

مدل سازی عددی تفاضل محدود نفوذ مخروط در خاک چسبنده

علی اکبر گلشنی^{۱*}، رضا نعمتی^۲

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس

golshani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۲۹

چکیده- در این پژوهش، آنالیز تفاضل محدود تغییر شکل های بزرگ برای آزمایش نفوذ مخروط (CPT) در خاک های چسبنده، با استفاده از نرم افزار FLAC 2D انجام می شود. در این مدل سازی، المان سطح مشترک بین نفوذسنج و خاک در نظر گرفته شده و مصالح نفوذسنج به گونه ای فرض می شود که در برابر مصالح خاک، رفتاری صلب داشته باشد. رفتار خاک از مدل الاستیک-پلاستیک کامل و معیار موهر-کولمب تبعیت می کند. پارامترهای مقاومت نوک و مقاومت اصطکاکی از محاسبات نرم افزار به دست آمده و سپس با نتایج آزمایش صحرایی نفوذسنج مخروطی (از سایت پروژه کارخانه ذوب آلومینیم در شهر لامرد واقع در استان فارس)، مقایسه می شود. نتایج مدل سازی عددی، تطابق خوبی با نتایج آزمایش صحرایی نشان می دهد. همچنین مش بهینه، حالت نفوذ دائم، ارزیابی نتایج با نمودار رابرتسون ۱۹۸۶ و نمودار اسلامی و فلنیوس (۱۹۹۷) هم بررسی شد.

واژگان کلیدی: آنالیز تفاضل محدود، نفوذ مخروط، مقاومت نوک، المان سطح مشترک، مش بهینه

۱- مقدمه

برای آزمایش نفوذ مخروط که یک مسئله ی ژئوتکنیکی است، با توجه به پیشرفت های چشم گیر در زمینه روش های عددی و ارتقاء سخت افزارها، برای بررسی از دیدگاه سرعت و در نتیجه اقتصادی بودن، از تحلیل عددی استفاده شده؛ به گونه ای که آن را با بررسی های صحرایی و آزمایش ها برای به دست آوردن پارامترهای طراحی و غیره ترکیب می کنند.

ظرفیت باربری، نشست پی و همچنین برآورد پتانسیل روانگرایی ماسه ها، استفاده کرد. استفاده از مشخصات مهم ژئوتکنیکی مانند ظرفیت باربری و مقاومت برشی لایه های ماسه ای در اعماق، برای بکارگیری در طراحی شمع ها با افزایش کاربرد این آزمایش، گسترش پیدا کرد.

۲- روش های تحلیل آزمایش نفوذ مخروط

برای استفاده گسترده از آزمایش CPT^۱ در مهندسی ژئوتکنیک، لازم است ارتباط درست و معتبری بین مقاومت نوک مخروطی و خواص مکانیکی خاک، ارائه شود.

۱-۱- کاربرد آزمایش نفوذ مخروط

از این آزمایش می توان شناسایی لایه های خاک، تخمین

1- Cone Penetration Test

ارزیابی‌های گوناگون نظری به خاطر خواص غیرخطی مصالح و کرنش‌های بزرگ مرتبط با مسئله، با مشکل روبرو خواهند بود. در این قسمت به خاطر زمینه عددی مقاله، تنها روش عددی توصیف می‌شود [۲].

۲-۱- روش‌های عددی

از روش‌های متداول عددی، روش المان محدود و تفاضل محدود است [۳]. این روش‌ها به دو گروه با توانایی مدل‌سازی کرنش‌های کوچک^۱ و توانایی مدل‌سازی کرنش‌های بزرگ^۲ تقسیم می‌شوند. در تحلیل کرنش‌های کوچک، مخروط، داخل گمانه از پیش حفاری شده فرستاده می‌شود به گونه‌ای که خاک‌های اطراف هنوز در وضعیت تنش‌های برجا است و مقاومت نوک مخروط برابر بار گسیختگی است. این روش کارا و دقیق نیست، زیرا هنگام نفوذ مخروط به داخل خاک، تنش‌های جانبی در نزدیکی بدنه تمایل به افزایش دارند و همان‌گونه که انتظار می‌رود، ایجاد تنش در اطراف بدنه باعث افزایش مقاومت نوک مخروط می‌شود. چون در مدل تحلیل کرنش‌های کوچک المان محدود، این امر در نظر گرفته نمی‌شود، نتایج این روش کمتر از مقادیر واقعی خواهند بود. برای در نظر گرفتن آثار نفوذ مخروط بر شرایط تنش‌های اولیه، باید از تئوری کرنش‌های بزرگ استفاده شود؛ زیرا در آزمایش CPT، میزان نفوذ مخروط، چند برابر قطر مخروط است و در این وضعیت، تغییر شکل‌های پلاستیک رخ می‌دهند. چنین نفوذ بزرگی که سبب افزایش تنش‌های القایی اطراف بدنه مخروط می‌شود، ایجاب می‌کند که تحلیل کرنش‌های بزرگ در روش عددی بکار گرفته شود. تحلیل مسائل با تغییر شکل‌های بزرگ به دو صورت زیر در فرمول بنادی مسئله انجام می‌شود:

۱- استفاده از توصیف لاگرانژی^۳

۲- استفاده از توصیف اویلری^۴

در توصیف لاگرانژی، المان بندی و جسم مورد تحلیل به هم متصل است و با هم جابجا می‌شود و تغییر شکل می‌دهد. در این روش، المان‌ها در محل قبلی خود باقی نمی‌ماند و به شکل اولیه خود نیز نیست. شکل تغییر یافته المان‌ها در تحلیل مسئله ممکن است به شدت تغییر طول و یا دوران کنند که سبب سخت شدن مسائل عددی می‌شود [۴، ۵].

۳- مدل‌سازی عددی

این بخش روند توصیه شده‌ای را برای برخورد با یک مدل عددی با استفاده از نرم‌افزار FLAC بررسی می‌کند. یک مدل‌سازی عددی موفق را می‌توان در هفت گام بیان کرد [۶].

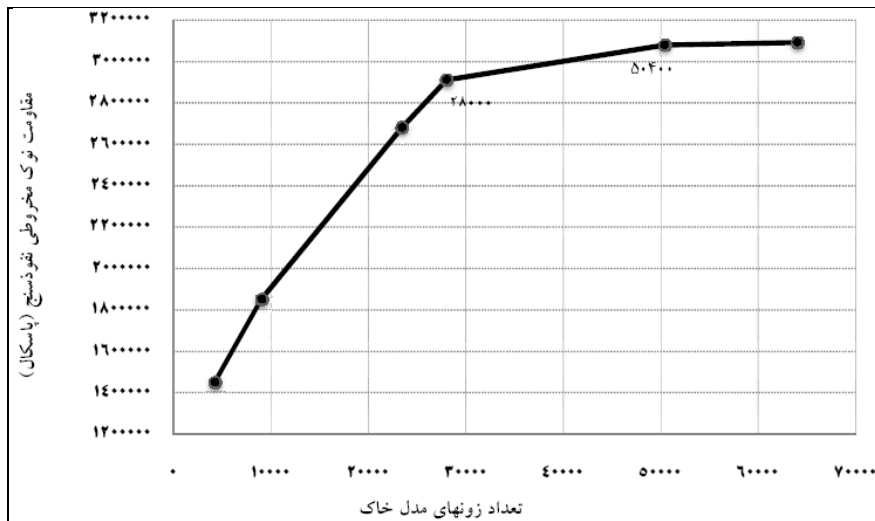
۱-۳- گام اول، تعریف اهداف برای تحلیل مدل هدف

تحلیل مدلی است که در آن، روند نفوذ، قابل اعمال است و حالت پایا در آن برای نفوذ نفوذسنج اصطکاکی (با سطح مقطع مخروط ۱۰ سانتی متر مربع، ارتفاع غلاف ۱۳/۴ میلی-متر و زاویه رأس ۶۰ درجه با سرعت ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه در خاک ریزدانه و چسبنده برای بررسی پاسخ زهکشی نشده خاک) امکان‌پذیر است.

چنین هدفی سازوکار گسیختگی و تغییر شکل‌های پلاستیک را با مدل‌سازی هر چه واقعی‌تر نفوذسنج دنبال می‌کند. با مدل کردن هندسه نفوذسنج به وسیله المان‌ها و حرکت دادن آن در مدل خاک، آثار آن بررسی می‌شود در روش عددی سعی شده مدل‌سازی به شکل کاربردی (وجود نفوذسنج) انجام شود.

3- Lagrangian
4- Eulerian

1- Small Strain
2- Large Strain



شکل (۱) نمودار مش بهینه

روند نفوذ توجه شده است. البته ابعاد مدل از موارد مهم است که با اقتباس از کارهای عددی تا کنون انجام شده، ابعاد ۱ متر عرض در برابر ۲ متر طول در نظر گرفته شده است. همچنین ناحیه‌ها به گونه‌ای در نظر گرفته شده که اندازه آن‌ها در راستای قائم، ثابت و در راستای افقی به سمت مرز، بزرگ می‌شود. بهترین وضعیت مش را می‌توان به صورت شکل ۱، با عنوان مش بهینه^۱ نمایش داد.

نمودار در تعداد مش ۵۰۴۰۰ به یکنواختی رسیده اما در مدل‌سازی از تعداد مش ۲۸۰۰۰ استفاده می‌شود. زیرا مقادیر مقاومت نوک مخروط تفاوت زیادی با هم نداشته (۳/۰۸ با ۲/۹۱ مگاپاسکال) و نرم‌افزار مجهز به دو حالت تحلیل دقت معمولی و دقت مضاعف است و بنابراین از حالت دقت مضاعف در تحلیل استفاده می‌شود که برای بالا بردن ارزش کیفی نتایج است.

۳-۴- گام چهارم، جمع‌آوری داده‌های مربوط به

مسئله

در این مدل‌سازی ضمن استفاده از نتایج مطالعات عددی مختلف، جنبه عملی و کاربردی، بیشتر امکان نفوذ نوک با

مدل‌سازی و رفع مشکلات احتمالی آن روی سایت پروژه کارخانه ذوب آلومینیم جنوب در هفت کیلومتری شمال شهرستان لامرد و جنوب استان فارس انجام و در نهایت، نتایج مدل‌سازی عددی با نتایج آزمایش صحرایی مقایسه می‌شود [۱].

۳-۲- گام دوم، ایجاد یک تصویر مفهومی از سامانه

فیزیکی

تغییر مکان‌های بزرگ کرنش‌های بزرگ اهمیت زیادی دارند زیرا نفوذ نفوذسنج، در اصل روندی با تغییر شکل‌های بزرگ به دنبال دارد. با توجه به موقعیت مکانی پروژه که سازه‌ای در اطراف آن نیست، محیط خاک را می‌توان در حالت دوبعدی بررسی کرد. با توجه به هندسه مسئله و شرایط برابر در دو طرف نفوذسنج، می‌توان آن را به صورت مدل متقارن محوری در نظر گرفت و این موضوع در سرعت بخشیدن به روند تحلیل، تأثیر زیادی دارد.

۳-۳- گام سوم، ایجاد و اجرای مدل‌های دلخواه

ساده

در این زمینه، حدود ۶۰ مدل ساده ساخته شده و بیشتر به

تقارن است. این گودال باعث می‌شود گره‌ای در راستای رأس نوک مخروط نباشد و نفوذسنج ضمن حرکت قائم بتواند نواحی خاک را کنار زده و عمق‌پیمایی بیشتری داشته باشد [۱۱، ۱۲]. با توجه به محدودیت‌های روش لاگرانژی، در این جا سعی شده که با این روش، مسئله تحلیل شود؛ به گونه‌ای که نفوذسنج، نواحی را کنار براند و اندازه‌گیری مقاومت اصطکاکی نیز ممکن شود؛ زیرا مدل‌سازی مجازی نفوذسنج، تنها اندازه‌گیری مقاومت نوک را ممکن می‌سازد. بنابراین استفاده از نرم افزار FLAC لازم است زیرا همه‌ی موارد گفته‌شده را در اختیار دارد.

۳-۵-۱- مشخصات خاک برای ارزیابی پاسخ نرم‌افزار
 مشخصات خاک رس زهکشی‌نشده مورد تحلیل کیوسیز^۲، شامل تنش قائم ۱۰۰ کیلوپاسکال که با تنش افقی برابر است، مدول الاستیسیته ۳۰۰۰۰ کیلوپاسکال، ضریب پواسون ۰/۲۸، و مقاومت برشی زهکشی‌نشده ۵۰ کیلوپاسکال است. و مشخصات خاک رس زهکشی‌نشده مورد تحلیل ون دن برگ^۳، شامل تنش قائم و افقی ۵۰ کیلوپاسکال، مدول الاستیسیته ۶۰۰۰ کیلوپاسکال، ضریب پواسون ۰/۴۹ و مقاومت برشی زهکشی‌نشده ۲۰ کیلوپاسکال است [۵]. با مدل‌سازی مشخصات خاک‌های مورد تحلیل کیوسیز و برگ در مدلی با ابعاد ۱ متر عرض با شرایط مرزی ثابت در دو راستای قائم و افقی در قسمت پائین مدل و ۲ متر ارتفاع با شرایط مرزی ثابت در راستای افق به صورت متقارن محوری، نتایج به صورت جدول ۱ و ۲ است. نتایج گویای آن است که تحلیل به روشی که تشریح می‌شود برای ادامه مدل‌سازی عددی مناسب است.

در نظر گرفتن حائل در رأس نوک مخروطی برای در جای خود نگه داشتن نواحی مجاور نفوذسنج تا زمانی که نفوذسنج به آن‌ها نزدیک شود و از آن‌ها عبور کند و همچنین لایه‌بندی نفوذ نفوذسنج تا عمق ۱۶/۸ متر از سطح زمین که شامل ۶۴ تراز برای خواندن مقاومت نوک و اصطکاکی است، انجام شد و البته این عمق، آخرین تراز است که در آزمایش‌های صحرایی در نظر گرفته شده از عمق ۱۵/۸ متر به بعد تنها یک آزمایش نفوذ مخروط در ناحیه یک، گزارش شده است؛ بنابراین نتایج تا این عمق بررسی می‌شوند.

۳-۵- گام پنجم، آماده سازی اجزای مدل کامل

در این جا تحلیل مسئله به دو قسمت اصلی تحلیل اولیه و تحلیل ثانویه تقسیم می‌شود. در تحلیل اولیه، شرایط برجا شامل تنش‌های برجا و سربار به تعادل می‌رسند اما در تحلیل ثانویه، جابه‌جایی‌ها و سرعت‌های بوجودآمده در تحلیل اولیه صفر می‌شوند و نفوذسنج شروع به حرکت و نفوذ در خاک می‌کند و تا عمق مورد نظر عمق‌پیمایی می‌کند. با تحلیل مدل‌های ساده (گام سوم) برای امکان نفوذ مخروط در خاک، باید گودالی از پیش تعریف‌شده در نظر گرفت؛ به گونه‌ای که در مدلی بدون آن، با شروع نفوذ نفوذسنج در مدل خاک، انباشتگی گره جلوی نوک مخروط اتفاق افتاده و در نتیجه نواحی، شکل‌های ناهنجاری به خود می‌گیرد و در ادامه، نرم‌افزار پیغام "هندسه بد" را اعلام می‌کند، بنابراین تحلیل تا رفع کامل این پیغام متوقف می‌شود. گودال، بنابر تحلیل مدل‌های ساده در راستای نفوذسنج، شعاع ۳/۵ میلی‌متر دارد که در مقایسه با شعاع مخروط (۱۷/۸۵ میلی‌متر) مقدار ناچیزی است در واقع مرکز این گودال، محور

2- Kiouisis
 3- Van Den Berg

1- Bad Geometry

۲-۵-۳- شرایط مرزی

مدل مورد تحلیل بنابر بخش ۲-۳، مدل متقارن محوری است که در آن از مرز مکانیکی تنش و جابه‌جایی هم استفاده شده است. در مسئله نفوذ نفوذسنج، مدل از یک سمت به سطح زمین و از دو سمت دیگر به نواحی نامحدود منتهی می‌شود. بنابر قابلیت‌های مرزی نرم‌افزار FLAC، در حالت استاتیکی، مرز قائم در راستای افق و مرز افقی پایین مدل، هم در راستای قائم و هم در راستای افق، بسته می‌شوند [۶].

ایجاد شرایط موجود در محل انجام می‌شود. در واقع، اطلاعات درباره حالت اولیه، از اندازه گیری‌های محلی به دست می‌آید. در یک لایه یک‌پارچه از خاک یا سنگ با یک سطح آزاد، تنش‌های قائم معمولاً برابر gpz است؛ به گونه‌ای که g شتاب جاذبه زمین، p چگالی مصالح و z عمق زیر سطح زمین است. اما تنش‌های افقی در محل را به سادگی نمی‌توان به دست آورد. معمولاً مجموعه‌ای از تنش‌ها در مدل در نظر گرفته می‌شوند و سپس نرم‌افزار تحلیل می‌کند تا یک حالت تعادل به دست آید [۶].

جدول (۱) توضیح

مقاومت برشی زهکشی نشده	مقاومت نوک، تحلیل عددی کیوسیز [۵]	مقاومت نوک، تحلیل عددی احمدی [۵]	مقاومت نوک، تحلیل عددی این مطالعه
۵۰ KPa	۵۲۵ KPa	۶۵۰ KPa	۵۶۰ KPa

جدول (۲) توضیح

مقاومت برشی زهکشی نشده	مقاومت نوک، تحلیل عددی ون دن برگ [۵]	مقاومت نوک، تحلیل عددی احمدی [۵]	مقاومت نوک، تحلیل عددی این مطالعه
۲۰ KPa	۲۶۶ KPa	۲۷۰ KPa	۲۲۹ KPa

جدول (۳) ویژگی‌های خاک اشباع ناحیه یک

لايه بندي خاک	چگالی اشباع (کیلو پاسکال)	چسبندگی زهکشی نشده (کیلو پاسکال)	مدول برشی (مگا پاسکال)	مدول بالک (مگا پاسکال)	نسبت پیش تحکیمی
لايه اول ۰-۴ متر	۱۹/۶۴	۷۷	۹۴	۵۴۶	۵/۳۲
لايه دوم ۴-۱۰ متر	۱۹/۵۸	۷۷	۱۴۳	۳۴۳۲	۳/۷۷
لايه سوم ۱۰-۱۶ متر	۱۹/۶۷	۷۷	۱۸۱	۴۸۲۳	۲/۳
لايه چهارم ۱۶-۲۲ متر	۱۹/۶۹	۷۷	۱۹۶	۵۰۲۱	۲

۴-۵-۳- انتخاب مدل رفتاری

برای تعریف رفتار خاک، مدل موهر-کولمب به کار برده می‌شود. مدل الاستیک با مشخصات فولاد نیز برای نفوذسنج در نظر گرفته می‌شود تا رفتاری صلب در برابر خاک داشته باشد.

۵-۵-۳- ویژگی‌های مصالح

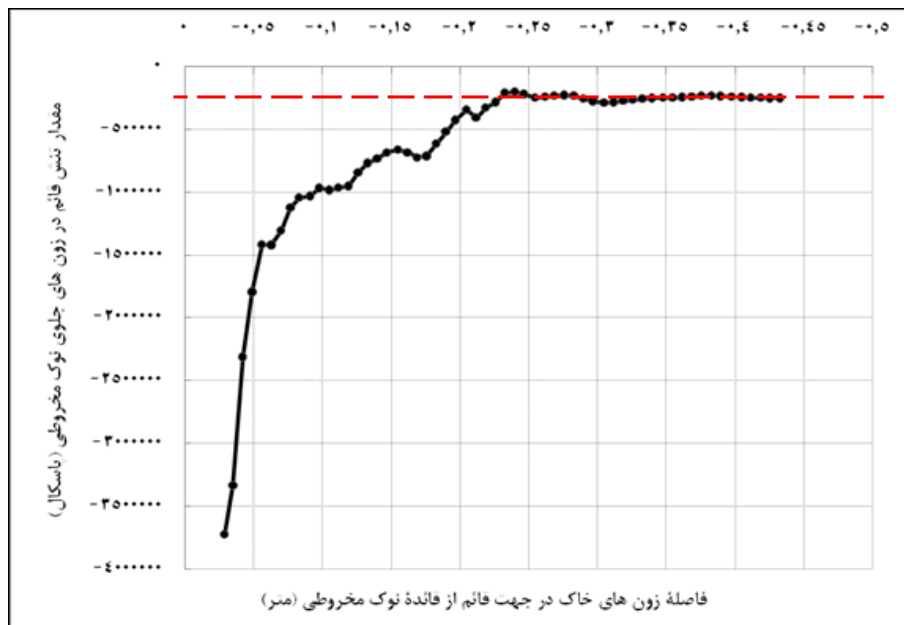
ویژگی‌های مصالح مورد نیاز در FLAC، در یکی از دو گروه ویژگی‌های تغییر شکل پذیری الاستیک و ویژگی‌های مقاومتی قرار می‌گیرد. ویژگی‌های مصالح با توجه به گزارش آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی از سایت پروژه شهرستان لامرد، استخراج شد که در جدول ۳ دیده می‌شود.

۶-۵-۳- سطوح مشترک

FLAC، سطوح مشترک خاصی را به وجود می‌آورد که به وسیله لغزش کولمب و یا جدایش کششی، شناخته می‌شوند. سطوح مشترک، ویژگی‌های اصطکاک، چسبندگی، اتساع، مقاومت برشی و مقاومت کششی را دارند.

۳-۵-۳- شرایط اولیه

با تعریف شرایط اولیه در مدل FLAC، در واقع تلاشی برای



شکل (۲) نمودار تأثیر نوک مخروط روی خاک جلوی نوک مخروطی

$$k_s = k_n = 10 \times \text{Max}[(K + (4/3)G) / (\Delta Z_{\min})] \quad (۴)$$

که K و G به ترتیب مدول بالک و برشی و ΔZ_{\min} کوچکترین عرض ناحیه مجاور در راستای قائم بر سطح مشترک است [۶].

۳-۶- گام ششم، اجرای محاسبات مدل

اجراها باید در هر مرحله کنترل شوند تا اطمینان حاصل شود که واکنش درست است. وقتی اطمینان حاصل شد که مدل به درستی کار می‌کند، چند فایل داده را می‌توان به یکدیگر متصل کرد تا یک سلسله مراتب محاسباتی کامل، اجرا شود.

۳-۷- گام هفتم، ارائه نتایج برای تفسیرها

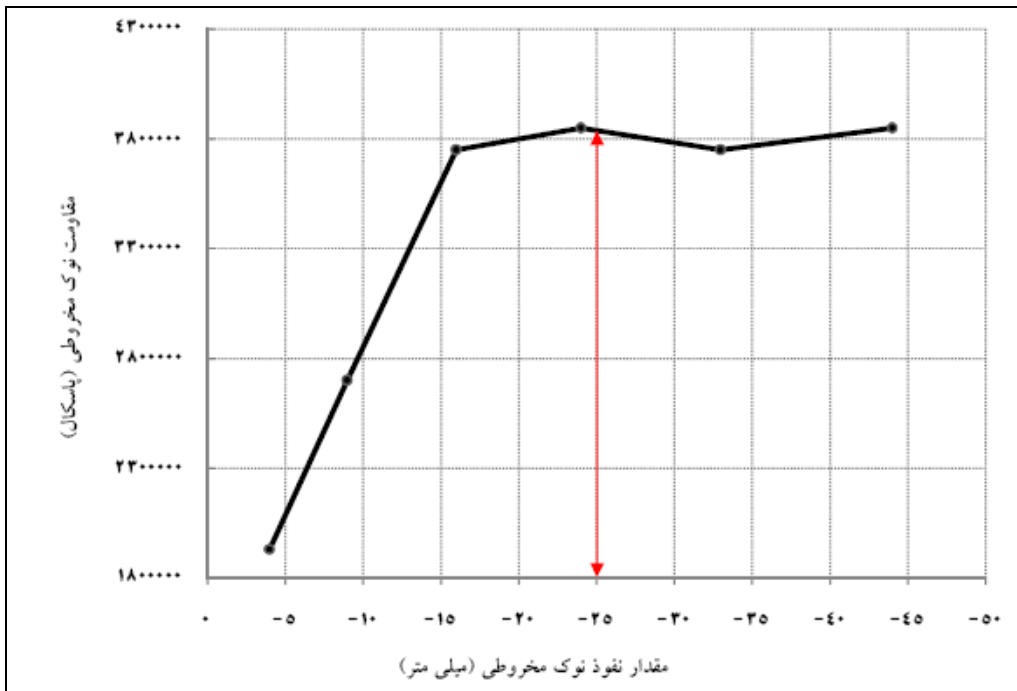
مرحله پایانی حل مسئله، ارائه نتایج برای تفسیر و تحلیل است. این کار تحت عنوان حساسیت مقاومت نوک مخروط، ایجاد حالت نفوذ ثابت، ارزیابی بردارهای جابه‌جایی و منحنی میزان‌های تنش‌ها و مقاومت نوک و اصطکاک، با ارائه نتایج گرافیکی انجام می‌شود.

۳-۵-۶-۱- فرمول بندی

سه حالت برای تعیین شرایط سطح مشترک وجود دارد؛ سطوح مشترک چسبیده، مقاومت برشی کولمب و باند کششی. در این جا شیوه سوم بحث می‌شود.

۳-۵-۶-۱-۱- باند کششی

در این حالت، مقاومت باند کششی برای تنش‌های نرمال و برشی برای تنش‌های تماسی وجود دارد و اگر تنش‌ها از مقدار مقاومت باند بیشتر شوند، جداشدگی و لغزش با توجه به نوع تنش مورد نظر رخ خواهد داد. مقاومت باند برشی پیش‌فرض، ۱۰۰ برابر مقاومت باند کششی است [۶] و با توجه به این‌که مدل‌سازی به صورت زهکشی‌نشده است چسبندگی سطح مشترک، ۵۰٪ چسبندگی زهکشی‌نشده مصالح خاک [۷]، زاویه اصطکاک، صفر، و مقاومت باند برشی و کششی آن گونه که توضیح داده شد، در نظر گرفته می‌شود. سطح مشترک، سختی برشی نرمال دارد که از رابطه (۴) به دست می‌آید:



شکل (۳) نمودار حالت نفوذ ثابت

۱-۷-۳- حساسیت مقاومت نوک مخروط نفوذسنج

در این پژوهش، هر تراز مورد نظر برای خواندن مقاومت نوک و اصطکاک در مدلی جداگانه بررسی می‌شود. بنابراین لحاظ کردن اثر حرکت نوک مخروط روی تنش‌های نواحی تراز بعدی را می‌توان با ترسیم تنش‌های قائم نواحی که در راستای نوک مخروطی قرار دارند، بررسی کرد. شکل ۵، نشان می‌دهد که فاصله ۲۵ سانتی‌متری از قاعده مخروط، شروع یکنواخت شدن مقادیر تنش‌ها است و می‌توان گفت این فاصله، ۷ برابر قطر مخروط است. بنابراین تأثیر نوک مخروط را باید در تراز بعدی در نظر گرفت. بررسی‌ها نشان می‌دهند که مقدار این تأثیر به طور متوسط، ۰/۲۵ مگاپاسکال (خط چین در شکل ۲) است که به مقاومت نوک محاسبه‌شده در تراز بعدی اضافه می‌شود.

۲-۷-۳- ایجاد حالت نفوذ ثابت و کاربرد آن

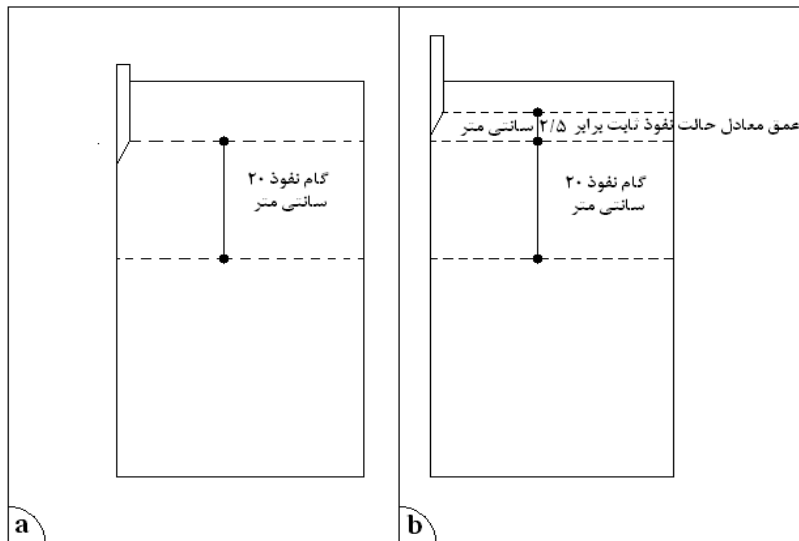
عمق پیمایی نفوذسنج در خاک تا جایی که قطر گودال

به دست آمده از نفوذ، به قطر مخروط برسد (انبساط حفره) ادامه دارد و بعد از آن، تنش‌ها به یکنواختی می‌رسند. میزان عمق پیمایی که در آن حالت، نفوذ ثابت به وجود آید، مطابق شکل ۳ نشان داده شده است که تقریباً عمق ۲۵ میلی‌متر را می‌توان عمقی دانست که در آن تنش‌ها به یکنواختی می‌رسند. گام‌های نفوذ مخروط برای خواندن مقاومت نوک و اصطکاک هر ۲۰ سانتی‌متر (گام نفوذ مخروط) است. بنابراین، نیاز است در یک گام، حالت نفوذ ثابت تا قبل از رسیدن نوک مخروط به عمق مورد نظر به وجود آید. این امر به دو حالت انجام می‌شود:

۱- نفوذسنج از ۲۰ سانتی‌متر قبل از عمق مورد نظر شروع به حرکت کند (شکل ۴a).

۲- بنابر شکل ۴، عمق حالت نفوذ ثابت با احتساب گام نفوذ به عنوان عمق آغازین نفوذ در نظر گرفته شود (شکل ۴b).

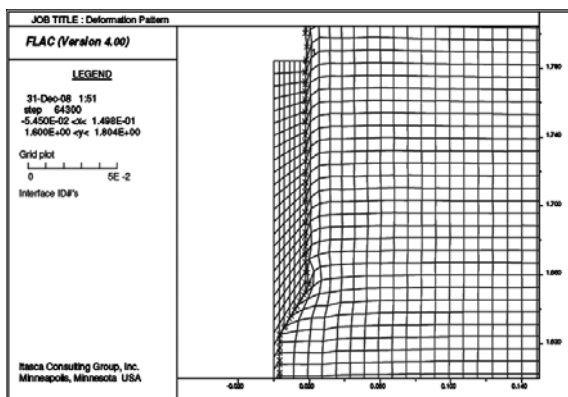
در این مطالعه از روش دوم استفاده شده تا تأثیر بررسی هر عمق در مدل، جداگانه کاهش یابد.



شکل (۴) عمق آغازین نفوذ نفوذسنج

۴-۷-۳- مقاومت نوک و مقاومت اصطکاکی

مقاومت نوک با احتساب تنش قائم نواحی که در تماس با نوک مخروطی است محاسبه و ترسیم می شود تنش های برشی نواحی در مجاور غلاف اصطکاکی، نیز برای محاسبه مقاومت اصطکاکی در نظر گرفته شده و ترسیم می شوند.



شکل (۵) تغییر شکل نواحی اطراف نفوذسنج

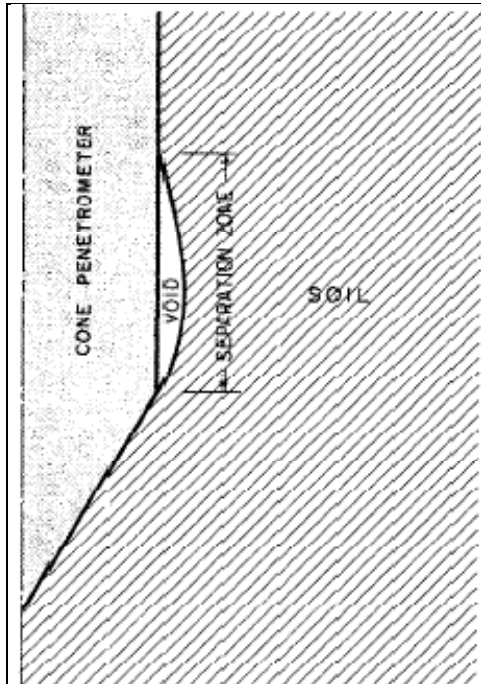
بین مصالح خاک و غلاف اصطکاکی هنگامی که نفوذسنج شروع به عمق پیمایی می کند، در قسمت بالای قاعده نوک مخروطی، جداشدگی رخ می دهد و در همه ی فرایند نفوذ، این جداشدگی همراه نوک مخروط وجود دارد. این

۳-۷-۳- ارزیابی بردارهای جابه جایی و منحنی تنش های

قائم و افقی

شکل مخروطی نوک نفوذسنج که در واقع حالت گوه ای دارد، در حالی که در خاک نفوذ می کند، نواحی خاک را مطابق شکل ۵، هم زمان به سمت پایین و کناره ها می راند. با تعریف سطح مشترک بین مصالح خاک و نفوذسنج، تلاش شده برهم کنش این دو، مدل شود تا تأثیر آن روی جابه جایی نواحی مجاور نفوذسنج در نظر گرفته شود. همان گونه که انتظار می رفت، بردار جابه جایی در مجاورت نفوذسنج، بیشترین اندازه را دارد و به سمت پایین و کناره ها از اندازه آن، چرا که تحت تأثیر کمتر نفوذسنج است، کاسته می شود. شکل های ۶ و ۷، ضمن نمایش منحنی میزان تنش ها (که در آن به علت تراکم منحنی میزان ها در نزدیکی نوک مخروطی، تنها مقدار سه منحنی میزان مشخص شده است) در اطراف نوک مخروطی، گویای کاهش تأثیر نفوذسنج در فواصل دورتر و رخداد گسیختگی در محل تنش های بالا است که در مجاورت نوک مخروطی است.

می کند درحالی که در این مطالعه، سعی شده با کوچک تر نگه داشتن نواحی اطراف نوک مخروط، از این مقدار کاسته شود.

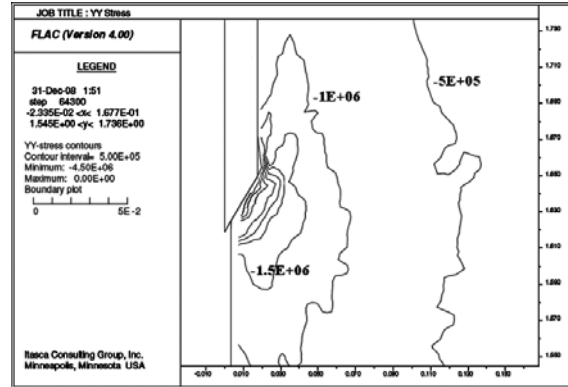


شکل (۸) طرح جداشدگی نفوذسنج- خاک در طول نفوذ [۸]

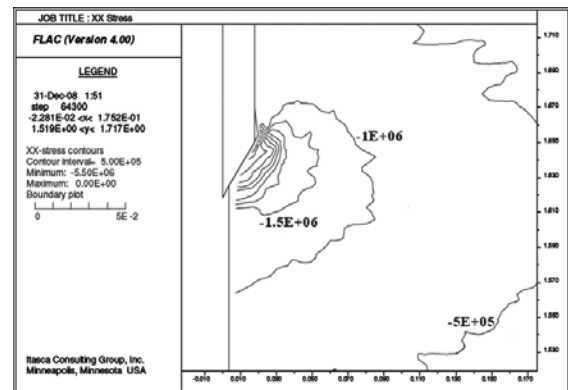
البته از این مسئله نمی توان چشم پوشید و گزارش های آزمایش های صحرایی پیروزکن درباره فشار آب حفره های منفی هنگامی که حسگر اندازه گیری فشار آب در قسمت بالای نوک مخروطی قرار دارد، دلیلی بر درستی این مسئله است [۹، ۱۱].

در این مطالعه، میزان جداشدگی تقریباً ۱۵ میلی متر کاهش یافته است. بنابراین طولی که نفوذسنج و مصالح خاک از هم جدا است، ۲۰ میلی متر و ضخامت آن کوچک است. محل پروژه، شهرستان لامرد، طبق برنامه ریزی آزمایش های آزمایشگاهی صحرایی و به چهار ناحیه تقسیم شده است. نتایج مقاومت نوک مخروطی و اصطکاکی، مربوط به ناحیه یک از چهار ناحیه سایت است. در این سایت، مقادیر بیشینه و کمینه مقاومت نوک و اصطکاکی در

موضوع اهمیت دارد زیرا بر خواندن تنش برشی نواحی واقع در این محل، تأثیر می گذارد.



شکل (۶) منحنی میزان تنش های قائم



شکل (۷) منحنی میزان تنش های افقی

در واقع نواحی که در این محل قرار می گیرند، بنابر آنچه در رابطه با کیفیت سطوح مشترک بیان شد، از خواندن تنش برشی حذف می شوند. در این رابطه، کیوسیز، جدایی ناحیه ها از غلاف، بالای نوک مخروطی را علت کاهش فشار آب حفره های دانسته و حتی، بیان کرده لانی فشار آب حفره های منفی را گزارش کرده است. به همین دلیل توصیه می شود که از به کارگیری حسگرهای اندازه گیری فشار آب حفره های در این ناحیه خودداری شود. پس خواندن تنش ها در این ناحیه برای بررسی تنش برشی برای استفاده در مقاومت اصطکاکی، بی اعتبار است [۸، ۹]. کیوسیز یک فاصله جداشدگی ۳۵ میلی متر را طبق شکل ۸، مطرح

Q_t : مقاومت نوک نرمال شده

q_t : مقاومت نوک اصلاح شده به وسیله فشار آب حفره‌ای طبق رابطه‌ی ۷ است:

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \quad (7)$$

q_c : مقاومت نوک اندازه‌گیری شده،

u_2 : فشار آب حفره‌ای اندازه‌گیری شده در بالای قاعده مخروط،

a : نسبت مساحت شبکه که از کالیبراسیون مخروط در محفظه سه‌محوری به دست می‌آید؛

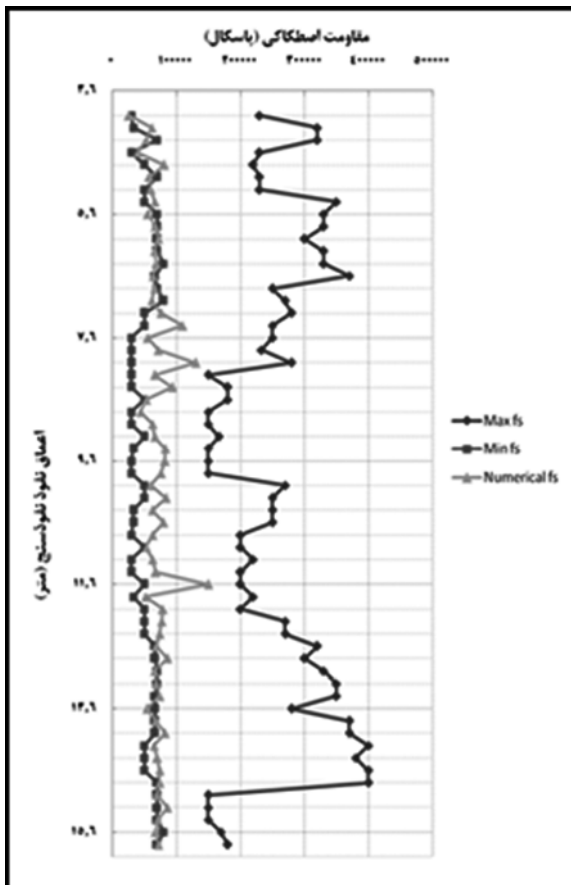
$\sigma'v_0$: تنش سربار کل؛

$\sigma'v_0$: تنش سربار مؤثر؛

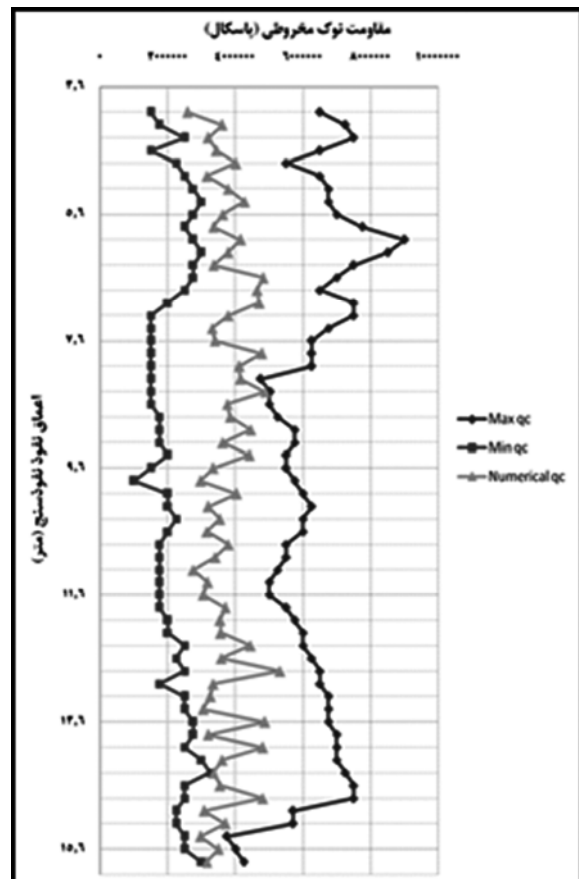
هر تراز آزمایش صحرائی مشخص شده و ترسیم می‌شود و در نتیجه، نمودارهای نتایج عددی باید در این بازه نموداری قرار بگیرند. شکل ۹ نشان می‌دهد نمودار نتایج مدل‌سازی عددی در بازه نموداری مورد نظر قرار گرفته و مقاومت نوک مخروطی به خوبی مدل‌سازی شده است. شکل ۱۰ گویای آن است که نمودار به دست آمده از نتایج مدل‌سازی عددی تقریباً بر مقادیر کمینه منطبق شده است. برای بررسی ارزش نتایج به روشی دیگر، استفاده از نمودار رابرتسون مطرح می‌شود. قبل از این که نتایج بررسی شوند، روابط ۵، ۶ و پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$Q_t = (q_t - \sigma'v_0) / \sigma'v_0 \quad (5)$$

$$F_r = f_s / (q_t - \sigma'v_0) \times 100\% \quad (6)$$



شکل (۱۰) نمودار مقاومت اصطکاکی در این مطالعه برای ناحیه یک



شکل (۹) نمودار مقاومت نوک مخروطی در این مطالعه برای ناحیه یک

F_r : نسبت اصطکاک نرمال شده

f_s : مقاومت اصطکاکی اندازه گیری شده است

مطابق شکل ۱۱، رابرتسون هر ناحیه را معرف بازه طبقه خاصی از خاک در نظر گرفته است. مطابق شماره گذاری هر ناحیه، طبقه بندی خاک به شرح زیر است:

۱- خاکهای ریزدانه و حساس؛

۲- خاکهای ارگانیک؛

۳- رس تا رس سیلت دار؛

۴- رس سیلت دار تا سیلت رس دار؛

۵- سیلت ماسه ای تا ماسه سیلت دار؛

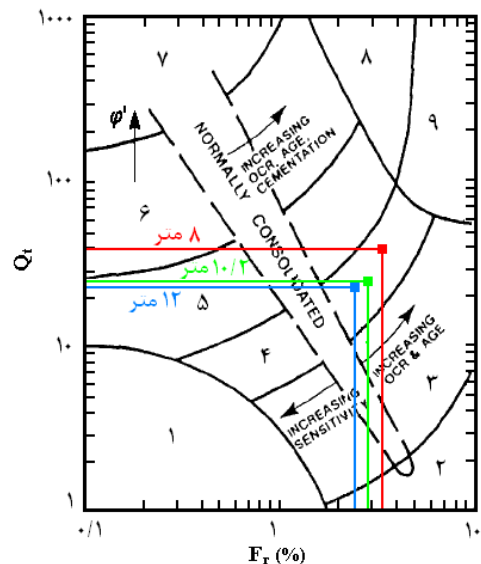
۶- ماسه سیلت دار تا ماسه؛

۷- ماسه تا ماسه شن دار؛

۸- ماسه - ماسه رس دار تا ماسه خیلی سخت

۹- خاک چسبنده، پیش تحکیم یافته، خیلی سخت، ریزدانه [۹]

با استفاده از روابط ۵ و ۶ و با در نظر گرفتن مقادیر جدول ۴ که از نتایج عددی استخراج شده، می توان مقادیر آن را ترسیم و کیفیت را بررسی کرد. از شکل ۱۱ و قرار گرفتن نتایج جدول ۴ در ناحیه ۴، مشخص است که نوع خاک، رس سیلت دار تا سیلت رس دار معرفی می شود که با گزارش پروژه در سایت شهرستان لامرد (مبنی بر این که خاک زیرسطحی به گونه ای معمول شامل مصالح ریزدانه ای است که بیشتر در رده رس لاغر یا سیلت قرار می گیرد)، برابری می کند. همچنین نتایج عددی با طبقه بندی ارائه شده به وسیله اسلامی و فلنیوس نیز بررسی می شود. بنابراین، رابطه ۸، اهمیت دارد؛ به این معنی که استفاده از این رابطه، مستلزم اندازه گیری فشار آب حفره ای در شانه مخروط است؛ حال آنکه موضوع بحث پیرامون نفوذسنج اصطکاکی بدون اندازه گیری فشار آب حفره ای است. بررسی ها نشان می دهد که مقادیر کم فشار آب حفره ای در شانه مخروط، چندان زیاد نخواهد بود بنابراین از مقاومت های نوک، بدون در نظر گرفتن فشار آب حفره ای استفاده می شود.



شکل (۱۱) نمودار تشخیص نوع خاک [۹]

جدول (۴) مقادیر نتایج عددی

تراز عمق	۸ متر	۱۰/۲ متر	۱۲ متر
σ_{v0} (کیلو پاسکال)	۱۴۲/۶	۱۸۲	۲۲۱
σ'_{v0} (کیلو پاسکال)	۱۰۱	۱۲۰	۱۴۰
q_t (مگاپاسکال)	۴/۱	۳/۲	۳/۵
f_s (کیلو پاسکال)	۱۳۰	۸۴	۸۰
F_r	۳/۳	۲/۸	۲/۴
Q_t	۳۹	۲۵	۲۳

$$q_E = (q_t - u_2) \quad (۸)$$

q_E : مقاومت نوک مؤثر؛

q_t : مقاومت نوک تصحیح شده برای فشار آب منفذی روی شانه و

u_2 : فشار منفذی اندازه گیری شده در شانه مخروط

در شکل های ۱۲ و ۱۳ نتایج تنها در سه عمق بررسی می شوند. بنابراین در این شکل ها، نقاط پیرامون مرز بین ناحیه ۳ و ۴ متمرکز است و طبقه خاک یکسانی را نشان می دهد؛ بنابراین می توان نتایج عددی را مناسب دانست.

در خاک میسر شد. در ادامه، نتایج ارائه می‌شود:

۱- مدل‌هایی برای به دست آوردن مش بهینه بررسی و مدل خاکی با ۲۸۰۰۰ ناحیه برای تحلیل اصلی، مناسب شناخته شد.

۲- مقایسه و مطابقت مقاومت نوک حاصل از تحلیل خاک رسی با مشخصاتی که کیوسیز و ون دن برگ در نظر گرفتند، با مقاومت نوکی که از تحلیل همان خاک‌ها با روش گفته شده به دست آمده گویای آن است که این روش اعتبار لازم برای بررسی خاک رسی در سایت پروژه لامرد را دارد.

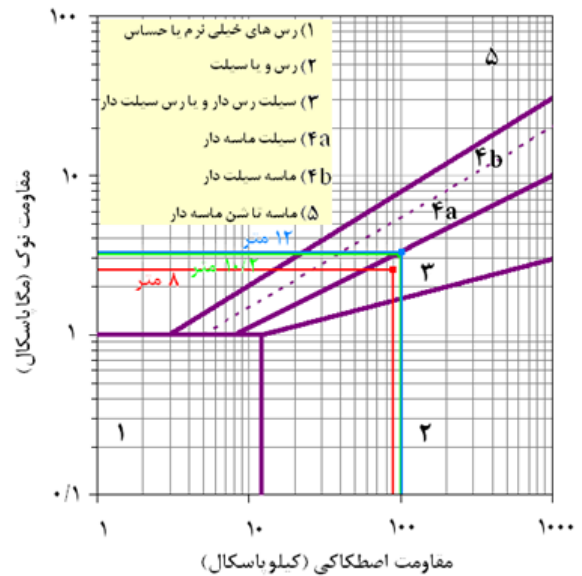
۳- تأثیر نوک مخروط به اندازه ۷ برابر قطر آن از قاعده مخروط به سمت جلوی نوک آن بوده است. بنابراین نمی‌توان از لحاظ کردن این تأثیر به مقدار ۰/۲۵ مگاپاسکال (به خاطر این که از مقدار گام نفوذ، بیشتر است)، در مقادیر تراز بعدی چشم‌پوشی کرد.

۴- برای شروع نفوذ نفوذسنج، ایجاد حالت نفوذ ثابت و تعیین عمق آغازین نفوذ اهمیت دارد. پس لازم است نفوذ به اندازه ۲۵ میلی‌متر (۱/۴ شعاع مخروط) انجام شود و از آن می‌توان در کاهش تأثیر نوک مخروط در تراز بعدی و تعیین عمق آغازین نفوذ با توجه به گام نفوذ ۲۰ سانتی‌متر استفاده کرد. این امر به دو حالت انجام می‌شود:

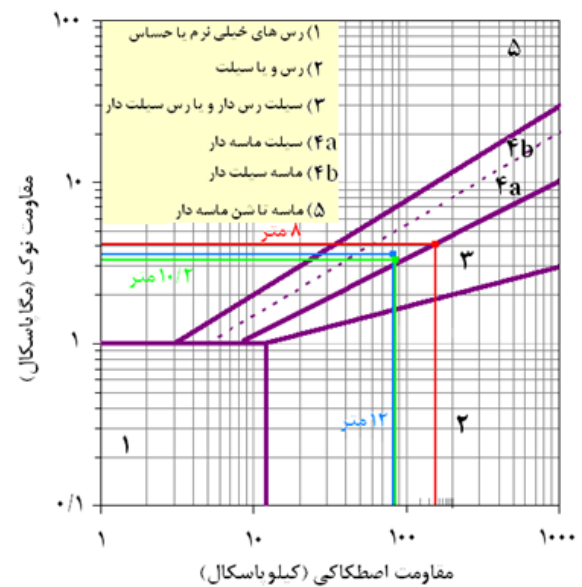
۱- نفوذسنج از ۲۰ سانتی‌متر قبل از عمق مورد نظر شروع به حرکت کند.

۲- عمق معادل حالت نفوذ ثابت با احتساب گام نفوذ، به عنوان عمق آغازین نفوذ در نظر گرفته شود. در این مطالعه از روش دوم استفاده شده تا به گونه‌ای غیرمستقیم، تأثیر بررسی هر عمق در مدل، جداگانه کاهش یابد.

۵- جداشدگی بین مصالح خاک و نفوذسنج طی روند نفوذ وجود دارد و در مقادیر تنش برشی یا به عبارت دیگر مقاومت اصطکاکی مؤثر است. این جداشدگی در مطالعات



شکل (۱۲) ارزیابی خاک سایت با میانگین نتایج آزمایش صحرایی در سه عمق [۱۰]



شکل (۱۳) ارزیابی خاک سایت با نتایج مدل‌سازی عددی

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه سعی شده است با بهره بردن از اطلاعات تئوری و تحلیلی که در مطالعات پارامتری مطرح شده، مسئله، کاربردی و عملی باشد. بنابراین نفوذ تا اعماق زیاد

گویای آن است که مقاومت نوک، تغییر کمی خواهد داشت؛ از اینرو، مقاومت‌های نوک مخروط حاصل از سایت و مدل‌سازی، بدون تأثیر فشار آب حفره‌ای، استفاده می‌شود. مقایسه نتایج، انطباق خوبی را نشان می‌دهد.

۵- منابع

- [1] نعمتی، «مدلسازی آزمایش نفوذ مخروط (CPT)»؛ پایان نامه کارشناسی ارشد؛ عمران، خاک و پی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ ۱۳۸۸.
- [2] Yu, H. S.; Mitchell, J. K.; "Analysis of Cone Resistance: Review of Methods", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1998; pp 140-147.
- [3] Carter, J. P.; Desai, C. S.; Potts, D. M.; Schweiger, H. F.; Sloan, S.W.; An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering; 19-24 November 2000, Melbourne Australia.
- [4] حیدری، غ م؛ «مطالعه عددی آزمایش CPT در خاک‌ها»؛ پایان نامه کارشناسی ارشد؛ عمران، خاک و پی؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ ۱۳۷۷.
- [5] Ahmadi, M. M.; "Analysis of Cone Tip Resistance in sand", Ph.D thesis, The University of British Columbia, Vancouver, B.C., 2000.
- [6] FLAC User Manual, Version 4.00, Itasca Consulting Group Inc., USA, 2002.
- [7] Huang, W.; Sheng, D.; Sloan, S. W.; Yu, H. S.; "Finite Element Analysis of Cone Penetration in Cohesionless Soil", Computers and Geotechnics 31, pp 517-528, 2004.
- [8] Kioussis, P. D.; Voyiadjis, G. Z.; Tumay, M. T.; "A Large Strain Theory and its Application in the Analysis of the Cone Penetration Mechanism", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.12, No.1, 1988, pp 45-60.
- [9] Lunne, T.; Robertson, P. K.; Powell, J. J. M.; "Cone Penetration Testing In Geotechnical Practice", Blackie Academic & Professional, 1997.

کیوسیز، ۳۵ میلی‌متر است ولی در این مطالعه، به ۲۰ میلی‌متر رسیده است. اما از وجود آن نمی‌توان پیش‌گیری کرد زیرا کیوسیز؛ علت کاهش فشار آب در قسمت بالای قاعده مخروط (شانه مخروط) را همین می‌داند و حتی در این زمینه لانی فشار آب منفی را گزارش می‌کند و در واقع می‌توان آن را به اتساع خاک در این ناحیه نسبت داد.

۶- نتایج مقاومت نوک مخروطی و اصطکاکی مربوط به ناحیه یک از چهار ناحیه سایت است. در این سایت، مقادیر بیشینه و کمینه مقاومت نوک و اصطکاکی در هر تراز مشخص و ترسیم شده و نمودار مقاومت نوک مخروطی حاصل از مدل‌سازی عددی، به خوبی در بازه نموداری مورد نظر قرار گرفت. نمودار مقاومت اصطکاکی به‌دست‌آمده از نتایج مدل‌سازی عددی، تقریباً بر مقادیر کمینه منطبق شده است. برای بررسی ارزش نتایج، این موضوع با استفاده نمودار پروفیل خاک رابرتسون (۱۹۹۰) بررسی شد.

۷- در ناحیه ۴، مشخص است که نوع خاک رس سیلت‌دار تا سیلت رس‌دار معرفی می‌شود که با گزارش پروژه در سایت شهرستان لامرد برابری می‌کند. از طرفی، مشخص است که در عمق کمتر یعنی همان ۸ متر، بالاتر از دو نقطه دیگر است؛ به این معنی که به سمت OCR بیشتر است و دو نقطه دیگر یعنی ۱۰/۲ و ۱۲ متر به سمت ناحیه عادی تحکیم‌یافته سوق یافته‌است؛ و این موضوع با واقعیت مطابقت دارد. زیرا در عمق ۸ متر، خاک نسبت پیش‌تحکیمی ۳/۷۷ دارد و در دو مورد دیگر خاک نسبت پیش‌تحکیمی ۲/۳ دارد.

۸- نتایج با نمودار اسلامی و فلنیوس نیز بررسی شد با توجه به اینکه نمودارهای پروفیل خاک مربوط به منطقه ای است که داده‌ها از آن استخراج شده است.

۹- محاسبه فشار آب حفره‌ای و اضافه کردن آن به مقاومت نوک و سپس کم کردن آن از مقاومت کل برای به‌دست آوردن مقاومت نوک مؤثر برای نمودار اسلامی و فلنیوس

- [12] Abu-Farsakh, M.; Tumay, M.; Voyiadjis, G.; "Numerical Parametric Study of Piezocone Penetration Test in Clays", International Journal of Geomechanics, ASCE, 2003.
- [10] Fellenius, B. H.; "Basics of Foundation Design", Electronic Edition, 2006.
- [11] Susila, E.; D. Hryciw, R.; "Large Displacement FEM Modelling of the Cone Penetration Test (CPT) in Normally Consolidated", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2003; 27:585-602.

Numerical model of cone penetration determinate difference in cohesive soil:

A. Golshani^{1*}, R. Nemati²

1. Assist. Prof. University of Tarbiat Modares

2. M. Sc. Student University of Tarbiat Modares

golshani@modares.ac.ir

Abstract:

The cone-penetration test (CPT) is a well-established in situ test in geotechnical engineering for soil classification and estimation of soil properties. In a CPT, a cone shaped penetrometer is pushed into the ground at a constant rate. The resistance on the cone tip is measured and is then related to soil classification and soil properties. In this research, the finite difference analysis of large deformations for the cone penetration testing (CPT) in the cohesive soil have been conducted using FLAC 2D Software. In this modeling, interface elements between penetrometer and soil are considered and it is assumed that the penetrometer materials show rigid behavior in reaction to the soil materials. FLAC provides interfaces that are characterized by Coulomb sliding and/or tensile separation. Interfaces have the properties of friction, cohesion, dilation, normal and shear stiffness, and tensile strength there is an in-situ state of stress in the ground, before any excavation or construction is started. In FLAC 2D, an attempt is made to reproduce this in-situ state by setting initial conditions. Ideally, information about the initial state comes from field measurements. Boundary conditions are modeled as axesymmetry. Horizontal and vertical direction at the bottom boundary and horizontal direction at the vertical boundary of soil model are fixed. Soil behavior follows full elastic-plastic model and Mohr-Coulomb failure criterion. Numerical model is analyzed to achieve mesh convergency at the various grids. The values of cone and frictional resistance have been obtained through software calculations and then compared with the results obtained from cone penetration test at the aluminum melt factory in Lamard, Fars Province. Stress and displacement contours are related for evaluation of the penetration process. Steady state is considered to achieve steady stress range in which the hole diameter is equal with the CPT hole. The numerical modeling results of CPT test by FLAC 2D software shows good agreement with the field tests results. Furthermore, the results have been discussed by using Robertson Chart 1986 and Eslami- Felonious Chart 1997. Charts almost show same profile with the field test results at the aluminum melt factory site.

Keywords: Finite difference analysis, Cone penetration, Cone resistance, Interface element, Mesh Convergency