

## آنالیز و مدل سازی شیب خاکی در حالات فشارهای آب حفره ای

سمکو عارف پناه

کارشناسی ارشد عمران گرایش مکانیک خاک و پی

نام نویسنده مسئول:

سمکو عارف پناه

### چکیده

روش های عددی در حل مسائل مهندسی می توانند کاربردهای زیادی داشته باشند. در گذشته به علت نبود امکانات رایانه ای کافی و همچنین زمانبر بودن انجام محاسبات، بیشتر از روابط تجربی استفاده می شد. باید توجه داشت که حل دقیق مسائل ژئومکانیکی با استفاده از روش های تجربی و عددی به تنهایی ممکن نیست. ترکیب این دو روش می تواند طراح را در حل مسائل پیچیده کمک کند. اساس روش های عددی، تبدیل یک محیط با بینهایت درجه آزادی به محیطی با درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط است. موقعیت تعداد و ارتباط نقاط یاد شده توسط مش بندی مشخص می شود. ارزیابی بدون انجام زه کشی تنش های موثر و تحکیم در زمان انجام عملیات ساختمانی خاکریزها از مواردی است که باید مد نظر قرار گیرد. بررسی موارد مذکور با روش تفاضل محدود و تعیین شرایط مرزی و فشار حفره ای انجام شد. ابتدا خاکی با بافت همگن با دو لایه مدل شد و سپس رفتار نمونه مذکور با نرم افزار شبیه سازی شد. بررسی نتایج نشان داد که خروجی نرم افزار که به روش عددی کار می کنند، نتایج دقیق تری از نرم افزار پلاکسیس بدست می دهد.

**واژگان کلیدی:** خاکریز جاده، فشار آب حفره ای، تحکیم، تفاضلات محدود،

توزیع تنش موثر. *FLAC 2D*.

## مقدمه

خاک متشکل از ذرات جامد و حفرات بین آن هاست. از طرفی طبق قانون ثقل، آب می تواند از یک نقطه پر انرژی به نقطه دارای انرژی کم تر جریان پیدا کند. در اصل پارامترهای متعددی در تغییر شکل و جابجایی فونداسیون خاکریزها موثر هستند. از جمله این عوامل می توان به: گسل ها، رگه ها و لایه سست سنگ های هوا زده، لایه های رسی نرم و شیل های هوا زده، و نیز افزایش فشار منفذی آب (حاصل از تحکیم لایه ها در اثر اعمال بار و...) که موجب کاهش مقاومت آن می شود، اشاره کرد. از این رو است که بلافاصله پس از ساخت به علت افزایش فشار منفذی و کاهش مقاومت برشی احتمال لغزش لایه ها نیز افزایش می یابد.

خاکریزها به عنوان سازه ای سنگین که با بستر زیرین خود اندرکنش دینامیکی قابل توجهی دارند، باید مد نظر قرار گیرند. ساخت یک خاکریز جاده روی لایه های خاک با بافت نرم با وجود تراز آب اشباع بالا، سبب افزایش فشار حفره ای در لایه ها می گردد. در اثر اعمال بار بدون صورت گرفتن زه کشی، تنش موثر بدست آمده کاهش می یابد. بدین منظور بررسی تغییرات فشار حفره ای و همچنین میزان نشست خاکریز جاده نمونه ای بر روی خاک های نرم صورت گرفت. کارستنن و همکاران (۲۰۰۶) در طی مطالعاتی رفتار تنش- کرنش خاکریز روی پی نرم با پنج مدل مختلف و در شرایط غیرهکشی ساخت و با لحاظ زمانی برای تحکیم بررسی کرد. نتایج هر پنج مدل تفاوت کمی نسبت به هم داشت

مقایسه روش های ریاضی عددی با روش های محاسباتی ژئوتکنیکی برای اعتبارسنجی مدل های مقایسه ای همواره صورت گرفته است. روش عددی بکار رفته اجزا محدود ۱ و مدل های بکار رفته انسیس و پلاکسیس می باشد. در این مدل سازی سعی شده است تا سازه و کلیه مشخصه های ژئوتکنیکی آن مدل شود.

ملا و همکاران (۲۰۰۰) در بررسی روش اجزاء محدود با موضوعات مرتبط با اندرکنش خاک و سازه، با تبعیت از قانون موهر- کولمب دریافتند که این روش قابلیت تعیین اکثر پارامترهای مکانیکی (تنش های بینابین، تغییر شکل، جابجایی، فشار حفره ای،...) را دارا است. امروزه با توجه به پیشرفت سریع علوم کامپیوتر، استفاده از روش های عددی برای حل مسایل ژئوتکنیکی گسترش چشمگیری یافته است. به دلیل قابلیت بالای روش های عددی می توان تاثیر ناپیوستگی هایی مانند گسل، درزه، صفحات لایه بندی و ناهماهنگی ها را مطالعه و بررسی کرد. با بهره گیری از نرم افزارهای موجود و تعریف دقیق هندسه، شرایط مرزی و خواص مقاومتی و تغییر شکل پذیری توده سنگ، می توان طراحی قابل قبولی انجام داد. همچنین می توان سازه های سطحی و یا زیر زمینی (تونل ها، مغازه ها، شیروانی ها و...) با هر شکل و مقطع را مدل سازی کرده و تنش ها و جابجایی ها در تمام نقاط مورد نظر را بدست آورد. علاوه بر این به کمک روش های عددی می توان روند حفاری، نگهداری و اثر جیان آب را در پایداری توده های سنگی و خاکی را بررسی کرد. واقعیتی که نباید فراموش کرد این است که نتایج بدست آمده از مدل سازی عددی به داده های ورودی و فرض های ساده سازی بستگی دارد. نباید انتظار داشت که داده های ورودی اشتباه، نتایج صحیحی بدست آید. محققین و مهندسانی که در مدل سازی عددی و طراحی سازه های عمرانی و معدنی موفق بوده و هستند که خواص فیزیکی، مکانیکی و تغییر شکل پذیری توده سنگ را خوب می شناسند و دارای تجربه کافی در این زمینه هستند [۳].

روش های عددی به صورت زیر تقسیم بندی می شوند:

### روش های پیوسته

- روش المان محدود ( $FEM$ )<sup>۱</sup>

- روش تفاضل محدود ( $FDM$ )<sup>۲</sup>

- روش المان مرزی ( $BEM$ )<sup>۳</sup>

### روش المان محدود

روش المان محدود یکی از پر کاربرد ترین روش های عددی در زمینه مهندسی است. که اولین بار به وسیله ترنر<sup>۴</sup> و همکاران (۱۹۵۶) برای استفاده در تحلیل ساختمان ارایه شد. در این روش هندسه مساله به یک سری المان تقسیم می شود که در نقاط گره ای با یکدیگر ارتباط دارند و روابط تنش - کرنش به وسیله معادلات مناسب مشخص می شوند. تنش، کرنش و تغییر شکل پذیری را می توان با تغییر در شرایط مساله (به عنوان مثال حفاری) تحلیل نمود. انعطاف پذیری زیاد این روش در مدل سازی ها، اعمال شرایط مرزی

<sup>1</sup> Finite Element Methods

<sup>2</sup> Finite Difference Methods

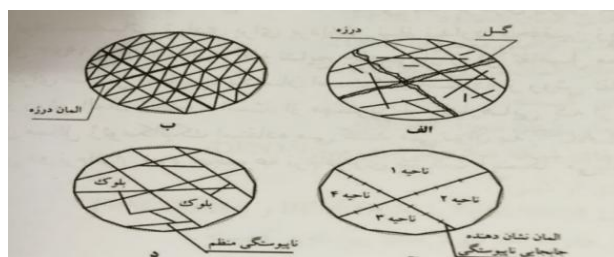
<sup>3</sup> Boundray Element Methods

<sup>4</sup> Turner

متنوع وهمچنین توسعه کد های تجاری توانمند، باعث شده است که این روش یکی از پر کاربرد ترین روش های عددی باشد. از میان نرم افزارهایی که که با این روش قادر به حل مسایل ژئومکانیکی هستند می توان *PLAXIS* , *ABAQUS* , *ANSYS* اشاره کرد.

### روش تفاضل محدود

روش تفاضل محدود یکی از قدیمی ترین روش های عددی برای حل دستگاههای معادلات دیفرانسیلی است که هنوز هم از کاربرد گسترده ای در حل مسایل مهندسی برخوردار است. این روش نیز مانند روش المان محدود، فضای مساله را به صورت پیوسته با المان هایی که در گرهها به هم متصل هستند، مدل می کند. برتری روش تفاضل محدود این است که به توان محاسباتی زیادی برای پردازش نیاز ندارد. محققین زیادی از جمله ویکینس<sup>۵</sup> در سال ۱۹۶۳ نشان داده اند که نتایج حاصل از روش تفاضل محدود و روش المان محدود برای مسایل خاص، یکسان است اما استفاده از روش تفاضل محدود انعطاف پذیر تر از روش المان محدود است. از مهمترین نرم افزارهایی که از روش تفاضل محدود برای حل مسائل ژئومکانیک استفاده می کنند می توان به *FLAC 2D* , *FLAC 3D* اشاره کرد که این دو نرم افزار جزو مجموعه نرم افزاری شرکت آیتسکا<sup>۶</sup> می باشد [۲].



طرح های مختلف مدل سازی توده سنگ (الف) توده سنگ شکسته شده (ب) مدل سازی عددی به روش *FDM* یا *FEM* (ج) مدل سازی عددی به وسیله *BEM* (د) مدل سازی عددی به وسیله *DEM*

در حل به روش تفاضل محدود، توسط نرم افزار عواملی چون: بافت خاک، شرایط زه کشی، جنس لایه های تشکیل دهنده خاکریز، مدل های مقایسه ای یا همان ابعاد روش آنالیز المان محدود که شامل مش بندی، شرایط مرزی، بازه های زمانی محاسباتی یا همان فاز عملیات ساخت خاکریز و هم چنین لحاظ فشار آب حفره ای و مرزهای لایه های خاک می بایستی اعمال شود. بورگس و همکاران (۲۰۰۴) دریافتند که میزان ماکزیمم نشست مورد انتظار در انتهای بازه عملیات احداث خاکریز روی خاک های با بافت نرم بیشتر از سایر بافت ها می باشد و این تغییر بدلیل کاهشی که در میزان درصد تخلخل در حین تحکیم صورت گرفته است.

ساری ابوشرار و همکاران (۲۰۰۹) با بررسی خاکریزی لایه به لایه خاکریز جاده و مدل کردن با روش عددی اجزاء محدود دریافتند که در اکثر مواقع بیشترین نشست در بخش پنجه خاکریز به وقوع می پیوندد نرم افزار پلاکسیس به تجزیه و تحلیل تغییر شکل ها و بهم ریختگی ها در مبحث پایداری لایه های خاک می پردازد. البته مدل رفتاری استفاده شده در این مورد مطالعه ارزیابی با فلک دوبعدی معیار موهر-کلمب است. بعلاوه در این نرم افزار شرایطی از قبیل: زه کشی یا زه کشی نشده یا حالت اشباع و غیر اشباع در منوهای مربوطه تعریف شده که جزء خواص یک نرم افزار ژئوتکنیکی است. فلک دوبعدی از جمله نرم افزارهایی است که قابلیت مدل نمودن بستر(پی)، سازه ها را با تکنیک المان های محدود دارد. وجود این حالات در انسیس، تنها مستلزم تعیین حدود و تعریف شرایط مرزی جدید است [۵]

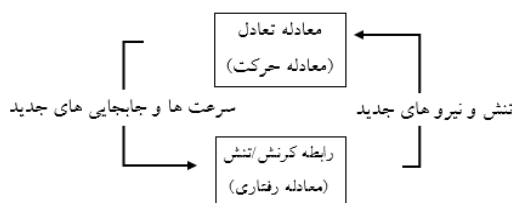
### روش تفاضل محدود صریح

نرم افزار فلک یکی از محصولات شرکت مهندسی مشاور آیتاسکا است. این شرکت در سال ۱۹۸۱ از جانب اعضای هیات علمی دپارتمان مهندسی عمران و معدن دانشگاه مینسوتا جهت ارائه خدمات مکانیک خاک و سنگ، مدل سازی عددی محیط های ژئوتکنیکی و فضاهای زیر زمینی تاسیس شد. در سال ۱۹۸۴ نرم افزار یودک برای مدل سازی عددی محیط های سنگی معرفی شد. در پی آن در سال ۱۹۸۶ اولین نسخه نرم افزار فلک با پشتیبانی علمی دکتر پیتر کاندال به جامعه علمی سراسر جهان ارائه گردید.

<sup>5</sup> Wikins

<sup>6</sup> ITASCA

فلک به عنوان یک (برنامه تفاضل محدود صریح) شناخته شده است که بر پایه (تحلیل لاگرانژی) عمل می کند. روش های تفاضل محدود تقریباً قدیمی ترین روش تحلیل عددی است که بر پایه معادلات دیفرانسیل عمل کرده و در آن مقادیر اولیه و مرزی به مدل معرفی می شود. در روش تفاضل محدود هر یک از مشتقات معادلات حاکم مستقیماً با یک توصیف جبری و بر حسب متغیرات مدل (مانند تنش یا جابجایی) در نقاط مجزای هندسه مدل تعریف می شود. این متغیرات در داخل المان های مدل تعریف نشده است. در مقابل در روش المان محدود تمرکز اصلی بر روی تغییر مقادیر کمیت های مدل (مانند تنش و جابجایی) در هر یک از المان ها با استفاده از توابعی است که بر اساس پارامترهای مدل تعریف می شود. فرمول بندی در این روش بر پایه مقادیر مربوط به پارامترها بوده به گونه ای که خطای محاسبات و یا خطای انرژی به حداقل ممکن برسد. هر دوی این روش ها مجموعه ای از روابط جبری را برای حل مدل به دست می آورند. با وجود آنکه این معادلات به روش کاملاً متفاوتی از یکدیگر بدست می آیند، اما نتایج حاصله در محاسبات مربوط به مدل های خاص، مشابه همدیگر خواهد بود. لذا با توجه به شباهت نزدیک نتایج محاسبات در هر دو روش، نمی توان برتری خاصی برای هر یک از روش ها قائل شد [۳].



### چرخه محاسبات صریح

روند تشریح شده با استفاده از مدل های ریاضی فرول بندی می شود. در این روند هدف اصلی این است که (سرعت موج محاسباتی) بیانگر (سرعت موج فیزیکی) باشد. این موضوع مزیت های مختلفی دارد. مزیت اصلی این است که هنگام محاسبه مقدار تنش با استفاده از مقدار کرنش یک المان، حتی اگر قوانین رفتاری کاملاً غیره خطی باشد، باز هم نیاز به هیچ تکراری در چرخه محاسباتی نیست. در روش غیره صریح (ضمنی) که در اغلب برنامه های رایانه ای تحت تفاضل محدود به کار می رود، در هر مرحله از تحلیل، هر المان با تمام المان های مدل مرتبط می شود. این امر منجر به تکرار بسیار زیاد چرخه محاسباتی جهت استخراج محاسبات تفاضل محدود خواهد شد. در جدول (۳-۱) روش های صریح و غیره صریح (ضمنی) تفاضل محدود با همدیگر مقایسه شده است. همانگونه که در این جدول مشاهده می شود عبی عمده روش تفاضل محدود صریح، گام های زمانی کوچک است که این موضوع باعث تعداد گام های محاسباتی زیاد در تحلیل مدل خواهد بود. روی هم رفته روش تفاضل محدود بهترین روش تحلیل برای سیستم های رفتاری مشکل آفرین مانند مدل های غیره خطی، کرنش های بزرگ و ناپایدار فیزیکی محسوب می شود. در کل اگر بخواهیم روش های عددی را از بابت نوع معادلات بکار رفته و روش حل مسئله تقسیم بندی کنیم، میتوانیم آنها را در دو دسته روش های صریح و روشهای غیره صریح (ضمنی) تفکیک نماییم. در روش های صریح، حل مسئله به کمک حل مستقیم معادله دیفرانسیلی که برای هر المان در نظر گرفته میشود انجام میگردد که جواب دقیق آن تابعی از تعداد آزمون خطاهایی است که انجام می شود که در این روش یک تکرار همگرایی (خطای قابل پذیرش) تعریف می شود و در صورتی که تغییرات نتایج بالانس نیروها و جابجایی ها کمتر از این مقدار باشد حل معادلات متوقف می گردد این روش برای کامپیوترهای که از حجم حافظه کمی برخوردارند بسیار مناسب است ولی طبیعتاً پروسه آنالیز بسیار زمانبر خواهد بود نسبت به روش المان محدود. این در حالی است که در روش های ضمنی حل مسائل از طریق حل مستقیم یا معکوس ماتریس های پارامتریک با دخالت ماتریس سختی برای هر جزء از محیط صورت میگیرد و برای حل مسایل پیچیده فضای زیادی از سیستم لازم است پس امکان تشکیل ماتریس سختی، جابجایی و نیرو و..... وجود دارد (روش المان محدود جزء روشهای ضمنی بوده و روش هایی مانند تفاضل محدود و اجزاء مجزا در دسته روش های صریح قرار میگیرند).

### معادلات اصلی تفاضل محدود

معادلات تفاضل محدود برای یک زیر المان مثلثی با استفاده از تیوری دیورژانس گاوس<sup>۷</sup> به صورت زیر حاصل می شود:

$$\int_s n_i f d_s = \int_A \frac{\partial f}{\partial x_i} d_A$$

در این رابطه داریم:

<sup>7</sup> Gauss divergence

$$\int^s : \text{انتگرال حول مرکز یک سطح بسته}$$

$$n^i : \text{بردارهای یکه سطح } S$$

$$f : \text{یک مقدار عددی، برداری یا تانسوری}$$

$$x^i : \text{بردارهای موقعیت}$$

$$d_s : \text{طول کمان دیفرانسیلی}$$

$$\int^A : \text{انتگرال سطح } A$$

## مدل الاستیک و مدل پلاستیک

**الف) مدل الاستیک:** که جهت مدل سازی مصالحی به کار می روند که از رفتار خطی تنش و کرنش پیروی می کنند.

- **مدل الاستیک ایزوتروپ (همگن):** که ساده ترین نوع رفتار ماده را نشان می دهد. این مدل برای مواد همگن، ایزوتروپ و پیوسته استفاده می شود که در طی باربرداری رفتار تنش - کرنش آن، خطی و بدون هیچ پس ماندی است.

- **مدل پلاستیک:** توانایی مدل سازی مصالحی را دارند که رابطه تنش و کرنش آنها مانند حالت الاستیک الزاماً خطی نیست.

## ب) مدل های پلاستیک نیز شامل الگوهای زیر می باشند:

**۱- مدل دراگر پراگر:** که یک معیار گسیختگی ساده است و زمانی مورد استفاده قرار می گیرد که تنش تسلیم برشی تابعی از تنش ایزوتروپ باشد. اگر چه این مدل معمولاً برای استفاده در مباحث زمین شناسی چندان توصیه نمی شود اما می تواند برای مدل سازی رس های نرم با زاویه اصطکاک کم به کار گرفته شود. این مدل بر اساس رابطه میان تنش مماسی و میانگین تنش های اصلی تعریف شده است

**۲- مدل موهر - کولمب:** که مدل رایجی برای نشان دادن گسیختگی برشی در خاک و سنگ است. و طبق مطالعات آزمایشگاهی ورمیر و دبورست (۱۹۸۴) این مدل رفتار گسیختگی بتن سخت شده را به خوبی شبیه سازی می کند. در این مدل، تنش تسلیم تابع تنش های اصلی ماگزیمم و مینیمم است. پارامترهای لازم برای این مدل چسپندگی و زاویه اصطکاک است که با آزمایش های نسبتاً ساده ای بدست می آید.

**۳- مدل کم کلی اصلاح شده:** که برای نشان دادن رفتار موادی مانند رس نرم به کار می رود که تغییرات حجم بر خصوصیات حجمی و مقاومت برشی ماده تاثیر می گذارد.

## معرفی مدل موهر-کولمب

معیار شکست این مدل گسیختگی برشی، همراه با گسیختگی کششی است. سطح تسلیم برشی غیره همبسته و سطح تسلیم کشش همبسته است. در مدل موهر-کولمب تنش های اصلی  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  معرفی می شوند. مقادیر تنش های اصلی و نحوه رشد کرنش های پلاستیک به صورت زیر می باشد:

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \quad (1)$$

$$\Delta_{ei} = \Delta_{e_i^e} + \Delta_{e_i^p} \quad (2)$$

زیرنویس های  $e$  و  $p$  به ترتیب معرف کرنش پلاستیک و الاستیک هستند. مقادیر پلاستیک هنگامی که کرنش ها به سطح تسلیم نرسیده اند صفر است. مقادیر تنش های اصلی در ناحیه الاستیک با توجه به قانون هوک به شرح زیر است:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta_{\sigma_1} = \alpha_1 \Delta_{e_1^e} + \alpha_1 (\Delta_{e_2^e} + \Delta_{e_3^e}) \\ \Delta_{\sigma_2} = \alpha_1 \Delta_{e_2^e} + \alpha_2 (\Delta_{e_1^e} + \Delta_{e_3^e}) \\ \Delta_{\sigma_3} = \alpha_1 \Delta_{e_3^e} + \alpha_3 (\Delta_{e_1^e} + \Delta_{e_2^e}) \end{array} \right\}$$

### توابع گسیختگی و پتانسیل

با توجه به رابطه (۳-۱۱) معیار گسیختگی در صفحه تنش های اصلی ( $\sigma_1$  و  $\sigma_3$ ) به صورت

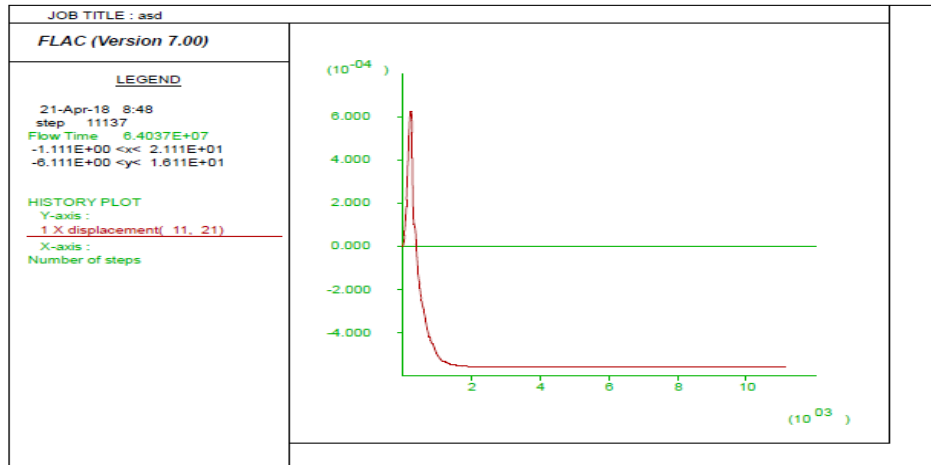
#### مشخصات مدل موهر - کولومب

ردیف	ویژگی	مشخصه	کد مخف در فلک	کد کامل در فلک
۱	مدول حجمی	k	b	Bulk_mod
۲	چسپندگی	c	c	cohesion
۳	جرم مخصوص	$\rho$	d	density
۴	زاویه اتساع	$\psi$	di	dilation
۵	زاویه اصطکاک داخلی	$\Phi$	f	friction
۶	مدول برشی	G	s	Shear_mod
۷	حد کششی	$\sigma^t$	t	tension

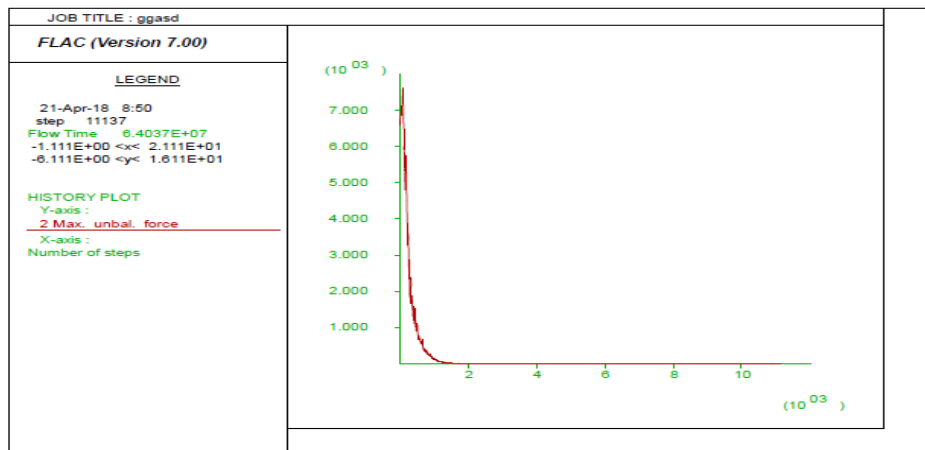
با مدل کردن خاکریز به مشخصات زیر ابتدا شیب خاک را پایدار شده و تحت تحلیل مکانیکی قرار می گیرد و سپس تراز آب زیر زمینی تا زمانی که شیب دچار گسیختگی شود بالا می آید. تحلیل در هر مد جدا گانه انجام می گیرد به گونه ای که ابتدا تحلیل در حالت مکانیکی انجام شده و شرایط تنش اولیه در سیستم توزیع می شود. سپس یک تحلیل در حالت منفرد انجام می گیرد تا تراز آب به سطح مورد نظر برسد و در نهایت تحلیل مکانیکی منفرد با حضور تراز آب انجام گرفته تا وضعیت پایداری شیب مورد بررسی قرار گیرد. در مرحله اول مقدار چسپندگی و مقاومت کششی بسیار بیشتر از محیط واقعی به مدل اختصاص داده می شود زیرا در تحلیل اولیه هدف توزیع تنش های محیط ددر محل است و پس از تحلیل مقادیر تنش در محل، مقادیر چسپندگی و مقاومت کششی روی مقادیر واقعی خود تنظیم شده. جهت مطالعه پایداری شیب از امکانات مطالعه تاریخچه ای استفاده می شود. بدین منظور جابجایی در بحرانی ترین نقطه مورد بررسی قرار می گیرد. بعد از تحلیل پایداری توزیع تنش های محیط در محیط با اختصاص مقادیر چسپندگی و مقاومت کششی بالا ایجاد می شود و این مقادیر تقلیل یافته و مجدداً تحلیل می شوند تا وضعیت پایداری شیب مورد بررسی قرار گیرد. و می بینیم که نیروهای نامتعادل کننده پس از هر دو تحلیل به صفر می رسند. پس می توان مطمئن شد که شیب پایدار است. در این تحلیل از حالت جریان پایدار استفاده شده به همین دلیل از تحلیل جریان در حالت غیره فعال بودن تحلیل مکانیکی استفاده شده تا سطح فریاتیکی (سطح آزاد آب در محیط متخلخل) حاصل گردد. پس از حصول سطح فریاتیکی مجدداً یک تحلیل مکانیکی جهت اثر آب حفره ای در پایداری شیب انجام می شود [۳].

#### مقادیر نفوذپذیری

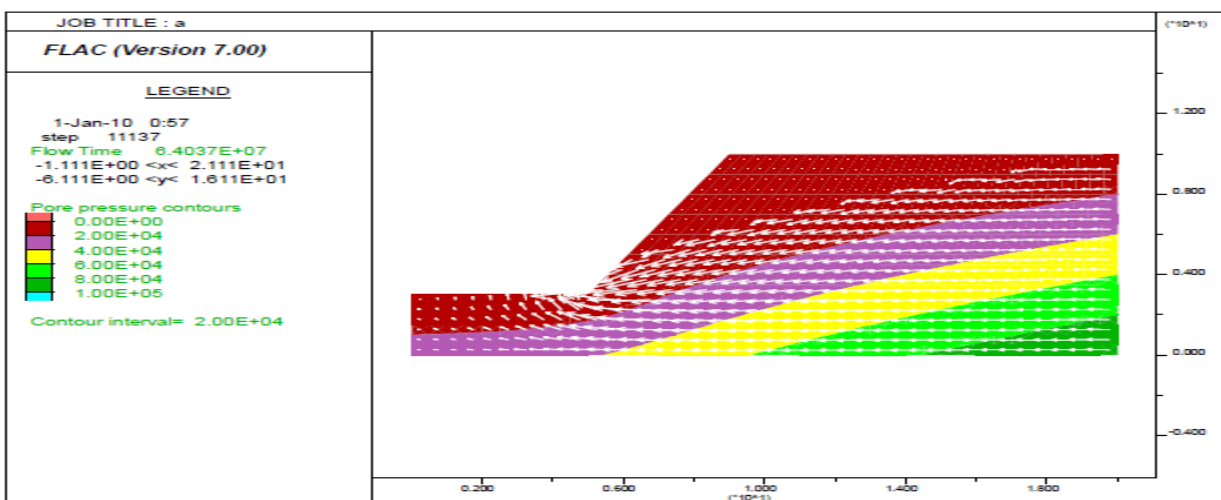
نوع خاک	$K (m^2 / pa - sec)$
شن تمیز	$1e^6 to 1e^4$
ماسه درشت	$1e^6 to 1e^8$
ماسه ریز	$1e^8 to 1e^9$
لایی	$1e^9 to 1e^{11}$
رس	$< 1e^{12}$



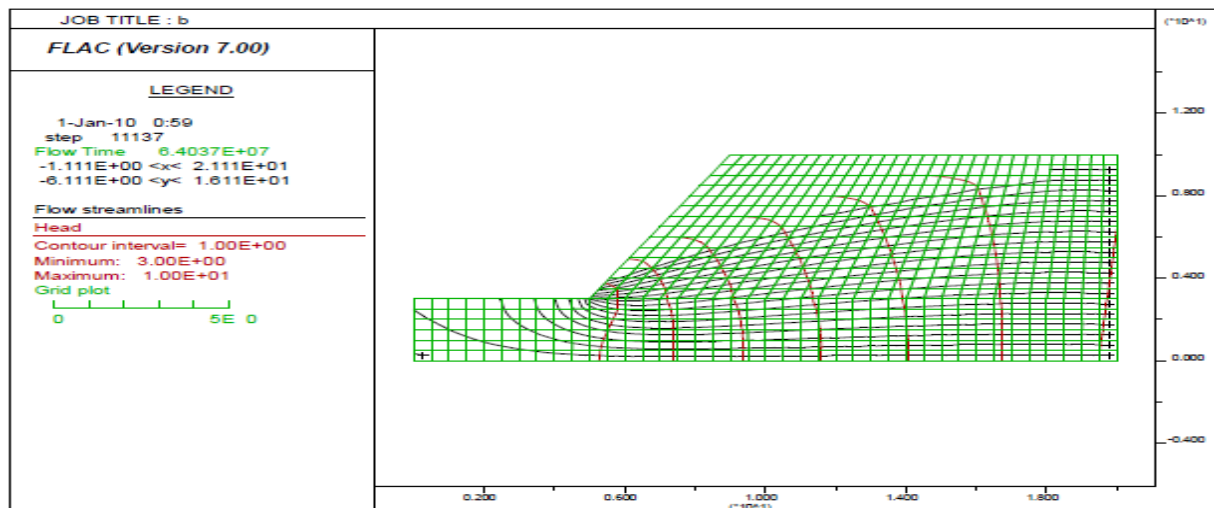
جابجایی افقی در گره ۲۱۱۱



مکانیزم نیروی نامتعادل کننده

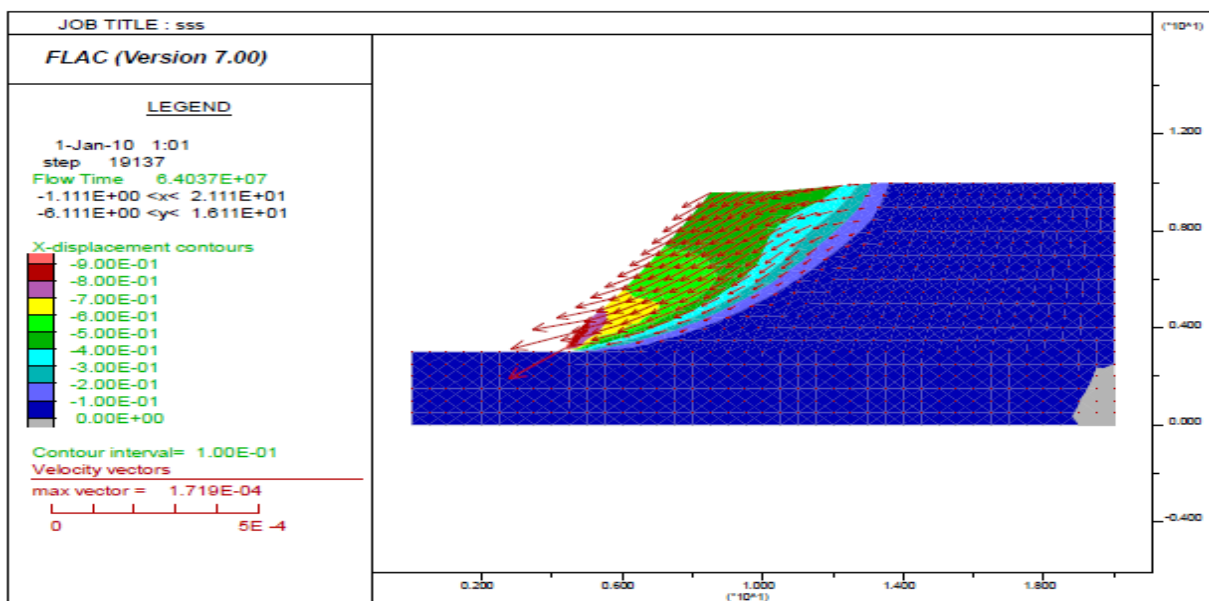


کانتور های فشار آب حفره ای و بردارهای جریان آب



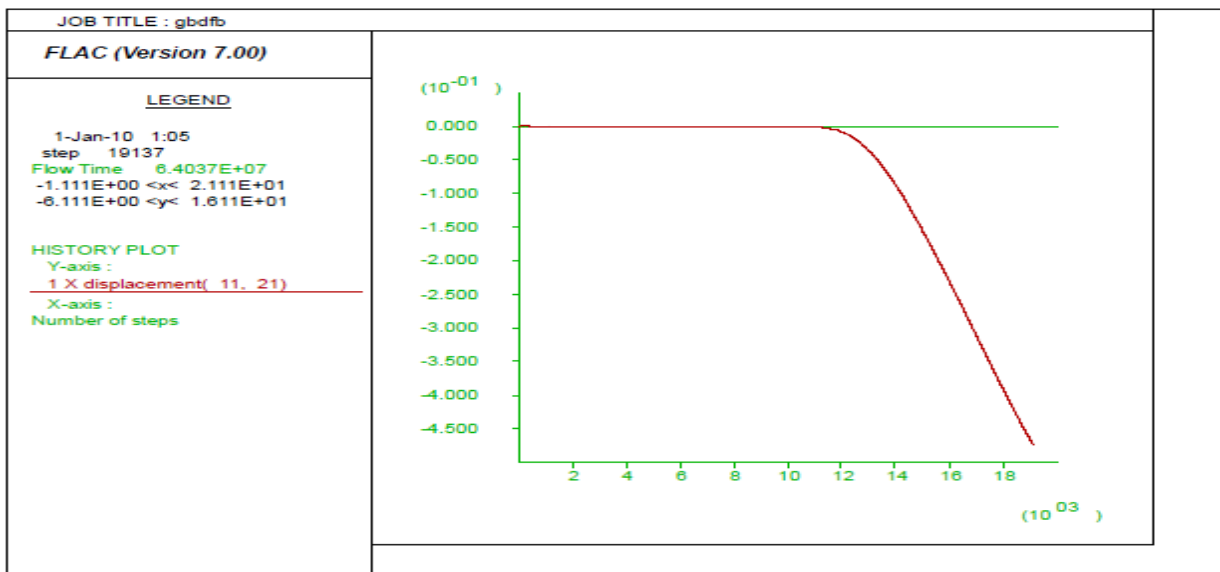
خطوط جریان و خطوط هم پتانسیل

پس از ایجاد جریان پایدار و توزیع فشار آب حفره ای با توجه به تراز آب در خطوط مرزی، مد تحلیل مکانیکی فعال و مد تحلیل جریان غیره فعال می شود. مدول حجمی آب صفر می گردد تا از ایجاد فشار آب حفره ای ناشی از تغییر شکل های مکانیکی در داخل مدل جلوگیری شود. در نهایت می توانیم نتیجه بگیریم که در شرایط خاک خشک پایدار بوده اما هنگامی که تراز آب زیر زمینی به یک مقدار مشخص برسد شیب به ناپایداری و گسیختگی خواهد رسید.

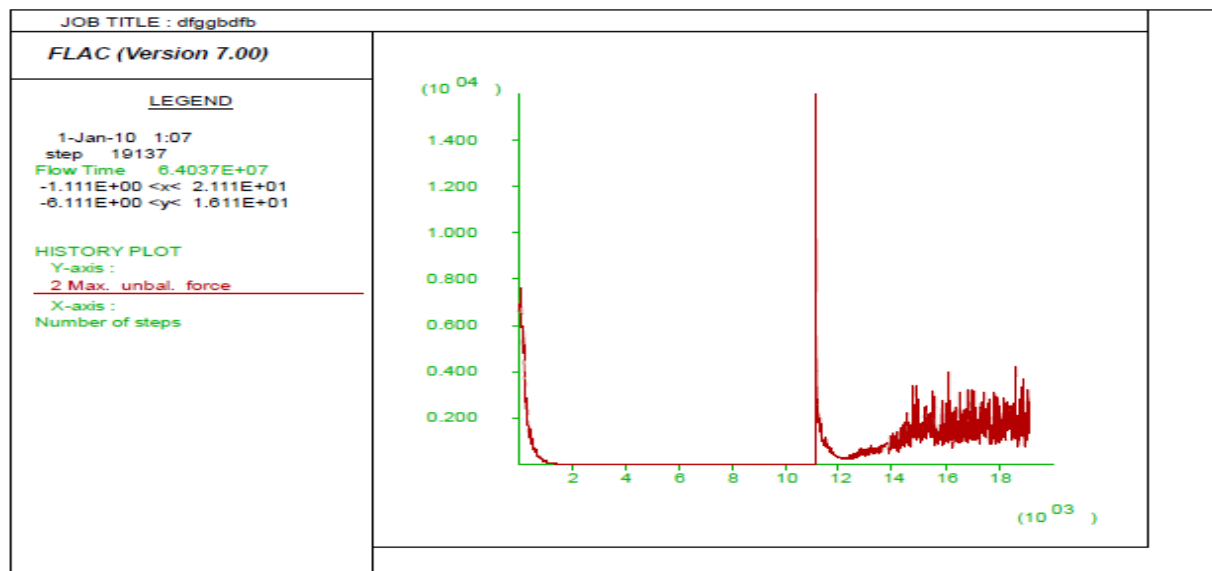


وضعیت تغییر شکل یافته شیب





نمودار جابجایی افقی در لبه شیب



نمودار حداکثر نیروی نامتعادل کننده

## نتیجه گیری

معین شد که برای خاکریزهای احداث شده با جنس خاکهای رسی در شرایط زه کشی نشده، تنش برشی با افزایش عمق در راستای قائم افزایش می یابد. مدل مور- کولمب در کوتاه مدت نتایج نسبتاً خوبی می دهد، ولی در ارزیابی نشست های درازمدت اثرات رفتار خزشی خاک موجب کاهش دقت می گردد. در صورتی که استفاده از مدل خزشی خاک های نرم با دقت بهتری در دراز مدت با وجود داده های واقعی عمل

می کند. به طور کلی پایین بودن ظرفیت باربری و مقاومت برشی و نیز بالابودن قابلیت تراکم پذیری پی های احداث شده بر رس های نرم مرحله خاکریزی سدها را در حین ساخت با مشکلاتی روبرو خواهد کرد.

برای اجتناب از این دگرشکلی های خاک پی، خاکریزی به صورت لایه ای انجام گرفته تا در هر لایه زمانی برای تحکیم و زوال فشار آب حفره ای در نظر گرفته شود. جهت پایداری این سازه باید عمل تحکیم برای زائل کردن فشار حفره ای اضافی بوجود آمده صورت گیرد. نشست و تراوش و هم چنین تغییرات فشار حفره ای حداکثر برآوردی توسط نرم افزار فلک دو بعدی و روش های تئوری و نظری تقریباً برابر و دارای اختلاف جزئی و قابل اغماض بود. چنانچه ضخامت لایه فوقانی بالای خاک های نرم رسی، افزایش یابد و از نوع درشت دانه باشد، تنش های کمتری به لایه زیرین منتقل می شود و پایداری سازه حفظ خواهد شد. بهتر است در حین عملیات ساخت خاکریز پس از ساخت فاز اول (حدود نصف ارتفاع خاکریز) بازه استراحت زمانی قرار داده شود تا پدیده کاهش فشار منفذی اضافی در فونداسیون خاکریز مجال یابد.

فلک دو بعدی برای تحلیل تغییر شکل ها و پایداری در عملیات ژئوتکنیکی مهندسی کاربرد زیادی دارد و در ساخت مرحله ای خاکریز می توان از آن برای ارزیابی رفتار تنش- کرنش، تحکیم، فرآیند گسیختگی، جابجایی و مواردی نظیر آن استفاده نمود. مدل های رفتاری موهر- کولمب سخت شوندهگی هذلولی، مدل نرم شوندهگی و نرم شوندهگی خزشی از منوهای مورد استفاده در پلاکسیس است. وجود ذرات رسی در یک نمونه خاک ماسه ای، اصطکاک داخلی آن ها را کاهش می دهد زیرا ذرات رسی در بین دانه ها قرار گرفته و به این حرکت آن ها را آسان تر می کند. با لحاظ شرایط خطی و غیر خطی الاستیسیته، الاستیسیته با احتساب تنش و یا بدون آن، مشخص شد که لایه رس مدل شده بیشترین خاصیت تغییر ارتجاعی را در این حالات نسب به بافتهای دیگر از خود بروز می دهد. برای مدلسازی خاکریز جاده، شرایط الاستیسیته- پلاستیسیته با احتساب تنش برشی، بیشترین کاربرد را در تعیین فشار حفره ای و شناسایی رفتار خاک هایی با بافت نرم دارد. نرم افزار فلک از ابعاد ذکر شده علی الخصوص محاسبه نشست و تعیین فشار آب حفره ای و همچنین مسائل مرتبط با تحکیم در حین ساخت خاکریز طبق نتایج فوق دقیق تر و کاربری آسان تری دارد.

## منابع و مراجع

- [۱] دکتر میر حسینی سید مجدالدین، "دینامیک خاک کاربردی"، چاپ دوم انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، ۱۳۹۳
- [۲] دکتر عامل سخی مسعود، "پی های عمیق"، چاپ اول نشر دیبای دانش، ۱۳۹۳
- [۳] مهندس کرمی مرتضی و مهندس ابره بهنام و دکتر فرامرزی لهراسب، "آموزش کاربردی نرم افزار *FLAC 3D*"، چاپ اول جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، ۱۳۹۳
- [۴] فاخر دکتر علی، "مهندسی پی پیشرفته"، چاپ دوم انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۲
- [۵] وتوکوری.وی.اس.و کاتسویاما مترجم:دکتر حسینی محمد فاروق، "درآمدی بر مکانیک سنگ"، چاپ هفتم نشر انتشارات دانشگاهی، ۱۳۹۲
- [۶] نشریه شماره ۵۲۵، "ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک"، سازمان مدیریت و برنامه، ۱۳۹۱
- [۷] طاحونی شاپور، "اصول مهندسی ژئوتکنیک (مهندسی پی)"، چاپ مروری موسسه انتشارات پارس آیین، ۱۳۹۰
- [۸] دکتر بهنیا کامبیز و دکتر طباطبایی امیر محمد، "مهندسی پی"، چاپ هشتم انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۰
- [۹] "راهنمای مبحث هفتم پی و پی سازی" - دفتر مقررات ملی ساختمان ایران - انتشارات نشر توسعه ایران، ۱۳۹۰
- [۱۰] دکتر وفاییان محمود، "آزمایشهای مکانیک خاک (در آزمایشگاه و در محل)"، چاپ اول انتشارات ارکان دانش، ۱۳۸۹
- [11] Kastunen,M,Wiltafsky,C,Krenn,H,Scharinger(2006),"Modeling the behaviour of embankment on soft[۱]
- [12] clay with different constitutive models",International journal for Numerical & Analytical Methods
- [13] Geomechanics,30:953-982.
- [14] R. Mellah,G. Auvinet,F. Masrouri.(2000)," Stochastic finite element method applied to non-linear[۲]
- [15] analysis of embankment",Probabilistic Engineering Mechanics 15 (2000) 251-259.
- [16] Jose Leitaõ Borges,"Three-dimensional analysis of embankment on soft soils incorporating vertical[۳]
- [17] drains by finite element method",Computers and Geotechnics 31 (2004) 665-676.
- [18] Sari W,Abusharar,Jun-Jie Zheng,Bao-Guo Chen,(2009)," Finite element modeling of the consolidation