

# مدل‌سازی عددی تفاضل محدود نفوذ مخروط در خاک چسبنده

علی‌اکبر گلشانی<sup>۱\*</sup>، رضا نعمتی<sup>۲</sup>

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

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

golshani@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۱۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۹/۰۶

**چکیده-** در این پژوهش، آنالیز تفاضل محدود تغییر شکل‌های بزرگ برای آزمایش نفوذ مخروط (CPT) در خاک‌های چسبنده، با استفاده از نرم‌افزار FLAC 2D انجام می‌شود. در این مدل‌سازی، المان سطح مشترک بین نفوذسنج و خاک در نظر گرفته شده و مصالح نفوذسنج به گونه‌ای فرض می‌شود که در برابر مصالح خاک، رفتاری صلب داشته باشد. رفتار خاک از مدل الاستیک-پلاستیک کامل و معیار موهر-کولمب تبعیت می‌کند. پارامترهای مقاومت نوک و مقاومت اصطکاکی از محاسبات نرم‌افزار 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 می‌شود. نتایج مدل‌سازی عددی، تطابق خوبی با نتایج آزمایش صحرایی نشان می‌دهد. همچنین مش بهینه، حالت نفوذ دائم، ارزیابی نتایج با نمودار رابرتسون (۱۹۸۶) و نمودار اسلامی و فلننیوس (۱۹۹۷) هم بررسی می‌شود.

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

## ۱- مقدمه

ظرفیت باربری، نشست پی و همچنین برآورد پتانسیل روانگرایی ماسه‌ها، استفاده کرد. استفاده از مشخصات مهم ژئوتکنیکی مانند ظرفیت باربری و مقاومت برشی لایه‌های ماسه‌ای در اعماق، برای به‌کارگیری در طراحی شمع‌ها با افزایش کاربرد این آزمایش، گسترش پیدا کرد.

برای آزمایش نفوذ مخروط که یک مسئله‌ی ژئوتکنیکی است، با توجه به پیشرفت‌های چشم‌گیر در زمینه روش‌های عددی و سخت‌افزارها، بررسی از دیدگاه سرعت و در نتیجه اقتصادی بودن، از تحلیل عددی استفاده شده؛ به گونه‌ای که آن را با بررسی‌های صحرایی و آزمایش‌ها برای به‌دست آوردن پارامترهای طراحی و غیره ترکیب می‌کنند.

## ۲- روش‌های تحلیل آزمایش نفوذ مخروط

برای استفاده گسترده از آزمایش CPT<sup>۱</sup> در مهندسی ژئوتکنیک، لازم است ارتباط درست و معتبری بین مقاومت

### ۱-۱- کاربرد آزمایش نفوذ مخروط

از این آزمایش می‌توان شناسایی لایه‌های خاک، تخمین

1- Cone Penetration Test

نوک مخروطی و خواص مکانیکی خاک، ارائه شود. 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 جمله روش‌های متداول عددی، روش المان محدود و تفاضل محدود است [۳]. این روش‌ها به دو گروه با توانایی مدل‌سازی کرنش‌های کوچک<sup>۱</sup> و توانایی مدل‌سازی کرنش‌های بزرگ<sup>۲</sup> 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 تحلیل با استفاده 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، ایجاد می‌کند که تحلیل کرنش‌های بزرگ در روش عددی به کار گرفته شود. تحلیل مسائل با تغییر شکل‌های بزرگ به دو صورت زیر

در فرمول بندی مسئله انجام می‌شود:

۱- استفاده از توصیف لاگرانژی<sup>۳</sup>

۲- استفاده از توصیف اویلری<sup>۴</sup>

در توصیف لاگرانژی، المان بندی و جسم مورد تحلیل به هم متصل است و با هم جابه‌جا 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 داشته باشد 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. مراحل یک مدل‌سازی عددی موفق را می‌توان در هفت گام بیان کرد [۶].

### ۳-۱- 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 سانتی‌متر مربع، ارتفاع غلاف ۱۳/۴ میلی‌متر و زاویه رأس ۶۰ درجه با سرعت ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه در خاک ریزدانه و چسبنده برای بررسی پاسخ زهکشی‌نشده خاک] 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.

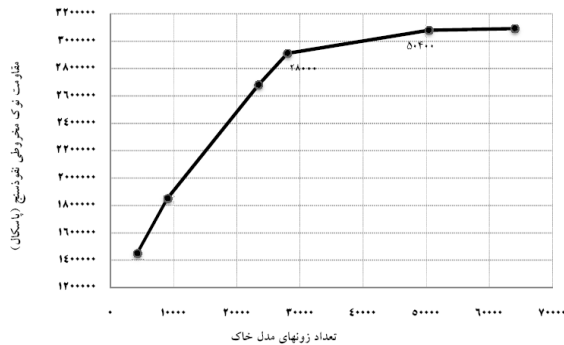
3- Lagrangian  
4- Eulerian

1- Small Strain  
2- Large Strain

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 سعی شده ضمن استفاده از نتایج مطالعات عددی مختلف، جنبه عملی و کاربردی، بیشتر در نظر گرفته شود؛ برای نمونه، امکان نفوذ نوک با در نظر گرفتن حائلی 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 خاک.



شکل (۱) نمودار مش بهینه

نفوذ نفوذسنج تا عمق ۱۶/۸ متر از سطح زمین که شامل ۶۴ تراز برای خواندن مقاومت نوک و اصطکاک است، انجام شد و البته این عمق، آخرین تراز است که در آزمایش‌های صحرایی در نظر گرفته شد. 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، آماده‌سازی اجزای مدل کامل

در این‌جا 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

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 سازه ای در اطراف آن نیست، محیط خاک را می‌توان در حالت دو بعدی 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 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<sup>۱</sup> نمایش داد.

نمودار در تعداد مش ۵۰۶۰۰ به یکنواختی رسیده اما در مدل‌سازی از تعداد مش ۲۸۰۰۰ استفاده می‌شود. زیرا مقادیر مقاومت نوک مخروط تفاوت زیادی با هم نداشته (۳/۰۸ یا ۲/۹۱ مگاپاسکال) و نرم‌افزار مجهز به دو حالت

1- Mesh Convergency

ثانویه، جابه‌جایی‌ها و سرعت‌های به‌وجودآمده 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؛ به‌گونه‌ای 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  $3/5$  میلی‌متر دارد که در مقایسه با شعاع مخروط ( $17/85$  میلی‌متر) مقدار ناچیزی است. در واقع مرکز این گودال، محور تقارن است. این گودال باعث می‌شود گره‌ای در راستای رأس نوک مخروط نباشد و نفوذسنج ضمن حرکت قائم به سمت پایین 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 نرم‌افزار FLAC لازم است زیرا همه‌ی موارد گفته شده را در اختیار

کیلوپاسکال است. مشخصات خاک رس زهکشی‌نشده مورد تحلیل ون دن برگ<sup>۳</sup>، شامل تنش قائم و افقی  $50$  کیلوپاسکال، مدول الاستیسیته  $6000$  کیلوپاسکال، ضریب پواسون  $0/49$  و مقاومت برشی زهکشی‌نشده  $20$  کیلوپاسکال است [۵]. با مدل‌سازی مشخصات خاک‌های مورد تحلیل کیوسیز و برگ در مدلی با ابعاد  $1$  متر عرض با شرایط مرزی ثابت در دو راستای قائم و افقی در قسمت پایین مدل و  $2$  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.

### 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، در راستای قائم و هم در راستای افق، بسته می‌شوند [۶].

جدول (۱)

مقاومت نوک	مقاومت نوک	مقاومت نوک	مقاومت نوک
زهکشی‌نشده	کیوسیز [۵]	تحلیل عددی	تحلیل عددی
$50 \text{ KPa}$	$525 \text{ KPa}$	احمدی [۵]	این مطالعه
		$650 \text{ KPa}$	$560 \text{ KPa}$

جدول (۲)

مقاومت نوک	مقاومت نوک	مقاومت نوک	مقاومت نوک
زهکشی‌نشده	ون دن برگ [۵]	تحلیل عددی	تحلیل عددی
$20 \text{ KPa}$	$266 \text{ KPa}$	احمدی [۵]	این مطالعه
		$270 \text{ KPa}$	$229 \text{ KPa}$

### ۱-۵-۳- مشخصات خاک برای ارزیابی پاسخ نرم‌افزار

مشخصات خاک رس زهکشی‌نشده مورد تحلیل کیوسیز<sup>۲</sup>، شامل تنش قائم  $100$  کیلوپاسکال که با تنش افقی برابر است، مدول الاستیسیته  $30000$  کیلوپاسکال، ضریب پواسون  $0/28$  و مقاومت برشی زهکشی‌نشده  $50$

1- Bad Geometry  
2- Kiouisis

**۳-۵-۳- شرایط اولیه**

با تعریف شرایط اولیه در مدل FLAC، در واقع تلاشی برای ایجاد شرایط موجود در محل انجام شود. در واقع، اطلاعات درباره حالت اولیه، از اندازه گیری‌های محلی به دست می‌آید. در یک لایه یک پارچه 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].

**۳-۵-۶- سطوح مشترک**

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

**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 مقاومت برشی برای تنش‌های تماسی وجود دارد و اگر تنش‌ها از مقدار مقاومت باند بیشتر شوند، جدایشگی و لغزش با توجه به نوع تنش مورد نظر رخ خواهد داد. مقاومت باند برشی پیش فرض، ۱۰۰ برابر مقاومت باند کششی است [۶] و با توجه به این که مدل‌سازی به صورت زهکشی نشده است، چسبندگی سطح مشترک، ۵۰ درصد چسبندگی زهکشی نشده مصالح خاک [۷]، زاویه اصطکاک، صفر و مقاومت باند برشی و کششی آن گونه که چنانکه توضیح داده شد، در نظر گرفته می‌شود. سطح مشترک، سختی برشی نرمال دارد که از رابطه (۱) به دست می‌آید:

**۳-۵-۴- 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.

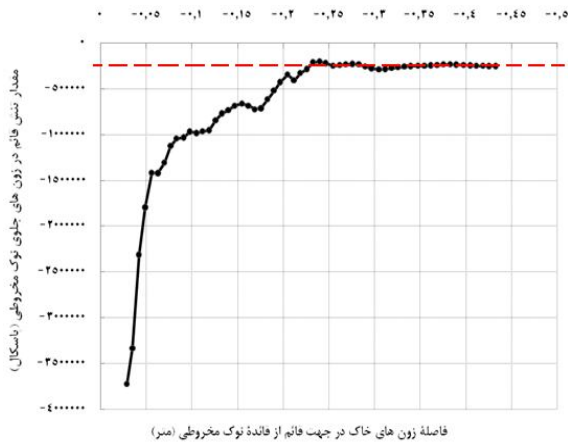
**۳-۵-۵- ویژگی‌های مصالح**

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.

جدول (۳) ویژگی‌های خاک اشباع ناحیه یک

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

این تأثیر به طور متوسط،  $0.25$  مگاپاسکال (خط چین در شکل ۲) است که به مقاومت نوک محاسبه شده در تراز بعدی اضافه می شود.



فاصله زون های خاک در جهت قائم از فاصله نوک مخروطی (متر)

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

### ۳-۷-۲- 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، تنش ها به یکنواختی می رسند. میزان عمق پیمایی که در آن حالت، نفوذ ثابت به وجود آید، مطابق شکل ۳ نشان داده شده است که تقریباً عمق  $25$  میلی متر را می توان عمقی دانست که در آن تنش ها به یکنواختی می رسند. گام های نفوذ مخروط برای قرائتهای مقاومت نوک و اصطکاک، هر  $20$  سانتی متر (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 می شود:

۱- نفوذسنج از  $20$  سانتی متر 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).

$$k_s = k_n = 10 \times \text{Max}[(K + (4/3)G) / (\Delta Z_{\min})] \quad (1)$$

به ترتیب مدول بالک و برشی و  $\Delta Z_{\min}$  کوچک ترین عرض ناحیه مجاور در راستای قائم بر سطح مشترک است [۶].

### ۳-۶- گام هشتم، اجرای محاسبات مدل

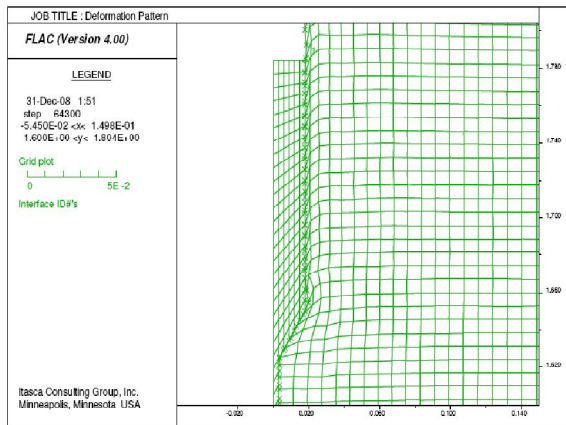
اجراها باید در هر مرحله کنترل شوند تا اطمینان حاصل شود که واکنش، درست است. وقتی اطمینان حاصل شد که مدل به درستی کار می کند، چند فایل داده را می توان به یکدیگر متصل کرد تا یک سلسله مراتب محاسباتی کامل، اجرا شود.

### ۳-۷- گام هفتم، ارائه نتایج برای تفسیرها

مرحله پایانی حل مسئله، ارائه نتایج برای تفسیر تحلیل است. این کار تحت عنوان حساسیت مقاومت نوک مخروط، ایجاد حالت نفوذ ثابت، ارزیابی بردارهای جابه جایی و منحنی میزان های تنش ها و مقاومت نوک و اصطکاک، با ارائه گرافیکی نتایج انجام می شود.

#### ۳-۷-۱- حساسیت مقاومت نوک مخروط نفوذسنج

در این پژوهش، هر تراز مورد نظر برای خواندن مقاومت نوک و اصطکاک در مدلی جداگانه بررسی می شود. بنابراین لحاظ کردن اثر حرکت نوک مخروط روی تنش های نواحی تراز بعدی را می توان با ترسیم تنش های قائم نواحی که در راستای نوک مخروطی قرار دارند، بررسی کرد. شکل ۲، نشان می دهد که فاصله  $25$  سانتی - متری از قاعده مخروط، شروع یکنواخت شدن مقادیر تنش ها است و می توان گفت این فاصله،  $7$  برابر قطر مخروط است. بنابراین تأثیر نوک مخروط را باید در تراز بعدی در نظر گرفت. بررسی ها نشان می دهند که مقدار



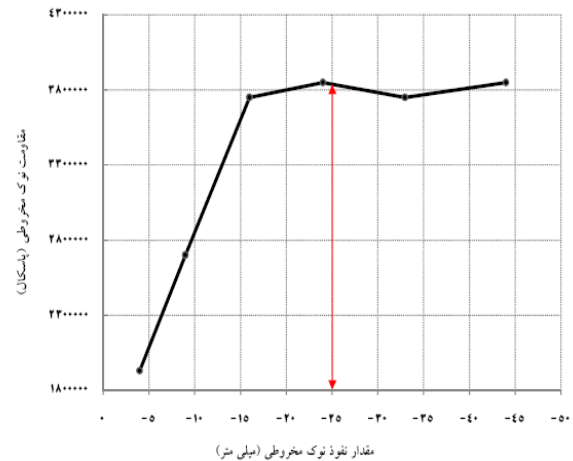
شکل (۵) تغییر شکل نواحی اطراف نفوذسنج

همان‌گونه که انتظار می‌رفت، بردار جابه‌جایی در مجاورت نفوذسنج، بیشترین اندازه را دارد و به سمت پایین و کناره‌ها از اندازه آن، چرا که تحت تأثیر کمتر نفوذسنج است. شکل‌های ۶ و ۷، ضمن نمایش منحنی میزان تنش‌ها (که در آن به علت تراکم منحنی میزان‌ها 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 تنش‌های بالا است که در مجاورت نوک مخروطی است.

#### ۳-۷-۴- مقاومت نوک و مقاومت اصطکاکی

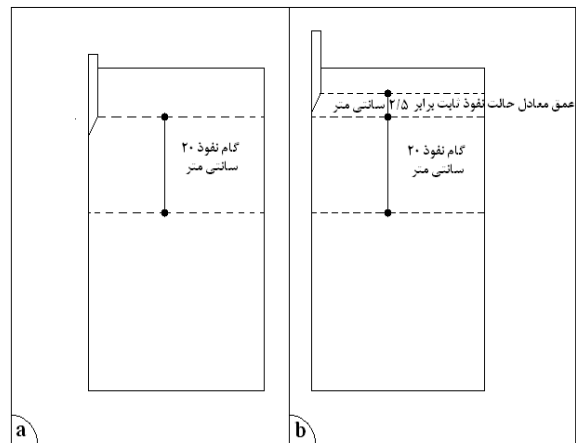
مقاومت نوک با احتساب تنش قائم نواحی که در تماس با نوک مخروطی است، محاسبه و ترسیم می‌شود. تنش‌های برشی نواحی مجاور غلاف اصطکاکی نیز برای محاسبه مقاومت اصطکاکی در نظر گرفته شده و ترسیم می‌شوند.

بین مصالح خاک و غلاف اصطکاکی، هنگامی که نفوذسنج شروع به عمق‌پیمایی می‌کند، در قسمت بالای قاعده نوک مخروطی، جداسدگی رخ می‌دهد و در همه‌ی فرایند نفوذ، این جداسدگی همراه نوک مخروط وجود دارد. این موضوع اهمیت دارد زیرا بر خواندن تنش برشی نواحی واقع در این محل، تأثیر می‌گذارد. در واقع نواحی که در این



شکل (۳) نمودار حالت نفوذ ثابت

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

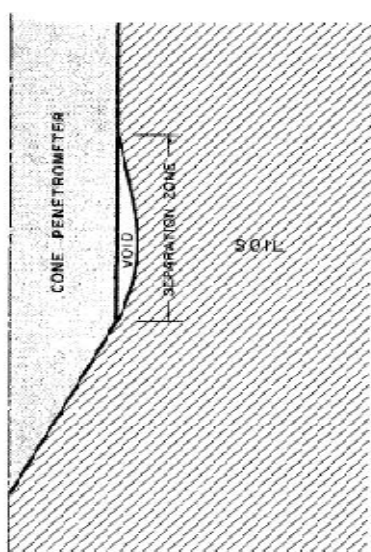


شکل (۴) عمق آغازین نفوذ نفوذسنج

#### ۳-۷-۳- ارزیابی بردارهای جابه‌جایی و منحنی

##### تنش‌های قائم و افقی

شکل مخروطی نوک نفوذسنج که در واقع حالت گوه‌ای دارد، در حالی که در خاک نفوذ می‌کند، نواحی خاک را مطابق شکل، هم‌زمان به سمت پایین و کناره‌ها می‌راند. با تعریف سطح مشترک بین مصالح خاک و نفوذسنج، تلاش شده برهم‌کنش این دو، مدل شود تا تأثیر آن روی جابه‌جایی نواحی مجاور نفوذسنج در نظر گرفته شود.

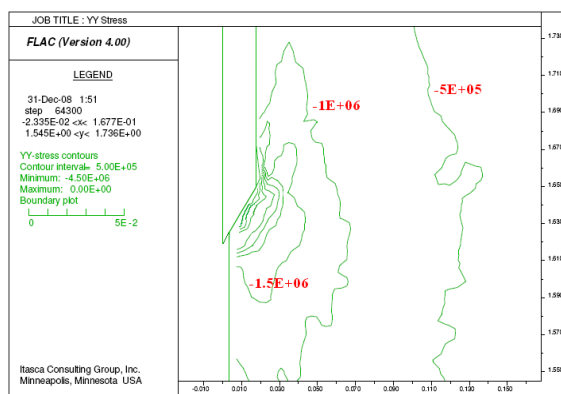


شکل (۸) طرح جداسازی نفوذسنج- خاک در طول نفوذ [۸]

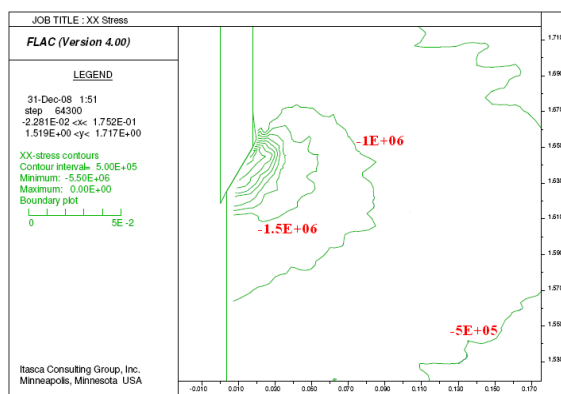
از این مسئله نمی‌توان چشم پوشید و گزارش‌های آزمایش‌های صحرایی پی‌روکن درباره‌ی فشار آب حفره‌ای منفی هنگامی که حسگر اندازه‌گیری فشار آب در قسمت بالای نوک مخروطی قرار دارد، دلیلی بر درستی این مسئله است [۹، ۱۱].

در این مطالعه، میزان جداسازی تقریباً ۱۵ میلی‌متر کاهش یافته است. بنابراین طولی که نفوذسنج و مصالح خاک از هم جدا است، ۲۰ میلی‌متر و ضخامت آن کوچک است. محل پروژه، شهرستان لامرد، طبق برنامه‌ریزی آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی 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 هر تراز آزمایش صحرایی 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 به‌دست‌آمده از نتایج مدلسازی

محل قرار می‌گیرند، بنابراین آنچه در رابطه با کیفیت سطوح مشترک بیان شد، از خواندن تنش برشی حذف می‌شوند. در این رابطه کیوسیز در مقاله خود، جدایی نواحی از غلاف، بالای نوک مخروطی را علت کاهش فشار آب حفره‌ای دانسته و حتی در این مقاله، بیان شده لانی فشار آب حفره‌ای منفی را گزارش کرده است. به همین دلیل توصیه می‌شود که از به‌کارگیری حسگرهای اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای در این ناحیه خودداری شود. پس خواندن تنش‌ها در این ناحیه برای بررسی تنش برشی برای استفاده در مقاومت اصطکاکی، بی‌اعتبار است [۸، ۹]. کیوسیز، یک فاصله جداسازی ۳۵ میلی‌متر را طبق شکل ۸، مطرح می‌کند؛ در حالی که در این مطالعه، سعی شده با کوچک‌تر نگه داشتن نواحی اطراف نوک مخروط، از این مقدار کاسته شود.

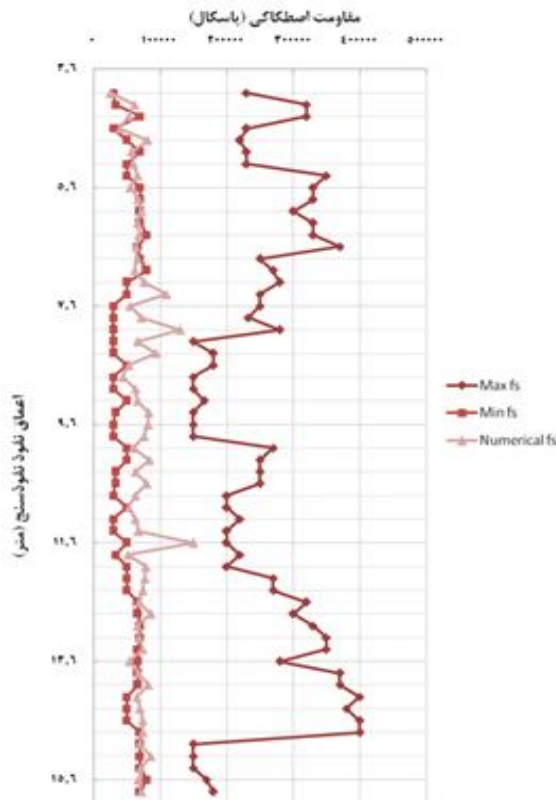


شکل (۶) منحنی میزان تنش‌های قائم



شکل (۷) منحنی میزان تنش‌های افقی





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

$q_c$ : 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 بدست می‌آید؛

$\sigma'v_0$ : تنش سربار کل؛

$\sigma'v_0$ : تنش سربار مؤثر؛

$F_r$ : نسبت اصطکاک نرمال شده و

$f_s$ : مقاومت اصطکاکی اندازه‌گیری شده است.

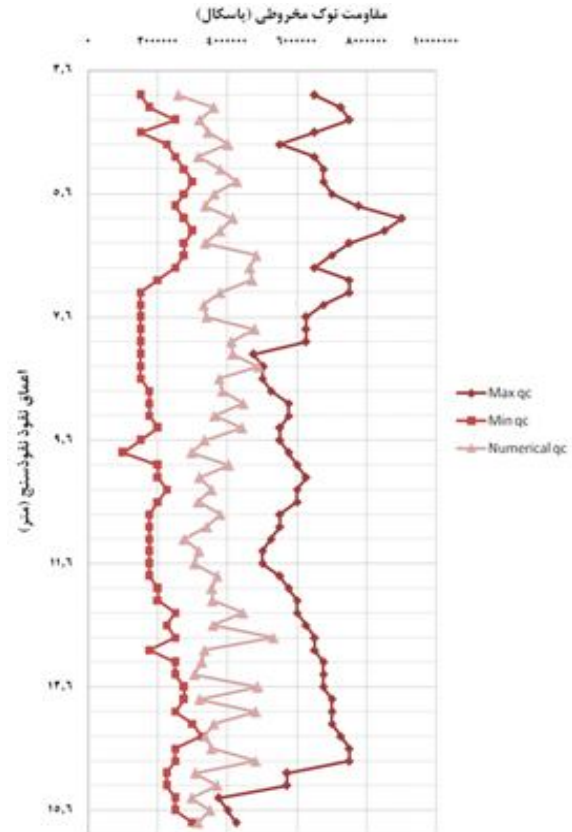
مطابق شکل ۱۱، رابرتسون هر ناحیه را معرف بازه طبقه خاصی از خاک در نظر گرفته است. مطابق شماره‌گذاری

هر ناحیه، طبقه بندی خاک به شرح زیر است:

۱- خاک‌های ریزدانه و حساس؛

۲- خاک‌های ارگانیک؛

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 ۲ و ۳ و پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:



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

$$Q_t = (q_t - \sigma'v_0) / \sigma'v_0 \quad (2)$$

$$F_r = f_s / (q_t - \sigma'v_0) \times 100\% \quad (3)$$

$Q_t$ : مقاومت نوک نرمال شده

$q_t$ : مقاومت نوک اصلاح شده به وسیله‌ی فشار آب حفره‌ای طبق رابطه‌ی ۴ است:

$$q_t = q_c + u_2(1-a) \quad (4)$$

که در آن:

با استفاده از روابط ۲ و ۳ و با در نظر گرفتن مقادیر جدول ۴ که از نتایج عددی استخراج شده، می‌توان 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 می‌شود که با گزارش پروژه در سایت شهرستان لامرد [معنی بر این که خاک زیرسطحی به گونه‌ای معمول شامل مصالح ریزدانه‌ای است که بیشتر در رده رس لاغر یا سیلت قرار می‌گیرد]، برابری می‌کند. همچنین نتایج عددی با طبقه‌بندی ارائه شده به وسیله‌ی اسلامی و فلنیوس نیز بررسی می‌شود. بنابراین، رابطه ۵، اهمیت دارد؛ به این معنی که استفاده از این رابطه، مستلزم اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای در شانه مخروط است؛ حال آنکه موضوع بحث پیرامون نفوذسنج اصطکاکی بدون اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ای است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که مقادیر کم فشار آب حفره‌ای در شانه مخروط، چندان زیاد نخواهد بود بنابراین از مقاومت‌های نوک، بدون در نظر گرفتن فشار آب حفره‌ای استفاده می‌شود.

$$q_E = (q_t - u_2) \quad (5)$$

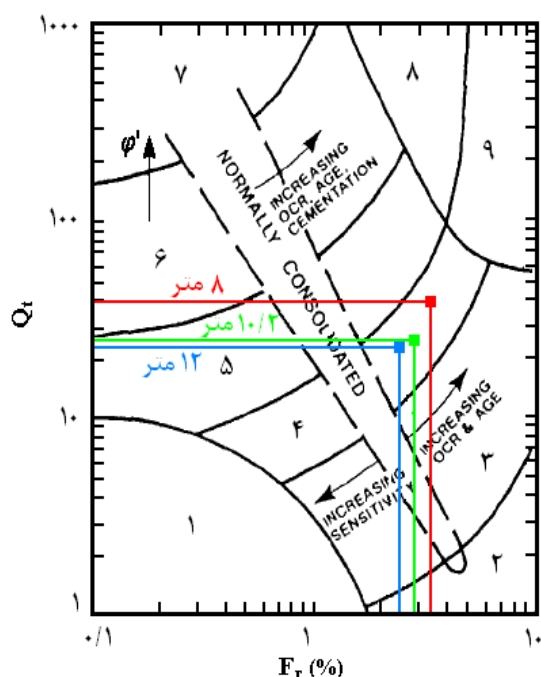
$q_E$ : مقاومت نوک مؤثر؛

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

$u_2$ : فشار منفذی اندازه‌گیری شده در شانه مخروط.

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳، نتایج تنها در سه عمق بررسی می‌شوند. بنابراین در این شکل‌ها، نقاط، پیرامون مرز بین ناحیه ۳ و ۴ متمرکز است و طبقه خاک یکسانی را نشان می‌دهد؛ بنابراین می‌توان نتایج عددی را مناسب دانست.

- ۳- رس تا رس سیلت‌دار؛
- ۴- رس سیلت‌دار تا سیلت رس‌دار؛
- ۵- سیلت ماسه‌ای تا ماسه سیلت‌دار؛
- ۶- ماسه سیلت‌دار تا ماسه؛
- ۷- ماسه تا ماسه شن‌دار؛
- ۸- ماسه - ماسه رس‌دار تا ماسه خیلی سخت و
- ۹- خاک چسبنده، پیش تحکیم‌یافته، خیلی سخت، ریزدانه [۹].



شکل (۱۱) نمودار تشخیص نوع خاک [۹]

جدول (۴) مقادیر نتایج عددی

تراز عمق	۸ متر	۱۰/۲ متر	۱۲ متر
$\sigma_{v0}$ (کیلو پاسکال)	۱۴۲/۶	۱۸۲	۲۲۱
$\sigma'_{v0}$ (کیلو پاسکال)	۱۰۱	۱۲۰	۱۴۰
$q_t$ (مگا پاسکال)	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

۱- مدل‌هایی برای به‌دست آوردن مش بهینه بررسی شد 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 گفته‌شده به‌دست آمده، گویای آن است که این روش اعتبار لازم برای بررسی خاک رسی در سایت پروژه لامرد را دارد.

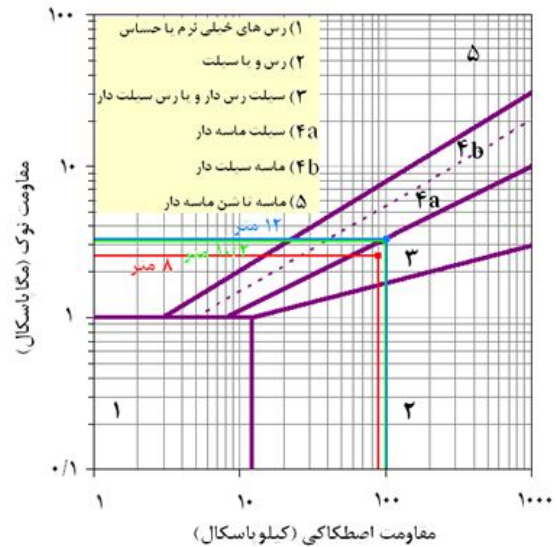
۳- تأثیر نوک مخروط به اندازه ۷ برابر قطر آن از قاعده مخروط به سمت جلوی نوک آن بوده است. بنابراین نمی‌توان از لحاظ کردن این تأثیر به مقدار ۰/۲۵ مگاپاسکال [به خاطر این‌که از مقدار گام نفوذ، بیشتر است]، در مقادیر تراز بعدی چشم‌پوشی است.

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:

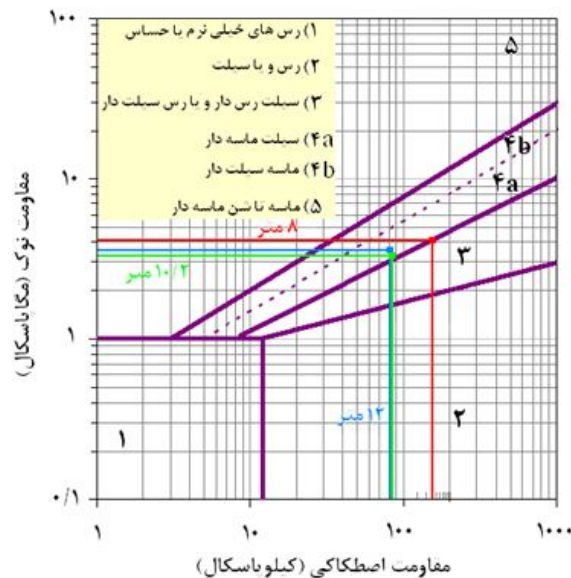
۱- نفوذسنج از ۲۰ سانتی‌متر قبل از عمق مورد نظر شروع به حرکت کند.

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 کیوسیز، ۳۵ میلی‌متر است ولی در این مطالعه، به ۲۰ میلی-



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



شکل (۱۳) ارزیابی خاک سایت با نتایج مدل‌سازی عددی

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه سعی شده است با بهره‌بردن از اطلاعات تئوری و تحلیلی که در مطالعات پارامتری مطرح شده، مسئله، کاربردی و عملی باشد. بنابراین نفوذ تا اعماق زیاد در خاک، میسر شد. در ادامه، نتایج بررسی می‌شود:

نوک و سپس کم کردن آن از مقاومت کل برای به دست آوردن مقاومت نوک مؤثر برای نمودار اسلامی و فلنیوس 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- مراجع

- [۱] نعمتی، ر؛ «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.
- [۴] حیدری، غ؛ «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.

متر 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 به دست آمده 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 مبنی بر این که خاک زیرسطحی به گونه‌ای معمول شامل مصالح ریزدانه‌ای است که بیشتر در رده رس لاغر یا سیلت قرار می‌گیرد، 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 یافته است 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 این که نمودارهای پروفیل خاک مربوط به منطقه‌ای است که داده‌ها از آن استخراج شده اند].

۹- محاسبه فشار آب حفره‌ای و اضافه کردن آن به مقاومت

- [12] Abu-Farsakh, M.; Tumay, M.; Voyiadjis, G.; "Numerical Parametric Study of Piezocone Penetration Test in Clays", International Journal of Geomechanics, ASCE, 2003.
- [9] Lunne, T.; Robertson, P. K.; Powell, J. J. M.; "Cone Penetration Testing In Geotechnical Practice", Blackie Academic & Professional, 1997.
- [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 Modeling of Cone Penetration Test

A.A. Golshani<sup>1\*</sup>, R. Nemati<sup>2</sup>

1- Assoc. Professor of Civil Engineering Faculty, Tarbiat Modares University

2- M.Sc Student of Civil Engineering Faculty, Tarbiat Modares University

golshani@modares.ac.ir

## Abstract:

Determining the bearing capacity of piles is an important issue that always Geotechnical engineers focus on. Effect of factors such as environmental dissonance of soil which contains a pile, pile implementation, pile gender and its shape make correct estimation of bearing capacity difficult. Pile load testing as a reliable method could be used in various stages of analysis, design and implementation of piles to determine the axial bearing capacity of piles.

On the other hand, pile load testing, despite high accuracy, imposes high cost and long duration for development projects and it causes limitations in this experiment. Thus acceptance of numerical analysis at geotechnical studies is increasing.

In this study serious models of multi-layer perception neural network, one of the most commonly used neural networks, was used.

In all models four parameters are used as input data which are length and diameter of the pile, the coefficient of elasticity and internal friction angle of soil and the bearing capacity of piles is used as output data. Models have reasonable success in predicting the bearing capacity of piles. To increase the accuracy of predicting bearing capacity, for the network training stage the real tests that has been done at the geotechnical studies of dry dock area Hormozgan by POR Consulting Engineers were used. According to (Because we) need of more data for training and testing network, several tests on pile bearing capacity, in smaller dimensions were performed in the laboratory. To perform these tests the device of pile bearing capacity, made in university of Tarbiat Modarres, was used.

Models based on neural networks, unlike traditional models of behavior don't explain effect of input parameters on output parameters. In this study, by the sensitivity analysis on the optimal structure of introduced models in each stage it has been somewhat trying to answer this question.

**Keywords:** Pile load testing, Device of determining pile bearing capacity, Artificial neural networks, Multi-layer perceptron, Sensitivity analysis