

بنام خدا

معرفی نرم افزار FLAC 2D و مدل سازی مسئله

مقدمه

در این بخش ابتدا نرم افزار FLAC معرفی می گردد. مزایا محدودیت ها و روش کار با آن به طور خلاصه توضیح داده می شود و در ادامه توضیحاتی در مورد روش مدل سازی در آن داده می شود. یکی از روش های مطالعه و بررسی عملکرد رفتار استاتیکی و دینامیکی سازه های خاکی و سنگی استفاده از روش های عددی می باشد. در گذشته محققان ترجیح می دادند از مدل های آزمایشگاهی و روش های تحلیلی استفاده نمایند، ولی با گسترش روش های عددی و استفاده از رایانه ها با قدرت پردازش بالا، کاربرد روش های عددی در حل مسائل ژئوتکنیکی از جمله تحلیل پاسخ دینامیکی سازه های خاکی، در سال های اخیر توسعه زیادی یافته است. به عبارت دیگر، امروزه روش های عددی جزء فراگیرترین و پرکاربردترین روش ها در ژئوتکنیک می باشند که با استفاده از این روش ها می توان جزئیات تنش و تغییر شکل را در نقاط مختلف یک مدل تعیین کرد. از جمله این روش های عددی به روش اجزاء ضمنی^۱ و روش تفاضل محدود صریح^۲ اشاره کرد. FLAC برنامه تفاضل محدود است که برای کاربردهای ژئوتکنیک گسترش یافته است. این نرم افزار توسط شرکت Itasca در سال ۱۹۸۶ به بازار آمد.

^۱ Implicit

^۲ Explicit

نرم افزار FLAC^۱ که دارای قابلیت‌های فراوان از جمله در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه، محاسبه تغییر شکل‌های بزرگ، مدل‌های رفتاری مختلف خاک، در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ای، می‌باشد. FLAC بسته نرم افزار بر مبنای روش تفاضل محدود است که می‌تواند برای شبیه سازی رفتار سازه‌های خاکی، سنگی و یا موارد دیگری که در زمان تسلیم ممکن است به حالت پلاستیک برسند، مورد استفاده قرار گیرد. محیط و مصالح مورد نظر به وسیله المان‌هایی که با هم یک شبکه را تشکیل می‌دهند، ایجاد و شبیه سازی می‌شود. هر المان تحت نیروهای اعمال شده و شرایط مرزی مسئله و با توجه به مدل رفتاری در نظر گرفته شده، ممکن است دارای رفتار تنش- کرنش خطی و یا غیرخطی باشد و مصالح می‌توانند به سطح تسلیم رسیده و پلاستیک شوند و نیز شبکه المان می‌تواند تغییر شکل دهد. از آنجایی که تحلیل در این نرم افزار بر مبنای روش آنالیز لاگرانژی^۲ انجام می‌شود شرایط پلاستیک و ناپایداری می‌تواند با دقت زیادی مدل شود.

¹ Fast Lagrangian Analysis of Continua

² Lagrangian

معرفی نرم افزار FLAC

نرم افزار FLAC که برگرفته شده از عبارت Fast Lagrangian Analysis of Continua است که تحلیل لاگرانژی محیط پیوسته را به کمک روش تفاضل محدود انجام می دهد. این نرم افزار رفتار سازه های ساخته شده در خاک، سنگ و دیگر مواردی که وقتی به نهایت تسلیم رسیده و رفتار پلاستیک از خود نشان می دهند را مدل می کند. مواد به وسیله المان هایی داخل یک شبکه که به وسیله کاربر جهت ساخته شده اشکال مورد نظر اصلاح گردیده است، نشان داده می شوند. هر المان در مقابل نیروها و محدودیت های اعمال شده مطابق با یک قانون تنش- کرنش خطی یا غیر خطی رفتار می کند. مواد قابلیت تسلیم و جریان یافتگی را دارند و نقاط شبکه در حد کرنش زیاد می توانند حرکت کنند و یا جابجا گردند. FLAC توانایی زیادی را برای حل مسائل پیچیده در علم مکانیک و به طور خاص در علم ژئومکانیک فراهم می آورد. این برنامه دارای ۱۱ مدل رفتاری (مدل null، سه مدل الاستیک و هفت مدل پلاستیک) برای مصالح مختلف می باشد.

هر زون در FLAC ممکن است دارای مدل رفتاری و خصوصیات مختلفی باشد و یک گرادیان پیوسته یا توزیع استاتیکی در هر یک از خصوصیات ممکن است مشخص گردد. بعلاوه یک فصل مشترک یا سطح لغزش برای مشخص کردن سطوح مجزا بین دو یا چند بخش از شبکه^۱ وجود دارد. فصل مشترک، صفحاتی هستند که لغزش و یا جدایش در این صفحات امکان پذیر است که به وسیله آن ها می توان گسل ها و درزه ها را نمایش داد.

برای هر مدل در FLAC که مصالح آن از مدل رفتاری موهر- کلمب تبعیت می کنند، ضریب اطمینان به طور خودکار محاسبه می شود. محاسبه بر مبنای روش کاهش مقاومت می باشد که مجموعه ای از مدل سازی ها را با تغییر در خصوصیات مقاومتی به منظور تعیین شرایطی که در آن ناپایداری رخ می دهد، انجام می دهد. ضریب اطمینان متناظر با نقطه ناپایدار به دست می آید و سطح شکست بحرانی در مدل نیز تعیین می گردد. ضمناً این نرم افزار قابلیت به کارگیری و استفاده از برنامه های نوشته شده در محیط (C++) را دارد. همچنین با استفاده از FISH (برنامه نویسی تعریف شده در نرم افزار) می تواند رفتار خاصی را که مدنظر است، مشاهده نمود. برنامه نویسی توسط FISH اصولی دارد که در راهنمای نرم افزار به آن اشاره شده است. محاسبات انجام شده در نرم افزار را می توان تا دقت خاصی (دقت ساده و یا دقت مضاعف) که مدنظر است، محدود کرد که این محدودیت در ورودی نرم افزار توصیف می گردد. در حالت کلی می توان گفت که کار کردن با این نرم افزار به دقت زیادی احتیاج دارد و باید در تعریف گره ها^۲، متصل کردن آن ها، تعریف مدل برای ناحیه های مختلف و سایر الزامات مورد نیاز جهت مدل سازی، دقت کافی به عمل آورد. خروجی این برنامه می تواند شامل موارد مختلفی مانند: تنش^۳، کرنش^۴ المان ها، جابجایی گره ها، نواحی پلاستیک شده، بردارهای جابجایی و ... باشد. در این نرم افزار، برای محاسبه دقیق کرنش های پلاستیک و گسیختگی مصالح از روش لاگرانژ با ناحیه بندی مختلط استفاده شده است.

¹ Grid

² Node

³ Stress

⁴ Strain

همچنین به دلیل اینکه در این نرم افزار هیچ گونه ماتریس سختی تولید نمی گردد، احتیاج به حافظه ی بالا در کامپیوتر نیست به طوری که به عنوان مثال، برای ایجاد یک شبکه با تعداد بیست هزار ناحیه، دو مگا بایت حافظه کافی می باشد.

این نرم افزار هم به صورت تایپ و هم با استفاده از منوهای مختلف قابلیت تولید مدل را دارد ولی با استفاده از حالت تایپ دستور می تواند مدل های پیچیده از لحاظ هندسه و رفتار را تولید و تحلیل نمود. ضمناً این نرم افزار هم در محیط DOS و هم در محیط Windows قابل اجرا می باشد ولی سرعت تحلیل در محیط windows به میزان ۱٪ الی ۱۵٪ بیشتر از سرعت تحلیل در محیط DOS می باشد.

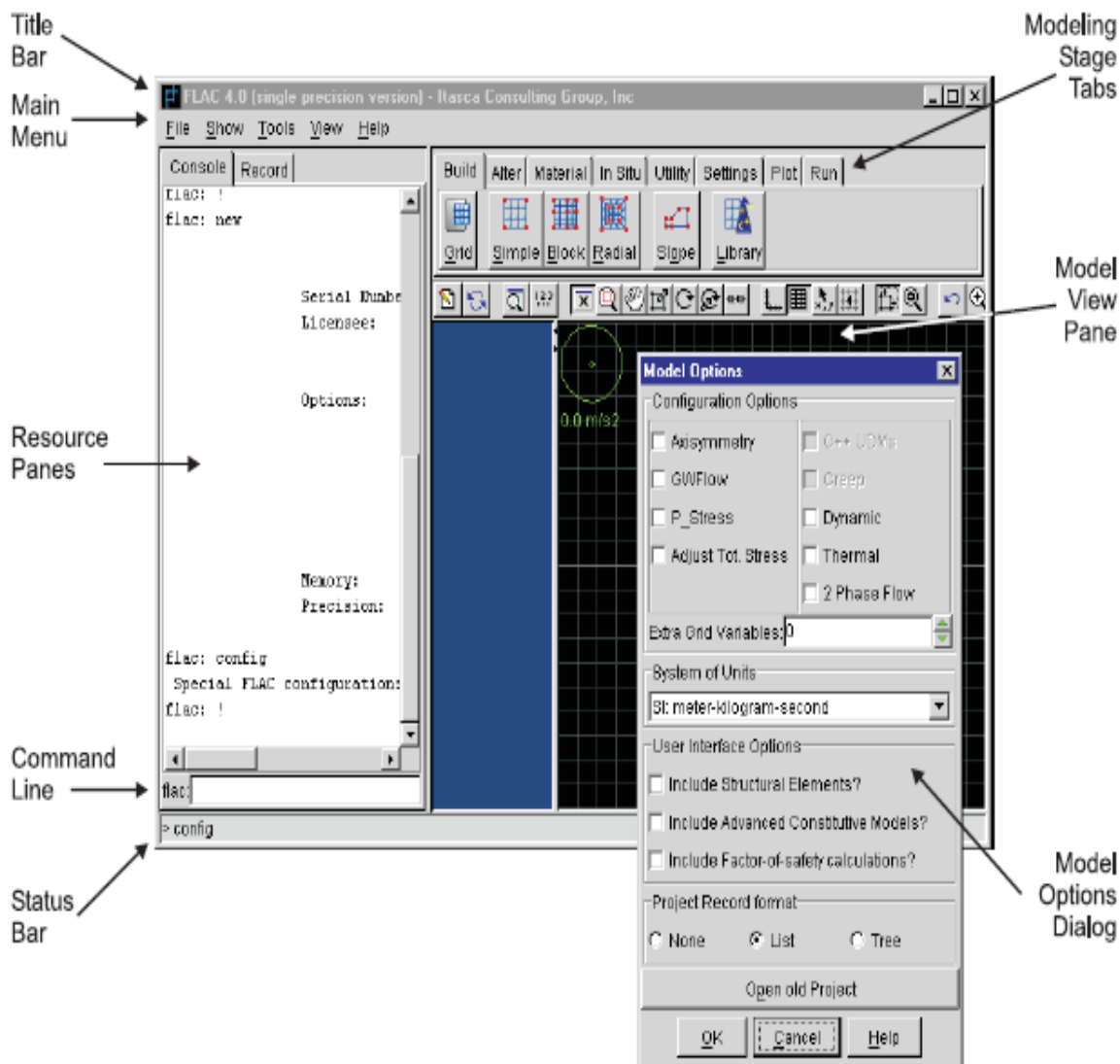
مزایا و معایب نرم افزار FLAC

از جمله قابلیت های شایان توجه نرم افزار FLAC می توان به موارد زیر اشاره کرد:

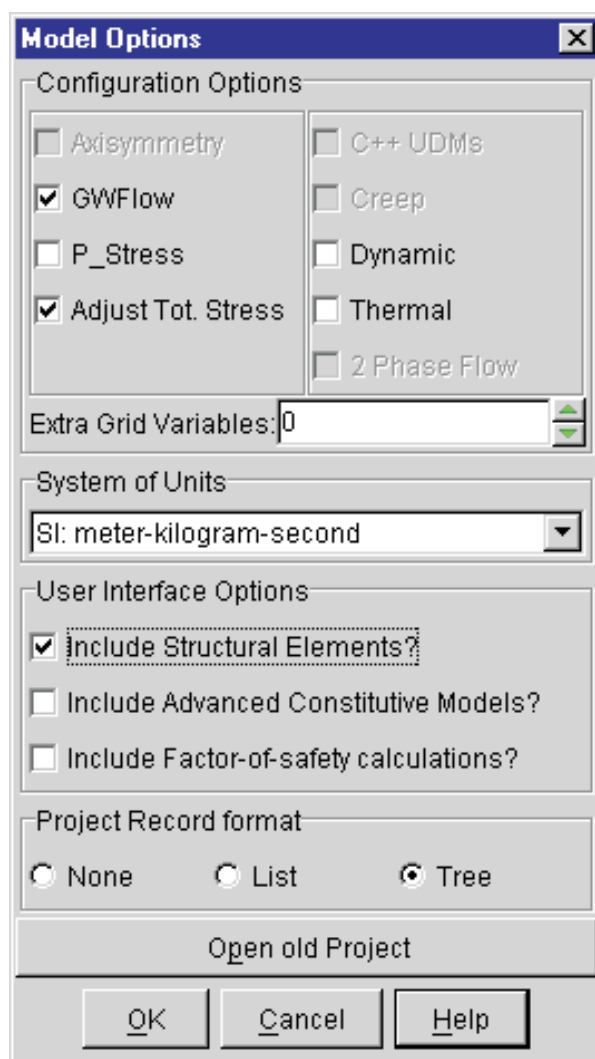
- ۱) توانایی تحلیل دینامیکی مسائل ژئوتکنیکی جهت مدل سازی بارهای هارمونیک، بار زلزله و بار افنجار
 - ۲) مدهای تحلیلی کرنش صفحه ای، تنش صفحه ای و تقارن محوری
 - ۳) توانایی مدل سازی جریان آب زیرزمینی و تحکیم در خاک
 - ۴) توانایی مدل سازی المان های سازه ای برای شبیه سازی حائل های تونل، سیستم های میخ کوبی، دیوارهای دیافراگمی، راک بولت ها، شمع ها، ریزشمع ها و غیره
 - ۵) قابلیت مدل سازی المان های سطح مشترک که از طریق آن می توان صفحات لغزش یافته، درزه ها، لایه های خاک و اندرکنش خاک و سازه را به دقت شبیه سازی نمود.
 - ۶) توانایی مدل سازی ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک (خزش)
 - ۷) توانایی مدل سازی حرارتی و نیز مدل سازی همزمان مدل های حرارتی و تنش مکانیکی و فشار آب منفذی
 - ۸) توانایی مدل سازی جریان دو فازه برای شبیه سازی جریان های دو فازه در محیط های متخلخل
 - ۹) قابلیت اضافه نمودن مدل هایی که با استفاده از زبان برنامه نویسی FISH نوشته می شود.
- از جمله معایب این نرم افزار می توان به طولانی بودن محاسبات دینامیکی و طولانی شدن روند حل مسائلی که در ارتباط با جریان آب و فرآیند تحکیم است، اشاره کرد.

روند مدل سازی در نرم افزار FLAC

پس از ورود به محیط نرم‌افزاری برنامه FLAC، می‌توان کار با نرم‌افزار را آغاز نمود. به محض ورود به نرم افزار پنجره زیر ظاهر می‌گردد.



شکل (۱) پنجره تنظیمات مدل و پنجره گرافیکی FLAC



شکل (۲) تنظیمات مدل در صورت وجود آب زیرزمینی

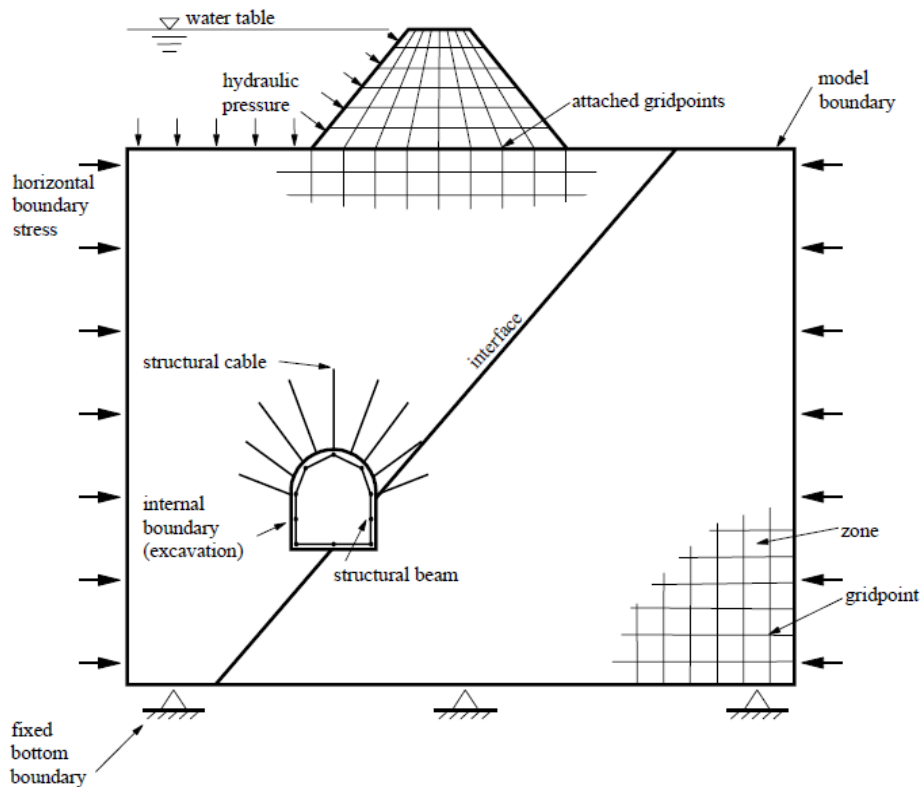
برای درج کدهای دستوری در زیر منوی اصلی گزینه Record انتخاب شده و در صفحه دستوری کدهای مورد نظر درج می‌شود. برای اجرا کردن کدهای نوشته شده در نرم‌افزار گزینه Rebuild انتخاب می‌شود. شکل هندسی مدل در صفحه نمایش (Model view Plan) قابل مشاهده است. در این صفحه همچنین می‌توان نمودارها و اشکال مختلف از مدل ساخته شده را مشاهده کرد. در قسمت Consol کدهای هم‌ارز با کدهای نوشته شده در FLAC درج می‌شود. در این پنجره همچنین می‌توان داده‌های رقومی نیز از نتایج مدل‌سازی استخراج کرد. زیرمجموعه کلید Build شامل کلیدهایی است که با استفاده از آن می‌توان شکل هندسی مدل و شبکه زون‌بندی را ایجاد کرد. زیرمجموعه کلید Alter مربوط به کلیدهایی است که تغییراتی مانند ایجاد سطوح مشترک در مدل از طریق گزینه‌های آن اعمال می‌شود. در قسمت Material، نوع مدل رفتاری و ویژگی مصالح معرفی می‌شوند. گزینه In Situ مربوط به اعمال شرایط اولیه و مرزی به مدل است. گزینه Utility تسهیلاتی را به کاربر ارائه می‌دهد تا از طریق آن بتوان خروجی‌های مورد نظر را دریافت.

گزینه Setting جهت تنظیم برخی پارامترها مانند شتاب گرانش زمین کاربرد دارد. گزینه Plot امکان استخراج اشکال هندسی مدل و نتایج تحلیل را فراهم می‌کند. نهایتاً گزینه Run مربوط به تنظیماتی خاص جهت تحلیل مدل می‌باشد.

در بالای قسمت Model View Plane، یک نوار ابزار وجود دارد که با استفاده از آن می‌توان تنظیماتی از قبیل بزرگ و کوچک کردن مدل، جابجایی مدل و ... را ایجاد کرد. این کلیدها تقریباً مشابه کلیدهای به کار رفته در نرم‌افزارهای مهندسی دیگر بوده و می‌توان با نگه داشتن نشانگر موس بر روی آن، کار کرد کلید مذکور را مشاهده کرد. عملکردهای مربوط به این کلیدها را می‌توان در زیر مجموعه قسمت view در منوی اصلی نیز مشاهده کرد. همچنین عملگرهای مربوط به کلیدهای کنترلی را می‌توان در بخش Tools در منوی اصلی مشاهده کرد. در منوی Show و File تنظیمات اولیه پنجره گرافیکی قابل تغییر است. همچنین می‌توان ذخیره‌ی فایل‌ها و کدها را در این قسمت انجام داد.

اصطلاحات فنی

برای کار با برنامه المان محدود FLAC آشنایی کلی با یک سری اصطلاحات فنی ضروری به نظر می‌رسد.



شکل (۲) مثالی از مدل سازی در FLAC

معادل فارسی اصطلاحات موجود در شکل عبارت است از:

Water Table	سطح آب زیرزمینی
Hydraulic Pressure	فشار هیدرولیکی
Attached Grid Points	نقاط گره‌ای متصل شده
Model Boundary	مرز مدل
Horizontal Boudary Stress	تنش مرزی افقی
Interface	سطح مشترک
Structural Cable	المان سازه‌ای کابل
Structural Beam	المان سازه‌ای تیر
Zone	زون (بخش، منطقه)
Grid Point	نقطه گره‌ای (گریدپوینت)
Internal Bouyndary (Excavation)	مرز داخلی
Fixed Bottom Boundary	مرز تحتانی گیردار شده

مراحل گام به گام مدل سازی در نرم افزار FLAC

گام اول - ایجاد شبکه تفاضل محدود

با استفاده از شبکه تفاضل محدود، محیط مورد بررسی مش بندی می شود. هر زون در شبکه تفاضل محدود کوچک ترین بخش از مدل است که FLAC بر روی آن تحلیل های لازم را انجام می دهد. در اکثر مسائل تعداد زون ها (گریدها) می تواند به صدها و یا حتی چند هزار زون برسد.

هر گرید با اختصاص شماره زون در جهت X با علامت i و شماره زون در جهت Y با علامت j آدرس دهی می شود. بنابراین می توان هر یک از زون ها را با یک جفت شماره i و j آدرس دهی کرد. از طرفی چنانچه خطوط تشکلی دهنده شبکه تفاضل محدود گریدلایین خوانده شود، می توان شکل را متشکل از انتشار گرید لایین های قائم در جهت X و گرید لایین های افقی در جهت Y در نظر گرفت.

اولین دستوری که برای تشکیل شبکه تفاضل محدود در FLAC نوشته می شود به صورت زیر است:

`Grid icol jrow`

در این دستور icol تعداد کل ستون ها و jcol تعداد کل ردیف های شبکه زون بندی شده می باشد. کاربر باید جهت تولید شبکه زون بندی شده توجه ویژه ای به تعداد زون ها داشته باشد. هر چه تعداد زون ها در یک شبکه بیشتر بوده و اندازه زون ها ریزتر باشد، دقت مدل سازی بیشتر خواهد بود. ابعاد زون ها با توجه به مدل مورد نظر باید به صورتی باشد که از یک طرف دقت مدل سازی به اندازه کافی بالا بوده و از طرف دیگر سرعت حل نیز به میزان نامطلوب کند نباشد.

برای ارائه شکل هندسی مشخص به شبکه زون بندی از دو دستور زیر استفاده می شود:

`generate`

`initia`

با دستور `Generate` می توان شبکه زون بندی را به شکل هندسی مورد نیاز کاربر درآود.

دستور `initial` می تواند محل نقاط گره ای مختلف را در مختصات X و Y مورد نیاز قرار دهد.

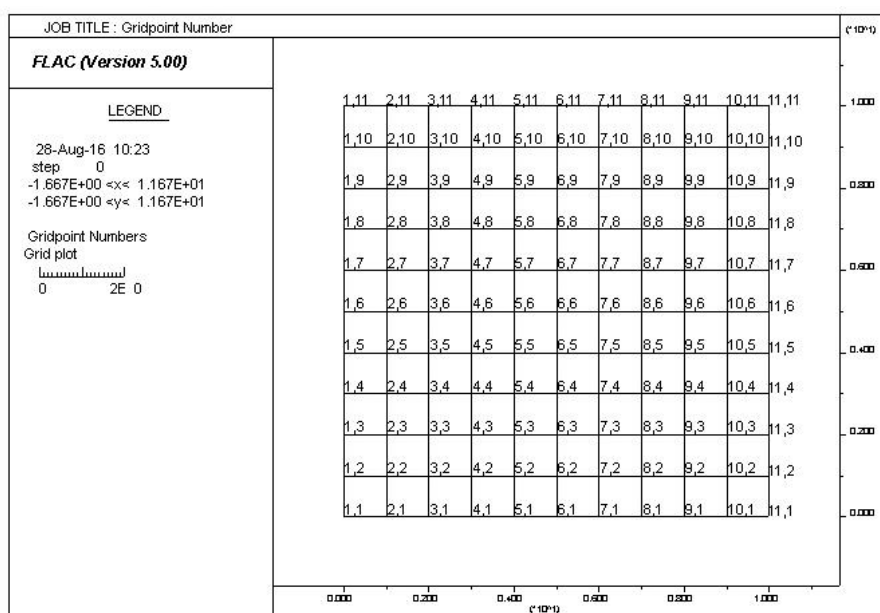
باید توجه داشت برای مشاهده شکل زون بندی دستور `model` باید پس از دستور `grid` درج شود. حال چنان چه ساخت یک مدل هندسی به ابعاد ۱۰ متر افقی و ۱۰ متر قائم مدنظر باشد با استفاده از دستور `generate` این مقادیر قابل مدل سازی خواهد بود:

`Gen 0 0 0 10 10 10 0 i 1 11 j 1 11`

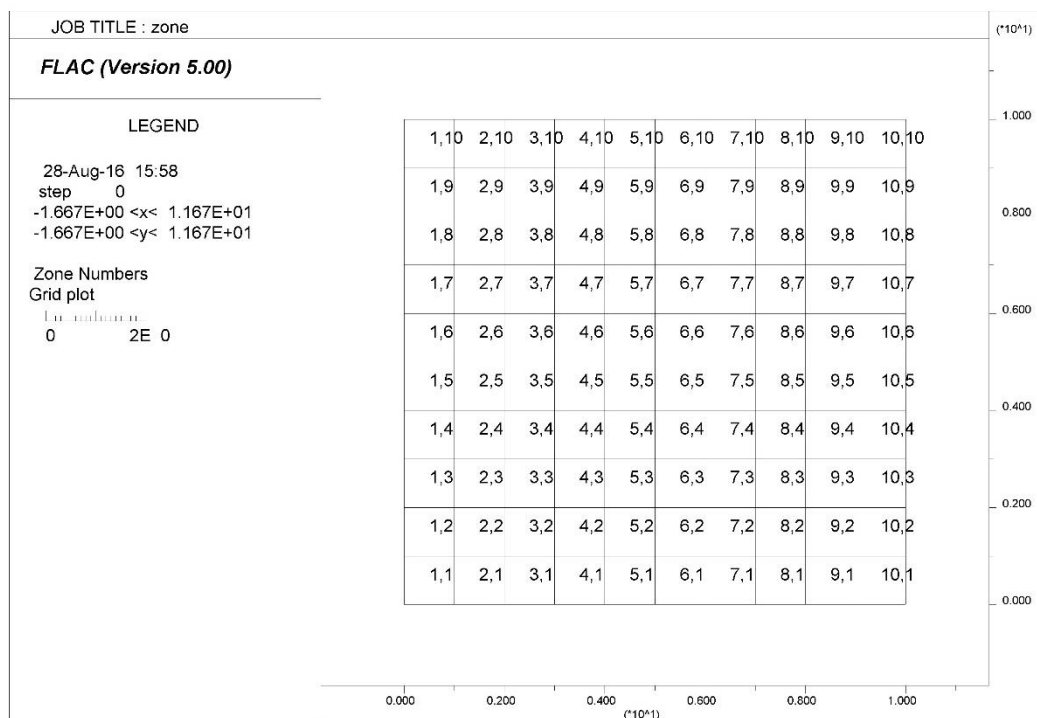
باید توجه داشت جهت معرفی مدل هندسی مختصات رئوس شکل مورد نظر از رأس تحتانی سمت چپ به صورت ساعتگرد معرفی خواهد شد. همچنین با آدرس دهی گریدلایین ها محدوده i و j در ادامه خط دستوری اعمال می شود.

برای مشاهده کانتور زون ها به صورت زیر عمل می کنیم:

`Plot > Model > Geometry > gnum`



شکل (۴) شماره گرید لاین ها



شکل (۵) شماره زون ها

*نکته: در بسیاری از مدل سازی ها جهت کاهش زمان محاسبات، زون هایی که در نواحی مرزی قرار دارند با ابعاد درست مدل شده؛ در حالی که زون هایی که در منطقه مورد مطالعه قرار دارد به صورت ریز مدل سازی می شود تا بتوان دقت مورد نیاز مدل را برآورد نمود.

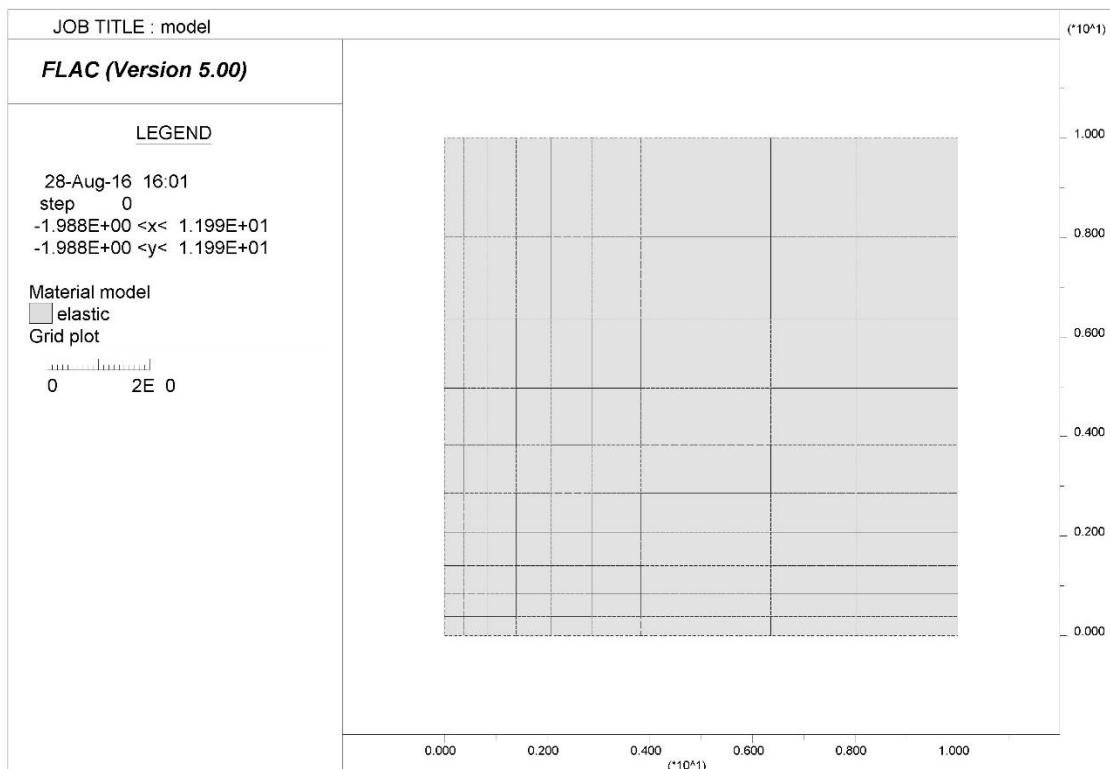
برای برآوردن این شرایط می‌توان از دستور ratio در قسمت معرفی خصوصیات هندسی مدل استفاده نمود.

کد دستوری زیر یک نمونه زون‌بندی با دستور ratio را نشان می‌دهد:

Grid 10 10

M e

Gen 0 0 0 10 10 10 0 rat 1.2 1.2



شکل (۶) دستور ratio برای ریز و درشت نمودن شبکه

همان گونه که مشاهده می‌شود ابعاد هر زون $1/2$ برابر زون قبلی در هر دو جهت X و Y است.

کد m e مخفف عبارت model elastic است.

❖ نکته: چنان چه اندازه ratio بین صفر و یک باشد، ابعاد زون در جهت مثبت محورهای X و Y کاهش

خواهد یافت و اگر بزرگ‌تر از یک باشد، ابعاد زون در جهت مثبت محورهای X و Y افزایش خواهد یافت.

📖 توجه: با دستورهای Generate Circle، Generate arc و Generate line می‌توان به ترتیب

اشکال دایره، کمان و خط مستقیم را در داخل زون‌ها ایجاد کرد.

دستور دیگری که در مدل‌سازی هندسی از آن استفاده می‌شود دستور Initial است. با استفاده از این

دستور می‌توان یک یا چند نقطه گره‌ای را به مختصات جدید منتقل کرد.

گام دوم - اعمال مدل رفتاری

پس از ترسیم شکل هندسی مدل، کاربر ملزم به معرفی مدل رفتاری مصالح به تمام زون‌ها خواهد بود. این عمل با دستور اصلی Property و model انجام می‌شود. مدل‌های معمول برای استفاده در FLAC عبارتند از:

Model Mohr (مخفف m m): مدل رفتاری موهر کولمب

Model elastic (مخفف m e): مدل رفتاری الاستیک همسانگرد

Model Null: دستور متداول جهت حذف زون‌ها در نواحی مورد نیاز مثل حفاری.

جدول (۱) ویژگی‌های مورد نیاز جهت معرفی مدل الاستیک

واحد SI	مخفف		
kg / m^3	d	Density	چگالی
N / m^2 (Pa)	b	Bulk modulus	مدول حجمی
N / m^2	s	Shear Modulus	مدول برشی

مدول بالک و مدول برشی با استفاده از روابط زیر قابل محاسبه است:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad \text{مدول بالک}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{مدول برشی}$$

در این روابط:

K: مدول حجمی (بالک) G: مدول برشی E: مدول الاستیسیته ν : ضریب پواسون

جدول (۲) ویژگی‌های مورد نیاز جهت معرفی مدل موهر کولمب

واحد SI	مخفف		
kg / m^3	d	Density	چگالی
N / m^2 (Pa)	b	Bulk modulus	مدول حجمی
N / m^2	s	Shear Modulus	مدول برشی
درجه	f	Friction angle	زاویه اصطکاک
N / m^2	c	Cohesion	چسبندگی
درجه	di	Dilation angle	زاویه اتساع
Pa	t	Tensile strenght	مقاومت کششی

*نکته: باید توجه داشت بر خلاف آدرس دهی در خط دستوری generate که بر پایه i و j مربوط به گرید لاین‌های مدل است، آدرس دهی در خطوط دستوری model و property با استفاده از i و j های مربوط به زون‌های مدل امکان پذیر است.
کد دستوری زیر مثالی را نشان می دهد که به نیمه تحتانی آن مدل موهر کولمب و نیمه فوقانی آن مدل الاستیک اختصاص داده شده است.

Grid 10 10

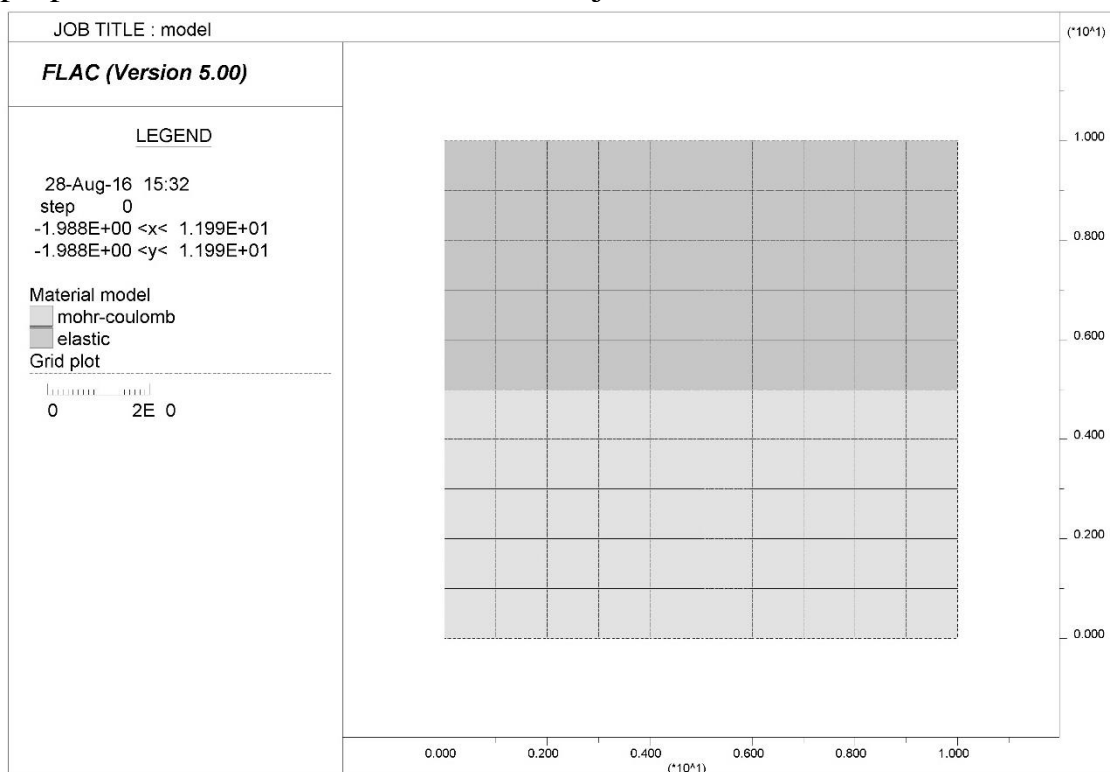
Gen 0 0 0 10 10 10 10 0 i 1 11 j 1 11

Me

prop den=2000 bulk=1e8 shear=0.3e8 i 1 10 j 6 10

m m i 1 10 j 1 5

prop den=2500 bulk 1.5e8 shear=0.6e8 j 1 5



شکل (۷) اختصاص دو مدل رفتاری به یک مدل

گام سوم- اعمال شرایط مرزی و اولیه

پس از اعمال مدل هندسی و مدل رفتاری با استفاده از دستورهای `fix`، `initial`، `apply` و `free` می‌توان شرایط مرزی و اولیه مورد نیاز را به مدل معرفی کرد. در جدول‌های (۱) و (۲) دستورهای مرتبط با اعمال شرایط مرزی و شرایط اولیه مشاهده می‌شود. باید توجه داشت که مشخصات مربوط به شرایط مرزی در طول آنالیز مدل ثابت باقی می‌ماند.

جدول (۳) دستورهای مربوط به شرایط مرزی

دستور	عملکرد
Apply Pressure	اعمال فشار مکانیکی به مرز
Apply sxx	اعمال تانسور تنش XX به مرز
Apply sxy	اعمال تانسور تنش برشی XY به مرز
Apply syy	اعمال تانسور تنش YY به مرز
Apply xforce	اعمال نیرو در جهت محور X به نقاط گره‌ای واقع در مرزها
Apply yforce	اعمال نیرو در جهت محور Y به نقاط گره‌ای واقع در مرزها
Apply xvel	اعمال سرعت در جهت محور X به نقاط گره‌ای واقع در مرزها
Apply yvel	اعمال سرعت در جهت محور Y به نقاط گره‌ای واقع در مرزها
Fix pp	ثابت نگه داشتن فشار آب حفره‌ای (pore pressure) در نقاط گره‌ای واقع در مرزها
Fix x	گیر دار نمودن و به صفر رساندن سرعت در جهت محور X
Fix y	گیر دار نمودن و به صفر رساندن سرعت در جهت محور Y

در اعمال شرایط مرزی به نکات زیر دقت شود:

- ۱- با استفاده از دستور `Free` و زیردستورهای درج شده در قسمت `Fix` می‌توان اثرات اعمال شده با دستور `Fix` را از میان برد.
- ۲- جهت گیردار کردن مرزها از دستور `Fix x` و `Fix y` استفاده می‌شود.

جدول (۴) دستورهای مربوط به شرایط اولیه

دستور	عملکرد
Initial pp	اعمال شرایط اولیه فشار آب حفره‌ای به یک زون
Initial sat	اعمال شرایط اولیه خاک اشباع به یک نقطه گره‌ای
Initial sxx	اعمال شرایط اولیه تانسور تنش XX به یک زون
Initial sxy	اعمال شرایط اولیه تانسور تنش برشی XY به یک زون

Initial syy	اعمال شرایط اولیه تانسور تنش yy به یک زون
Initial szz	اعمال شرایط اولیه تانسور تنش zz به یک زون
Initial xvel	اعمال شرایط اولیه سرعت در جهت X به یک نقطه گره‌ای
Initial yvel	اعمال شرایط اولیه سرعت در جهت Y به یک نقطه گره‌ای
Initial xdis	اعمال شرایط اولیه جابجایی در جهت X به یک نقطه گره‌ای
Initial ydis	اعمال شرایط اولیه جابجایی در جهت Y به یک نقطه گره‌ای

Grid 10 10

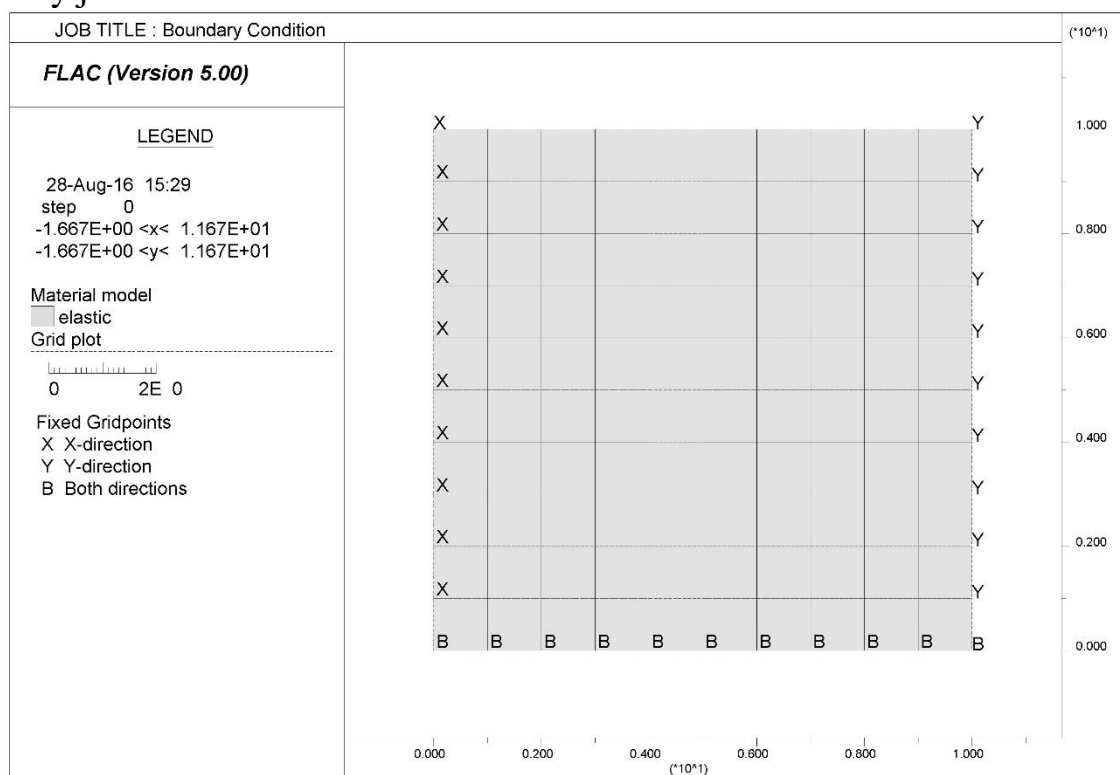
Gen 0 0 0 10 10 10 10 0 i 1 11 j 1 11

Model e

Fix x i=1

Fix y i=11

Fix x y j=1



شکل (۸) اعمال شرایط مرزی به مدل

گام چهارم- تعادل اولیه و تحلیل گام به گام

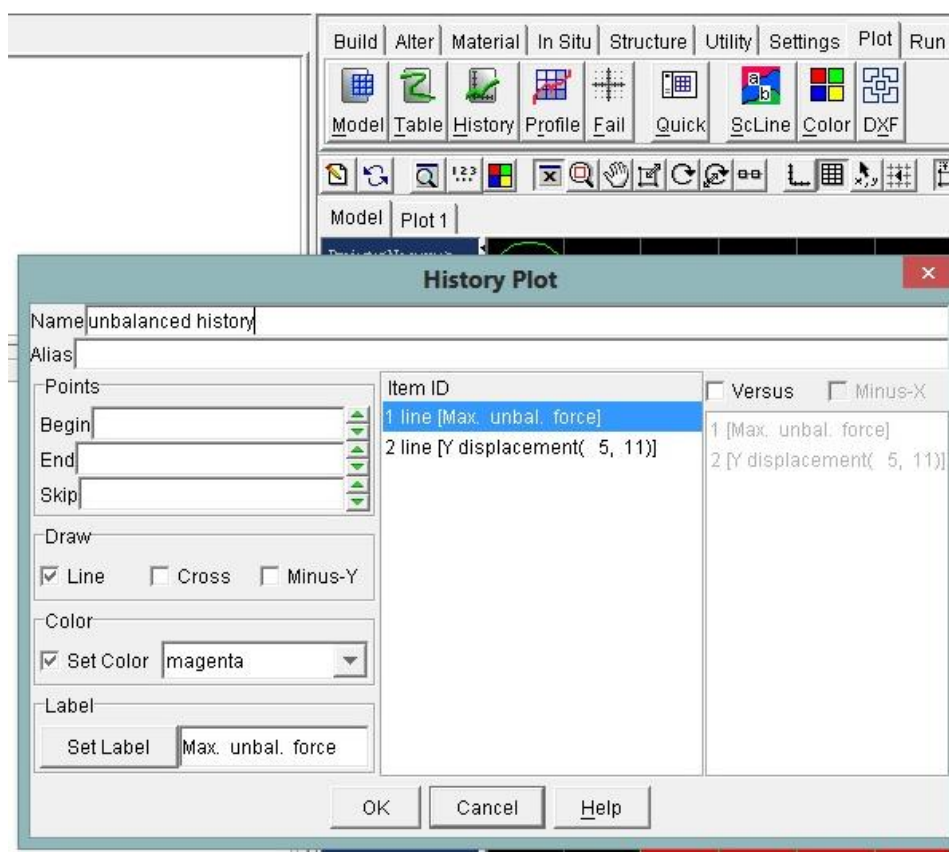
پیش از آن که در داخل مدل، حفاری یا تغییرات دیگر اعمال شود، مدل اصلی باید به یک تعادل اولیه برسد. شرایط مرزی و شرایط اولیه باید طوری به مدل اعمال شود که مدل دقیقاً در تعادل اولیه قرار داشته باشد. در مدل سازی های پیچیده با مصالح گوناگون تعادل اولیه در مدل حتماً باید انجام شود تا مدل به پایداری طبیعی خود برسد و سپس حفاری ها یا خاکریزی های مصنوعی بر آن اعمال گردد. تعادل اولیه را می توان با دستور Step یا Solve ایجاد کرد. چنانچه در مدل گسیختگی روی ندهد، دستور Solve مدل را تا انتها و تا جایی که مدل به تعادل برسد حل می کند. با این حال با دستور Step کاربر می تواند میزان تعادل مورد نظر خود را به مدل معرفی کند.

برای به تعادل رساندن مدل ۴ روش می تواند انجام گردد:

- ۱- مدل رفتاری پلاستیک، اعمال تنش های اولیه و حفاری در همان مرحله
 - ۲- مدل رفتار الاستیک، عدم اعمال تنش های اولیه، به تعادل رساندن مدل سپس صفر نمودن جابجایی ها و اعمال مدل رفتاری پلاستیک
 - ۳- مدل رفتاری پلاستیک با در نظر گیری چسبندگی و مقاومت کششی بالا، عدم اعمال تنش های اولیه، به تعادل رساندن مدل سپس صفر نمودن جابجایی ها و اعمال مقدار واقعی چسبندگی و مقاومت کششی
 - ۴- اعمال مدل رفتاری الاستیک، اعمال تنش های اولیه، به تعادل رساندن مدل سپس صفر نمودن جابجایی ها و اعمال مدل رفتاری پلاستیک
- ❖ نکته: به طور تئوریک یک مدل وقتی به تعادل می رسد که در هر گره از مدل برآیند نیروهای اعمال شده به آن برابر صفر باشد.

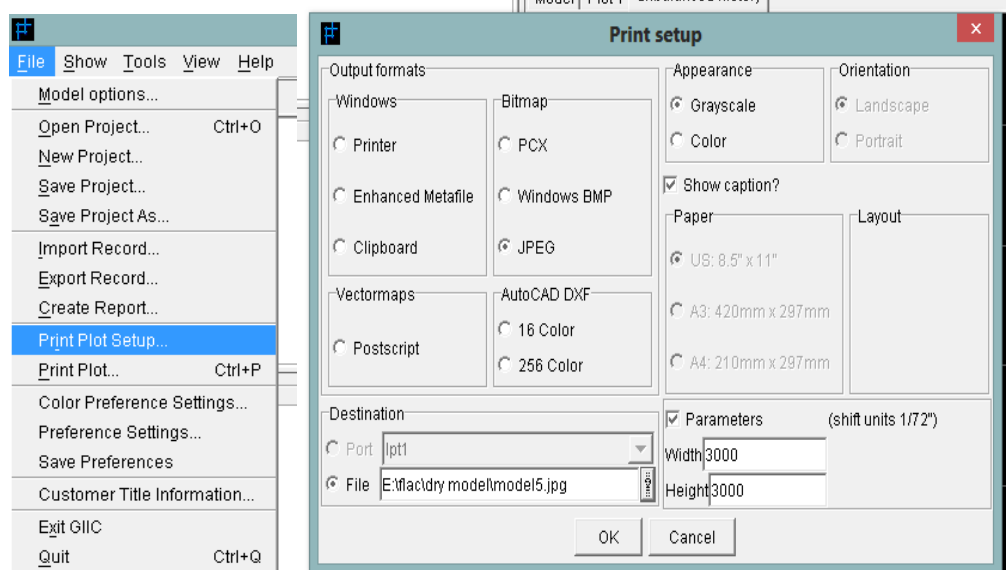
بهترین روش جهت بررسی تعادل حدی یک سیستم، استفاده از دستور history unbalance می باشد. با درج این دستور در فرایند تحلیل، می توان نموداری استخراج نمود که محور قائم آن بیانگر بیشینه نیروی نامتعادل و محور افقی مبین تعداد گام های مورد نیاز برای تحلیل مدل باشد. همچنین می توان از سرعت و جابجایی ایجاد شده در یک نقطه گره ای تاریخچه گرفت تا نحوه جابجایی نقطه در طول فرایند تحلیل مشخص شود.

پس از مدل، در منوی گرافیکی Plot، گزینه history انتخاب شده و در قسمت item ID، گزینه history Unbalance انتخاب می شود.

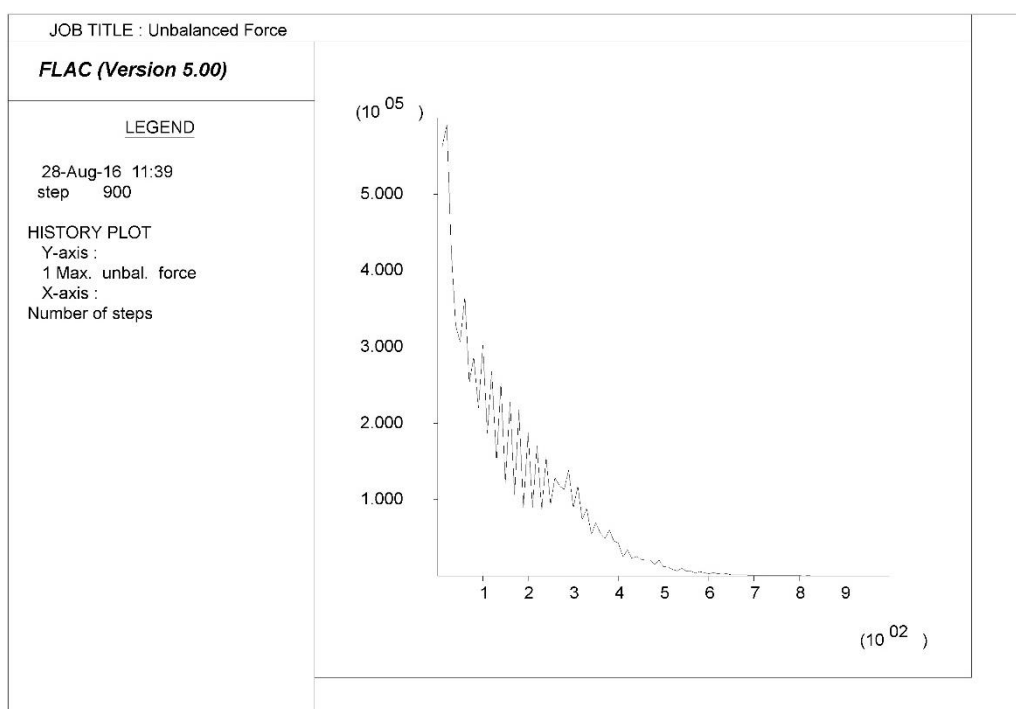


شکل (۹) طریقه خروجی گرفتن برای history

سپس برای خروجی گرفتن از پلاتی که طبق دستور بالا گفته شده به صورت زیر عمل می‌کنیم: وارد منوی file شده Print Plot Setup را انتخاب می‌نماییم. سپس پنجره‌ای باز شده آن را مطابق شکل زیر انتخاب نموده و OK می‌نماییم. File و بعد از آن Print Plot را انتخاب نموده و OK می‌نماییم.



شکل (۱۰) نحوه سیو نمودن خروجی history



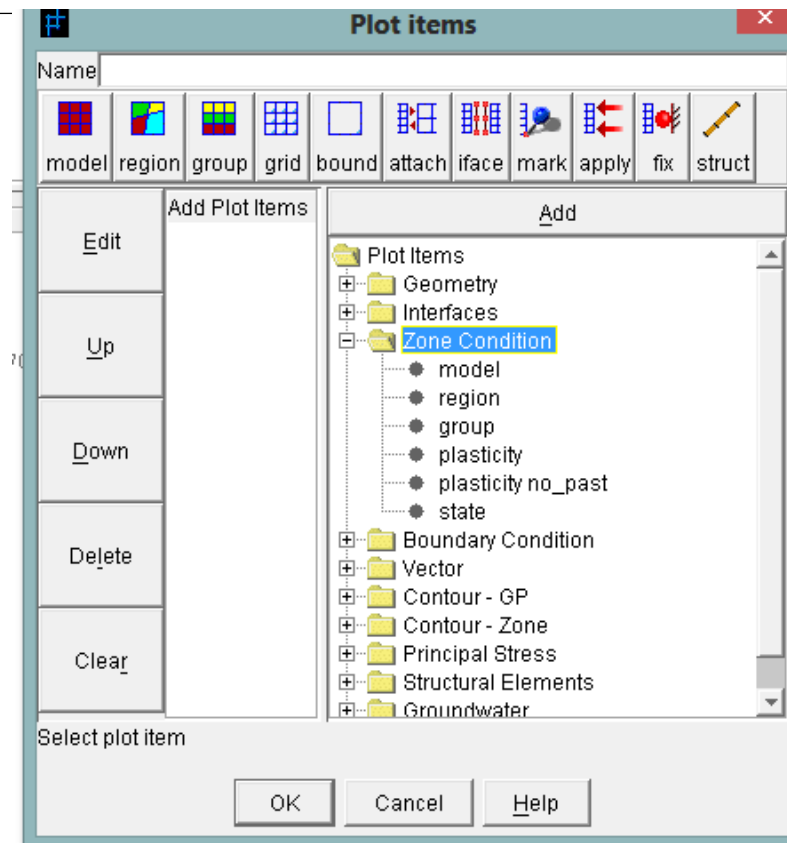
شکل (۱۱) نمودار نیروی نامتعادل کننده

همان گونه که در شکل بالا مشاهده می‌شود، نمودار نیروهای نامتعادل کننده به سمت صفر متمایل شده‌اند و مدل به تعادل اولیه رسیده است.

توجه: نیروهای نامتعادل کننده در حقیقت نیروی کاذبی است که خود نرم‌افزار جهت شروع تحلیل وارد می‌کند که این نیرو با اجرای مدل از بین می‌رود. نمودار نیروهای نامتعادل کننده که با گذر زمان به صفر می‌رسد.

همچنین برای کنترل دیگر موارد از جمله کانتور نقاط پلاستیک به صورت زیر عمل می‌شود:

Plot > Model > Zone condition > Plasticity



شکل (۱۲) نحوه خروجی گرفتن از پلات نقاط پلاستیک

گام پنجم - اعمال سربار و بار وارده به مدل

برای اعمال بار گذاری در نرم افزار FLAC از دستور apply استفاده می گردد و کد دستوری آن به صورت زیر می باشد:

Apply press 40000 j 51

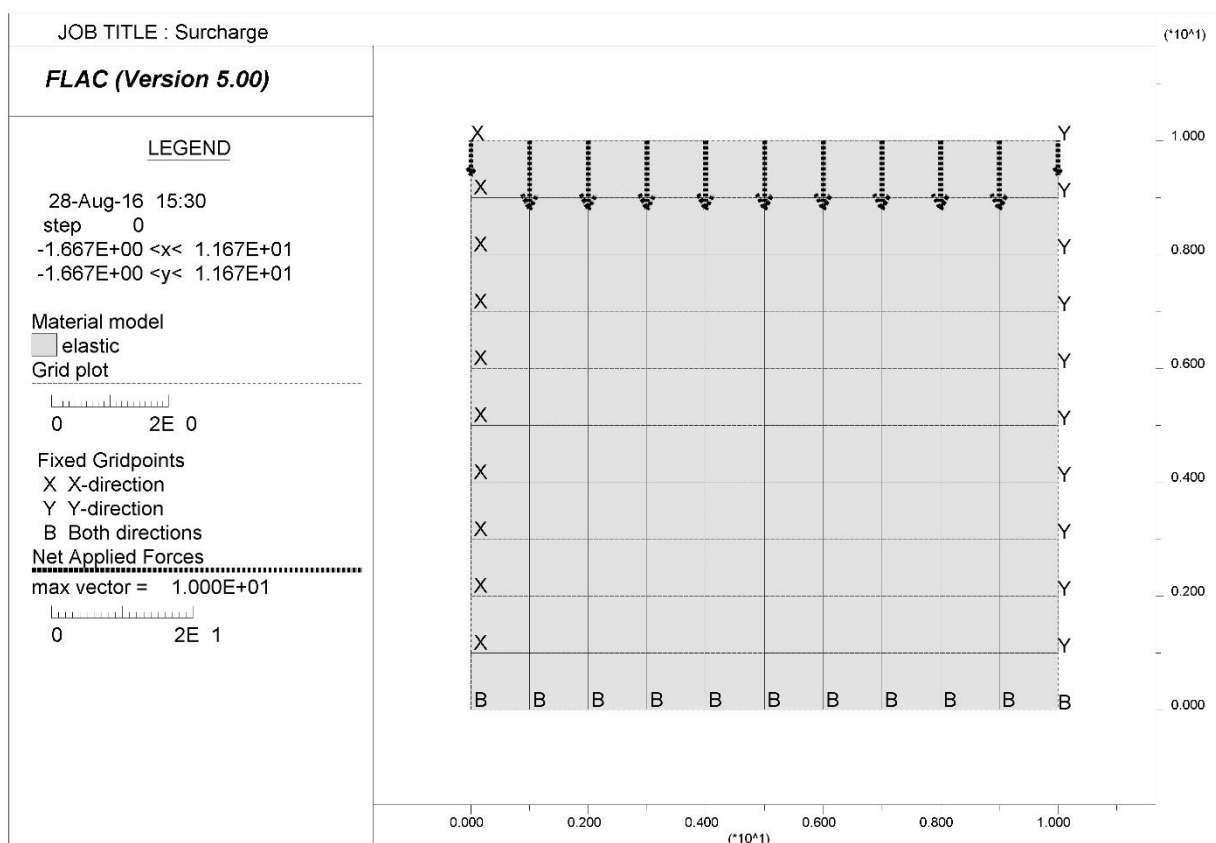
برای مشاهده تغییرات ایجاد شده در اثر وجود سربار اعم از جابجایی افقی و یا قائم و همچنین بردارهای جابجایی به صورت زیر عمل می کنیم:

Plot > Model > Vector > displacement

دستور بالا پلات بردارهای جابجایی را نشان می کند. که این پلات دقیقاً نشان می دهد در کدام قسمت نشست و در کدام قسمت بالا زدگی رخ می دهد.

Plot > Model > Contout- Gp > xdis or ydis

دستور بالا پلات بردارهای جابجایی افقی و همین قائم را نشان می دهد.



شکل (۱۳) اعمال سربار به مدل با دستور apply

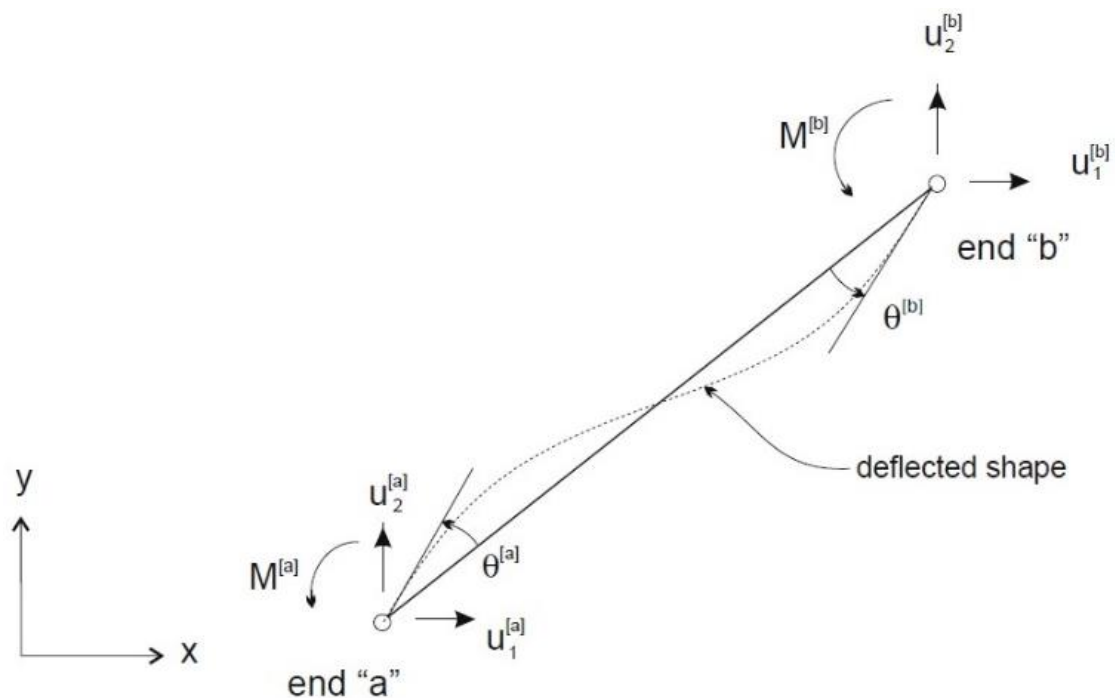
گام ششم - المان‌های سازه‌ای

در طراحی‌های ژئوتکنیکی، اعضای سازه‌ای نقش مهمی ایفا کرده و اغلب برای پایدارسازی سنگ و خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله مهم‌ترین المان‌های سازه‌ای در FLAC می‌توان به المان‌های تیر، کابل و شمع اشاره کرد.

پس از به تعادل رسیدن مدل و بررسی نمودار نیروهای نامتعادل کننده و همین‌طور کانتورهای خروجی که شامل تنش‌ها و جابجایی‌ها می‌باشد. کار اصلی مدل‌سازی آغاز می‌گردد. که بستگی به نوع مدل شامل مدل - سازی سازه نگهبان و گودبرداری مرحله به مرحله، حفاری تونل، نصب المان‌های سازه‌ای و ... آغاز می‌گردد.

📖 المان تیر:

المان تیر یک المان دو بعدی است که در هر نقطه گره‌ای دارای سه درجه‌ی آزادی می‌باشد: جابجایی در جهت x ، جابجایی در جهت y و دوران. از المان تیر زمانی استفاده می‌شود که عضو سازه‌ای شبیه‌سازی شده دارای مقاومت خمشی باشد. از این المان برای مدل‌سازی خط لوله، حائل بتنی یا فولادی جداره‌ی تونل‌ها، شبیه سازی قاب‌های ساختمانی فولادی یا بتنی، دیوارهای حائل، پی‌های سطحی، دیوارهای خاک مسلح و ژئوتکستایل‌ها استفاده کرد. برای شبیه‌سازی اندرکنش جداره‌ی تیر با خاک یا سنگ از المان‌های سطح مشترک در کنار المان سازه‌ای استفاده می‌شود.



شکل (۱۴) المان تیر

جدول (۵) دستورهای مرتبط با المان تیر

STRUCTURE	keyword			
beam	begin	keyword		
		grid	<i>ij</i>	
		node	<i>n</i>	
		<i>x y</i>		
		end		
		keyword		
	end	grid	<i>ij</i>	
		node	<i>n</i>	
		<i>x y</i>		
		prop	<i>np</i>	
		segment	<i>ns</i>	
		delete	<i><n1 n2></i>	
	node	<i>n</i>	<i>x y</i>	
	node	<i>n*</i>	keyword	
		fix	<i><x> <y> <r></i>	
		free	<i><x> <y> <r></i>	
		initial	keyword	
		xvel		<i>value</i>
		yvel		<i>value</i>
		rvel		<i>value</i>
		load	<i>fx fy m</i>	
		pin		
		slave	<i><x> <y> m</i>	
		unslave	<i><x> <y></i>	
	prop	<i>np</i>	keyword	
		area	<i>value</i>	
		density	<i>value</i>	
		e	<i>value</i>	
		height	<i>value</i>	
		I	<i>value</i>	
		pmom	<i>value</i>	
		radius	<i>value</i>	
		spacing	<i>value</i>	
		thexp	<i>value</i>	
		width	<i>value</i>	
	chprop	<i>np</i>	range	<i>nel1 nel2</i>
	hinge	<i>nel1 nel2</i>		

* For the keywords **fix**, **free**, **initial**, **load** and **pin**, a range of nodes can be specified with the phrase **range n1 n2**.

ویژگی‌هایی که می‌توان در FLAC به المان تیر اختصاص داد به قرار زیر است:

مساحت مقطع تیر، مدول الاستیسیته مقطع، ممان اینرسی

*نکته: به جای اختصاص مساحت مقطع و ممان اینرسی، می‌توان در مقاطع مستطیلی میزان عرض و طول و در مقاطع دایروی میزان شعاع را معرفی نمود. نرم‌افزار به طور خودکار مقدار مساحت و ممان اینرسی را محاسبه می‌کند.

📖 المان کابل:

المان کابل: المان کابل دارای کاربرد گسترده‌ای در زمینه مدل‌سازی مهارهای تونل؛ خاک مهارها، دیوارهای میخ کوبی شده و غیره می‌باشد. این المان سازه‌ای می‌تواند به خوبی اندرکنش دوغاب محیطی و میگردهای مسلح کننده را شبیه‌سازی کند. با این حال این المان قادر به تحمل خمش و نیروی برش نبوده و چنان چه در مدل‌سازی مهار در تونل نیاز به تعریف این ویژگی نیز باشد استفاده از المان شمع توصیه می‌شود. ویژگی‌هایی که می‌توان به المان کابل اختصاص داد به شرح زیر است:

سطح مقطع کابل، مدول الاستیسیته، مقاومت جاری شدن کششی yield، مقاومت جاری شدن فشاری ycomp، محیط خارجی peri، سختی دوغاب (نیرو/ طول کابل/ جابجایی) kbond، مقاومت چسبندگی دوغاب (نیرو طول کابل) sbond، مقاومت اصطکاکی دوغاب (درجه) sfric

جدول (۶) دستورهای مرتبط با المان کابل

STRUCTURE	keyword			
	cable	begin	keyword	
			grid	<i>i j</i>
			node	<i>n</i>
			<i>x y</i>	
		end	keyword	
			grid	<i>i j</i>
			node	<i>n</i>
			<i>x y</i>	
		prop	<i>np</i>	
		segment	<i>ns</i>	
	node	delete	< <i>n1 n2</i> >	
		tension	<i>value</i>	
		<i>n</i>	<i>x y</i>	
		<i>n*</i>	keyword	
			fix	< <i>x</i> > < <i>y</i> >
			free	< <i>x</i> > < <i>y</i> >
			initial	keyword
			xvel	<i>value</i>
			yvel	<i>value</i>
			load	<i>fx fy</i>
			slave	< <i>x</i> > < <i>y</i> > <i>m</i>
			unslave	< <i>x</i> > < <i>y</i> >
	prop	<i>np</i>	keyword	
			area	<i>value</i>
			density	<i>value</i>
			e	<i>value</i>
			kbond	<i>value</i>
			perimeter	<i>value</i>
			radius	<i>value</i>
			sbond	<i>value</i>
			striction	<i>value</i>
			spacing	<i>value</i>
	chprop	<i>np</i>	szz	on/off
			thexp	<i>value</i>
			ycomp	<i>value</i>
			yield	<i>value</i>
			range	<i>nel1 nel2</i>

* For the keywords fix, free, initial and load, a range of nodes can be specified with the phrase range *n1 n2*.

📖 المان شمع:

المان شمع یک المان دو بعدی با قابلیت انتقال نیروهای برشی، نرمال و گشتاور خمشی می‌باشد. این المان ترکیبی از المان‌های کابل و تیر است که علاوه بر تحمل نیروهای برشی، نرمال و خمشی دارای مقاومت جداره و مقاومت انتها نیز می‌باشد و به همین خاطر از این المان به طور گسترده برای مدل‌سازی پی‌های عمیق و ریز شمع‌ها استفاده می‌شود.

در نرم‌افزار FLAC المان شمع یک عملکرد ترکیبی از عملکردهای کابل و تیر را دارد. شمع‌ها به صورت یک المان دو بعدی تعریف می‌شوند که در هر راس آن سه درجه آزادی دارد (دو درجه آزادی جابجایی و یک درجه آزادی دورانی). ویژگی‌هایی که باید برای المان شمع مدنظر قرار گیرند عبارتند:

مساحت مقطع شمع، ممان اینرسی مقطع، وزن مخصوص شمع، مدول الاستیسیته شمع، محیط شمع، سختی برشی جداره شمع، مقاومت چسبندگی جداره شمع، مقاومت اصطکاکی جداره شمع، سختی مقطع نوک شمع، مقاومت چسبندگی شمع، مقاومت اصطکاکی نوک شمع

📌 توجه: همچنین می‌توان به جای معرفی مساحت مقطع و ممان اینرسی سطح مقطع در شمع‌ها با مقطع مستطیل عرض و طول سطح مقطع و در شمع‌های با مقطع دایروی، مقدار شعاع را به نرم‌افزار معرفی کرد.

جدول (۷) پارامترهای مرتبط با نوک و طول شمع

توصیف	زیر دستور در FLAC
سختی برشی بین سطح تماس شمع و خاک	Cs_stiff
زاویه اصطکاک بین سطح شمع و خاک	Cs_sfrc
مقاومت چسبندگی سطح تماس شمع با خاک	Cs_soch
محیط پیرامونی المان	Primeter
سختی محوری نوک شمع	Cs_nstiff
چسبندگی نوک شمع با خاک	Cs_noch
زاویه اصطکاک نوک شمع با خاک	Cs_nfrc
مقاومت کششی نوک شمع وقتی که شمع به کشش بیافتد	Cs_nten

جدول (۸) دستورها و زیر دستورهایی مرتبط با المان شمع در FLAC

STRUCTURE	keyword			
	pile	keyword		
		begin	keyword	
			grid	<i>ij</i>
			node	<i>n</i>
			<i>x y</i>	
		end	keyword	
			grid	<i>ij</i>
			node	<i>n</i>
			<i>x y</i>	
		prop	<i>np</i>	
		segment	<i>ns</i>	
		delete	<i><n1 n2></i>	
	node	<i>n</i>	<i>x y</i>	
	node	<i>n*</i>	keyword	
		fix	<i><x> <y> <r></i>	
		free	<i><x> <y> <r></i>	
		Initial	keyword	
			xvel	<i>value</i>
			yvel	<i>value</i>
			rvel	<i>value</i>
		load	<i>fx fy m</i>	
		pin		
		slave	<i><x> <y> m</i>	
		unslave	<i><x> <y></i>	
	prop	<i>np</i>	keyword	
		area	<i>value</i>	
		cs_ncoh	<i>value</i>	
		cs_nfric	<i>value</i>	
		cs_nfunc	<i>name</i>	
		cs_ngap	<i>value</i>	
		cs_nstiff	<i>value</i>	
		cs_nten	<i>value</i>	

* For the keywords **fix**, **free**, **Initial**, **load** and **pin**, a range of nodes can be specified with the phrase **range n1 n2**.

نحوه‌ی مدل‌سازی هندسی المان‌های سازه‌ای کابل، تیر و شمع به یک صورت است. تمام المان‌ها با آدرس دهی نقاط انتهایی مدل می‌شوند. کاربر با معرفی نقاط انتهایی المان قادر به ساخت مدل در محیط نرم‌افزار خواهد بود. کد مرتبط با مدل‌سازی هندسی در FLAC به صورت زیر است:

Strucutr <type> begin ... end ...

در این دستور می‌توان به قسمت type گزینه‌های cable , beam , pile را درج نمود تا المان سازه‌ای مورد نظر مدل شود.

برای آدرس‌دهی نقاط ابتدایی و انتهایی سه روش مرسوم است:

۱- معرفی نقطه گره‌ای در زون بندی محیط پیوسته که المان سازه‌ای از آن شروع یا به آن ختم می‌شود با استفاده از دستور $grid\ i\ j$

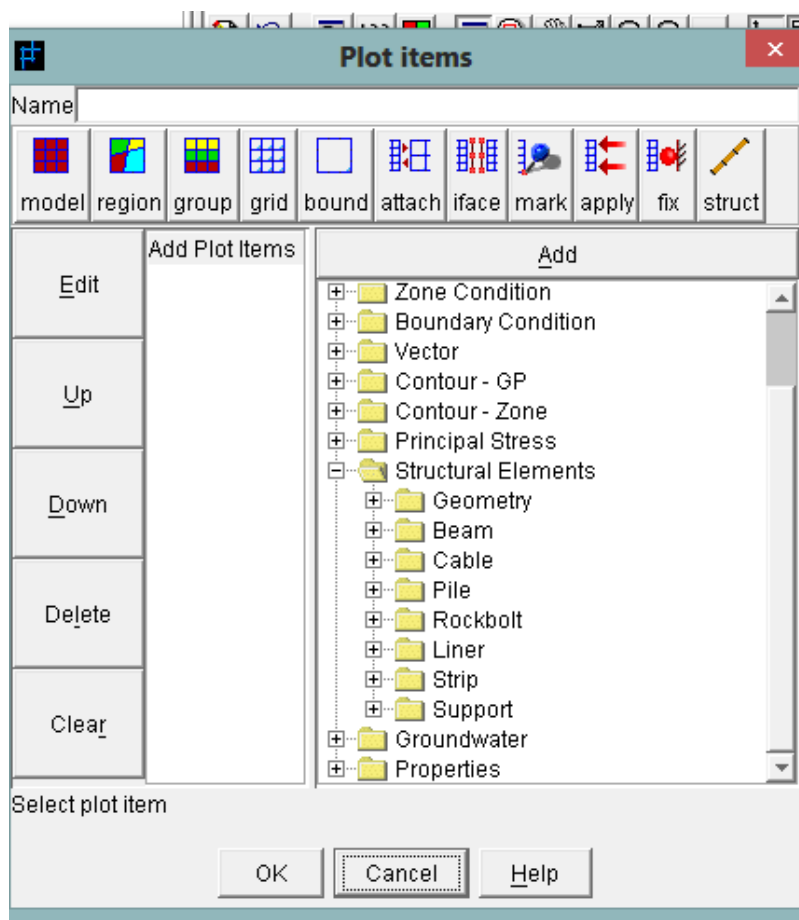
۲- ارائه مختصات دکارتی نقاط شروع و پایان المان سازه‌ای با زیر دستور $x\ y$

۳- ارائه شماره نقطه‌ای که المان سازه‌ای از آن شروع یا به آن ختم می‌شود با استفاده از زیر دستور $node=n$ که در آن n شماره نقطه خواهد بود.

با استفاده از زیر دستور $segment=n$ یک المان سازه‌ای می‌تواند به چند بخش تقسیم شود. چنانچه $n=1$ باشد المان سازه‌ای ایجاد شده صرفاً دارای یک بخش خواهد بود. دلیل اصلی استفاده از این دستور افزایش تعداد بخش‌های عضو سازه‌ای بوده که به دنبال آن دقت مدل‌سازی در اعضای سازه‌ای افزایش می‌یابد.

برای مشاهده شماره بخش‌ها و نقاط می‌توان در منوی گرافیکی به ترتیب مسیرهای زیر را دنبال نمود:

Plot> Model> Structural Elements



شکل (۱۵) نحوه نمایش پلات المان‌های سازه‌ای

❖ نکته: شرایط انتهایی یک عضو سازه‌ای می‌تواند با استفاده از دستورهای زیر در جهت x ، y و چرخش به صورت گیردار یا آزاد تغییر کند.

Struct node= n fix <x> <y> <r>

Struct node= n free <x> <y> <r>

اختصاص ویژگی مصالح به المان‌های سازه‌ای

بعد از خط دستوری مربوط به مدل‌سازی هندسی عضو سازه‌ای، ویژگی عضو سازه‌ای مورد بررسی در خط جداگانه نوشته می‌شود. توجه شود که هر یک از خطوط دستوری جهت اعمال ویژگی به عضو سازه‌ای، شماره‌گذاری می‌شود. شماره اختصاص داده شده در خط دستوری مربوط به مدل‌سازی هندسی عضو سازه‌ای نیز لحاظ می‌شود. به این ترتیب هر عضو سازه‌ای با شماره‌ای مختص به آن عضو به خط دستوری با همان شماره مرتبط شده و ویژگی مورد نظر را اخذ می‌کنند.

برای مثال با استفاده از دو خط دستوری زیر در ابتدا مدل‌سازی هندسی تیر شماره ۳ انجام شده و سپس ویژگی آن در خط جداگانه درج شده است:

Struct beam begin grid 3 4 end grid 3 7 seg 6 prop 3

Strucy prop 3 E=2e11 i=2.3e-5 a=4.8e-3

نحوه خروجی گرفتن از المان‌های سازه‌ای به این صورت می‌باشد.

Utility > info> Structure

و پس از انجام دستور بالا المان سازه‌ای مورد نظر را انتخاب نمود و سپس out put را انتخاب نمود و در پنجره سمت راست یعنی consol خروجی مورد نظر نمایان می‌شود که می‌توان آن را copy و به اکسل انتقال داد.

گام هفتم - معرفی حفاری و مدل سازی نهایی

در این مرحله پس از معرفی المان های سازه ای و خصوصیات مرتبط با هر المان نوبت انجام مراحل پایانی می گردد که اگر مثلاً مدل مورد نظر شامل پروژه تونل یا گودبرداری باشد در این مرحله، به مدل اعمال می گردد و به این نکته باید توجه داشت که حتماً مرحله به مرحله مدل نموده و Solve صورت گیرد. در انتها پس از solve تمام مراحل نوبت به خروجی های نهایی از مدل می گردد. که دستور خروجی و نوع هر یک در قسمت های قبل شرح داده شد.

مدل سازی فشار آب حفره ای و تراوش آب در خاک

یکی از مدهای تحلیل در FLAC، تحلیل مدل تحت حضور فشار آب حفره ای می باشد. ساده ترین مدل سازی جریان آب در FLAC به گونه ای است که جریان در داخل خاک اشباع ایجاد شده و مرز جریان در یک خط فریاتیک از ناحیه خشک بالای آن جدا شود. با این حال در FLAC امکان مدل سازی جریان در خاک های نیمه اشباع نیز وجود دارد.

برای تحلیل در حضور آب زیرزمینی فرآیند کدنویسی باید با دستور configuration groundwater آغاز شود. در ادامه شبکه زون بندی شده، مدل رفتاری و ویژگی مکانیکی مدل به FLAC معرفی می گردد.

Config gw

بعد از اختصاص مدل رفتاری و ویژگی مکانیکی مدل؛ ویژگی های هیدرولیکی خاک که شامل تخلخل و نفوذ پذیری آن است، با دستور property اعمال می شود.

Prop poros =0.5 perm=1e-10

❖ نکته: poros تخلخل و perm نفوذپذیری می باشد.

سپس ویژگی های مکانیکی آب که شامل چگالی و مدول حجمی آن می باشد، با دستور water به FLAC معرفی می شود.

Water dens= 1000 bulk= 2e9

سپس شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل مشخص می شود.

پس از تعریف نمودن شرایط اولیه و مرزی، وضعیت اشباع بودن خاک مشخص می شود. برای این منظور از دستور initial و زیر دستور sat (مخفف saturation) استفاده می شود.

نکته: باید توجه داشت برای معرفی وضعیت اشباع خاک مرزهای اشباع و خشک با استفاده از گریدلاینها آدرس دهی شوند.

Inial sat= 1 j 1 6

Initial sat=0 j 6 11

📖 توجه: دستور بالا به این معنی است که از $j = 1 \ 6$ مدل اشباع و از $j = 6 \ 11$ مدل خشک می باشد.

برای وارد نمودن مقدار فشار آب حفره ای مطابق دستور زیر عمل می کنیم:

ini pp <type>

برای خروجی گرفتن و مشاهده کانتورهای مربوط به آب زیرزمینی به صورت زیر عمل می کنیم.

Plot> Model > Groundwater

یکی از پلات های این قسمت saturation می باشد که با مشاهده این Plot دقیقاً سطح خشک و اشباع به وضوح نمایان می گردد.

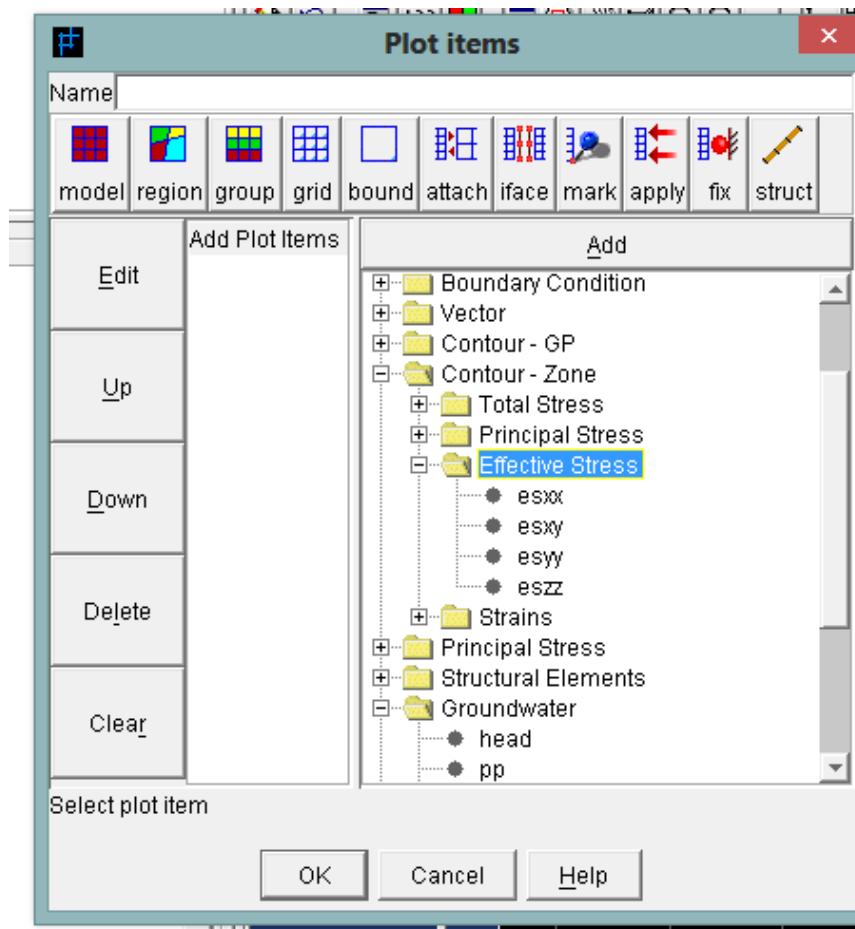
در قسمت Plot> Model > Groundwater گزینه های دیگری مانند pp برای مشاهده فشار آب حفره ای،

head برای مشاهده تراز آب زیرزمینی و ... استفاده می شود.

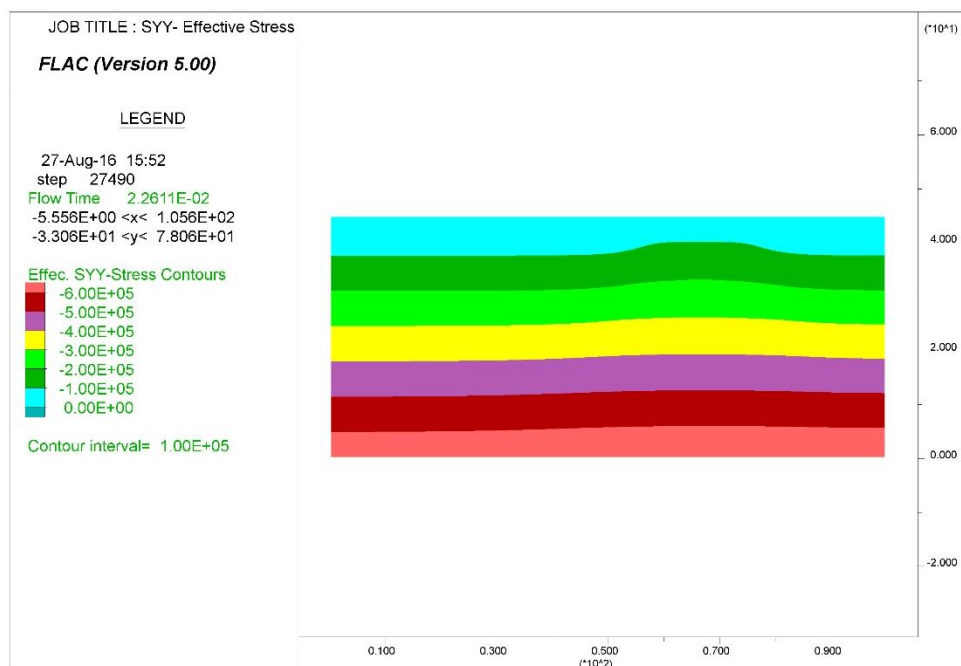
برای مشاهده کانتور تنش موثر در خاک به صورت زیر عمل می کنیم:

Plot > Model > countour Zone> Effective Stress

که با انجام دستور زیر تنش موثر در جهت X و Y مشاهده می گردد.



شکل (۱۶) نمایش دادن پلات تنش موثر



شکل (۱۷) یک نمونه کانتور تنش موثر