مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
پاییز و زمستان ۱۳۹۰، جلد چهارم، شماره ۳ و۴، صفحه ۷۵ تا ۹۰

روشی پیشنهادی برای تعیین وضعیت لایه‌بندی با استفاده از روش‌های زمین‌آمار و تحلیل گروهی

مهدی خداپرست[۱]

دریافت مقاله: ۹۰/۹/۸ پذیرش مقاله: ۹۱/۳/۳

چکیده

شناسایی لایه‌های زیر سطحی و تعیین نیم‌رخ لایه‌ها در روش‌های معمول مطالعات ژئوتکنیک بر اساس مقطع حاصل از گمانه‌های حفر شده با درون‌یابی و قضاوت فردی انجام می‌شود. در بعضی موارد چنان‌چه فاصله بین گمانه‌ها زیاد باشد با استفاده از انجام آزمایش‌های در محل نظیر آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی در بین گمانه‌ها سعی می‌شود تعیین لایه‌بندی با دقت بیشتری انجام پذیرد. در این مقاله با فرض در اختیار داشتن اطلاعات مربوط به حفر چند گمانه و انجام آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی در بین گمانه‌ها، روش جدیدی مبتنی بر استفاده از دو فن زمین‌آمار و تحلیل گروهی ارائه می‌شود که با استفاده از آن می‌توان دو دسته اطلاعات حاصل از گمانه‌ها و نفوذسنجی را ترکیب کرد و وضعیت لایه‌بندی و تغییر مقاومت لایه‌ها را در عمق تعیین نمود. در روش مذکور با ارائه تعریفی جدید برای برخی از مفاهیم زمین‌آمار، یک سطح نسبت به یک نقطه مبنا تعیین می شود که در آن سطح، وضعیت لایه ها و تغییر مقاومت ثابت است. سپس با استفاده از اعمال روش تحلیل گروهی بر نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی در محدوده مذکور، نیم‌رخ مربوط به لایه‌ها تعیین می‌شود.

کلید واژه‌ها: *لایه‌بندی، زمین‌آمار، تحلیل گروهی، نفوذسنجی دینامیکی.*

۱- استادیار و عضو هیئت علمی دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه قم

۱. مقدمه

در مطالعات ژئوتکنیک پس از انجام بررسی‌ها و آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی می‌بایست وضعیت لایه‌های زیرسطحی و مشخصات آنها ارائه گردد. تعیین عمق و جنس لایه‌های زیرسطحی عموماً با توجه به نتایج عملیات گمانه‌زنی در نقاط مختلف زمین و سپس درون‌یابی در مابقی نقاط و استفاده از قضاوت فردی و گاهی اوقات با استفاده از نتایج آزمایش‌های برجا نظیر نفوذسنجی در بین گمانه‌ها صورت می‌گیرد. در این حالت عمدتاً بررسی‌ها بر اساس مشاهده بصری و مقایسه نیم‌رخ‌های مربوط به نتایج این آزمایش‌های صورت می‌پذیرد که البته کار پیچیده‌ای بوده و به مهارت و تجربه فراوانی نیاز دارد.

حال اگر اطلاعات حاصل از گمانه‌ها و آزمایش‌های محلی زیاد باشد، تعیین نیم‌رخ زمین با قضاوت مهندسی مشکل بوده و بکارگیری یک روش محاسباتی ضروری می‌گردد. لذا کوشش گردید تا با انجام این تحقیق با استفاده از فن زمین‌آمار و همچنین روش تحلیل گروهی، یک شیوه محاسباتی برای تعیین نیمرخ لایه‌های زیر سطحی بر اساس ترکیب نتایج عملیات گمانه‌زنی و آزمایش نفوذسنجی دینامیکی ارائه شود.

نفوذسنجی شامل انواع آزمایش‌های برجا در ژئوتکنیک مثل آزمایش نفوذ مخروط و نفوذسنجی دینامیکی است و می‌تواند نقش مهمی در شناسایی لایه‌های زمین در بین گمانه‌ها داشته باشد (خداپرست و فاخر، ۱۳۸۹). زمین‌آمار شاخه‌ای از آمار کاربردی است که با در نظر گرفتن همبستگی بین داده‌های زمین‌شناختی و در نظر گرفتن موقعیت نمونه‌ها به تحلیل آماری آنها می‌پردازد. اگر چه قسمت عمده زمینه‌های رشد زمین‌آمار مسئله تخمین ذخایر معدنی بوده است لیکن در گرایش‌های مختلف علوم زمین‌شناسی، ژئوفیزیک و اخیراً ژئوتکنیک تحقیقات کاربردی انجام شده است (مدنی، ۱۳۷۳). تحلیل گروهی با هدف منظم کردن یک مجموعه از داده‌های پراکنده و دسته‌بندی آنها در تعدادی گروه به کار می‌رود به گونه‌ای که اعضای هر گروه دارای درجه معینی از شباهت به یکدیگر بر اساس یک رابطه ریاضی باشند Facciorusso and Uzielli, (2004) روش ارائه شده در این مقاله می‌تواند با هر آزمون برجا به کار رود.

۲. سابقه موضوع

در این قسمت سابقه موضوع برای هر یک از ارکان تحقیق ارائه شده در تحقیق حاضر تشریح می‌شود.

۲-۱. آزمایش نفوذسنجی دینامیکی

در این آزمایش جسمی در اثر ضربه، در داخل خاک نفوذ می‌کند و مقاومت آن در مقابل نفوذ، به مشخصات خاک ارتباط داده می‌شود. کاوشگرهای دینامیکی از سه بخش اصلی به نام چکش، مخروط نفوذ و میله‌های رابط تشکیل شده‌اند. انرژی لازم برای نفوذ در زمین در اثر ضربه تأمین می‌شود. این ضربه از سقوط وزنه‌ای معین و از ارتفاعی مشخص ناشی می‌شود که با توجه به اندازه و ارتفاع سقوط آن ممکن است به صورت دستی و یا به کمک دستگاه انجام گیرد. تعداد ضرباتی که باعث نفوذ به مقدار معین (بسته به وزن چکش بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر) می‌گردد ثبت و با حرف M نشان داده می‌شود. در نهایت نموداری پیوسته از تغییرات M نسبت به عمق قابل حصول خواهد بود.

تاکنون کاوشگرهای دینامیکی در ابعاد و اندازه‌های مختلفی ساخته شده و تعدادی از آنها تحت استانداردهای DIN آلمان و BS انگلستان درآمده‌اند. در جدول ۱ مشخصات مهم‌ترین انواع آنها بر اساس استاندارد DIN4094 آمده است (DIN 409, 1974).

جدول ۱. مشخصات انواع متعارف کاوشگرهای دینامیکی (DIN 409, 1974)

نوع	سبک (DPL)	متوسط (DPM)	سنگین (DPH)	خیلی سنگین (DPSH)	نفوذ استاندارد با نوک باز (SPT)
وزن چکش (برحسب کیلوگرم)	۱۰ ± ۰/۱	۳۰ ± ۰/۳	۵۰ ± ۰/۵	۶۳/۵ ± ۰/۵	۶۳/۵ ± ۰/۵
ارتفاع سقوط چکش (برحسب متر)	۰/۵ ± ۰/۰۱	۰/۵ ± ۰/۰۱	۰/۵ ± ۰/۰۱	۰/۷۵ ± ۰/۰۲	۰/۷۶ ± ۰/۰۳
قطر مخروط (برحسب میلی‌متر)	۳۵/۷ ± ۰/۳	۳۵/۷ ± ۰/۳	۴۳/۷ ± ۰/۳	۵۰/۵ ± ۰/۵	۵۰/۵ ± ۰/۵
سطح مقطع مخروط (برحسب سانتی‌متر مربع)	۱۰	۱۰	۱۵	۲۰	*۲۰
قطر میله‌های رابط (برحسب میلی‌متر)	۲۲ ± +۰/۲	۳۲ ± ۰/۲	۳۲ ± ۰/۲	۳۲ ± ۰/۲	۳۲-۴۰/۵-۵۰
انرژی مخصوص در هر ضربه (برحسب کیلو ژول بر مترمربع)	۵۰	۱۵۰	۱۶۷	۲۳۸	۴۴۷
محدوده استاندارد نتایج	۳-۵۰ (برای نفوذ ۱۰ سانتی‌متر)	۳-۵۰ (برای نفوذ ۱۰ سانتی‌متر)	۳-۵۰ (برای نفوذ ۱۰ سانتی‌متر)	۵-۱۰۰ (برای نفوذ ۲۰سانتی‌متر)	-

* شبه مخروط با نوک باز

تعدادی از انواع این ابزار در پروژه‌های تحقیقاتی دامنه‌دار ساخته شده است Fakher et al. (2006) و خداپرست و فاخر(۱۳۸۹). از مزایا و امتیازهای ویژه استفاده از کاوشگرهای دینامیکی در مطالعات محلی می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

۱- اقتصادی بودن این ابزار از نظر ساخت و همچنین کاربرد Sabtan and Shehata, (1995)

۲- پیوسته بودن نتایج وامکان شناسایی لایه‌های با ضخامت کم Butcher et al., (1996) و Eitner et al., (2004)

۳- عدم نیاز به حفر گمانه جهت انجام آزمایش و امکان برآورد پتانسیل روانگرایی Alam et al., (2008)

٤- امکان کاهش تعداد گمانه‌ها، در صورت جایگزینی با نفوذسنجی به کمک این ابزار Fakher et al., (2001)

۵- کاهش نیروی انسانی مورد نیاز (شکرانی، ۱۳۷۹)

٦- امکان نمونه‌گیری از خاک (خداپرست و فاخر، ۱۳۸٤)

البته لازم به ذکر است که برای تعیین عمق و جنس لایه‌های زیرسطحی بهتر است تنها به نتایج این آزمایش اکتفا نکرد و از نتایج نمونه‌گیری در عمق و یا پروفیل گمانه‌های شاهد نیز استفاده شود.

۲-۲. *زمین‌آمار*

در بسیاری از شاخه‌های علوم زمین از جمله مکانیک خاک به علت وسعت و عمق قابل توجه میدان مورد عمل و همچنین طبیعت تصادفی خاک، امکان شناخت قطعی و دقیق از تمامی نقاط محل عملی نمی‌باشد و در این شرایط به ناچار از روش‌های مدل‌سازی آماری و احتمالاتی استفاده می‌شود. تاج‌الدین،(۱۳۷٦).

در آمار کلاسیک فرض بر آن است که هر نمونه یک رخداد تصادفی و مستقل از سایر نمونه‌ها بوده و هیچ رابطه‌ای بین موقعیت مکانی آنها در نظر گرفته نمی‌شود. فرض مذکور در مورد داده‌های مربوط به زمین صحیح نیست زیرا این داده‌ها تا فواصل معینی به دلیل شرایط زمین‌شناختی مشترک با یکدیگر همبستگی دارند.

زمین‌آمار شاخه‌ای از آمار کاربردی است که با در نظر گرفتن همبستگی بین داده‌های زمین‌شناختی و در نظر گرفتن موقعیت نمونه‌ها به تحلیل آماری آنها می‌پردازد. به عبارت

دیگر داده‌ها در زمین‌آمار مستقل نیستند و به شرایط زمین‌شناختی وابسته هستند.

این شاخه از آمار از چند دهه قبل به طور گسترده در سطح جهان به ویژه کشورهای صاحب تکنولوژی معدن مطرح شده و کارایی خود را در بسیاری از موارد به اثبات رسانده است رندو،(۱۳۷۱). در ادامه لازم است به توضیح پاره‌ای از مفاهیم مهم زمین‌آمار پرداخته شود.

در زمین‌آمار چنانچه مقادیر مختلف یک نمونه به‌نحوی با موقعیت مکانی آن‌ها ارتباط داشته باشد به آن"متغیر ناحیه‌ای" گفته می‌شود با $z(x)$ نشان داده می‌شود.

یکی از فرضیات مهم در زمین‌آمار، فرضیه مانای ذاتی است (حسنی پاک، ۱۳۷۷). بر اساس این فرضیه در یک جهت مشخص برای هر فاصله (h) واریانس اختلاف بین دو متغیر ناحیه‌ای معین بوده و بستگی به مختصات آنها ندارد. برای مثال فرض کنید دو متغیر z_1 و z_2 مربوط به دو نقطه با فاصله h در بخش شمالی یک امتداد مشخص (مثلاً شمال- جنوب) زمین باشند و اختلاف آنها Δz باشد. اگر در هر دو نقطه دیگر به فاصله h در این امتداد مقادیر $z(x)$ تعیین شود و واریانس اختلاف بین این دو متغیر، یعنی Δz ثابت باشد و به موقعیت آن دو نقطه بستگی نداشته باشد به گونه‌ای که:

(۱)

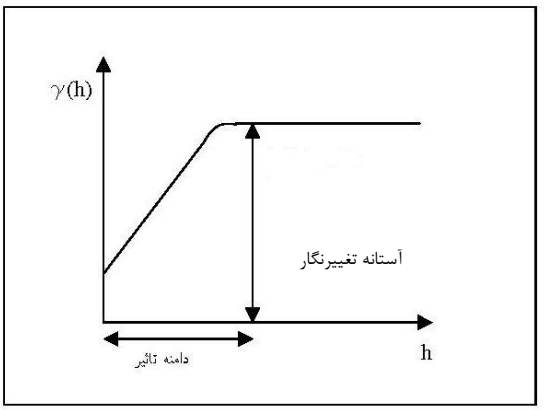
$$Var[z(x+h)-z(x)]=2\gamma(h)$$

آنگاه Δz مانای ذاتی است. تابع $2\gamma(h)$ که تغییرنگار نامیده می‌شود یکی از مهم‌ترین مفاهیم زمین‌آمار است و اغلب تحلیل‌های زمین‌آماری بر اساس آن انجام می‌شود. چنانچه تعداد $n(h)$ زوج نمونه که به فاصله h از یکدیگر واقعند در دست باشد تابع تغییرنگار به‌صورت زیر برآورد می‌شود:

$$2\gamma(h)=\frac{1}{n(h)}\sum_{i=1}^{n(h)}[z(x_i)-z(x_i+h)]^2 \qquad (۲)$$

تغییرنگار، یک تابع برداری است و مقدار آن در امتدادهای مختلف قابل محاسبه است. یک محدودیت مهم برای محاسبه $\gamma(h)$ آن است که باید از زوج نمونه‌هایی استفاده شود که با یکدیگر دارای فاصله مشخص (h) باشند. لذا ضرورت دارد که تا حد امکان نمونه‌گیری در هر امتداد به‌صورت منظم و در فواصل تقریباً مساوی صورت پذیرد.

منحنی تغییرنگار با افزایش فاصله h افزایش می‌یابد. این وضعیت تا فاصله معینی ادامه دارد و از آن پس مقدار آن ثابت می‌شود (شکل۱). این امر نشانگر آن است که نمونه‌ها فقط تا فاصله معینی به هم وابستگی دارند.



شکل۱. نمونه‌ای از یک تغییرنگار

فاصله‌ای که پس از آن دیگر نمونه‌ها به یکدیگر وابسته نیستند، دامنه تأثیر نامیده می‌شود. همچنین مقدار حداکثر $\gamma(h)$ در دامنه تأثیر را آستانه تغییرنگار می‌گویند.

در علم زمین‌آمار در محدوده دامنه تأثیر از تخمین‌گرهای آماری برای تعیین مقدار متغیر مورد مطالعه استفاده می‌شود، به گونه‌ای که تخمین دارای کمترین خطا باشد. یکی از مهم‌ترین تخمین‌گرهای زمین‌آماری کریگینگ است که اساس آن تخمین با کمترین واریانس می‌باشد.

برخی از پدیده‌های زمین شناختی به‌صورت کمی با استفاده از تغییرنگار قابل مشاهده‌اند. به عنوان مثال در نمونه‌گیری از لایه‌های رسوبی که دارای تغییرات یکنواخت و تدریجی هستند، منحنی تغییرنگار نیز یکنواخت است و از حوالی مبداء مختصات به‌صورت منظم افزایش می‌یابد (تاج الدین، ۱۳۷٦).

یکی از دیگر مواردی که با استفاده از منحنی تغییرنگار می‌توان از آن اطلاع حاصل کرد، بررسی وضعیت همسان‌گردی نمونه‌ها در امتدادهای مختلف است که بر اساس مقایسه منحنی‌های تغییرنگار در امتدادهای گوناگون انجام می‌شود.

۲-۳. تحلیل گروهی

تحلیل گروهی با هدف منظم کردن یک مجموعه از داده‌های پراکنده و دسته‌بندی آن‌ها در تعدادی گروه بکار می‌رود به‌گونه‌ای که اعضای هر گروه دارای یک درجه معین از شباهت به یکدیگر بر اساس یک رابطه ریاضی باشند. مراحل اصلی در این روش به شرح ذیل می‌باشد:

۱- تعیین یک مقیاس مناسب برای طبقه بندی

۲- انتخاب متغیرهای اصلی در یک مجموعه از اطلاعات

۳- نرمالایز کردن و استاندارد نمودن متغیرهای مذکور

٤- انتخاب مدلی مناسب برای تعیین میزان شباهت داده‌های حاصل از بند ۳

۵- تعیین معیاری مناسب برای گروه‌بندی اطلاعات و انتخاب تعداد مناسب گروه‌ها (آلگوریتم مناسب با توجه به طبیعت داده‌ها)

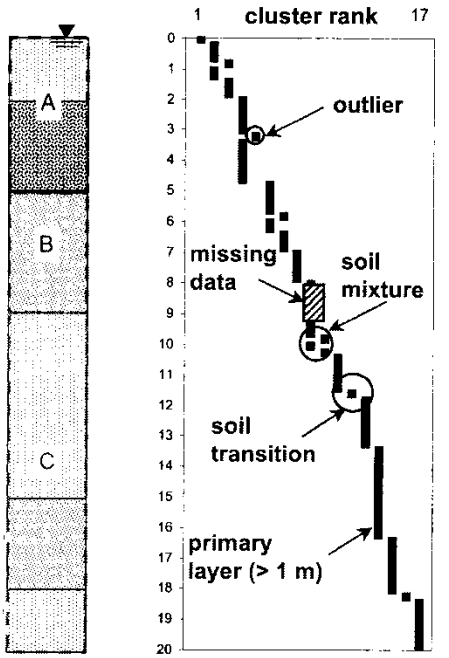
٦- طبقه‌بندی هر یک از گروه‌ها و نمایش آنها به روش مؤثر

آلگوریتم مناسب برای تحلیل گروهی باید با توجه به ماهیت و طبیعت داده‌ها انتخاب شود. پس از انجام آنالیز گروهی و ترسیم منحنی تعداد گروه در عمق، شناسایی لایه‌ها از نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی بر اساس شکل۲ صورت می‌گیرد. بر اساس این شکل لایه‌های اصلی با ضخامت بیش از یک متر، لایه‌های ثانویه با ضخامتی بین ۰/۵ تا یک متر، لنزها و لایه‌های انتقالی با ضخامتی کمتر از ۰/۵ متر و یا خاک مخلوط شده از دو لایه (در مرز بین آنها) قابل شناسایی خواهند بود. تعدادی از نتایج نیز ناشی از خطای تصادفی یا سیستماتیک به‌صورت داده‌های خارج از محدوده خود را نشان می‌دهند. Facciorusso and Uzielli, (2004)

۳. روش پیشنهادی در تحقیق حاضر

۳-۱. ترکیب زمین‌آمار و تحلیل گروهی

تعیین عمق و جنس لایه‌های زیرسطحی معمولاً بر اساس تجربه و گاهی با انجام محاسبات ساده آمار کلاسیک انجام می‌شود که عموماً با توجه به نتایج عملیات گمانه‌زنی در نقاط مختلف زمین و سپس درون‌یابی در مابقی نقاط و استفاده از قضاوت فردی صورت می‌گیرد.



شکل ۲. تعاریف اصلی برای طبقه‌بندی خاک از نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی در روش آنالیز گروهی Facciorusso and Uzielli, (2004)

در بعضی موارد چنان چه فاصله بین گمانه‌ها زیاد باشد، با استفاده از آزمایش‌های در محل، نظیر نفوذسنجی استاتیکی و دینامیکی سعی می‌شود تعیین لایه‌بندی با دقت بیشتری انجام پذیرد. در این حالت عمدتاً بررسی‌ها بر اساس مشاهده بصری و مقایسه نیم‌رخ‌های مربوط به نتایج این آزمایش‌ها صورت می‌پذیرد که کار پیچیده‌ای بوده و به مهارت و تجربه فراوانی نیاز دارد.

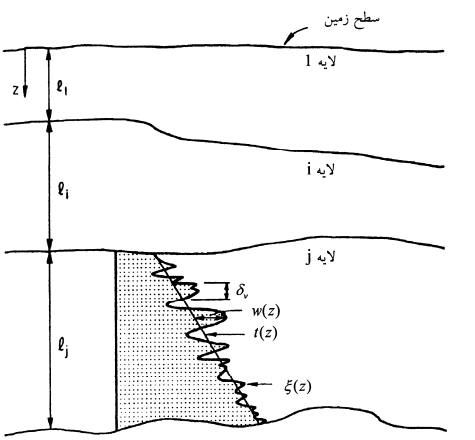
برای مثال هانتلی (Huntley, 1990) می گوید تفسیر نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی برای تعیین نوع خاک در یک محل خاص می‌بایست توسط مهندسین ژئوتکنیک با تجربه یا مهندسین زمین شناس که دارای تجربه کافی نسبت به خاک‌های آن محل باشند صورت گیرد. به‌طور مشابه لزوم تجربه بالا در تفسیر نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی توسط لاو و زاکچو (Low and Zaccheo, 1990) مورد تاکید قرار گرفته است.

نکته مهم دیگری که باید به آن توجه داشت آن است که خاک یک ماده مهندسی پیچیده است که به‌وسیله ترکیبی از

فرآیندهای مختلف زمین‌شناختی، زیست‌محیطی و فیزیکی و شیمیایی شکل می‌گیرد. بسیاری از این فرآیندها به‌طور پیوسته ادامه داشته و می‌تواند باعث تغییر در مشخصات خاک گردد. به علت این فرآیندهای طبیعی خواص خاک و از جمله پارامترهای مقاومتی آن بطور افقی و قائم تغییر می‌کنند Phoon and Kulhawy, (1995). همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود در یک لایه همگن این تغییرات مکانی می‌تواند به شکل ترکیبی از دو تابع به‌صورت زیر تجزیه شود:

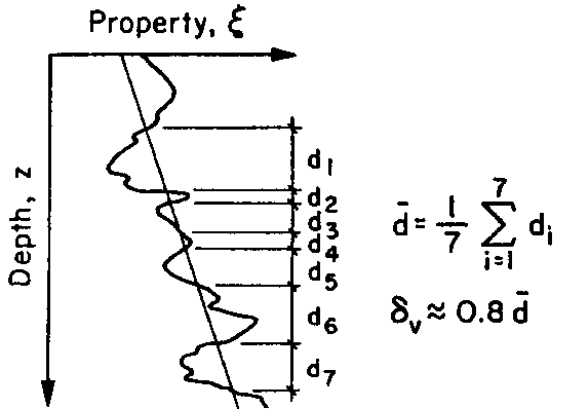
$$\xi(z) = t(z) + w(z) \qquad (۳)$$

که در آن $\xi(z)$ تغییرات یک مشخصه خاک در عمق z، $t(z)$ روند و $w(z)$ باقیمانده یا خطای تصادفی است. تابع $t(z)$یک تابع جزمی یا قطعیت‌پذیر است، لیکن تابع $w(z)$ یک تابع تصادفی با میانگین صفر و واریانس غیر صفر است. فاصله‌ای که تغییرات نوسانی رخ می‌دهد با δ_v نشان داده می‌شود و عبارت است از فاصله‌ای که تغییرات مشخصه خاک به‌طور کامل بیشتر یا کمتر از روند $t(z)$ قرار دارد. برای محاسبه δ_v یک روش تقریبی ارائه شده که در شکل ٤ نشان داده شده است Spry et al., (1988). همانطور که در شکل دیده می‌شود برای محاسبه δ_v ابتدا با توجه به تغییرات تابع $\xi(z)$ در عمق محدوده‌هایی از عمق که مقدار آن کمتر و یا بیشتر از روند $t(z)$ می‌باشد را یک به یک تعیین کرده (d_i) و δ_v برابر با ۸۰ درصد میانگین تعیین می گردد.



شکل ۳. تابع تغییرات یک مشخصه از خاک
Baecher, G.B. and Christian,(2003)

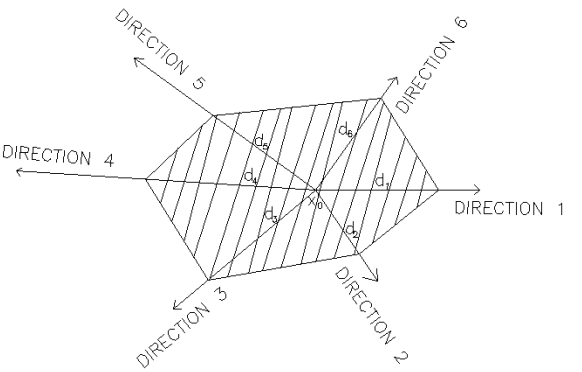
البته با توجه به تحقیقات انجام شده برای مشخصه‌های مختلف خاک مقدار δ_v پیشنهاد شده است. فون و همکاران Phoon et al., (1995) مقدار δ_v را برای مقاومت نوک مخروط در آزمایش‌های نفوذسنجی بین ۰/۲ تا ۰/۵ متر و با متوسط ۰/۳ متر به‌دست آورده‌اند. بر این اساس در تحقیق حاضر مقدار δ_v برای نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی ۰/۳ متر انتخاب شده است.



شکل ۴. روش تقریبی محاسبه δ_v Spry et al., (1988)

در این تحقیق با استفاده از ترکیب مفاهیم زمین‌آماری و انجام تحلیل گروهی کوشش می‌شود با دقت خوبی وضعیت لایه‌های زیرسطحی و تغییرات مقاومت آنها در یک محدوده مشخص تعیین گردد. اهداف اصلی در روش پیشنهادی عبارت است از آنکه اولاً معین گردد در اطراف یک گمانه مشخص به عنوان نقطه مبنا، برای هر امتداد تا چه فاصله‌ای از گمانه تغییر قابل توجهی در لایه‌بندی رخ نمی‌دهد و سطح در برگیرنده آنها یعنی سطحی که دارای لایه‌بندی همانند نقطه مبنا می‌باشد مشخص گردد. ثانیاً از مجموع نتایج آزمایش‌ها و گمانه شاهد یک لایه‌بندی برای کل سطح مذکور ارائه گردد. لازم به ذکر است که در این مقاله در هر امتداد، فاصله‌ای که در آن نسبت به نقطه مبنا تغییر قابل توجهی در لایه‌بندی رخ نمی‌دهد فاصله مؤثر و سطحی که دارای لایه‌بندی همانند نقطه مبنا می‌باشد، سطح مؤثر نامیده می‌شود. برای مثال، با توجه به شکل ۵ اگر فاصله مؤثر در امتدادهای ۱

الی ٦ برابر با d_1 تا d_6 باشد آنگاه محدوده هاشور خورده نشان دهنده سطح مؤثر است.



شکل ۵. پلان محل قرارگیری نقطه مبنا (x_0) و فاصله مؤثر در راستاهای مختلف که منجر به تعیین سطح مؤثر (منطقه هاشورخورده) می‌شود.

۳-۲. ویژگی‌های تغییرنگار در تحقیق حاضر

۳-۲-۱ معایب روش کلاسیک به‌کارگیری تغییرنگار

برای استفاده از منحنی تغییرنگار دو نکته باید مورد توجه قرار گیرد:

الف- فرض مانای ذاتی که تأکید دارد در یک امتداد مشخص هر دو زوج نمونه‌ای که دارای یک فاصله معین از یکدیگر باشند، واریانس اختلاف آنها تابع فاصله مذکور بوده و به مختصات آنها بستگی ندارد.

این فرض در بررسی مشخصات لایه‌های زیرسطحی با توجه به طبیعت تصادفی بودن زمین و پیچیدگی‌های زمین‌شناختی در هر منطقه به‌طور کلی قابل قبول و صحیح نمی‌باشد و شاید تنها در مواردی اعتبار داشته باشد که در صورت عدم وجود ساختارهای زمین‌شناختی پیچیده و تودرتو، فاصله h مقدار بسیار کوچکی باشد یا آنکه در محدوده مورد نظر و در عمق مورد بررسی مصالح آبرفتی از یک جنس و نسبتاً همگن و یکنواخت باشند(Chiasson et al., (1995 لذا فرض مانای ذاتی که در قسمت ۲-۲ تشریح شد بطور عمومی برای کاربردهای ژئوتکنیکی قابل استفاده نیست.

ب- برای ترسیم منحنی تغییرنگار باید نمونه‌گیری در یک شبکه نسبتاً منظم در امتدادهای مختلف و در فواصل معین و برنامه‌ریزی شده صورت گرفته باشد. از سوی دیگر با توجه به بند الف باید فاصله نمونه‌گیری نیز تا حد امکان کاهش یابد که در مطالعات ژئوتکنیک چنین امری بعضاً ممکن نبوده یا بسیار پر هزینه و غیر اقتصادی خواهد بود.

لازم به توضیح است که منظور از نمونه‌گیری در اینجا می‌تواند ثبت نتیجه یک آزمایش خاص در یک عمق معین باشد که در این تحقیق منظور ثبت نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی است.

البته روش زمین‌آمار در مطالعات معدنی که با تعداد زیاد نمونه‌گیری و آزمایش برای تعیین خلوص معادن انجام می شوند مفید و کارآمد می باشد.

۳-۲-۲ تغییرنگار خاص پیشنهادی در تحقیق حاضر

با توجه به معایب ذکر شده در فوق پیشنهاد می‌گردد در فرمول تغییرنگار با عدم پذیرش مانای ذاتی صرفاً از آن در امتدادهای مختلف جهت بررسی میزان تداوم و یکنواختی لایه‌ها و تعیین فاصله مؤثر و سپس مشخص نمودن سطح مؤثر استفاده گردد.

به این ترتیب در فرمول تغییرنگار یک محل به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و واریانس نمونه هر محل دیگر نسبت به نقطه مبنا محاسبه می‌شود. لذا خواهیم داشت:

$$Var[z(x_h)-z(x_0)]=2\gamma^*(h) \qquad (٤)$$

$$\gamma^*(h)=\frac{1}{2*1}[z(x_h)-z(x_0)]^2 \qquad (٥)$$

در روابط فوق $z(x_0)$ مقدار نمونه مبنا، $z(x_h)$ مقدار نمونه در فاصله h نسبت به نقطه مبنا و $\gamma^*(h)$ تغییرنگار خاص می باشد. رابطه ۵ در واقع همان رابطه ۲ است که در آن N=۱ می باشد.

شایان ذکر است که در فرمول پیشنهادی فوق دیگر وجود یک شبکه منظم و برنامه‌ریزی شده با فواصل بسیار نزدیک برای نمونه‌گیری لازم نیست. همچنین با محاسبه تغییرنگار خاص می‌توان در هر امتداد فاصله مؤثر را محاسبه کرد و سطح در برگیرنده آنها را در پلان به عنوان سطحی که دارای لایه‌بندی همانند نقطه مبنا می‌باشد (سطح مؤثر)، مشخص نمود.

۳-۲-۳ تعیین فاصله مؤثر در تغییرنگار خاص برای اعماق مختلف

با توجه به روش پیشنهادی جهت محاسبه تغییرنگار خاص، برای مشخص کردن فاصله مؤثر می‌بایست نسبت به نقطه مبنا طولی تعیین گردد که در آن طول تغییر قابل توجهی در جنس و مقاومت لایه‌ها و به‌طورکلی در وضعیت لایه‌بندی ایجاد نگردد. همان‌طور که در شکل ۵ ملاحظه گردید، تعیین سطح مؤثر نیازمند تعیین d_i در امتدادهای مختلف است.

در تحقیق حاضر برای تعیین فاصله مؤثر d_i در یک امتداد مشخص، ابتدا برای نتایج آزمایشی که در فاصله h از نقطه مبنا قرار دارد مقدار k در هر عمق از رابطه ٦ محاسبه می‌شود:

$$k = \frac{\gamma^*(h)}{\gamma^*_{\max}(h)} \quad (٦)$$

که در آن $\gamma^*(h)$ تغییرنگار خاص و $\gamma^*_{\max}(h)$ مقدار بیشینه تغییرنگار خاص در فاصله مؤثر می‌باشد که با توجه به جنس و مقاومت لایه در نقطه مبنا تعیین می‌شود. بدیهی است حداکثر مقدار k در محدوده فاصله مؤثر برابر با یک است.

به عنوان نمونه اگر بخواهیم فاصله مؤثر را با توجه به نتایج آزمایش نفوذ استاندارد در یک عمق معین تعیین نماییم و نقطه مبنا، مربوط به یک لایه ماسه نسبتاً متراکم با عدد نفوذ استاندارد ۲۰ باشد، در هر امتداد، فاصله مؤثر تا طولی ادامه دارد که نتایج آزمایش مذکور بین ۱۰ تا ۳۰ باشد (داس، ۱۳۷۲). لذا مقدار $\gamma^*_{\max}(h)$ در فاصله مؤثر ۵۰ خواهد بود.

به این ترتیب برای نتایج آزمایشی که در فاصله h از نقطه مبنا قرار دارد منحنی تغییرات k ، بر حسب عمق قابل ترسیم خواهد بود. در منحنی تغییرات k بر حسب عمق چنان‌چه مقدار k به‌طور پیوسته در ضخامتی بیش از ۳۰ سانتی‌متر از یک بزرگ‌تر نباشد آن آزمایش در محدوده فاصله مؤثر خواهد بود. این شرط با در نظر گرفتن مقدار δ_v معادل ۳۰ سانتی‌متر برای نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی که در بخش ۳-۱ توضیح داده شد. یا حداکثر ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای یک لایه نازک تعریف شده است. به عبارت دیگر اگر مقدار k به‌طور پیوسته در ضخامتی بیش از ۳۰ سانتی‌متر، از یک بزرگ‌تر باشد، به عنوان یک تغییر عمده در لایه‌بندی قلمداد می‌شود و لایه‌های نازک با ضخامت کمتر از ۳۰ سانتی‌متر در این روش در نظر گرفته نمی‌شوند.

در ادامه نتایج محل آزمایش‌های بعدی در امتداد مذکور به‌طور مشابه مورد بررسی قرار می‌گیرد. این کار در سایر امتدادها نیز نسبت به نقطه مبنا انجام شده و در هر امتداد به روش فوق فاصله مؤثر تعیین می‌شود.

به این ترتیب با تعیین فاصله مؤثر در امتدادهای مختلف می‌توان سطحی را در اطراف نقطه مبنا به عنوان سطح مؤثر مشخص نمود که در آن سطح وضعیت لایه‌ها و تغییر مقاومت در آن‌ها ثابت است.

۳-۳. تحلیل گروهی در تحقیق حاضر

پس از تعیین محدوده سطح مؤثر در امتدادهای مختلف، نتایج آزمایش‌هایی که داخل این محدوده قرار دارند جهت انجام تحلیل گروهی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در تحقیق حاضر که هدف اعمال روش تحلیل گروهی بر نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی است عملاً یک متغیر که همان تعداد ضربه به ازای هر۱۰ یا۲۰ سانتی‌متر است، اندازه‌گیری می‌شود. انتخاب آلگوریتم مناسب برای انجام تحلیل گروهی باید با توجه به ماهیت و طبیعت داده‌ها صورت گیرد. به عنوان نمونه برای انجام آنالیز گروهی نتایج آزمایش نفوذسنجی استاتیکی با توجه به ماهیت ژئوتکنیکی داده‌ها و طبیعت آنها که دارای تغییرات پیوسته در عمق است، آلگوریتم HAMAD پیشنهاد شده Facciorusso and Uzielli, (2004) در آلگوریتم مزبور، از تابع فاصله مینکوسکی Miyamoto, (1990) به صورت رابطه ۷ استفاده شده است:

$$d(i,j) = \left[\sum_{k=1}^{p}(x_{ik} - x_{jk})^2\right]^{1/2} \quad i,j = 1,...,n \quad (٧)$$

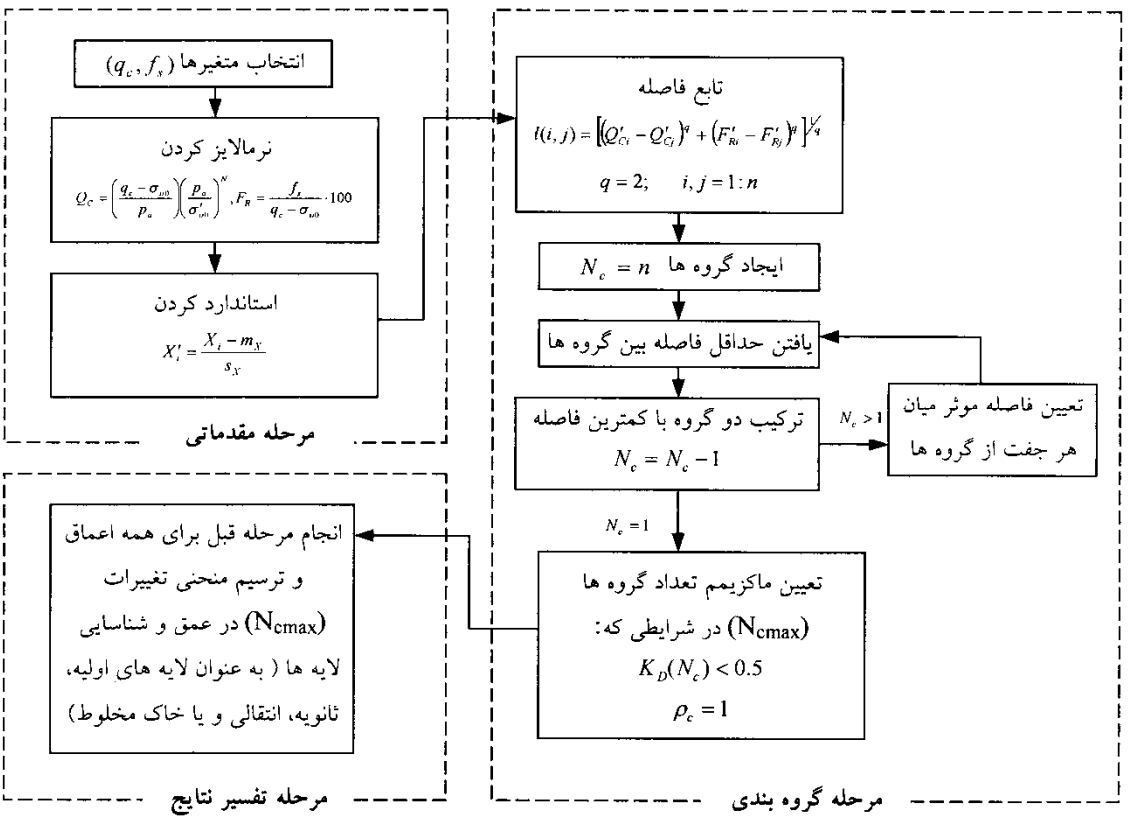
که در آن p تعداد متغیرهایی که اندازه‌گیری می‌شوند است.

در شکل ٦ آلگوریتم HAMAD نشان داده شده است.

در این آلگوریتم q_c مقاومت نوک مخروط، f_s نسبت اصطکاک جدار، σ_{v0} و σ'_{v0} به ترتیب تنش قائم کل و مؤثر،

p_a برابر ۰/۱ مگاپاسکال، N پارامتری که دارای مقدار ۰/۵ برای ماسه‌ها و ۱/۰ برای رس‌ها است، m_X و s_X به ترتیب میانگین و انحراف معیار متغیرهای استاندارد شده، K_D مشتق تابع فاصله و ρ_c ضریب همبستگی بین دو گروه مجاور در دو مرحله متوالی بوده و به صورت رابطه ۸ محاسبه می‌شود Neter et al., (1995)

$$\rho_c = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{i(j)} - m_{(j)})(x_{i(j+1)} - m_{(j+1)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{i(j)} - m_{(j)})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_{i(j+1)} - m_{(j+1)})^2}} \quad (۸)$$



شکل۶. دیاگرام آلگوریتم HAMAD

که در آن $x_{i(j)}$ شماره گروه متغیر i در مرحله j و $m_{(j)}$ متوسط وزن‌دار تعداد متغیرها در هر گروه در مرحله j است. فرآیند گروه‌بندی تا جایی ادامه می‌یابد که مقدار K_D کمتر از ۰/۵ و ρ_c برابر یک شود. به این ترتیب مشخص می‌گردد که داده‌های اولیه به چند گروه قابل تقسیم خواهد بود.

در این تحقیق آلگوریتم مناسب برای انجام تحلیل گروهی, با توجه به ماهیت ژئوتکنیکی داده‌ها (نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی) و طبیعت آن‌ها که دارای تغییرات پیوسته در عمق می‌باشد، مشابه آزمایش نفوذسنجی استاتیکی آلگوریتم HAMAD انتخاب شده است.

همچنین از آنجایی که نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی یک متغیر بی‌بعد است نیاز به نرمالایز نمودن ندارد و بر این اساس تابع فاصله، قدرمطلق تفاضل بین داده‌ها است.

۳-٤. ترکیب نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی و اطلاعات حاصل از گمانه‌ها

همان‌طور که در سابقه موضوع ذکر شد، در موارد زیادی نتایج تعدادی گمانه به‌علاوه نفوذسنجی دینامیکی در دسترس است. بنابراین ترکیب اطلاعات گمانه‌ها و نفوذسنجی ضروری می‌باشد.

برای این منظور ابتدا محل یک گمانه که پروفیل آن در اختیار است و در مجاورت آن یک آزمایش نفوذ سنجی دینامیکی انجام شده است به عنوان نقطه مبنا انتخاب می‌شود. سپس در امتدادهای مختلف با توجه به نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی فاصله مؤثر و در نتیجه سطح مؤثر را تعیین نموده و نتایج آزمایش‌هایی که داخل محدوده سطح مؤثر قرار دارند، جهت انجام تحلیل گروهی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

با انجام تحلیل گروهی این امکان فراهم می‌گردد که بر اساس نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی وضعیت لایه‌بندی در سطح مؤثر، تعیین گردد. حال با مقایسه پروفیل لایه‌ها که از نتیجه تحلیل گروهی به‌دست آمده است با پروفیل گمانه نقطه مبنا و سایر گمانه‌هایی که در داخل محدوده سطح مؤثر قرار دارند می‌توان با دقت مناسبی لایه‌بندی سطح مؤثر را تعیین کرد.

البته چنان‌چه در مجاورت گمانه به‌جای نتیجه یک آزمایش نفوذسنجی دینامیکی، نتایج آزمایش نفوذ استاندارد در مقطع گمانه در اختیار باشد می‌توان نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی در سایر نقاط را به مقدار عدد نفوذ استاندارد معادل بر مبنای روابط انرژی بین آن‌ها تبدیل نمود Gaba et al., (2004) و Card et al., (1990). در این خصوص ضریب تبدیل تئوری بین نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی و آزمایش نفوذ استاندارد با استفاده از رابطه ۹ قابل محاسبه می‌باشد:

$$f = \frac{N_{DP}}{N_{SPT}} = \frac{E_{SPT}}{E_{DP}} \frac{l_{DP}}{l_{SPT}} \qquad (۹)$$

در رابطه بالا N تعداد ضربه در آزمایش، l طول نفوذ در هر مرحله از آزمایش (که برای آزمایش نفوذسنجی دینامیکی بر حسب نوع آن ۱۰ یا ۲۰ سانتی‌متر و برای آزمایش نفوذ استاندارد ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد) و E انرژی مخصوص به ازای هر ضربه است که بر اساس رابطه ۱۰ محاسبه می‌شود.

$$E = MgH \Big/ A \qquad (۱۰)$$

که در آن E انرژی مخصوص برحسب کیلوژول بر مترمربع، M وزن چکش بر حسب کیلوگرم، H ارتفاع سقوط چکش بر حسب متر، g شتاب جاذبه بر حسب متر بر مجذور ثانیه و A سطح مقطع مخروط و یا قسمت نوک بر حسب مترمربع است.

لازم به ذکر است که برای برخی از انواع نفوذسنج‌های دینامیکی میزان دقت ضریب تبدیل f بررسی شده است. به عنوان نمونه برای نفوذسنج دینامیکی نوع سنگین(DPH) مقدار خطا حدود۷ درصد اندازه‌گیری شده است Card et al., (1990).

یکی دیگر از کاربردهای محاسبه عدد نفوذ استاندارد معادل آزمایش نفوذسنجی دینامیکی، سهولت تعیین فاصله مؤثراست.

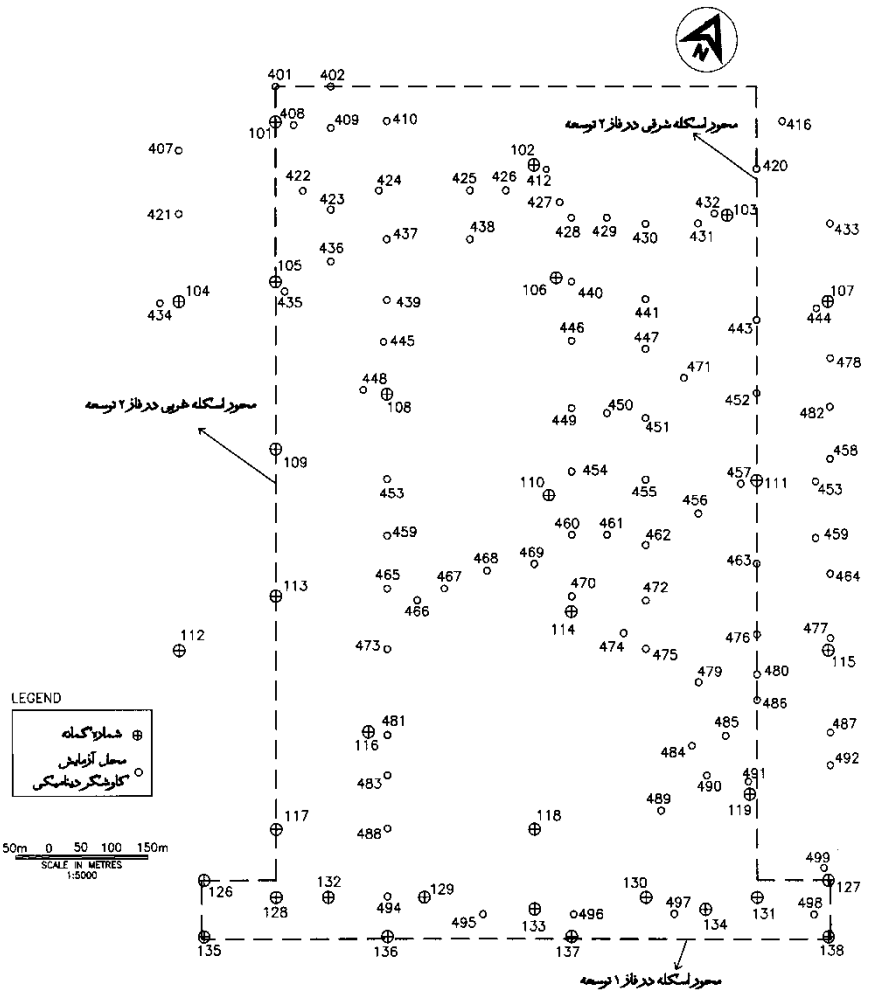
٤.مطالعه موردی

در این بخش به‌کارگیری روش پیشنهادی در تحقیق حاضر در ساختگاه بزرگ پروژه توسعه بندر شهید رجایی بررسی می‌شود. لازم به ذکر است که در این تحقیق به منظور ترسیم منحنی‌های k، اجرای آلگوریتم تحلیل گروهی و در نهایت ارائه نیمرخ لایه‌ها در عمق، یک نرم‌افزار Spread Sheet با نام SPSCA تهیه شده است.

در این برنامه ابتدا با توجه به اطلاعات مربوط به نقطه مبنا و نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی در امتدادهای مختلف، منحنی‌های تغییرات k در عمق ترسیم می‌گردد. سپس با تعیین فاصله مؤثر در امتدادهای مختلف آزمایش‌هایی که در داخل سطح مؤثر قرار دارند مشخص می‌شوند. در ادامه در یک شیت دیگر آلگوریتم تحلیل گروهی برای نتایج آزمایش‌های مزبور اجرا شده و نمودار تعداد گروه‌ها در عمق ترسیم می‌گردد. در نهایت با استفاده از این نمودار، نیمرخ لایه‌ها در عمق تعیین میشود.

٤-١. ویژگی‌های کلی پروژه توسعه بندر شهید رجایی

این بندر در ٦٠ کیلومتری شرق بندرعباس واقع شده است. منطقه مورد نظر جهت توسعه آن دارای سطحی بیش از یکصد هکتار بوده که در آن علاوه بر انجام آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی، عملیات گمانه‌زنی و سایر آزمایش‌های متداول ژئوتکنیکی به دقت انجام شده است (شکل۷).



شکل ۷. پلان محل گمانه‌ها و انجام آزمایش کاوشگر دینامیکی در مطالعات ژئوتکنیک درپروژه فاز ۱ و۲ توسعه بندر شهید رجایی

در این منطقه با توجه به وسعت آن، تعدادی گمانه حفر شده و در فاصله بین آنها آزمایش نفوذسنجی دینامیکی انجام شده است. تعداد زیاد آزمایش‌ها و همچنین پیچیدگی نسبی لایه‌ها موجب شد که لایه‌بندی با قضاوت‌های فردی تفاوت‌های زیادی داشته باشد. لذا روش پیشنهادی در تحقیق حاضر برای لایه‌بندی مورد استفاده قرار گرفت.

٤-٢. به‌کارگیری روش پیشنهادی این تحقیق

به منظور اعمال روش پیشنهادی در تحقیق حاضر محل گمانه BH103 به عنوان نقطه مبنا انتخاب شده است. زیرا در مجاورت آن آزمایش نفوذسنجی دینامیکی ٤٣٢ انجام شده بود.

در این محل بر اساس پروفیل گمانه BH103 لایه‌های زیرسطحی شامل یک لایه یک متری از خاک دستی، یک لایه ۱/۵ متری از شن ماسه‌دار و پس از آن تا عمق ۱۰ متر شامل لایه‌ای از ماسه سیلت‌دار با اندکی رس است.

با توجه به آرایش آزمایش‌های انجام شده در اطراف نقطه مبنا در شکل ۷، جهت تعیین فاصله مؤثر ۷ امتداد در نظر گرفته شده است (شکل ۸).

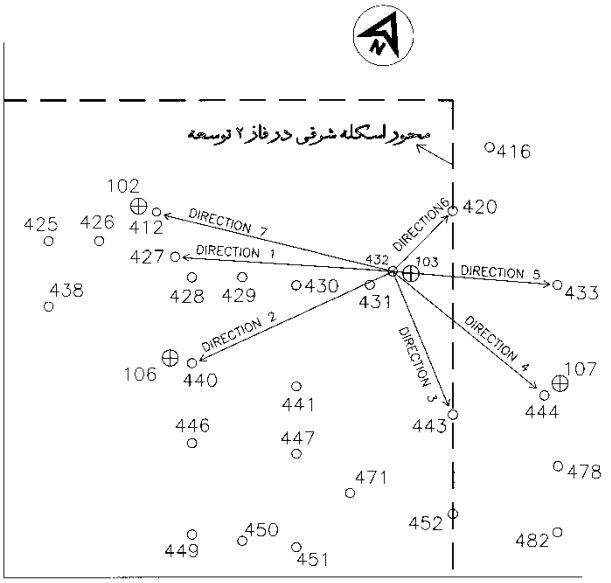
سپس در هر امتداد و برای محل هر آزمایش منحنی تغییرات k با نرم‌افزار SPSS در عمق ترسیم گردیده است. در منحنی تغییرات k بر حسب عمق، چنانچه مقدار k بطور پیوسته در ضخامتی بیش از ۳۰ سانتی‌متر از یک بزرگ‌تر نباشد آن آزمایش در محدوده فاصله مؤثر خواهد بود. این شرط با در نظر گرفتن حداکثر ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای یک لایه نازک تعریف شده است. به عبارت دیگر اگر مقدار k به‌طور پیوسته در ضخامتی بیش از ۳۰ سانتی‌متر از یک بزرگ‌تر باشد، این مقدار به عنوان تغییر در لایه‌بندی قلمداد می‌شود.

لازم به ذکر است که آزمایش‌های نفوذسنجی دینامیکی در اطراف نقطه مبنا با استفاده از نفوذسنج نوع متوسط (DPM) انجام شده که عمق این آزمایش‌ها عمدتاً بین ٤/٥ تا۱۰ متر است. لذا به منظور آنکه بتوان از نتیجه همه این آزمایش‌ها استفاده شود در این مقاله صرفاً بررسی تا عمق ٤/٥ متر ارائه می‌گردد تا مثال کاملی از کاربرد روش پیشنهادی این مقاله ارائه شود.

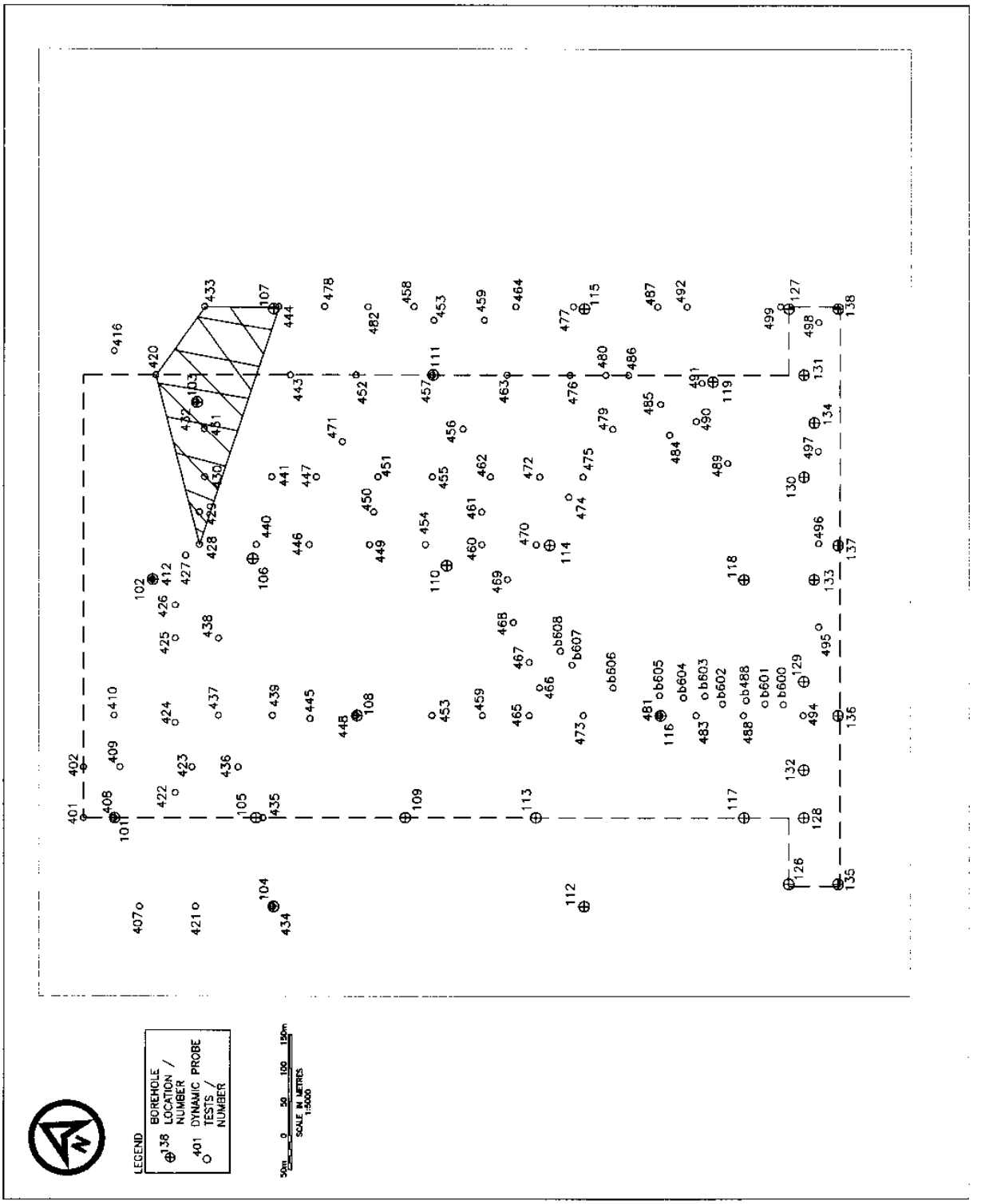
به این ترتیب با تعیین فاصله مؤثر در امتدادهای مختلف سطح مؤثر، یعنی سطحی که در آن وضعیت لایه‌ها و تغییر مقاومت در آنها ثابت است، مشخص می‌شود. این سطح در شکل۹ نشان داده شده است.

پس از این مرحله نتایج آزمایش‌هایی که در امتدادهای گوناگون در فاصله مؤثر یعنی داخل محدوده سطح مؤثر قرار دارند، جهت انجام تحلیل گروهی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همان‌طور که قبلاً ذکر شد جهت اجرای آلگوریتم تحلیل گروهی و در نهایت ارائه نیم‌رخ لایه‌ها در عمق، نرم‌افزار SPSCA که جهت این تحقیق تهیه شده مورد استفاده قرار گرفته است.

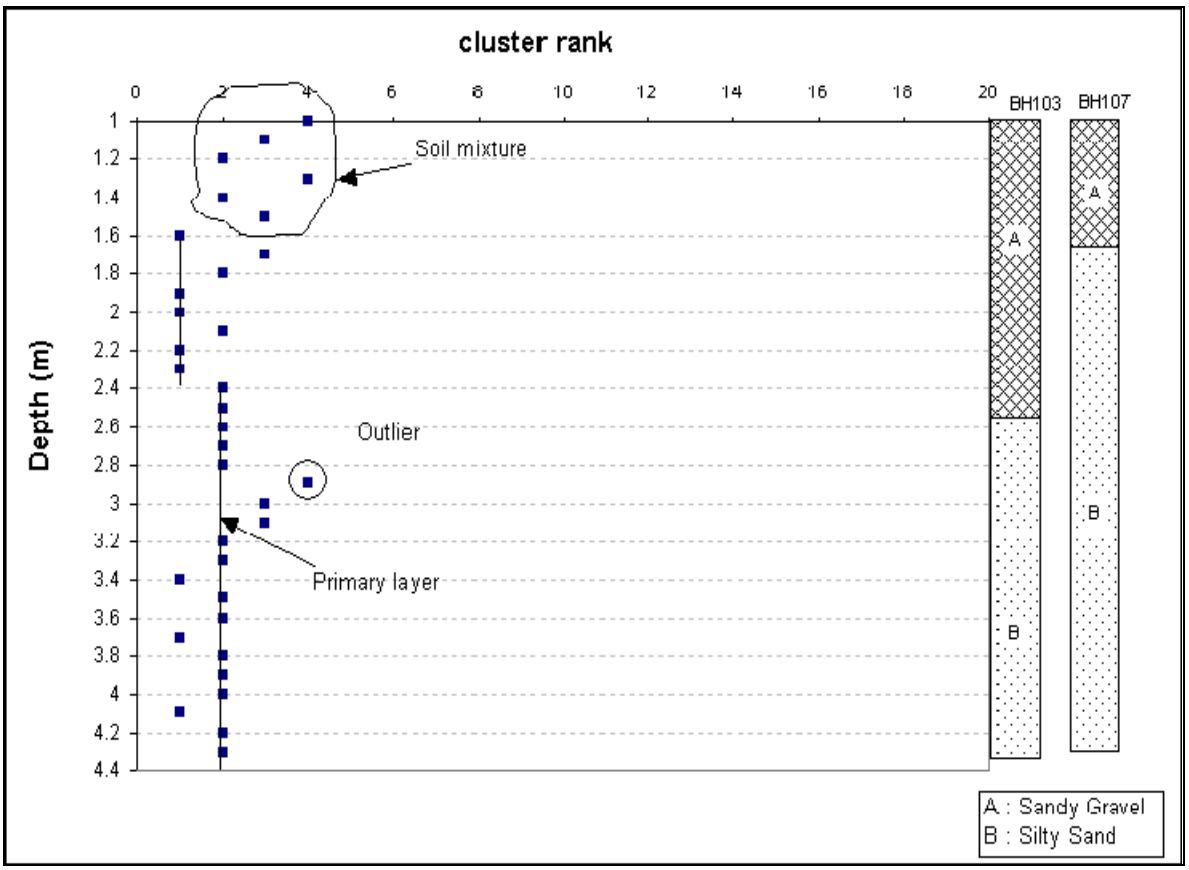
شکل ۱۰ پروفیل لایه‌ها را که بر اساس اعمال روش تحلیل گروهی به‌دست آمده است نشان می‌دهد. در این شکل مقطع دو گمانه که داخل محدوده سطح مؤثر در شکل ۹ قرار دارند، نیز ترسیم شده است.



شکل ۸. انتخاب نقطه مبنا و امتدادهای مختلف



شکل ۹. سطح مؤثر اطراف گمانه BH103



شکل ۱۰. تعیین لایه‌بندی از نتایج آزمایش نفوذسنجی دینامیکی با استفاده از روش تحلیل گروهی

به این ترتیب روش ارائه شده در این تحقیق این امکان را فراهم نمود که بتوان نسبت به محل گمانه BH103 به عنوان نقطه مبنا سطحی را تعیین کرد که وضعیت لایه‌بندی در آن سطح همسان‌گرد (دارای وضعیت یکسان در جهات گوناگون) باشد (شکل۹). همچنین با مقایسه پروفیل گمانه BH103 به عنوان نقطه مبنا و گمانه BH107 که در داخل محدوده سطح مؤثر قرار دارد می‌توان از دقت سطح مؤثر تعیین شده، اطمینان حاصل نمود و در نهایت پروفیل لایه‌بندی سطح مؤثر را پیشنهاد کرد.

۵. نتیجه گیری

الف- چنانچه لایه‌بندی تنها بر اساس مقطع گمانه‌ها انجام شود اشکال و ایراد مهم، عدم اطلاع از وضعیت لایه‌ها در بین گمانه‌ها است.

ب- با در اختیار داشتن نتایج توام پروفیل گمانه‌ها و آزمایش‌های محلی با اطمینان بیشتری می‌توان لایه‌بندی تعیین کرد. لیکن تعیین تأثیر نتایج آزمایش‌های محلی در لایه‌بندی کاری دشوار و پیچیده است و تنها یک مهندس ژئوتکنیک با شناخت کافی نسبت به محل می‌تواند در این خصوص اقدام نماید.

ج- بر اساس روش پیشنهادی در تحقیق حاضر می‌توان دو دسته اطلاعات مثل نتایج حاصل از گمانه‌ها و نتایج آزمایش‌های نفوذسنجی را ترکیب کرد. این روش در مناطقی که از آزمایش‌های محلی نظیر نفوذسنجی به منظور کاهش تعداد گمانه‌ها استفاده می‌شود، کاربرد دارد.

منابع

تاج الدین، ر. ۱۳۷٦. مدل‌سازی آماری توزیع سه بعدی مشخصه‌های ژئوتکنیکی خاک. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی خاک و پی، فرزانه، اورنگ (راهنما)، گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۲۰۹ ص.

حسنی پاک، ع. ا. ۱۳۷۷. زمین‌آمار. نشر دانشگاه تهران، ۳۱٤ ص.

خداپرست، م. و فاخر، ع. ۱۳۸۹. کاربرد کاوشگر دینامیکی در مطالعه خاک‌های ریزدانه و بررسی تکرارپذیری نتایج. چهارمین همایش بین‌المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران.

خداپرست، م. و فاخر، ع. ۱۳۸٤. توسعه تکنیک‌های شناسایی ژئوتکنیکی خاک‌ها با کاوشگرهای دینامیکی در پروژه‌های آبی. گزارش تحقیقی، مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو.

داس، ب. م. ،۱۳۷۲. اصول مهندسی ژئوتکنیک، مکانیک خاک. صالح زاده، حسین (مترجم)، جلد دوم، نشر دانشگاه علم و صنعت، ۳۸۰ ص.

رندو، ج. م. ، ۱۳۷۱. اصول زمین‌آماری. خدایاری، علی‌اصغر (مترجم)، نشر جهاد دانشگاهی دانشگاه تهران، ۲۱۲ ص.

شکرانی، ح. ۱۳۷۹. ساخت، بکارگیری و کالیبره نمودن ابزار مکینتاش برای شناسایی زمین. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی خاک و پی، فاخر، علی(راهنما)، گروه مهندسی عمران دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۷۷ ص.

مدنی، ح. ۱۳۷۳. مبانی زمین‌آمار. نشر دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ٦٦۰ ص.

Alam, M.J., Azad, A.K., Rahman, Z., 2008. Prediction of Liquefaction Potential of Dredge Fill Sand by DCP and Dynamic Probing. Proc. Seismic Engineering Conference, Reggio Calabria, Italy, pp 413-418.

Baecher, G.B., Christian, J.T., 2003. Reliability and Statistic in Geotechnical Engineering. Wiley and Sons, Inc., 605 p.

Butcher, A.P., Mcelmeel, K., Powel, J.J. M., 1996. Dynamic probing and its use in clay soils. Advance in Site Investigation Practice, Thomas Telford, London, pp. 383-395.

Card, G.B., Roche, D.P., Herbert, S.M., 1990. Application of continuous dynamic probing in ground investigation: Field Testing in Engineering Geology. Geological Society Engineering Geology Special Publication No 6: pp. 129-135.

Chiasson, P., Lafleur, J., Soulié, M., Law, K.T., 1995. Characterizing spatial variability of a clay by geostatistics. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 32: pp. 1-10.

DIN 4094, 1974. Dynamic and Static penetrometers: Dimensions of apparatus and method of operation. Deutsches Institut fur Normung e. V. Berlin.

Eitner, V., Katzenbach, R., Stolben F., 2004. International and European Standards on characterization. Proc. 2nd Int. Conf. Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Porto, pp. 307-313.

Facciorusso J., Uzielli M., 2004. Stratigraphic profiling by cluster analysis and fuzzy soil classification from mechanical cone penetration tests. Proc. 2nd Int. Conf. Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Porto, pp. 905-912.

Fakher, A., Khodaparast, M. Jones, C.J.F.P., 2006. The use of Mackintosh Probe for site investigation in soft soils. Q.J.E.G. London, No. 39: pp. 189-196.

Sabtan, A.A., Shehata, W.M., 1995. Mackintosh Probe as an exploration tool. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, Paris, No. 50: pp. 89-94.

Fakher, A., Khodaparast, M., Pahlvan, B., 2001. Coastal soft clay improvements using preloading - A case study. Proceeding of 3rd International Conference Soft Soil Engineering, Hong Kong, pp. 465-469.

Gaba, A.R., Pickles A.C., Oliveira R., 2004. Casa da música do Porto: Site characterization. Proc. 2nd Int. Conf. Geotechnical and Geophysical Site Characterization, Porto, pp. 1089-1096.

Huntley, S.L., 1990. Use of dynamic penetrometer as a ground investigation and design tool in Hertfordshire. Field Testing in Engineering Geology: Geological Society Engineering Geology Special Publication, No. 6: pp. 145-159.

Low, I.J., Zaccheo¸ P.F., 1990. Subsurface explorations and sampling. Foundation Engineering Handbook, Fang, Y.H. (eds), Chapman & Hall Publishers, pp. 12-14.

Miyamoto, S., 1990. Fuzzy sets in information retrieval and cluster analysis. Kluwer Academic Publishers, 251 p.

Neter, J., Wasserman, W., Kutner, M.H., 1990. Applied linear statistical models: Regression analysis of variance and experimental designs. Richard D. Irwin, Inc., 1012 p.

Phoon, K.K., Kulhawy, F.H., 1995. Characterizing of geotechnical variability. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 36: pp. 612-624.

Phoon, K.K., Kulhawy, F.H., Grigoriu, M.D., 1995. Reliability based foundation design for transmission line structures. Electric Power Research Institute, Palo Alto, Report TR-105000.

Spry, M.J., Kulhawy, F.H., Grigoriu, M.D., 1988. Reliability based foundation design for transmission line structures: geotechnical site characterization strategy. Electric Power Research Institute, Palo Alto, Calif., Report EL-5507