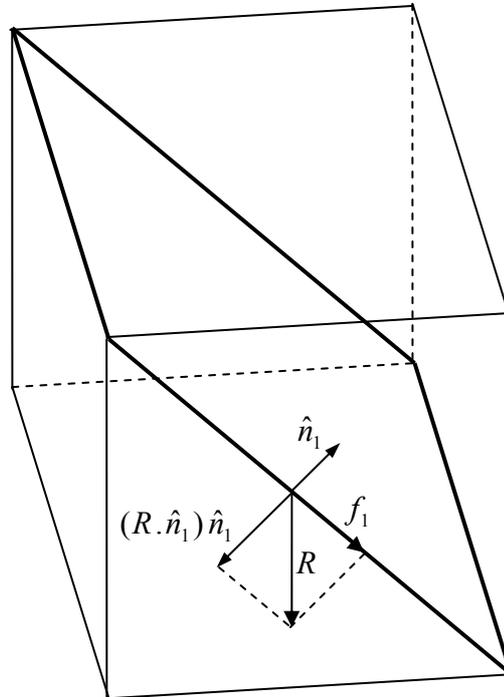
که در آن زیرنویس ۱ در f_1 به صفحه شماره ۱ مربوط می‌شود.

از آنجا که \hat{m} در جهت f_1 است، نتیجه می‌شود که:

$$\hat{m} = \hat{f}_1$$

(۱۱-۳)

این در واقع دومین نوع حرکت بلوک است.



شکل ۳-۶: تجزیه مجموع نیروهای محرک R به دو جزء برداری عمود و موازی با سطح ثابت [۶]

فرض کنید که دومین سطح ثابت (سطح ۲) نیز معرفی شود. در این صورت شرایط هندسی دیگری همانند شرطی که در ۳-۵ بیان شد، تحمیل می‌شود و بنابراین مجموعه شرایطی از ۳-۵ به صورت زیر بیان می‌شود:

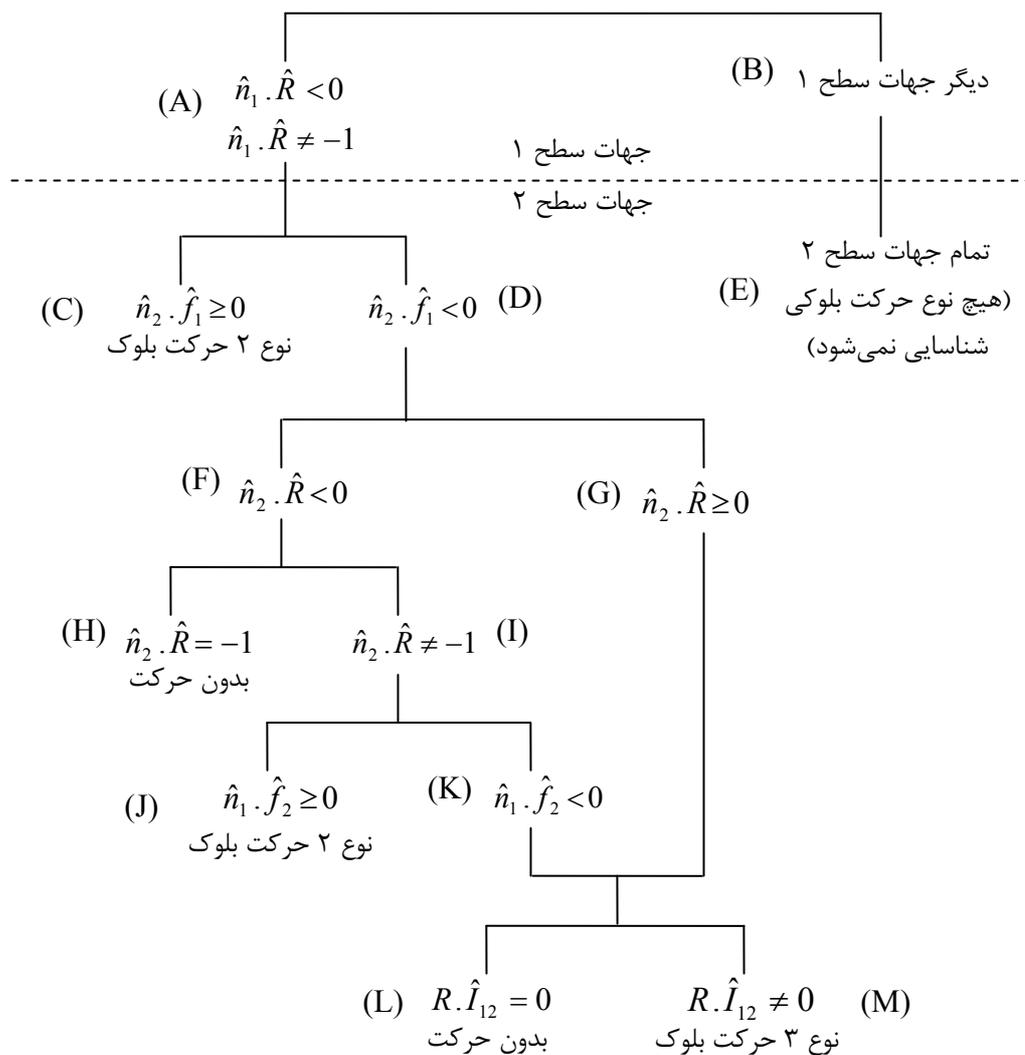
$$\hat{n}_1 \cdot \hat{m} \geq 0 \quad \text{و} \quad \hat{n}_2 \cdot \hat{m} \geq 0 \quad (۱۲-۳)$$

در نتیجه، اگر راه حلی برای تعیین \hat{m} موجود باشد، باید در معادلات ۳-۱۲، ۳-۶ و ۳-۷ صدق کند. تاثیر سطح ۲ روی حرکت بلوک بستگی به جهت سطح ۱ دارد. برای شروع، فرض می‌شود که سطح ۱ در جهت $\hat{n}_1 \cdot \hat{R} < 0$ و $\hat{n}_1 \cdot \hat{R} \neq -1$ باشد. در مرحله قبل، اینها شرایطی برای حرکت نوع ۲ بلوک در طول خط سقوط موثر سطح ۱ بودند.

برای اینکه بلوک این حرکت را بعد از تعریف سطح ۲ ادامه دهد، راه حل برای \hat{m} در ۳-۱۱ باید در دو ضابطه ۳-۱۲ صدق کند. این شرایط توسط $\hat{n}_2 \cdot \hat{f}_1 \geq 0$ بیان می‌شود، بدین صورت که اگر سطح ۲

طوری جهت‌یابی شود که $\hat{n}_2 \cdot \hat{f}_1 \geq 0$ ، آنگاه بلوک در طول خط سقوط موثر سطح ۱ ادامه حرکت می‌دهد.

اگر سطح ۲ طوری جهت‌یابی شود که $\hat{n}_2 \cdot \hat{f}_1 < 0$ برقرار باشد، این سطح، حرکت بلوک را در طول خط سقوط موثر صفحه ۱ تغییر خواهد داد. بدین صورت که یا آن را به سمت جهت جدید \hat{m} که شروط ۳-۱۲، ۳-۶ و ۳-۷ را بطور همزمان ارضا می‌کند، منحرف می‌کند و یا بطور کلی از حرکت بلوک در صورت عدم وجود \hat{m} ، جلوگیری می‌کند. تغییرات در حرکت بلوک می‌تواند به چندین گروه مختلف بسته به جهات خاص سطح ۲ طبقه‌بندی شود. به منظور درک بهتر موضوع، انواع حرکت بلوک بر اساس جهات سطوح ۱ و ۲ در شکل ۳-۷ نشان داده شده است.



شکل ۳-۷: طرح طبقه‌بندی برای شناسایی نوع سوم حرکت بلوک در مرحله ۳ [۶]

در این شکل، جهتی از سطح ۲ که برای آن $\hat{n}_2 \cdot \hat{f}_1 < 0$ (نقطه D در شکل ۷-۳) برقرار است، به دو حالت تقسیم می‌شود. ابتدا حالتی در نظر گرفته می‌شود که $\hat{n}_2 \cdot \hat{R} < 0$ برقرار است. در این حالت جهاتی از سطح ۲ ممکن است برای جلوگیری از کل حرکت بلوک کافی باشد. زمانی که $\hat{n}_2 \cdot \hat{R} = -1$ برقرار باشد یعنی \hat{n}_2 در جهت مخالف R است و در این شرایط برداری برای \hat{m} که قسمت دوم ۱۲-۳ را با ۶-۳ بطور همزمان ارضا کند وجود ندارد. اگر این مورد خاص مستثنی شود، جهت سطح ۲ نه فقط $\hat{n}_2 \cdot \hat{f}_1 < 0$ را بلکه $\hat{n}_2 \cdot \hat{R} < 0$ و $\hat{n}_2 \cdot \hat{R} \neq -1$ را نیز ارضا می‌کند. دو شرط آخر به عنوان شروطی برای حرکت نوع ۲ بلوک روی یک سطح ثابت (سطح ۲ در این مورد) می‌باشند. بنابراین اگر سطح ۱ موقتاً حذف شود، بلوک در طول خط سقوط موثر سطح ۲ با \hat{m} که توسط رابطه زیر بیان می‌شود، حرکت خواهد کرد [۶].

$$\hat{m} = \hat{f}_2 \quad (۱۳-۳)$$

در این حالت با اضافه شدن سطح ۱، در صورتی حرکت در این جهت تغییر نخواهد کرد که $\hat{n}_1 \cdot \hat{f}_2 \geq 0$ برقرار باشد که این شرط به عنوان شرط روی \hat{f}_2 و شرط روی جهت خط سقوط موثر سطح ۲ در ارتباط با جهت سطح ۱ بیان می‌شود. بنابراین جهت سطح ۲ با $\hat{n}_1 \cdot \hat{f}_2 \geq 0$ (نقطه J در شکل ۷-۳)، حرکت نوع ۲ بلوک در طول خط سقوط موثر سطح ۲ را بیان می‌کند. در حالتی که جهت سطح ۲ با $\hat{n}_1 \cdot \hat{f}_2 < 0$ تعریف شود (نقطه K در شکل ۷-۳)، سطح ۱ مانع حرکت نوع ۲ بلوک روی سطح ۲ می‌شود. با توجه به شکل ۷-۳، ردیابی مسیری که منجر به این حالت (نقطه K) می‌شود نشان می‌دهد که شرایط خاصی باید روی جهات سطوح ۱ و ۲ در نقاط A, D, F, I و K برقرار باشد.

در این مرحله با برگشت به نقطه D در شکل ۷-۳، جهاتی از سطح ۲ که هنوز تحلیل نشده‌اند یعنی جهاتی که با شروط $\hat{n}_2 \cdot \hat{f}_1 < 0$ و $\hat{n}_2 \cdot \hat{R} \geq 0$ (نقطه G در شکل ۷-۳) بیان می‌شوند، در نظر گرفته می‌شوند.

موقعیت‌های نقاط K و G در شکل ۳-۷ می‌توانند با یکدیگر تحلیل شوند. در هر دو نقطه، سطح ۲ نوع دوم حرکت بلوک را در طول خط سقوط موثر سطح ۱، یا در جهت جدید \hat{m} که شروط ۳-۱۲، ۳-۶ و ۳-۳ را بطور همزمان ارضا می‌کند، تغییر می‌دهد. در صورتی که هیچ یک از دو حالت قبل اتفاق نیافتد سطح ۲ از حرکت کلی بلوک جلوگیری خواهد کرد. حالت دوم وقتی رخ می‌دهد که $\hat{n}_1 \times \hat{n}_2$ بر R عمود باشند. برای حالت اول، \hat{m} ، در حقیقت، در جهت تصویر عمودی R روی خط تقاطع سطوح ۱ و ۲ است.

باید توجه شود که این راه حل برای وقتی که سطوح ۱ و ۲ به اندازه کافی برای تقاطع گسترده باشند و یا در حالتی که گستردگی کافی برای تقاطع را ندارند، دارای اعتبار است. در هر مورد مناسب است که عبارت خط تقاطع بکار برده شود، اما مفهوم واقعی آن بدین معنی است که این خط موازی با دو سطح و عمود بر هر دو بردار \hat{n}_1 و \hat{n}_2 است.

بنابراین خط تقاطع موازی ضرب برداری دو بردار \hat{n}_1 و \hat{n}_2 است:

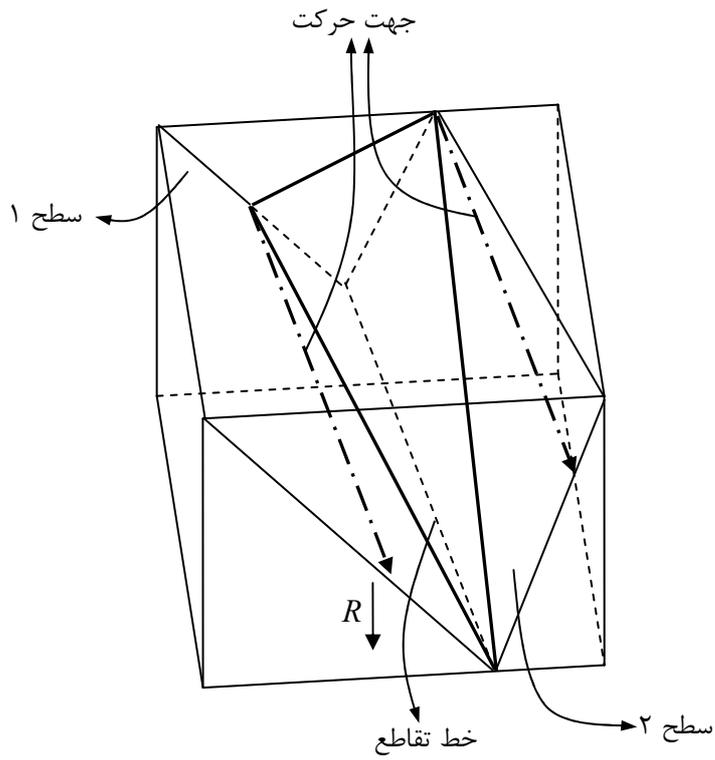
$$I_{12} = \hat{n}_1 \times \hat{n}_2 \quad (۱۴-۳)$$

که در آن زیرنویس ۱۲ در I_{12} به معنی وابستگی آن با سطوح ۱ و ۲ است. تصویر عمودی R بر روی خط تقاطع، برابر با $\hat{I}_{12}(R \cdot \hat{I}_{12})$ است. از آنجا که \hat{m} هم جهت با این بردار است، نتیجه می‌شود که:

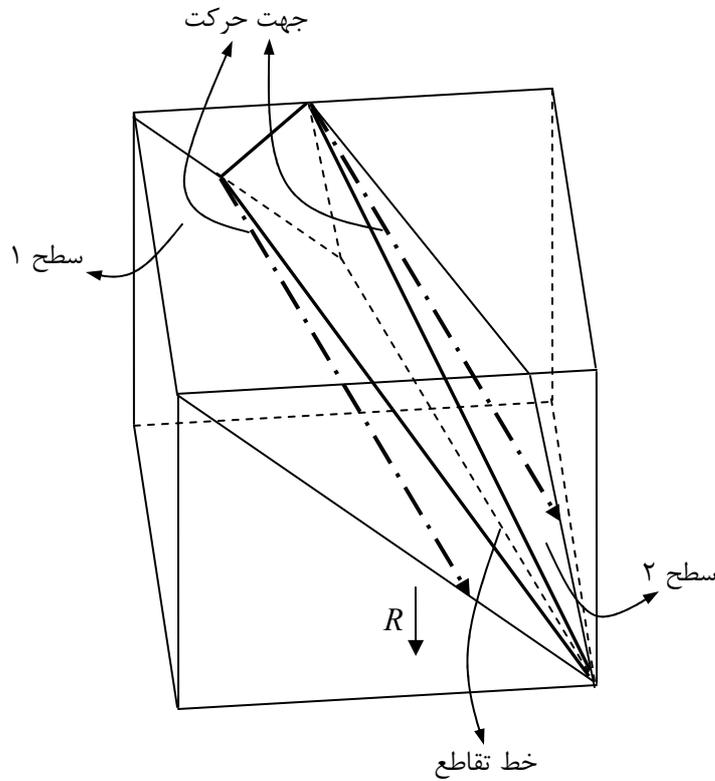
$$\hat{m} = \text{sign}(R \cdot \hat{I}_{12}) \hat{I}_{12} \quad (۱۵-۳)$$

این سومین نوع حرکت بلوک است که در آن sign نشان دهنده علامت عبارت داخل پرانتز است.

در شکل‌های ۳-۸ و ۳-۹ دو ترکیب نمونه از جهات سطوح ثابت ۱ و ۲ که منجر به حرکت نوع ۳ بلوک می‌شود، نشان داده شده است. جهات این سطوح ثابت، همه شرایطی که در نقطه M در شکل ۳-۷ ارائه شده را ارضا می‌کنند. اما جهات سطوح ثابت در شکل ۳-۸ به نقطه K در شکل ۳-۷ مربوط می‌شوند، در حالیکه این جهات در شکل ۳-۹ از نقطه G در شکل ۳-۷ مشتق می‌شوند. سومین سطح ثابت در هر مثال تأثیری روی حرکت بلوک ندارد. می‌توان نشان داد که هیچ نوع جدیدی از حرکت با معرفی سطوح ثابت اضافی ظاهر نمی‌شود [۶].



شکل ۳-۸: نمونه ترکیب جهات سطوح ثابت که منجر به نوع ۳ حرکت بلوک می شود
(منتج شده از نقاط M و K در شکل ۳-۷)



شکل ۳-۹: نمونه ترکیب جهات سطوح ثابت که منجر به نوع ۳ حرکت بلوک می شود
(منتج شده از نقاط M و G در شکل ۳-۷)

این بدین معنی است که همه راه حل‌های بالقوه برای جهت حرکت بلوک بجز آنکه کمترین $R \cdot \hat{m}$ را داراست با محدودیت‌های هندسی ترکیب‌بندی، ناسازگار است و بنابراین می‌تواند بدون انجام آزمایشات بیشتر برای اعتبارسنجی آن، رد شود و این تنها راه حل بالقوه است که نیاز به آزمایش با برقراری دوباره شرایط سطوح ثابت را دارد [۶].

فرآیند توصیف شده در بالا هرگز حل‌های دوگانه برای حرکت بلوک تولید نمی‌کند. اگر کمترین مقدار $R \cdot \hat{m}$ توسط دو یا چند راه حل بالقوه بدست آید، می‌توان با انجام یک آزمایش کوچک دریافت که باید همه آنها بر یکدیگر منطبق باشند. در عمل، تطبیق این راه حل‌ها دلالت می‌کند بر اینکه حرکت بلوک توسط سه یا تعداد بیشتر سطوح ثابت نگهدارنده که دارای خطوط تقاطع موازی هستند، هدایت می‌شود.

برای راه حل مربوط به حرکت نوع ۱ و ۳ بلوک‌ها، $R \cdot \hat{m}$ بطور مستقیم از عبارت مناسب برای \hat{m} محاسبه می‌شود. اگر راه حل به نوع ۲ حرکت بلوک مربوط شود، مقدار فوق را می‌توان به شکل زیر بیان نمود:

$$R \cdot \hat{m} = R \cdot \left[\frac{f_1}{f_t} \right] = \frac{R \cdot f_t}{\sqrt{f_1 \cdot f_1}} = |R| \sqrt{1 - (\hat{n}_1 \cdot \hat{R})^2} \quad (۱۶-۳)$$

که در آن $\hat{n}_1 \cdot R < 0$ و $\hat{n}_1 \cdot R \neq -1$. بنابراین برای پتانسیل نوع ۲ حرکت بلوک، راه حل برای \hat{m} با کمترین مقدار $R \cdot \hat{m}$ توسط سطح ثابتی که دارای بیشترین مقدار منفی $\hat{n}_1 \cdot \hat{R}$ است، ایجاد می‌شود [۶].

۳-۴-۲-۴- تأثیر اصطکاک روی حرکت بلوک

روشی که طی مباحث قبل بیان شد یکی از دو خروجی زیر را نتیجه می‌دهد:

الف) همه راه حل‌های بالقوه برای \hat{m} غیر قابل قبول (بی اعتبار) هستند. این موضوع بیان می‌کند که جهات سطوح ثابت به طریقی با یکدیگر ترکیب شده‌اند که از حرکت کلی بلوک جلوگیری می‌کنند. در

واقع بردار \hat{m} که شرایط ۳-۵ و ۳-۶ را بطور همزمان ارضا کند، وجود ندارد و بلوک پایدار تشخیص داده می‌شود.

ب) آزمایشات فقط یک بردار واحد \hat{m} را ارائه می‌کنند که بطور همزمان شرایط ۳-۵، ۳-۶ و ۳-۷ را ارضا می‌کند. همانطور که قبلاً در هنگام تعریف مساله توضیح داده شد، اکنون لازم است تعیین شود که آیا حرکت بلوک در این جهت توسط اصطکاک جلوگیری می‌شود یا نه.

قبلاً بیان شد که اگر حرکت بلوک توسط سه یا تعداد بیشتری سطوح ثابت نگهدارنده هدایت شود، خطوط تقاطع آن صفحات با یکدیگر موازی هستند. چنین شکلی از بلوک از لحاظ استاتیکی نامعین است و برای آن ضریب اطمینانی یافت نمی‌شود [۶].

فرض می‌شود که \hat{m} از نوع ۲ حرکت بلوک در ارتباط با سطح ثابت ۱ حاصل شده باشد. نیروهای اعمالی بر بلوک، مجموع نیروهای محرک R به همراه نیروی اصطکاک $F_1 \hat{m}$ و نیروی عکس العمل نرمال ایجاد شده توسط سطح ثابت ۱، یعنی $N_1 \hat{n}_1$ هستند. N_1 و F_1 اعدادی مثبت هستند که شدت نیروهای مربوطه را نشان می‌دهند.

ابتدا همه نیروها در جهت \hat{n}_1 تجزیه می‌شوند. مولفه وابسته به هر نیرو از ضرب نقطه‌ای آن در \hat{n}_1 بدست می‌آید. از آنجا که هیچ مولفه بردار نیرویی عمود بر \hat{m} وجود ندارد:

$$R \cdot \hat{n}_1 + N_1 = 0 \quad (۱۷-۳)$$

و از این رابطه N_1 به صورت زیر بدست می‌آید:

$$N_1 = -R \cdot \hat{n}_1 \quad (۱۸-۳)$$

سپس نیروهای اعمال شده بر روی بلوک برای یافتن اندازه نیروی برداری M ، در جهت \hat{m} ، تجزیه می‌شوند. نتیجه این تجزیه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$M = R \cdot \hat{m} - F_1 \quad (۱۹-۳)$$

در صورتی که مقدار حداکثر F_1 از $R \cdot \hat{m}$ تجاوز کند، اصطکاک از حرکت بلوک جلوگیری خواهد نمود. مقدار حداکثر می‌تواند از عبارت $c_1 A_1 + N_1 \tan \phi_1$ محاسبه شود که در آن c_1 و ϕ_1 به ترتیب

چسبندگی و زاویه اصطکاک ناپیوستگی، A_1 مساحت سطح ثابت و N_1 از رابطه ۳-۱۸ محاسبه می-شود.

ضریب اطمینان حرکت نوع ۲ بلوک می‌تواند به عنوان نسبت مقدار حداکثر F_1 به $R \cdot \hat{m}$ تعریف شود. وقتی که \hat{m} از حرکت نوع ۳ بلوک نتیجه شود، نیروهایی که بر روی بلوک اعمال می‌شوند شامل مجموع نیروهای محرک R به همراه نیروهای اصطکاک $-F_1 \hat{m}$ و $-F_2 \hat{m}$ و عکس العمل‌های نرمال $N_1 \hat{n}_1$ و $N_2 \hat{n}_2$ که به ترتیب توسط سطوح ۱ و ۲ اعمال می‌شوند، هستند.

همه نیروها ابتدا در جهت عمود بر \hat{m} و \hat{n}_2 تجزیه می‌شوند. مولفه برداری مربوط به هر نیرو از ضرب نقطه‌ای آن در بردار واحد $(I_{12} \times \hat{n}_2) / |I_{12} \times \hat{n}_2|$ بدست می‌آید. از آنجا که هیچ مولفه نیروی برداری عمود بر \hat{m} وجود ندارد، نتیجه می‌شود:

$$R \cdot (I_{12} \times \hat{n}_2) + N_1 \hat{n}_1 \cdot (I_{12} \times \hat{n}_2) = 0 \quad (20-3)$$

دو عبارت سمت چپ رابطه ۳-۲۰ می‌توانند به شکل ساده‌تر و مناسب‌تر بیان شوند. در ابتدا، ضرب برداری عبارت اول توسط تعریف I_{12} و فرمول‌های استاندارد تحلیل برداری به ضرب سه گانه برداری تبدیل می‌شود. بنابراین:

$$I_{12} \times \hat{n}_2 = (\hat{n}_1 \times \hat{n}_2) \times \hat{n}_2 = (\hat{n}_1 \cdot \hat{n}_2) \hat{n}_2 - \hat{n}_1 \quad (21-3)$$

سپس با استفاده از رابطه ۳-۲۱، عبارت اول سمت چپ رابطه ۳-۲۰ را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$\begin{aligned} R \cdot (I_{12} \times \hat{n}_2) &= (\hat{n}_1 \cdot \hat{n}_2) (R \cdot \hat{n}_2) - R \cdot \hat{n}_1 \\ &= -[R - (R \cdot \hat{n}_2) \hat{n}_2] \cdot \hat{n}_1 \\ &= -f_2 \cdot \hat{n}_1 \end{aligned} \quad (22-3)$$

عبارت دوم سمت چپ ۳-۲۰ شامل یک ضرب اسکالر سه گانه است که با کمک دیگر فرمول‌های استاندارد تحلیل برداری می‌تواند به صورت زیر بازنویسی شود:

$$\hat{n}_1 \cdot (I_{12} \times \hat{n}_2) = -I_{12} \cdot (\hat{n}_1 \times \hat{n}_2) = -|I_{12}|^2 \quad (23-3)$$

با جایگذاری ۳-۲۲ و ۳-۲۳ در ۳-۲۰، N_1 به صورت زیر بدست می‌آید:

$$N_1 = -\frac{f_2 \cdot \hat{n}_1}{|I_{12}|^2} \quad (24-3)$$

با تجزیه تمام نیروها در جهت عمود بر \hat{m} و \hat{n}_1 ، به طور مشابه می‌توان نشان داد که N_2 توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$N_2 = -\frac{f_1 \cdot \hat{n}_2}{|I_{12}|^2} \quad (25-3)$$

سرانجام، نیروهای وارد بر بلوک، در جهت \hat{m} ، برای یافتن بزرگی نیروی برداری M در آن جهت، تجزیه می‌شوند.

$$M = R \cdot \hat{m} - F_1 - F_2 \quad (26-3)$$

معادله ۲۶-۳ مشابه با ۱۹-۳ است. در صورتی که بلوک در مقابل نیروهای اصطکاک دو سطح ثابت قابل حرکت باشد، $R \cdot \hat{m}$ باید از ترکیب مقادیر حداکثر F_1 و F_2 تجاوز کند. بنابراین هر یک از مقادیر حداکثر F_1 و F_2 می‌توانند محاسبه شوند.

برای نوع ۳ حرکت بلوک، ضریب اطمینان می‌تواند به صورت نسبت مقادیر حداکثر ترکیب شده F_1 و F_2 به $R \cdot \hat{m}$ تعریف شود [۶].

۳-۵- روش‌های تحلیل پایداری سه بعدی شیب

تحلیل پایداری شیب‌ها به طور معمول توسط روش‌های تعادل حدی دو بعدی انجام می‌شود. روش‌های موجود برای تحلیل شیب‌های سنگی، با توجه به روش‌های موجود برای شیب‌های خاکی توسعه داده شده‌اند که از آن جمله می‌توان به روش ساده شده بیشاپ^{۳۲} که بوسیله هوک و بری^{۳۳} پیشنهاد شده، اشاره کرد [۱۵]. همچنین روش‌های دیگری مانند روش سارما^{۳۴} [۱۶] که قطاع‌هایی با سطوح مایل را برای شبیه‌سازی ناپیوستگی‌های ساختاری در نظر می‌گیرد، ارائه شده است [۱۷]. متأسفانه بیشتر این تحلیل‌ها دو بعدی هستند و نمی‌توانند مشخصات سه بعدی لغزش را بطور مناسب مدل

³² . Bishop

³³ . Hoek and Bray

³⁴ . Sarma

کنند. بنابراین وجود روش‌های کاربردی تحلیل پایداری سه بعدی شیب و برنامه‌های کامپیوتری متناسب با آن مورد نیاز است [۱۸ و ۱۹].

۳-۵-۱- روش‌های تحلیل تعادل حدی

چندین روش بر مبنای اصول تعادل حدی برای تحلیل پایداری دو بعدی شیروانی‌های همگن وجود دارد که در اکثر آنها از روش برش‌ها استفاده شده است. فلنیوز^{۳۵}، بی‌شاپ، مورگنسترن^{۳۶} و پرایس^{۳۷}، اسپنسر^{۳۸} و جانبو^{۳۹} همگی روش‌های محاسبه‌ای را بر مبنای برش‌های قائم ارائه داده، سلطان-سید و سپس سارما روش‌های محاسبه‌ای را بر مبنای برش‌های مایل به دست آورده‌اند. هانگر^{۴۰} [۲۰]، هانگر و دیگران [۲۱]، چامو و چن^{۴۱} [۲۲] و فردلند و لم^{۴۲} [۲۳] به ترتیب روش‌های ساده شده‌ی بی‌شاپ، اسپنسر، مورگنسترن و پرایس را از حالت دو بعدی به سه بعدی بسط داده‌اند. با این حال گزارش‌های کم تعدادی راجع به کاربرد این روش‌ها منتشر شده است. در تمامی موارد توده شکسته شده به تعدادی ستون با سطح مشترک قائم تقسیم شده و شرایط تعادل استاتیکی برای تعیین ضریب ایمنی استفاده شده است.

بطور کلی روش‌های برشی ستونی با سطوح مشترک قائم دارای محدودیت‌های زیر هستند:

- فرضیات زیادی برای اینکه مساله به یک مساله معین استاتیکی تبدیل شود، لازم است. بر اساس بررسی که توسط فردلند و لم انجام شده یک توده شکسته که به n ردیف و m ستون تقسیم شده به تعداد $n \times m \times 8$ فرض نیاز دارد [۲۳].

³⁵ . Fellneus

³⁶ . Morgenstern

³⁷ . Price

³⁸ . Spencer

³⁹ . Janbu

⁴⁰ . Hungr

⁴¹ . Chameau & chen

⁴² . Fredlund & lam

- این روش‌ها برای تحلیل برداری پیچیده سه بعدی که معمولاً شامل یکسری از معادلات غیر خطی همزمان است، محدودتر می‌شوند. در این موارد برای رسیدن به جواب، تکرار زیاد لازم است مگر اینکه ساده سازی‌های بیشتری در نظر گرفته شود.

- از آنجا که کاربرد این روش برای حالت سه بعدی در مراحل اولیه است، تاکنون هیچ موردی برای یافتن سطح بحرانی لغزش در حالت سه بعدی برای یک شکل کلی از شیب سنگی، منتشر نشده است.

- این روش‌ها برای کاربرد در شیب‌های سنگی که دارای ناپیوستگی‌های ساختاری غیر قائم و نامنظم هستند، نامناسب می‌باشند، چون در شیب‌های سنگی قطعات یا برش‌ها بوسیله ناپیوستگی‌ها تعریف می‌شوند [۱۰].

۳-۵-۲- روش‌های مرز بالایی

چن و دنالد^{۴۳} یک روش تحلیل پایداری دو بعدی شیب را ارائه کردند که بر مبنای تئوری مرز بالایی است و به یک راه حل عددی می‌رسد [۲۴]. آنها نشان دادند که این روش در صورتی که به سه بعد گسترش یابد، معادل با روش سارما با برش‌های مایل است و بنابراین به صورت عملی برای شیب‌های سنگی قابل کاربرد است. اما متفاوت از روش سارما که تعادل نیروها روی هر برش را بررسی می‌کند، محاسبات بر مبنای برقراری یک میدان سرعت مناسب، انجام و ضریب ایمنی بر اساس معادله تعادل کار و انرژی تعیین می‌شود. جستجوی خودکار برای سطح بحرانی ریزش بوسیله سکولوسکی^{۴۴} با موفقیت مدل شده است [۲۵].

روشی که در ادامه توضیح داده می‌شود بسط و گسترش روش دو بعدی چن و دنالد است. در این روش توده شکسته به تعدادی منشور با سطوح تماس مشترک مایل تقسیم می‌شود [۲۶]. این روش از تئوری مرز بالایی استفاده می‌کند و بنابراین از تعداد زیادی از فرض‌ها اجتناب شده است.

⁴³ . Chen and Donald

⁴⁴ . Sokolovski

در حالت سه بعدی، ضریب ایمنی بر اساس تغییر عددی معادله تعادل نیرو و انرژی بدست می‌آید. بطور معمول بهینه‌سازی تا جایی که سطح بحرانی ریزش مشخص شود، ادامه می‌یابد.

۳-۵-۲-۱- روش مرز بالایی

فرض می‌شود که یک شیب سنگی در حالت پایداری تعادل حدی است و مصالحی که روی سطح لغزش قرار دارند، بوسیله Ω^* نشان داده می‌شوند و در همه نقاط به صورت پلاستیک و به عبارتی در حالت تسلیم قرار دارند. تحت این شرایط، تئوری مرز بالایی بیان می‌کند که در میان همه بارهای خارجی اعمال شده به ناحیه پلاستیک Ω^* ، بار خارجی T که باعث ایجاد شکست روی یک حالت شکست Ω می‌شود، می‌تواند بوسیله کمینه کردن T^* همانگونه که در معادله تعادل کار و انرژی زیر تعریف شده، بدست آید.

$$\int_{\Omega^*} \sigma_{ij}^* \cdot \delta v + \int_{\Omega^*} dD_s^* = WV^* + T^*V^* \quad (27-3)$$

که در آن V^* نرخ جابجایی پلاستیک است که بطور مصطلح به عنوان سرعت پلاستیک شناخته می‌شود. W نیروی داخلی متناسب با ناحیه پلاستیک است. σ^* تنش نرمال و dD^* کار انجام شده توسط تنش‌های داخلی است. سمت چپ معادله ۲۷-۳ نرخ اتلاف انرژی داخلی در طول سطح لغزش (شکست) را نشان می‌دهد.

روش انرژی سه بعدی مورد بحث در اینجا، توده شکسته را بوسیله یکسری منشور^{۴۵} با سطوح لغزش مایل مستطیل شکل تقریب می‌زند (شکل‌های ۳-۱۰ و ۳-۱۱).

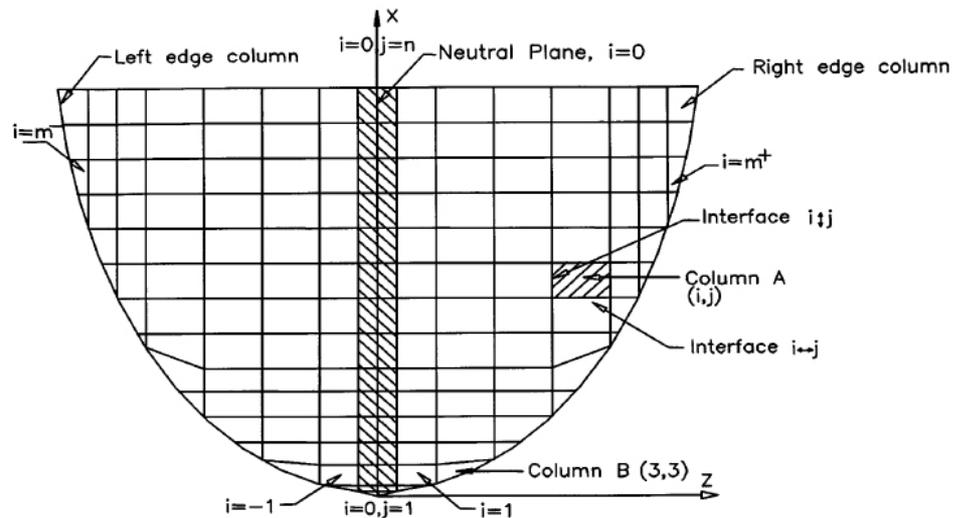
برای این گونه تقسیم بندی، معادله ۲۷-۳ را می‌توان به شکل حاصل جمع (سیگما) تقریب زد.

$$\sum D_{i \leftrightarrow j}^* + \sum D_{i\beta j}^* + \sum D_{i,j}^* = WV^* + T^*V^* \quad (28-3)$$

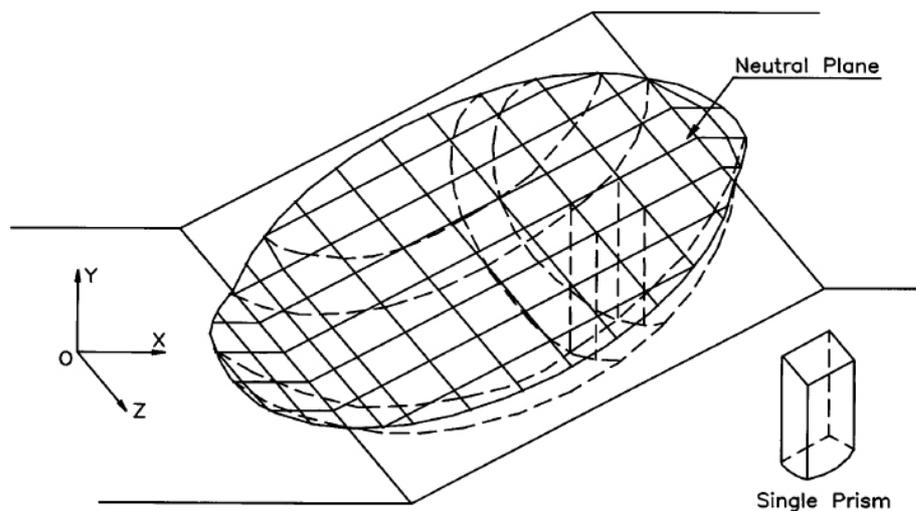
⁴⁵ - واژه منشور در مقابل واژه متعارف ستون بکار می‌رود تا با سطر و ستون ماتریس اشتباه نشود.

در اینجا از علامت β برای نشان دادن سطح تماس بین دو ستون منشور و از علامت \leftrightarrow برای نشان دادن سطح تماس بین دو ردیف منشور استفاده شده است (شکل ۳-۱۰).

سه عبارت سمت چپ معادله ۳-۲۸، به ترتیب از چپ به راست، مقادیر اتلاف انرژی روی سطوح تماس ردیف به ردیف، سطوح تماس ستون به ستون و سطح لغزش را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۰: پلان نشان داده شده از یک الگوی تقسیم بندی برای یک توده شکسته سه بعدی [۲۶]



شکل ۳-۱۱: نمای ایزومتریک از الگوی تقسیم بندی برای یک توده شکسته سه بعدی [۲۶]

برای یک شیب سنگی یا خاکی که در معرض یک بار خارجی مانند T^0 قرار گرفته، تئوری مرز بالایی بیان می‌کند که زمانی تخریب سازه اتفاق می‌افتد که مقدار ضریب بارگذاری (η) که از رابطه زیر تعیین می‌شود، به مقدار کمینه خود برسد تا باعث تخریب سازه شود.

$$\eta = \frac{T^0 - T^*}{T^0} \quad (29-3)$$

پایداری یک شیب معمولاً بوسیله تعیین ضریب ایمنی F ارزیابی می‌شود، بدین صورت که مولفه‌های مقاومتی برشی شامل c' و ϕ' تا جاییکه سازه در یک حالت تعادل حدی قرار گیرد، کاهش می‌یابند. مولفه‌های کاهش داده شده c'_e و ϕ'_e توسط روابط زیر تعیین می‌گردند.

$$c'_e = c'/F \quad (30-3)$$

$$\tan \phi'_e = \tan \phi'_e / F \quad (31-3)$$

بنابراین مقدار کمینه ضریب ایمنی (F) مربوط به حالت شکست بحرانی، بوسیله معادله زیر تعریف می‌شود.

$$\sum D_{i \leftrightarrow j, e}^* + \sum D_{i \beta j, e}^* + \sum D_{i, j, e}^* = WW^* + T^0 V^* \quad (32-3)$$

سه مولفه سمت چپ معادله ۳-۳۲ که با اندیس e همراه هستند، بر مبنای پارامترهای مقاومتی کاهش یافته بیان شده در معادلات ۳-۳۰ و ۳-۳۱، تعیین می‌گردند.

۳-۵-۲-۲- سرعت پلاستیک و اتلاف انرژی

روش حل مرز بالایی که پیش از این توصیف شد، با بکار بردن معادله ۳-۲۷ و اعمال فرض توسعه سرعت پلاستیک روی سطح تسلیم موهر- کلمب که توسط معادله زیر نشان داده می‌شود، بدست آمده است.

$$f(\tau, \sigma) = \tau - c'_e - (\sigma - u) \tan \phi'_e = 0 \quad (33-3)$$

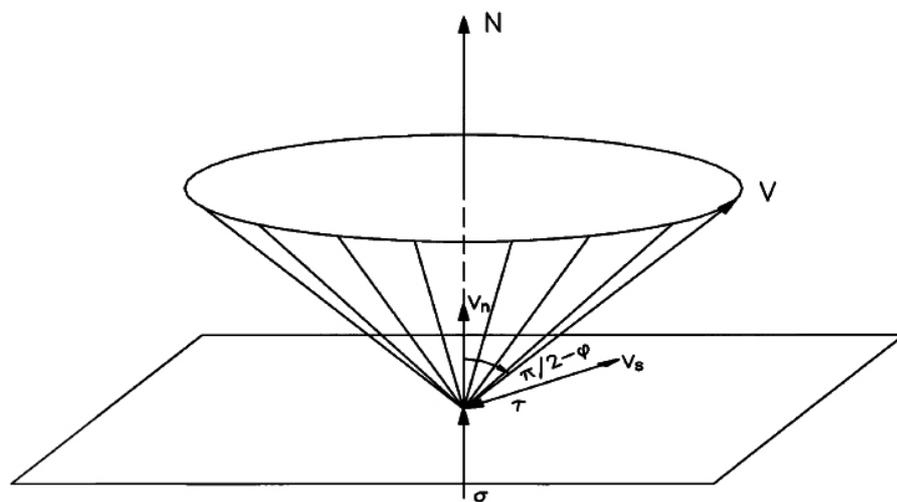
که در آن، σ و τ به ترتیب مقادیر تنش‌های برشی و نرمال اعمال شده روی سطح برش هستند و u مقدار فشار منفذی است. برای یک قانون جریان پیوسته مقادیر سرعت نرمال V_n و سرعت برشی (مماسی) V_s از رابطه زیر پیروی می‌کنند.

$$\frac{V_n}{V_s} = \frac{\partial f / \partial \sigma}{\partial f / \partial \tau} = -\tan \phi'_e \quad (34-3)$$

این رابطه به این نکته اشاره دارد که برای ماده‌ای با معیار موهر-کلمب، سرعت پلاستیک تحت زاویه نسبت به سطح شکست قرار دارد. از دیدگاه سه بعدی، بردار سرعت V بر سطح یک مخروط معکوس مماس است که این مخروط از چرخش بدور بردار نرمال صفحه شکست با زاویه داخلی $(\frac{\pi}{2} - \phi'_e)$ بدست می‌آید (شکل ۳-۱۲):

$$\Phi(V, N) = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi'_e\right) = \sin \phi'_e \quad (35-3)$$

که در آن N بردار نرمال سطح شکست است.



شکل ۳-۱۲: امتداد بردارهای سرعت پلاستیک تعیین شده بر مبنای قانون جریان پیوسته [۲۶]

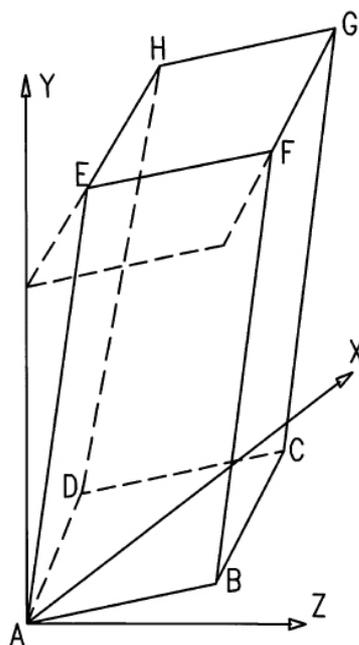
کار انجام شده توسط تنش‌های داخلی روی مساحت واحد از سطح شکست را می‌توان بدون تعیین این تنش‌ها که بطور کلی ناشناخته هستند، از رابطه زیر بدست آورد.

$$dD = \tau V_s + \sigma V_n = (\tau \cos \phi'_e + \sigma \sin \phi'_e) V = (c \cos \phi'_e - u \sin \phi'_e) V \quad (36-3)$$

در معادله ۳-۳۶ عبارت $c \cos \phi'_e V$ مقدار اتلاف انرژی داخلی است که بوسیله تنش‌های موثر ایجاد می‌شود و عبارت $u \sin \phi'_e V$ کار انجام شده توسط فشار آب منفذی است که به صورت اتلاف انرژی منفی عمل می‌کند [۲۶].

۳-۵-۲-۳- حوزه سرعت در سه بعد

مشابه روش تعادل حدی دو بعدی، توده شکسته به تعدادی منشور با سطوح داخلی مایل تقسیم بندی می‌شود. فرض بر این است که در داخل توده شکسته، صفحه‌ای به نام صفحه خنثی وجود دارد که در آن حرکت جانبی نسبت به جهت اصلی لغزش وجود ندارد. برای یک توده شکسته متقارن، صفحه خنثی، صفحه عمودی تقارن توده است که امتداد آن در جهت لغزش است. دستگاه مختصات xyz بر روی این صفحه بگونه‌ای قرار می‌گیرد که محور oy در جهت خلاف جاذبه و ox عمود بر oy و خلاف جهت لغزش است و oz با استفاده از قانون دست راست تعیین می‌شود. در صفحه خنثی فرض می‌شود که مولفه عمودی بردار سرعت در هر نقطه در جهت z صفر و یا ثابت است. هر منشور به صورت شش وجهی، همانگونه که در شکل ۳-۱۳ ملاحظه می‌گردد، در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳-۱۳: یک منشور شش وجهی [۲۶]

در تصویر از بالا، n ردیف منشور در جهت ox وجود دارد و تعداد m^+ و m^- ستون منشور، به ترتیب، در جهات مثبت oz و منفی oz وجود دارد (شکل ۳-۱۰). اولین ستون از منشورها در راستای ox که در صفحه xoy واقع می‌باشد، دارای محورهایی با شماره $i=0$ است. به همین ترتیب منشورهای دومین ستون در جهت مثبت محور oz با $i=1$ شماره‌گذاری می‌شوند. به عبارتی در جهت مثبت محور oz ، $i=0,1,\dots,m^+$ و در جهت منفی محور oz ، $i=0,-1,\dots,m^-$ تغییر خواهد کرد. منشورها بر روی صفحه خنثی در جهت محور ox از ۱ تا n شماره‌گذاری می‌شوند. منشوری که در i امین ستون در جهت oz و i امین ردیف در راستای ox قرار دارد، با زیرنویس i, j شماره‌گذاری می‌شود.

سرعت منشور با شماره زیرنویس (i, j) با $V_{i,j}$ نشان داده می‌شود. سرعت نسبی منشور i, j نسبت به ستون $i-1, j$ (یعنی سطح تماس ستون به ستون) با $V_{i\beta j}$ مشخص می‌شود و همچنین سرعت نسبی منشور i, j نسبت به منشور $i, j-1$ با $V_{i\leftrightarrow j}$ نشان داده می‌شود (شکل ۳-۱۰). سرعت یک منشور نسبت به همسایگی‌های بلاواسطه‌اش بر مبنای قانون جریان و سازگاری جابجایی محاسبه می‌شود [۲۶]. در این مورد سه حالت مختلف باید در نظر گرفته شود:

حالت (۱) میدان سرعت منشورهای واقع بر صفحه خنثی:

روش محاسبه سرعت سری ستون‌های $i=0$ یعنی آندسته از منشورهایی که در صفحه xoy قرار دارند، مشابه روش استفاده شده در شیوه انرژی دو بعدی است. در این حالت انحراف زاویه بین $V_{i,j}$ و صفحه xoy برای همه منشورها، صفر یا ثابت است. مقادیر $V_{0,1}$ و $V_{0,j}$ و $V_{0\leftrightarrow j}$ را می‌توان با استفاده از روش انرژی تعیین نمود [۲۶].

حالت (۲) میدان سرعت منشورهای دور از لبه‌های توده شکسته:

سرعت $V_{i,j}$ مربوط به منشور i, j ام بر مبنای سرعت ستون‌های همسایه سمت چپ و پایینی آن، $V_{i-1,j}$ و $V_{i,j-1}$ محاسبه می‌شود (شکل ۳-۱۴-الف). در این حالت معادلات زیر برقرار است.

$$\Phi(V_{i,j}, N_{i,j}) = \sin \phi'_{i,j} \quad (37-3)$$

$$\Phi(V_{i\beta j}, N_{i\beta j}) = \sin \phi'_{i\beta j} \quad (38-3)$$

$$\Phi(V_{i\leftrightarrow j}, N_{i\leftrightarrow j}) = \sin \phi'_{i\leftrightarrow j} \quad (39-3)$$

که در آنها مقدار $\Phi(N, V)$ از رابطه زیر تعیین می‌شود:

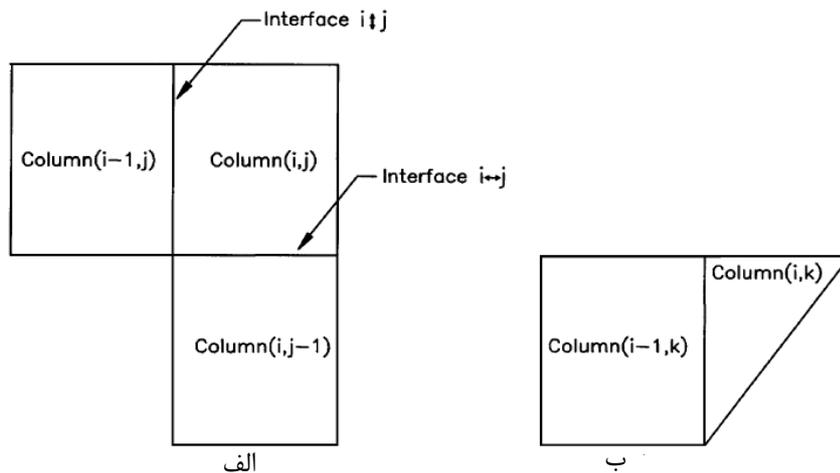
$$\Phi(V, N) = \frac{X.L + Y.M + Z.N}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \cdot \sqrt{L^2 + M^2 + N^2}} \quad (40-3)$$

در این معادله مقادیر X, Y, Z مولفه‌های سرعت V هستند و مقادیر L, M, N کسینوس‌های هادی بردار نرمال صفحه شکست به ترتیب نسبت به محورهای x, y, z هستند.

از آنجا که مقادیر $V_{i,j-1}$ و $V_{i-1,j}$ مشخص (معلوم) هستند، معادلات ۳-۳۷ تا ۳-۳۹ برای تعیین مولفه‌های $V_{i,j}$ طبق روابط زیر ساده می‌شوند [۲۶].

$$V_{i\leftrightarrow j} = V_{i,j} - V_{i,j-1} \quad (41-3)$$

$$V_{i\beta j} = V_{i,j} - V_{i-1,j} \quad (42-3)$$



شکل ۳-۱۴: محاسبه سرعت یک منشور الف) حالت ۲ ب) حالت ۳ [۲۶]

حالت ۳) سرعت یک ستون واقع در لبه توده شکسته:

اولین منشور از سری منشورها، با شماره i, k که به عنوان منشور لبه به حساب می‌آید، در نظر گرفته می‌شود (شکل ۳-۱۴ ب). این منشور تنها دارای یک همسایگی بلاواسطه در سمت چپ خود با شماره $i-1, k$ است و هیچ همسایه بلاواسطه‌ی پایینی‌ای ندارد. سرعت $V_{i,k}$ را تنها می‌توان بر مبنای سرعت معلوم $V_{i-1,k}$ تعیین نمود. در این مورد دو معادله ۳-۳۷ و ۳-۳۸ برای تعیین $V_{i,k}$ کافی نیستند زیرا $V_{i,k}$ دارای سه مولفه مجهول است. بنابراین یک شرط اضافی باید تعریف شود تا بتوان بر مبنای آن سرعت اولین منشور پایینی سری ستون‌ها را تعیین نمود.

فرض شود که اندازه سرعت $V_{i,k}$ منشور i ام را می‌توان بر اساس ضریب (ξ_i) از منشور $i-1$ ام تعیین نمود، یعنی:

$$|V_{i,k}| = \xi_i |V_{i-1,k}| \quad (43-3)$$

اکنون با استفاده از این فرض اضافی می‌توان سرعت منشور لبه هر یک از سری منشورها را تعیین نمود. اثبات شده است که با قراردادن $\xi_i = 1$ می‌توان به راه حلی با دقت کافی دست یافت [۲۶].

با توجه به آنچه گفته شد می‌توان فرآیند زیر را برای تعیین تمامی میدان‌های سرعت تعریف نمود.

۱) سرعت اولین منشور در صفحه خنثی یعنی $V_{0,1}$ ، برابر با واحد قرار داده می‌شود. $V_{0,2}$ و $V_{0,2}$ را می‌توان بوسیله فرآیند توضیح داده شده در حالت ۱ محاسبه نمود. ادامه فرآیند منجر به تعیین مقادیر $V_{0,j}$ و $V_{0,j}$ برای $j = 2, \dots, n$ خواهد شد.

۲) محاسبه مقدار $V_{1,k}$ (سرعت منشور واقع در لبه با شماره $(1, k)$) بوسیله $V_{0,k}$ ، بر مبنای فرآیند حالت ۳.

۳) محاسبه مقادیر سرعت $V_{1,j}$ ، $V_{1\beta j}$ و $V_{1\leftrightarrow j}$ ($j = k, k+1, \dots$) با شروع از $V_{1,k}$ برای منشورهای سری $i=1$ بر مبنای فرآیند حالت ۲.

۴) محاسبه سرعت‌های سری ستون‌های سمت راست صفحه خنثی، یعنی $i = 2, \dots, m^+$ بوسیله فرآیندی مشابه آنچه در مراحل ۲ و ۳ بیان شد.

۵) محاسبه سرعت‌های سری ستون‌های سمت چپ صفحه خنثی، یعنی $i = -1, \dots, m^-$ با تکرار مراحل ۲ تا ۴ برای آنها.

۳-۵-۲-۴- روش انرژی

زمانی که میدان سرعت معلوم باشد، اتلاف انرژی روی سطوح لغزش و سطوح تماس مشترک بین برش‌ها که توسط معادله ۳-۳۲ بیان شد را می‌توان به راحتی توسط معادله ۳-۳۶ تعیین نمود. سپس می‌توان T^* یا ضریب بار η را که بوسیله معادله ۳-۲۹ تعریف شده، بدست آورد. معادله ۳-۳۲ برای تعیین مقدار F ، یک فرآیند تکراری است. همانند روش دو بعدی، فرآیند تکرار با فرض یکسری از مقادیر برای ضریب ایمنی (F) و سپس محاسبه ضرایب بارگذاری متناظر آنها (η) انجام خواهد شد. روش حل عددی نیوتن-رافسون برای یافتن آن مقدار از F که مقدار $\eta = 0$ را تولید می‌کند، پیشنهاد می‌گردد. بطور کلی در حل عددی به روش نیوتن-رافسون، از آنجا که فرآیند مذکور تنها شامل یک متغیر است، همگرایی اهمیت چندانی ندارد [۲۶].

۳-۵-۲-۵- روش‌های عددی

تحلیل پایداری شیب در حالت سه بعدی که تا اینجا ارائه شد در واقع روشی ساده و سریع برای یافتن ضریب اطمینان مربوط به سطح لغزش و سطوح تماس مشترک شیب‌دار خاص و مشخص است. با این حال، کاربرد این روش در مسائل عملی، نیازمند بکارگیری راه‌حلهایی عددی برای رفع مشکلات زیر است:

الف) مدل‌سازی ریاضی سطوح شکست و سطوح تماس مشترک در سه بعد

سطح شکست یک زمین لغزش طبیعی معمولاً شکل پیچیده‌ای دارد و اغلب توسط عوارض زمین شناسی کنترل می‌شود. سطوح شکست لزوماً کروی و یا مارپیچ نیستند و ممکن است قسمت‌هایی از صفحه لغزشی و یا سطوح تماس مشترک شامل بعضی ساختارهای زمین شناسی مسطح باشند. مدل ریاضی سطوح شکست باید به گونه‌ای تعریف شده باشد که انعطاف‌پذیری زیادی برای شبیه‌سازی یک

مدل شکست کلی داشته و شامل پارامترهای کنترل کننده به منظور کاهش حجم محاسبات برای بدست آوردن سطح بحرانی و ضریب اطمینان کمینه، باشد. تقسیم یک توده شکسته به منشورهایی با سطوح تماس مشترک شیب‌دار و اتخاذ سیستم عددی مناسب برای شناسایی هر قسمت از سطح لغزش و سطوح تماس مشترک، فرآیند را پیچیده‌تر خواهد کرد. در یک نمونه واقعی، در طی فرآیند بهینه‌سازی، تقسیم‌بندی توپوگرافی و هندسه سه بعدی شیب ممکن است نیاز به تکرار چندین هزار مرتبه‌ای داشته باشد، بنابراین سیستم عددی، باید منحصر به فرد و منطقی باشد تا بتوان توسط برنامه کامپیوتری به صورت خودکار این سیستم را ایجاد کرد.

ب) روش‌های بهینه‌سازی به کار گرفته شده در یافتن صفحه لغزش بحرانی

تئوری مرز بالای روشی است بر اساس محاسبه ضریب اطمینان‌های مورد نیاز برای مدل‌های شکست احتمالی، تا از میان آنها کمترین ضریب اطمینان بدست آید. شکستی که ایجاد می‌شود باعث تخمین حد بالای ضریب اطمینان می‌شود. این فرآیند حتی برای حالت دو بعدی می‌تواند پیچیده باشد. در حالت سه بعدی، درجات آزادی که باید بهینه شوند به طور قابل توجهی افزایش می‌یابند که این خود به طور قابل ملاحظه‌ای باعث پیچیدگی بیشتر در یافتن راه حل بهینه می‌شود. روش‌های بهینه‌سازی قابل کاربرد به دو نوع قطعی و احتمالاتی تقسیم می‌شوند. از روش‌های قطعی می‌توان به روش‌های سیمپلکس و پاول و نیوتن اشاره نمود. یکی از روش‌های احتمالاتی که به تازگی معرفی شده و مورد استفاده قرار گرفته است "روش ذوب شبیه‌سازی شده"^{۴۶} است [۲۷]. در حال حاضر سطوح تماس مشترک ستون به ستون در فرآیند بهینه‌سازی فقط مجاز به کج شدن تحت زاویه یکسان (برابر) هستند که این خود محدودیتی برای شبیه‌سازی درزه‌های واقعی در موارد عملی است [۲۷].

ج) ارائه گرافیکی ورودی و خروجی

تفسیر و بیان اطلاعات زمین شناسی و هندسی و ارائه نتایج تحلیل، قسمت اصلی توسعه روش است. تجربه نشان داده است که پردازش اطلاعات مقطع به مقطع روشی بسیار مناسب و قابل اطمینان برای

⁴⁶. Simulated Annealing Method

تفسیر ورودی و خروجی است. این کار اجازه می‌دهد تا کارهای دو بعدی قبلی که به طور قابل ملاحظه‌ای تصحیح و به‌روز شده‌اند را مستقیماً به برنامه سه بعدی تبدیل کرد. محققین معتقد هستند که این مشکلات باید از طریق کاربرد مداوم این روش در مسائل عملی برطرف شود [۲۷].

۳-۵-۲-۶- محدودیت‌های کاربرد روش مرز بالایی در این تحقیق

در بخش ۳-۵-۲ نشان داده شد که توسعه روش‌های قطاعی دو بعدی قدیمی به روشی با منشورهای سه بعدی امکان پذیر است. میدان سرعت را می‌توان با یک روش ساده با استفاده از فرضیات محدودی تعیین نمود. جواب در این روش با استفاده از معادله تعادل کار و انرژی بدست می‌آید و با کاربرد تئوری پلاستیسیته به شرط اینکه میدان سرعت محاسبه شده، مکانیزم تغییر شکل پلاستیک واقعی را از خود نشان دهد، تایید می‌شود. این روش برای کاربرد در مسائل عملی در نهایت به یک راه حل عددی منجر می‌شود.

از مشکلات این روش که مانع از بکارگیری آن در این تحقیق به منظور در نظر گرفتن نیروهای بین بلوکی می‌شود، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- روش مرز بالایی در نهایت منجر به حلی عددی می‌شود که در این صورت از حوزه ساده روش‌های استاتیکی خارج می‌شود و مساله وارد پیچیدگی‌های خاص مسائل عددی می‌شود.

- شبیه‌سازی درزه‌ها در حال حاضر فقط در یک بعد می‌تواند با زوایای مختلف صورت گیرد و در بعد دیگر ملزم به داشتن زوایای یکسان برای درزه‌ها است.

- این روش در جایکه تحلیل سریع مورد نیاز باشد، قابل کاربرد نیست.

فصل چهارم

مدل سازی هندسی سه بعدی

بلوک تکنیکی III معدن چغارت

۴-۱- کلیات

در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی معمولاً ناپیوستگی‌هایی چون لایه‌بندی، گسل و دسته درزه‌ها نقش اصلی را در کنترل پایداری توده سنگ دارند و باعث بلوکی شدن توده سنگ می‌شوند. در چنین شرایطی موثرترین روش برای بررسی پایداری شیروانی، فرض ناپیوسته بودن محیط است که در آن بلوک‌های مجاور در ارتباط با یکدیگر دچار لغزش یا جابجایی می‌شوند. متداول‌ترین روش تحلیل پایداری شیب، روش تحلیل تعادل حدی است. برای کاربرد این روش، ابتدا باید بلوک‌ها از لحاظ هندسی کاملاً مشخص و به صورت چند وجهی تعریف شده باشند [۷].

در شبیه‌سازی هندسی توده سنگ، سعی بر این است که ساختارهای اصلی زمین شناسی توده سنگ، شناخته شده و ویژگی‌های هندسی آن اندازه‌گیری و با توجه به این ویژگی‌ها، موقعیت آنها به بهترین وجه و با بیشترین تطابق با واقعیت، مکان‌یابی شوند. بدین ترتیب با شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها و تطابق آنها با بلوک بزرگ توده، می‌توان یک مجموعه بلوکی را مدل‌سازی نمود و نهایتاً امکان ساخت مدل سازی‌های مکانیکی و تحلیل‌های پایداری را فراهم نمود.

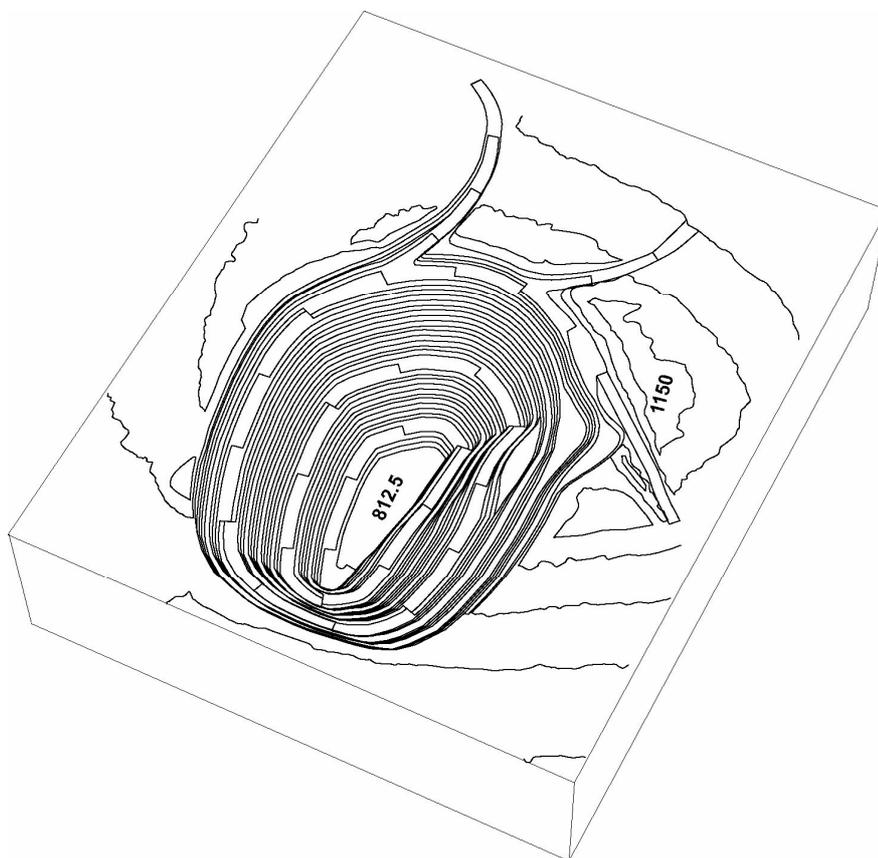
مدل هندسی سه بعدی توده‌های سنگی شامل مجموعه بلوک‌های ژئوتکنیکی شبیه‌سازی شده توده می‌باشد که با شبیه‌سازی محدوده مدل و مدل‌سازی هندسی ناپیوستگی‌های موجود، به روش‌های قطعی، آماری و زمین آماری ایجاد می‌گردد.

در این فصل، مراحل ایجاد مدل هندسی بلوک تکتونیکی II معدن چغارت به عنوان مورد مطالعاتی این تحقیق ارائه شده است.

۴-۲- شبیه‌سازی محدوده مدل

اولین قدم در مدل‌سازی هندسی، شناخت محدوده منطقه مورد نظر و توپوگرافی آن است. توپوگرافی معدن چغارت قبل از استخراج، تپه مانند بوده و حدود ۱۵۰ متر از سطح زمین مجاور خود بیرون زدگی داشته است. در شکل ۴-۱ آخرین محدوده نهایی معدن که در سال ۱۳۷۳ توسط کارشناسان

دفتر طراحی معدن طراحی شده، نشان داده شده است. بالاترین تراز این محدوده در تراز ۱۱۵۰ متری و کف آن در تراز ۸۱۲/۵ متر قرار دارد. این معدن تا تراز ۱۱۰۰ متری دارای پله‌های عملیاتی ۱۰ متری و پله‌های نهایی ۳۰ متری بوده و با عمیق شدن معدن به علت نیاز به افزایش تولید، ارتفاع پله‌های عملیاتی به ۱۲،۵ متر و ارتفاع پله‌های نهایی به ۳۷،۵ متر افزایش یافته است. شیب نهایی دیواره با جانمایی پله‌های ایمنی به صورت هر سه پله یک بار به عرض ۱۰ تا ۱۲،۵ متر و جاده‌هایی با عرض ۲۰ متر طراحی شده است. با این وضعیت هندسی، دیواره‌ها با زوایای شیب حدود ۴۲ تا ۵۲ درجه شکل می‌گیرند [۲۸].

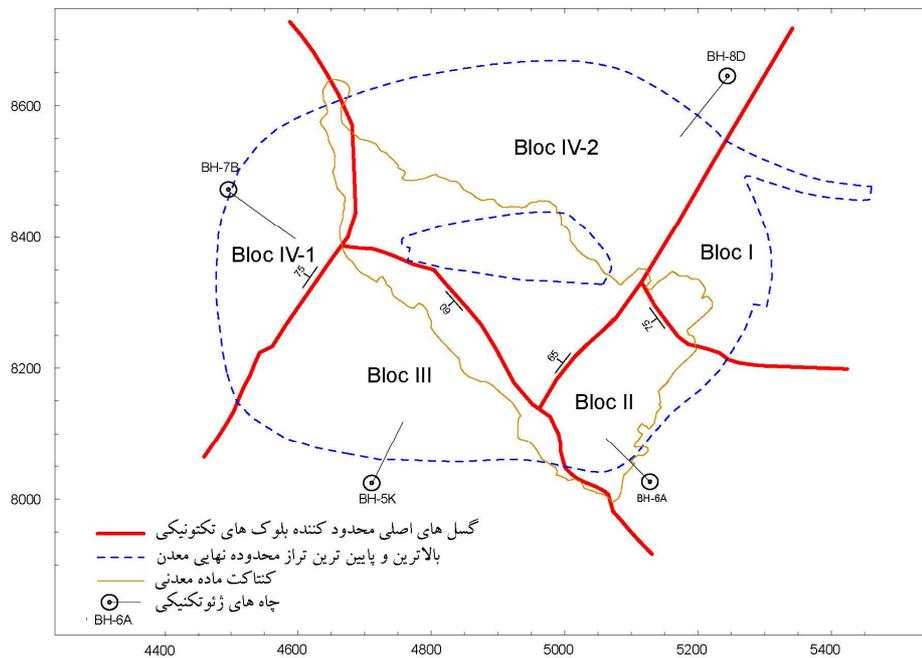


شکل ۴-۱: محدوده نهایی پیت معدن سنگ آهن چغارت [۲۸]

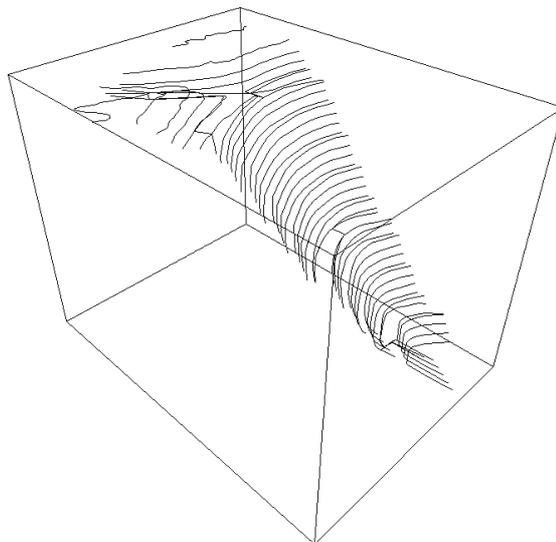
۴-۲-۱- بلوک تکتونیکی شماره II چغارت

براساس مطالعات زمین‌شناسی و تکتونیک اولیه و با توجه به گسل‌های اصلی منطقه، توده سنگ معدن چغارت به چهار بلوک تکتونیکی تقسیم شده است. بلوک چهارم، خود به دلیل وجود اختلاف در

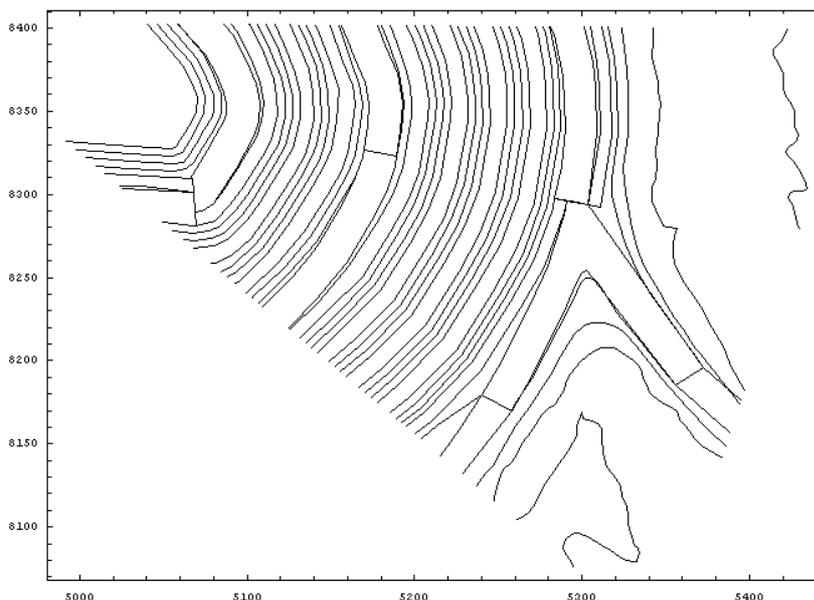
بعضی از مشخصات، به بلوک‌های ۱-۴ و ۲-۴ تقسیم شده است. این تقسیم‌بندی بدون در نظر گرفتن دیگر ساختارهای زمین‌شناسی مانند درزه، لایه‌بندی، شیستوزیته، دگرشیبی و غیره که عوامل ساختاری غالب پس از گسله‌های اصلی در توده سنگ‌های درزه‌دار هستند، انجام شده است. در شکل ۲-۴ موقعیت بلوک‌های تکتونیکی معدن و در شکل ۳-۴ نمایی سه بعدی از بلوک II و در شکل ۴-۴ پلان این بلوک نشان داده شده است [۲۹].



شکل ۲-۴: محدوده بلوک‌بندی تکتونیکی پیت معدن چگارت [۲۹]



شکل ۳-۴: نمایی سه بعدی از بلوک تکتونیکی II معدن چگارت [۲۹]



شکل ۴-۴: نمایی دو بعدی از بلوک تکتونیکی II معدن چغارت [۲۹]

۳-۴- مدل سازی هندسی ناپیوستگی‌ها

از نظر هندسی، ناپیوستگی‌ها به عنوان یک جدایش در سنگ دست نخورده محسوب می‌شوند که در دو بعد توسعه بیشتری یافته‌اند.

ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها به طور کلی به دو دسته هندسی و مکانیکی تقسیم می‌شوند. از ویژگی‌های مکانیکی ناپیوستگی‌ها می‌توان به زاویه اصطکاک سطح ناپیوستگی، JRC ^{۴۷}، درجه (میزان) پایایی و JCS ^{۴۸} اشاره کرد. این ویژگی‌ها در ساخت مدل مکانیکی بکار می‌روند. در فصل پنجم نحوه ایجاد مدل مکانیکی با استفاده از مدل هندسی و مشخصات مکانیکی ناپیوستگی‌ها بیان می‌شود.

مهمترین ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها شامل گسترش، جانمایی، فاصله‌داری، شیب و جهت شیب هستند که برای ایجاد مدل هندسی از این پنج پارامتر استفاده می‌شود. سطح آگاهی و شناخت از پارامترهای هندسی بر اساس امکان برداشت برجای آنها متغیر است. به عنوان مثال، گودمن^{۴۹} نظر خود را در مورد پارامترهایی چون جهت‌داری، گسترش و جانمایی ناپیوستگی‌ها مطابق جدول ۴-۱

⁴⁷ . Joint Roughness Coefficient

⁴⁸ . Joint Compressive Strength

⁴⁹ . Goodman

بیان نموده است. دسترسی به پارامترهایی چون جانمایی و گسترش ناپیوستگی‌ها به منظور تعیین و برآورد پارامترهای معرف درزه، مشکل‌تر از سایر پارامترها است. در ادامه مشخصات هندسی ناپیوستگی‌هایی که برای ایجاد مدل هندسی بلوک تکتونیکی II چگارت به کار برده شده‌اند و چگونگی تعیین این مشخصات بیان شده است.

جدول ۴-۱: سطح آگاهی و شناخت ممکن از درزه‌ها

ردیف	پارامترهای معرف درزه	سطح شناخت ممکن
۱	جهت‌داری	رضایت بخش
۲	فاصله‌داری	رضایت بخش با نواقص
۳	ابعاد (گسترش)	ضعیف
۴	جانمایی	تقریباً صفر

۴-۳-۱- گسترش ناپیوستگی‌ها

منظور از گسترش، طول اثر ناپیوستگی است که در یک رخنمون مشاهده می‌شود. از روی پایایی می‌توان معیاری تقریبی از گسترش فضایی یا طول رسوخ یک ناپیوستگی را به دست آورد. ختم ناپیوستگی در سنگ متراکم و سخت یا منتهی شدن به ناپیوستگی‌های دیگر پایایی را کاهش می‌دهد. در این تحقیق، گسترش ناپیوستگی‌ها نامحدود فرض شده است.

۴-۳-۲- جانمایی ناپیوستگی‌ها

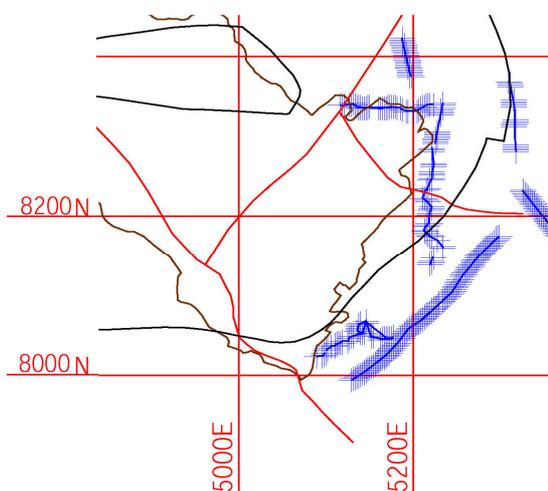
ساختار اصلی توده سنگ‌های درزه‌دار با جانمایی ناپیوستگی‌ها تعیین می‌شود. یکی از روش‌های مدل‌سازی موقعیت درزه که بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از توزیع پواسون است. در این روش، شبیه‌سازی از مرکز مختصات $(0,0,0)$ شروع و در جهت عمود بر جهت‌داری متوسط دسته درزه ادامه می‌یابد. طول هر گام شبیه‌سازی در این جهت (فاصله‌داری) بر اساس توابع توزیع پواسون تعیین می‌شود. تفاوت شبیه‌سازی جانمایی ناپیوستگی‌ها در این تحقیق با روش ذکر شده در این است که به جای کاربرد توابع توزیع از مقادیر میانگین فاصله‌داری، استفاده شده است.

۳-۳-۴- شیب، جهت شیب و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها

این مشخصات ناپیوستگی‌ها با انجام مطالعات درزه‌نگاری و طی مراحل زیر مشخص می‌شود.

۳-۳-۴-۱- برداشت درزه‌ها

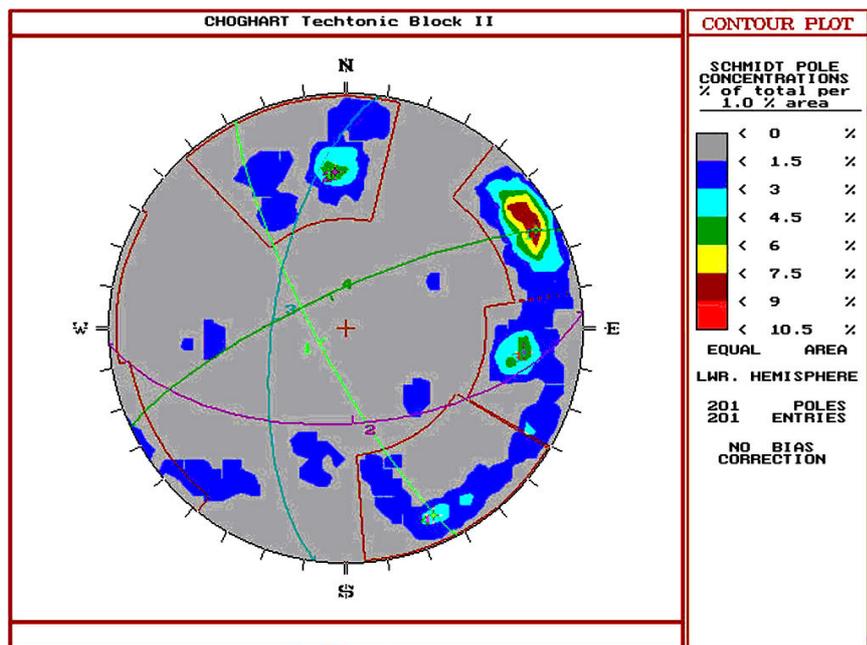
عملیات برداشت درزه در امتداد خطوط برداشت درزه‌ها در بلوک تکتونیکی II معدن چغارت که در شکل ۴-۵ نشان داده شده، انجام شده است. داده‌های مورد نیاز از جبهه‌کارها در ترازهای ارتفاعی مختلف و در ترانسه‌ها برداشت شده و پارامترهای هندسی درزه‌ها شامل جهت شیب، شیب و فاصله-داری با استفاده از کمپاس، متر و دوربین نقشه‌برداری اندازه‌گیری شده‌اند.



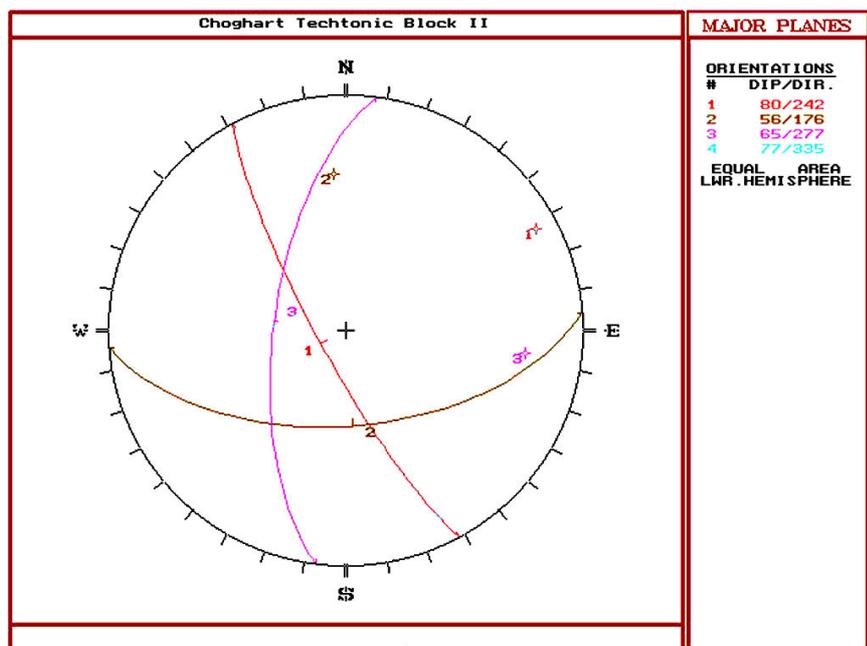
شکل ۴-۵: خطوط برداشت در بلوک II معدن چغارت [۲۹]

۳-۳-۴-۲- ترسیم و دسته‌بندی درزه‌ها

به منظور دسته‌بندی و تفکیک دسته درزه‌ها و ثبت مشخصات هر کدام از آنها، اطلاعات برداشت شده در بلوک II، توسط نرم افزار *Dips* تجزیه و تحلیل شده است. در بلوک شماره II، ۸۸۰ درزه برداشت شده است. با توجه به تحلیل‌های انجام شده در نرم افزار مذکور، ۴ تمرکز درزه تشخیص داده شده (شکل ۴-۶-الف) که دسته درزه چهارم قابل صرف‌نظر کردن است. بنابراین تعداد سه دسته درزه برای این بلوک قابل تشخیص است که در شکل ۴-۶-ب نشان داده شده است [۳۰].



a



b

شکل ۴-۶: کنتور تمرکز درزه‌ها و تفکیک آنها در بلوک تکتونیکی II [۳۰]

۴-۳-۳-۳- تحلیل آماری

در این بخش مشخصات شیب، جهت شیب و فاصله‌داری هر دسته درزه به صورت آماری تحلیل شده و پارامترهای آماری این دسته درزه‌ها در جدول ۴-۲ ارائه شده است. بررسی نرمال بودن داده‌ها توسط

آزمون اندرسون- دارلینگ⁵⁰ انجام گرفته است. در این آزمون ضریبی با عنوان P تعریف می‌شود به طوری که اگر این ضریب بزرگتر از $0/005$ باشد، توزیع داده‌ها نرمال فرض می‌شود. همانطور که از اطلاعات جدول نیز ملاحظه می‌شود در مورد شیب و جهت شیب تابع، توزیع به صورت نرمال است ولی در مورد فاصله‌داری این تابع به صورت نمایی است [۳۰].

جدول ۴-۲: نتایج تحلیل آماری دسته درزه‌های بلوک شماره دو [۳۰]

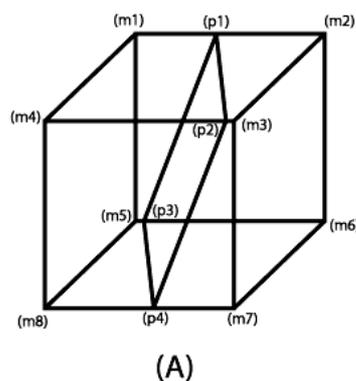
دسته درزه سه			دسته درزه دو			دسته درزه یک			پارامتر
شیب (درجه)	امتداد شیب (درجه)	فاصله داری (متر)	شیب (درجه)	امتداد شیب (درجه)	فاصله داری (متر)	شیب (درجه)	امتداد شیب (درجه)	فاصله داری (متر)	
۵۱/۰۴	۷۷/۹۶	۲/۸۹۵	۵۳/۴۷۳	۳۰۵/۲۰	۲/۰۳	۵۹/۳۵	۲۳۷/۴۳	۲/۲۰۴	میانگین
۷/۵۹	۲۸/۸۶	۳/۱۲۷	۱۴/۸۷۹	۲۰/۷۵	۲/۳۵	۱۳/۶۶	۱۱/۸۶	۲/۴۵۹	انحراف معیار
۵۷/۶۰	۸۳۳/۱۴	۹/۷۸	۲۲۱/۳۷	۴۳۰/۷۴	۵/۵۵	۱۸۶/۵۶	۱۴۰/۷۰	۶/۰۴۸	واریانس
-۰/۰۶۵	۰/۱۴	۱/۶۷	-۰/۲۴۸	-۰/۰۰۳	۲/۲۲۹	-۰/۱۷۴	-۰/۳۷۶	۱/۶۵۶	چولگی
-۰/۹۷	-۱/۰۵۷	۲/۳۲	-۰/۴۷۹	-۰/۸۲۵	۵/۶۵۷	-۰/۷۱۲	-۰/۳۶۹	۱/۹۳۴	کشیدگی
۰/۱۳۹	۰/۱۰۷	<۰/۰۰۵	۰/۰۲۳	۰/۰۱۳	<۰/۰۰۵	۰/۰۰۶	۰/۰۱۲	<۰/۰۰۵	مقدار P

۴-۴- مدل سازی هندسی سه بعدی

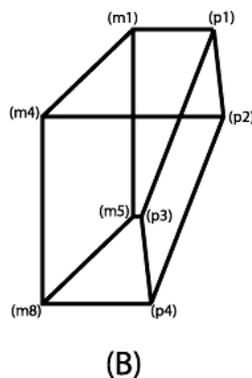
محدوده مدل و مشخصات هندسی ناپیوستگی‌های موجود در محدوده مورد نظر شامل شیب، جهت شیب، فاصله‌داری، گسترش و جانمایی، اطلاعات مورد نیاز برای ایجاد یک مدل هندسی است. برای ایجاد مدل هندسی، مدل اولیه توسط ناپیوستگی‌ها قطع داده می‌شود و بدین ترتیب مدل به بلوک-های کوچکتری تقسیم می‌شود. مدل اولیه، یک چند وجهی محدب است که می‌توان آن را با فصل مشترک n صفحه (نیم فضا) و یک نقطه درونی تعریف نمود. همچنین این چند وجهی محدب می‌تواند توسط لیستی از گوشه‌ها معرفی شود که در آن هر نقطه از گوشه چند وجهی، فصل مشترک سه

⁵⁰ . Anderson-Darling

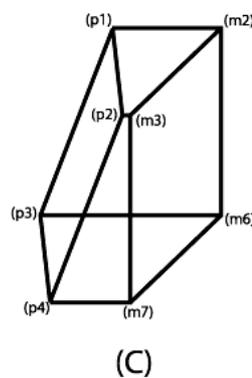
صفحه تشکیل دهنده آن چند وجهی است. همانطور که در شکل ۷-۴ نشان داده شده است، فرض می‌شود مدل چند وجهی محدب اولیه (بلوک A) با معادله شناخته شده یک صفحه، به دو بلوک B و C که هر یک از آنها یک چند وجهی محدب و قابل تعریف توسط نقاط گوشه‌های آن است، تقسیم شود. از برخورد هر صفحه با یک چند وجهی محدب، موقعیت گوشه‌های بلوک نسبت به صفحه در سه حالت قرار می‌گیرند: ۱- نقاط بالای صفحه، ۲- نقاط پایین صفحه و ۳- نقاط روی صفحه. الگوریتم هلیوت با توجه به این اصل و با کاربرد معادله صفحه، نقاط را از هم تفکیک می‌نماید. از ترکیب نقاط بالای صفحه و روی صفحه و نیز نقاط پایین صفحه و روی صفحه دو بلوک مجزا تشکیل می‌شود (شکل ۷-۴) [۳۱].



$$\text{Block (A)} = \{m1, m2, m3, m4, m5, m6, m7, m8, p1, p2, p3, p4\}$$



$$\text{Block (B)} = \{m1, m4, m5, m8, p1, p2, p3, p4\}$$



$$\text{Block (C)} = \{m2, m3, m6, m7, p1, p2, p3, p4\}$$

شکل ۷-۴: تقسیم یک بلوک به دو بلوک [۳۱]

در این روش صفحه P_i فضا را به دو نیم فضای H_i^+ و H_i^- تقسیم می‌کند که معادله این صفحه به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$a_i x + b_i y + c_i z - d = 0 \quad (۱-۴)$$

که در آن a_i ، b_i و c_i با کاربرد روابط زیر مشخص می‌شوند:

$$\begin{aligned} a_i &= \cos \theta \cos \phi \\ b_i &= \cos \theta \sin \phi \\ c_i &= -\sin \theta \end{aligned} \quad (۲-۴)$$

در این روابط θ معرف شیب و ϕ معرف جهت شیب صفحه است.

نقطه گوشه $m(x_m, y_m, z_m)$ متعلق به چند وجهی محدب اولیه، در صورتی که در شرط زیر صدق کند، در نیم فضای H_i^+ قرار دارد و متعلق به گوشه‌ی بلوک جدید B است.

$$a_i x_m + b_i y_m + c_i z_m > d_i \quad (۳-۴)$$

و در صورتی که نقطه $m(x_m, y_m, z_m)$ در شرط زیر صدق کند، در نیم فضای H_i^- قرار دارد و نقطه گوشه‌ی بلوک جدید C را تشکیل می‌دهد.

$$a_i x_m + b_i y_m + c_i z_m < d_i \quad (۴-۴)$$

اگر تمام نقاط گوشه متعلق به بلوک محدب اولیه در شروط ۳-۴ یا ۴-۴ صدق کنند، نتیجه می‌شود که صفحه P_i بلوک را قطع نمی‌کند.

نقاط گوشه جدید که متعلق به بلوک‌های بوجود آمده (یعنی B و C) و مشترک بین آنها است، فصل مشترک صفحه P_i و دو صفحه از بلوک اولیه، P_1 و P_2 است که با حل دستگاه سه معادله سه مجهول زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned} a_i x + b_i y + c_i z &= d_i \\ a_1 x + b_1 y + c_1 z &= d_1 \\ a_2 x + b_2 y + c_2 z &= d_2 \end{aligned} \quad (۵-۴)$$

با حل معادلات بالا برای تمام ترکیبات دوتایی از صفحات بلوک اولیه که با صفحه P_i قطع شده‌اند، تمام نقاط گوشه جدید یافت می‌شوند.

با اضافه شدن هر صفحه، بلوک یا بلوک‌های موجود در مدل چند وجهی محدب اولیه، به بلوک‌های کوچکتری تقسیم می‌شوند و این روند تا اضافه شدن آخرین صفحه ناپیوستگی ادامه می‌یابد. بدین ترتیب مدل هندسی که شامل بلوک‌های شبیه‌سازی شده در محدوده مدل اولیه است، ایجاد می‌شود. همانطور که قبلاً بیان شد مدل‌سازی هندسی ناپیوستگی‌ها معمولاً به سه روش قطعی و محدود، آماری و زمین آماری انجام می‌شود. در روش‌های آماری و زمین آماری از توابع توزیع مختلف برای شبیه‌سازی هر یک از مشخصات هندسی ناپیوستگی‌ها مانند شیب، جهت‌داری، فاصله‌داری، گسترش و جانمایی استفاده می‌شود.

در تحقیق حاضر برای اعتمادسنجی روش گروه‌های کلیدی سه بعدی از نرم افزار 3DEC استفاده شده است. در این نرم افزار تنها یک نوع تابع توزیع آماری از نوع با سقف ثابت⁵¹ تعریف شده و امکان استفاده از توزیع‌های آماری دیگر وجود ندارد، به همین دلیل در این تحقیق برای ایجاد تشابه و سازگاری بین دو مدل ساخته شده در دو نرم افزار *Matematica* و 3DEC، مدل‌سازی هندسی به روش قطعی و محدود انجام شده و از مقادیر میانگین آماری برای پارامترهای هندسی ناپیوستگی‌ها استفاده می‌شود.

در روش قطعی و محدود هندسه توده سنگ با تعداد محدودی درزه تعریف می‌شود که دارای گسترش نامحدود بوده و هر دسته درزه با جهت‌داری، شیب و فاصله‌داری تعریف می‌شود. در این روش، هر صفحه ناپیوستگی در فضای سه بعدی، توسط مختصات حداقل سه نقطه از آن، به طور قطعی مشخص می‌شود. روش مذکور بلوک‌هایی با ابعاد بیشینه را ایجاد خواهد کرد [۳۱].

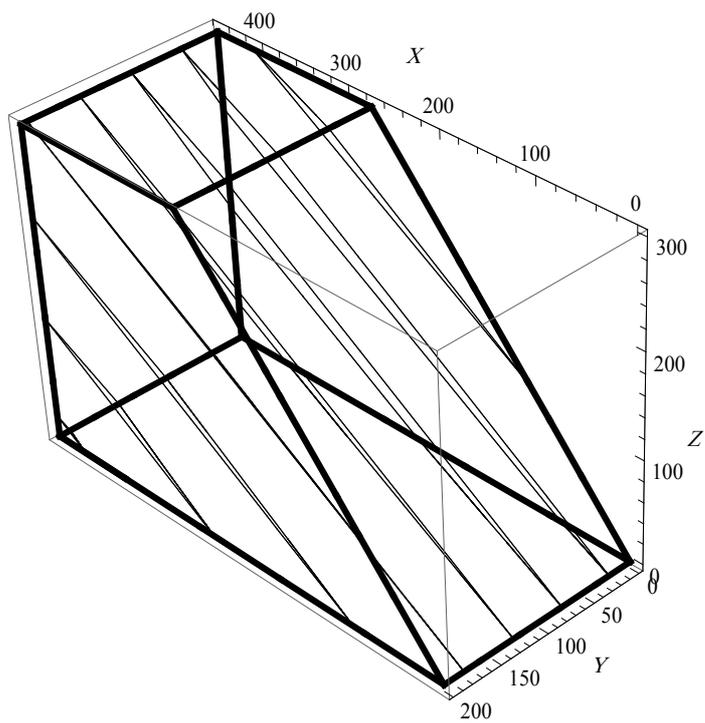
برای انجام مدل‌سازی هندسی به روش مذکور، یک برنامه کامپیوتری در محیط *Matematica* تهیه شده که در آن از برنامه کامپیوتری تهیه شده برای مدل‌سازی هندسی به روش آماری، استفاده شده است.

⁵¹ . Uniform

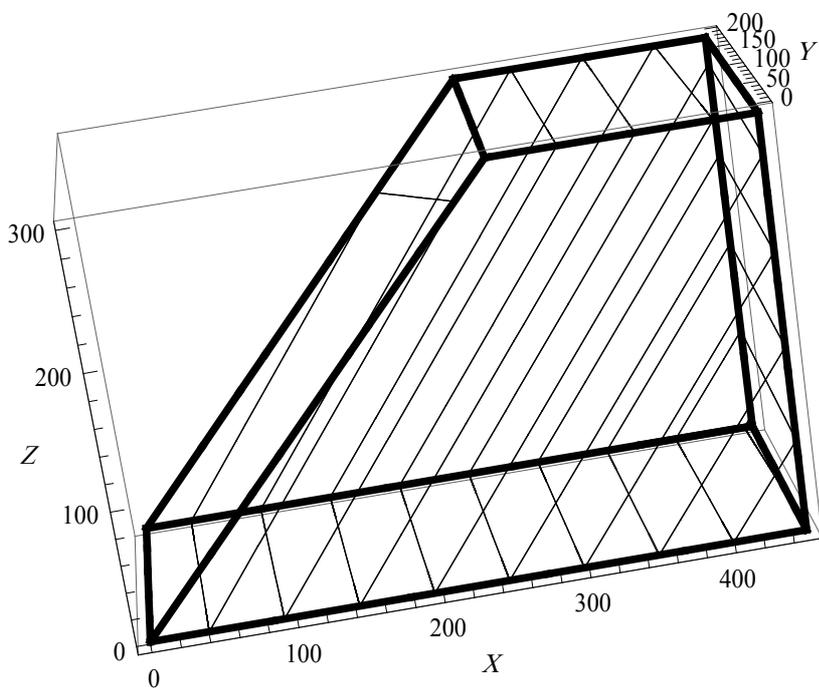
۴-۴-۱- مدل سازی هندسی سه بعدی بلوک II در محیط Mathematica

برای کاربرد برنامه مدل سازی هندسی تهیه شده باید محدوده بلوکی به صورت بلوکی محدب تعریف شود. به همین دلیل با توجه به ابعاد و شیب دیواره نهایی بلوک II که برابر ۴۸ درجه است، محدوده مورد نظر مدل سازی شده است. از تأثیر توپوگرافی سطح زمین به علت ناچیز بودن تغییرات، صرف نظر شده و سطح زمین به صورت افقی با ارتفاع ثابت مدل شده است. مشخصات دسته درزه‌ها به عنوان ورودی در برنامه تهیه شده به صورت {جهت شیب، شیب، فاصله‌داری، طول خط اسکن} می‌باشد. مدل هندسی برای انجام محاسبات تحلیل پایداری ایجاد می‌شود. برای افزایش سرعت انجام این محاسبات با روشی که در این تحقیق ارائه شده، فاصله‌داری هر دسته درزه در بلوک II، ۲۰ برابر متوسط فاصله‌داری در حالت واقعی در نظر گرفته شده است. انتخاب این عدد برای بزرگنمایی فاصله‌داری دسته درزه‌ها با توجه به ابعاد پیت نهایی و لحاظ کردن ابعاد هر پله نهایی صورت گرفته و این مقدار افزایش فاصله‌داری نحوه ریزش‌ها را تغییر نمی‌دهد.

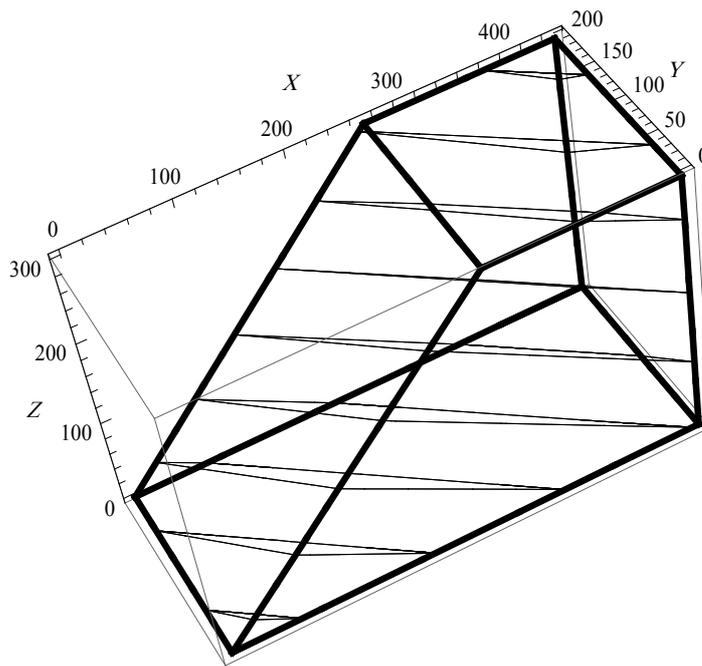
با استفاده از دیگر مقادیر میانگین آماری خواص هندسی دسته درزه‌ها که در جدول ۴-۲ آمده است و بکار بردن روش قطعی و محدود برای شبیه‌سازی هندسی ناپیوستگی‌ها، مدل هندسی سه بعدی بلوک II توسط محقق ایجاد شده است. شکل‌های ۴-۸ تا ۴-۱۰ به ترتیب تقاطع مدل بلوکی ایجاد شده با دسته درزه‌های شماره ۱، ۲ و ۳ در جدول ۴-۲ را نشان می‌دهد. شکل ۴-۱۱، مدل هندسی سه بعدی شبیه‌سازی شده‌ی بلوک تکتونیکی II چفارت را که به عنوان مدل ورودی برای تحلیل پایداری مورد استفاده قرار می‌گیرد، نشان می‌دهد.



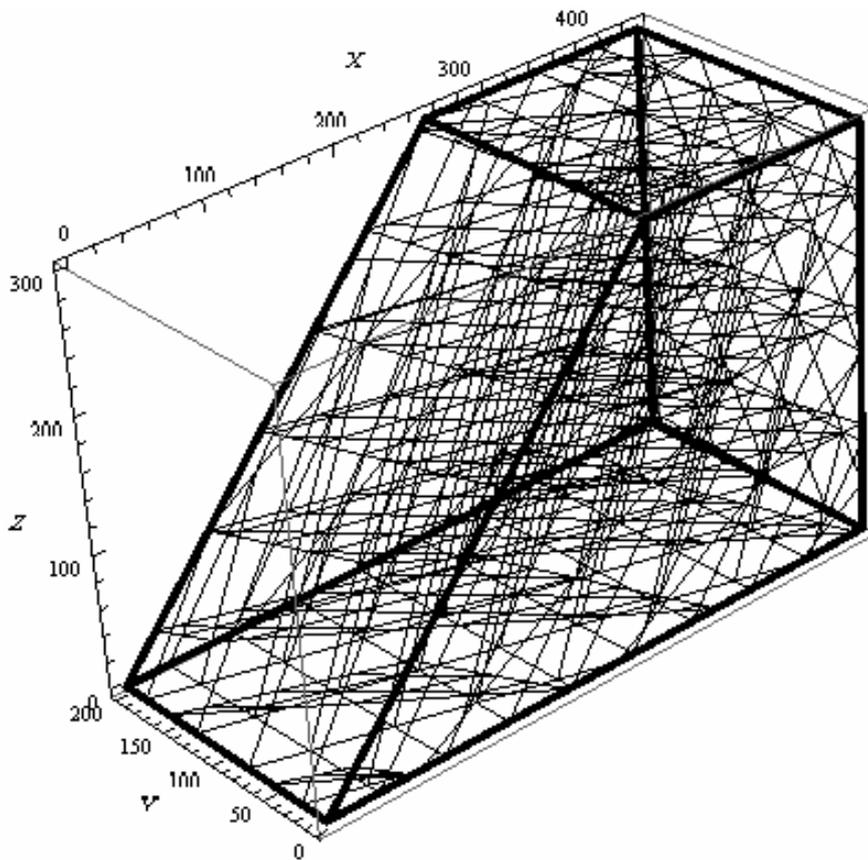
شکل ۴-۸: دسته درزه ۱ در بلوک تکتونیکی II چگارت



شکل ۴-۹: دسته درزه ۲ در بلوک تکتونیکی II چگارت



شکل ۴-۱۰: دسته درزه ۳ در بلوک تکتونیکی II چگارت



شکل ۴-۱۱: مدل هندسی سه بعدی بلوک تکتونیکی II چگارت با سه دسته درزه اصلی در محیط

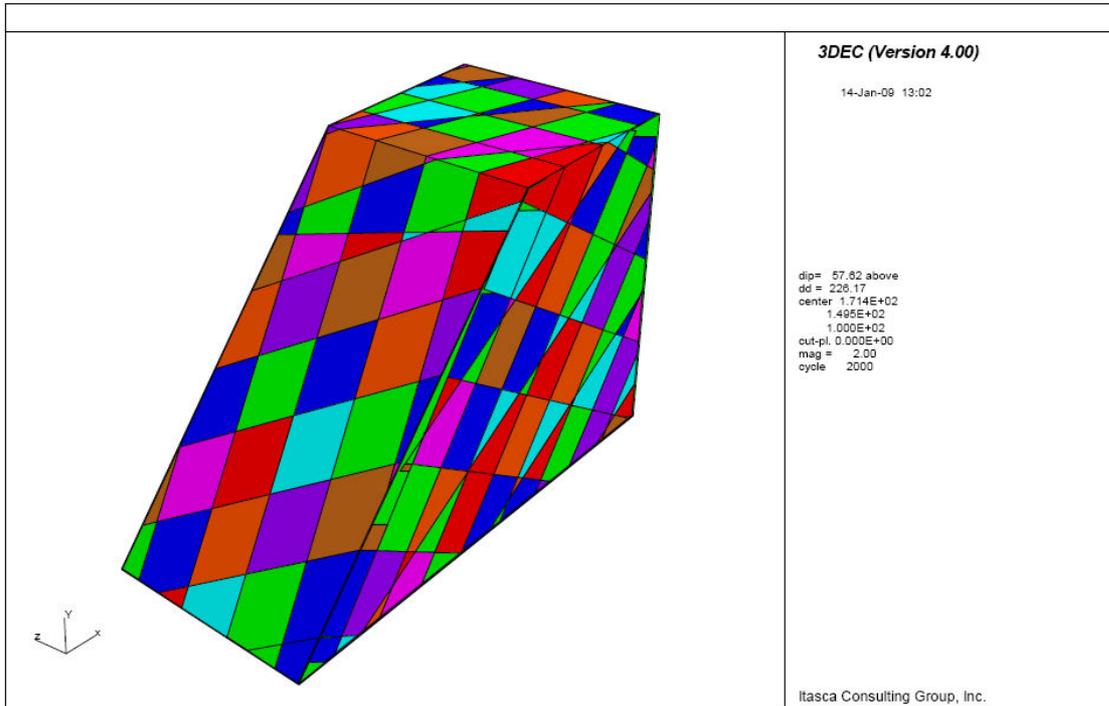
Mathematica

۴-۴-۲- مدل سازی هندسی سه بعدی بلوک II در نرم افزار 3DEC

با توجه به وجود چندین دسته درزه در بلوک تکتونیکی II و دارا بودن خصوصیات یک محیط ناپیوسته، نرم افزار 3DEC برای مدل سازی و تحلیل کردن این بلوک انتخاب شده است. نرم افزار 3DEC یک برنامه عددی سه بعدی است که بر اساس روش المان های مجزا (DEM) برای مدل سازی محیط های ناپیوسته و به منظور تحلیل سه بعدی محیط های درزه دار به کار می رود. در این نرم افزار تأثیر عوارض ساختاری نظیر درزه های سنگی، لایه بندی، گسل و انواع ناپیوستگی ها قابل مدل سازی و تحلیل است و با توجه به مدل های رفتاری متفاوت تعریف شده برای سطوح ناپیوستگی و ماده سنگ موجود در آن می توان مدل سازی را انجام داد. با توجه به اطلاعات بدست آمده از آزمایش ها، بهترین مدل رفتاری برای تحلیل ناپیوستگی ها، مدل لغزشی کلمب تشخیص داده شده است [۲۹]. وقتی محیط بارگذاری می شود تغییرات نیرو در سطوح هم جوار با زمان شروع می شود و معادلات تعادل دینامیکی برای هر المان به صورت تکراری حل می شود تا اینکه قوانین موجود در سطح و شرایط مرزی مساله ارضا شود.

در مدل عددی نیز برای وارد کردن اطلاعات هندسی درزه ها در نرم افزار به منظور افزایش سرعت انجام محاسبات، فاصله داری هر دسته درزه در این بلوک ۲۰ برابر متوسط فاصله داری در حالت واقعی منظور شده است. برای ایجاد مدل هندسی، از مقادیر میانگین مشخصات هندسی درزه ها که در جدول ۴-۲ بیان شده، همانند آنچه در مدل ایجاد شده در Mathematica بکار رفته، استفاده شده و ماده سنگ نیز به صورت صلب مدل شده است.

شکل ۴-۱۲ مدل هندسی سه بعدی شبیه سازی شده ی بلوک تکتونیکی II چغارت را که در نرم افزار 3DEC ایجاد شده، نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود دو مدل ایجاد شده در دو نرم افزار Mathematica و 3DEC کاملاً یکسان هستند.



شکل ۴-۱۲: مدل هندسی سه بعدی شبیه‌سازی شده‌ی بلوک تکتونیکی II چگارت در نرم افزار 3DEC

فصل پنجم

مدل سازی مکانیکی

با استفاده از روش

گروه های کلیدی سه بعدی

۵-۱- کلیات

مدل مکانیکی، قوانین مکانیکی حاکم بر هندسه شیروانی را تشریح می‌کند و بر این اساس جابجایی‌ها و یا تغییر شکل‌های حاصل از اعمال نیروهای موجود ساخته می‌شود.

مدل مکانیکی توده سنگ با هدف تحلیل‌های پایداری مکانیکی (استاتیکی یا دینامیکی) توده سنگ ایجاد می‌شود و شامل بررسی پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ، وضعیت تنش‌های برجا، شرایط آب-های زیرزمینی، قوانین حاکم بر رفتار و مقاومت توده سنگ (معیارهای مقاومتی شکست و رفتارهای مکانیکی محیط)، روش‌های تحلیل پایداری و نهایتاً قیاس و نتیجه‌گیری در مورد پایداری مکانیکی (ضریب اطمینان یا حاشیه اطمینان) است.

با توجه به سادگی و سرعت اجرای روش‌های استاتیکی هنوز از این روش‌ها برای تحلیل پایداری استفاده و در زمینه توسعه آنها تحقیقاتی انجام می‌شود. مقایسه نتایج بدست آمده از دو روش استاتیکی و دینامیکی بر روی یک سیستم مورد مطالعه در شرایط یکسان بارگذاری، می‌تواند به تعریف وضعیت‌هایی که تحلیل استاتیکی در کارهای عملی دارای دقت کافی باشد، کمک کند.

معروف‌ترین روش استاتیکی استفاده شده طی سی سال گذشته روش تحلیل بلوک‌های کلیدی یا تئوری بلوک است. برای تعمیم روش بلوک‌های کلیدی از یک روش گروه‌بندی، بر مبنای تحلیل تمام بلوک‌های همسایه یک بلوک کلیدی استفاده شده است که به جستجوی یک گروه کلیدی ناپایدارتر از بلوک‌های کلیدی مجزا می‌پردازد. این روش بر اساس یک تحلیل پایداری پیشرونده اجرا می‌شود که به روش گروه‌های کلیدی (^{52}KGM) موسوم است. با وجود همه مزیت‌های این روش باید گفت که این روش یک روش تعادل حدی دو بعدی است که هنوز از آن استفاده می‌شود. در پروژه‌های بزرگ، تحلیل سه بعدی امری ضروری است زیرا میزان ضریب ایمنی که از این روش به دست می‌آید بیشتر از روش دو بعدی است و گاهی درصد این اختلاف ممکن است بیش از ۳۰ درصد باشد.

⁵². Key Group Method

در تبدیل واقعیت سه بعدی به دو بعد همیشه فرض‌هایی بر مدل حاکم می‌شود و خصوصیات بعد سوم در نظر گرفته نمی‌شود، در حالی که ممکن است ویژگی‌های این بعد روند تحلیل را تغییر دهد. هدف اصلی در این تحقیق توسعه سه بعدی روش گروه‌های کلیدی دو بعدی است تا بدین وسیله امکان تحلیل پایداری‌ای نزدیک‌تر به واقعیت ایجاد شود.

روش جدید که 3DKGM⁵³ نامیده می‌شود، روشی بر مبنای تحلیل تعادل حدی است و برای تحلیل مدل مکانیکی استفاده می‌شود. برای کاربرد عملی این روش، برنامه کامپیوتری آن در محیط Mathematica تهیه شده است.

در این فصل روش 3DKGM و الگوریتم‌های مورد استفاده در آن توصیف می‌شود و برای اعتبارسنجی این روش، نتایج اجرای آن بر روی چند مدل مکانیکی فرضی با نتایج حاصل از تحلیل عددی به روش المان‌های گسسته با استفاده از نرم افزار 3DEC مقایسه می‌شود.

برای آزمایش کاربرد عملی این روش، بلوک تکتونیکی II چغارت به عنوان مورد مطالعاتی مورد توجه قرار گرفته است که نتایج تحلیل آن توسط روش پیشنهاد شده و نرم افزار 3DEC با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

۵-۲- فرضیات بکار رفته در روش 3DKGM

فرض‌هایی که در این روش از آنها استفاده می‌شود به شرح زیر می‌باشند:

- (۱) سطح تمام درزه‌ها مسطح است.
- (۲) سطوح درزه‌ها در تمام حجم مورد بررسی (بلوک کلیدی)، بطور کامل گسترش یافته‌اند. نتیجه این فرض تشکیل بلوک‌هایی محدب در مدل هندسی است.
- (۳) بلوک‌های حاصل از تقاطع درزه‌ها، صلب هستند. در این صورت تغییر شکلی در بلوک بوجود نیامده و شکل اولیه آن تغییر نخواهد کرد.

⁵³ . 3 Dimensional Key Group Method

۴) بلوک‌ها تنها تحت تأثیر وزن خالصشان قرار دارند و هیچ نیروی استاتیکی دیگری بر آنها وارد نمی‌شود.

۵) از تأثیر آب بر تحلیل پایداری صرف نظر شده است.

۶) حرکت احتمالی بلوک‌ها فقط به حرکت انتقالی محدود می‌شود و از حرکت چرخشی بلوک‌ها صرف نظر شده است.

۷) گروه‌هایی که توسط بلوک‌ها تشکیل می‌شوند، صلب هستند و لغزشی بر روی سطوح تماس مشترک آنها اتفاق نمی‌افتد.

فرض آخر همانطور که در فصل سوم بحث شد به دلیل فقدان یک روش برداری برای در نظر گرفتن نیروهای بین بلوکی به الگوریتم اعمال می‌شود.

۵-۳- روش گروه‌های کلیدی سه بعدی (3DKGM)

در این روش، بلوک کلیدی طبق تعریف، بلوکی است که فعال و محدود باشد و ضمن قابلیت جابجایی، بالقوه ناپایدار نیز باشد. با این تعریف گروه کلیدی حتماً شامل یک بلوک کلیدی خواهد بود و از طرف دیگر یک گروه کلیدی تمام ویژگی‌های یک بلوک کلیدی را دارا می‌باشد. در این روش فرض شده مجموعه بلوک‌هایی که به عنوان گروه کلیدی معرفی می‌شوند، صلب هستند.

اطلاعات مورد نیاز در این روش شامل مختصات گوشه‌های بلوک‌های تشکیل شده در مدل هندسی سه بعدی، معادله هر یک از صفحات درزه موجود در مدل، صفحات مرزی مدل و معادله صفحه استخراجی است.

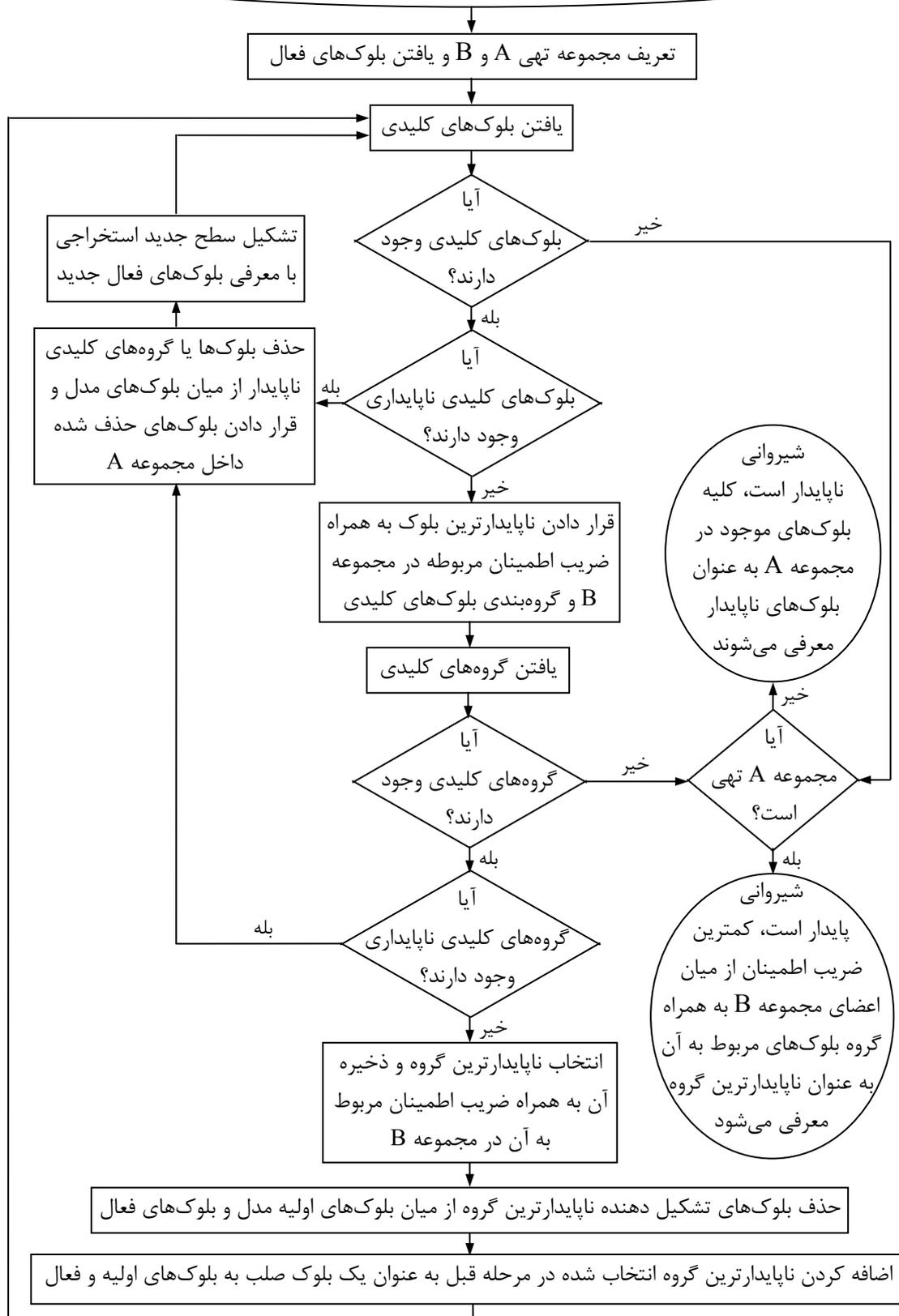
در تعریف ریاضی روش ارائه شده، نقطه P_0 با سه‌تایی مرتب $\{x_0, y_0, z_0\}$ و یک بردار با سه مولفه a و b و c ، به صورت $\{a, b, c\}$ بیان می‌شود. بلوک B توسط مجموعه‌ای شامل نقاط گوشه‌های آن، بدون تکرار و به صورت $\{P_0, P_1, P_2, \dots\}$ و یا $\{\{x_0, y_0, z_0\}, \{x_1, y_1, z_1\}, \dots\}$ و مجموعه چند بلوکی به صورت $\{B_1, B_2, B_3, \dots\}$ و یا $\{\{P_0^{B1}, P_0^{B1}, \dots\}, \{P_0^{B2}, P_0^{B2}, \dots\}, \dots\}$ و یا به صورت جزئی‌تر به شکل

نشان داده می‌شود. $\{\{\{x_0^{B1}, y_0^{B1}, z_0^{B1}\}, \{x_1^{B1}, y_1^{B1}, z_1^{B1}\}, \dots\}, \{\{x_0^{B2}, y_0^{B2}, z_0^{B2}\}, \{x_1^{B2}, y_1^{B2}, z_1^{B2}\}, \dots\}, \dots\}$

در این روش ابتدا بلوک‌های کلیدی در مدل جستجو و در صورت ناپایدار بودن (ضریب اطمینان کمتر از یک) حذف می‌شوند. در صورتی که بلوک کلیدی ناپایداری یافت نشود، گروه‌های شامل بلوک کلیدی و بلوک‌های همسایه آن تشکیل و از میان آنها گروه‌های کلیدی شناسایی و در صورت ناپایدار بودن حذف می‌شوند. در هر مرحله در صورت عدم وجود بلوک یا گروه کلیدی ناپایدار، نتیجه می‌شود که مدل پایدار است و تحلیل تمام می‌شود و همچنین پس از حذف بلوک‌ها یا گروه‌های کلیدی ناپایدار در هر مرحله، سطح جدید استخراجی تشکیل و از ابتدا جستجوی بلوک‌های کلیدی انجام می‌شود. اگر گروه کلیدی ناپایداری یافت نشد، ناپایدارترین گروه که دارای کمترین ضریب اطمینان در میان گروه‌های تشکیل شده است، به صورت یک بلوک جدید به مدل اضافه و تحلیل به نقطه آغازین بر می‌گردد. این روند تا جایی که گروه کلیدی قابل تشکیل جدیدی وجود نداشته باشد، ادامه می‌یابد. شکل ۵-۱ الگوریتم اجرای روش 3DKGM را با جزئیات بیشتر و به صورتی که قابل برنامه‌نویسی باشد، نشان می‌دهد.

در الگوریتم این روش دستورات متفاوتی بکار گرفته می‌شود. برای اجرای این دستورات، الگوریتم‌هایی توسط محقق ایجاد شده که در آنها از اصول و قوانین هندسه تحلیلی استفاده شده و در ادامه هر یک از این الگوریتم‌ها توصیف خواهد شد. بعضی از این الگوریتم‌ها وابسته به الگوریتم‌های دیگر است و از سایر الگوریتم‌ها در آنها استفاده شده است اما تعدادی از آنها مستقل از یکدیگر هستند. ترتیب بیان این الگوریتم‌ها بر اساس کاربرد آنها در الگوریتم‌های بعدی است. بنابراین ابتدا الگوریتم‌های مستقل و سپس الگوریتم‌های وابسته بیان می‌شوند.

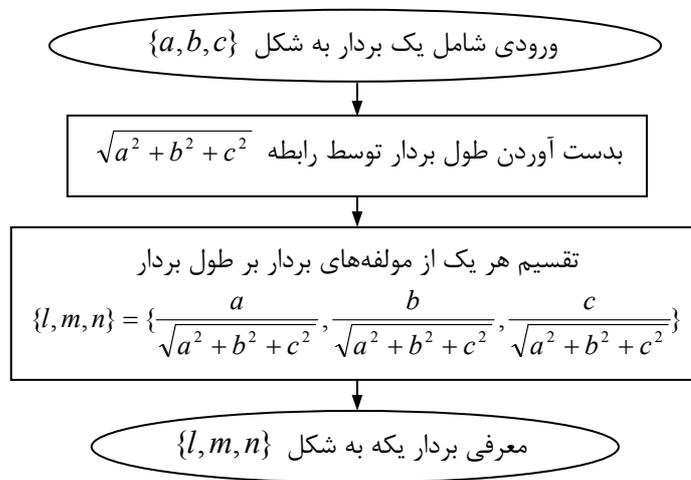
تمام بلوک‌های تشکیل شده در مدل هندسی به صورت مختصات گوشه‌های آنها، معادله هر یک از صفحات درزه، صفحات مرزی مدل و معادله صفحه استخراجی به عنوان ورودی



شکل ۵-۱: الگوریتم روش گروه‌های کلیدی سه بعدی

۵-۳-۱- الگوریتم بردار نرمال یکه

این الگوریتم یک بردار را به بردار یکه، یعنی برداری با طول واحد تبدیل می‌کند. توسط این الگوریتم بردار نرمال صفحات، به بردار نرمال یکه آن صفحات تبدیل می‌شود. ورودی این الگوریتم یک بردار است که توسط مولفه‌های آن به صورت $\{a, b, c\}$ تعریف می‌شود و خروجی، یک بردار به صورت $\{l, m, n\}$ است که طول آن برابر واحد است. در این الگوریتم هر یک از مولفه‌های بردار بر اندازه بردار تقسیم می‌شود. شکل ۵-۲ این الگوریتم را به صورت نموداری نمایش می‌دهد.



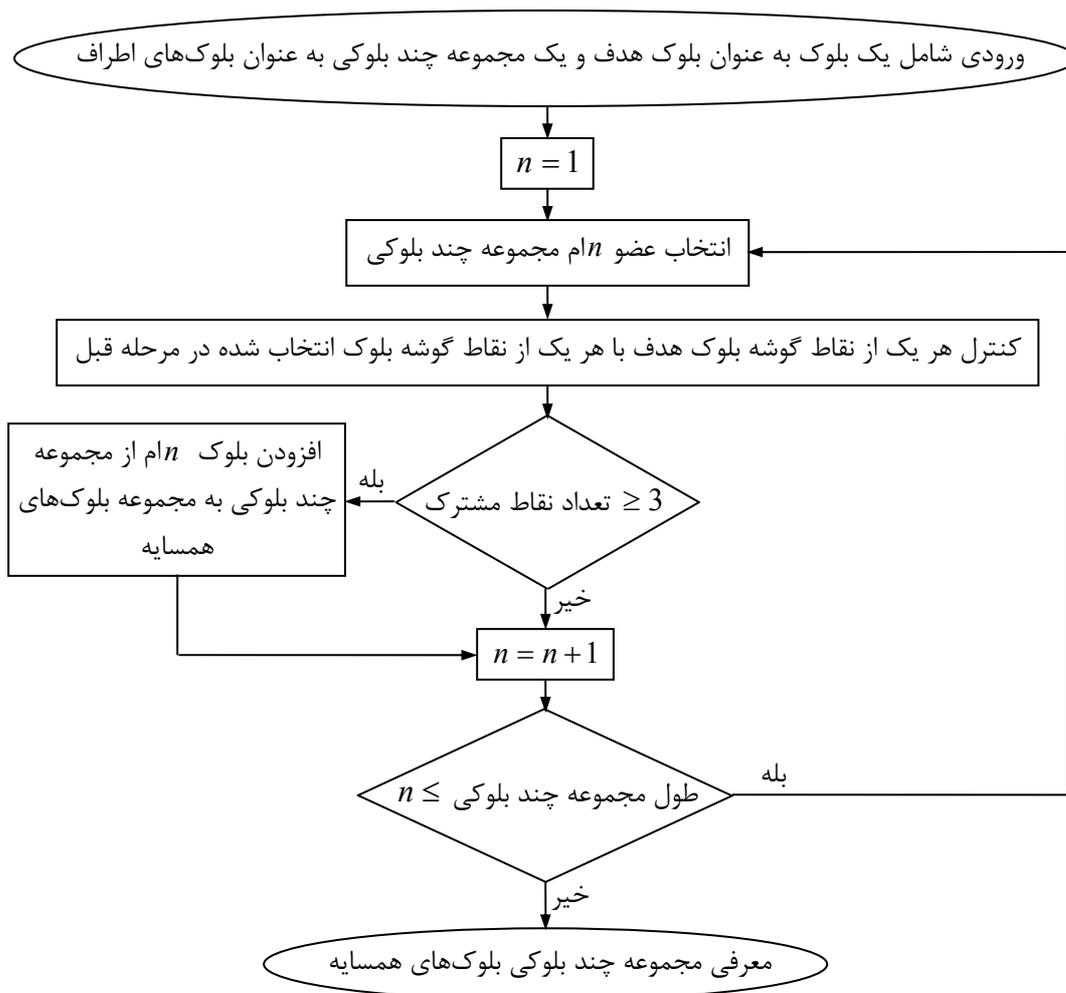
شکل ۵-۲: الگوریتم تعیین بردار نرمال یکه

۵-۳-۲- الگوریتم یافتن بلوک‌های همسایه یک بلوک

در این الگوریتم، هدف یافتن همسایه‌های درجه اول یک بلوک است که در اینجا "بلوک هدف" نامیده می‌شود. سایر بلوک‌های اطراف بلوک هدف که نامزد همسایه بودن با این بلوک هستند، بلوک‌های اطراف نامیده می‌شوند. با فرض نامحدود بودن صفحات درزه در مدل هندسی، تماس دو بلوک در بیشتر از یک وجه امکان ندارد. دو بلوکی که در یک وجه (سطح) مشترک باشند، به عنوان همسایه یکدیگر معرفی می‌شوند. تمام نقاط گوشه این وجه مشترک، در دو بلوک یکسان هستند. همسایه‌های درجه اول بلوک هدف، آن دسته از بلوک‌های اطراف هستند که در تماس مستقیم با بلوک هدف قرار دارند و همسایه‌های درجه دوم، آن دسته از بلوک‌های اطراف هستند که در تماس مستقیم با بلوک-

های همسایه درجه اول بلوک هدف قرار دارند. به همین ترتیب درجه همسایگی n ام معرفی می‌شود. ورودی این الگوریتم یک بلوک به عنوان بلوک هدف و یک مجموعه چند بلوکی به عنوان بلوک‌های اطراف است.

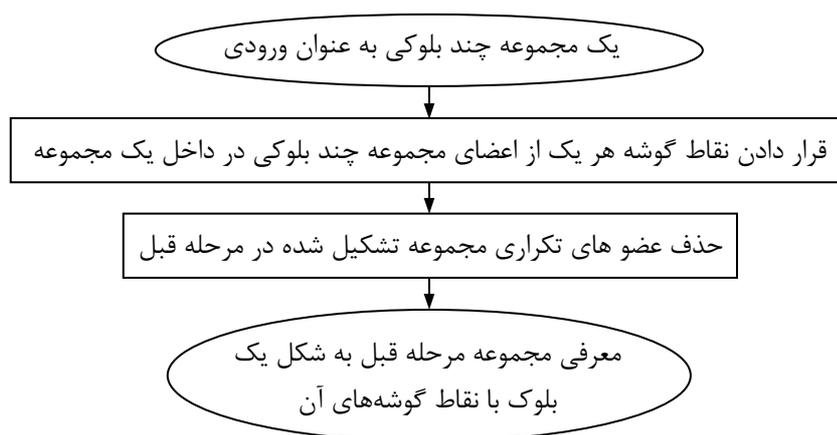
در این الگوریتم نقاط گوشه بلوک هدف با نقاط گوشه هر یک از بلوک‌های اطراف کنترل می‌شود و در صورتی که سه نقطه و یا بیشتر از سه نقطه مشترک بین دو بلوک یافت شود، آن بلوک، به عنوان بلوک همسایه بلوک هدف معرفی می‌شود. خروجی این الگوریتم یک مجموعه چند بلوکی است که شامل بلوک‌های همسایه درجه اول بلوک هدف است. شکل ۵-۳ این الگوریتم را به صورت نموداری نمایش می‌دهد.



شکل ۵-۳: الگوریتم یافتن بلوک‌های همسایه یک بلوک

۵-۳-۳- الگوریتم ترکیب دو یا چند بلوک

ترکیب دو یا چند بلوک به معنی تبدیل آن بلوک‌ها به بلوکی واحد و صلب است. شرط ترکیب دو بلوک این است که بلوک‌ها باید همسایه یکدیگر باشند. همانطور که قبلاً بیان شد، نقاط گوشه‌های یک وجه در دو بلوک همسایه یکسان هستند. با توجه به این موضوع، در این الگوریتم مختصات نقاط گوشه بلوک‌ها، بدون تکرار، به صورت مجموعه نقاط گوشه یک بلوک معرفی می‌شود. ورودی این الگوریتم یک مجموعه چند بلوکی از بلوک‌های به هم چسبیده (دو به دو یا هم همسایه) هستند و خروجی یک بلوک به صورت نقاط گوشه‌های آن است. در شکل ۴-۵ این الگوریتم به صورت نموداری نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: الگوریتم ترکیب چند بلوک

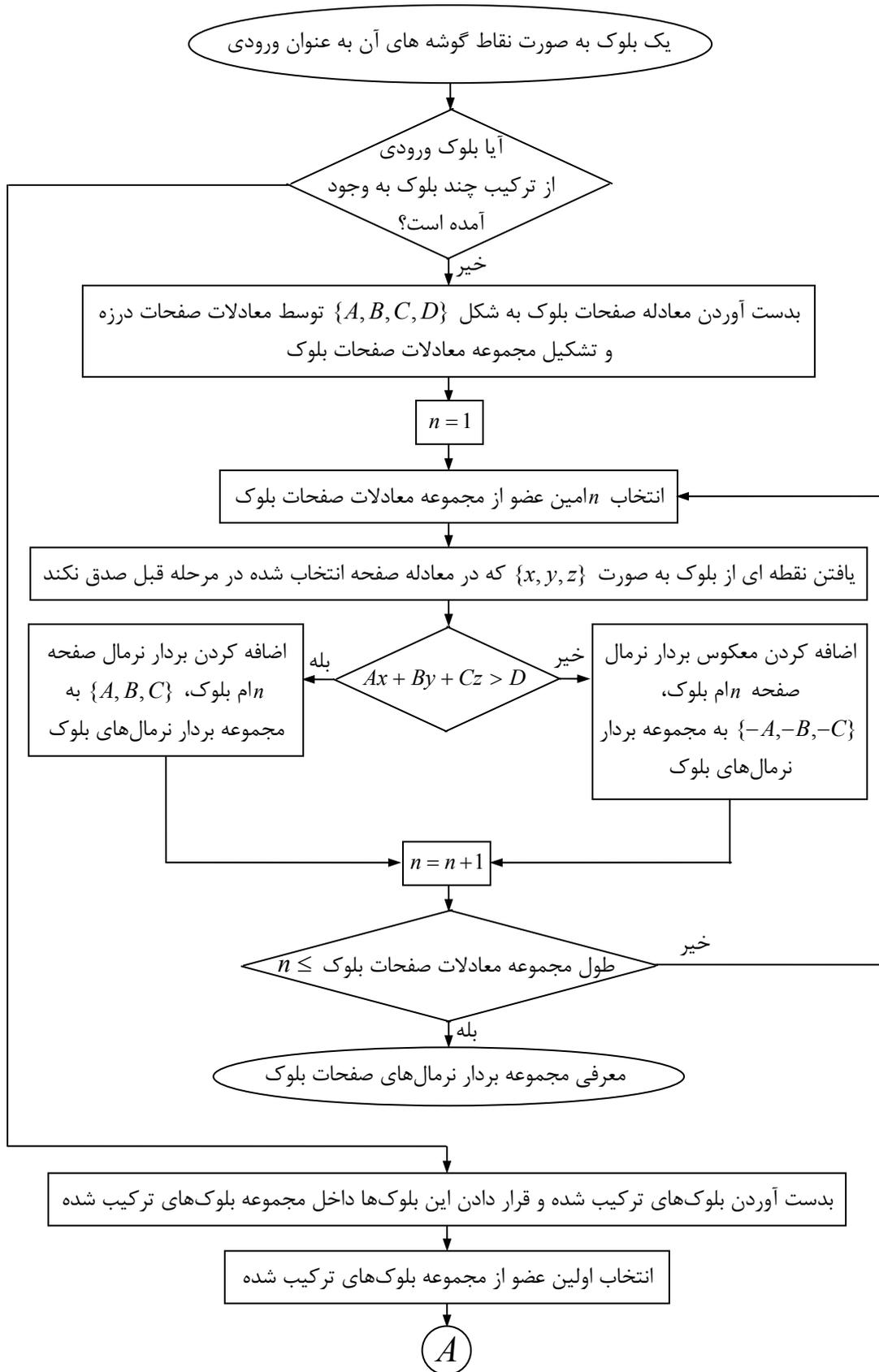
۵-۳-۴- الگوریتم یافتن بردار نرمال سطوح بلوک

بردار غیر صفر $N = ai + bj + ck$ بردار نرمال صفحه P به معادله $ax + by + cz = d$ و بر صفحه P عمود است. در این بردار i ، j و k بردارهای یکه به ترتیب در جهت‌های x ، y و z هستند. این الگوریتم ابتدا معادله صفحات تشکیل دهنده بلوک را با کاربرد معادله صفحات درزه و نقاط بلوک تشکیل می‌دهد و سپس بردار نرمال این صفحات را از روی معادله آنها بدست می‌آورد. ورودی این الگوریتم یک بلوک به صورت نقاط گوشه‌های آن است. برای کاربرد بردار نرمال سطوح بلوک در الگوریتم‌های دیگر، این بردارها باید به سمت داخل بلوک باشند. برای این منظور در این

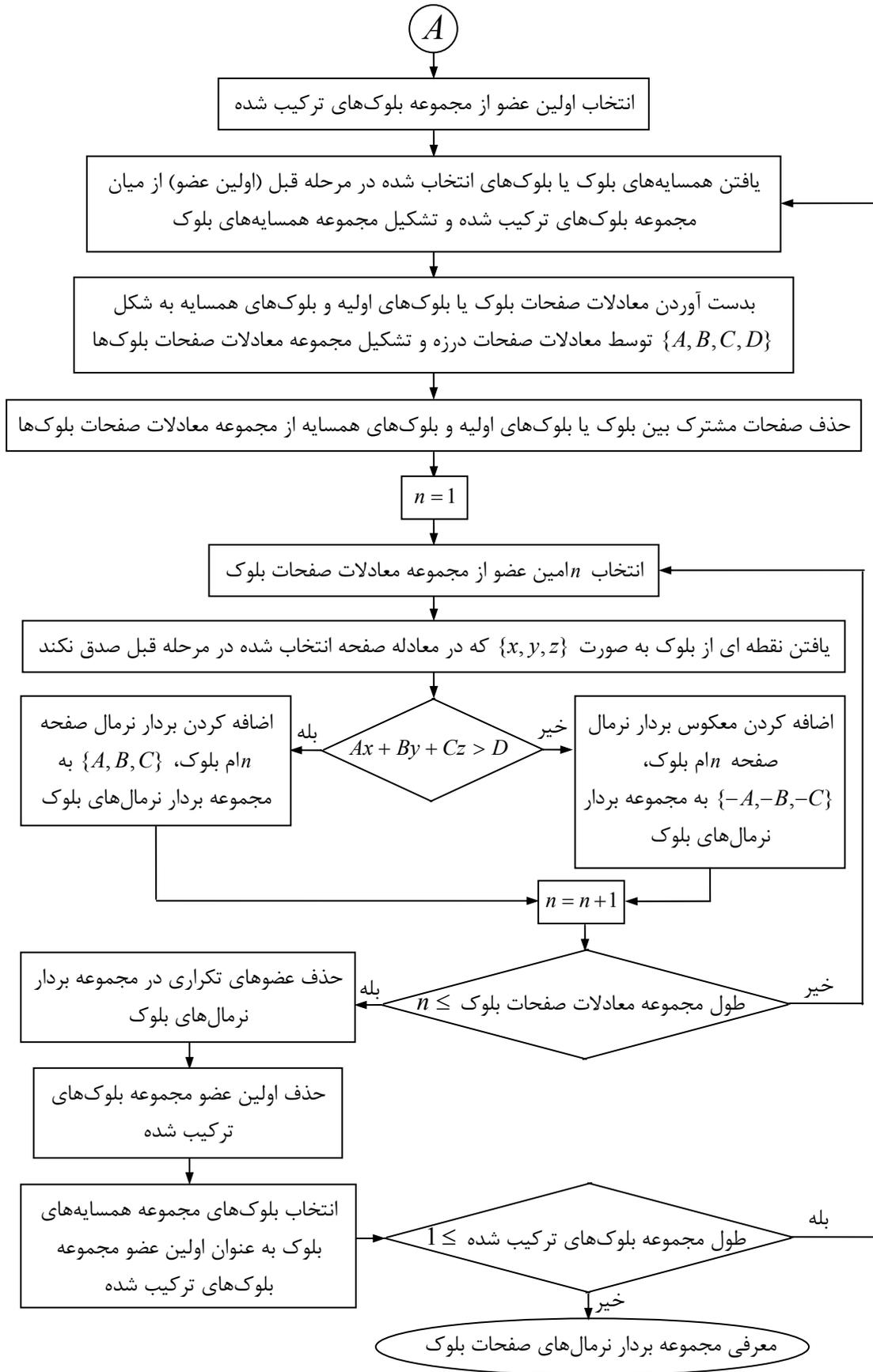
الگوریتم برای یافتن بردار نرمال یک صفحه از بلوک به معادله $a_1x + b_1y + c_1z = d_1$ ، مختصات $\{x, y, z\}$ نقطه‌ای از بلوک غیر از نقاطی که بر روی این صفحه قرار دارند، در معادله صفحه قرار داده می‌شود. اگر شرط $a_1x + b_1y + c_1z > d_1$ برقرار باشد، بردار نرمال صفحه برابر $\{a_1, b_1, c_1\}$ است که برداری به سمت داخل بلوک است و در غیر این صورت، $\{-a_1, -b_1, -c_1\}$ به عنوان بردار نرمال صفحه در نظر گرفته می‌شود.

این الگوریتم برای سطحی از بلوک‌های فعال که توسط معادله صفحه استخراجی مشخص می‌شوند، بردار نرمالی ایجاد نمی‌کند. از این ویژگی در آزمایش تحرک‌پذیری بلوک در الگوریتم تحلیل پایداری استفاده می‌شود.

برای صفحات مشترک بلوک‌های ترکیب شده که به صورت بلوک واحدی تبدیل شده‌اند، نباید بردار نرمالی تعریف شود، در واقع زمانی که دو بلوک ترکیب می‌شوند، صفحه مشترک بین دو بلوک حذف شده است. این الگوریتم بلوک ترکیب شده را شناسایی و برای صفحات مشترک بین بلوک‌های تشکیل دهنده آن بردار نرمالی تولید نمی‌کند. این الگوریتم را می‌توان تکمیل کننده الگوریتم ترکیب بلوک‌ها دانست. خروجی این الگوریتم بردار نرمال سطوح تشکیل دهنده بلوک، به سمت داخل بلوک است. شکل ۵-۵ این الگوریتم را به صورت نموداری نمایش می‌دهد.



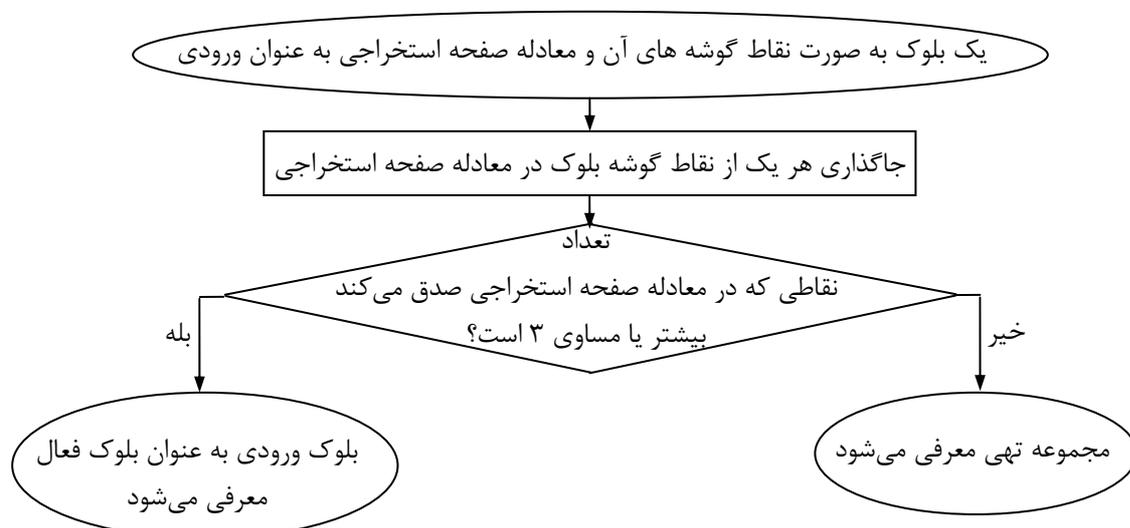
شکل ۵-۵: الگوریتم یافتن بردار نرمال سطوح بلوک



شکل ۵-۵ (ادامه): الگوریتم یافتن بردار نرمال سطوح بلوک

۵-۳-۵- الگوریتم یافتن بلوک‌های فعال

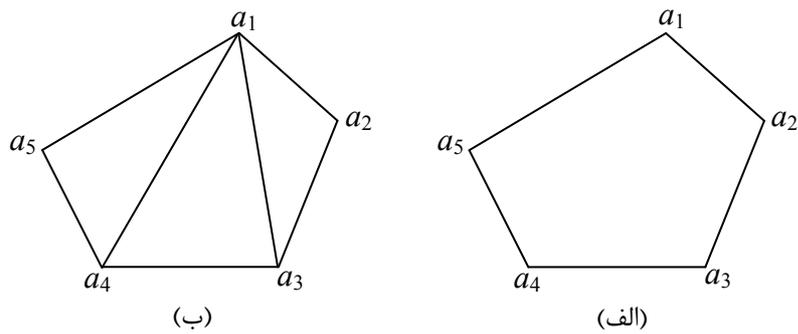
توسط این الگوریتم، بلوک‌های در تماس با سطح استخراجی که بلوک‌های فعال نامیده می‌شوند، شناسایی می‌شوند. ورودی این الگوریتم شامل یک بلوک از مدل هندسی و معادله سطح استخراجی است. در این الگوریتم، نقاط گوشه بلوک در معادله صفحه استخراجی کنترل و در صورتی که بیشتر از سه نقطه در معادله این صفحه صدق کرد، آن بلوک به عنوان بلوک فعال در خروجی الگوریتم معرفی می‌شود. در صورتی که بلوک ورودی فعال نباشد، مجموعه تهی ($\{\}$) ارائه خواهد شد. در شکل ۵-۶ این الگوریتم به صورت نموداری نشان داده شده است.



شکل ۵-۶: الگوریتم یافتن بلوک‌های فعال

۵-۳-۶- الگوریتم محاسبه مساحت یک صفحه از بلوک

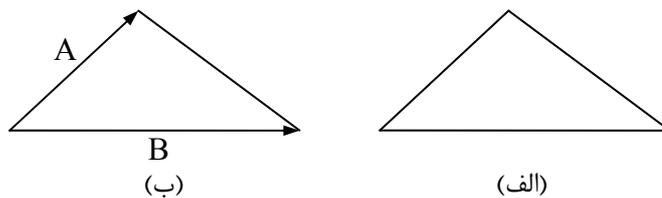
مساحت یک چند ضلعی از تقسیم آن چند ضلعی به تعدادی مثلث و مجموع مساحت مثلث‌ها بدست می‌آید. برای تقسیم یک چند ضلعی، یک نقطه از گوشه‌های آن انتخاب می‌شود. این نقطه محل تقاطع دو یال است که نقطه گوشه انتخاب شده را به دو نقطه دیگر از چند ضلعی متصل می‌کند. غیر از این سه نقطه بقیه نقاط چند ضلعی توسط یال‌هایی به نقطه انتخاب شده متصل می‌شود. بدین ترتیب چند ضلعی به مثلث‌هایی تقسیم می‌شود. روش بیان شده در شکل ۵-۷ نشان داده شده است.



شکل ۵-۷: تقسیم‌بندی یک چند ضلعی به تعدادی مثلث

با انتخاب a_1 به عنوان رأس مشترک همه مثلث‌ها، چند ضلعی a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 به مثلث‌های $a_1 a_2 a_3$ و $a_1 a_3 a_4$ و $a_1 a_4 a_5$ تقسیم شده است. در صورت در اختیار داشتن نقاط گوشه‌های مثلث می‌توان دو بردار بر روی دو ضلع مثلث تشکیل داد که از یک نقطه مشترک شروع می‌شوند

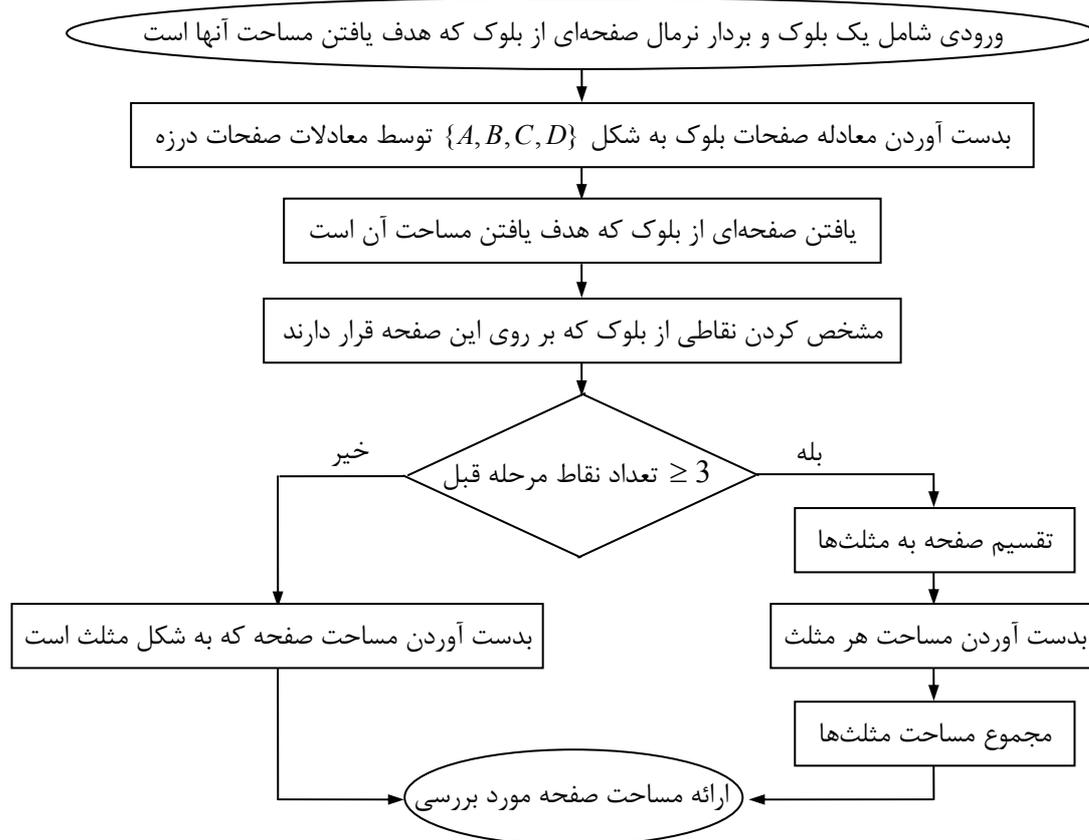
(شکل ۵-۸). در این صورت مساحت مثلث از رابطه $S = \frac{1}{2} |A \times B|$ بدست می‌آید.



شکل ۵-۸: نحوه محاسبه مساحت مثلث

ورودی این الگوریتم شامل یک بلوک به صورت نقاط گوشه‌های آن و بردار نرمال صفحه‌ای از بلوک است که هدف یافتن مساحت آن است.

در این الگوریتم ابتدا نقاط گوشه‌های صفحه‌ای از بلوک که هدف یافتن مساحت آن است، مشخص می‌شوند. اگر تعداد این نقاط بیشتر از سه بود، صفحه مورد نظر به مثلث‌هایی تقسیم می‌شود و مساحت هر مثلث به طور جداگانه محاسبه و با یکدیگر جمع می‌شوند. بدین ترتیب مساحت صفحه مورد نظر در خروجی الگوریتم ارائه می‌شود. شکل ۵-۹ این الگوریتم را به صورت نموداری نشان می‌دهد.

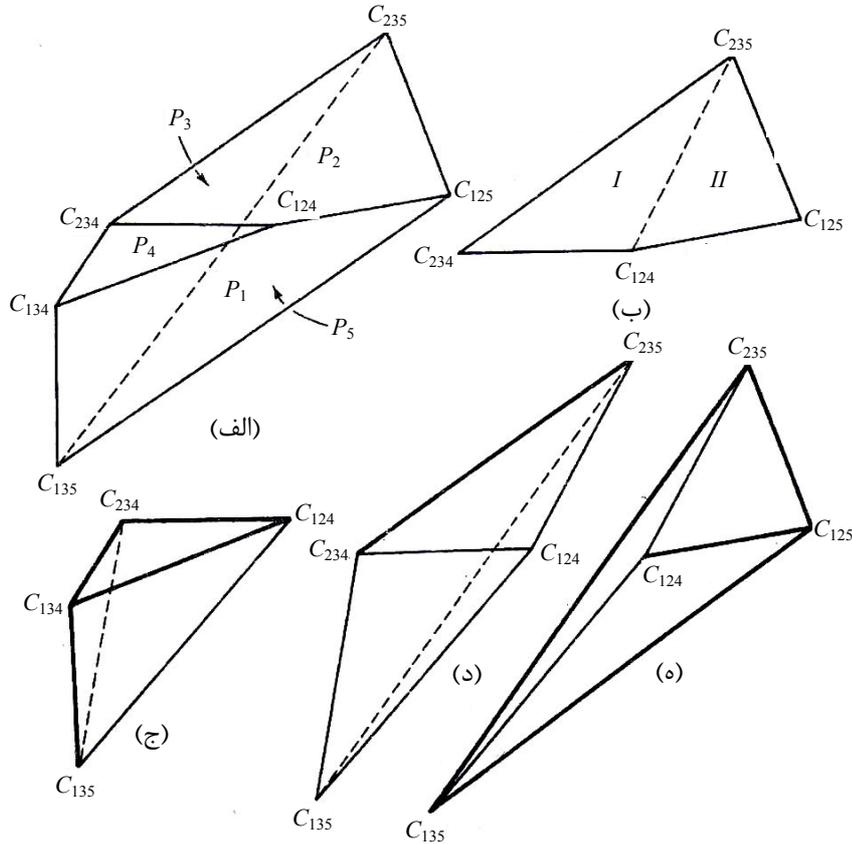


شکل ۵-۹: الگوریتم محاسبه مساحت یک صفحه از بلوک

۵-۳-۷- الگوریتم محاسبه حجم بلوک

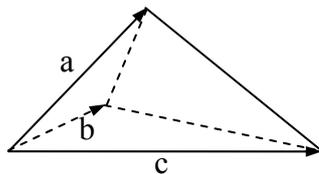
حجم یک چند وجهی از تقسیم آن به تعدادی هرم چهار وجهی و مجموع حجم چهار وجهی‌ها بدست می‌آید. برای تقسیم چند وجهی، ابتدا یک نقطه گوشه C_{ijk} از چند وجهی انتخاب می‌شود. نقطه C_{ijk} محل تقاطع سه صفحه i ، j و k است. به غیر از این سه صفحه، بقیه سطوح بلوک به مثلث‌هایی تقسیم می‌شوند. گوشه‌های مثلث‌های تشکیل شده، به رأس C_{ijk} متصل می‌شوند. بدین ترتیب مجموعه‌ای از چهار وجهی‌ها بدست می‌آید که مجموع حجم آنها برابر با حجم چند وجهی مورد نظر می‌باشد [۷]. شکل ۵-۱۰ مثالی از روش تشریح شده را نشان می‌دهد. هدف تقسیم پنج وجهی شکل ۵-۱۰-الف به بلوک‌های چهار وجهی است. نقطه گوشه C_{135} به دلخواه انتخاب می‌شود. بدین ترتیب سطوح P_1 ، P_3 و P_5 نیاز به مثلث‌بندی نخواهند داشت. از سطوح باقیمانده یعنی P_2 و P_4 ، سطح P_2 در شکل ۵-۱۰-ب به دو مثلث $I(C_{235}, C_{234}, C_{124})$ و $II(C_{235}, C_{125}, C_{124})$ تقسیم شده است.

سطح P_4 خود یک مثلث است و نیازی به مثلث بندی ندارد. نقاط گوشه سه مثلث موجود، به رأس C_{135} متصل می‌شود. بدین ترتیب بلوک پنج وجهی به سه بلوک چهار وجهی تقسیم می‌شود. این چهار وجهی‌ها در شکل ۵-۱۰-ج، د و ه نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۰: تقسیم چندوجهی به چهار وجهی‌ها

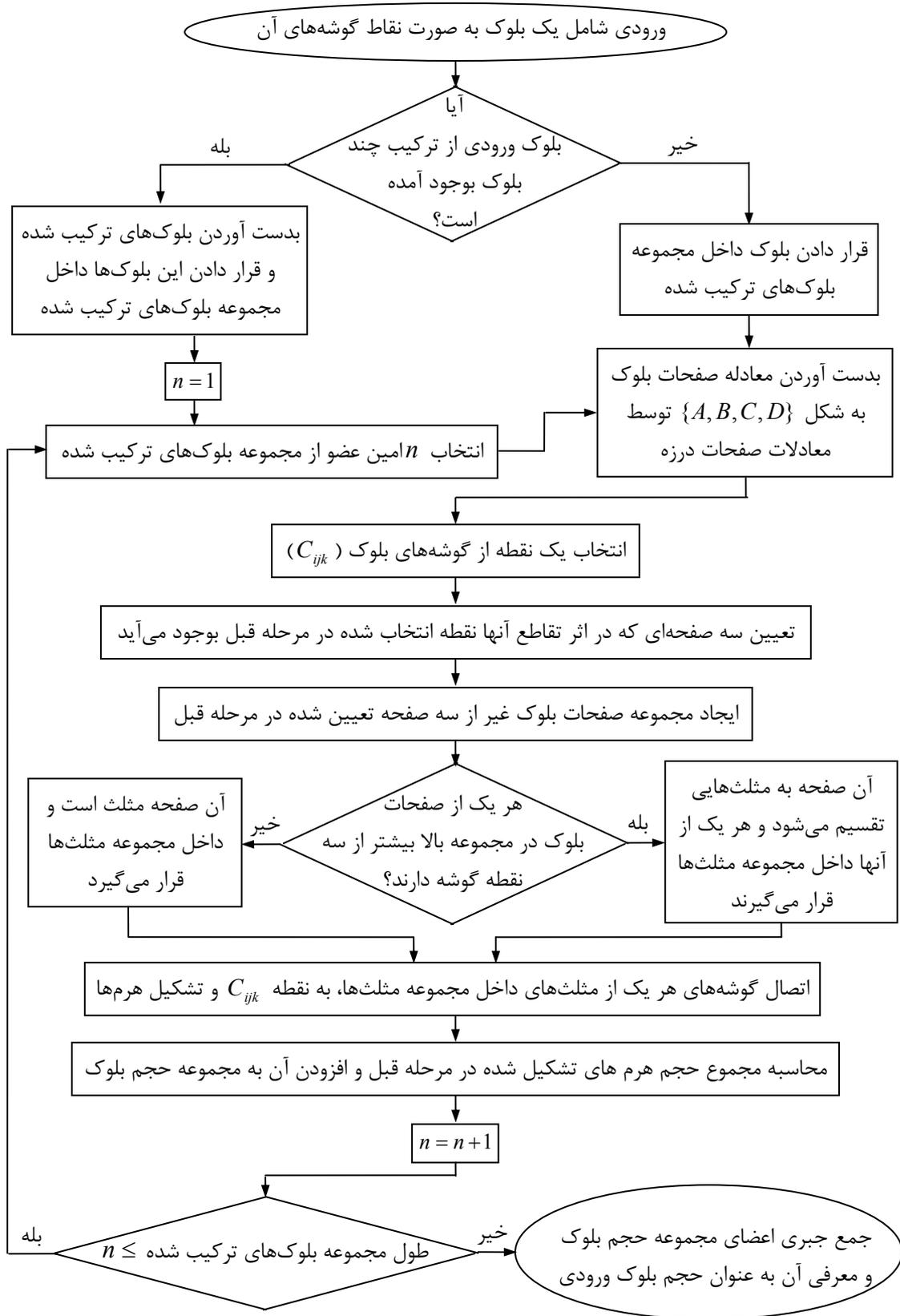
حجم یک هرم چهار وجهی از رابطه $V = 1/6a.(b \times c)$ بدست می‌آید که در آن a ، b و c ، سه بردار بر روی سه ضلع آن هستند که از یک نقطه مشترک شروع می‌شوند (شکل ۵-۱۱).



شکل ۵-۱۱: نحوه محاسبه حجم چهار وجهی

در این الگوریتم از روش بیان شده در بالا استفاده می‌شود. ورودی این الگوریتم یک بلوک به صورت نقاط گوشه‌های آن و خروجی حجم بلوک به صورت یک عدد است.

در شکل ۵-۱۲ این الگوریتم به صورت نموداری نشان داده شده است.

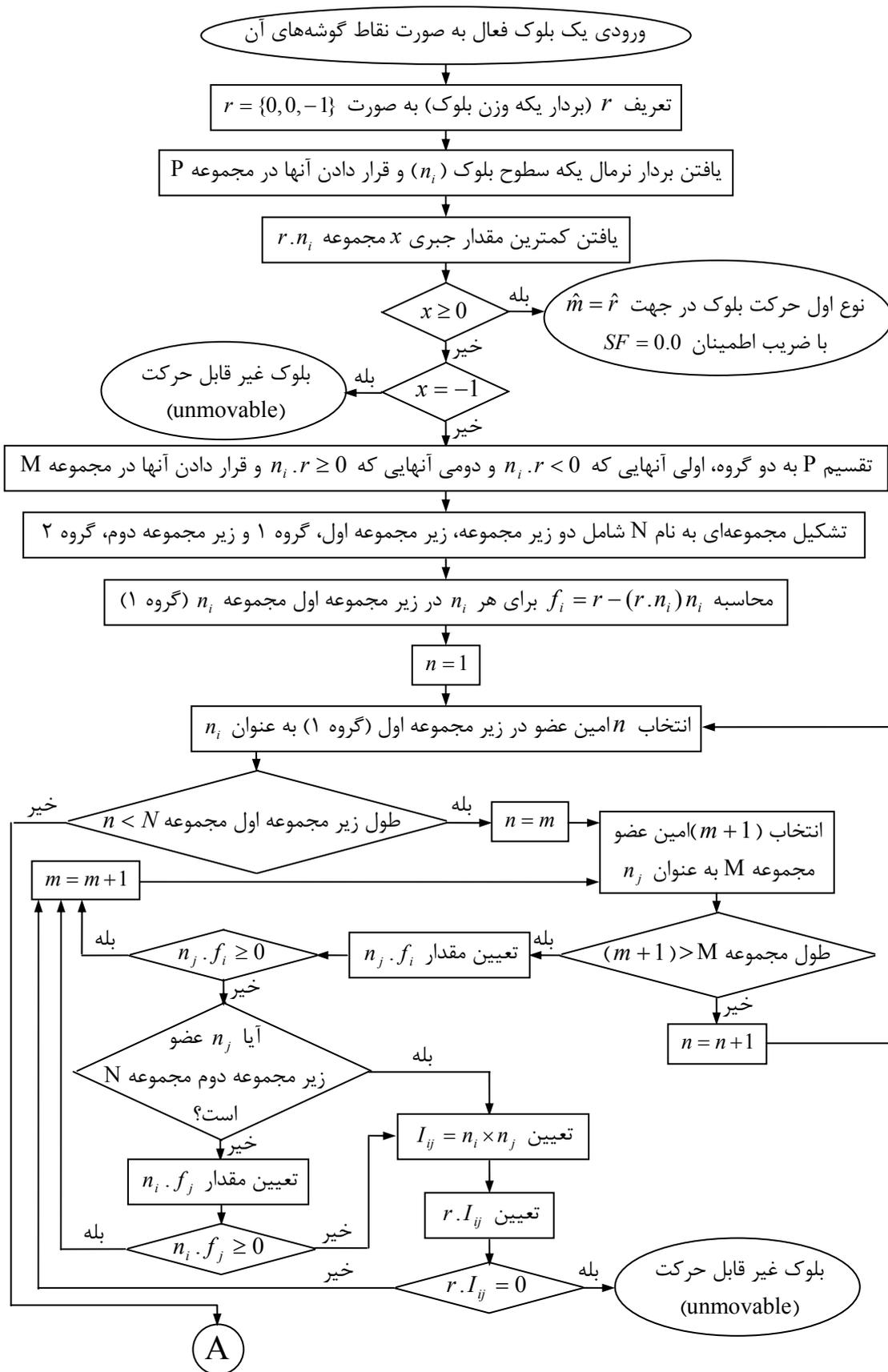


شکل ۵-۱۲: الگوریتم محاسبه حجم بلوک

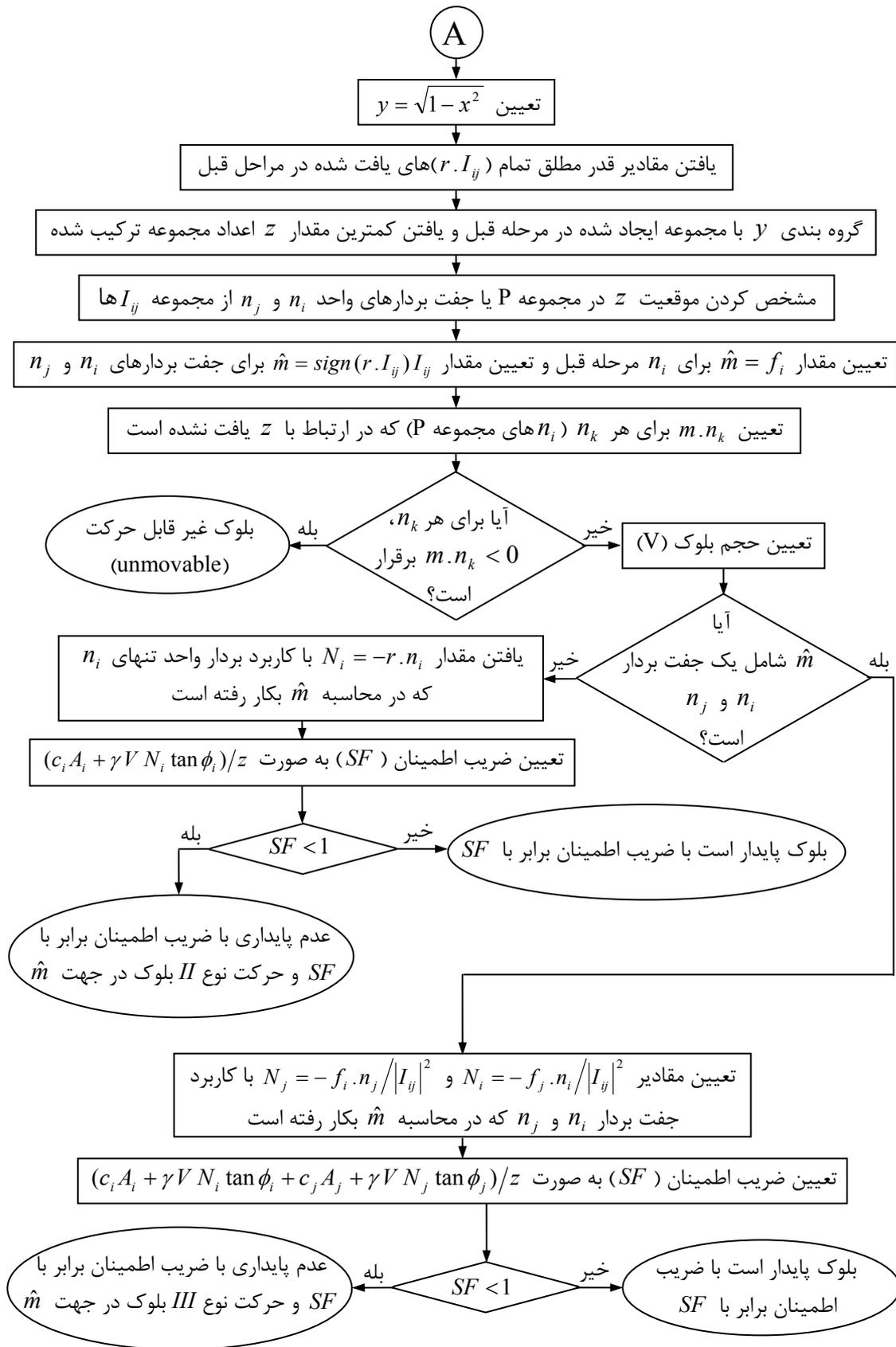
۵-۳-۸- الگوریتم تحلیل پایداری یک بلوک

اصول و مفاهیمی که در این الگوریتم استفاده شده است در فصل دوم در قسمت تحلیل برداری بلوک‌ها، به طور مفصل بیان شده است. این الگوریتم، از الگوریتم ارائه شده توسط وارپورتون اقتباس شده، که در آن تغییرات لازم برای کاربرد در این تحقیق داده شده است. ورودی این الگوریتم یک بلوک فعال به صورت نقاط گوشه‌های آن است.

در این الگوریتم، قابلیت جابجایی بلوک مورد بررسی قرار می‌گیرد و در صورت قابل حرکت بودن، ضریب اطمینان مربوط به آن محاسبه می‌شود. در فصل دوم بیان شد که در صورتی که بلوک دارای قابلیت حرکت باشد، حرکت آن فقط و فقط در یک جهت امکان‌پذیر است. بلوک در صورتی در این جهت حرکت می‌کند که دیواره‌های اطراف بلوک، مانع حرکت آن نشوند. سه نوع حرکت برای بلوک در نظر گرفته می‌شود که شامل سقوط آزاد، حرکت بر روی یک سطح و حرکت بر روی خط تقاطع دو صفحه است. تمام جهت‌های حرکت ممکن برای هر یک از انواع حرکت بلوک، شناسایی و جهتی که حرکت بلوک در آن جهت امکان‌پذیر است، انتخاب می‌شود. با توجه به نوع حرکت بلوک، ضریب اطمینان مربوط به آن محاسبه و در خروجی الگوریتم ارائه می‌شود. در صورت عدم قابلیت حرکت بلوک، عبارت "unmovable" در خروجی ظاهر می‌شود. در شکل ۵-۱۳ این الگوریتم به صورت نموداری نشان داده شده است.



شکل ۵-۱۳: الگوریتم تحلیل پایداری یک بلوک

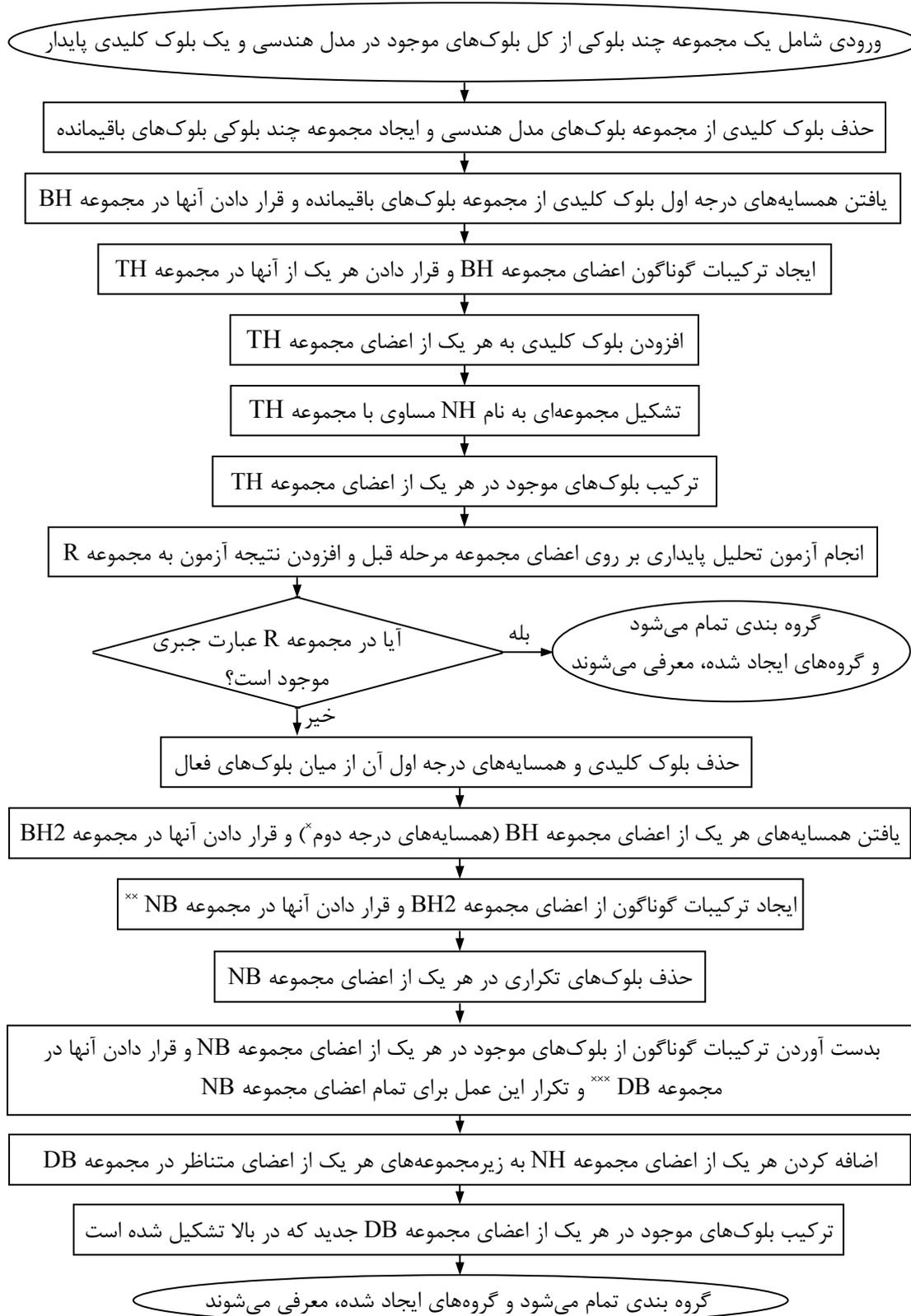


شکل ۵-۱۳ (ادامه): الگوریتم تحلیل پایداری یک بلوک

۵-۳-۹- الگوریتم گروه بندی بلوک‌ها

در روش گروه‌های کلیدی سه بعدی ارائه شده در این تحقیق، در صورتی که بلوک‌های کلیدی موجود در مدل هندسی، پایدار و دارای ضریب اطمینان بالاتر از یک باشند، گروه بندی بلوک‌ها با استفاده از این الگوریتم آغاز می‌شود. این الگوریتم با استفاده از بلوک کلیدی و کل بلوک‌های موجود در مدل هندسی به عنوان ورودی، عمل گروه بندی را انجام می‌دهد. در این الگوریتم، در مرحله اول گروه بندی، همسایه‌های درجه اول بلوک کلیدی یافت می‌شوند و ترکیبات مختلف بلوک‌های همسایه ایجاد و سپس بلوک کلیدی به آنها افزوده می‌شود. در صورتی که توسط آزمون تحلیل پایداری کلیه گروه‌های شامل بلوک کلیدی و همسایه‌های درجه اول آن، غیر قابل حرکت یا پایدار تشخیص داده شوند، مرحله دوم گروه بندی بلوک‌ها انجام می‌شود. در غیر این صورت گروه‌های تشکیل شده از بلوک کلیدی و همسایه‌های درجه اول آن به عنوان خروجی معرفی می‌شوند.

در مرحله دوم، همسایه‌های درجه دوم بلوک کلیدی از میان بلوک‌های فعال یافت می‌شوند. تمامی ترکیبات مختلف همسایه‌های درجه دوم بلوک کلیدی، با همسایه‌های درجه اول و بلوک کلیدی ایجاد و بدین ترتیب گروه بندی خاتمه می‌یابد. گروه‌های ایجاد شده به همراه بلوک‌های تشکیل دهنده آنها، خروجی الگوریتم را تشکیل می‌دهند. در شکل ۵-۱۴ این الگوریتم به صورت مفصل تر و نموداری نشان داده شده است.



* طول مجموعه‌های BH و BH2 یکسان است، به عبارتی تعداد اعضای آنها با یکدیگر برابر است.

** طول مجموعه‌های TH و NB یکسان است.

*** هر یک از اعضای مجموعه DB شامل زیر مجموعه‌هایی است که هر کدام از آنها یکی از ترکیبات گوناگون ایجاد شده است.

شکل ۵-۱۴: الگوریتم گروه بندی بلوک‌ها

۴-۵- اعتبارسنجی الگوریتم ارائه شده با ارائه چند مثال

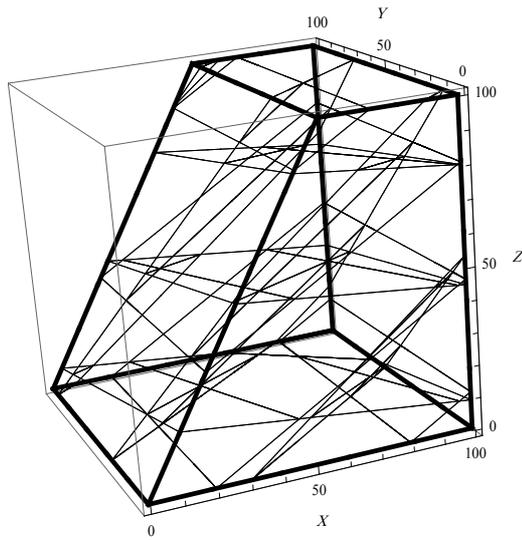
در این بخش به منظور اعتبارسنجی و صحت عمل الگوریتم ارائه شده، سه مدل مکانیکی تیپیک از یک شیروانی با چندین دسته درزه ایجاد شده است. مشخصات هندسی درزه‌ها و ویژگی‌های مکانیکی آنها در هر یک از مدل‌ها تغییر می‌کند. دقیقاً همان مدل‌ها با مشخصات هندسی و مکانیکی مشابه در نرم افزار 3DEC ایجاد شده و نتایج تحلیل در دو مدل با یکدیگر مقایسه شده است.

۴-۵-۱- مثال اول

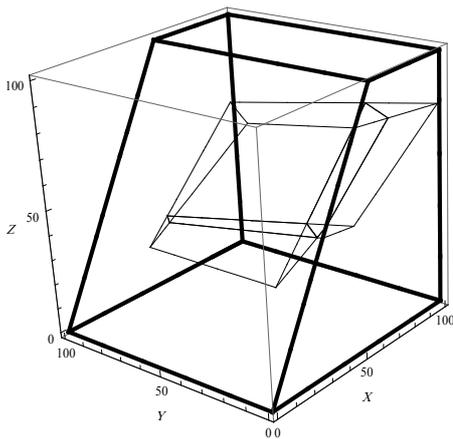
مشخصات هندسی و مکانیکی فرضی دسته درزه‌های بکار برده شده برای تهیه مدل مکانیکی توده سنگ درزه‌دار برای این مثال که در شکل ۵-۱۵ نشان داده شده، در جدول ۵-۱ بیان شده است. نتایج تحلیل پایداری با استفاده از برنامه کامپیوتری تهیه شده بر اساس الگوریتم 3DKGM در محیط Mathematica، به صورت گرافیکی در شکل ۵-۱۶ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱: مشخصات هندسی و مکانیکی دسته درزه‌ها برای تهیه مدل مکانیکی در مثال اول

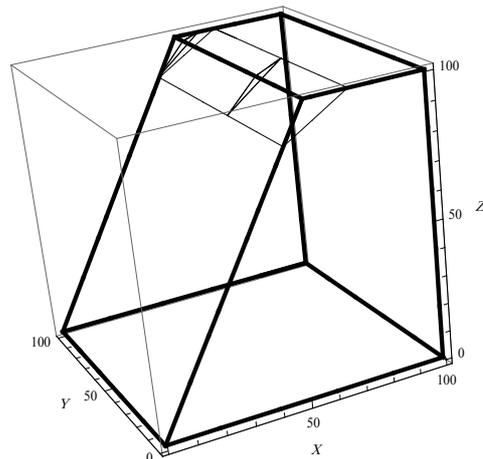
واحد	مقدار	پارامتر	
متر مکعب	$100 \times 100 \times 100$	ابعاد مدل	
درجه	۵۰	شیب	دسته درزه اول
درجه	۳۲۰	جهت شیب	
متر	۳۵	فاصله داری	
درجه	۳۰	شیب	دسته درزه دوم
درجه	۲۷۰	جهت شیب	
متر	۳۰	فاصله داری	
درجه	۱۰	شیب	دسته درزه سوم
درجه	۴۰	جهت شیب	
متر	۳۵	فاصله داری	
MPa	۰/۳۸۹	چسبندگی سطح درزه‌ها	دسته درزه اول، دوم و سوم
درجه	۲۹/۲۳	زاویه اصطکاک درزه‌ها	
GPa/m	۱۹۹/۵۳	سختی نرمال سطح درزه	
GPa/m	۹۵	سختی برشی سطح درزه	
Kg/m^3	۲۸۰۰	وزن حجمی	ماده سنگ



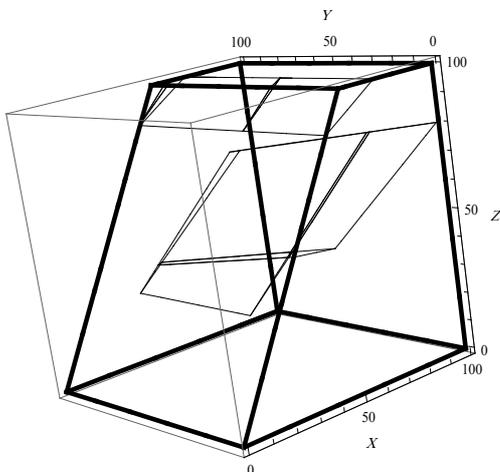
شکل ۵-۱۵: مدل مکانیکی ایجاد شده در محیط Mathematica



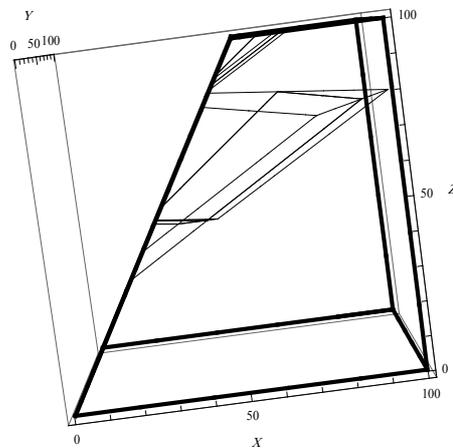
(ب) دید ایزومتریک ناپایدارترین گروه



(الف) دید ایزومتریک بلوک‌های ناپایدار



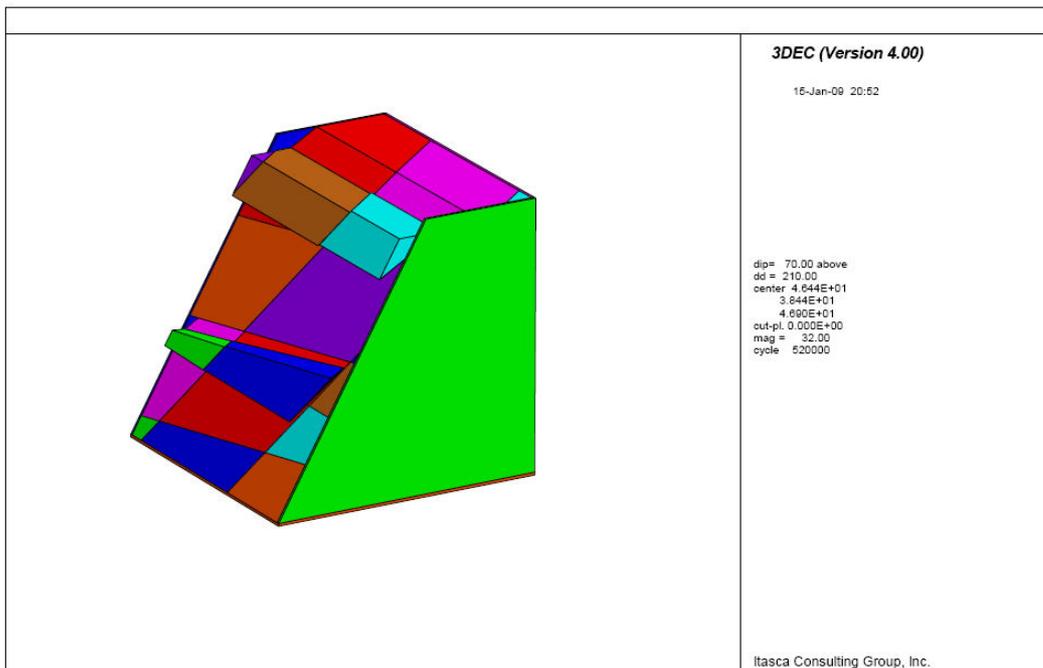
(د) دید ایزومتریک مجموعه بلوک‌های الف و ب



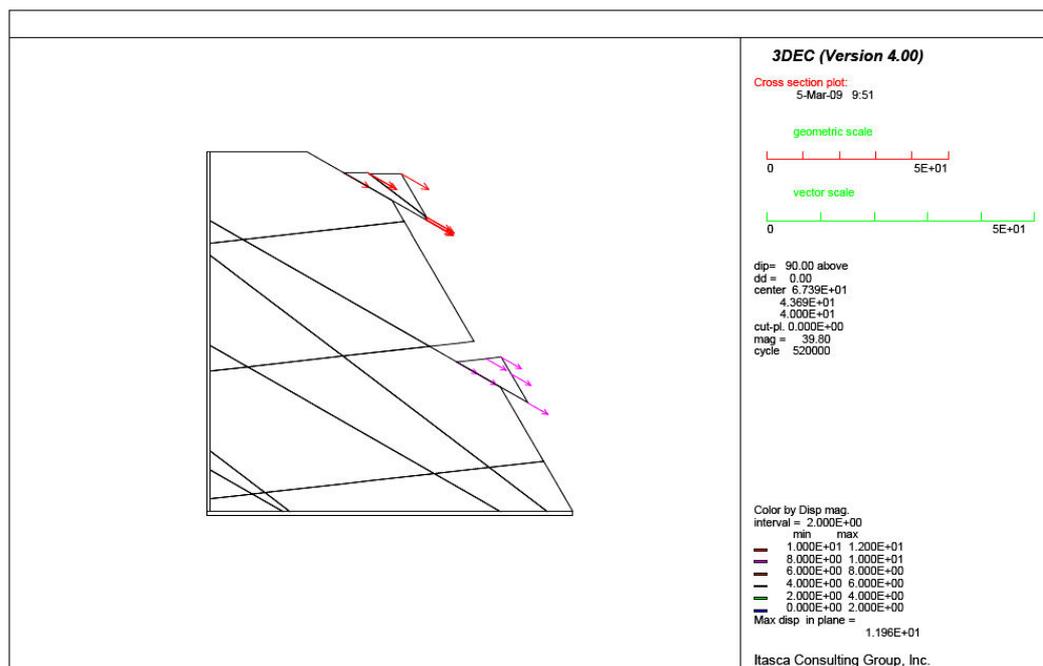
(ج) دید از پهلو بلوک‌های ناپایدار و ناپایدارترین گروه

شکل ۵-۱۶: تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال اول توسط 3DKGM

در این مثال، برنامه تهیه شده یک گروه ناپایدار از بلوک‌ها را به صورت نقاط گوشه‌های آنها معرفی می‌کند که این بلوک‌ها بطور ترسیمی در شکل ۵-۱۶-الف نشان داده شده‌اند. این برنامه سپس گروهی از بلوک‌ها را به عنوان ناپایدارترین گروه معرفی می‌کند که در شکل ۵-۱۶-ب نمایش داده شده است. مجموعه بلوک‌های ناپایدار به همراه ناپایدارترین گروه به طور شماتیک در شکل ۵-۱۶-د مشاهده می‌شود. نمایی سه بعدی از بلوک‌های ناپایدار که توسط نرم افزار 3DEC شناخته شده‌اند، به همراه بردارهای جابجایی در مقطعی دو بعدی از مدل، در شکل ۵-۱۷ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود دو گروه ناپایدار توسط 3DEC شناخته شده است و بلوک‌های بالاسری بلوک‌های جابجا شده در دامنه، حرکتی اندک را داشته‌اند. با مقایسه شکل ۵-۱۶ و ۵-۱۷ نتیجه می‌شود که در صورت فرض ناپایداری برای کلیه بلوک‌های ناپایدار و ناپایدارترین گروه در روش 3DKGM، نتایج حاصل از 3DEC و 3DKGM تطابق خوبی را در تحلیل پایداری شیروانی مورد مطالعه در این مثال، نشان می‌دهند.



(الف) نمایش سه بعدی از بلوک‌های ریزشی



(ب) بردارهای جابجایی در مقطعی دو بعدی از مدل

شکل ۵-۱۷: تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال اول توسط 3DEC

۵-۴-۲- مثال دوم

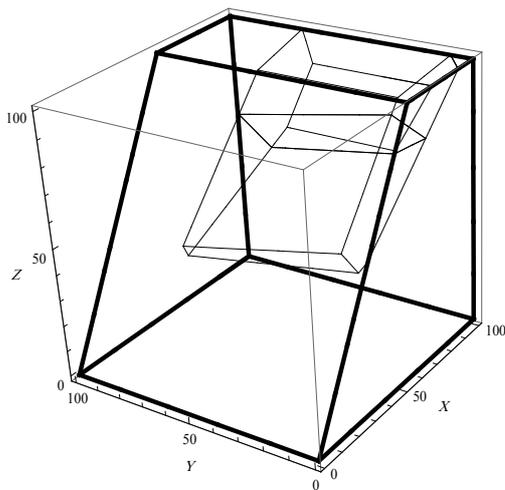
مشخصات هندسی و مکانیکی فرضی دسته درزه‌های مورد استفاده برای تهیه مدل مکانیکی توده سنگ درزه‌دار در جدول ۲-۵ بیان شده است. در این مثال از همان دسته درزه‌های مثال اول استفاده

شده است، بنابراین نمای سه بعدی آن همانند شکل ۵-۱۵ است. نتایج تحلیل پایداری با استفاده از برنامه کامپیوتری تهیه شده بر اساس الگوریتم 3DKGM در محیط Mathematica به صورت گرافیکی در شکل ۵-۱۸ نشان داده شده است.

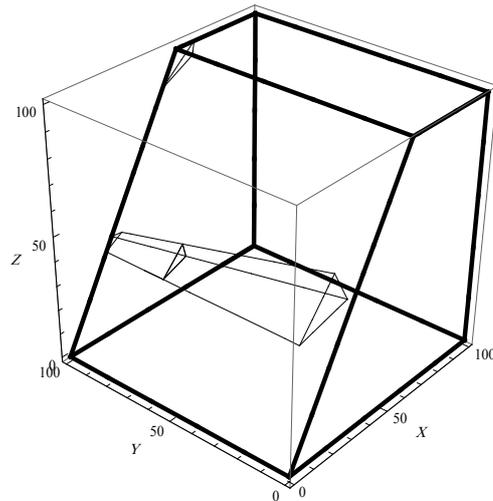
جدول ۵-۲: مشخصات هندسی و مکانیکی دسته درزه‌ها برای تهیه مدل مکانیکی در مثال دوم

واحد	مقدار	پارامتر	
متر مکعب	$100 \times 100 \times 100$	ابعاد مدل	
درجه	۵۰	شیب	دسته درزه اول
درجه	۳۲۰	جهت شیب	
متر	۳۵	فاصله داری	
درجه	۳۰	شیب	دسته درزه دوم
درجه	۲۷۰	جهت شیب	
متر	۳۰	فاصله داری	
درجه	۱۰	شیب	دسته درزه سوم
درجه	۴۰	جهت شیب	
متر	۳۵	فاصله داری	
MPa	بدون چسبندگی	چسبندگی سطح درزه‌ها	دسته درزه اول، دوم و سوم
درجه	۱۰	زاویه اصطکاک درزه‌ها	
GPa/m	۱۹۹/۵۳	سختی نرمال سطح درزه	
GPa/m	۹۵	سختی برشی سطح درزه	
Kg/m^3	۲۸۰۰	وزن حجمی	ماده سنگ

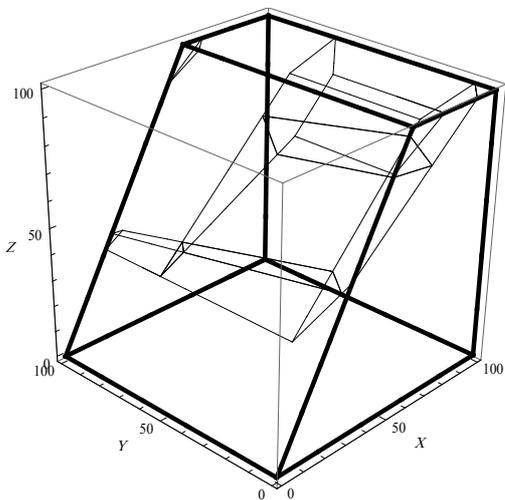
در این مثال، سه بلوک ناپایدار در مدل، توسط برنامه تهیه شده شناسایی شد که این بلوک‌ها در شکل ۵-۱۸ الف نشان داده شده است. همچنین برنامه گروهی از بلوک‌ها را پس از شناسایی و حذف بلوک‌های ناپایدار، به عنوان ناپایدارترین گروه شناسایی می‌کند که در شکل‌های ۵-۱۸ ب و ج نشان داده شده است. مجموعه بلوک‌های ناپایدار به همراه ناپایدارترین گروه به طور شماتیک در شکل ۵-۱۸ د مشاهده می‌شود.



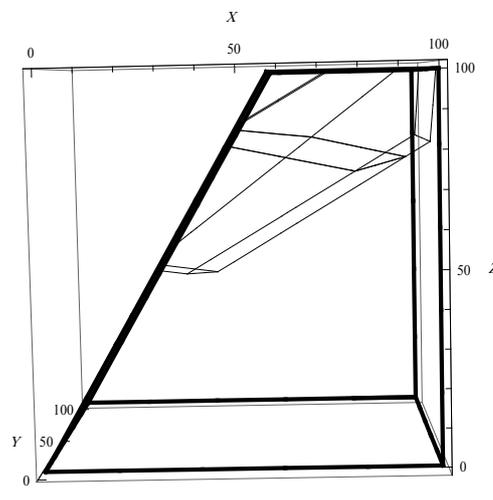
(ب) دید ایزومتریک ناپایدارترین گروه



(الف) دید ایزومتریک بلوک‌های ناپایدار



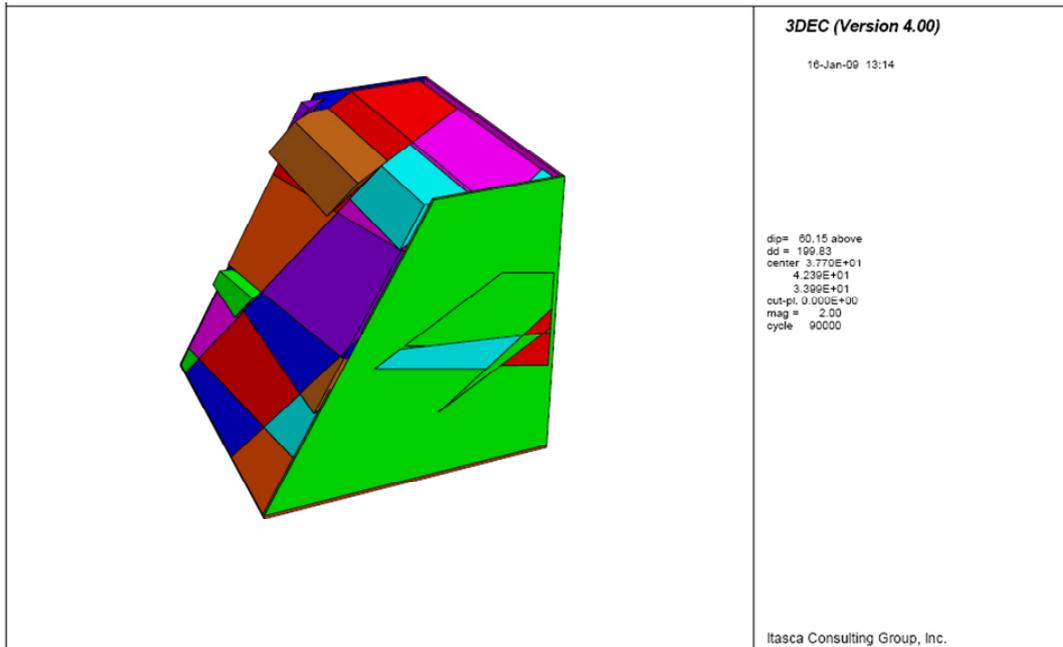
(د) دید ایزومتریک مجموعه بلوک‌های الف و ب



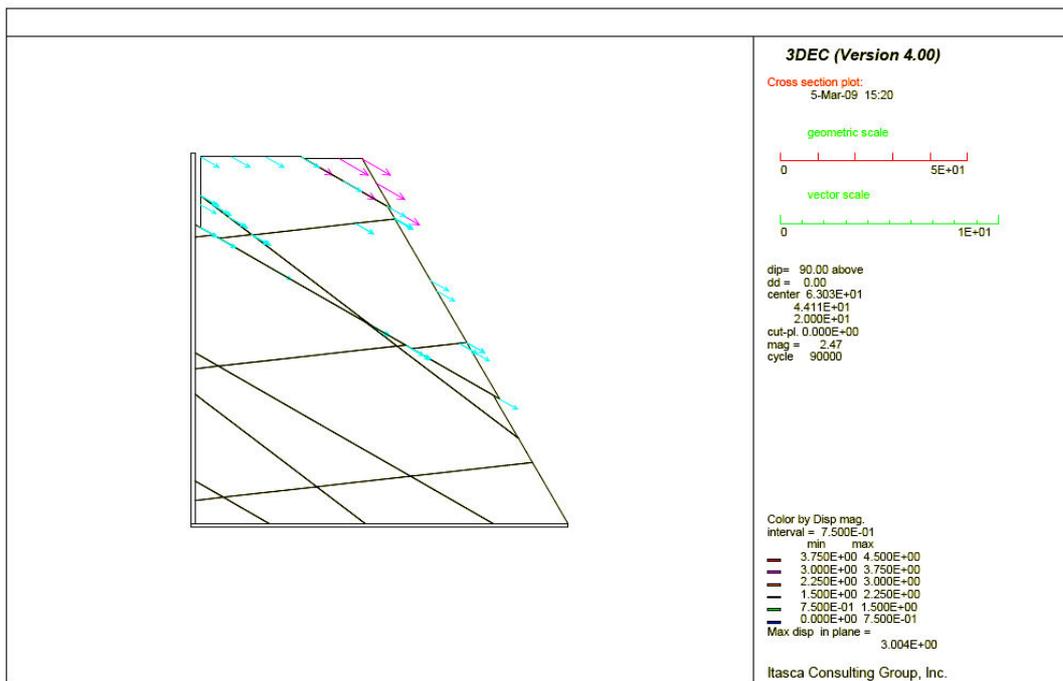
(ج) دید از پهلو ناپایدارترین گروه

شکل ۵-۱۸: تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال دوم توسط 3DKGM

نمایی سه بعدی از بلوک‌های ناپایدار که توسط نرم افزار 3DEC شناخته شده‌اند، به همراه بردارهای جابجایی در دو مقطعی دو بعدی از مدل، در شکل ۵-۱۹ نشان داده شده است. در این شکل سه بلوک ناپایدار اولیه شناخته شده است که در شکل ۵-۱۹-الف و ج قابل رویت است و همچنین ناپایداری‌ای در مجموعه‌ای از بلوک‌ها در شکل ۵-۱۹-الف و ب دیده می‌شود. با مقایسه نتایج، می‌توان دریافت که در شناسایی بلوک‌های ناپایدار اختلافاتی جزئی بین دو روش وجود دارد، اما مانند مثال قبل مجموعه بلوک‌های ناپایدار و ناپایدارترین گروه در روش 3DKGM تطابق بیشتری با نتیجه حاصل از تحلیل 3DEC دارد.

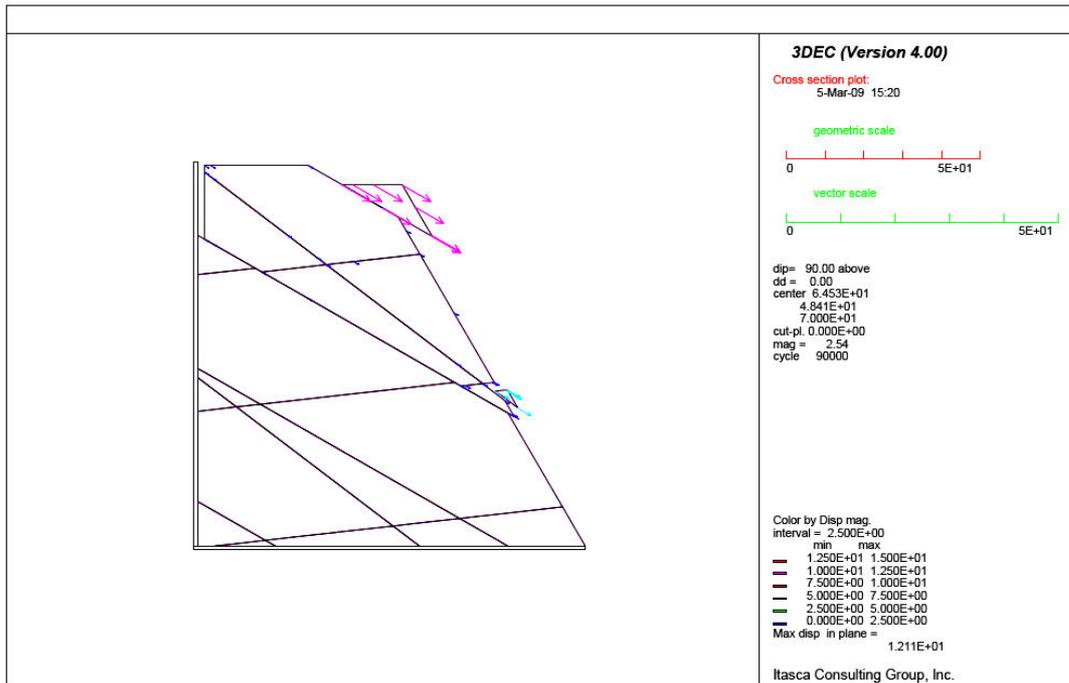


(الف) نمایی سه بعدی از بلوک‌های ریزشی



(ب) بردارهای جابجایی در مقطعی دو بعدی در نزدیکی دیواره سمت چپ مدل

شکل ۵-۱۹: تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال دوم توسط 3DEC



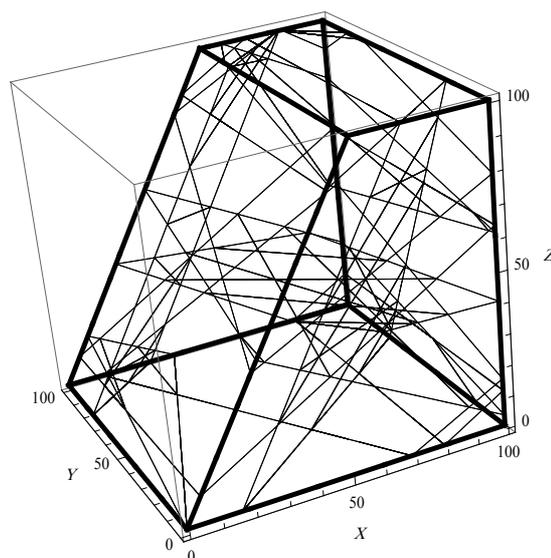
ج) بردارهای جابجایی در مقطعی دو بعدی در نزدیکی دیواره سمت راست مدل

شکل ۵-۱۹ (ادامه): تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال دوم توسط 3DEC

۵-۴-۳- مثال سوم

مشخصات هندسی و مکانیکی فرضی دسته درزه‌های بکار برده شده برای تهیه مدل مکانیکی توده

سنگ درزه‌دار که در شکل ۵-۲۰ نشان داده شده، در جدول ۵-۳ بیان شده است.



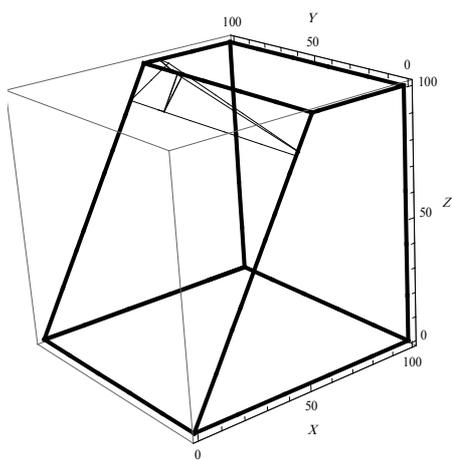
شکل ۲۰-۵: مدل مکانیکی ایجاد شده در محیط Mathematica

جدول ۵-۳: مشخصات هندسی و مکانیکی دسته درزه‌ها برای تهیه مدل مکانیکی در مثال سوم

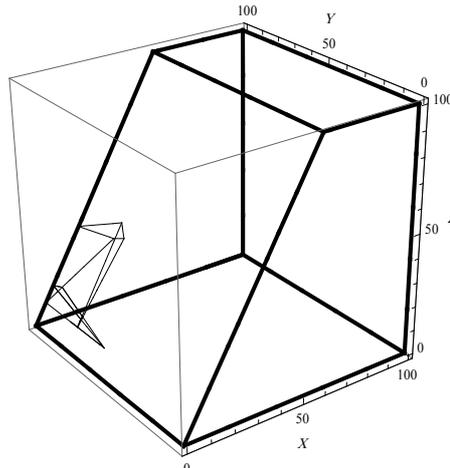
واحد	مقدار	پارامتر	
متر مکعب	$100 \times 100 \times 100$	ابعاد مدل	
درجه	۷۰	شیب	دسته درزه اول
درجه	۳۲۰	جهت شیب	
متر	۶۵	فاصله داری	
درجه	۳۰	شیب	دسته درزه دوم
درجه	۲۷۰	جهت شیب	
متر	۴۵	فاصله داری	
درجه	۳۰	شیب	دسته درزه سوم
درجه	۲۴۰	جهت شیب	
متر	۵۵	فاصله داری	
درجه	۳۰	شیب	دسته درزه چهارم
درجه	۱۱۰	جهت شیب	
متر	۵۰	فاصله داری	
درجه	۴۰	شیب	دسته درزه پنجم
درجه	۵۰	جهت شیب	
متر	۸۰	فاصله داری	
MPa	۰/۲	چسبندگی سطح درزه‌ها	دسته درزه اول، دوم، سوم، چهارم و پنجم
درجه	۱۰	زاویه اصطکاک درزه‌ها	
GPa/m	۱۹۹/۵۳	سختی نرمال سطح درزه	
GPa/m	۹۵	سختی برشی سطح درزه	
Kg/m^3	۲۸۰۰	وزن حجمی	ماده سنگ

نتایج تحلیل پایداری با استفاده از برنامه کامپیوتری تهیه شده بر اساس الگوریتم 3DKGM در محیط

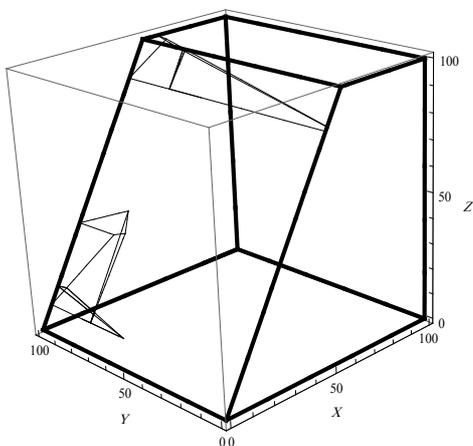
Mathematica در شکل ۵-۲۱ نشان داده شده است.



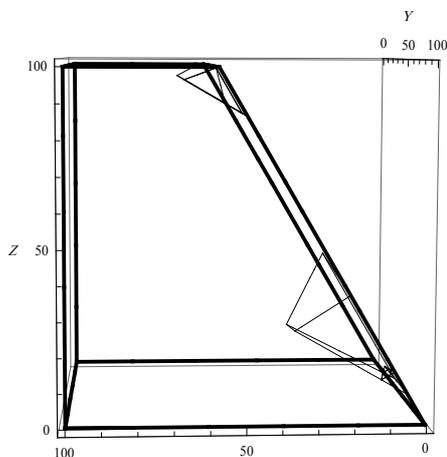
(ب) دید ایزومتریک ناپایدارترین گروه



(الف) دید ایزومتریک بلوک‌های ناپایدار



(د) دید ایزومتریک مجموعه بلوک‌های الف و ب



(ج) دید از پهلو بلوک‌های ناپایدار و ناپایدارترین گروه

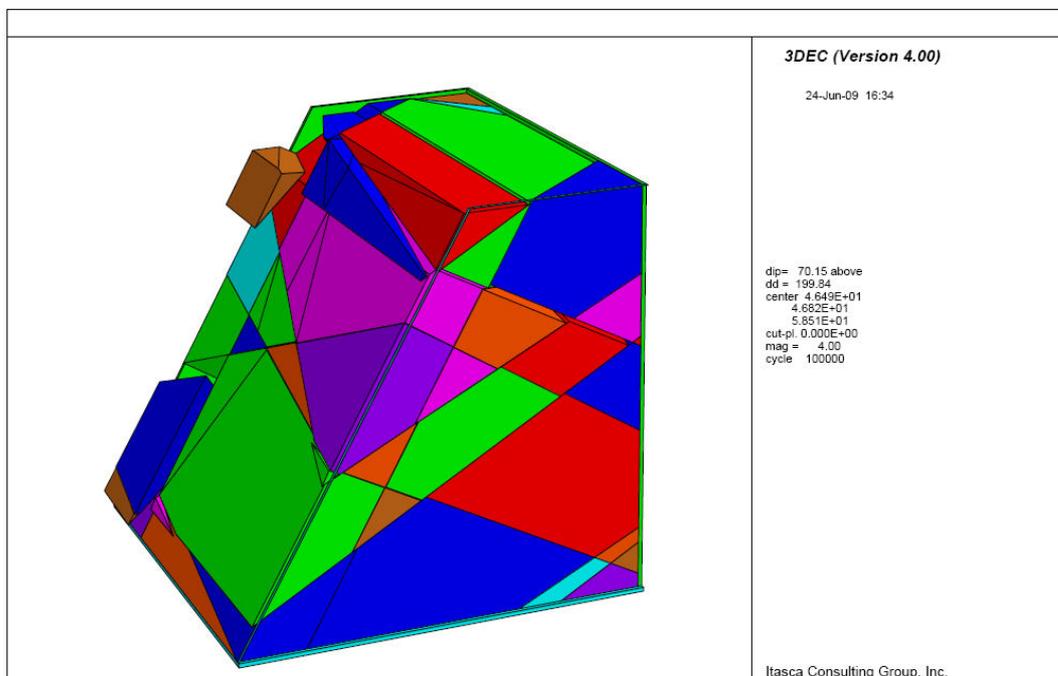
شکل ۵-۲۱: تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال سوم توسط 3DKGM

در این مثال، سه بلوک ناپایدار در مدل، توسط برنامه تهیه شده شناسایی شد که این بلوک‌ها در شکل ۵-۲۱-الف نشان داده شده است. همچنین برنامه گروهی از بلوک‌ها را به عنوان ناپایدارترین گروه شناسایی می‌کند که در شکل‌های ۵-۲۱-ب و ج نشان داده شده است. مجموعه بلوک‌های ناپایدار به همراه ناپایدارترین گروه به طور شماتیک در شکل ۵-۲۱-د مشاهده می‌شود.

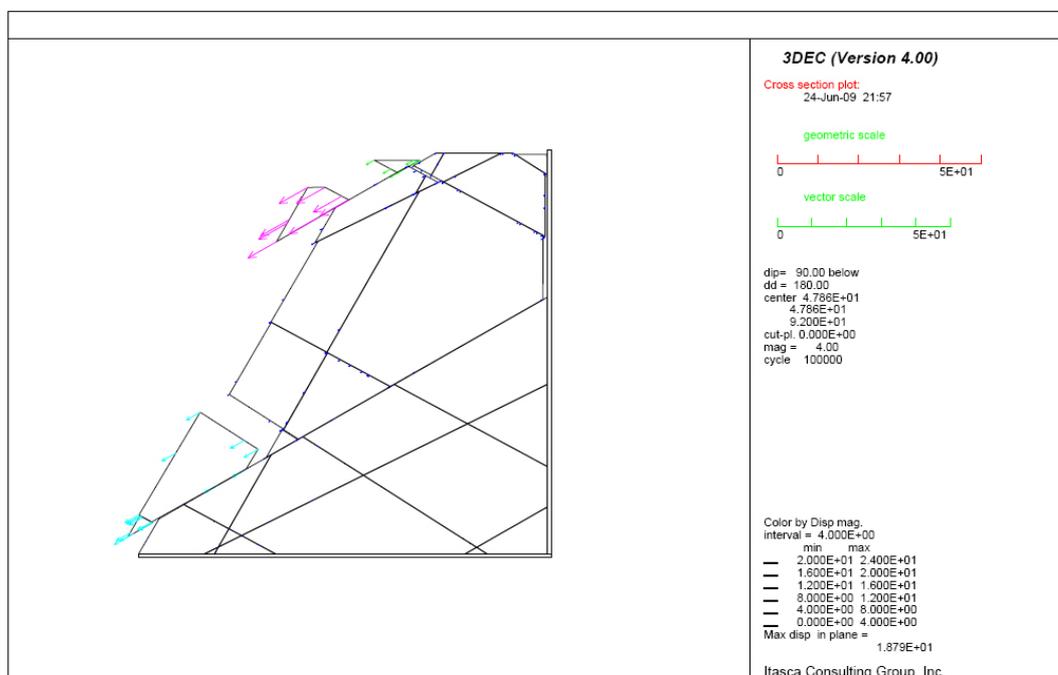
نمایی سه بعدی از بلوک‌های ناپایدار که توسط نرم افزار 3DEC شناخته شده‌اند، به همراه بردارهای جابجایی در مقطعی دو بعدی از مدل، در شکل ۵-۲۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود دو گروه ناپایدار توسط 3DEC شناخته شده است. با مقایسه شکل ۵-۲۱ و ۵-۲۲ همانند دو مورد قبلی نتیجه می‌شود که در صورت فرض ناپایداری برای کلیه بلوک‌های ناپایدار و

ناپایدارترین گروه در روش 3DKGM، نتایج حاصل از 3DEC و 3DKGM تطابق بسیار خوبی را در

تحلیل پایداری شیروانی مورد مطالعه در این مثال، نشان می‌دهند.



(الف) نمایی سه بعدی از بلوک‌های ریزشی



(ب) بردارهای جابجایی در مقطعی دو بعدی در نزدیکی دیواره سمت راست مدل

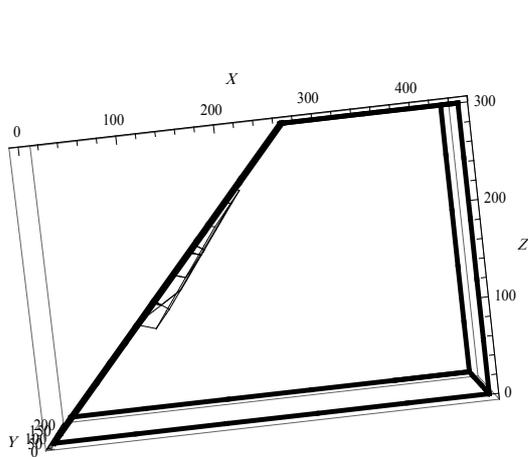
شکل ۵-۲۲: تحلیل پایداری مدل مکانیکی ایجاد شده در مثال سوم توسط 3DEC

۵-۵- تحلیل پایداری بلوک تکتونیکی II معدن چغارت

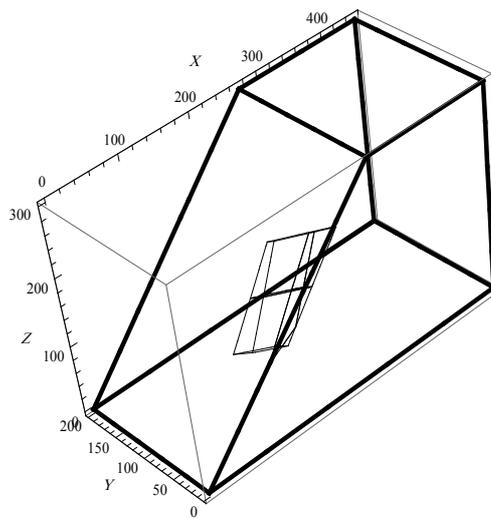
به منظور آزمایش کارآیی روش ارائه شده بر روی یک مورد واقعی، بلوک تکتونیکی شماره II معدن چغارت به عنوان مورد مطالعاتی انتخاب شده است. با استفاده از مدل هندسی این بلوک که در فصل چهارم تهیه شده است و با کاربرد مولفه‌های معرفی شده در جدول ۴-۵ که در نتیجه مطالعات قبلی تهیه شده، مدل مکانیکی آن در محیط Mathematica و نرم افزار 3DEC ایجاد شده است. نتایج اجرای روش 3DKGM و نرم افزار 3DEC بر روی مدل مکانیکی تهیه شده، به ترتیب در شکل‌های ۲۳-۵ و ۲۴-۵ نشان داده شده است.

جدول ۴-۵: مولفه‌های استفاده شده برای بلوک تکتونیکی II در مدل مکانیکی و روش محاسبه آنها

پارامترها	روش محاسبه	واحد	مقدار
RMR	طبقه بندی مهندسی سنگ	----	۶۱/۵
مدول الاستیسیته معادل	$E_s = 10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)}$	MPa	۱۹/۹۵
سختی نرمال سطح درزه	JKn=10Es	GPam ⁻¹	۱۹۹.۵۳
سختی برشی سطح درزه	10JKs ≤ JKn ≤ 100JKs	GPam ⁻¹	۹۵
وزن حجمی ماده سنگ	آزمایش	Kg / m ³	۲۷۵۳
چسبندگی سطح درزه‌ها	تعیین خواص مقاومتی معیار بارتن - باندیس	MPa	۰/۳۸۹
زاویه اصطکاک درزه‌ها	تعیین خواص مقاومتی معیار بارتن - باندیس	درجه	۲۹.۲۳
تنش‌های برجا	به دلیل ماهیت سازه و تمرکز خطوط هم پتانسیل در پای پله و دور شدن از جبهه کار در نظر گرفته نمی‌شود		
آب زیرزمینی	به علت فقدان اطلاعات، نقش آب در کاهش مولفه‌های مقاومتی و فشار ناشی از آن در تحلیل‌ها در نظر گرفته نشده است		
تنش‌های ثقلی	تنها تنش‌های در نظر گرفته شده در این تحلیل، تنش‌های ناشی از وزن بلوک‌های سنگی است		

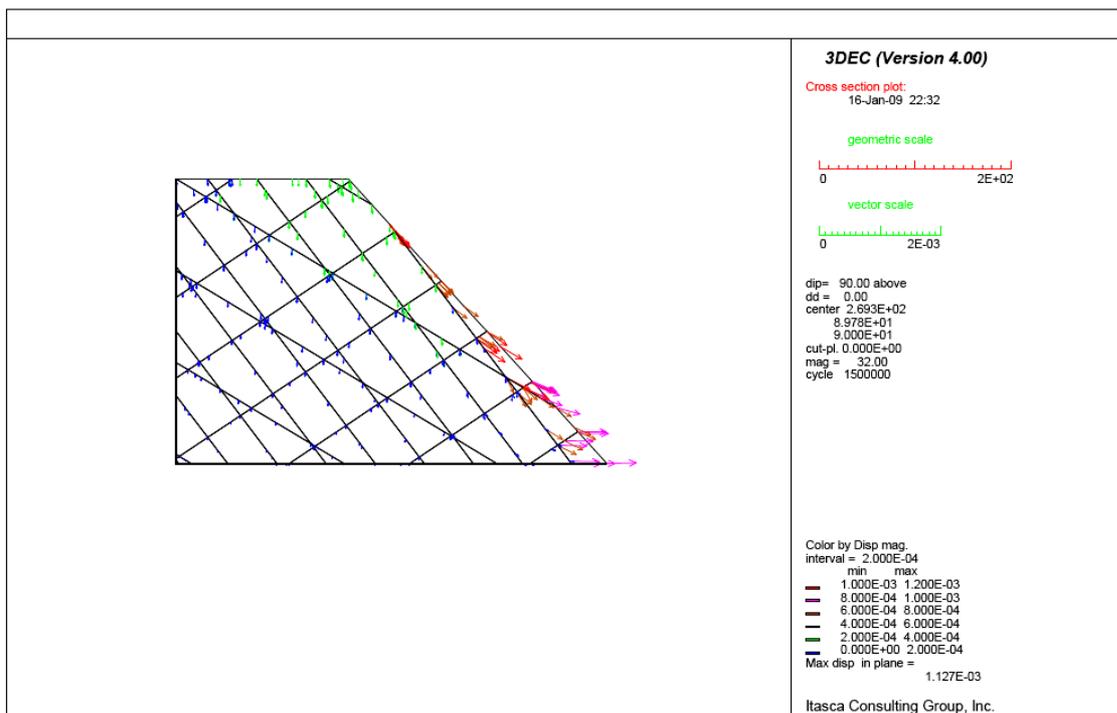


(ب) دید از پهلو



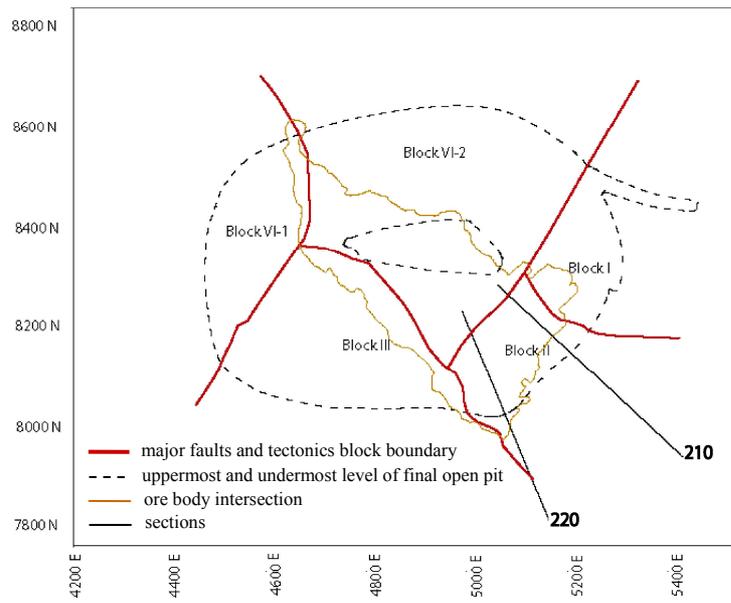
(الف) دید ایزومتریک

شکل ۵-۲۳: ناپایدارترین گروه شناخته شده توسط روش 3DKGM برای مدل مکانیکی بلوک II چغارت

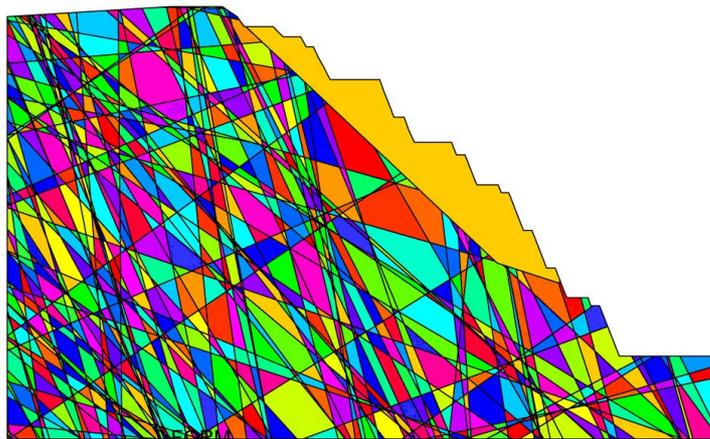


شکل ۵-۲۴: بردارهای جابجایی ایجاد شده در مقطعی دو بعدی از بلوک II چغارت

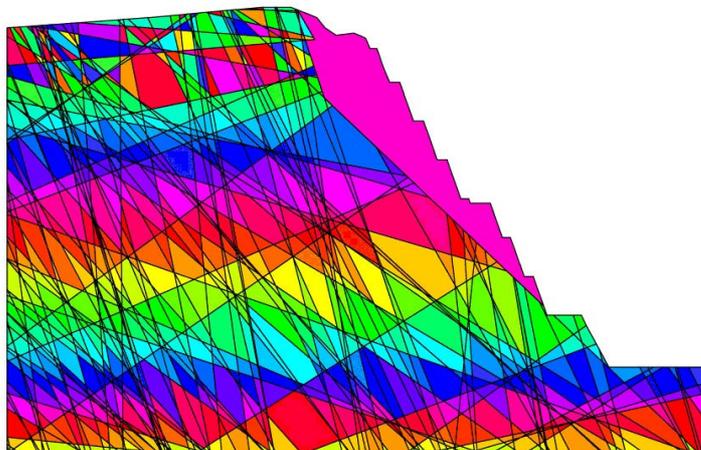
همانطور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، برنامه کامپیوتری تهیه شده بر اساس روش 3DKGM و همچنین نرم افزار 3DEC، این بلوک را پایدار شناسایی می‌کنند. بیشینه جابجایی مشخص شده توسط 3DEC در حد اغماض است و برنامه تهیه شده نیز ناپایدارترین گروه را با ضریب اطمینان



شکل ۵-۲۶: موقعیت مقاطع مورد تحلیل در بلوک II چگارت [۳۲]



شکل ۵-۲۷: ناپایدارترین گروه مقطع سمت راست با ضریب اطمینان ۱/۹۷ [۳۲]



شکل ۵-۲۸: ناپایدارترین گروه مقطع سمت چپ با ضریب اطمینان ۱/۰۳ [۳۲]

در این گزارشات، مقطع ۲۱۰ (سمت راست) پایدار و مقطع ۲۲۰ (سمت چپ) ناپایدار معرفی شده است. میزان ماکزیمم جابجایی در مقطع ۲۱۰، ۲۸ سانتی‌متر و برای مقطع ۲۲۰، ۵۸ سانتی‌متر گزارش شده است [۳۲]. از آنجا که در عمل برای این بلوک تاکنون ریزشی گزارش نشده است، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج تحلیل سه بعدی این بلوک تطابق بیشتری با واقعیت دارد. همانند نتیجه‌ای که قبلاً از اجرای روش ارائه شده در این تحقیق بر روی مدل‌های تیپیک گرفته شد، مکان و موقعیت ناپایداری در مدل به خوبی توسط این روش شناسایی می‌شود، اما ضریب اطمینانی که از این روش بدست می‌آید، محافظه‌کارانه بوده که باید در تحلیل‌ها به این نکته توجه نمود. بنابراین روش گروه‌های کلیدی سه بعدی امکان تحلیل‌های واقعی‌تر شیب سنگ‌های درزه‌دار را فراهم کرده و در پروژه‌های بزرگ قابل کاربرد است.

۵-۶- مشخصات نرم افزار تهیه شده

نرم افزار تهیه شده در محیط *Mathematica* که برای تحلیل مکانیکی شیب‌های سنگی با استفاده از روش جدید گروه‌های کلیدی سه بعدی ارائه شده است، 3DKGM نام دارد. *Mathematica* نرم افزاری جامع برای انجام محاسبات علوم کاربردی و فنی است. اکثر عملیات ریاضی به کمک این نرم افزار با دستورهایی ساده، به راحتی قابل اجراست. این نرم افزار علاوه بر توانایی و امکانات زبانهایی چون بیسیک^{۵۴} و فرترن^{۵۵}، دارای مزایایی چون شناخت اعداد بزرگ و کوچک، در برداشتن همه توابع، پیاده‌سازی اکثر الگوریتم‌های کاربردی با سرعت بالا، قبول ورودی (حتی تابع) با روشی آسان، ارائه فرم گرافیکی همراه با صدا و متحرک‌سازی و بسته^{۵۶} نویسی می‌باشد. برخی از دستورات موجود در *Mathematica* که در نرم افزار 3DKGM بکار رفته، در جدول ۵-۵ بیان شده است.

⁵⁴ . Basic

⁵⁵ . Fortran

⁵⁶ . Package

جدول ۵-۵: دستورات برنامه نویسی بکار رفته در نرم افزار 3DKGM

دستور	تفسیر دستور
For	با آزمایش کردن یک شرط یکسری دستورات را به فرم تکراری اجرا می کند
IF	با برقرار بودن یا نبودن شرطی، دستور یا دستورات مناسبی را اجرا می کند
Map	برای محاسبه و ارزیابی تابع مورد نظر روی عناصر داخل مجموعه به طور جداگانه، بکار می رود
While	مادامی که یک شرط بخصوص برقرار باشد، گروهی از دستورات به صورت تکراری اجرا می شوند
Position	موقعیت بخش های مورد نظر را در عبارت جستجو می کند
Delete	داده یا داده هایی را از مجموعه داده ها حذف می کند
Join	عمل اضافه کردن به یکدیگر را انجام می دهد
Append	عمل اضافه کردن یک داده یا داده هایی به انتهای یک مجموعه یا لیستی را انجام می دهد
Flatten	لیست های تو در تو را به یک لیست واحد تبدیل می کند
Length	تعداد مولفه های یک مجموعه را می دهد و همچنین طول بردار را بیان می کند
Range	برای ساختن بردار با مولفه هایی که در یک مجموعه بیان می شود بکار می رود
Extract	داده های مورد نظر را استخراج می کند
Abs	بیان کننده تابع قدر مطلق است
Round	نزدیک ترین عدد صحیح به متغیر مورد نظر را بیان می کند
Member	عضو مورد نظر را نشان می دهد
Show	برای رسم مجدد و ترکیب رسم ها به کار می رود
Line	برای اتصال نقاط (X_i, Y_i, Z_i) به وسیله پاره خط استفاده می شود

ورودی نرم افزار 3DKGM شامل چهار مجموعه جداگانه است:

الف) مجموعه کلیه بلوک های موجود در مدل هندسی.

این مجموعه، خروجی برنامه مدل سازی هندسی تهیه شده است که در فصل چهارم بیان شد. هر یک از اعضای این مجموعه، بلوک هایی هستند که توسط نقاط گوشه های خود معرفی می شوند.

ب) مجموعه دسته درزه های موجود در مدل هندسی.

اعضای این مجموعه شامل معادله هر یک از صفحات درزه موجود در مدل است که توسط مولفه‌های A, B, C, D نشان داده می‌شوند.

ج) مجموعه دسته درزه‌ها، صفحات مرزی مدل و صفحه استخراجی.

هر یک از معادلات صفحات درزه، صفحات مرزی مدل و صفحه استخراجی به عنوان یک عضو داخل این مجموعه قرار می‌گیرند.

د) معادله صفحه استخراجی به صورت A, B, C, D .

در این نرم افزار سطح استخراجی باید به صورت یک صفحه تعریف شود زیرا قوانین مورد استفاده در ایجاد توابع تهیه شده در این نرم افزار، برای شکل‌های هندسی محدب تعریف شده‌اند.

در جدول ۵-۶ توابع مورد استفاده در ایجاد نرم افزار 3DKGM ارائه شده است. هر یک از توابع تهیه شده با یک نام معرفی می‌شوند و وظیفه‌ای خاص را در این نرم افزار ایفا می‌کنند که در این جدول بیان شده است.

نرم افزار 3DKGM بر اساس ورودی‌های بیان شده، اقدام به تحلیل پایداری شیب سنگ مورد نظر می‌کند. برای کاربرد این نرم افزار، ابتدا باید هر یک از توابع موجود به ترتیبی که در نرم افزار ارائه شده‌اند اجرا شوند. سپس ورودی‌ها با یک نام معرفی می‌شوند و تابع 3DKGM که بدنه اصلی نرم افزار است، ورودی‌ها را دریافت و در نهایت پس از اجرای این تابع، خروجی ارائه می‌شود.

خروجی این نرم افزار، شامل اطلاعاتی در مورد پایداری یا عدم پایداری شیب سنگ مورد نظر به صورت گرافیکی و یک بانک اطلاعاتی است که نقاط گوشه‌های بلوک‌ها را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. در صورتی که شیب پایدار تشخیص داده شود، پیغام "شیروانی پایدار است"، چاپ می‌شود. در غیر این صورت اگر گروه یا گروه‌های ناپایداری وجود داشتند، پیغام "گروه ناپایدار عبارتست از" چاپ می‌شود و سپس گروه یا گروه‌های ناپایدار به صورت بلوک‌های تشکیل دهنده آنها چاپ می‌شوند. در مورد اول پس از چاپ پیغام شیروانی پایدار است، پیغام "ناپایدارترین گروه" به همراه گروه مربوطه و پیغام "مینیمم ضریب اطمینان" به همراه ضریب اطمینان مربوط به ناپایدارترین گروه چاپ می‌شود. در هر

مورد، موقعیت و شکل گروه‌های ناپایدار و یا ناپایدارترین گروه به صورت گرافیکی در مدل هندسی نشان داده می‌شود.

جدول ۵-۶: توابع تهیه شده مورد استفاده در ساخت نرم افزار 3DKGM

نام تابع	وظیفه تابع
Round	جهت گرد کردن نتایج محاسبات، با دقت دلخواه بکار می‌رود
Unit Line Normal	این تابع یک بردار را به بردار یکه تبدیل می‌کند
Find Contact Block	توسط این تابع دو بلوک مماس با یکدیگر (همسایگی درجه اول) یافت می‌شوند
Combine Blocks	دو یا چند بلوک توسط این تابع با یکدیگر ترکیب و به بلوک واحدی تبدیل می‌شوند
Line Normal	توسط این تابع، بردار نرمال سطوح تشکیل دهنده بلوک ایجاد می‌شوند
Active Block	این تابع، بلوک‌های در تماس با سطح استخراجی (فعال) را از میان کل بلوک‌های موجود در مدل هندسی مشخص می‌کند
Area Plane	این تابع، مساحت یک صفحه (وجه) از بلوک را محاسبه می‌کند
Block Volume	حجم یک بلوک توسط این تابع محاسبه می‌شود
Block Analysis	توسط این تابع پایداری یا ناپایداری یک بلوک با تعیین ضریب اطمینان مربوط به آن، مورد بررسی قرار می‌گیرد
Grouping	این تابع عمل گروه بندی بلوک‌ها را با شروع از بلوک کلیدی آغاز می‌کند. گروه بندی تا بلوک‌های همسایه درجه دوم بلوک کلیدی انجام می‌شود
3DKGM	این تابع بدنه اصلی نرم افزار است و در آن با استفاده از کلیه توابع موجود، الگوریتم روش گروه‌های کلیدی سه بعدی اجرا و خروجی‌ها ارائه می‌شوند

فصل نهم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۶- نتیجه‌گیری

هدف اصلی در این تحقیق، توسعه سه بعدی روش گروه‌های کلیدی برای کاربرد در تحلیل‌های مکانیکی و ارائه نرم افزاری برای کاربرد روش مذکور است. تحلیل پایداری دیواره شماره II معدن چغارت تنها به عنوان یک مورد مطالعاتی مورد توجه قرار گرفته است.

با توجه به تحقیقات صورت گرفته، مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های سه بعدی انجام شده می‌تواند به نتایج ذیل دست یافت:

۱- توسعه روش گروه‌های کلیدی به سه بعد انجام پذیرفته و نرم افزاری بر اساس این روش برای کاربرد عملی آن ارائه شده است.

۲- نتایج حاصل از اجرای روش بر روی مدل‌های شاخص نشان می‌دهد که ضریب اطمینان حاصل از این روش محافظه‌کارانه است و برای دستیابی به نتایج واقعی‌تر احتیاج است که مرز بین پایداری و ناپایداری (ضریب اطمینان حدی)، بالاتر در نظر گرفته شود.

۳- روش ارائه شده توانایی بالایی در تشخیص ناپایداری دارد.

۴- تفاوت‌هایی در میزان ناپایداری در مثال‌های مورد بررسی مشاهده می‌شود که ناشی از فرض‌های حاکم بر روش ارائه شده است.

۵- بر اساس مدل‌سازی‌ها و تحلیل‌های انجام شده با استفاده از نرم افزار تهیه شده بر اساس الگوریتم پیشنهادی و نرم افزار 3DEC، بلوک تکتونیکی II چغارت پایدار است.

۶- احتمال ایجاد ناپایداری در قسمت میانی شیب و در سمت چپ شیروانی وجود دارد.

۲-۶- پیشنهادات

به منظور تحلیل واقعی‌تر شیروانی و مد نظر قرار دادن پارامترهای بیشتری در یک تحلیل تعادل حدی، پیشنهاد می‌شود که روش ارائه شده در این تحقیق در موارد ذیل بسط و توسعه داده شود:

۱- در نظر گرفتن حرکت واژگونی در تحلیل پایداری یک بلوک و در نظر گرفتن کمینه ضریب اطمینان از میان حرکت واژگونی و لغزشی.

۲- مد نظر قرار دادن نیروهای بین بلوکی در تحلیل پایداری یک گروه کلیدی توسط بسط روش سارما به سه بعد یا یافتن راه حلی مشابه با آن که بر اساس تعادل حدی باشد.

۳- حل مساله یافتن بحرانی‌ترین سطح لغزش، که با در نظر گرفتن پیچیدگی زمانی مساله از مشکلات الگوریتم دو بعدی و نیز سه بعدی است.

۴- برای افزایش سرعت اجرای برنامه و کاربرد آن برای مدل‌های پیچیده‌تر، برنامه‌ها باید با الگوریتم‌های بهتر و به زبان ماشین نوشته شوند.

به منظور ارائه تحلیلی با حاشیه اطمینان بیشتر برای بلوک تکتونیکی II چغارت، پیشنهاد می‌شود که:

۵- مدل هندسی با فاصله‌داری درزه‌های کمتر ایجاد و توسط نرم افزارهای موجود تحلیل مکانیکی شود که البته عملی شدن این کار به شدت وابسته به تهیه کامپیوتری با سرعت پردازش بسیار بالا می‌باشد.

۶- برای ارائه تحلیلی با حاشیه اطمینان بیشتر برای بلوک تکتونیکی II چغارت، باید سایر دسته درزه‌هایی که در تحلیل از آن صرف نظر شده بود و همچنین دسته درزه‌های فرعی و تصادفی، در نظر گرفته شوند.

۷- در نظر گرفتن تأثیر آب بر تحلیل پایداری

۸- در نظر گرفتن تأثیر انفجار بر تسهیل جابه‌جایی بلوک‌ها

مراجع

1. Hock E. and Bray J. W. (1977), "Rock Slope Engineering", 2nd edn, Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 402.
2. Lucas J. M. (1980), "A general stereographic method for determining the possible mode of failure of any tetrahedral rock wedge". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech., pp. 57-61.
3. Croney P., Legge T. F. & Dhalla A. (1978), "Location of block release mechanisms in tunnels from geological data and the design of associated support. Computer Methods in Tunnel Design", Institution of Civil Engineers, London, pp.97-119
4. Priest S. D. (1980), "The use of inclined hemisphere projection methods for the determination of kinematic feasibility, slide direction and volume of rock blocks". Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. pp. 1-23.
5. Shih Ken-hua. (1978), "A Geometric Method of Stability Analysis of Rock Mass", Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Ministry of Water Conservancy and Electric Power, Academia Sinica, Peking.
6. Warburton P. M. (1981), "Vector Stability Analysis of an Arbitrary Polyhedral Rock Block with any Number of Free Faces", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 18, pp. 415-427.
7. Goodman, R. E. and Shi-Gen-Hua. (1985), "Block theory and its application to rock engineering", Prentice- Hall, New Jersey.
8. Yarahmadi-Bafghi, A. R. and Verdel, T. (2003), "The key-group method". International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, pp. 495-511.
9. امامی، م؛ یاراحمدی، ا؛ سالاری راد، ح؛ (۱۳۸۵) روش گروه‌های کلیدی جهت دار در تحلیل پایداری شیب سنگ‌های درزه دار؛ مجله علمی پژوهشی مهندسی معدن، دور دوم، ش ۴، ص ۵۵ تا ۶۳.
10. Yarahmadi-Bafghi A. R. and Verdel, T. (2005), "Sarma-based key-group method for rock slope stability analysis", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, pp. 1019-1043.
11. Mauldon M. and Chou K. C. and Wu Y. (1997), "Limit Analysis of 2-D Tunnel Key blocks", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol 34, pp. 379-

397.

12. Wibowo, J. L. (1997), "Consideration of secondary block in key-block analysis", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci*, 34 (3-4).

۱۳. امامی ع، (۱۳۸۵)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "تحلیل قابلیت اعتماد دیواره نهایی بلوک تکتونیکی ۲ معدن چغارت"، دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

14. Lin D. and Fairhurst C. (1988), "Static Analysis of the stability of Three-dimensional blocky systems around excavations in rock", *International journal of rock mechanics and mining sciences*, vol 25, pp. 139-147.

15. Hoek E, Bray J. W. (1977), "Rock slope engineering", The Institute of Mining and Metallurgy.

16. Sarma K. S. (1979), "Stability analysis of embankments and slopes", *J Geotech. Am Soc. Civ. Eng*, 105.

17. Hoek E. (1987), "General two-dimensional slope stability analysis", In: Brown ET, editor. *Analytical and computational methods in engineering rock mechanics*.

18. Seed R. B., Mitchell J. K., Seed H. B. (1990), "Kettleman hills waste landfill slope failure, II: stability analysis". *J Geotech. Eng. ASCE*, 116, pp. 90-669.

19. Morgenstern N. R. (1992), "The evaluation of slope stability", In: *stability and performance of slopes and embankments*. ASCE Geotechnical Special Publications, pp. 1-26.

20. Hungr O. (1987), "An extension of Bishops simplified method of slope stability analysis to three dimension", *Geotechnique*, 37, pp. 7-113.

21. Hungr O., Salgado F. M., Byrne P. M. (1989), "Evaluation of a threedimensional method of slope stability analysis", *Can Geotech J*, 26, pp. 86-679.

22. Chen R., Chameau J. L. (1983), "Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes", *Geotechnique*, 33, pp. 31-40.

23. Lam L., Fredlund D. G. (1993), "A general limit-equilibrium model for three-dimensional slope stability analysis", *Can Geotech J*, 30, pp. 19-905.

24. Donald I., Chen Z. Y. (1997), "Slope stability analysis by the upper bound approach: fundamentals and methods". *Can Geotech J*, 34, pp. 62-853.

25. Sokolovski V. V. (1960), "Statics of soil media", Translated by Jones DH. and Scholfield AN., Butterworth, London.

26. Zuyu Chen and et. al. (2001), "A three-dimensional slope stability analysis method

using the upper bound theorem, Part I: theory and methods", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38, pp. 369-378.

27. Zuyu Chen (2001), "A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, Part II: numerical approaches, applications and extensions", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38, pp. 379-397.

۲۸. شرکت مهندسين مشاور کاوشگران، (۱۳۷۳)، "گزارش نهایی پایداری دیواره‌های معدن چغارت".

۲۹. شرکت مهندسين مشاور EBE آلمان، "گزارش آزمایشگاه مکانیک سنگ بر روی گمانه اکتشافی ۶A، آرشیو معدن چغارت.

۳۰. امینی ا، (۱۳۸۵)، پایان نامه کارشناسی، "مدل‌سازی هندسی - ژئوتکنیکی سه بعدی توده سنگ -

های درزه‌دار به روش آماری در محیط Mathematica"، دانشگاه یزد.

31. Heliot D. (1988), "Conception et realisation d'un outil integre de modelisation des massifs rocheux fracture en blocs", These INPL, Laboratoire de mecanique des terrains, Nancy, France.

۳۲. طرح پژوهشی، مرکز تحقیقات مواد معدنی، (۱۳۸۷) تعیین قابلیت اعتماد دیواره های معادن

سطحی با مورد مطالعاتی دیواره های نهایی معدن چغارت، ایران.

Abstract

The most well-known of these methods for purposes of stability analysis of fractured rock masses is the key-block method (KBM). The KBM only considers key-blocks. If no such blocks are unstable, the method then concludes that the entire rock mass is stable. In reality however, groups of 'stable' blocks, when considered as a whole, may in some instances prove unstable. The 'key-group method (KGM)' combines groups of collapsible blocks into an iterative and progressive analysis of the stability of discontinuous rock slopes.

This method is indeed a 2D limit equilibrium approach. Because the results of 2D analysis are usually conservative, it makes 3D analysis be necessary in huge project.

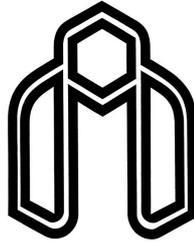
In this project, in order to make a possibility of realst analysis of fractured rock masses, the 2D key group method is developed into three dimensions. Then, using Mathematica software, a computer program was prepared to implement the proposed method on a real case.

For validation of proposed method, the implementation results on some assumed model have been compared with outcomes of numerical analysis based on distinction elements by 3DEC software which is used to modeling and analyzing of discontinues areas.

For evaluation of reliability of proposed 3D method, its implementation results on real case have been compared with the implementation results of 2D key group method. Tectonic block no.2 of the Choghart open pit mine was investigated as a case study and its geometrical model was created, hence its stability analysis using proposed 3D key group method has been done.

Key words:

Block theory, Key group method, Stability analysis, Choghart mine



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining Eng., Petroleum and Geophysics

**development of 3D key-groups method for Choghart
Mine rock slope analysis(tectonic block 2)**

Mehdi Noroozi

Supervisors:
Dr. S. E. Jalali
Dr. A. R. Yarahmadi Bafghi

Date: July 2009