مدلسازی سه بعدی حفریات سنگی در محیطهای ناپیوسته و ارائه روش نوینی برای تعیین نوع تماس بین بلوکها

احمد جعفری
استادیار گروه مهندسی معدن – دانشکده فنی – دانشگاه تهران
سید امیررضا بیابانکی
دانشجوی دکتری مهندسی معدن (مکانیک سنگ) – دانشکده فنی – دانشگاه تهران
پرویز معارف وند
استادیار گروه مهندسی معدن – دانشکده فنی – دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۲/۷/۱ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۳/۱۱/۱۲، تاریخ تصویب ۸۳/۱۱/۲۴)

چکیده

توده سنگی که در آن فضاهای حفاری به وجود می آید به دلیل وجود ناپیوستگی هایی مانند درزه ها و گسل ها محیطی ناپیوسته تلقی می شود. روشهای مختلفی برای تحلیل چنین محیطهایی وجود دارد که بهترین آنها روش های عددی می باشد. الگوریتم هایی برای مدلسازی یک سیستم متشکل از بلوکهای سنگی به همراه تشخیص انواع تماس بین بلوکهای این سیستم در این مقاله ارائه می شود که به عنوان یک پیش پردازنده[1] برای روش های عددی اجزای مجزا (DEM)[2] و آنالیز تغییر شکل ناپیوسته (DDA)[3] به کار می روند. در این تحقیق تلاش شده است تا راه حل های ساده تری با کارایی بیشتر در مقایسه با روش های موجود ارائه شود.

واژه های کلیدی: محیطهای ناپیوسته، توده سنگ درزه دار، بلوکهای سنگی، درزه و ناپیوستگی، تشخیص تماس

مقدمه

به دلیل وجود ناپیوستگی ها در مقیاس های مختلف (مانند گسل ها، درزه ها، لایه بندیها و ریزترکها) توده سنگی که در آن حفاری انجام می گیرد محیطی ناپیوسته است. از دید زمین شناسی ساختمانی (تکتونیک)، یک توده سنگ همانند یک سیستم بلوکهاست که گسل ها، درزه ها و لایه بندیها فصل مشترک آنها هستند. صفحات ساختمانی اصلی مانند گسل ها و درزه های بزرگ مهمترین صفحات ناپیوستگی ها برای یک توده سنگ می باشند.

برای تحلیل فضاهای حفاری شده روباز و زیرزمینی در توده سنگ درزه دار روش های مبتنی بر تحلیل محیطهای پیوسته مناسب نبوده و در این گونه مسائل باید از روش های تحلیل محیطهای ناپیوسته سود جست.

روش تحلیلی موجود برای آنالیز محیطهای بلوکی، تئوری بلوکی[4] می باشد که ابزاری را فراهم می کند که به موجب آن بلوکهای بالقوه خطرناک شناسایی شده و احتمال حرکت آنها به داخل فضای حفاری شده مورد بررسی قرار می گیرد [۱]. مفهوم اصلی تئوری بلوکی برای اولین بار در سال ۱۹۸۵ توسط گودمن[5] مطرح شد. این نظریه مبنای ریاضی داشته و مفاهیم توپولوژی و تئوری مجموعه ها را با هم می آمیزد و نهایتاً تحلیلی هندسی ارائه می کند که علاوه بر آنکه بلوکهای بالقوه خطرناک را شناسایی می کند، تعیین نوع شکست و محل آن بلوکها را نیز امکان پذیر می سازد [۲].

از آنجایی که این روش دارای مفروضات محدود کننده بسیار زیادی مانند عدم در نظر گرفتن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی ماده سنگ،عدم تحلیل چرخش بلوکها و ... است، به خوبی نمی تواند تحلیل پایداری را انجام دهد. روش های عددی راه حل جایگزین مناسبی را ارائه می کنند. یکی از این روش های عددی، روش اجزای مجزا[6] می باشد [۳]. در این روش، یک توده سنگ همانند ترکیبی از بلوکهای مجزا و درزه ها به عنوان فصل

مشترک بین بلوکهای مجزا در نظر گرفته می شوند. نیروهای تماس و جابجایی ها در فصل مشترک بلوکها توسط انجام یکسری محاسبات بدست می آیند. پایه و اساس فرموله کردن این روش توسط کندل[۷] در سال ۱۹۷۸ ارایه شده است [۴].

روش DDA نیز یک تکنیک گسترش یافته در سالهای اخیر است که عضوی از خانواده اجزای مجزا محسوب می شود. تفاوت این روش با روش اجزای مجزا این است که روش حل در اجزای مجزا صریح[۸] ولی در این روش ضمنی[۹] می باشد. برای اولین بار در سال ۱۹۸۸، شی[۱۰] در تز دکترای خود با عنوان "DDA، یک مدل عددی جدید برای سیستم های بلوکی ایستا و پویا" این روش را ارائه نمود[۵].

برای تحلیل با استفاده از روش های عددی DEM و DDA ابتدا باید مطابق با اطلاعات موجود، توده سنگی که در آن حفاری انجام می گیرد به صورت یک سیستم بلوکی متأثر از ناپیوستگی ها مدلسازی شده، سپس با توجه به مشخصات فضای حفاری شده، بلوکهای جدید ایجاد شوند. پس از ایجاد سیستم بلوکی منطقه حفاری شده باید انواع تماس بلوکها به همراه مختصات نقاط تماس به دست آمده و سپس با در نظر گرفتن یک مدل رفتاری مناسب برای درزه های بین بلوکها مبادرت به حل معادلات مربوطه برای هر بلوک نمود.

لازم به ذکر است که حل معادلات مربوطه برای مرحله زمانی کوچکی انجام می گیرد و در هر مرحله از محاسبات پس از محاسبه مکان جدید هر بلوک نوع و مختصات نقاط تماس بلوکها به روز شده و نیروهای حاصل از جابجایی بلوکها در محل درزه ها محاسبه می شود. مراحل انجام محاسبات تا جایی که انرژی ذخیره شده در بلوکها به سمت صفر میل نماید تکرار می شوند.

در این مقاله قسمت پیش پردازنده تحلیل محیطهای بلوکی(تشکیل سیستم بلوکی از اطلاعات ناپیوستگیها و تشخیص انواع تماس بین بلوکها) در حالت سه بعدی ارائه می گردد.

در مورد شناسایی انواع تماس در حالت سه بعدی تحقیقات زیادی انجام شده است که در کاملترین حالت، اجسام به صورت انحنا دار در نظر گرفته شده اند [۷،۶] ولی برای انجام تحلیل فضاهای حفاری شده، از آنجایی که ناپیوستگی ها به صورت یک صفحه در نظر گرفته می شوند، لذا بلوکهای ایجاد شده به صورت چند وجهی بوده و انجام تشخیص تماس برای آنها نسبت به حالتی که صفحات ناپیوستگی انحنا دار می باشند، ساده تر می باشد.

با فرض چند وجهی بودن بلوکها نیز روش های متفاوتی ارائه شده که از مهمترین آنها می توان به روش به کار رفته در نرم افزار 3DEC [۸] اشاره نمود. 3DEC رایج ترین نرم افزار برای تحلیل محیطهای ناپیوسته می باشد که بر اساس روش DEM بنا شده است.

روش ارائه شده در این مقاله برای تشخیص تماس، یک روش ساده و کارا برای مشخص نمودن انواع تماس بین بلوکها می باشد. الگوریتم مربوطه ساده تر از منطق "Common Plane" به کار رفته در نرم افزار 3DEC می باشد [۸]. این روش بر مبنای یافتن تماس بین وجوه مجاور بلوکهای همسایه بنا شده است.

الگوریتم به کار رفته

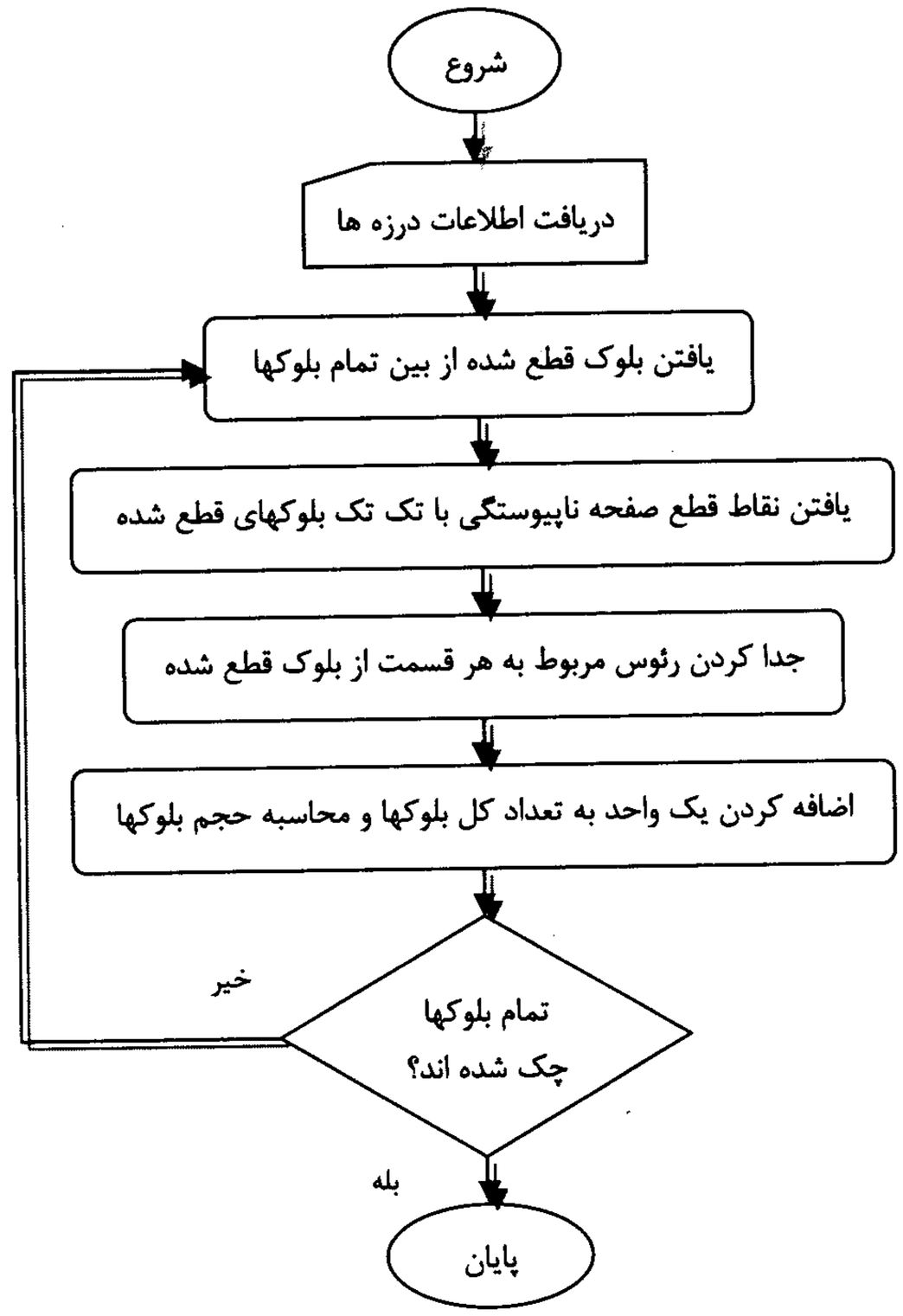
ابتدا الگوریتم های به کار رفته برای تشکیل سیستم بلوکی و تشخیص انواع تماس بین بلوکها ذکر می شود.

۱- تشکیل سیستم بلوکی

همانطور که قبلاً ذکر شد، ابتدا باید منطقه حفاری شده به صورت یک سیستم بلوکی مدلسازی شود. در این مرحله لازم است که مختصات هر رأس، تعداد وجوه آنها و حجم هر بلوک محاسبه شود. برای این منظور محدوده کل مدل، فضای حفاری شده و بلوکها مدلسازی می شوند.

منطقه ای که در آن حفاری انجام می گیرد را به صورت یک مکعب مستطیل در نظر گرفته که عوامل تکتونیکی آن را قطع و بلوکهای کوچکتری را ایجاد می کنند. فرض بر این است که صفحات ناپیوستگی به صورت صفحات ممتدی هستند که بلوک اولیه را به طور کامل قطع می کنند.

برای تشخیص بلوکهای ایجاد شده در اثر تکتونیک منطقه، پس از ایجاد بلوک اولیه، تک تک ناپیوستگی ها را به طور مجزا با آن قطع داده شده تا بلوکهای جدید ایجاد شوند. شکل (۱) روندنمای کلی جدا نمودن بلوکها را نشان می دهد.



شکل ۱: روندنمای جدا نمودن بلوکها.

روش کار بدین صورت می باشد که ابتدا اطلاعات مورد نیاز تک ناپیوستگی و دسته درزه ها از واحد ورودی دریافت می شود. سپس معادله هر صفحه ناپیوستگی به صورت زیر محاسبه می شود:

$$\begin{cases} A = \sin\alpha.\sin\beta \\ B = \cos\alpha \\ C = \sin\alpha.\cos\beta \end{cases} \quad (۱)$$

که در آن A، B و C پارامترهای معادله صفحه ناپیوستگی و α و β به ترتیب شیب و جهت شیب آن می باشند. برای یافتن پارامتر D این صفحه با داشتن یک نقطه دلخواه روی آن $M(x_0, y_0, z_0)$ خواهیم داشت:

$$D = ax_0 + by_0 + cz_0 \quad (۲)$$

به این ترتیب معادله صفحه درزه مزبور به صورت زیر خواهد بود:

$$P: Ax + By + Cz = D \quad (۳)$$

پس از آن، بلوکهایی از سیستم بلوکی موجود که توسط ناپیوستگی ها قطع می شوند به دست می آید. برای این منظور باید صفحه ناپیوستگی را با دوبه دوی صفحات وجوه هر بلوک قطع داده تا دستگاه معادله زیر حاصل شود:

$$\begin{cases} Ax + By + Cz = D \\ a_1x + b_1y + c_1z = d_1 \\ a_2x + b_2y + c_2z = d_2 \end{cases} \quad (۴)$$

که در آن A، B، C و D پارامترهای معادله صفحه ناپیوستگی و a_1، b_1، c_1 و d_1 پارامترهای معادله یکی از وجه های بلوک مورد نظر و a_2، b_2، c_2 و d_2 معادله وجه دیگر آن بلوک است.

اگر تعداد نقاط به دست آمده برای یک بلوک بیش از دو عدد باشد (یعنی حداقل سه وجه بلوک قطع شده .

باشند)، آنگاه می توان نتیجه گرفت که بلوک مزبور توسط ناپیوستگی مورد نظر قطع خواهد شد.

پس از یافتن بلوکهایی که توسط ناپیوستگی قطع می شوند نوبت به تعیین مختصات رئوس بلوکهای ایجاد شده جدید می رسد. برای انجام این کار باید ابتدا معادله خط حاصل از اتصال دو نقطه تقاطع صفحه ناپیوستگی با بلوک اولیه در هر وجه به دست آید، پس از آن مختصات تک تک رئوس بلوک اولیه نسبت به خط مزبور مقایسه می شود، آنهایی که در یک طرف خط قرار دارند متعلق به یک نیمه بلوک (یک بلوک جدید ایجاد شده) و بقیه متعلق به نیمه دیگر آن (دومین بلوک جدید ایجاد شده) خواهند بود. پس از انجام این کار برای هر وجه، رئوس بلوکهای جدید ناشی از قطع ناپیوستگی با هر بلوک به دست خواهد آمد.

برای محاسبه حجم هر بلوک که می تواند به هر شکلی باشد، ابتدا باید آن بلوک را به تعدادی هرم تقسیم نموده و حجم هر هرم را از رابطه زیر به دست آوریم:

$$V = \frac{1}{6}\begin{vmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 & x_4 - x_1 \\ y_2 - y_1 & y_3 - y_1 & z_4 - z_1 \\ z_2 - z_1 & z_3 - z_1 & z_4 - z_1 \end{vmatrix} \quad (۵)$$

که در آن x، y و z مختصات رئوس هر هرم می باشد.

از جمع حجم هرم ها، حجم بلوک مورد نظر محاسبه می شود.

پس از تشخیص بلوکهای ناشی از تأثیر عوامل تکتونیکی بر بلوک اولیه، نسبت به حفاری فضای مورد نظر اقدام کرد. برای انجام حفاری کافی است مانند قبل معادله صفحات فضای حفاری را به دست آورده و با بلوکهای موجود در بلوک اولیه قطع داده شوند تا بلوکهای جدید به دست آید.

پس از به دست آوردن بلوکهای جدید، باید بلوکهایی که داخل فضای حفاری قرار می گیرند حذف شوند، تا فضای حفاری مدل شود.

۲- تشخیص تماس

همانطور که ذکر شد برای تحلیل محیطهای ناپیوسته به روش عددی، پس از انجام هر مرحله محاسبات و حرکت بلوکها (به روز رسانی مختصات رئوس آنها)، نوع و نقاط تماس به روز می شوند. در واقع یک تماس ممکن است بین هر دو وجه از هر دو بلوک و یا ترکیبی از رئوس، لبه ها و وجه ها وجود داشته باشد.

در حالتی که فقط دو یا سه بلوک مورد تحلیل قرار گیرد، سطوح تماس می تواند توسط کاربر به صورت دستی وارد کامپیوتر گردد، در این حالت کمترین مقدار محاسبه و کنترل تماس توسط کامپیوتر مورد نیاز می باشد، اما هنگامی که ده ها و یا صدها بلوک وجود دارد، مشخص نمودن تمام سطوح موجود، بصورت دستی امری بسیار دشوار و تقریباً غیر ممکن است. در این حالت به یک الگوریتم نیاز می باشد که به طور خودکار بتواند تماس های موجود بین بلوکها را مشخص نماید.

چک کردن انواع تماس بین رئوس، لبه ها و وجوه هر جفت بلوک در یک سیستم بلوکی یک مرحله وقت گیر است [۹].

با توجه به زمان بر بودن مرحله تشخیص تماس، برای دست یافتن به سرعت قابل قبول برای حل مسأله سه بعدی و نیز ایجاد قابلیت تحلیل تعداد زیاد بلوک، باید از بهترین الگوریتم ممکن استفاده شود، برای این منظور ایده کلی از روش جدید ارائه شده توسط Liu, Lemos (2001) گرفته شده و اصلاحاتی در آن صورت پذیرفته است.

روندنمای روش به کار رفته برای تشخیص تماس در حالت سه بعدی در شکل (۲) نشان داده شده است.

همانطور که در این روند نما نشان داده شده است، مراحل اصلی تشخیص تماس به کار رفته به شرح زیر می باشد:

الف. یافتن بلوکهای مجاور

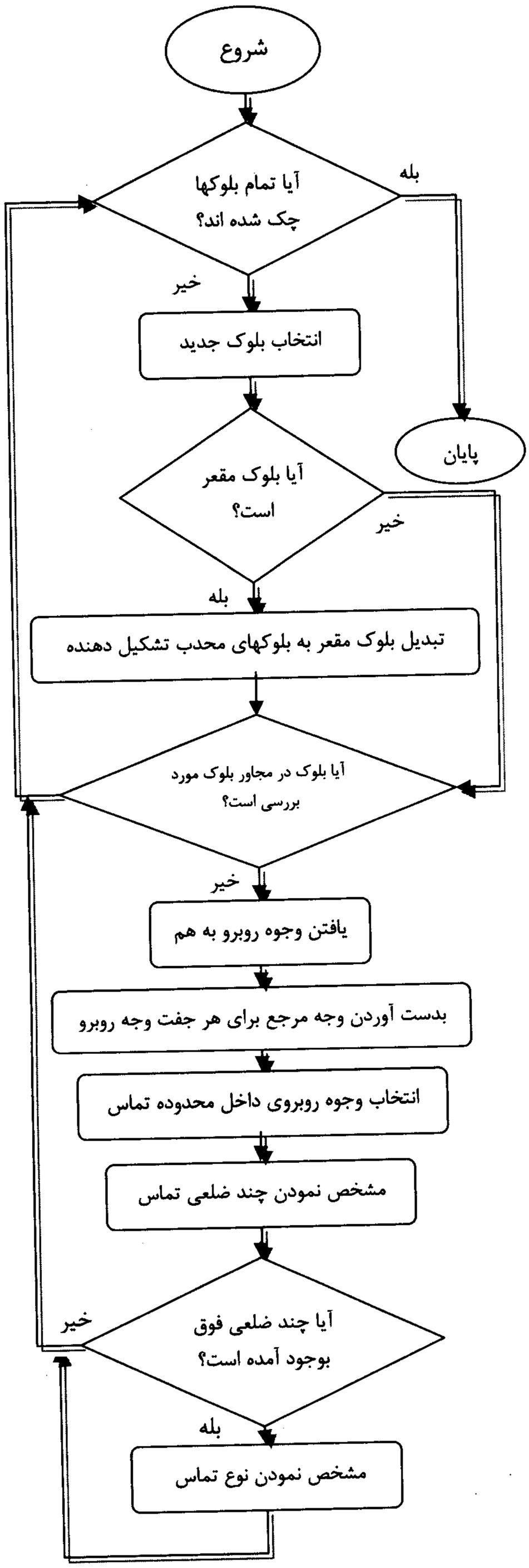
ب. یافتن وجوه روبروی هر دو بلوک مجاور

ج. به دست آوردن وجوه روبروی داخل محدوده تماس برای هر دو بلوک مجاور

د. به دست آوردن چند ضلعی تماس برای هر جفت بلوک مجاور

ه. مشخص نمودن نوع تماس

در بخش های بعدی هر یک از این مراحل تشریح می گردند.

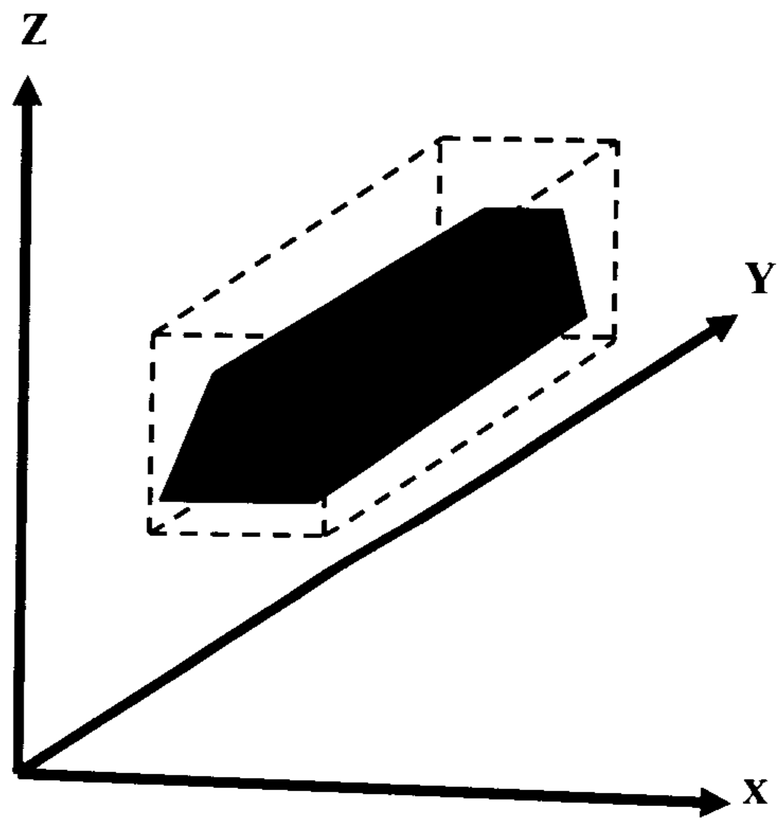


شکل ۲: روندنمای تشخیص تماس.

الف – یافتن بلوکهای مجاور

برای صرفه جویی در زمان باید عملیات تشخیص تماس فقط برای جفت بلوکی که احتمال تماس آنها وجود دارد، انجام پذیرد. برای این منظور باید ابتدا بلوکهای مجاور داخل سیستم بلوکی مورد نظر به دست آیند.

برای انجام این کار یک محدوده کوچک اطراف هر بلوک در نظر گرفته می شود (شکل ۳). حداقل یک رأس از بلوکهای مجاور باید داخل این محدوده قرار گیرد.



شکل ۳ : محدوده فرضی اطراف هر بلوک.

ب – یافتن وجوه روبروی هردو بلوک مجاور

پس از اینکه جفت بلوکهای مجاور به دست آمدند، برای کاهش عملیات مورد نیاز باید وجوهی از این جفت بلوکها که روبروی هم قرار دارند (یعنی اینکه احتمال تماس آنها با یکدیگر وجود دارد) را به دست آورد.

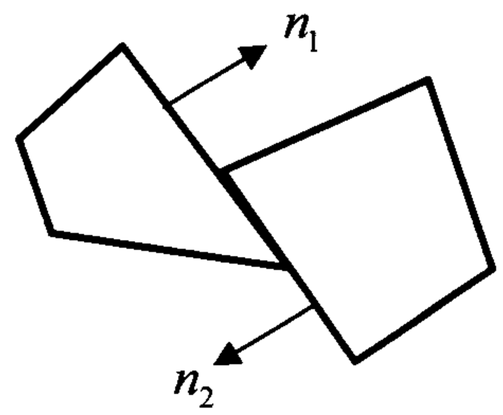
برای انجام این کار باید ابتدا بردارهای عمود بر هر یک از وجوه بلوکهای مجاور را که جهت آنها رو به خارج بلوک می باشد را به دست آورد. چنانچه زاویه این دو بردار که متعلق به دو وجه از دو بلوک مجاور می باشند بیش از ۹۰ درجه باشد، آن دو وجه روبروی یکدیگر خواهند بود.

یعنی:

$$\cos\alpha = n_1.n_2 \prec 0$$

(۶)

شکل (۴) دو وجه روبرو به هم را نشان می دهد.



شکل ۴ : دو وجه روبرو به هم .

ج– یافتن وجوه روبروی داخل محدوده تماس

پس از به دست آوردن جفت وجوه روبرو به هم، نوبت به انتخاب بلوکهایی می رسد که احتمال تماس آنها بیشتر باشد، چون ممکن است دو وجه روبروی هم باشند اما امکان اینکه با هم در تماس باشند وجود نداشته باشد.

برای این منظورکافی است فاصله قائم تک تک رئوس یک وجه نسبت به وجه دیگر به دست آید. چنانچه معادله صفحه یکی از وجوه به صورت باشد:

$$P : ax + by + cz + d = 0$$

(۷)

و $A(x_1, y_1, z_1)$ مختصات یکی از رئوس وجه دیگر باشد، فاصله قائم این رأس تا آن وجه برابر خواهد بود با:

$$d = \frac{|ax_1 + by_1 + cz_1 + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}}$$

(۸)

برای این منظورکافی است فاصله قائم تک تک رئوس یک وجه نسبت به وجه دیگر به دست آید.

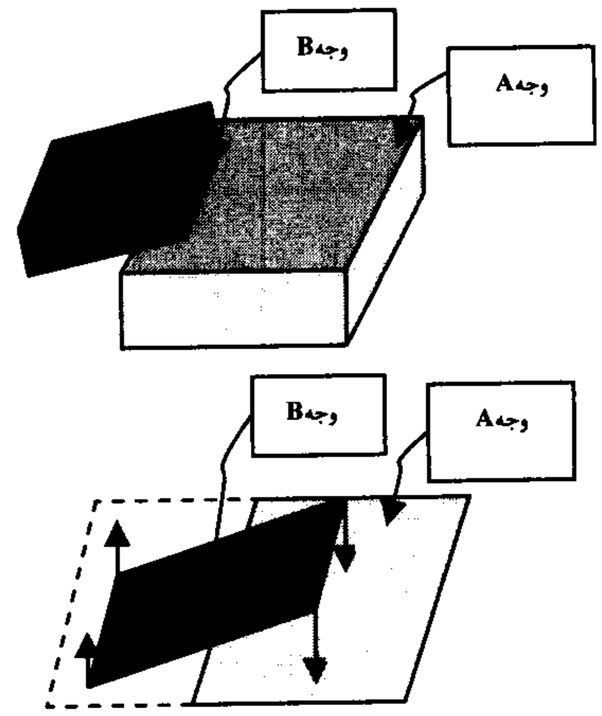
اگر فاصله به دست آمده برای حداقل یکی از رئوس، داخل محدوده قرار داشته باشد، احتمال بسیار زیادی برای تماس این دو وجه وجود خواهد داشت.

امکان دارد که فاصله قائم هیچ یک از رئوس یک وجه تا وجه دیگر داخل محدوده تماس قرار نداشته باشد ولی این دو وجه با هم در تماس باشند. این حالت در شکل (۵) نشان داده شده است.

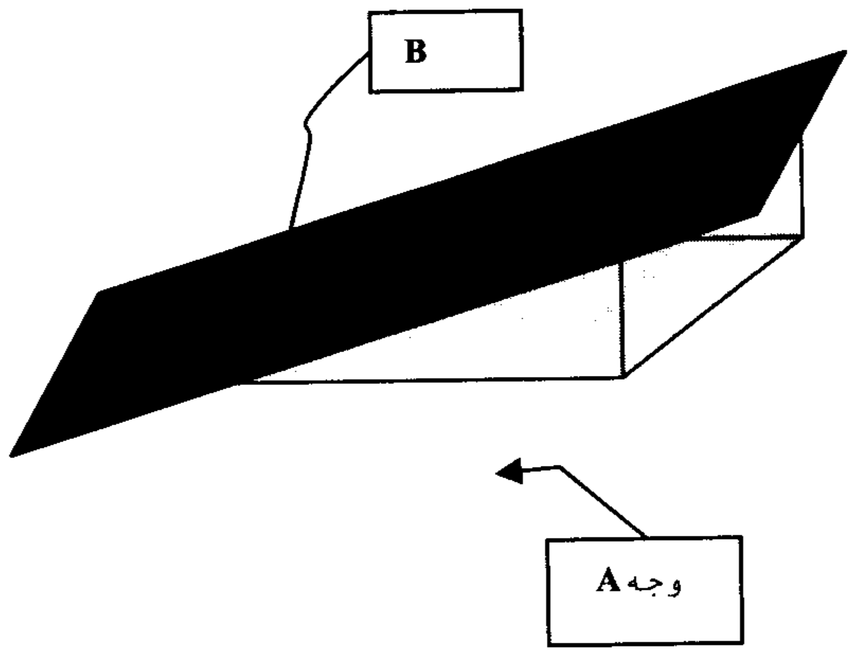
همانطور که در این شکل نشان داده شده است ممکن است فواصل قائم رئوس وجه B نسبت به وجه A خارج از محدوده تماس باشد اما آن دو وجه با هم در تماس باشند.

در چنین مواقعی راه حل این است که فاصله قائم وجه دیگر نسبت به آن وجه به دست آید. برای نمونه در

مثال قبل باید فواصل قائم رئوس وجه A را نسبت به وجه B بدست آوریم (شکل (۶)).



شکل ۵ : دو وجه در تماس که فاصله قائم رئوس هیچ یک از آنها داخل محدوده تماس قرار ندارد.



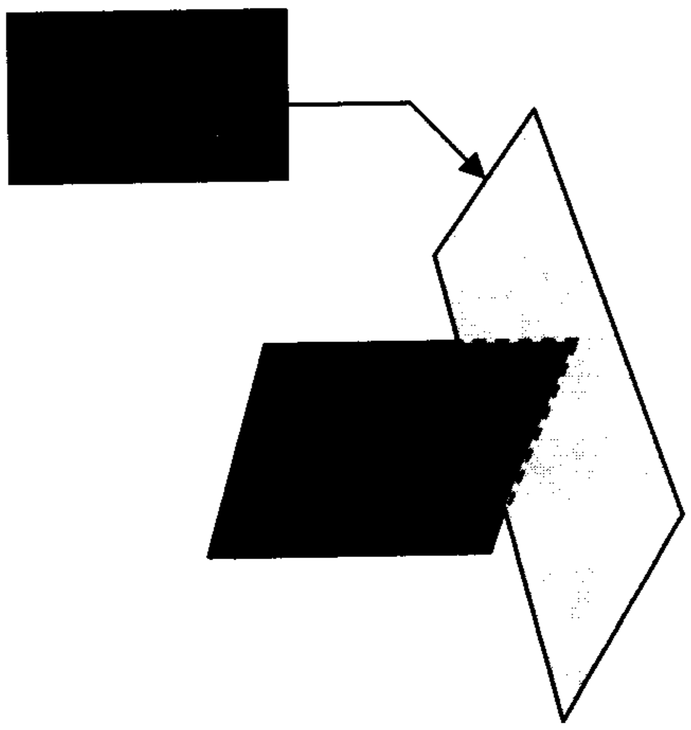
شکل ۶ : فاصله قائم رئوس وجه A نسبت به وجه B .

همانطوری که در این شکل مشخص می باشد، فواصل قائم دو رأس داخل محدوده مورد نظر قرار دارند (چون فاصله کمی با وجه B دارند).

بنابر این برای تشخیص وجوه روبرویی که احتمال تماس دارند باید یکبار فواصل قائم یک وجه نسبت به دیگری به دست آمده و بررسی شود که آیا فاصله آنها کمتر از محدوده مربوطه است یا خیر، در صورت منفی بودن پاسخ این مرحله باید فاصله قائم وجه دوم نسبت به وجه اول به دست آید، حال اگر باز هم فواصل رئوس مربوطه در محدوده نباشد، احتمال اینکه این دو وجه با هم در تماس باشند وجود ندارد.

برای حالتی که تعداد بلوکها زیاد باشد (و در نتیجه تعداد جفت وجوه روبرو نیز زیاد می باشد) انجام این کار وقت زیادی را صرف می نماید، لذا بهتر است فقط یکبار عمل محاسبه و چک شدن فاصله قائم رئوس تا یک وجه صورت بگیرد. برای انجام این امر باید وجهی از هر جفت وجه روبرو مشخص گردد که عمل چک نمودن فاصله نسبت به آن کافی باشد.

این وجه که از این پس وجه مرجع نامیده می شود، وجهی است که وجه دیگر در یکطرف آن قرار گرفته باشد. برای نمونه در شکل (۷) وجه مرجع نشان داده شده است.



شکل ۷ : تعیین وجه مرجع.

د – یافتن چندضلعی تماس

پس از اینکه وجوه روبرویی که احتمال تماس دارند یعنی فاصله آنها کمتر از محدوده مورد نظر می باشد، به دست آمد، حال باید سطح تماس دو وجه به دست آید. برای انجام این کار باید تصویر رئوس یک وجه از هر جفت وجه روبرویی که احتمال تماس دارند بر روی وجه مرجع آن جفت وجه به دست آید.

اگر مختصات رأس مورد نظر $A(x_1, y_1, z_1)$ و معادله وجه مرجع به صورت زیر باشد:

$$P: a_2 x + b_2 y + c_2 z + d_2 = 0 \qquad (۹)$$

مختصات تصویر این رأس بر روی وجه مرجع به صورت زیر خواهد بود:

$$A' \begin{cases} x_2 = x_1 - a_2 \lambda \\ y_2 = y_1 - b_2 \lambda \\ z_2 = z_1 - c_2 \lambda \end{cases} \qquad (۱۰)$$

که در آن:

$$\lambda = \frac{a_r x_1 + b_r y_1 + c_r z_1 + d_r}{a_r^2 + b_r^2 + c_r^2}$$

(۱۱)

در صورتی که تعداد رئوسی که داخل محدوده تماس قرار گیرند، بیش از سه عدد باشد، آنگاه برای سطح تماس یک چند ضلعی به دست می آید که رئوس این چند ضلعی لزوماً همان رئوس هر یک از این دو وجه نخواهد بود. در صورتی که تعداد رئوس داخل محدوده تماس دو و یا یک نقطه باشد، چند ضلعی تماس به ترتیب یک خط و یا یک نقطه خواهد بود.

ه- مشخص نمودن نوع تماس

با توجه به تعداد نقاط به دست آمده و وضعیت موجود، نوع تماس مشخص می گردد. جدول (۱) انواع حالات تماس و شرایط هر یک را نشان می دهد.

توانایی ها ومحدودیتهای برنامه تهیه شده

نرم افزارتهیه شده به زبان Visual Fortran نوشته شده و شامل ۱۵ فایل و ۱۰۱ سابروتین و در حدود ۱۸۰۰۰ خط می باشد.

توسط این نرم افزار ابتدا منطقه ای که در آن حفاری انجام می گیرد مدلسازی می شود. این کار با داشتن ابعاد طول، عرض و ارتفاع آن صورت می پذیرد.

پس از مدل نمودن منطقه مورد نظر، مشخصات دسته درزه ها (شامل شیب، جهت شیب و یک نقطه دلخواه بر روی یکی از صفحات درزه های واقع در این دسته درزه) و درزه های تصادفی (شامل شیب، جهت شیب و یک نقطه دلخواه داخل صفحه ناپیوستگی) وارد گردیده و همانند شکل (۸) مدل ژئومکانیکی منطقه ایجاد می گردد.

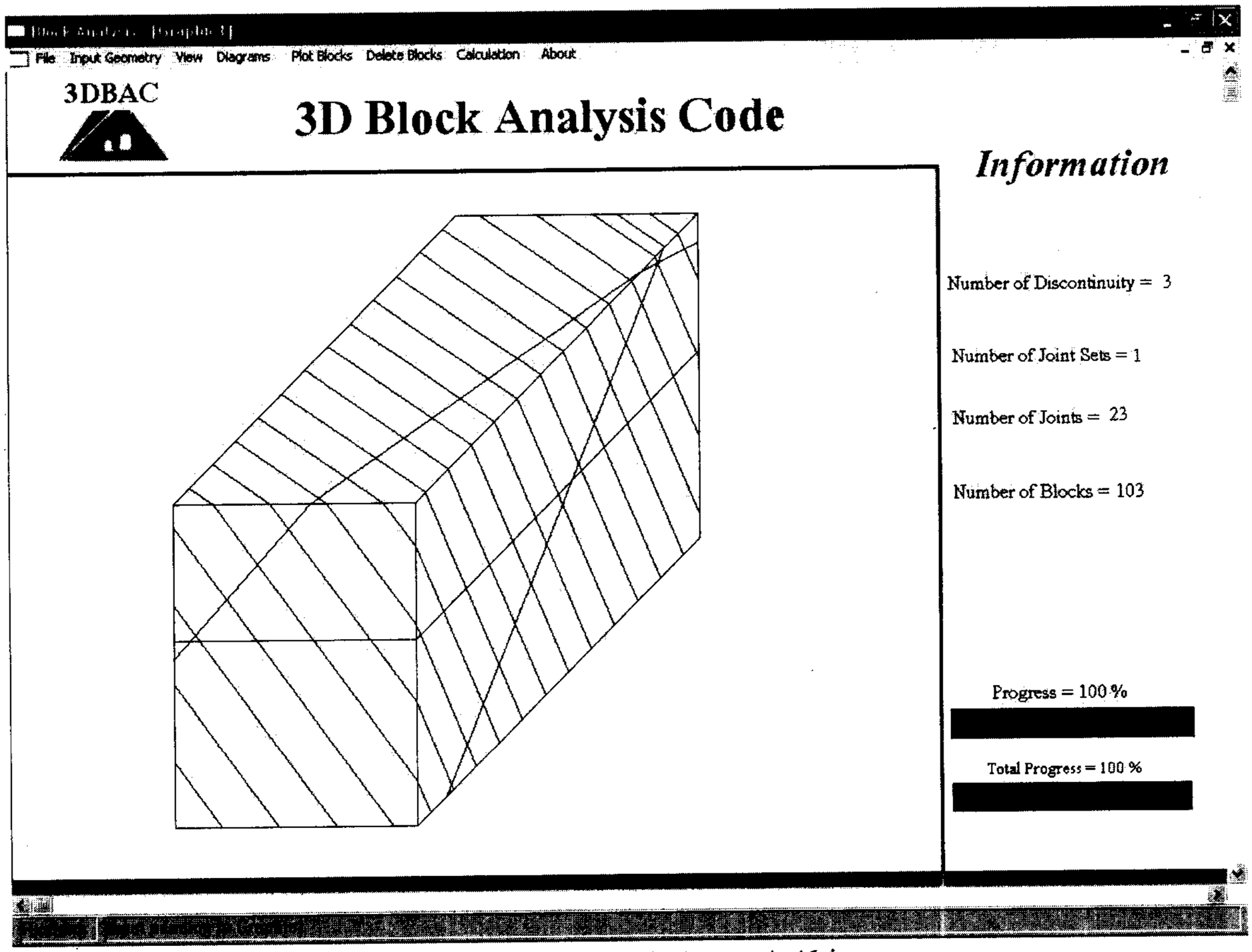
در اثر دسته درزه ها و ناپیوستگی های وارد شده بلوک مکعب مستطیل اولیه به یکسری بلوک با تعداد مختلف وجوه و رئوس تقسیم می گردد. پس از ساخت مدل اولیه، فضای حفاری زیرزمینی (شکل(۹)) یا روباز (شکل(۱۰)) و یا ترکیبی از هر دو (شکل(۱۱)) در آن ایجاد گردیده و بلوکهای مربوط به آنها ایجاد می گردد.

در هر مرحله از ایجاد بلوکها، می توان نمودار بلوکومتری (فراوانی تجمعی اندازه بلوکها بر حسب تعداد آنها) و هیستوبلوک (هیستوگرام ابعاد بلوکها) را ترسیم نمود. با استفاده از این نمودارها می توان یک راهنمایی برای نگهداری اولیه فضای حفاری شده ارائه نمود.

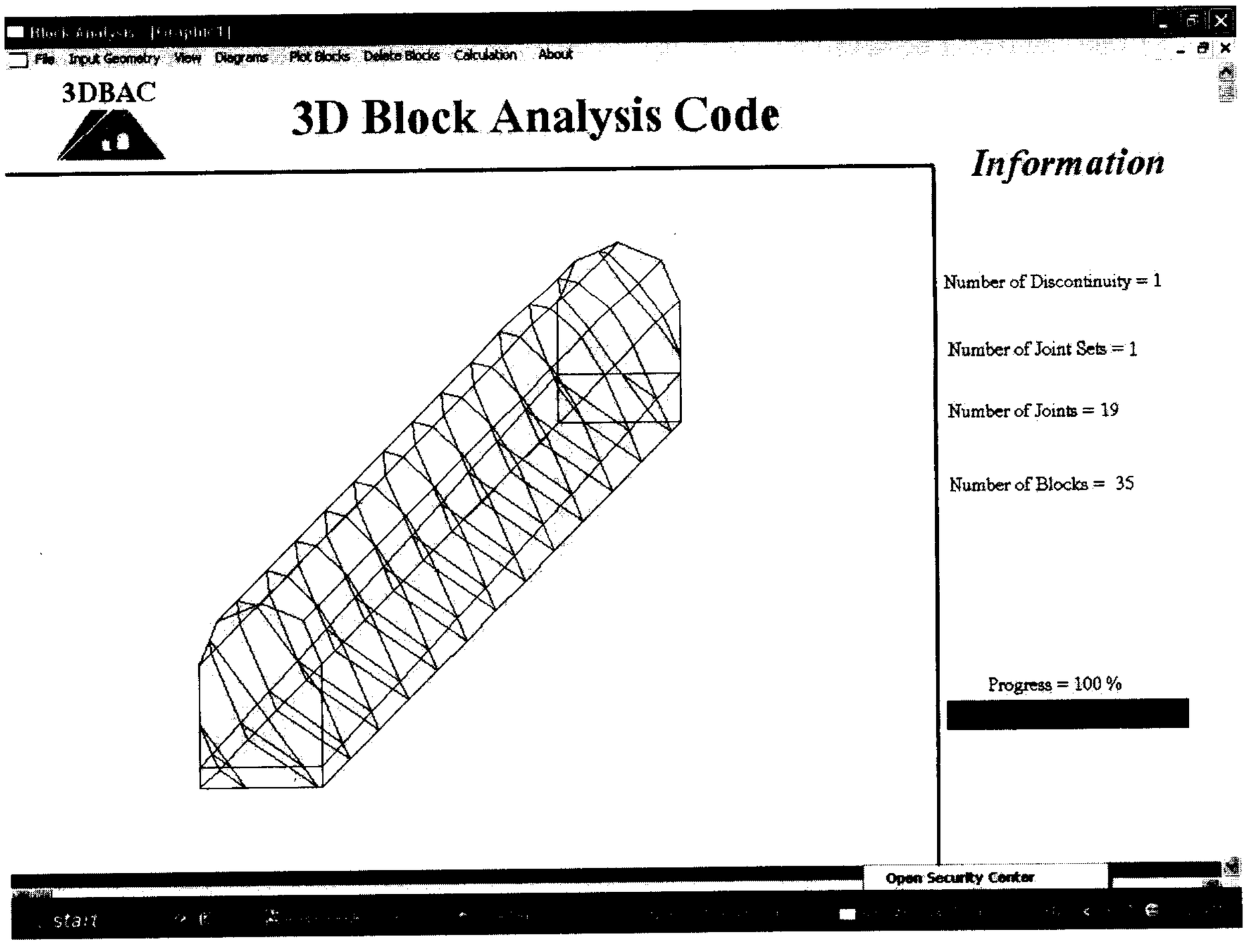
علاوه بر موارد ذکر شده، این نرم افزار قادر است نمایش های سه بعدی متفاوتی از منطقه مدل گردیده به همراه درزه های موجود در آن و نیز بلوکهای ایجاد شده ارایه نموده و نیز آنها را برروی کاغذ چاپ نماید.

جدول ۱ : حالات متفاوت تماس.

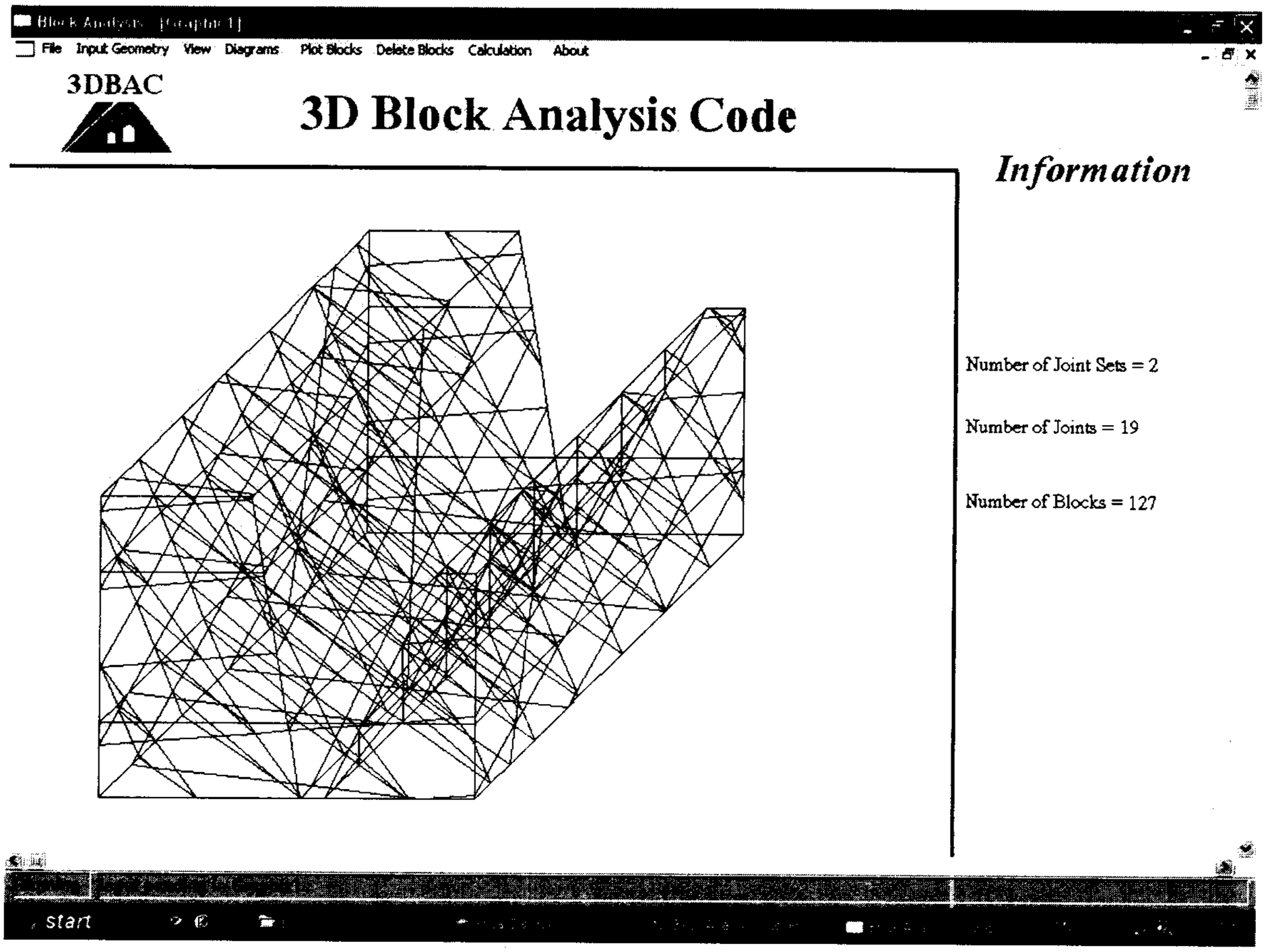
نوع تماس	تعداد رئوس چند ضلعی تماس	تماس	توضیحات
وجه به وجه	≤ ۳	سطح	دو نقطه متعلق به بیش از یک وجه باشند
لبه به وجه	۲	خط	دو نقطه متعلق به بیش از یک وجه باشند
رأس به وجه	۱	نقطه	نقطه از یک لبه باشد
لبه به لبه	۲	خط	دو نقطه روی یک لبه از دو وجه باشند
لبه به لبه	۱	نقطه	نقطه روی دو لبه باشد
رأس به لبه	۱	نقطه	نقطه از یک لبه باشد
رأس به رأس	۱	نقطه	نقطه از دو رأس باشد



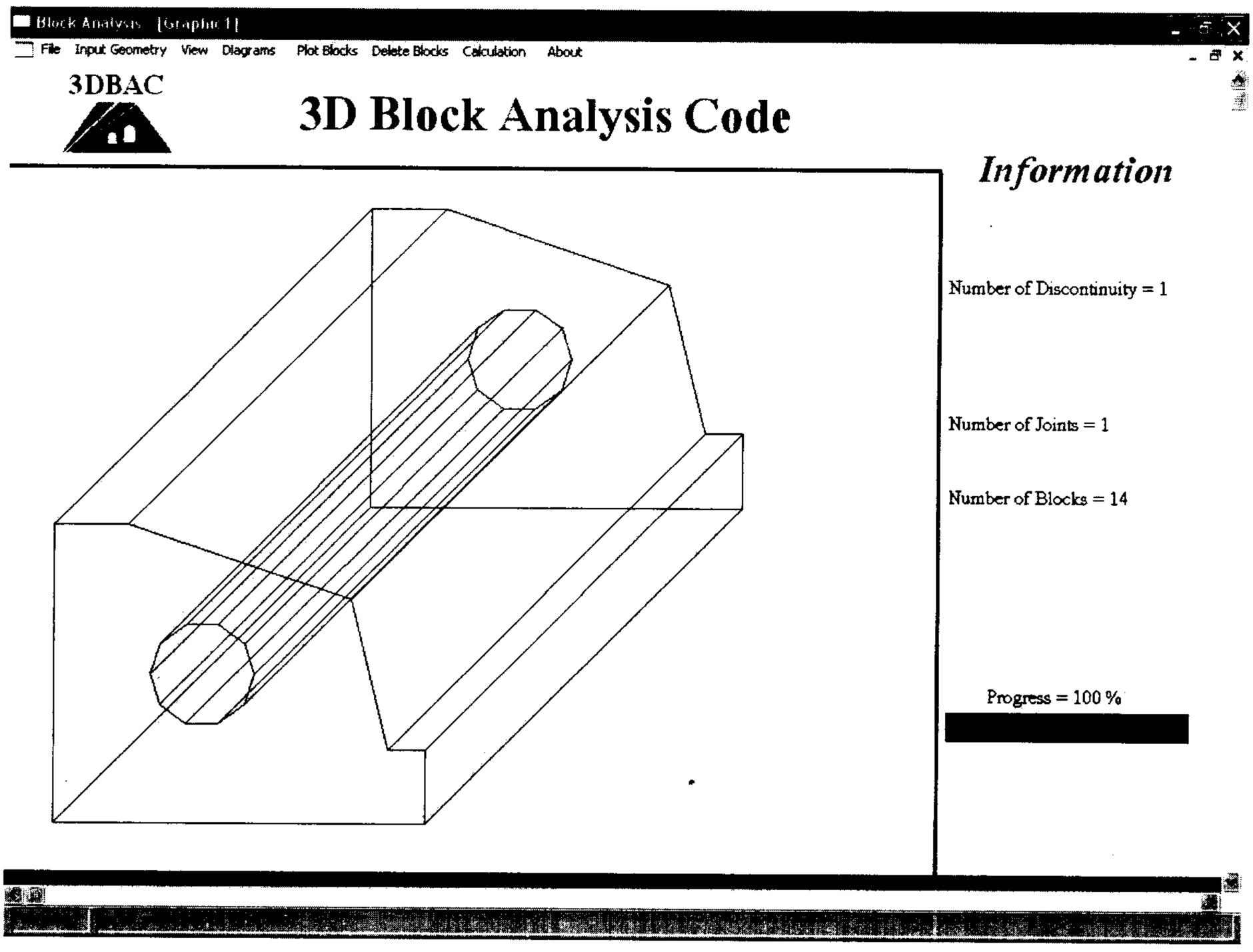
شکل ۸ : نمونه ای از مدل درزه بندی منطقه.



شکل ۹ : نمونه ای از مدل حفاری زیرزمینی.



شکل ۱۰ : نمونه ای از مدل حفاری روباز.



شکل ۱۱: نمونه ای از مدل حفاری روباز- زیرزمینی.

از ویژگیهای این نرم افزار این است که برای حفاری زیرزمینی می توان از مقاطع پیش فرض آماده (اشکال مستطیل، چندضلعی، دایره، بیضی و نعل اسبی) استفاده نمود.

همچنین این برنامه می تواند در هر مرحله از کار اطلاعات وارد شده را درون یک فایل ذخیره نموده و یا از یک فایل اطلاعاتی مورد بازخوانی قرار دهد. همچنین از نظر دریافت تعداد ناپیوستگی محدودیتی وجود نداشته و تا جایی که حافظه و سرعت کامپیوتر مورد استفاده اجازه دهد می تواند درزه و دسته درزه مدل نماید. از محدودیت های این برنامه در نظر گرفتن ناپیوستگی ها به صورت صفحاتی ممتد با ابعاد بی نهایت و نیز امکان حفاری از یک طرف مدل می باشد.

مقایسه با نرم افزارهای مشابه

همانطور که قبلاً ذکر شد معروف ترین برنامه برای تحلیل سه بعدی محیطهای ناپیوسته نرم افزار 3DEC [۸] می باشد. در مقایسه با این نرم افزار برنامه تهیه شده کاملا تحت ویندوز بوده، دارای گرافیک مطلوب می باشد و می تواند اطلاعات ورودی را به ساده ترین حالت ممکن بدون نیاز به کدنویسی و با استفاده از منوهای موجود دریافت کرده و نتایج را نمایش دهد. این در حالی است که در هنگام کار با نرم افزار 3DEC برای انجام هر کاری باید دستورات مربوطه را تایپ نمود. علاوه بر آن، نرم افزار قادر است با ترسیم نمودارهای بلوکومتری و هیستوبلوک، تحلیل آماری از بلوکهای موجود در منطقه ارائه دهد که 3DEC فاقد آن است. و نیز در قسمت های مختلف مدل نمودن یک مسأله، برای آگاهی کاربر، نمایش گرافیکی و نوشتاری از میزان پیشرفت کار در هر مرحله از عملیات نمایش داده می شود. فرآیند تشخیص تماس که در نرم افزار 3DEC به کار رفته است دارای دو مرحله می باشد: مرتب نمودن بلوکها و یافتن تماس واقعی آنها. مرتب نمودن بلوکها با تعریف سلولهایی با ابعاد مشخص و در نظر گرفتن بلوکهای موجود در هر سلول انجام می گیرد[۸]. در این مرحله بلوکهای همسایه شناسایی می شوند. برخلاف الگوریتم ارائه شده در این مقاله، در 3DEC تشخیص تماس مستقیماً روی دو بلوک همسایه انجام نمی پذیرد، بلکه یک صفحه فرضی به نام "Common Plane" بین بلوکها در نظر گرفته می شود که قطع رئوس و یا یالهای هر جفت بلوک همسایه با این صفحه فرضی سطح تماس را مشخص می نماید. مکان و امتداد این صفحه تماس توسط یک الگوریتم تکرار شونده که حجم زیادی محاسبات نیاز دارد به دست می آید. موقعیت هر صفحه فرضی در هر مرحله از حرکت بلوکها باید به روز شود، اما طبق روش ارائه شده در این مقاله، منطقه تماس به طور مستقیم به دست آمده و نیازی به صفحه فرضی و در نتیجه محاسبات وقت گیر و اضافی آن نمی باشد. در روش به کار رفته نسبت به روش جدید ارائه شده توسط Liu, Lemos (2001) برای افزایش سرعت اصلاحات زیر صورت گرفته است:

الف. به جای اینکه برای هر وجه از هر جفت بلوک همسایه یک محور مختصات محلی در نظر گرفته شود تمام محاسبات نسبت به یک محور مختصات انجام می پذیرد که باعث افزایش قابل توجه سرعت محاسبات می شود.

ب. در مرحله یافتن صفحات روبروی دارای تماس واقعی به جای اینکه تمام وجوه روبرو کنترل شوند، تنها وجوه روبرویی مورد بررسی قرار می گیرند که نه تنها فاصله کمی با هم داشته باشند، بلکه لااقل تصویر یکی از رئوس آنها داخل چندضلعی وجه روبرو قرار گرفته و یا اینکه یکی از اضلاع آن چند ضلعی وجوه روبرو را قطع کند، در این صورت بسیاری از صفحاتی که فاصله کمی با هم دارند اما با هم در تماس نیستند از چرخه محاسبات حذف می شوند.

ج. پس از یافتن صفحات مجاوری که دارای تماس واقعی با هم هستند به جای اینکه تمام نقاط آنها بر وجه روبرو تصویر شده و چندضلعی تماس به دست آید و بعد از آن نقاطی که در فاصله کمی از وجه مورد نظر قرار ندارند حذف شوند، از ابتدا تنها نقاطی که در محدوده قرار داشتند تصویر می شوند و چندضلعی تماس به دست می آید. بدین صورت خیلی از محاسبات اضافی حذف می شوند.

خلاصه و نتیجه گیری

در این مقاله، مدلسازی سه بعدی حفریات در محیطهای سنگی ناپیوسته به همراه روش نوینی برای تعیین نوع تماس بلوکها که به عنوان پیش پردازنده روش های تحلیل محیطهای ناپیوسته به کار می روند ارائه

شده است. در حالتی که تعداد بلوکها کم باشد، می توان به صورت دستی اطلاعات مورد نیاز برای هر بلوک را وارد کامپیوتر نمود ولی در حالتی که تعداد بلوکها بسیار زیاد باشد، این کار بسیار مشکل و یا غیر ممکن است، مخصوصاً اگر نیاز باشد بلوکهای تشکیل شده از تقاطع تعداد زیادی صفحه را به دست آوریم، از این رو باید برای ایجاد بلوکهای بوجود آمده در اثر تقاطع صفحات ناپیوستگی الگوریتمی یافت که بتواند هر بلوک را به همراه مشخصات مورد نیاز آن مشخص نماید. در الگوریتم به کار رفته برای تشکیل سیستم بلوکی تک تک صفحات ناپیوستگی ها با بلوکهای موجود قطع داده شده و رئوس و وجوه مربوط به بلوکهای جدید محاسبه می شوند. به دلیل زمان بر بودن تشخیص تماس در تحلیل عددی محیطهای ناپیوسته باید از بهترین الگوریتم ممکن استفاده شود.

به طور کلی تشخیص تماس به دو بخش اصلی تقسیم می گردد:

۱- مشخص نمودن جفت بلوکی که احتمال تماس با هم دارند.

۲- به دست آوردن نوع تماس واقعی بین این دو جفت بلوک.

با استفاده از الگوریتم به کار رفته هفت حالت ممکن تماس (شامل وجه به وجه، لبه به وجه، رأس به وجه، لبه به لبه (دوحالت)، رأس به لبه، رأس به رأس) را می توان تشخیص داد. روش به کار رفته برای تشخیص تماس نسبت به روش های موجود، ساده تر بوده و به دلیل اینکه محاسبات به طور مستقیم بر روی بلوکها انجام می گیرد زمان کمتری را برای انجام، نیاز دارد.

تقدیر و تشکر

از دانشکده فنی و قطب علمی گروه مهندسی معدن برای پشتیبانی این تحقیق تشکر می شود.

مراجع

1 - Goodman, R. E. (1989). *Introduction to rock mechanics.* Wiley, New York.

2 - Goodman, R. E. and Shi, G. H. (1985). *Block theory and its application to rock engineering.* Prentice-Hall Englewood Cliff, New Jersey

3 - Jing, L. and Hudson, J. A. (2002). "Numerical methods in rock mechanics." *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,* Vol. 39, PP. 409-427.

4 - Sharma, V. M., Saxena, K. R. and Woods, R. D. (EDs) (1999). *Distinct element modeling in geomechanics.* A. A. Balkema.

5 - Maclaughlin, M. and Tinucer, J. P. (2001). "Introduction to DDA." *Short course notes, DC Rocks 2001 38th U.S. Rock Mechanics Symposium,* Washington D.C.

6 - Lin, M. C. (1993). *Efficient collision detection for animation and robotics.* PhD. Thesis, University of California Berkeley

7 - Gottschalk, S. (2000). *Collision queries using oriented boundary boxes.* PhD. Thesis, University of California Berkeley.

8 - *Manual of 3DEC,* Version 2.0, Itasca Co., (1999)

9 - Pande, G. N., Beer, G. and Williams, J. R. (1990). *Numerical Methods in Rock Mechanics.* John Wiley & Sons LTD.

10 - Liu, X. L. and Lemos, J. V. (2001). "Procedure for contact detection in discrete element analysis." *Advances in Engineering Software*, Vol. 32, PP. 409-415.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Pre-Processor
2 - Distinct element Method
3 - Discontinuous deformation analysis
4 - Block Theory
5 - Goodman
6 - Discrete element Method
7 - Cundall
8 - Explicit
9 - Implicit
10 - Shi