# مدل‌سازی سه‌بعدی و هندسی ناپیوستگی‌ها و شناسایی بلوک‌های سنگی ایجاد شده در تودهٔ سنگ درزه‌دار

اکبر اسمعیل‌زاده*، رضا میکائیل؛ دانشگاه صنعتی ارومیه

تاریخ: دریافت ۹۶/۰۲/۳۰ پذیرش ۹۶/۰۶/۱۲

## چکیده

تودهٔ سنگ به‌عنوان بستر میزبان در ساخت انواع سازه‌های عمرانی و معدنی سطحی و زیرزمینی مطرح است. عوامل متعددی بر نحوهٔ رفتار و پایداری چنین سازه‌هایی تأثیر می‌گذارند که از جمله مهم‌ترین این پارامترها می‌توان به، رفتارشناسی تودهٔ سنگ‌ها، ناپیوستگی‌ها و به‌تبع آن حضور بلوک‌های سنگی ایجاد شده در اثر برخورد این ناپیوستگی‌ها اشاره کرد. بلوک‌های سنگی که تودهٔ سنگ به آن‌ها افراز شده است، به‌لحاظ استاتیکی و دینامیکی از مهم‌ترین اجزای روند تحلیل پایداری و رفتاری سازه‌ها محسوب می‌شوند. در این تحقیق سعی شده به شناسایی بلوک‌های سنگی ایجاد شده در اثر تقاطع ناپیوستگی در سه بعد پرداخته شود. الگوریتم طراحی شده در این پژوهش، بر مبنای جستجوی سلسله مراتبی با شناسایی اجزاء بلوکی از جزء به کل عمل می‌کند که سرعت عملکرد زیادی دارد. هم‌چنین در پیاده‌سازی این الگوریتم از قابلیت روش محاسبه موازی برنامه متلب نیز استفاده شده که به‌مراتب سرعت محاسبات را با حفظ دقت، افزایش می‌دهد. اجزاء تشکیل‌دهنده بلوک‌ها شامل کنج، لبه و چند ضلعی‌های تشکیل دهنده سطوح هستند. بلوک‌های سنگی براساس الگوریتم طراحی شده در محیط نرم‌افزار متلب شناسایی شده و بعد از محاسبه حجم آن‌ها و هیستوگرام حجمی آن‌ها ترسیم می‌شود. نمایش زنده روند شناسایی بلوک و هم‌چنین ثبت و نمایش موقعیت و توزیع فضایی کنج‌ها و لبه‌های بلوک‌ها از ویژگی‌های کد توسعه داده شده است. نتایج نشان می‌دهد، غالباً توزیع حاکم بر حجم بلوک های ایجاد شده، نمایی است.

**واژه‌های کلیدی**: تودهٔ سنگ، ناپیوستگی، دسته درزه، بلوک سنگی، نرم‌افزار متلب.

* **نویسنده مسئول** esmailzade.ak@aut.ac.ir

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]

## مقدمه

ایمنی و استحکام تودهٔ سنگ، و در نتیجه پایداری سازه‌های مرتبط با آن، به‌وسیلهٔ توزیع هندسی و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بلوک‌های سنگی که در اثر تقاطع ناپیوستگی‌ها به‌وجود آمده‌اند، کنترل می‌شود. از این‌رو، شناسایی و تشخیص بلوک‌های سنگی موجود در تودهٔ سنگ از نقطه نظر تحلیل مکانیکی و رفتار هیدرولیکی توده سنگ‌های درزه‌دار، اهمیت به‌سزایی دارد. بلوک‌های شناسایی شده کاربردهای فراونی در حوزهٔ مکانیک سنگ دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از آن‌ها در روش عددی اجزاء گسسته و تحلیل تغییر شکل پیوسته ناپیوستگی‌ها اشاره کرد که هر دوی آن‌ها نیاز به توصیف صریح و مستقل بلوک‌های سنگی دارند [۱]. گودمن و شای، واربارتن و هلیت را می‌توان از پیش‌روان پژوهش در زمینهٔ شناسایی بلوک‌های تودهٔ سنگی دانست. واربارتن براساس پارامترهای هندسی تودهٔ سنگ، روشی را ارائه کرد و براساس آن نرم‌افزاری را نیز توسعه داد. در این پژوهش واربارتن ناپیوستگی‌ها را موازی و نامحدود فرض کرد [۲]، [۳]. به‌طور مشابه لو و لاتهام، استازک و تی سانگ و اسمیت به‌شناسایی بلوکی با استفاده از پارامترهای هندسی پرداختند [٤]، [٥]، [٦]. هلیت در سال ۱۹۸۸ الگوریتمی را براساس روش‌های عددی برای مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها در سه بعد ارائه کرد و ویژگی‌های هندسی بلوک‌ها را تعیین کرد [۷]. در سال ۱۹۸۵ گودمن و شای الگوریتمی را پیشنهاد کردند که به بررسی ناپیوستگی‌ها در دو و سه بعد براساس روش برداری می‌پرداخت [۸]، [۹]. در پژوهش‌های اولیه، ناپیوستگی‌ها صفحات نامحدود در نظر گرفته شدند. بنابراین تنها بلوک‌های محدب، قابل شناسایی بودند. بلوک‌های مقعر که به‌وسیلهٔ ناپیوستگی‌های محدود ایجاد می‌شوند، در بررسی‌های تفضیلی‌تر، شناسایی شدند. اساساً این روش‌ها بر دو مبنا است: دنبال کردن بلوک‌ها براساس مفاهیم توپولوژیکی و مونتاژ المان‌های بلوکی براساس عملیات اویلر بود. لین و همکاران، روش شناسایی را ارائه کردند که ناپیوستگی‌ها را محدود فرض کرده و براساس تئوری توپولوژیکی عمل می‌کرد [۱۰]. این روش قابلیت محاسبه بلوک‌های محدب و مقعر را با هر ترکیب صفحه‌ای از ناپیوستگی‌ها را دارد. ایکیگاوا و هادسون، جینگ، روش‌هایی مشابه با قابلیت کارکرد بیش‌تر و دقیق‌تر ارائه

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]

کردند [۱۱]، [۱۲]. شارما و همکارانش، معادله‌ای را برای محاسبه حجم بلوک‌های سنگی در کتاب خود ارائه کرد [۱۳]. فریارا روشی را براساس تئوری گراف ارائه کرد که به لحاظ حجم و زمان محاسبات نسبت به سایر روش‌ها بهینه است. بر اساس این الگوریتم، ابتداً همهٔ نقاط برخورد خطوط در دوبعد محاسبه شده و سپس گرافی براساس این نقاط و خطوط ایجاد شده و چندین پلی‌گون را تشکیل داده که به‌عنوان بلوک‌های دوبعدی، در نظر گرفته می‌شوند [۱٤]. در روش ارائه شدهٔ لو و همکاران بلوک‌ها با استفاده از روش‌برداری در سه‌بعد شناسایی می‌شوند. در این روش صفحات محدود فرض شده و نقاط ناشی از برخورد خطوط به‌صورت بردار در نظر گرفته شده و این بردارها در مرحلهٔ بعد تشکیل بلوک‌ها را می‌دادند [۱۵]. اولکر و ترانبوی در سال ۲۰۰۹ از الگوریتم ژنتیک برای شناسایی بلوک‌ها در سه‌بعد استفاده کردند که براساس ساختار درختی بنا نهاده شده بود [۱٦]. در کارهای اخیر انجام گرفته در حوزهٔ شناسایی بلوک‌های سنگی، ناپیوستگی‌ها به‌صورت مسطح و صفحه‌ای فرض نشده و از مدل صفحات انحنادار استفاده شده است [۱۷]. این فرض باعث افزایش دقت الگوریتم در شناسایی بلوک‌هایی می‌شود که یک یا چند وجه آن‌ها با سطوح مصنوعی ایجاد شده در بناهای زیرزمینی، به‌وجود می‌آیند که اغلب به‌صورت صفحات مسطح و صفحه‌ای نیستند. علاوه بر روش‌های مذکور از روش‌های دقیق ریاضی نیز برای شناسایی بلوک‌ها استفاده می‌شود [۱۸]. در این تحقیق، ضمن طراحی الگوریتم با سرعت عملکرد زیاد، برای شناسایی المان‌های تشکیل‌دهندهٔ بلوک و در نهایت خود بلوک‌ها، برنامه‌ای در محیط نرم‌افزار متلب با تکیه بر قابلیت‌های خود این نرم‌افزار، توسعه داده شده است که با فرض نامحدود بودن ناپیوستگی‌ها و لحاظ کردن یک دسته درزه، اقدام به شناسایی بلوک‌های ایجاد شده و محاسبه حجم آن‌ها کرده و در نهایت هیستوگرام حجمی بلوک‌های شناسایی شده را ارائه می‌دهد که مسیر را برای به‌دست آوردن تابع توزیع آن‌ها هموار می‌کند.

## شبیه‌سازی هندسی ناپیوستگی‌ها

به‌منظور مدل‌سازی از طرح صفحهٔ نامحدود برای شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها استفاده شده است. در این نوع شبیه‌سازی، هر ناپیوستگی، با صفحه‌ای در فضای اقلیدسی سه‌بعدی، نشان

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]

داده می‌شود. برای شناسایی بلوک، باید حجم مشخصی از فضای تودهٔ سنگ در نظر گرفته شود که بلوک‌های ایجاد شده در آن محدودهٔ هدف، مورد شناسایی قرار می‌گیرند. حجم بررسی شده، حوزه نامیده می‌شود. در این پژوهش حوزه به‌صورت مکعبی تعریف می‌شود که در واقع مرزهایش به‌وسیلهٔ ٦ صفحهٔ عمود بر هم، تعریف می‌شوند. در این مدل‌سازی یک دسته موازی ناپیوستگی بر حوزه اعمال شده و اثر آن بررسی می‌شود. برای شرح الگوریتم مدل‌سازی به معرفی مفاهیم هندسی به‌کار رفته در مدل‌سازی پرداخته می‌شود.

## اجزای بلوکی

با تقاطع صفحات ناپیوستگی در فضا، در حوزهٔ بررسی شده مکعبی، بلوک‌های سنگی ایجاد می‌شوند. برای توصیف کامل یک بلوک در فضا، ابتدا باید کنج‌های آن شناسایی شوند. سپس لبه‌ها (یال‌ها) تشخیص داده شده و بعد از آن نوبت به مشخص کردن چندضلعی‌ها (وجه‌ها) رسیده و در نهایت با به‌هم پیوستن چندضلعی‌ها چندوجهی‌ها (بلوک‌ها) یا همان بلوک‌ها به‌دست می‌آیند. هر کنج در فضا از تقاطع سه صفحه ناموازی به‌وجود می‌آید. به‌عبارت دیگر از تقاطع سه صفحه ناهم‌راستا، نقطه‌ای به‌دست می‌آید که به آن کنج یا گوشه اطلاق می‌شود. در واقع کنج یا گوشه فصل مشترک سه صفحه در فضای اقلیدسی است. البته برای ایجاد کنج در فضا این سه صفحه باید دارای وضعیت خاصی نسبت به‌هم دیگر باشند. برای یافتن کنج حاصل از تقاطع سه صفحه (البته در صورت وجود) باید یک دستگاه سه‌معادله‌ای، سه مجهولی را حل کرد. در این دستگاه، معادلات تشکیل‌دهنده، در واقع معادلات صفحات متقاطع است. اگر این دستگاه جواب داشته باشد، و جواب آن منحصر به‌فرد باشد، مختصات کنج تولید شده از برخورد سه صفحه است. از این‌رو، باید توجه کرد که دستگاه معادلات هم باید دارای جواب بوده و جوابش نیز منحصر به فرد باشد.

جزء بعدی در فرایند بلوکومتری، تشخیص لبه‌ها و یا همان یال‌های بلوک‌ها است. همهٔ لبه‌ها بدون استثنا بر خطوط ایجاد شده در اثر تقاطع صفحات در فضا، به‌وجود می‌آیند. به‌عبارت دیگر هر خط در فضا، فصل مشترک دو صفحه ناموازی است. در شناسایی لبه‌ها، ابتدا بردار

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]

موازی تمامی خطوط ناشی از تقاطع جفت صفحه‌ها به‌دست می‌آید. برای این منظور اگر $\overrightarrow{N_1}$ و $\overrightarrow{N_2}$ بردارهای نرمال دو صفحه دل‌خواه باشند، می‌توان با تعیین حاصل‌ضرب خارجی آن‌ها به وضعیت نسبی آن‌ها پی برد. اگر حاصل‌ضرب خارجی دو بردار صفر شود، دو صفحهٔ موازی است. از این‌رو، خط تشکیل نمی‌شود. در غیر این‌صورت دو صفحه متقاطع است و بردار حاصل از ضرب خارجی نرمال‌ها، در واقع بردار موازی $\vec{u}$ خط ایجاد شده در اثر برخورد دو صفحه است، که رابطهٔ (۱) بیان‌گر آن است:

$$\vec{N}_1 \times \vec{N}_2 = \vec{u} \qquad (۱)$$

بعد از تعیین بردارهای موازی تمامی خطوط ممکن، در مرحلهٔ بعد با به‌دست آوردن تفاضل کنج‌ها و مقایسه آن با بردارهای موازی خطوط شکل گرفته در اثر برخورد صفحات، کنج‌های تشکیل‌دهنده‌ی یال‌ها و به‌تبع آن‌ها یال‌ها مشخص می‌شوند. در تعیین یال‌ها، کنج‌هایی نقش دارند که تفاضل آن‌ها، موازی با بردارهای موازی باشد.

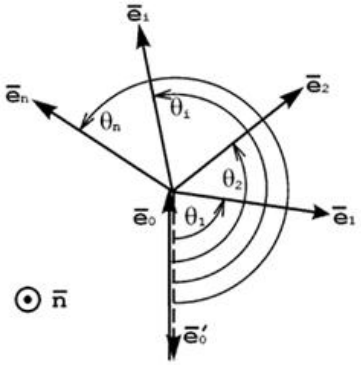
بعد از شناسایی لبه‌ها نوبت به تشخیص وجه‌های تشکیل دهندهٔ بلوک‌ها می‌رسد. هر وجه یک بلوک از واحدهای سازندهٔ خود یعنی لبه‌ها، تشکیل شده است. چون شناسایی بلوک‌ها در سه بعد دنبال می‌شود، در قسمت قبل لبه‌های شناسایی شده در گروه‌هایی طبقه‌بندی می‌شوند که هر کدام نشان‌دهندهٔ لبه‌های متعلق به هر ناپیوستگی است. در تعیین چندضلعی‌ها نیز به‌همین منوال کار شده است. در این بخش به تفکیک، چند ضلعی‌های متعلق به هر صفحه ناپیوستگی، شناسایی می‌شوند. رویهٔ استفاده شده، برای شناسایی چندضلعی‌ها، روی هر ناپیوستگی بدین‌صورت است که اولین لبه از لیست انتخاب شده و به‌عنوان اولین لبه از اولین چندضلعی، ثبت می‌شود. از بین سایر لبه‌ها، لبه‌هایی که از انتهای لبهٔ انتخاب شده آغاز می‌گردند، تعیین می‌شود. در این حالت اگر تنها یک لبه وجود داشته باشد، آن لبه به‌عنوان لبهٔ بعدی اولین چندضلعی ثبت می‌شود. در صورت وجود بیش از یک لبه از انتهای لبه انتخاب شده، زاویهٔ بین هر لبه محتمل با لبهٔ انتخاب شده، محاسبه می‌شود. رابطه‌های (۲) و (۳) برای این منظور استفاده می‌شوند [۱۵]:

$$\theta_i = \pi - \cos^{-1}(\widehat{e_0} \cdot \widehat{e_i}) \quad \text{if} \quad (\widehat{e_1} \times \widehat{e_0}) \cdot \vec{n} \geq 0 \qquad (۲)$$

$$\theta_i = \pi + \cos^{-1}(\widehat{e_0} \cdot \widehat{e_i}) \quad \text{if} \quad (\widehat{e_1} \times \widehat{e_0}) \cdot \vec{n} < 0 \qquad (۳)$$

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]

با استفاده از روابط (۲) و(۳) و با توجه به شکل ۱، حداقل زاویهٔ بین لبه‌ها محاسبه می‌شود. بعد از محاسبهٔ زاویه، لبه‌ای که دارای بیش‌ترین زاویه است به‌عنوان لبهٔ بعدی از اولین چندضلعی انتخاب می‌شود.

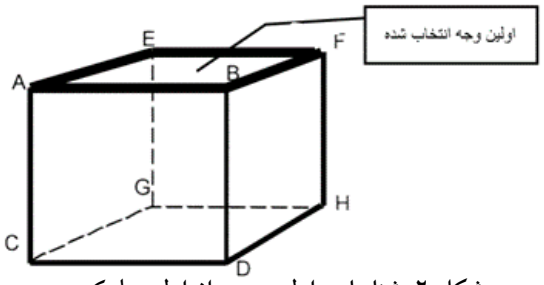



**شکل ۱. شناسایی سیستماتیک لبه‌ها [۱۵]**

این روند تا رسیدن به لبهٔ اول ادامه می‌یابد. رسیدن به لبهٔ اول به معنای تشخیص اولین چندضلعی است. در تکرار دوباره لبه‌ای دیگر انتخاب می‌شود و فرایند بالا دوباره تکرار می‌شود. بدین‌منوال تمامی چندضلعی به تفکیک هر ناپیوستگی شناسایی و ثبت می‌شوند.

در مرحلهٔ بعد از فرایند کلی تشخیص بلوکی، نوبت به شناسایی چندوجهی‌هایی می‌رسد که در اثر تقاطع ناپیوستگی‌ها ایجاد شده‌اند. در مرحلهٔ قبل، وجه‌های محتمل، به تفکیک قرارگیری روی هر ناپیوستگی، به‌دست آمدند. در واقع خروجی قسمت قبل ماتریسی است که درایه‌های آن ماتریس‌هایی هستند که در هر ردیف، حاوی شماره لبه‌هایی هستند که تشکیل وجه‌های مختلف قرار گرفته روی ناپیوستگی مذکور را می‌دهند. در این مرحله برای طراحی الگوریتم از این اصل بهره‌گرفته شده است که دو وجه تشکل دهندهٔ یک بلوک، لبه‌ای مشترک با هم دارند. از این رو، برای نیل به شناسایی بلوکی، اولین وجه از اولین ناپیوستگی، به‌عنوان اولین وجه از اولین بلوک، در نظر گرفته می‌شود. شکل ۲، مبین همین واقعیت است. در شکل ۲، وجه AEFB اولین صفحه انتخاب شده است. این وجه با وجوه ABCD، BFDH، EFHG و AEGC لبه مشترک دارد. از این رو، این وجوه انتخاب شده و در ماتریس بلوک‌ها به‌عنوان وجوه تشکیل‌دهندهٔ اولین بلوک قرار می‌گیرند.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]




**شکل ۲. شناسایی اولین وجه از اولین بلوک**

ماتریس بلوک‌ها در واقع ماتریسی سطری است که درایه‌های آن خود ماتریسی حاوی وجوه هر کدام از بلوک‌های ایجاد شده‌اند.

## شناسایی بلوک‌های سنگی و ترسیم هیستوگرام حجمی

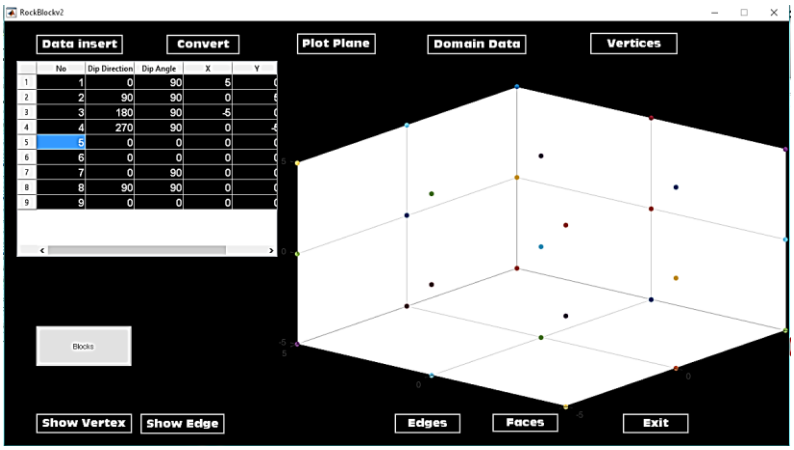
با توجه به الگوریتم طراحی‌شده، برای مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها، از محیط نرم‌افزار متلب استفاده شد. قابلیت‌های محاسباتی و گرافیکی این نرم‌افزار، جذابیت‌های زیادی را برای اغلب محققان برای استفاده از پتانسیل‌های آن ایجاد کرده است. از نقاط قوت این نرم‌افزار قدرت محاسباتی زیاد همراه با دقت گرافیکی مثال زدنی آن است. این نرم‌افزار دارای توابع از پیش تعریف شده است که از عوامل اصلی سهولت کار در محیط این نرم‌افزار است. کد توسعه داده شده در متلب که RockBlock2 نام‌گذاری شده است با استفاده از واسط کاربر گرافیکی ($GUI$[1]) طراحی شده تا استفاده از آن به‌سهولت انجام گیرد. برای نشان دادن نحوهٔ کارکرد برنامه، تعداد ۲۹ عدد ناپیوستگی به برنامه داده می‌شود. برنامه ابتدا، شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها، همراه با نقطه‌ای دل‌خواه روی آن را گرفته و پارامترهای تشکیل دهندهٔ معادله صفحات ناپیوستگی‌ها را محاسبه می‌کند. پارامترهای لازم برای توصیف کامل معادله یک صفحه، عبارت از بردار نرمال صفحه و نقطه‌ای روی آن است.

برنامه طوری طراحی شده که کاربر می‌تواند با انتخاب هر یک از ناپیوستگی‌ها، وضعیت و شکل فضایی ناپیوستگی را مشاهده کند. با استفاده از این امکان تجسم فضایی ناپیوستگی‌ها به

1. Graphical User Interface

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]

سهولت انجام می‌گیرید. داده‌های فرایند مذکور در فایل اکسل مجزایی که قبلاً به برنامه معرفی گشته، ذخیره می‌شود. در مرحلهٔ بعد برنامه اقدام به شناسایی کنج‌ها می‌کند. برنامه بعد از طی مراحل شناسایی کنج‌های داخل محدوده، مختصات هر کنج را همراه با تخصیص یک شماره به آن، در ماتریس کنج‌ها که در واقع فایل اکسل است که قبلاً به برنامه معرفی شده، برای استفاده در مراحل بعدی، ذخیره می‌شود. شکل ۳، محیط برنامه، دگمه‌ها،کنج‌های شناسایی شده را در فضای اقلیدسی نشان می‌دهد.

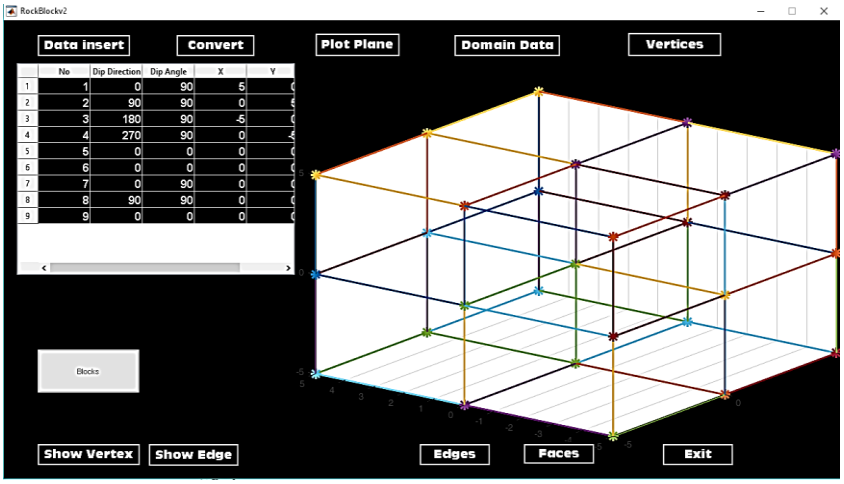



**شکل ۳. شمای کلی برنامه در وضعیت شناسایی کنج‌ها**

شناسایی لبه‌ها مرحلهٔ بعدی است که برنامه انجام می‌دهد. در این مرحله برنامه با استفاده از داده‌های مرحله قبل یعنی مختصات کنج‌ها و الگوریتم تعریف شده، شروع به شناسایی تک تک لبه‌ها می‌کند. در این مرحله برنامه ضمن شناسایی همهٔ لبه‌های داخل محدودهٔ بررسی، اقدام به ترسیم لبه‌ها می‌کند. که در واقع در این مرحله کاربر شکل فضایی از نحوهٔ قرارگیری لبه‌ها نسبت به یک‌دیگر را مشاهده می‌کند. شکل ٤، نتیجه این فرایند را نشان می‌دهد.

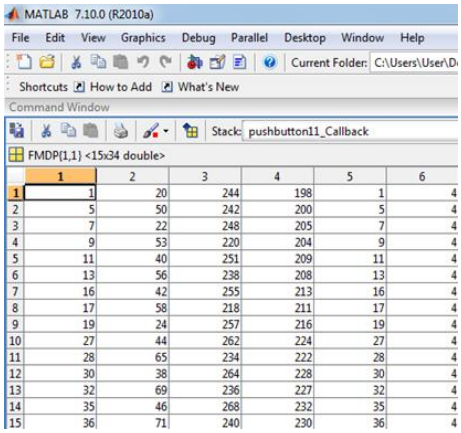
مختصات ابتدا و انتهای هر لبه همراه با شمارهٔ آن در ماتریس لبه‌ها در قالب فایل اکسل، ذخیره و نگه‌داری می‌شود. در مرحلهٔ شناسایی وجوه، با پیوستن صحیح لبه‌ها به یک‌دیگر، وجوه شکل می‌گیرند. بعد از طی این مرحله خروجی برنامه، ماتریس وجه‌ها است. این ماتریس، ماتریس ویژه‌ای است که درایه‌های این ماتریس خود ماتریس، هستند. ماتریس وجوه، ماتریس سطری است، که تعداد ستون‌های آن به تعداد ناپیوستگی‌ها است. زیرا چنان‌که در فصل

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]




**شکل ٤. شمای برنامه در وضعیت شناسایی لبه‌ها**

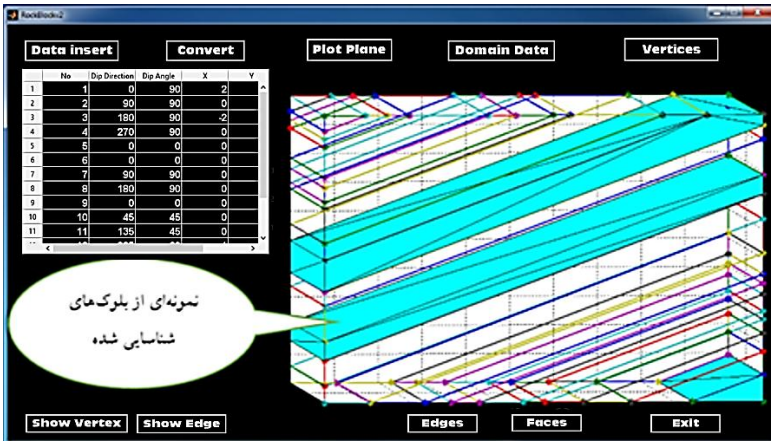
الگوریتم به آن اشاره شد، وجوه به تفکیک ناپیوستگی‌ها یافت می‌شوند. از این‌رو، هر ستون از ماتریس وجوه شامل وجه‌هایی هستند که روی یک ناپیوستگی مشخص قرار دارند. در توضیح شکل ۵، می‌توان گفت، ردیف اول ماتریس درایه وجوه، نشان‌دهندهٔ اولین وجه روی اولین ناپیوستگی است. هر وجه به‌وسیلهٔ لبه‌های تشکیل‌دهندهٔ آن توصیف شده است. به‌طور مثال در ردیف اول ماتریس مذکور، اولین وجه با توالی لبه‌های {۱،۲۰،۲٤٤،۱۹۸،۱} تشکیل یافته است. رقم ٤ در انتهای هر توالی نشان‌دهندهٔ تعداد اضلاع وجه است.




**شکل ۵. ماتریسی که هر ردیف آن حاوی وجوه تشکیل‌دهندهٔ چندضلعی‌های شناسایی شده**

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]

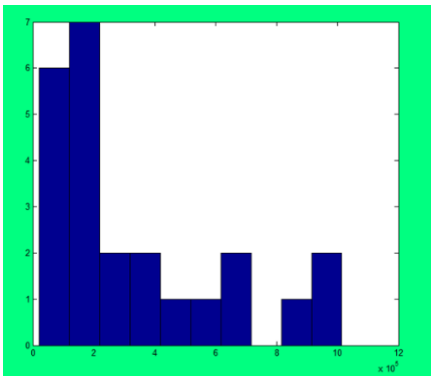
مرحله بعد، فرایند شناسایی بلوک‌ها و یا همان چند وجهی‌ها به‌وسیلهٔ برنامه آغاز می‌شود. در این مرحله برنامه با استفاده از وجوه یافته شده در مرحلهٔ قبل و الگوریتم تعریف شده برای آن، فرایند شناسایی را آغاز می‌کند. در این مرحله، بلوک‌های شناسایی شده در ماتریس بلوک‌ها ذخیره می‌شود. در ضمن، برنامه مرحله به مرحله با یافتن هر بلوک، شکل فضایی آن را ترسیم می‌کند. با شناسایی بلوک‌ها (شکل ٦) برنامه حجم هرکدام از بلوک‌ها را محاسبه کرده و در نهایت هیستوگرام حجمی آن‌ها را ترسیم می‌کند. در واقع هیستوگرام حجمی (شکل ۷) برای نمایش چگونگی، توزیع حجم بلوک‌ها، ترسیم می‌شود. به‌دست آوردن چگونگی توزیع بلوک‌ها و یا به‌عبارت دیگر، رسیدن به تابع توزیع بلوکی، گامی اساسی در رفتار سنجی تودهٔ سنگ محسوب می‌شود. زیرا که یکی از مهم‌ترین تبعات حضور ناپیوستگی‌ها، افراز ماده سنگ به زیر بازه‌های بلوکی است.




**شکل ٦. تصویر بلوک‌های ایجاد شده**

با در دست داشتن تابع توزیع بلوکی، میتوان با استفاده از روش‌ها تولید تصادفی، مانند مونت کارلو، به تولید شبکه بلوکی پرداخته و به تحلیل آن در حالت‌های مختلف و دلخواه اقدام کرد.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]



**شکل ۷. هیستوگرام احجام بلوک‌های ایجاد شده**

## اعتبارسنجی نتایج به‌دست آمده از برنامهٔ توسعه داده شده با نرم‌افزار 3DEC

برای اعتبارسنجی عملکرد برنامه توسعه داده شده از یکی از نرم‌افزارهای گروه آیتسکا به نام 3DEC استفاده شده است. این نرم‌افزار برای مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته مانند محیط‌های سنگی طراحی شده و در چنین محیط‌هایی کاربرد فراوانی دارد. از جمله کاربردهای این نرم‌افزار، تحلیل پایداری، محاسبه میزان جابه‌جایی‌ها و سایر پارامترهای کلیدی مطرح در طراحی و اجرای محیط‌های ناپیوسته است. در این نرم افزار با اعمال صفحات ناپیوستگی، محیط پیوسته به زیر فضاهای پیوسته افراز می‌شوند. در فصل پیش‌رو، از قابلیت محاسبه حجم بلوک‌های ایجاد شده، در اثر اعمال ناپیوستگی‌ها استفاده شده است.

## ایجاد مدل در برنامه RockBlock2

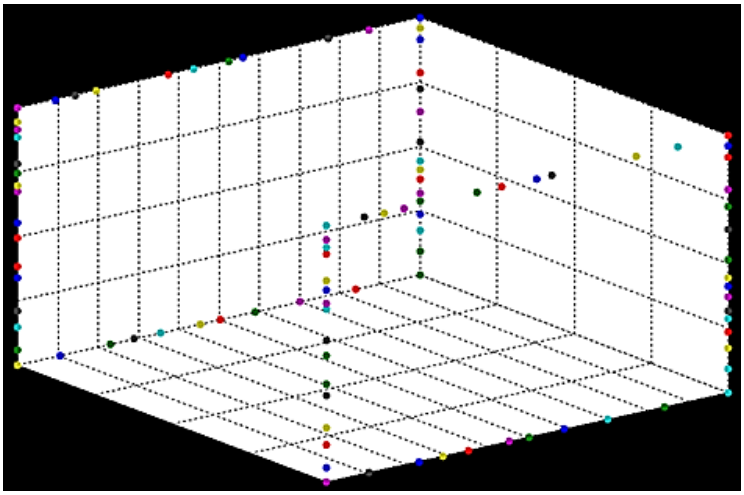
در این قسمت با استفاده از داده‌های جدول ۱، به ایجاد مدل سه‌بعدی در برنامه RockBlock2 اقدام می‌شود و احجام محاسبه شده و بلوک‌های تشکیل شده، به‌دست می‌آیند.

**جدول ۱. بخشی از داده‌های ورودی به برنامه**

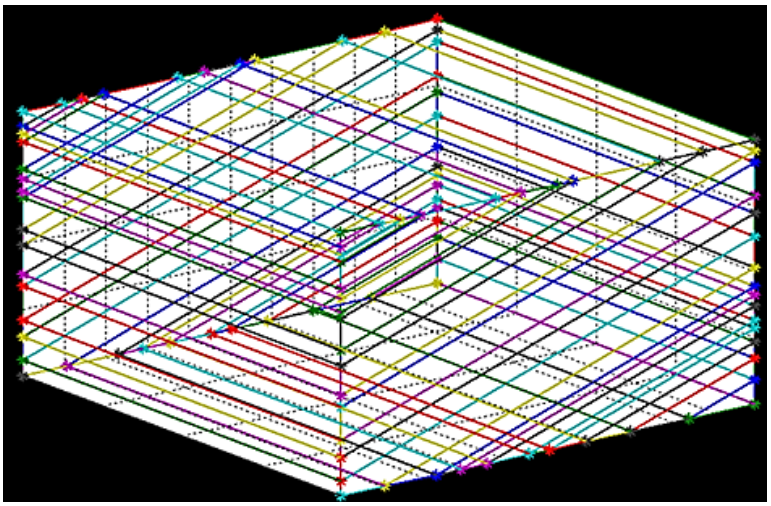
| شماره | جهت شیب | شیب | x | y | z |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰ | ۹۰ | ۰ | ۰ | ۱۰۰ |
| ۲ | ۹۰ | ۹۰ | | ۱۰۰ | ۰ |
| ۳ | ۱۸۰ | ۹۰ | ۰ | ۰ | -۱۰۰ |
| ۴ | ۲۷۰ | ۹۰ | ۰ | -۱۰۰ | ۰ |
| ۵ | ۰ | ۰ | ۱۰۰ | ۰ | ۰ |
| ۶ | ۰ | ۰ | -۱۰۰ | ۰ | ۰ |
| ۷ | ۰ | ۳۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۸ | ۰ | ۳۰ | ۶۰ | ۶۰ | -۱۵ |
| ۹ | ۰ | ۳۰ | -۴۰ | -۷۰ | ۵۰ |
| ۱۰ | ۰ | ۳۰ | -۲۰ | -۲۰ | ۱۸/۵ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]

با وارد کردن این داده‌ها به برنامه RockBlock2، برنامه ابتداً به یافتن محل کنج‌ها پرداخته و نتیجهٔ این مرحله، شکل ۸، است. در ادامه برنامه، لبه‌ها را محاسبه و ترسیم می‌کند که در شکل ۹، نشان داده شده است.



**شکل ۸ کنج‌های شناسایی شده داده‌های ورودی جدول ۱**

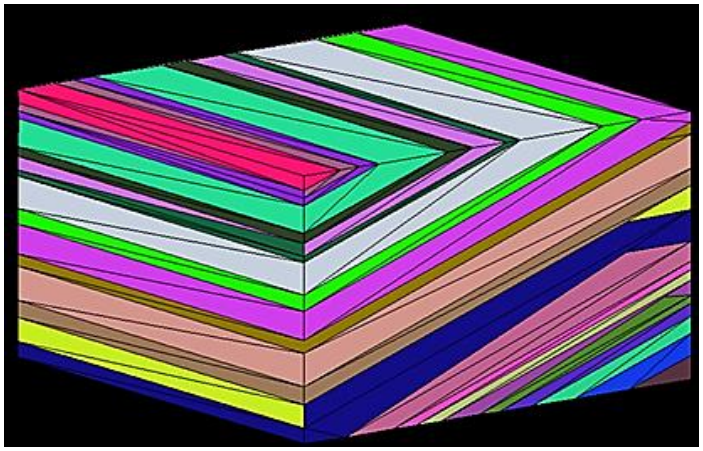


**شکل ۹. لبه‌های شناسایی شده داده‌های ورودی جدول ۱**

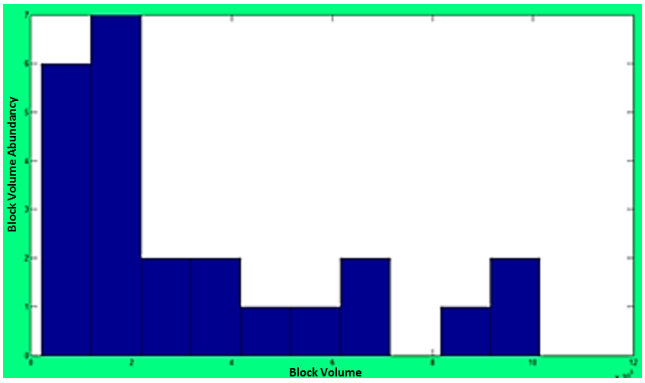
در ادامه برنامه وجوه و در نهایت، بلوک‌های به‌وجود آمده در اثر تقاطع ناپیوستگی‌ها با محدودهٔ بررسی شده را شناسایی می‌کند. در این مرحله شکل ۱۰، ایجاد می‌شود که در واقع

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]

بلوک‌های به‌دست آمده در اثر تقاطع هستند. در این شکل برنامه برای تفکیک بلوک‌ها از رنگ‌های متمایز بهره جسته است. بعد از شناسایی بلوک‌ها، چنان‌که در فصل پیشین بدان اشاره شد، برنامه اقدام به محاسبه احجام بلوکی شناسایی شده می‌کند. در این برنامه حجم هر یک از بلوک‌های به‌وجود آمده را محاسبه کرده و در نهایت هیستوگرام آن‌ها را ترسیم می‌کنیم (شکل ۱۱).



**شکل ۱۰. بلوک‌های شناسایی شده داده‌های ورودی جدول ۱**




**شکل ۱۱. هیستوگرام احجام بلوک‌های شناسایی شده ورودی‌های جدول ۱**

جدول ۲، مقادیر احجام بلوک‌های ایجاد شده را نشان می‌دهد که با برنامهٔ RockBlock2، محاسبه شده است. لازم به توضیح است که واحد احجام محاسبه شده بستگی به واحد انتخابی برای سیستم دستگاه مختصات دارد. به‌عبارت دیگر اگر واحد دستگاه مختصات متر انتخاب شود، آن‌گاه احجام بر مبنای واحد متر مکعب به‌دست خواهند آمد.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]

**جدول ۲. احجام محاسبه‌شده توسط برنامه RockBlock2**

| احجام محاسبه شده | شماره بلوک | احجام محاسبه شده | شماره بلوک | احجام محاسبه شده | شماره بلوک | احجام محاسبه شده | شماره بلوک |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۹۳۸۶۹,۳۷۳۵۳ | ۱۹ | ۲۰۴۴۵۶,۰۷۷۶ | ۱۳ | ۹۲۴۴۶۲,۹۸۳۷ | ۷ | ۸۵۱۱۰۲,۷۲۵۴ | ۱ |
| ۱۹۱۹۶۱,۵۲۴۲ | ۲۰ | ۱۴۸۸۶۷,۵۱۳۵ | ۱۴ | ۷۰۳۴۷۸,۷۶۸۵ | ۸ | ۵۸۹۷۸,۵۸۳۴۵ | ۲ |
| ۱۱۸۵۶۴,۰۶۴۶ | ۲۱ | ۱۸۰۰۰۰ | ۱۵ | ۳۷۳۶۴۹,۳۶۰۷ | ۹ | ۵۲۳۷۶۰,۴۳۰۷ | ۳ |
| ۲۳۵۳۶۶,۴۲۴۱ | ۲۲ | ۲۰۱۰۳,۶۲۹۷۱ | ۱۶ | ۱۸۱۲۴۳,۵۵۶۵ | ۱۰ | ۱۰۱۴۳۵۹,۳۵۴ | ۴ |
| ۳۸۸۶۷,۵۱۳۴۶ | ۲۳ | ۳۸۶۶۲۴,۸۶۱۲ | ۱۷ | ۱۲۰۴۱۴,۵۱۸۸ | ۱۱ | ۱۹۸۴۴۵,۵۵۴۳ | ۵ |
| ۲۷۳۲۰,۵۰۸۰۸ | ۲۴ | ۶۴۸۲۱۰,۶۶۱ | ۱۸ | ۲۷۵۴۷۰,۰۵۳۸ | ۱۲ | ۴۸۰۴۲۱,۹۵۹۱ | ۶ |

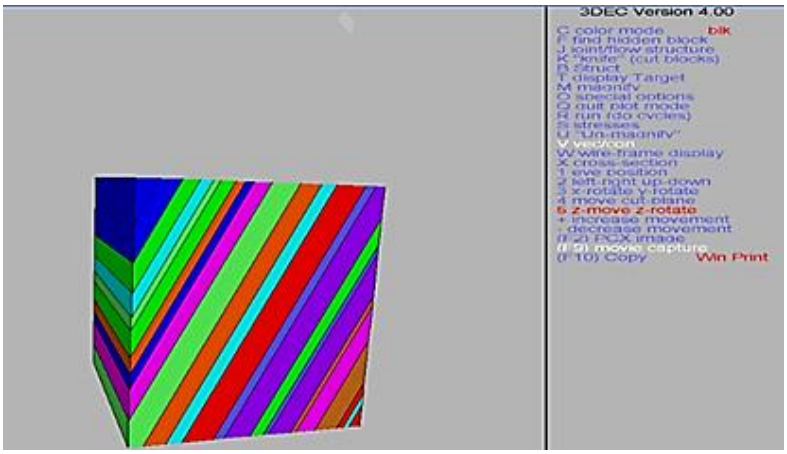
در ادامه همان داده‌های ورودی به برنامه (جدول۲) به نرم‌افزار 3DEC، داده می‌شود. در این قسمت لازم به توضیح است که به‌دلیل متفاوت بودن سیستم مختصات در نرم‌افزار 3DEC، تغییراتی در نقطه مشخصه ناپیوستگی‌ها داده شده است تا با سیستم مختصات این نرم‌افزار مطابقت داشته باشد. برای توضیح بیش‌تر قابل ذکر است که در نرم‌افزار MATLAB که برنامه RockBlock2 در محیط آن توسعه داده شده است؛ سیستم مختصات طوری قرار گرفته که جهت شمال به‌سمت منفی محورX، و محور مثبت z، به‌سمت بالا است. این در حالی است که در نرم‌افزار 3DEC جهت شمال به‌سمت z مثبت و محور y مثبت به‌سمت بالا است. از این‌رو، با ایجاد تغییرات در داده‌های ورودی سعی در مطابقت مختصات شده است. چنان‌که از شکل ۱۲، معلوم است ٢٤ بلوک ایجاد شده است. جدول ۳، نشان‌دهندهٔ نتایج محاسبه حجم بلوک‌ها است. با وارد کردن داده‌ها و گرفتن پلات، شکل ۱۲، به‌عنوان، محدودهٔ بررسی شده همراه با ناپیوستگی‌های متقاطع آن، با نرم‌افزار ایجاد می‌شود.

بعد از ترسیم مدل در نرم‌افزار که در واقع همان مدل ایجاد شده در برنامهٔ RockBlock2، است. با استفاده از نرم‌افزار 3DEC، حجم هر یک از بلوک‌های شکل ۱۳، محاسبه می‌شود. مقادیر حجم‌های محاسبه شده با 3DEC، به‌طور متوالی در جدول ۳، آورده شده است که در واقع تأییدکنندهٔ همان مقادیر محاسبه شده به‌وسیلهٔ برنامه RockBlock2، است.

**جدول ۳. احجام محاسبه شده با نرم‌افزار3DEC**

| احجام محاسبه شده | شماره بلوک | احجام محاسبه شده | شماره بلوک | احجام محاسبه شده | شماره بلوک | احجام محاسبه شده | شماره بلوک |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ۹۳۸۶۹,۳۷۳۵۳ | ۱۹ | ۲۰٤٤٥٦,۰۷۷٦ | ۱۳ | ۹۲٤٤٦۲,۹۸۳۷ | ۷ | ۸٥۱۱۰۲,۷۲٥٤ | ۱ |
| ۱۹۱۹٦۱,٥۲٤۲ | ۲۰ | ۱٤۸۸٦۷,٥۱۳٥ | ۱٤ | ۷۰۳٤۷۸,۷٦۸٥ | ۸ | ٥۸۹۷۸,٥۸۳٤٥ | ۲ |
| ۱۱۸٥۹٦٤,۰٦٤٦ | ۲۱ | ۱۸۰۰۰۰ | ۱٥ | ۳۷۳٦٤۹,۳٦۰۷ | ۹ | ٥۲۳۷٦۰,٤۳۰۷ | ۳ |
| ۲۳٥۳٦٦,٤۲٤۱ | ۲۲ | ۲۰۱۰۳,٦۲۹۷۱ | ۱٦ | ۱۸۱۲٤۳,٥٥٦٥ | ۱۰ | ۱۰۱٤۳٥۹,۳٥٤ | ٤ |
| ۳۸۸٦۷,٥۱۳٤٦ | ۲۳ | ۳۸٦٦۲٤,۸٦۱۲ | ۱۷ | ۱۲۰٤۱٤,٥۱۸۸ | ۱۱ | ۱۹۸٤٤٥,٥٥٤۳ | ٥ |
| ۲۷۳۲۰,٥۰۸۰۸ | ۲٤ | ٦٤۸۲۱۰,٦٦۱ | ۱۸ | ۲۷٥٤۷۰,۰٥۳۸ | ۱۲ | ٤۸۰٤۲۱,۹٥۹۱ | ٦ |

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]




**شکل ۱۲. مدل ایجاد شده در 3DEC با استفاده از داده‌های متناظر جدول ۱**

چنان‌که جدول ۳، نشان می‌دهد نتایج به‌دست آمده از هر دو برنامه یک‌سان است و بدین‌ترتیب عملکرد صحیح برنامه RockBlock2 اعتبارسنجی شده و تأیید می‌شود.. اهمیت شناسایی بلوک‌ها و محاسبه حجم آن‌ها از این جهت اهمیت پیدا می‌کند که در واقع در مناطق سنگی و غیرریزشی، قسمت عمدهٔ تنش اعمالی به سیستم نگه‌داری و یا به‌عبارت دیگر ناپایداری ابنیه‌های زیر زمینی، از حضور بلوک‌های تشکیل شده در محیط است. این بلوک‌ها در حالت بکر، در محل خود پایدار است و هیچ خطری را ایجاد نمی‌کند. ولی وقتی عملیات اجرایی حفر ابنیه زیرزمینی آغاز می‌شود، این بلوک در تقاطع با سطوح حفر شده تبدیل به بلوک‌های کلیدی شده و شدیداً مستعد رها شدن می‌شوند. از این‌رو، با توجه به شرایط به‌وجود آمده، این بلوک‌ها با رها شدن، شروع به اعمال نیرو به سیستم نگه‌داری می‌کنند. از این‌رو، برای طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم نگه‌داری مطمئن، نیاز به محاسبهٔ نیروی اعمالی از سمت بلوک‌های تشکیل شده است. در واقع نیروی اعمالی از سمت این بلوک‌ها ناشی از وزن آن‌ها است. از این‌رو، در واقع نیاز به محاسبهٔ وزن بلوک‌ها است. چنان‌که آشکار است برای محاسبهٔ نیروی وزن این بلوک‌ها نیاز به محاسبهٔ حجم آن‌ها است تا با در دست داشتن وزن مخصوص سنگ، بتوان اقدام به محاسبهٔ نیروی وزن آن‌ها کرد. با توجه به توضیحات ذکر شده، واضح است که مهم‌ترین بخش این فرایند و در واقع اولین پله از این فرایند شناسایی این بلوک‌ها است که برنامه RockBlock2 این مهم را طی فرایندی که در بخش‌های قبل تشریح شد، انجام می‌دهد.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]

## بحث و نتیجه‌گیری

برای شناسایی و بررسی بلوک‌های سنگی ایجاد شده در اثر وجود ناپیوستگی‌ها، الگوریتمی سلسله مراتبی طراحی شده و در نرم‌افزار متلب توسعه داده شد. این الگوریتم با شناسایی جزء به جزء مؤلفه‌های تشکیل‌دهندهٔ بلوک‌ها که شامل کنج‌ها، لبه‌ها و وجه‌ها است، بلوک‌های سنگی را شناسایی و ثبت می‌کند. این الگوریتم که برای سهولت در کاربری، با استفاده از قابلیت کدنویسی واسط کاربری گرافیکی نوشته شده، با استفاده از توان محاسباتی موازی نرم‌افزار متلب عملکرد بسیار سریعی را از خود نشان می‌دهد. کد توسعه داده شده با دریافت ویژگی‌های هندسی صفحات ناپیوستگی‌ها، شیب و جهت شیب آن‌ها را محاسبه کرده و بلوک‌های ایجاد شده در سه بعد را شناسایی و حجم آن‌ها را محاسبه می‌کند. این کد هیستوگرام حجم‌های محاسبه شده را ترسیم می‌کند.

نتایج نشان می‌دهد که کد توسعه داده شده با عملکرد سریع خود، ضمن شناسایی بلوک‌های سنگی، حجم آن‌ها را بدون خطا محاسبه کرده و ثبت می‌کند. قابلیت نمایش مرحله به مرحله روند شناسایی بلوک‌ها از مشخصه‌های بارز این کد است. به‌طوری‌که کاربر ناظر بر توزیع فضایی کنج‌های شناسایی و موقعیت فضایی آن‌ها است که در صورت لزوم مختصات آن‌ها برای استفاده‌های دیگر در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. هم‌چنین موقعیت و توزیع فضایی لبه‌های وجه‌های بلوکی به‌صورت زنده هم‌زمان با پیش‌روی مراحل شناسایی، قابل مشاهده است. اطلاعات مربوط به لبه‌ها نیز برای کاربردهای ثانویه ثبت شده و قابل دسترس هستند. هیستوگرام حجم بلوک‌ها از مهم‌ترین نتایج کارکرد کد توسعه داده شده است که می‌تواند کاربردهای متفاوتی داشته باشد.

شناسایی بلوک‌های سنگی ایجاد شده هم از لحاظ تحلیل پایداری سازه‌ها و هم از لحاظ تحلیل‌های مبتنی بر شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها و تودهٔ سنگ مانند مدل‌سازی شبکه شکستگی‌های گسسته(DFN[2]) کاربرد دارد. تعیین تابع توزیع حجم بلوک‌ها که با استفاده از هیستوگرام انجام می‌پذیرد، از مهم‌ترین مجهولات مطرح در رفتارسنجی سه‌بعدی تودهٔ سنگ است که می‌تواند در بهینه‌سازی طراحی سازه‌های درگیر در تودهٔ سنگ، نقش مؤثری داشته باشد. از این‌رو، با توجه به نقش کلیدی حجم بلوک‌ها، شناسایی و محاسبه حجم بلوک‌ها و به‌تبع آن ترسیم

2. Disceret Fracture Network

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]

هیستوگرام آن‌ها و تعیین تابع توزیع حاکم بر آن‌ها، اهمیت ویژه‌ای در انواع تحلیل استاتیکی و دینامیکی سازه‌های سنگی دارد.

## منابع


1. Jing L., Hudson J. A., "Numerical methods in rock mechanics", Int J Rock Mech Min Sci., 39 (2002) 409-27.
2. Warburton P. M., "Application of a new computer model for reconstructing blocky block geometry-analyzing single block stability and identifying keystones", Proceedings of the fifth international congress on rock mechanics, Melbourne, Australia, (1983) F225-30.
3. Warburton P. M., "A computer program for reconstructing blocky rock geometry and analyzing single block stability", Computers and Geotechnics, 11 (1985) 707-12.
4. Lu P., Latham J.P., "Developments in the assessment of in-situ block size distributions of rock masses", Rock Mech Rock Eng., 32(1) (1999) 29-49.
5. Starzeca P., Tsangc C. F., "Use of fracture-intersection density for predicting the volume of unstable blocks in underground openings", Int J Rock Mech Min Sci., 39 (2002) 807-13.
6. Smith J. V., "Determining the size and shape of blocks from linear sampling for geotechnical rock mass classification and assessment", Journal of Struct Geol, 26 (2004) 1317-39.
7. Heliot D., "Generating a blocky rock mass", Int J Rock Mech Min, 25 (1988) 127-38.
8. Goodman R. E., Shi G. H., "Geology and rock slope stability-application of the key block concept for rock slopes", Proceedings of the third international conference on stability in surface mining, New York, USA; (1982) 347-73.


[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]

9. Goodman R. E., Shi G., "Block theory and its application to rock engineering", New Jersey: Prentice-Hall (1985).
10. Lin D., Fairhurst C., Starfield A. M., "Geometrical identification of three-dimensional rock block systems using topological techniques", Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 24 (1987) 331-8.
11. Ikegawa Y., Hudson J. A., "A novel automatic identification system for three-dimensional multi-block systems", Eng Comput, 9 (2) (1992) 169-79.
12. Jing Lanru, "Block system construction for three-dimensional discrete element models of fractured rocks", Int J Rock Mech Min Sci., 37 (2000) 645-59.
13. Sharma V. M., Saxena K. R., "In in-situ characterization of rocks", Netherlands: A A Balkema Publishers (2001) 49-97.
14. Ferreira A., Fonseca M., Jorge J., "Polygon detection from a set of lines", Lisbon: Technical University of Lisbon (2000).
15. Lu J., "Systematic identification of polyhedral rock blocks with arbitrary joints and faults", Comput Geotech, 22 (2002) 49-72.
16. Ulker E., Turanboy A., "Maximum volume cuboids for arbitrarily shaped in-situ rock blocks as determined by discontinuity analysis-a genetic algorithm approach", Comput Geosci, 35 (2009) 1470-80
17. Zheng Yinhe, Xia Lu, Yu Qingchun, "A method for identifying three-dimensional rock blocks formed by curved fractures", Computers and Geotechnics, 65 (2015) 1-11
18. Yinhe Zheng, Lu Xia, Qingchun Yu, "Identifying rock blocks based on exact arithmetic", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 86 (2016) 80-90.

[ Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-01 ]
[ DOR: 20.1001.1.22286837.1397.12.3.8.6 ]
[ DOI: 10.18869/acadpub.jeg.12.3.373 ]