

تحلیل کامپیوتری شیب‌های سنگی با استفاده از تئوری بلوک‌ها

احمد علی فحیمی
استادیار

حمیدرضا توکلی
کارشناس ارشد

بخش مهندسی عمران، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

مشکل عمده در تحلیل پایداری شیب‌های سنگی، یافتن مکان بلوک‌های لغزان حاصل از تقاطع درزها، قبل از اقدام به ایجاد ترانشه است. حل ریاضی چنین مسئله‌ای و انطباق آن با شرایط محلی، کاری پیچیده می‌باشد. در این مقاله سعی شده است با استفاده از تولید تصادفی سیستم درزها، مکان محتمل بلوک‌های لغزان و به خصوص بلوک‌های کلیدی با استفاده از تئوری بلوک‌ها در حالت سه بعدی ارائه گردد. برای این منظور برنامه کامپیوتری SBLOCK تهیه شده است که ضمن تولید تصادفی شبکه درزها، مکان بلوک‌های لغزان را مشخص می‌کند. همچنین با استفاده از این برنامه می‌توان نسبت به نصب میل مهارها، تحلیل پایداری بلوک‌ها در وضعیت جدید و تعیین ضرایب اطمینان اقدام کرد. با کمک روش ارائه شده، این امکان وجود دارد تا از حجم محتمل بلوک‌های ریزشی قبل از احداث ترانشه آگاهی یافت و تمهیدات لازم برای پایداری قسمت‌های لغزنده را از پیش مهیا کرد.

Computerized Rock Slope Stability Analysis Using Block Theory

H. R. Tavakoli
MSc.

A. A. Fakhimi
Assistant Professor

Civil Engineering Department, University
of Tarbiat Modarres

Abstract

The main difficulty in rock slope stability analysis is finding the location of keyblocks before excavation. To resolve this difficulty, a random joint system is generated assuming a negative exponential distribution of joint spacing. The computer code SBLOCK, developed by the authors, using the key block approach and modal analysis in three dimensional space, is used to distinguish among the finite, infinite and keyblocks.

The factor of safety of keyblocks before and after bolt installation can be determined. This approach helps in finding the probable volume of instable regions and the location of keyblocks, using a 3-D computer graphics.

Key words

Stability of Slopes, Block Theory, Rock Slopes, Instable Blocks, Random Joint System, Rock Bolts.

سنگ در طبیعت، ماده‌ای ناهمگن و ناپیوسته است بدین معنی که صفحات گسیختگی از قبیل صفحات لایه بندی، گسل ها، درزها و شکاف ها، توده سنگی را به بلوک هایی مجزاء تقسیم می کنند و احتمال دارد که این بلوک ها در صورت تماس با سطوح حفاری قابل ریزش باشند. در این مقاله، به منظور تحلیل پایداری بلوک های سنگی از تئوری بلوک [4, 8] استفاده شده است. با توجه به بعضی از مزایایی که تئوری بلوک نسبت به روش های تحلیلی دیگر مانند روش های عددی (المان محدود، تفاوت محدود، المان مجزا) و حتی مدل های فیزیکی در تحلیل پایداری حفاری ها (حفاری های سطحی و زیرزمینی) دارد [4]، پیش بینی می شود که این روش در آینده در مسائل مهندسی سنگ، بیشتر از پیش مورد استفاده قرار گیرد.

تئوری بلوک از انعطاف پذیری بالایی برخوردار است. بدین صورت که میتواند با دو روش برداری و گرافیکی به طور جدا از هم و یا مخلوطی از هر دو روش، به کار برده شود. روش گرافیکی یا روش تصویر استریوگرافیک می تواند حتی به صورت دستی انجام شود و روش برداری روشی است که می تواند به کمک کامپیوتر انجام شود. در این مقاله ابتدا تئوری بلوک تشریح خواهد شد و سپس مثال هایی که به وسیله نرم افزار SBLOCK حل شده است، بررسی می گردد و توان روش ارائه شده در یافتن مکان محتمل بلوک های لغزان و حجم محتمل ریزش، مورد بررسی قرار می گیرد.

تئوری بلوک از انعطاف پذیری بالایی برخوردار است. بدین صورت که میتواند با دو روش برداری و گرافیکی به طور جدا از هم و یا مخلوطی از هر دو روش، به کار برده شود. روش گرافیکی یا روش تصویر استریوگرافیک می تواند حتی به صورت دستی انجام شود و روش برداری روشی است که می تواند به کمک کامپیوتر انجام شود. در این مقاله ابتدا تئوری بلوک تشریح خواهد شد و سپس مثال هایی که به وسیله نرم افزار SBLOCK حل شده است، بررسی می گردد و توان روش ارائه شده در یافتن مکان محتمل بلوک های لغزان و حجم محتمل ریزش، مورد بررسی قرار می گیرد.

$$f(x) = \lambda x^{-\lambda} \quad 0 \leq x \leq \infty \quad (1)$$

که در آن $\lambda = \frac{1}{X}$ است و X میانگین فاصله بینابین می باشد. با استفاده از اصل انتقال انتگرال [7]، توزیع احتمالی F(x) برابر است با:

$$F(x) = \int_0^x f(y) dy = 1 - e^{-\lambda x} \quad (2)$$

حال با جایگزین کردن F(x) به وسیله مقادیر تصادفی پیوسته R_{ii}^i و مقدار x به وسیله مقادیر تصادفی مورد نیاز $R_{E,\lambda}^i$ (فاصله دو صفحه درز متوالی در توزیع نمایی منفی) و مرتب کردن رابطه فوق داریم:

$$R_{E,\lambda}^i = \frac{-\ln(1 - R_{ii}^i)}{\lambda} \quad (3)$$

در رابطه (3)، R_{ii}^i مقادیر تصادفی بین 0 تا 1 را به خود می گیرد.

ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک: با نمونه گیری از توده سنگی و انجام آزمایش برش مستقیم یا تراکم سه محوری می توان پارامترهای فوق را به طور

تئوری بلوک از انعطاف پذیری بالایی برخوردار است. بدین صورت که میتواند با دو روش برداری و گرافیکی به طور جدا از هم و یا مخلوطی از هر دو روش، به کار برده شود. روش گرافیکی یا روش تصویر استریوگرافیک می تواند حتی به صورت دستی انجام شود و روش برداری روشی است که می تواند به کمک کامپیوتر انجام شود. در این مقاله ابتدا تئوری بلوک تشریح خواهد شد و سپس مثال هایی که به وسیله نرم افزار SBLOCK حل شده است، بررسی می گردد و توان روش ارائه شده در یافتن مکان محتمل بلوک های لغزان و حجم محتمل ریزش، مورد بررسی قرار می گیرد.

تئوری بلوک از انعطاف پذیری بالایی برخوردار است. بدین صورت که میتواند با دو روش برداری و گرافیکی به طور جدا از هم و یا مخلوطی از هر دو روش، به کار برده شود. روش گرافیکی یا روش تصویر استریوگرافیک می تواند حتی به صورت دستی انجام شود و روش برداری روشی است که می تواند به کمک کامپیوتر انجام شود. در این مقاله ابتدا تئوری بلوک تشریح خواهد شد و سپس مثال هایی که به وسیله نرم افزار SBLOCK حل شده است، بررسی می گردد و توان روش ارائه شده در یافتن مکان محتمل بلوک های لغزان و حجم محتمل ریزش، مورد بررسی قرار می گیرد.

فرضیات تئوری بلوک ها

در تئوری بلوک فرضیاتی به شرح ذیل پذیرفته می شوند:

- الف) سطوح درزها کاملاً مستوی فرض می شوند.
- ب) سطوح درزها تا بی نهایت ادامه دارند.
- ج) بلوک های ایجاد شده صلب هستند.
- د) مشخصات سطوح درزها و حفاری به عنوان اطلاعات اولیه، معلوم هستند.

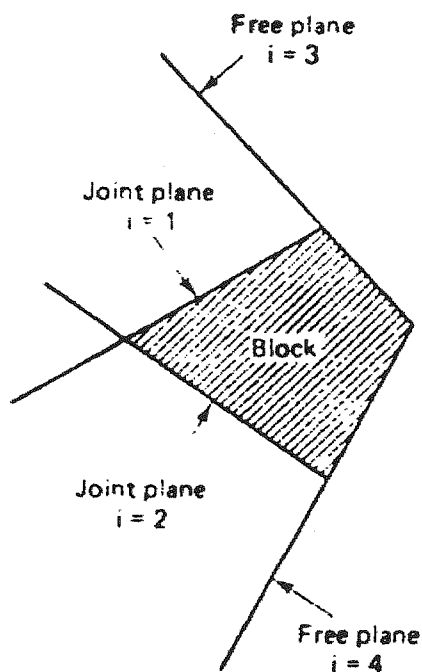
۲- موقعیت فضایی درزها

موقعیت فضایی درزها (گسیختگی ها) توسط پارامترهایی مانند جهت یافتگی، فاصله بینابین، ضریب چسبندگی، زاویه اصطکاک و مختصات نقطه ایی واقع بر

می باشند که بلوک حفاری را تعریف می نمایند. شکل (۱) بلوک تپ را در حالت دو بعدی برای $k=2$ و $n=2$ نشان می دهد. حال اگر صفحات درز و حفاری را به مبدا مختصات انتقال دهیم یعنی مقدار D صفحات را مساوی صفر قرار دهیم، نامعادلات (۵ a) و (۵ b) به دست می آیند که بیانگر هرم بلوک هستند.

$$\begin{aligned} A_1 X + B_1 Y + C_1 Z &\geq 0 \\ A_2 X + B_2 Y + C_2 Z &\geq 0 \end{aligned} \quad (5 a)$$

$$\begin{aligned} \vdots & \quad \vdots & \quad \vdots & \quad \vdots \\ A_n X + B_n Y + C_n Z &\geq 0 \\ A_{n+1} X + B_{n+1} Y + C_{n+1} Z &\geq 0 \\ \vdots & \quad \vdots & \quad \vdots & \quad \vdots \\ A_{n+k} X + B_{n+k} Y + C_{n+k} Z &\geq 0 \end{aligned} \quad (5 b)$$



شکل (۱) بلوک ایجاد شده حاصل از تقاطع دو صفحه درز و دو صفحه حفاری [4]

از انتقال تنها صفحات درز به مبدا مختصات، ناحیه مشترکی ایجاد می گردد که به هرم درز (JP) معروف است، مثلاً روابط (۵ a) هرم درز بلوک B می باشد. همچنین از انتقال تنها صفحات حفاری به مبدا مختصات، ناحیه مشترکی ایجاد می گردد که به هرم

دقیق اندازه گیری کرد. ولی گاهی برای پروژه های معمولی، پارامترهای فوق براساس مصالح پرکننده بین سطوح درز و یا مشاهده سطح درز حدس زده می شوند. **مختصات نقطه ایی واقع بر صفحات گسیختگی یا حفاری:** برای به دست آوردن پارامتر D معادله جبری صفحات گسیختگی یا حفاری، مختصات نقطه ایی واقع بر آن صفحات لازم می باشد. با در نظر گرفتن مبدا مختصات در نزدیکی محل حفاری می توان با استفاده از دوربین های نقشه برداری و یا وسایل دیگر، مختصات فضایی نقطه واقع بر صفحات گسیختگی یا حفاری را به دست آورد. با داشتن نقطه شروع یک سیستم درز و استفاده از توزیع تصادفی فاصله بین درزها، می توان یک سیستم درز تصادفی را تولید کرد.

۳- بلوک ها و هرم های بلوک

هر صفحه حفاری و یا درز، دو نیم فضا دارند که بنا به تعریف، هرگاه نقطه دلخواه x به مختصات (X, Y, Z) در نامعادله $A_i X + B_i Y + C_i Z \geq D_i$ صدق کند، نقطه x در نیم فضای پایین صفحه i قرار دارد و هرگاه نقطه دلخواه x در نامعادله $A_i X + B_i Y + C_i Z \leq D_i$ صدق کند، نقطه x در نیم فضای پایین صفحه i قرار دارد. حال فرض کنید بلوک B از n صفحه درز و k صفحه حفاری تشکیل شده باشد و نامعادلات نیم فضاهای وجوه بلوک به صورت زیر باشد:

$$\begin{aligned} A_1 X + B_1 Y + C_1 Z &\geq D_1 \\ A_2 X + B_2 Y + C_2 Z &\geq D_2 \\ \vdots & \quad \vdots & \quad \vdots & \quad \vdots \\ A_n X + B_n Y + C_n Z &\geq D_n \end{aligned} \quad (4 a)$$

$$\begin{aligned} A_{n+1} X + B_{n+1} Y + C_{n+1} Z &\geq D_{n+1} \\ \vdots & \quad \vdots & \quad \vdots & \quad \vdots \\ A_{n+k} X + B_{n+k} Y + C_{n+k} Z &\geq D_{n+k} \end{aligned} \quad (4 b)$$

که در آن الزامی برای \geq وجود ندارد و می تواند \leq نیز باشد. چون مقادیر A, B, C و D می توانند مثبت یا منفی باشند. نامعادلات (۴ a) مربوط به نیم فضاهای n صفحه درز می باشند که بلوک درز را تعریف می کنند و نامعادلات (۴ b) مربوط به نیم فضای k صفحه حفاری

۵- تئوری‌های محدودیت و قابلیت ریزش

مجدداً بلوک B (مانند شکل ۱) را در نظر می‌گیریم که از تقاطع n نیم فضای صفحات درز و k نیم فضای صفحات حفاری تشکیل شده است. فرض کنید روابط (۵ a) و (۵ b) مبین هرم‌های درز و حفاری و در نتیجه هرم بلوک باشند. با استفاده از تئوری محدودیت، متناهی بودن یا نامتناهی بودن بلوک B و همچنین با استفاده از تئوری قابلیت ریزش، باریک شونده بودن یا قابل ریزش بودن بلوک B را مشخص می‌نماییم، این تئوری‌ها به شرح زیر می‌باشند:

تئوری محدودیت: «یک بلوک محدب متناهی است هر گاه هرم بلوک آن تهی باشد و برعکس، یک بلوک محدب نامتناهی است هر گاه هرم بلوک آن غیر تهی باشد» [1, 4].

تئوری قابلیت ریزش: «یک بلوک محدب قابل ریزش است، هر گاه هرم بلوک آن تهی و هرم درز آن غیر تهی باشد و برعکس، یک بلوک محدب غیر قابل ریزش (باریک شونده) است، هر گاه هرم بلوک آن تهی و هرم درز آن نیز تهی باشد» [1, 4].

البته اگر بخواهیم تهی بودن یا غیر تهی بودن هرم درز یا هرم بلوک را مشخص کنیم، بایستی در تحلیل برداری تئوری بلوک، ابتدا تمامی فصل مشترک‌های صفحات درز را برای هرم درز و تمامی فصل مشترک‌های صفحات درز و حفاری را برای هرم بلوک با استفاده از رابطه (۶) به دست آوریم. مثلاً فصل مشترک صفحات درز ۱ و ۲ با بردارهای واحد نرمال بر صفحات با مؤلفه‌های $\hat{n}_1 = (X_1, Y_1, Z_1)$ و $\hat{n}_2 = (X_2, Y_2, Z_2)$ عبارتست از:

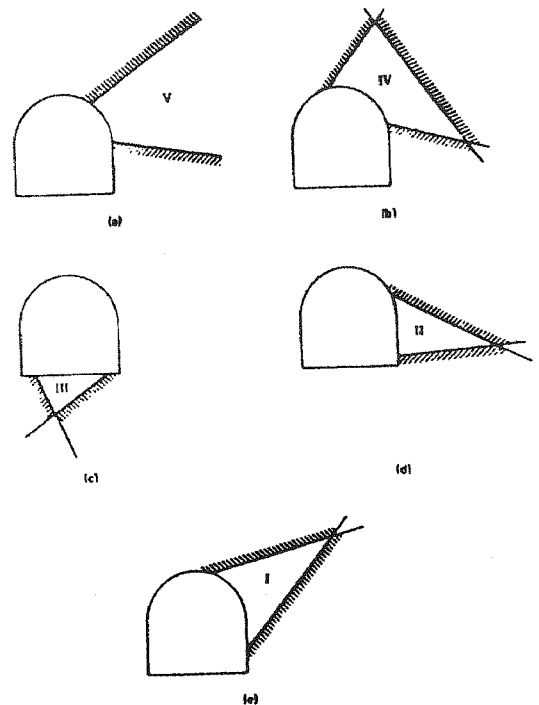
$$I_{12} = \hat{n}_1 \times \hat{n}_2 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \end{vmatrix} \quad (6)$$

که در آن I_{12} بردار فصل مشترک صفحات درز ۱ و ۲ می‌باشد. مثلاً برای بلوک B، بعد از محاسبه تمامی فصل مشترک‌های صفحات درز، هر کدام از $\hat{I}_{ij} = (\pm X, \pm Y, \pm Z)$ ها را در نامعادلات هرم درز (رابطه ۵ a) قرار می‌دهیم. اگر هیچکدام از \hat{I}_{ij} ها تمام نامعادلات هرم درز را همزمان ارضاء نکنند، آن وقت می‌گوییم هرم درز بلوک B تهی است و اگر حداقل یک \hat{I}_{ij} ای پیدا شود که تمام نامعادلات هرم درز را

حفاری (EP) معروف است، مثلاً روابط (۵ b) هرم حفاری بلوک B را مشخص می‌کنند. طبق تعریف، مجموعه نقاطی که از اشتراک هرم درز و هرم حفاری به وجود آید، به هرم بلوک (BP) معروف است. به عبارت دیگر مجموعه نقاطی که روابط ۵ a و ۵ b را به طور همزمان ارضاء می‌کند. البته در راستای این تعاریف، هرم دیگری داریم که به هرم فضا (SP) معروف است و مکمل هرم حفاری می‌باشد [5, 8].

۶- تحلیل پایداری بلوک‌ها

در اثر حفاری در سنگ‌های درز دار، بلوک‌هایی با ابعاد مختلف بوجود می‌آیند که برخی از اینها، نامتناهی و غیر لغزان هستند و برخی دیگر بلوک‌های متناهی می‌باشند که خود به بلوک‌های باریک شونده (غیر لغزان) و بلوک‌های لغزان تقسیم می‌گردند. همچنین بلوک‌های لغزان به سه دسته به نام‌های بلوک‌های پایدار، بلوک‌های کلیدی بالقوه و بلوک‌های کلیدی بحرانی تقسیم می‌گردند (شکل ۲).



شکل (۲) انواع بلوک‌ها: (a) بلوک نامتناهی، (b) باریک شونده، (c) پایدار، (d) کلیدی بالقوه، (e) کلیدی بحرانی [8, 4].

همزمان ارضاء کند، آن وقت می‌گوییم که هرم درز غیر تهی است. همین عملیات را می‌توان برای کنترل تهی بودن یا تهی نبودن هرم بلوک نیز انجام داد. لازم به توضیح است که تئوری‌های بلوک برای بلوک‌های محدب صادق هستند و نمی‌توان آنها را به طور مستقیم برای بلوک‌های مقعر به کار برد، بلکه بایستی ابتداء بلوک‌های مقعر را به بلوک‌های محدب کوچکتری تقسیم کرد و سپس تئوری‌ها را برای هر کدام از بلوک‌های محدب تقسیم شده به کار برد [4].

۶- تحلیل مدی

بعد از اینکه به وسیله تئوری‌های محدودیت و قابلیت ریزش، بلوک‌های لغزان از بلوک‌های غیر لغزان تشخیص داده شد، با استفاده از تحلیل مدی می‌توان با انجام مراحل زیر بلوک‌های پایدار را از بلوک‌های کلیدی تشخیص داد و همچنین مد لغزش بلوک‌های کلیدی را به دست آورد. الف) وزن بلوک قابل ریزش را محاسبه کرده و بردار واحد نیروی برآیند وارد بر بلوک را به دست می‌آوریم. اگر نیروی وزن بلوک، تنها نیروی وارده بر بلوک باشد، بردار واحد نیروی برآیند $r=(0, 0-1)$ خواهد بود و هرگاه علاوه بر نیروی وزن، نیروی میل مهار، نیروی آب و غیره بر بلوک وارد شوند، ابتداء مقدار نیروی برآیند و بردار واحد نیروی برآیند را به دست می‌آوریم. ب) تمامی جهات لغزش (S) صفحات درز را از روابط زیر به دست می‌آوریم [6, 8]. برای لغزش روی یک صفحه درز داریم:

$$S = S_i = \frac{(\hat{n}_i \times \hat{r}) \times \hat{n}_i}{|\hat{n}_i \times \hat{r}|} \quad (7)$$

و برای لغزش روی فصل مشترک دو صفحه درز داریم:

$$S = S_{ij} = \frac{\hat{n}_i \times \hat{n}_j}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|} \times [\text{sgn}((\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot \hat{r})] \quad (8)$$

که در آن \hat{n}_i و \hat{n}_j بردارهای واحد نرمال بر صفحات i و j و بردار واحد نیروی برآیند می‌باشند. ج) هر کدام از جهات لغزش (S) را در نامعادلات هرم درز قرار می‌دهیم. هرگاه هیچکدام از جهات لغزش، نامعادلات هرم درز را به طور همزمان ارضاء نکند، می‌گوییم بلوک مورد نظر هیچ مد لغزشی ندارد و در نتیجه بلوک از نوع پایدار است و هرگاه یک جهت

لغزش پیدا شود که تمام نامعادلات هرم درز را همزمان ارضاء کند. آن جهت لغزش، مد لغزش بلوک است و بلوک از نوع کلیدی بالقوه یا کلیدی بحرانی می‌باشد. از سوی دیگر هر گاه بیشتر از یک بردار جهت لغزش تمام نامعادلات هرم درز را به طور همزمان ارضاء کنند، برای تعیین مد لغزش بلوک، زاویه بین هر کدام از این جهات لغزش (جهات لغزشی که در نامعادلات هرم درز صدق کردند) را با بردار واحد نیروی برآیند به دست می‌آوریم. آن جهت لغزشی که کمترین زاویه را با بردار نیروی برآیند داشته باشد، مد لغزش بلوک خواهد بود و بلوک از نوع کلیدی بالقوه یا کلیدی بحرانی می‌باشد.

۷- تحلیل تعادل حدی

بعد از تحلیل مدی، برای متمایز کردن بلوک‌های کلیدی بحرانی از بلوک‌های کلیدی بالقوه لازم است که ضریب اطمینان بلوک‌های کلیدی را با استفاده از روابط زیر به دست آوریم [4, 2, 8, 9]. برای لغزش روی یک صفحه درز داریم:

$$F. S = \frac{C_i A_i + |\hat{n}_i \cdot r| \tan \phi_i}{|\hat{n}_i \times r|} \quad (9)$$

و برای لغزش روی فصل مشترک دو صفحه درز داریم:

$$\begin{aligned} R &= [C_i A_i + C_j A_j + (r \times \hat{n}_j) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)] \tan \phi_i + \\ & \quad [(r \times \hat{n}_i) \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)] \tan \phi_j \\ W &= |r \cdot (\hat{n}_i \times \hat{n}_j)| |(\hat{n}_i \times \hat{n}_j)| \\ F. S &= R / W \end{aligned} \quad (10)$$

که در آن C_i و C_j چسبندگی صفحات درز i و j ، A_i و A_j مساحت وجوه i و j ، \hat{n}_i و \hat{n}_j بردارهای واحد نرمال بر صفحات درز i و j ، r بردار نیروی برآیند و ϕ_i و ϕ_j زوایای اصطکاک سطوح درز i و j می‌باشند. در صورت وجود فشار آب در درزها باید مقدار نیروی آب روی وجوهی که لغزش روی آنها صورت می‌گیرد، محاسبه گردد و از نیروی مقاوم مربوط به آن وجوه، کاسته گردد. همچنین بردار نیروی آب را باید روی تمام وجوه بلوک به دست آورد و با بردار نیروی برآیند وارد بر بلوک جمع نمود و سپس تحلیل مدی و تحلیل تعادل حدی را دوباره انجام داد.

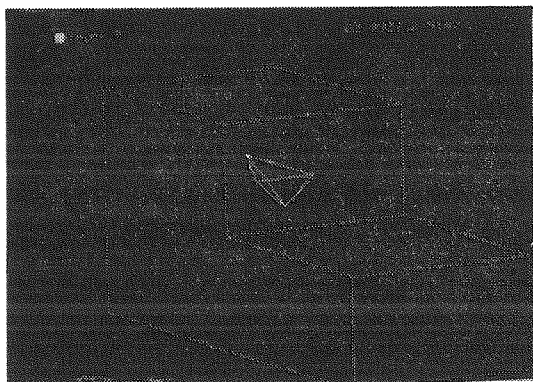
۸- تحلیل پایداری شیب‌های سنگی با استفاده از نرم افزار SBLOCK

نرم افزار SBLOCK تحلیل پایداری حفاری‌های سطحی در سنگ‌های درزدار را انجام می‌دهد که نتایج آن، رسم ترانشه و بلوک‌های کلیدی در حالت سه بعدی و مشخصات بلوک‌های کلیدی از قبیل جهت لغزش، ضریب اطمینان، وزن بلوک کلیدی و حجم کل ریزش خواهد بود. نرم افزار SBLOCK تحلیل پایداری شیب‌های سنگی را با الگوریتمی مانند شکل (۴) انجام می‌دهد که می‌توان از نتایج تحلیل آن، مکان بلوک‌های کلیدی و حجم محتمل ریزش را برای سیستم درز تعیین کرد و حتی در جهت نصب میل مهارها، تمهیدات لازم را در نظر گرفت.

در ادامه، نتایج حاصل از حل چند مثال با نرم افزار SBLOCK بررسی می‌گردند. فرض کنید ترانشه‌ای به عرض ۳۰ متر در سنگ گرانیت با مشخصات سطوح حفاری و گسیختگی جدول‌های ۱ و ۲ ایجاد گردد، شکل ترانشه و تنها بلوک ناپایدار حاصل از برخورد ترانشه با سه صفحه درز به صورت شکل (۳) می‌باشد که بعد از تحلیل با نرم افزار SBLOCK، جهت لغزش بلوک 31/180 درجه، وزن بلوک مساوی 254.97 تن و ضریب اطمینان آن $F.S=0.53$ به دست می‌آید. نکته مهم در این آنالیز این است که علاوه بر ضریب اطمینان، محل محتمل بلوک لغزان نیز به دست می‌آید.

جدول (۱) مشخصات سطوح حفاری

صفحات حفاری	زاویه شیب (درجه)	نقطه ای روی صفحات حفاری
صفحه پایین ترانشه	0	(0, 0, 0)
صفحه میانی ترانشه	90	(0, 0, 0)
صفحه بالای ترانشه	0	(0, 0, 20)



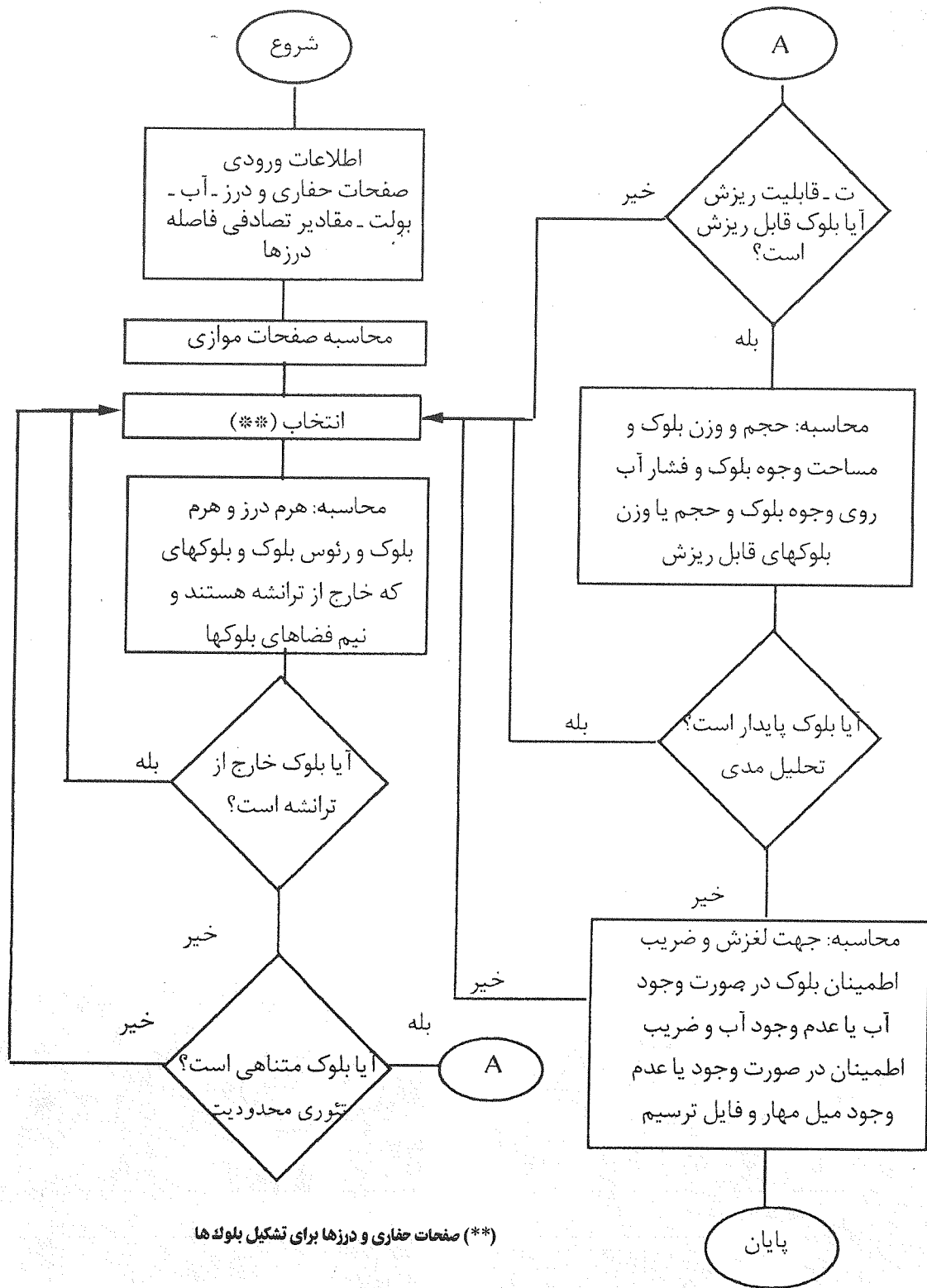
شکل (۳) بلوک ناپایدار حاصل از تقاطع سه صفحه درز و یک صفحه حفاری پس از تحلیل با نرم افزار SBLOCK

جدول (۲) مشخصات سطوح گسیختگی

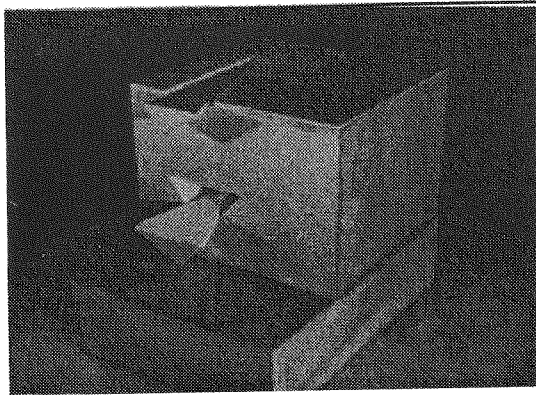
صفحات درز	زاویه شیب (درجه)	زاویه امتداد شیب	میانگین فاصله بینابین	نقطه ای روی صفحات	زاویه اصطکاک	چسبندگی
J_1	50	120°	20 m	(10, 0, 4)	10°	0.05 t/m^2
J_2	50	240°	20 m	(10, 0, 4)	15°	0.05 t/m^2
J_3	10	180°	20 m	(10, 0, 9)	25°	0.05 t/m^2

جدول (۳) مشخصات صفحات گسیختگی

صفحات درز	زاویه شیب	زاویه امتداد شیب	میانگین فاصله درزها	نقطه ای روی صفحات	زاویه اصطکاک	ضریب چسبندگی
J_1	60°	90°	20 m	(5, 0, 20)	5°	0.05 t/m^2
J_2	35°	250°	20 m	(12, 0, 20)	5°	0.05 t/m^2



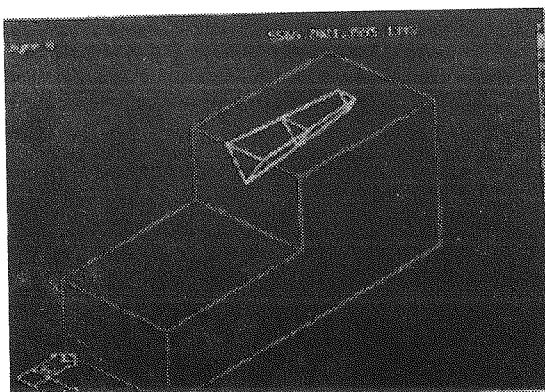
شکل (۲) نحوه عمل نرم افزار SBLOCK



شکل (۶) مدل فیزیکی مثال های ۱ و ۲

لازم به ذکر است که نرم افزار SBLOCK قادر است که بلوک پنج وجهی و جهی حاصل از برخورد سه صفحه درز و دو صفحه حفاری یا چهار صفحه درز و یک صفحه حفاری را نیز تحلیل نماید و همچنین می تواند سیستم تصادفی درزها را نیز ایجاد کند.

در مثال سوم فرض کنید که ترانشه ای مانند مثال های قبل داریم و مشخصات صفحات گسیختگی به صورت جدول (۴) باشد. پس از تحلیل، نتیجه به صورت شکل (۷) خواهد شد که نمایانگر نتیجه دو مثال می باشد. بدین صورت که اگر با داشتن میانگین بینابین درزها، صفحات درز به طور منظم تکرار شوند، پس از آنالیز، دو بلوک مانند شکل (۷) خواهیم داشت که برنامه کامپیوتری SBLOCK، بزرگترین بلوک را در نظر می گیرد و بلوک کوچکتر را حذف می کند. حال اگر با داشتن میانگین فاصله بینابین درزها، صفحات درز به صورت تصادفی ایجاد گردند، پس از آنالیز، تنها یک بلوک کلیدی خواهیم داشت که همان بلوک کوچکتر نشان داده شده در شکل (۷) می باشد.

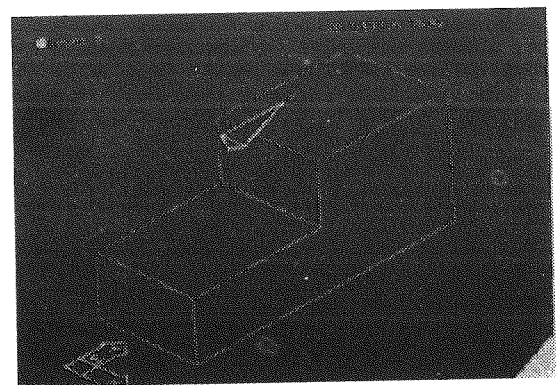


شکل (۷) بلوک های کلیدی حاصل از تقاطع سه صفحه درز و دو صفحه حفاری پس از تحلیل با نرم افزار SBLOCK

هر گاه برای مهار بلوک فوق بخواهیم از میل مهاری با جهت یافتگی 10/0- درجه و ظرفیت کششی 100 تن استفاده نماییم، پس از تحلیل با نرم افزار SBLOCK، ضریب اطمینان بلوک فوق مساوی $F.S=1.62$ به دست می آید و همچنین با وجود میل مهار فوق، مد لغزش بلوک عوض نمی شود. هر گاه همراه چنین میل مهاری، فشار آبی به ارتفاع 15 متر از مختصات (0 و 0 و 0) با وزن مخصوص $\gamma=1 \text{ t/m}^3$ وجود داشته باشد، پس از تحلیل، ضریب اطمینان بلوک $F.S=0.26$ خواهد بود.

حال مثال دیگری را با همان ترانشه ولی با صفحات گسیختگی جدول (۳) در نظر بگیرید. پس از آنالیز با نرم افزار SBLOCK ترانشه و بلوک کلیدی به صورت شکل (۵) خواهد شد و ضریب اطمینان بلوک بدون میل مهار و فشار آب $F.S=0.86$ ، مد لغزش 10/174 درجه و وزن بلوک مساوی 198.5 تن به دست می آید.

هر گاه برای مهار این بلوک، میل مهاری با جهت یافتگی 0/0 درجه و ظرفیت کششی 15 تن در نظر بگیریم، پس از تحلیل، ضریب اطمینان مساوی $F.S=0.54$ خواهد شد و اگر علاوه بر میل مهار، فشار آبی به ارتفاع 20 متر از مبدا مختصات با وزن مخصوص $\gamma=1 \text{ t/m}^3$ داشته باشیم، ضریب اطمینان مساوی $F.S=0.05$ به دست می آید و مد لغزش نیز عوض نمی گردد. برای کنترل صحت نتایج به دست آمده از مثال های فوق علاوه بر کنترل با محاسبات دستی، مدل فیزیکی نیز تهیه گردیده که در شکل (۶) نشان داده شده است. مقایسه مدل فیزیکی و نتایج کامپیوتری مبین صحت نتایج تحلیلی می باشد.



شکل (۵) بلوک کلیدی حاصل از تقاطع دو صفحه درز و دو صفحه حفاری پس از تحلیل با نرم افزار SBLOCK

جدول (۲) مشخصات صفحات گسیختگی

صفحات درز	زاویه شیب (درجه)	زاویه امتداد شیب	میانگین فاصله بینابین	نقطه ای روی صفحات	زاویه اصطکاک	چسبندگی
J ₁	60°	95°	10 m	(10, 0, 20)	10°	0.05 t/m ²
J ₂	60°	265°	10 m	(20, 0, 20)	15°	0.05 t/m ²
J ₃	89°	1°	10 m	(15, 10, 20)	25°	0.05 t/m ²

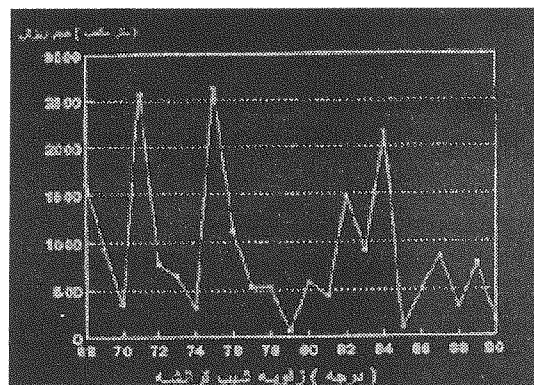
بلوک های کلیدی را از میان آنها بیاید، برای روشن شدن این موضوع، دوباره مثال ۲ را با میانگین فاصله بینابین مساوی ۲ متر بررسی می کنیم. بعد از تحلیل با نرم افزار SBLOCK متوجه می شویم که تعداد کل بلوک های ایجاد شده مساوی ۸۶۰۰ عدد می باشد که از این تعداد، ۲۳۹ عدد بلوک قابل ریزش هستند. همانطوری که در شکل ۹ نشان داده شده است، ۲۳۹ بلوک قابل ریزش قبل از تحلیل مدی باقی می مانند. هرگاه تحلیل مدی انجام شود و بلوک های پایدار از لیست محاسبات حذف گردند، تنها ۴۱ عدد بلوک کلیدی (بالقوه یا بحرانی) باقی می ماند که در شکل (۱۰) نشان داده شده است.

۹ - نتیجه گیری

با استفاده از تئوری بلوک ها و به وسیله نرم افزار SBLOCK می توان نواحی بحرانی در اطراف یک ترانشه را مشخص نمود و حجم محتمل ریزش بلوک های کلیدی و ضریب اطمینان آنها را برای حالات وجود یا عدم وجود میل مهارها و فشار آب محاسبه کرد.

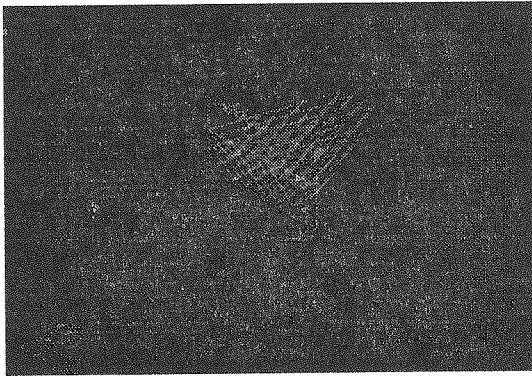
همچنین می توان با داشتن میانگین فاصله بینابین درزها، سیستم تصادفی درزها را تولید کرد و تحلیل پایداری شیب های سنگی را انجام داد، که در این صورت قادر خواهیم بود شیب های سنگی را حتی قبل از حفاری تحلیل نماییم و برای محل های بحرانی، تمهیدات لازم را در نظر بگیریم، یا اینکه در صورت امکان، جهت یافتگی ترانشه را تا حد امکان و قابل اجراء بودن تغییر دهیم تا کمترین حجم محتمل ریزش و در نتیجه، کمترین نیروی لازم برای مهار بلوک های لغزان را داشته باشیم.

علاوه بر توانایی های فوق، به کمک نرم افزار SBLOCK می توان شکل حفاری و جهت یافتگی آن را طوری انتخاب کرد تا حجم محتمل ریزش به حداقل برسد. مثلاً فرض کنید ترانشه ای مانند مثال های قبل و سیستم درزی مانند مثال ۱ داشته باشیم. با این تفاوت که زاویه امتداد شیب صفحه میانی ترانشه مساوی 181 درجه باشد. حال اگر زاویه شیب آن را از 68 درجه تا 90 درجه تغییر دهیم و برای هر مرحله، حجم محتمل ریزش را توسط نرم افزار SBLOCK محاسبه نماییم و نمودار آن را رسم کنیم، نتیجه مانند شکل (۸) خواهد شد که از روی آن می توان گفت، کمترین حجم ریزش را ترانشه با زاویه شیب صفحه میانی 79 درجه دارد.

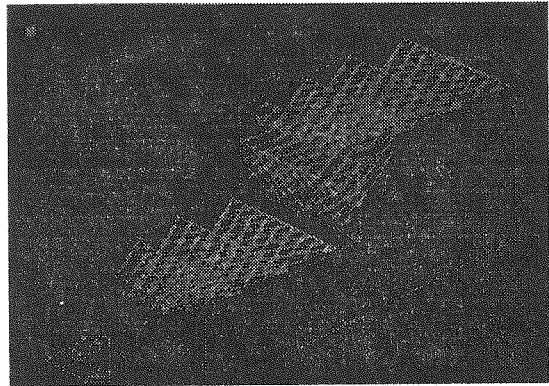


شکل (۸) طیف حجم محتمل ریزش بر اساس تغییرات زاویه شیب ترانشه پس از تحلیل بانرم افزار SBLOCK

در واقع، درهر آنالیز، نرم افزار SBLOCK تعداد خیلی زیادی از بلوک ها را مورد تحلیل قرار می دهد تا



شکل (۱۰) بلوک‌های کلیدی بعد از انجام تحلیل مدی



شکل (۹) بلوک‌های قابل ریزش قبل از انجام تحلیل مدی

کلمات کلیدی

تحلیل پایداری، تئوری بلوک‌ها، شیب‌های سنگی، بلوک‌های لغزان، سیستم تصادفی درزها، میل مهار.

مراجع

- [1] Hudson, J. A. and S. D., Priest, "Discontinuities and rock mass geometry", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol. 16, pp. 339-362, (1979).
- [2] Mauldom, M., "Probability aspects of the removability and rotatability of tetrahedral blocks". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 27, No. 4, 291-301, (1990).
- [3] Priest, S. D., and J. A. Hudson, "Estimation of discontinuity spacing and trace length using scanline surveys", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, Vol 18, pp. 183-197, (1981).
- [4] Goodman, R. E. and Shi, G., "Block theory and its application to rock engineering", Prentice-Hall, New Jersey, (1985).
- [5] Goodman, R. E., "Methods of geological engineering in discontinuous rocks", West Publishing Co., St. Paul. MN, (1979).
- [6] Hoek, E. and J., Bray, "Rock slope engineering", Inst. of Mining and Metallurgy, London, (1981).
- [7] Meyer, P. L., "Introductory probability and statistical applications", Addison-Wesley, Amsterdam, (1970).
- [8] Goodman, R. E., and Gen-Hua Shi, and W. Boyle, "Calculation of support for hard jointed rock using the keyblock principle", Proc. 23rd U. S. Symposium on Rock Mechanics (AIME/SME, New York), pp. 883-898, (1982).
- [9] Shi, Gen-Hua and R. E. Goodman, "A New concept for support of underground and surface excavation in discontinuous rock based on a key-stone principle", proc 22nd U.S. symposium on Rock Mechanics, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., pp. 290-296, (1981).