

پهنه‌بندی خطر روانگرایی شهر بوشهر براساس نتایج آزمایش نفوذ استاندارد با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)

مهرداد زارع^۱ و علیرضا حاجیانی بوشهریان^{۲*}

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کرمانشاه

^۲ گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شیراز

(دریافت: ۹۶/۱/۲۸، پذیرش: ۹۶/۹/۱۸، نشر آنلاین: ۹۶/۹/۱۹)

چکیده

مطالعه ژئوتکنیکی شهر بوشهر به لحاظ وجود تأسیسات مهم نظامی و هسته‌ای، مخازن نفتی و توسعه شهری حساسیت بالایی دارد. در این تحقیق بر اساس نتایج آزمایش‌های نفوذ استاندارد و مطالعات ژئوتکنیک انجام شده توسط شرکت‌های مهندسی مشاور، استعداد روانگرایی با استفاده از دو روش مهم و معمول Seed و Idriss (۱۹۷۱) و Iwasaki و همکاران (۱۹۸۲)، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به وسیله نرم‌افزار ArcGIS به صورت پهنه‌بندی ارائه گردید. مناطق مختلف شهر از لحاظ پتانسیل روانگرایی و سطح آب زیر زمینی بررسی شده و نتایج به صورت هم‌پوشانی با هم مقایسه گردید. نتایج پهنه‌بندی نشان می‌دهد که اکثر نقاط شهر خصوصاً مناطق ساحلی به دلیل سطح بالای آب زیرزمینی و خاک ماسه‌ای سست در لایه‌های فوقانی زمین، دارای پتانسیل بالای روانگرایی هستند و در برخی مناطق از جمله نقاط احداث تأسیسات هسته‌ای، احتمال بروز خطر روانگرایی مشاهده نشد. مقایسه نتایج دو روش ارزیابی روانگرایی مشابهت نسبی را نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: روانگرایی، آزمایش نفوذ استاندارد، نرم‌افزار ArcGIS، پهنه‌بندی.

۱- مقدمه

روانگرایی بیشتر مورد توجه مهندسان قرار گرفت. در این پژوهش در اعماق ۰ تا ۱۰ متر ارزیابی روانگرایی مورد بررسی قرار گرفته و روانگرایی به روش‌های موجود Idriss و Seed (۱۹۷۱) و Iwasaki و همکاران (۱۹۸۲)، بررسی گردیده است و نتایج حاصل به کمک نرم‌افزار ArcGIS به صورت پهنه‌بندی استخراج گردید. بنابر این با توجه به استراتژیک شهر بوشهر از لحاظ تأسیسات‌های نظامی و هسته‌ای و شبه‌جزیره بودن این شهر و وجود مخازن نفتی و گازی عظیم، همچنین ماسه‌ای بودن و تراز سطح آب‌های زیر زمینی باعث گردیده مطالعه دقیق‌تری به لحاظ استعداد روانگرایی بر روی نهشته‌ها انجام گردد.

استان بوشهر با مساحتی در حدود ۲۳۱۶۷ کیلومتر مربع در حدود ۵/۱ درصد مساحت کل کشور را تشکیل می‌دهد که ۹۸۲۵ کیلومتر مربع (۷/۳۸٪) آن را دشت و ۱۵۵۳۵ کیلومتر مربع (۳/۶۱٪) بقیه ارتفاعات را شامل می‌گردد. این استان بین محدوده جغرافیایی ۲۷ درجه و ۱۴ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵۸ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار مبدأ گرینویچ قرار گرفته است. شهرستان بوشهر مرکز استان بوشهر

زلزله، از جمله بلاای طبیعی می‌باشد که با دانش و تکنولوژی جدید بشر تاکنون موفق به پیش‌بینی دقیق زمان وقوع آن نگردیده است. زلزله تأثیر مخربی بر روی پوسته زمین ایجاد می‌کند زلزله خرابی‌های متعددی ایجاد می‌نماید که برخی از مهم‌ترین خرابی‌ها نتیجه مستقیم پدیده روانگرایی می‌باشند. هنگامی که خاک اشباع در اثر حرکات لرزه‌ای قرار می‌گیرد، فشار آب در داخل خلل و فرج خاک شروع به افزایش می‌نماید. در خاک‌های غیر چسبیده اشباع، افزایش فشار آب منفذی باعث می‌شود برای لحظاتی مقاومت برشی خاک به شدت کاهش یافته و به طور کامل از بین می‌رود. از عوامل تأثیرگذار بر وقوع روانگرایی می‌توان به بزرگای زلزله و مدت زمان آن، تخلخل، تراکم نسبی، درصد ریزدانه، نشانه خمیری و دامنه تنش برشی اعمالی بر توده خاک در حین زلزله اشاره کرد (Seed و Idriss، ۱۹۷۱). به این پدیده در اصطلاح روانگرایی خاک گفته می‌شود.

Terzaghi در سال ۱۹۲۵ بحث فروپاشی خاک غیر اشباع را مطرح نمود سپس از آن تاریخ تا زلزله ۱۹۶۴ نیگاتا و آلاسکا

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۹۱۷-۷۰۲۸۰۷۲

ویجایا وادا و دهلی که دارای پتانسیل لرزه‌خیزی با خطر متوسط به بالا بوده، بررسی نمودند.

Lodi و همکاران در سال ۲۰۱۵، در پژوهشی به بررسی پتانسیل زلزله در خط ساحلی شهر کراچی پرداختند. نتایج حاصل از مطالعه بر اساس محاسبه ضریب ایمنی تعیین شده به روش Idriss و Seed (۱۹۷۱) و روش Youd و همکاران (۲۰۰۱)، می‌باشد. مطالعه انجام شده بر مبنای نتایج حاصل از آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) متشکل از ۱۲۰ گمانه مختلف واقع در مناطق ساحلی و در ارتباط با پروژه‌های مسکونی سازمان دفاع و منطقه صنعتی بندر قاسم انجام شده بود. بزرگی زلزله در تجزیه و تحلیل در نظر گرفته شده ۷/۵ می‌باشد. مطالعه ایشان که در نهایت به صورت نقشه ارائه شده است، نشان می‌دهد که نواحی ساحلی کراچی بسیار مستعد وقوع پدیده روانگرایی در یک زمین‌لرزه است. در سال‌های اخیر نیز محققین مختلف روانگرایی شهرهای مختلف را با استفاده از نتایج آزمایش SPT بررسی کردند (Jawaid و Singh، ۲۰۱۶؛ Rakesh و همکاران، ۲۰۱۶).

از طرفی گروه دیگر از پژوهشگران، برای برآورد خطر روانگرایی خاک از سرعت موج برشی (v_s) و با استفاده از روش انستیتو ملی تکنولوژی و تحقیقات آمریکا استفاده می‌کنند (Andrus و همکاران، ۱۹۹۹). این انستیتو در سال ۱۹۹۹ ضمن بررسی کلیه مطالعات آزمایشگاهی Dobry و همکاران (۱۹۸۱) و Rashidian (۱۹۹۵)، مطالعات تحلیلی Bierschwale (۱۹۸۴) و Andrus (۱۹۹۴)، روابط میان نتایج آزمایش نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی Lodge (۱۹۹۴) و Rollins و همکاران (۱۹۹۸) و داده‌های صحرائی، اندازه‌گیری سرعت موج برشی در محل Robertson و همکاران (۱۹۹۲) و Andrus و همکاران (۱۹۹۷)، تا آن زمان و با مقایسه نتایج حاصل از روابط بین نسبت مقاومت تناوبی (CRR) و سرعت موج برشی اصلاحی (v_{st}) که توسط Robertson و همکاران (۱۹۹۲)، Kayen و همکاران (۱۹۹۲)، Lodge (۱۹۹۴) و Andrus و همکاران (۱۹۹۷)، به دست آمده بود، منحنی‌هایی را ارائه نمودند.

۳- شرایط عمومی و ویژگی‌های زمین ریخت شناسی شهر بوشهر

شهر بوشهر و روستاهای پیرامون به صورت شبه جزیره‌ای با ارتفاع کم از سطح دریا و با توپوگرافی نسبتاً مسطح‌اند که بر روی یکی از تاقدیس‌های زون چین‌خورده زاگرس شکل گرفته‌اند. بخش‌های شمالی و غربی این شبه‌جزیره در محاصره آب‌های خلیج فارس بوده و سمت شرقی آن محدود به منطقه‌ای کم ارتفاع و فرو افتاده (احتمالاً مرتبط با یک ناودیس) است که با بالا آمدن سطح آب دریا در مواقع مد زیر آب قرار می‌گیرد. در مجموع بوشهر منطقه همواری را شامل می‌شود که عوارض ژئومورفولوژیکی قابل

است که در طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه و عرض جغرافیایی ۲۸ درجه و ۵۹ دقیقه قرار دارد. بندر بوشهر به صورت شبه‌جزیره‌ای بر کرانه خلیج فارس واقع شده است. در اطراف این شبه‌جزیره خورهای سلطانی، لشکری و پودر اهمیت دارد. از مهم‌ترین پدیده‌های زمین‌شناسی وجود گنبد‌های نمکی و چرخش تاقدیس‌های منطقه ناشی از گسل کازرون می‌باشد. از معروف‌ترین گسل‌های استان بوشهر، گسل کازرون، گسل برازجان و گسل پیشانی کوهستانی هستند.

۲- تحقیقات گذشته

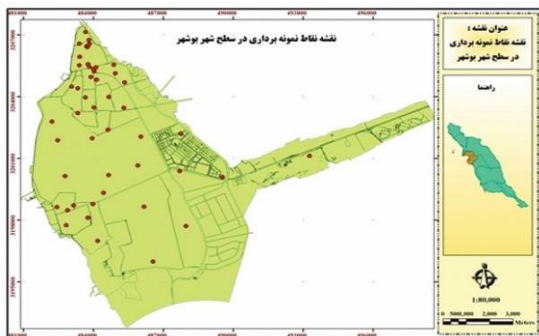
عسکری و کسای (۱۳۸۲)، پتانسیل روانگرایی در جنوب شرق تهران را با استفاده از روش ساده شده Idriss و Seed ارزیابی کردند و با استفاده از روش Iwasaki و همکاران شاخص پتانسیل روانگرایی را تعیین کردند و به ارزیابی خطر روانگرایی پرداختند. انصاری و منصوری کیا (۱۳۸۷)، در پژوهشی با عنوان بررسی پر کاربردترین روش ارزیابی پتانسیل روانگرایی در ایران به روش Seed و Idriss اشاره کردند.

عدالت‌حقی و سیدعابدین (۱۳۹۱)، در پژوهشی به بررسی پتانسیل روانگرایی در جنوب تهران ناشی از رخداد زلزله پرداختند. کنگی و خطیبی (۱۳۹۱)، شهر کویری کرمان را برای مطالعه پتانسیل روانگرایی انتخاب کردند. کرمان بر روی افق ماسه‌ای بنا شده است و در طی دو دهه اخیر افزایش جمعیت شهر و استفاده از چاه‌های جذبی باعث بالا آمدن سطح آب حتی در بخش مرکزی تا عمق ۳ متری شده که این مسأله باعث افزایش پتانسیل روانگرایی گردیده است.

محمدی و همکاران (۱۳۹۱)، نیز خطر نسبی روانگرایی متأثر از زلزله در نوار ساحلی استان بوشهر (منطقه پارس جنوبی واقع در عسلویه) را به روش Idriss و Seed واقع در فازهای مناطق گازی پارس جنوبی (فاصله ۳۰۰ کیلومتری از شهر بوشهر قرار دارد) بررسی کردند.

معروف و همکاران (۱۳۹۲)، در پژوهشی با عنوان «بررسی پتانسیل وقوع روانگرایی در بستر سدها» چنین بیان داشتند که در اثر پدیده روانگرایی ممکن است سازه‌های روزمینی در خاک فرو روند یا کج شوند، سازه‌های سبک مدفون در خاک مانند مخازن و خطوط لوله بالا بیایند، خاک گسترش جانبی پیدا کند و باعث رانش و لغزش شیروانی‌ها شود. با توجه به جنس مصالح پی سد بینالود و وجود لایه‌ها ماسه‌ای لای‌دار پتانسیل روانگرایی در بستر این سد ارزیابی شده و بر لایه‌های مستعد روانگرایی، امکان وقوع روانگرایی با استفاده از معیارهای موجود با استفاده از نرم‌افزار NovoLIQ بررسی شده است.

Rao و Satyam در سال ۲۰۱۴، خطر روانگرایی را بر مبنای نتایج آزمایش نفوذ استاندارد و سرعت موج برشی برای دو شهر



شکل ۱- موقعیت گمانه‌ها در محدوده شهر بوشهر

گزارش سطح آب زیرزمینی در زمان حفاری، در ارزیابی اولیه سطح ایستایی مد نظر قرار گرفته است. ضمن این که نتیجه با نقشه‌های تهیه شده توسط سازمان‌ها دولتی و دستگاه‌های اجرایی آنها کنترل شده است.

در انتخاب نوع خاک، اطلاعات گمانه‌هایی که در آن خاک‌های رسی و خاک‌های شن‌دار مشاهده شده بود به ترتیب به دلیل چسبندگی بالا و استهلاک سریع اضافه فشار آب منفذی به علت نفوذپذیری بالا، حذف شده است. این خاک‌ها عملاً استعداد روانگرایی پایینی دارند. البته بر مبنای روش‌ها و مطالعات جدید، می‌بایست پتانسیل روانگرایی خاک‌های ریزدانه را به صورت جداگانه و بر اساس خصوصیات خمیری آنها ارزیابی کرد. خاک‌های ماسه‌ای ریز و لای‌دار سست، به دلیل نداشتن چسبندگی قابل ملاحظه، تمایل به تغییر حجم در اثر ارتعاشات ناشی از زلزله و عدم زهکشی مناسب مستعد روانگرایی می‌باشند.

بر اساس مطالعات انجام شده پژوهشگاه بین‌المللی زلزله چشمه خطی شماره ۱۵ نزدیک‌ترین چشمه به شهر بوشهر می‌باشد. لذا با توجه به بزرگای و طول گسیختگی حداکثر بزرگای $M_{max}=6.1$ برای این چشمه خطی به روش تعیینی در نظر گرفته شده است و حداکثر بیشینه شتاب افقی به روش تعیینی $0.3g$ تخمین زده شده است (داودی، ۱۳۸۹). همچنین بیشینه شتاب افقی به روش احتمالی برای دوره بازگشت‌های ۴۷۵ و ۲۴۷۵ سال برای شبکه 1×1 کیلومتر مربع برای سنگ بستر در محدوده بوشهر و تنگک و بهمنی تخمین زده شده است (داودی، ۱۳۸۹).

۴- ارزیابی پتانسیل روانگرایی بر مبنای عدد نفوذ استاندارد (SPT)

از معروف‌ترین روش‌های مبتنی بر نتایج آزمون صحرایی SPT در ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک یک منطقه، می‌توان روش‌های ذیل را نام برد:

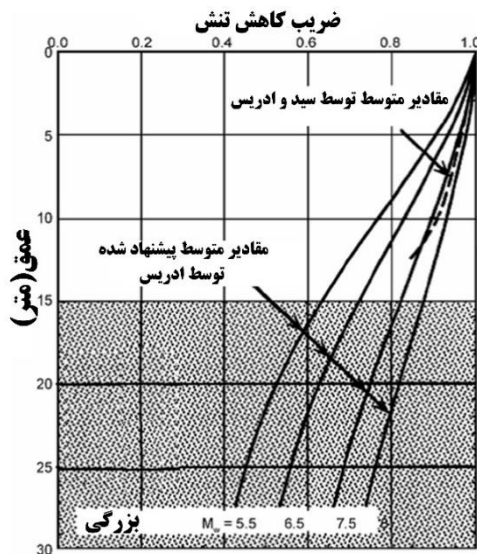
- ۱- روش Seed و همکاران (۱۹۷۱)
- ۲- روش Ishihara و همکاران (۱۹۹۰)
- ۳- روش Tatsuoka و همکاران (۱۹۸۰)
- ۴- روش Iwasaki و همکاران (۱۹۸۲)

توجهی در آن مشاهده نمی‌شود. با حرکت به سمت قسمت‌های مرکزی تاقدیس (جاده بوشهر- هلیله به سمت نیروگاه اتمی بوشهر) ارتفاع از سطح دریا افزایش یافته و به تبع آن عملکرد عوامل فرسایش باعث ایجاد آبراهه‌های محدودی گردیده است. از جمله می‌توان به آبکند موجود در محله ریشهر در جنوب منطقه بهمنی اشاره کرد. به سمت مناطق جنوبی‌تر و حد واسط تنگک و هلیله تپه ماهورهای کم ارتفاع با ستیغ‌های مسطح و عریض خودنمایی می‌کنند.

در سال‌های اخیر، به منظور ارزیابی قابلیت روانگرایی ماسه‌های سست و اشباع، روش‌های متعددی پیشنهاد شده است. در این روش‌ها معمولاً تنش‌های برشی ایجاد شده در زمان زلزله تعیین، و با تنش‌های برشی سیکی مقاوم لایه خاک مقایسه می‌گردد. مهم‌ترین آزمون‌های آزمایشگاهی جهت تعیین مقاومت برشی سیکی خاک آزمون‌های سه محوری سیکی و برش سیکی می‌باشند که در هر دوی آنها به نمونه‌های دست نخورده نیاز است که تحت شرایط محلی مورد آزمایش قرار می‌گیرند. به دلیل مشکلات قابل ملاحظه‌ای که در خصوص تهیه نمونه‌های دست نخورده، به ویژه در شرایط غیر متراکم و سست وجود دارد، بهره‌گیری از آزمون‌های درجا و محلی به منظور دسترسی به مقاومت سیکی لایه‌های خاک بسیار متداول‌تر می‌باشد.

از میان این آزمون‌ها، آزمون نفوذ استاندارد (SPT)، نفوذ مخروط (CPT) و اندازه‌گیری سرعت موج برشی معمول‌ترین آزمون‌هایی می‌باشند که امروزه در سراسر جهان در مقیاس بسیار وسیع مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

از آنجایی که در منطقه مورد مطالعه در این تحقیق اطلاعات مربوط به آزمون‌های SPT موجود و در دسترس بوده است، در این بخش روش‌های مهم و اصلی در ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک‌ها که بر مبنای نتایج آزمون SPT پایه‌گذاری شده است، مورد بررسی مطالعه قرار گرفته‌اند. به این منظور، اطلاعات ژئوتکنیکی ۱۵۱ گمانه حفاری شده در شهر بوشهر، جمع‌آوری شد و مورد استفاده قرار گرفت. این گمانه‌ها بیشتر در گستره مناطق ساحلی بوده و عمدتاً به روش ماشینی حفر شده‌اند. در بررسی‌های اولیه، از مجموع ۹۸ گمانه موجود، تعداد ۲۵ گمانه با توجه به جنس خاک (شنی و رسی) و ۱۲ گمانه به دلیل سطح پایین آب زیرزمینی، غیر مستعد باری روانگرایی تشخیص داده شدند و تعداد ۱۳ گمانه به جهت قابل اطمینان نبودن نتایج کنار گذاشته شدند. در نهایت ۴۸ گمانه با توجه به تراز آب زیرزمینی و نوع خاک (ماسه‌ای و لای‌دار) مورد ارزیابی قرار گرفتند. شکل (۱) موقعیت مکانی گمانه‌های انتخاب شده را بر روی نقشه نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نقاط نمونه‌برداری در سطح شهر بوشهر را نشان می‌دهد با توجه به تراکم جمعیت و ساخت و سازهای انجام شده بیشترین پراکنش در محدوده شهر می‌باشد.



شکل ۲- چگونگی ارزیابی ضریب کاهش تنش

جدول ۱- ضرایب اصلاح عدد SPT

| عامل | مشخصات تجهیزات | عبارت | ضریب تصحیح |
|----------------|---------------------------|-------|----------------------------------|
| فشار سربار | | C_N | (P_a/σ_v) $C_v \leq 2$ |
| نسبت انرژی | چکش دونات | | ۱/۵-۱ |
| | چکش safety | C_E | ۱۷-۱/۲ |
| | چکش دونات از نوع اتوماتیک | | ۰/۸-۱/۳ |
| قطر گمانه | ۶۵ تا ۱۱۵ میلی متر | | ۱ |
| | ۱۵۰ میلی متر | C_B | ۱/۰۵ |
| | ۲۰۰ میلی متر | | ۱/۱۵ |
| | ۳ الی ۴ متر | | ۰/۷۵ |
| | ۴ الی ۶ متر | | ۰/۸۵ |
| طول میله | ۶ الی ۱۰ متر | C_R | ۰/۹۵ |
| | ۱۰ الی ۳۰ متر | | ۱ |
| | بیش از ۳۰ متر | | < ۱ |
| روش نمونه گیری | نمونه گیری استاندارد | | ۱ |
| | نمونه گیری بدون پوشش | C_s | ۱/۱-۱/۲ |

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{CS60}} + \frac{N_{1CS60}}{135} + \frac{50}{(10 * (N_1)_{CS60} + 45)^2} - \frac{1}{200}$$

$$N_{1CS60} = \alpha + \beta(N_1)_{60}$$

$$\alpha = \begin{cases} 0 & FC \leq 5 \\ e^{(1.76 - \frac{190}{FC^2})} & 5 \leq FC < 35 \\ 5 & FC \geq 35 \end{cases}$$

$$\beta = \begin{cases} 1 & FC \leq 5 \\ 0.99 + \frac{FC^{1.5}}{1000} & 5 \leq FC < 35 \\ 1.2 & FC \geq 35 \end{cases}$$

(۴)

جهت برآورد و ارزیابی خطر وقوع روانگرایی در این پژوهش و برای کامل تر شدن و مقایسه آن از روش های Idriss و Seed (۱۹۷۱) و روش Iwasaki و همکاران (۱۹۸۲)، استفاده شده است. از دلایل اصلی استفاده از این روش ها اطلاعات موجود و مستندات تأیید شده از دفترچه های ژئوتکنیک پروژه های شخصی که زیر نظر سازمان نظام مهندسی استان بوشهر انجام شده و گزارش مطالعات انجام شده توسط دستگاه های اجرایی برای پروژه های ملی و استانی می باشد. نقطه اشتراک همگی این مطالعات اعلام نتایج آزمایش نفوذ استاندارد، دانه بندی و تراز آب زیرزمینی می باشد.

۴-۱- روش Seed و Idriss (۱۹۷۱)

روش ساده شده و Idriss به وسیله ارتباط دادن عدد نفوذ استاندارد با مقاومت برشی سیکی خاک ها، پتانسیل روانگرایی آنها را مورد ارزیابی قرار می دهد. این روش به خاطر وجود داده های فراوان آزمون نفوذ استاندارد و سهولت انجام این آزمون معمولاً برای ارزیابی خطر روانگرایی مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش ایشان یک ضریب ایمنی به صورت زیر معرفی کردند که بر مبنای آن احتمال وقوع پدیده روانگرایی تعیین می شود.

$$FI = \frac{CRR}{CSR} \quad (۱)$$

FL : ضریب ایمنی در برابر وقوع پدیده روانگرایی است.

CSR : نسبت تنش تناوبی

CRR : نسبت مقاومت تناوبی

$FL > 1$: به معنی عدم وقوع روانگرایی در آن منطقه می باشد.

$FL < 1$: به معنی وقوع روانگرایی در آن منطقه می باشد.

$$CSR = \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \times \left(\frac{\sigma}{\sigma'} \right) \times r_d \quad (۲)$$

که در آن:

r_d : ضریب کاهش عمق، جهت کاهش مقاومت (شکل (۲))

$$r_d = 1 - 0.012z \quad (۳)$$

a_{max} : شتاب افقی بیشینه در سطح زمین ناشی از زمین لرزه

σ : تنش قائم کل در عمق مورد نظر در محاسبه روانگرایی

σ' : تنش قائم مؤثر در عمق مورد نظر در محاسبه روانگرایی

g : شتاب جاذبه که برابر با $\frac{m}{s^2}$ ۹/۸۱ در نظر گرفته می شود.

در این روش مقدار نسبت مقاومت برشی تناوبی توده خاک (CRR)، بر اساس نتایج آزمون نفوذ استاندارد و پس از اعمال ضرایب اصلاحی جدول (۱) و به کارگیری نمودار شکل (۳) یا رابطه (۴)، که توسط Idriss و Seed (۱۹۸۳)، ارائه شده به دست می آید. بزرگای زمین لرزه در محاسبات برابر ۷/۵ فرض شده است.

۴-۲- روش Iwasaki و همکاران (۱۹۸۲)

Iwasaki و همکاران در سال ۱۹۸۲ برای ارزیابی شدت روانگرایی احتمالی در یک ساختگاه رابطه پتانسیل روانگرایی و FS ضریب اطمینان در برابر روانگرایی در عمق Z می‌باشد، ارائه نمودند. مقدار PL (پتانسیل روانگرایی) می‌تواند از ۰-۱۰۰ متغیر باشد Iwasaki (۱۹۸۲). برای محاسبه ضریب اطمینان مشابه روش قبل از رابطه (۱) استفاده می‌شود با این تفاوت که مقادیر تنش برشی تناوبی توده خاک (CSR) و نسبت مقاومت برشی تناوبی توده خاک (CRR)، به پیشنهاد Iwasaki و همکاران (۱۹۷۸)، از رابطه‌های زیر به دست می‌آید.

برای محاسبه نسبت تنش برشی تناوبی به مانند روش قبل از رابطه (۳) استفاده می‌شود با این تفاوت که مقدار r_d در این رابطه و در عمق Z از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$r_d = 1 - 0.015z \quad (7)$$

نسبت مقاومت برشی تناوبی در روش Iwasaki و همکاران، از جمع سه ضریب فشار سربار، دانه‌بندی و مقدار درصد ریزدانه خاک به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$CRR = R_1 + R_2 + R_3 \quad (8)$$

که در آن:

$$R_1 = 0.0882 \sqrt{\frac{N_j}{\sigma'_v + 0.7}} \quad (9)$$

و

$$R_2 = \begin{cases} 0.19 & 0.02 \text{ mm} < D_{50} < 0.05 \text{ mm} \\ 0.225 \log \frac{0.35}{D_{50}} & 0.05 \text{ mm} < D_{50} < 0.075 \text{ mm} \\ -0.05 & 0.075 \text{ mm} < D_{50} < 0.2 \text{ mm} \end{cases} \quad (10)$$

و

$$R_3 = \begin{cases} 0 & 0\% \leq FC \leq 40\% \\ 0.004FC - 0.16 & 40\% < FC < 100\% \end{cases} \quad (11)$$

و

$$N_j = 0.833(N_1)_{60} \quad (12)$$

که در آن:

σ'_v : تنش مؤثر قائم در عمق مورد مطالعه (kg/cm²)

D_{50} : اندازه متوسط دانه‌ها

N_j : عدد SPT (بر اساس آیین‌نامه ژاپن)

Iwasaki و همکارانش نشان دادند که در مناطق دارای PL بیش از ۱۵، پتانسیل روانگرایی زیاد بوده و در مناطق دارای PL کمتر از ۵، پتانسیل روانگرایی به حداقل می‌رسد.

که در آن:

$CRR_{7.5v}$: نسبت مقاومت برشی تناوبی توده خاک برای زلزله‌ای

به بزرگای ۷/۵

N_{1CS60} : عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده

FC: درصد ریزدانه توده خاک

با توجه به تأثیر سطح تنش مؤثر، نوع چکش دستگاه، طول میله و فر گمانه بر مقدار عدد نفوذ استاندارد، برای محاسبه مقدار N_{60} از رابطه (۵) بهره گرفته می‌شود.

$$(N_1)_{60} = N \times C_N \times C_E \times C_S \times C_R \times C_B \quad (5)$$

که در رابطه فوق:

$(N_1)_{60}$: نسبت مقاومت برشی تناوبی توده خاک برای زلزله‌ای

به بزرگای ۷/۵

C_N : عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده

C_E : درصد ریزدانه توده خاک

C_S : درصد ریزدانه توده خاک

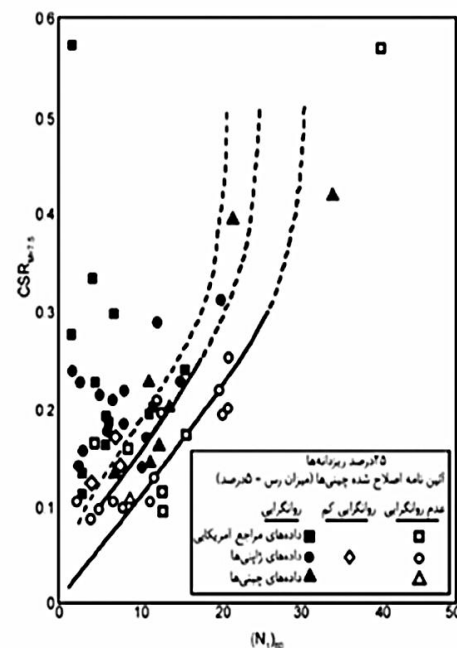
C_B : ضریب اصلاح قطر گمانه

C_R : ضریب اصلاح طول میله

مقدار ضریب اصلاح فشار سربار از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$C_N = \left(\frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^{0.5} \quad (6)$$

که در آن p_a فشار اتمسفر بوده و مقدار آن ۱۰۰ کیلوپاسکال در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳- نمودار تخمین مقاومت برشی تناوبی خاک در روش SPT

جدول ۲- میزان خطر روانگرایی بر اساس روش PL

| | |
|-------------|---|
| PL=0 | خطر روانگرایی خیلی کم است و عموماً نیاز به تحقیقات و مطالعات دقیق نمی‌باشد. |
| 0 < PL ≤ 5 | خطر روانگرایی کم است، با این حال نیاز به تحقیقات و مطالعات دقیق برای سازه‌های مهم می‌باشد. |
| 5 < PL ≤ 15 | خطر روانگرایی زیاد است و نیاز به تحقیقات و مطالعات دقیق برای انواع سازه‌ها می‌باشد. استفاده از روش‌های کاهش مخاطرات روانگرایی معمولاً ضرورت دارد. |
| PL > 15 | خطر روانگرایی خیلی زیاد است و نیاز به تحقیقات و مطالعات دقیق می‌باشد. استفاده از روش‌های کاهش مخاطرات روانگرایی ضروری است. |

برای پهنه‌بندی داده‌های نمونه‌برداری شده در یک محدوده مشخص، ابتدا باید داده‌ها در محیط نرم‌افزار Microsoft Excel به صورت دو ستون X و Y به عنوان مختصات وارد شوند (کاردان مقدم و همکاران، ۱۳۹۲). بدین منظور در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.2، داده‌های تنظیم شده از محیط Excel فراخوان می‌گردد و ضمن شناخته شدن فرمت داده‌ها در این محیط، مخصوصاً در این مرحله UTM نقاط و فرمت اعداد X و Y که مهم‌ترین قسمت ورودی داده‌ها به محیط GIS می‌باشند، باید برای نرم‌افزار شناخته شود. سپس سیستم مختصات منطقه برای نقاط تعریف نموده و در نهایت با پسوند *.shp ذخیره و تشکیل لایه داده می‌شود (ArcGIS 10.2، ۲۰۱۳).

۶- معرفی نرم‌افزار زمین‌آماری مورد استفاده در پژوهش

امروزه با توجه به پیشرفت‌های روزافزون علوم کامپیوتر، نرم‌افزارهای متعددی در جهت تخمین‌های زمین‌آماری تهیه شده است. در این پژوهش از برنامه جانبی تجزیه و تحلیل‌های زمین‌آماری (Geo-Statistical Analyst) که یکی از ابزارهای با قابلیت‌های گسترده در زمین‌آمار در محیط نرم‌افزار ArcGIS می‌باشد، استفاده شده است که روابط و همبستگی داده‌ها را از حیث مکانی بررسی می‌کند.

۷- تحلیل آماری داده‌ها

در بررسی داده‌های خام به منظور تحلیل و آنالیز آن‌ها، در نظر گرفتن خصوصیات آماری آن‌ها نظیر واریانس، میانگین، حداقل، حداکثر، میانه، انحراف معیار، چولگی، کشیدگی و... ضروری است. بر این اساس بررسی نرمال بودن و نرمال‌سازی داده‌ها، همگنی و ناهمگنی جمعیت آماری موجود، همبستگی مکانی بین داده‌های متغیر، بررسی داده‌های پرت و حذف روند از داده‌ها انجام می‌شود که در این پژوهش مراحل زیر را در بر می‌گیرد.

۸- هیستوگرام فراوانی داده‌ها

روش‌های درون‌یابی برای ارائه بهترین پردازش منطقه‌ای با توجه به توزیع نرمال داده‌های خام استفاده می‌شود. کلیه داده‌های خام در صورت داشتن چولگی بایستی با استفاده از توابع تحلیلی تبدیل به نرمال شوند. ابزار هیستوگرام در توابع توزیعی یک متغیره برای هر خصوصیت جهت برآزش نرمال بودن داده‌ها به کار برده می‌شود. این نمودار می‌تواند نقاط پرت را در یک توزیع احتمالاتی نشان دهد و با انتخاب و حذف آن توزیع بهتری را برای پهنه‌بندی در اختیار کاربر قرار دهد (کاردان مقدم و همکاران، ۱۳۹۲). علاوه بر روش‌های مختلف، به طور کیفی نیز می‌توان نرمال بودن توزیع داده‌ها را بررسی کرد (حسینی‌پاک، ۱۳۹۲).

جدول (۲)، خطر روانگرایی را با توجه به شاخص پتانسیل روانگرایی به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌کند.

۵- سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)

مجموعه‌ای است که با بهره‌گیری از امکانات علمی و پیشرفته علوم و نقشه‌برداری و جغرافیایی، امکان تعیین موقعیت مکان و شناسایی عوارض و پدیده‌های جغرافیایی و برقراری ارتباط میان آن‌ها را میسر ساخته و بدین ترتیب نقش مهمی در مدیریت و برنامه‌ریزی پروژه‌های مرتبط با زمین خواهد داشت. سیستم اطلاعات جغرافیایی به مشابه یک هرم تشکیل شده که شامل سخت‌افزار، نرم‌افزار، اطلاعات و نیروی انسانی می‌باشد. علم زمین‌آمار از شاخه‌های GIS می‌باشد. بنابر این علم زمین‌آمار به مفهوم بررسی پدیده‌های متغیر در زمان و مکان است و به طور کلی می‌توان با استفاده از آن و به راحتی از یک نقشه و یا سطح پیوسته از نقاط نمونه‌برداری شده، مقادیر ارتفاع و عمق و یا هر چیز دیگری را به دست آورد.

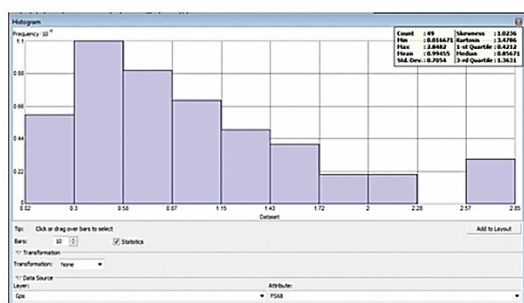
تخمین زمین‌آمار در نهایت منجر به آنالیز، واریوگرام و مدل‌سازی ساختار فضایی توسط ابزار درون‌یابی می‌گردد. علم درون‌یابی شامل آمار کلاسیک و زمین‌آمار می‌باشد. آمار کلاسیک به صورت روش‌های تابع شعاعی، گوسی، خطی، مکعبی می‌باشد، در حالی که زمین‌آمار شامل انواع کریجینگ یا همان روش‌های تخمین زنی می‌باشد. کریجینگ ساده، معمولی، جامع، گسسته، محدود، شاخص، نرم از این دسته می‌باشند.

در این پژوهش برای ارزیابی و انتخاب روش جهت بررسی دقت و مقایسه روش‌های درون‌یابی موجود از ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین انحراف خطا (MBE) بهره برده شده است. به این ترتیب که بهترین مدل مدلی است که کمترین خطا را داشته باشد که در این پژوهش کمترین خطا مربوط به روش تابع شعاعی بود.

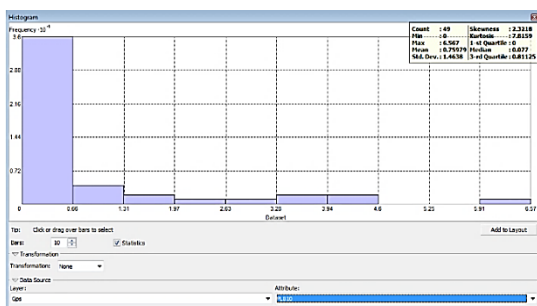
خطای استاندارد شده (RMSSE) نزدیک تر به یک باشد، در عمل مقدار این دو صفر نمی شود. در عمل اگر مقدار این دو صفر گردد، نمایانگر این مطلب است که دقت روش صد درصد بوده و مقدار تخمین زده شده یک کمیت برابر با مقدار واقعی آن می باشد (موسوی و همکاران، ۱۳۸۹). تخمین گر خوب، تخمین گری است که میانگین خطای آن حداقل مقدار ممکن بوده و پراکندگی خطا حول میانگین (واریانس خطای تخمین) نیز کم باشد (حسنی پاک، ۱۳۹۲).

با توجه به ارزیابی متقابل و برآورد میزان خطا در مدل های مختلف، به این نتیجه رسیده شد که روش تابع شعاعی یا RBF به عنوان بهترین روش جهت عملیات پهنه بندی روانگرایی تعیین شود و پس از تعیین بهترین مدل جهت پهنه بندی نقشه های پهنه بندی مقادیر روانگرایی در هر دو مدل و در عمق های مختلف ترسیم گردد که در بخش نتایج ارائه شده است.

شکل های (۵) و (۶) به ترتیب نمونه ای از هیستوگرام فراوانی FS و PL، به ترتیب در عمق ۶ تا ۸ متر و ۸ تا ۱۰ متر را نمایش می دهند. شکل (۵) نشان می دهد که میزان پراکندگی ضریب ایمنی در عمق ۶ تا ۸ متر، در حدود ۰/۰۲ تا ۲/۸۵ بوده و میانگین و انحراف معیار آن به ترتیب برابر با ۰/۹۹ و ۰/۷۰ می باشد.



شکل ۵- هیستوگرام فراوانی میزان FS در عمق ۶-۸ بعد از نرمال سازی

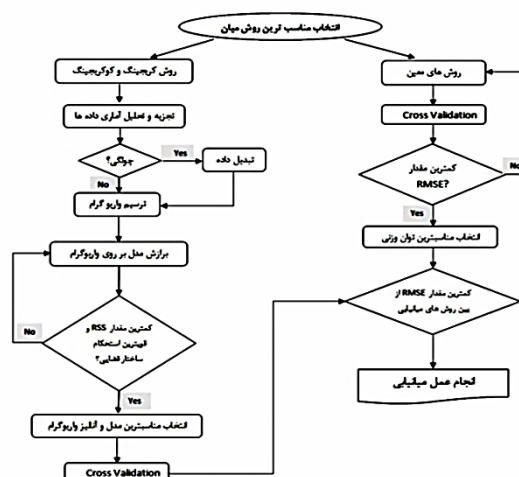


شکل ۶- هیستوگرام فراوانی میزان PL در عمق ۸-۱۰ بعد از نرمال سازی

همان گونه که هیستوگرام میزان PL در شکل (۶) نشان می - دهد میزان پراکندگی شاخص پتانسیل روانگرایی در عمق ۸ تا ۱۰

۹- تجزیه و تحلیل های زمین آماری (Geo-statistic Analyst)

برای ترسیم، پهنه بندی و مدیریت جامع داده ها از گزینه Geostatistical Wizard زمین آمار استفاده می شود که شامل کلیه روش های درون یابی ریاضی کلاسیک و زمین آمار می باشد. در شکل (۴) روند اجرایی مطالعات زمین آماری و انتخاب بهترین مدل و روش میان یابی برای متغیرها را نمایش می دهد (طهمورث جعفری، ۱۳۹۱).



شکل ۴- روند اجرایی مطالعات زمین آماری و انتخاب بهترین مدل و روش میان یابی برای متغیرها

۹-۱- مراحل آنالیزهای زمین آماری شامل موارد ذیل می- باشد

الف) انتخاب روش درون یابی: در این پژوهش از روش های درون یابی ریاضی قطعی (عکس فاصله، تابع شعاعی، چند جمله ای کروری و چند جمله ای محلی) و روش های زمین آماری کریجینگ و کوکریجینگ (ساده، معمولی، جهانی، شاخص، احتمالاتی و عطف) استفاده شد. در نوع روش انتخابی زمین آماری، انواع روش های درون بخشی کریجینگ نیز بررسی گردید.

ب) ارزیابی صحت: برای ارزیابی دقت روش های به کار گرفته شده، از تکنیک ارزیابی متقابل استفاده گردید. این روش برای نقاط اندازه گیری شده یک تخمین ارائه می دهد که با استفاده از پارامتر مقدار خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) می توان دقت پارامترها را برآورد کرد. روشی که دارای R "دامنه یا شعاع تأثیر" بالاتر و RMSE پایین تر می باشد، بهترین روش می باشد (طهمورث جعفری، ۱۳۹۱).

اصولاً مناسب ترین روش درون یابی، روشی است که حداقل (RMSE) را داشته و مقادیر میانگین خطاها (ME) و میانگین مربع خطاها (MSE) در آن نزدیک به صفر و مقادیر ریشه مربع میانگین

از رسوبات با جنس لای غیر آلی با خاصیت خمیری کم (ML) تشکیل شده و به تدریج به رسوبات رس و لای دار (CL-ML) و بعضاً حاوی رسوبات با جنس رس با خاصیت خیری پایین (CL) تغییر پیدا می‌کنند. عمده رسوبات ماسه‌ای لای دار (SM) و ماسه‌های بد دانه‌بندی شده لای دار (SP-SM) می‌باشند. هرچند که از عمق ۴ متر به بعد خاصیت خمیری رسوبات بیشتر شده و به لای با خاصیت خمیری پایین (ML)، رس با خاصیت خمیری پایین (CL) و رسوبات ماسه‌ای غیر خمیری رس و لای دار (SC-SM) تبدیل می‌شوند.

قسمت‌های شرقی منطقه بهمینی، عمدتاً از رسوبات لای غیر آلی با خاصیت خمیری کم (ML) تشکیل شده که در قسمت‌های میانی به رسوبات ماسه‌ای (SP)، (SM) و (SW-SM) تبدیل می‌شوند. هرچند در بخش‌هایی مانند منطقه یکم نیروی دریایی ماسه سنگ متراکم نیز وجود دارد و این رسوبات از عمق ۴ متری به رسوبات رسی با خاصیت خمیری کم (CL) تبدیل می‌شوند. در این منطقه و در بخش‌هایی محدود، رسوبات رسی با خاصیت خمیری زیاد نیز وجود دارند (CH).

در منطقه مرکزی شهر، رسوبات در منطقه شرق و جنوب شرق و بخش شمالی تا عمق ۲ متری عدد نفوذ استاندارد بین ۴ تا ۱۴ بوده و در قسمت‌های غربی نیز عدد نفوذ استاندارد عموماً بین ۱۵ تا ۲۵ می‌باشد. در قسمت‌های مرکزی شهر رسوباتی متراکم با عدد نفوذ استاندارد بین ۳۶ تا ۴۶ برخوردار شده است. عمدتاً با افزایش عمق عدد نفوذ استاندارد رسوبات افزایش یافته است. در جنوب شرق شهر بوشهر که منطقه طغیان آب بوده و سطح آب زیر زمینی بالا می‌باشد، رسوبات سست و عدد نفوذ استاندارد پایین می‌باشد. در شهر بوشهر رسوبات در سواحل شمالی و غربی به استثنای مناطقی که از ماسه سنگ متراکم تشکیل شده‌اند، عدد نفوذ استاندارد پایینی دارند.

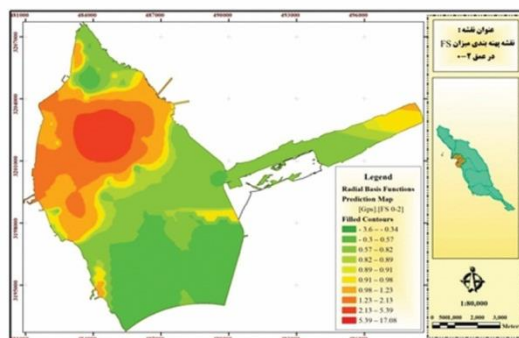
همچنین با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه شده براساس روش Seed و Idriss که در عمق‌های مختلف خاک در بخش نتایج ارائه گردیده، می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که در عمق ۰ تا ۲ متر، در بخش‌های مرکزی و شرقی شهر بوشهر پتانسیل روانگرایی زیاد بوده و نیاز به تحقیقات و مطالعات دقیق برای انتخاب روش‌های کاهش مخاطرات روانگرایی در این مناطق وجود دارد. در عمق ۲ تا ۴ متری و در بخش‌های مرکزی و غربی پتانسیل روانگرایی بالا بوده و در بقیه بخش‌های شهر وضعیت روانگرایی متوسط و کم می‌باشد. در عمق‌های ۴ تا ۶ و ۶ تا ۸ متر، بیشتر بخش‌های شمالی، غربی و مرکزی و بخش‌هایی از مناطق جنوبی شهر دارای روانگرایی خیلی زیاد بوده که می‌بایست نکات ایمنی جهت مقابله با پدیده روانگرایی در این مناطق حتماً رعایت شود. در عمق ۸ تا ۱۰ متری نیز همانند عمق‌های قبلی ۴ تا ۶ متر، در بخش‌های مرکزی، شمالی، غربی و جنوبی شهر روانگرایی خیلی

متر در حدود ۰ تا ۶/۵۷ بوده و میانگین و انحراف معیار آن به ترتیب برابر با ۰/۷۶ و ۱/۴۶ می‌باشد.

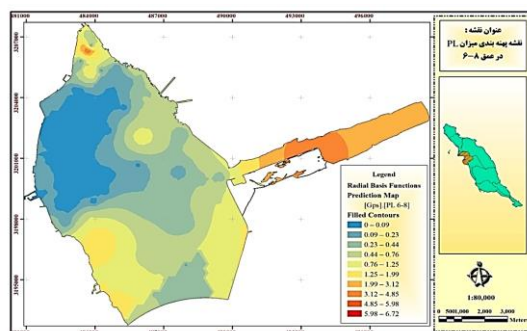
شکل‌های (۷) و (۸) به عنوان نمونه و به ترتیب پهنه‌بندی خطر وقوع و شاخص پتانسیل روانگرایی را در عمق‌های ۰ تا ۲ تا ۴ نشان می‌دهند.

با توجه به شکل (۷) در بخش‌های مرکزی و غرب شهر بوشهر تا عمق ۲ متری، به دلیل کمتر شدن مقدار ضریب ایمنی از عدد یک، روانگرا بوده و در سایر بخش‌های شهر میزان روانگرایی کم و ناچیز می‌باشد.

با توجه به شکل (۸) که براساس روش Iwasaki نقشه پهنه‌بندی در عمق ۸-۶ متر تهیه شده، مشخص شده است در اکثر بخش‌های شهر بوشهر به جز بخش شمالی شهر خطر روانگرایی در این عمق، کم و خیلی کم می‌باشد. خلاصه محاسبات آنالیز رواگرایی به روش Iwasaki و همکاران در عمق ۴ تا ۶ متر به پیوست ارائه شده است.



شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی میزان FS در عمق ۰-۲ بر اساس روش RBF



شکل ۸- نقشه پهنه‌بندی میزان PL در عمق ۶-۸ بر اساس روش RBF

۱۰- تحلیل نتایج

با توجه به طبقه‌بندی خاک بر اساس روش متحد، گسترش و فراوانی انواع مختلف خاک‌ها مطابق موارد زیر است:
 - در منطقه شهر به استثنای قسمت‌های شرق و جنوب شرق که

کاردان مقدم ح، خاشعی سیوکی ع، "پهنه‌بندی در علوم آب با استفاده از زمین‌آمار"، انتشارات قدس رضوی، چاپ اول، ۱۳۹۲، ۱۱۲.

کنگی ع، خطیبی د، "ارزیابی پتانسیل روانگرایی شهر کرمان براساس آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)"، فصلنامه زمین-شناسی کاربردی، ۸(۱)، ۷۳-۸۲، ۱۳۹۱.

محمدی ع، ارومیه‌ای ع، مرادی هرسینی ک، و قنوتی ن، "ارزیابی خطر نسبی روانگرایی متأثر از زلزله در نوار ساحلی استان بوشهر (منطقه پارس جنوبی)"، سی و یکمین همایش علوم زمین، تهران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۱.

معروف م ع، بلوری بزاز ج، و رضازاده عیدگاهی د، "بررسی پتانسیل وقوع روانگرایی در بستر سدها"، هشتمین همایش انجمن زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۲.

میرموسوی س ح، مزیدی ا، و خسروی ی، "تعیین بهترین روش زمین‌آمار جهت تخمین توزیع بارندگی با استفاده از GIS (مطالعه موردی: استان اصفهان)"، فضای جغرافیایی، ۱۰(۳۰)، ۱۳۸۹، ۱۲۰-۱۰۵.

Alba PD, Baldwin K, Janoo V, Roe G, Celikkol B, "Elastic-wave velocities and liquefaction potential", 1984.

Andrus RD, Stokoe KH, "Liquefaction resistance based on shear wave velocity", In Technical Report NCEER US National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER), 1997, 97, 89-128.

Andrus RD, Stokoe KH, Chung RM, "Draft guidelines for evaluating liquefaction resistance using shear wave velocity measurements and simplified procedures", US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology, 1999, 140.

Andrus RD, "In situ characterization of gravelly soils that liquefied in the 1983 Borah Peak earthquake", Ph.D. Dissertation, The Univ. of Texas at Austin, 1994, 533.

ArcGIS10.2, User's manual. ArcGIS. Redlands, California, United Sate of America, 2013.

Bierschwale JG, "Analytical evaluation of liquefaction potential of sands subjected to the 1981 Westmorland earthquake", Geotechnical Engineering Center, Civil Engineering Department, University of Texas at Austin, 1984.

Dobry R, Stokoe KH, Ladd RS, Youd TL, "Liquefaction susceptibility from S-wave velocity. In Proc. In-Situ Tests to Evaluate Liquefaction Susceptibility", ASCE National Convention, 1981.

Dobry R, "Prediction of pore water pressure buildup and liquefaction of sands during earthquakes by the cyclic strain method", Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1982, 138.

http://www.civilica.com/Paper-GSI31-GSI31_180.html Rao KS, Satyam DN, "Liquefaction studies for seismic microzonation of Delhi region",

زیاد می‌باشد. در مجموع بر اساس روش Idriss و Seed در اکثر مناطق شهر بخصوص بخش‌های شمال غرب، مرکز و جنوبی، میزان روانگرایی زیاد و خیلی زیاد بوده که نیاز به تحقیقات و مطالعات دقیق برای انواع سازه‌ها می‌باشد و می‌بایست از روش‌های کاهش مخاطرات روانگرایی استفاده شود.

نتایج حاصل از روش Iwasaki و همکاران در عمق‌های ۶ تا ۸ متر و ۸ تا ۱۰ متر، نیز نشان می‌دهد که در بخش‌های غربی و مرکزی شهر بوشهر خطر وقوع روانگرایی کم بوده و در قسمت‌هایی از بافت قدیم (شمالی) و مناطقی از محله بهمنی (جنوب غربی) احتمال وقوع روانگرایی زیاد می‌باشد.

در نهایت در مقایسه مابین روش‌های به روش Iwasaki و همکاران و روش Idriss و Seed پس از انجام و نتایج حاصل از مقایسه پهنه‌بندی مشخص گردید که روش Iwasaki بیشتر روش مقایسه‌ای است و روش Idriss و Seed یک روش محاسباتی می‌باشد و نتایج قابل قبولی را در بحث پهنه‌بندی ارائه می‌دهد.

در بررسی نقشه تراز سطح آب زیر زمینی تهیه شده نیز می‌توان چنین نتیجه‌گیری نمود که در بیشتر بخش‌های شمال شرقی و شرق شهر بوشهر تراز آب بالا بوده (در حدود ۰/۵ تا ۲ متری) و در سال‌های اخیر به دلیل طراحی و احداث شبکه فاضلاب سطح آب زیرزمینی کمی پایین‌تر از قبل رفته است.

۱۱- مراجع

انصاری ز، منصور کیما م ت، "بررسی پر کاربردترین روش‌های ارزیابی پتانسیل روانگرایی در ایران"، اولین سمینار ملی مسائل ژئوتکنیکی شبکه‌های آبیاری و زهکشی، مؤسسه تحقیقات فنی و مهندسی کشاورزی، ۱۳۸۷.

حسنی پاک ع ا، "زمین‌آمار (ژئواستاتیک)"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم، ۱۳۹۲، ۳۱۴.

داودی م، "مطالعات ریزپهنه‌بندی ژئوتکنیک لرزه‌ای"، پروژه ارتباط با صنعت دانشگاه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۱۳۸۹.

طهمورث م، جعفری م، نقیلو م، "بررسی روش‌های درون‌یابی مکانی و ابزار GIS جهت آنالیز مکانی کیفیت و آلودگی آب-های زیرزمینی (مطالعه موردی: دشت اشتهارد، استان البرز)"، اولین همایش ملی بیابان، تهران، مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان دانشگاه تهران، ۱۳۹۱.

عدالت‌حقی س ع، "بررسی پتانسیل روانگرایی در جنوب تهران ناشی از رخداد زلزله"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، دانشکده علوم پایه، ۱۳۹۱.

عسکری ف، کسای م، "ارزیابی پتانسیل روانگرایی در بخشی از نواحی جنوب شرقی تهران"، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۷، شماره ۲، ۱۳۸۲.

- soil liquefaction potential", Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1971.
- Seed HB, Idriss IM, Arango I, "Evaluation of liquefaction potential using field performance data", Journal of Geotechnical Engineering, 1983, 109 (3), 458-482.
- Sharma B, Chetia M, "Deterministic and probabilistic liquefaction potential evaluation of Guwahati city", Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2016, 2 (22), 823-828.
- Singh NK, Jawaid SA, "A SPT Based Evaluation of Liquefaction Potential of Rapti Main Canal in District Balrampur", Global Journal for Research Analysis, 2016, 4 (11).
- Stokoe KH, Roesset JM, Bierschwale JG, Aouad M, August, "Liquefaction potential of sands from shear wave velocity", In Proceedings, 9th World Conference on Earthquake, 1988, 13, 213-218.
- Tatsuoka F, Iwasaki, T, Tokida K, Yasuda S, "Standard penetration tests and soil liquefaction tests and soil liquefaction potential evaluation", Soils and Foundations, 1980, 20 (4).
- Terzaghi K, "Principles of soil mechanics, IV- Settlement and consolidation of clay", Engineering News-Record, 1925, 95 (3), 874-878.
- Thoithoi L, Dubey CS, Ningthoujam PS, Shukla DP, Singh RP, Naorem SS, "Liquefaction potential evaluation for subsurface soil layers of Delhi region", Journal of the Geological Society of India, 2016, 88 (2), 147-150.
- Tokimatsu K, Uchida, A, "Correlation between Liquefaction Resistance and Shear Wave Velocity", Soils and Foundations, 1990, 30 (2), 33-42.
- Tokimatsu K, Tamura S, Kuwayama S, "Liquefaction potential evaluation based on Rayleigh wave investigation and its comparison with field behavior", Proc. Second Int. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthquake Engrg. And Soil Dyn S, Parakash Ed, 11-15 Mar, St. Louis, MO, Univ. of Missouri at Rolla, I, 1991, 357-364.
- Youd TL, Idriss IM, Andrus RD, Arango I, Castro, G, Christian JT, Dobry R, Finn WL, Harder Jr LF, Hynes ME, and Ishihara K, "Liquefaction resistance of soils: summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils", Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2001, 127 (10), 817-833.
- CURRENT SCIENCE-BANGALORE-, 2007, 92 (5), 646.
- Hynes ME, "Pore pressure generation characteristics of gravel under undrained cyclic loading", University of California, Berkeley, 1988, 1.
- Ishihara K, "Evaluation of liquefaction potential and consequent deformations in sand fills", In Proceedings of the Workshop on Seismic Issues, Port of Los Angeles, CA, 1990.
- Iwasaki T, Tatsuoka F, Tokida KI, Yasuda S, "A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan", In Proc., 2nd Int. Conf. on Microzonation Washington, DC: National Science Foundation, 1978, 885-896.
- Iwasaki T, Tokida K, Tatsuoka F, Watanabe S, Yasuda S, Sato H, "Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods", In Proceedings of the 3rd international conference on microzonation, 1982, 3, 1310-1330.
- Kayabali K, "Soil liquefaction evaluation using shear wave velocity", Engineering Geology, 1996, 44 (1), 121-127.
- Kayen RE, Mitchell JK, Seed RB, Lodge A, Nishio SY, Coutinho R, "Evaluation of SPT-, CPT-, and shear wave-based methods for liquefaction potential assessment using Loma Prieta data", In Technical Report NCEER US National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER), 1992, 1, 177-204.
- Lodge AL, "Shear wave velocity measurements for subsurface characterization", Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley, 1994.
- Lodi SH, Sultan W, Bukhary SS, Rafeeqi SFA, "Liquefaction potential along the coastal regions of Karachi", Journal of Himalayan Earth Sciences, 2005, 48 (1), 89-98.
- Rakesh K, Rao GRS, Prasad DSV, "Seismic soil liquefaction susceptibility assessment of District Krishna, Andhra Pradesh", IJAR, 2016, 2 (2), 477-482.
- Rashidian M, "Undrained Shearing Behavior of Gravelly Sands and its Relation with Shear Wave Velocity", (Doctoral dissertation, Thesis, Geotech. Engrg. Lab, Dept. of Civil Engrg. Univ. of Tokyo, Japan), 1995.
- Robertson PK, Woeller DJ, Finn WDL, "Seismic cone penetration test for evaluating liquefaction potential under cyclic loading", Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29 (4), 686-695.
- Rollins KM, Diehl NB, Weaver TJ, "Implications of V s-BPT (N1) 6 0 Correlations for Liquefaction Assessment in Gravels", In Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE, 1998, 506-517.
- Sana H, Nath SK, "Liquefaction potential analysis of the Kashmir valley alluvium, NW Himalaya", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 11-18.
- Seed HB, Idriss IM, "Simplified procedure for evaluating

پیوست- خلاصه محاسبات آنالیز رواگرایی به روش Iwaaki و همکاران در عمق ۴ تا ۶ متر

| ردیف | | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|-----------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|-------------------|-------------------|---------|-------------------|-------------------|
| amax | | ۲/۵ | ۲/۵ | ۲/۵ | ۲/۵ | ۲/۵ | ۲/۵ | ۲/۵ | ۲/۵ | ۲/۵ |
| X | | ۴۸۳۳۹۶ | ۴۸۳۷۱۱ | ۴۸۳۳۰ | ۴۸۳۳۹۶ | ۴۸۳۹۸۲ | ۴۸۳۶۸۸ | ۴۸۲۸۲۹ | ۴۸۱۳۲۶ | ۴۸۳۳۱۶ |
| Y | | ۳۲۰۶۵۷۵ | ۳۲۰۶۴۵۰ | ۳۲۰۶۴۰۷ | ۳۲۰۵۵۱۳ | ۳۲۰۵۲۹۴ | ۳۲۵۴۴۴۳ | ۳۱۹۷۷۴۲ | ۳۱۹۶۴۹ | ۳۱۹۵۵۷۶ |
| عمق | | ۲۴ | ۲۴ | ۲۴ | ۲۴ | ۲۴ | ۲۴ | ۲۴ | ۲۴ | ۲۴ |
| سطح آب زیرزمینی | | ۰/۵ | ۰/۵ | ۰/۷ | برخورد نگرد | ۱/۷ | ۱/۳ | ۳/۲ | برخورد نگرد | |
| Nspt | | ۹ | ۱۶ | ۲۴ | ۴۷ | ۵۰ | ۵۲ | ۲۳ | ۴۶ | ۹ |
| طبقه بندی خاک | | SP-SM | SP-SM | SP-SM | CL-ML | SP | SM | CL-ML | SP-SM | SP-SM |
| PI | (%) | NP | NP | NP | ۵ | NP | NP | ۱۳ | NP | NP |
| LL | (%) | غیر قابل تعیین | غیر قابل تعیین | غیر قابل تعیین | ۲۵ | غیر قابل تعیین | غیر قابل تعیین | ۳۴ | غیر قابل تعیین | غیر قابل تعیین |
| D50 | (mm) | ۰/۲ | ۰/۱ | ۰/۲ | ۰ | ۰/۳ | ۰/۲ | ۰ | ۰/۱ | ۰/۲ |
| رشته الک ۴ | (%) | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۸۴ | ۱۰۰ | ۱۰۰ | ۱۰۰ |
| رشته الک ۲۰۰ | (%Fc) | ۹ | ۷ | ۵ | ۶۴ | ۲ | ۱۵ | ۹۳ | ۱۱ | ۸ |
| | gr/cm ² | ۰/۳۷۴ | ۰/۴۲۰ | ۰/۴۴۶ | ۰/۵۹۸ | ۰/۴۴۱ | ۰/۴۰۶ | ۰/۶۵۲ | ۰/۶۰۰ | ۰/۲۵۰ |
| r | gr/cm ² | ۰/۵۲۴ | ۰/۹۷۰ | ۰/۹۹۶ | ۰/۵۹۸ | ۰/۶۹۱ | ۰/۶۵۵ | ۰/۷۰۱ | ۰/۶۰۰ | ۰/۶۰۰ |
| y | gr/cm ³ | ۰/۸۸ | ۰/۸۰ | ۰/۸۴ | ۱/۷۲ | ۰/۹۸ | ۰/۹۷ | ۱/۰۱ | ۱/۷۲ | ۰/۷۲ |
| y' | gr/cm ³ | ۱/۸۸ | ۱/۸۰ | ۱/۸۴ | ۱/۷۲ | ۱/۹۸ | ۱/۹۷ | ۲/۰۱ | ۱/۷۲ | ۱/۷۲ |
| N' | | ۷/۵۴ | ۱۳/۴ | ۲۰/۱۱ | ۳۹/۳۹ | ۴۱/۹۰ | ۴۳/۵۸ | ۱۹/۳۷ | ۳۸/۵۵ | ۷/۵۴ |
| R | R ₁ | ۰/۳۴۵ | ۰/۳۰۵ | ۰/۳۶۹ | ۰/۴۸۶ | ۰/۵۳۴ | ۰/۵۵۴ | ۰/۳۳۳ | ۰/۴۸۰ | ۰/۳۴۹ |
| R | R ₂ | ۰/۰۷۶ | ۰/۰۹۰ | ۰/۰۶۵ | ۰/۲۰۳ | ۰/۰۰۶ | ۰/۰۵۰ | ۰/۲۸۰ | ۰/۰۹۰ | ۰/۰۷۶ |
| L | R ₃ | ۰/۲۲۲ | ۰/۲۲۵۲ | ۰/۲۱۷۷ | ۰/۰۹۷۵ | ۰/۱۵۲۸ | ۰/۱۵۷۶ | ۰/۱۰۵۰ | ۰/۰۹۷۵ | ۰/۲۳۴۰ |
| F.S=R/L | | ۱/۴۵۰ | ۱/۱۶۷ | ۱/۳۵۲ | ۸/۰۴۶ | ۳/۵۳۶ | ۳/۸۳۰ | ۵/۸۳۷ | ۵/۸۴۴ | ۱/۳۸۹ |
| PL | | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |

محاسبات SPT

EXTENDED ABSTRACT

Boushehr Liquefaction Hazard Zonation Based On SPT and Result Presentation by Using GIS Plat Form

Mehrdad Zare ^{a,*}, Alireza Hajiani Boushehrian ^b

^a Master of Science in Earthquake Engineering, Kermanshah Branch, Islamic Azad University, Kermanshah, Iran

^b Department of Civil Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran

Received: 17 April 2017; Accepted: 09 December 2017

Keywords:

Liquefaction, Standard Penetration Test (SPT), Arc GIS Software, Zonation.

1. Introduction

In the present paper, liquefaction hazard zonation of Boushehr city is presented. In this research program, geotechnical information of 151 borehole in Boushehr city have been gathered and utilized to zonation of liquefaction hazard specially in the inshore areas. Two different methods have been used to determine the liquefaction potential of these areas. Seed and Idriss (1971) and Iwasaki et al. (1982) are assessed the liquefaction potential of specific site by the aim of SPT results from site investigation. Results present by the aim of ArcGIS software. Different areas of city have been investigated in terms of liquefaction potential and ground water table. Results have been compared in the form of overlap method.

2. Methodology

2.1. Evaluation of liquefaction potential based on the standard penetration test

To determine and evaluate the liquefaction potential hazard in this research two different methods (Seed and Idriss (1971) and Iwasaki et al. (1982) have been utilized. The main reasons of using these methods are availability of required information and documents from geotechnical investigation reports of personal and national projects. All of these reports have been confirmed by competent authorities. 151 projects through the Boushehr city have been selected. The locations of selected boreholes of these projects are presented in Fig. 1.

2.1.1. Seed and Idriss Method (1971)

The simplified Seed and Idriss method evaluates the liquefaction hazard by relating the SPT number and cyclic shear strength of the soils. They introduced a factor of safety in the form of following equation:

$$FL = \frac{CRR}{CSR} \quad (1)$$

FL: Factor of safety of liquefaction occurrence

CSR: Cyclic stress ratio

CRR: Cyclic strength ratio

If the safety factor is more than 1, the liquefaction will be happen in the area of study. The cyclic stress ratio is determined by the following formula:

$$CSR = \left(\frac{amax}{g} \right) \times \left(\frac{\sigma}{\sigma'} \right) \times r_d \quad (2)$$

* Corresponding Author

E-mail addresses: ahajiani@gmail.com (Mehrdad Zare), mehrmehr769@gmail.com (Alireza Hajiani Boushehrian).

In which:

$$r_d = 1 - 0.012z \quad (3)$$

z : Soil depth (m)

a_{\max} : Maximum horizontal acceleration in ground surface due to earthquake

σ : Vertical stress in the given depth in liquefaction calculation

σ' : Vertical effective stress in the given depth in liquefaction calculation

g : Gravity acceleration (m/s^2)

In this method, the value of CRR is calculated based on modified SPT number. The modification factors are determined by equation number 4.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 \cdot (N_1)_{CS60}} + \frac{N_{1CS60}}{135} + \frac{50}{(10 \cdot (N_1)_{CS60} + 45)^2} - \frac{1}{200}$$

$$N_{1CS60} = \alpha + \beta(N_1)_{60}$$

$$\alpha = \begin{cases} 0 & FC \leq 5 \\ e^{(1.76 - \frac{190}{FC^2})} & 5 \leq FC < 35 \\ 5 & FC \geq 35 \end{cases} \quad (4)$$

$$\beta = \begin{cases} 1 & FC \leq 5 \\ 0.99 + \frac{FC^{1.5}}{1000} & 5 \leq FC < 35 \\ 1.2 & FC \geq 35 \end{cases}$$

In which:

$CRR_{7.5v}$: The cyclic shear strength ratio in soil for earthquake with magnitude more than 7.5

N_{1CS60} : Modified standard penetration number

FC : Fine grained size percent of soil

2.1.2. Iwasaki et al. (1982)

Iwasaki et al. presented the following equation to evaluate the probable liquefaction intensity.

$$PL = \int_0^{20} (1 - FS)(10 - 0.5Z) dZ \quad (5)$$

In which:

PL : Liquefaction potential index

FS : Factor of safety

Z : Depth of liquefaction calculation

Equation number 1 is used to calculate the factor of safety with some modification. The values of CSr and CRR in Iwasaki et al. method are determined by the aim of following equations:

$$CRR = R_1 + R_2 + R_3 \quad (6)$$

$$R_1 = 0.0882 \sqrt{\frac{N_j}{\sigma'_v + 0.7}} \quad (7)$$

$$R_2 = \begin{cases} 0.19 & 0.02mm < D_{50} < 0.05mm \\ 0.225 \log \frac{0.35}{D_{50}} & 0.05mm < D_{50} < 0.075mm \\ -0.05 & 0.075mm < D_{50} < 0.2mm \end{cases} \quad (8)$$

$$R_3 = \begin{cases} 0 & 0\% \leq FC \leq 40\% \\ 0.004FC - 0.16 & 40\% < FC < 100\% \end{cases} \quad (9)$$

$$N_j = 0.833(N_1)_{60} \quad (10)$$

In which:

σ'_v : Vertical effective stress in the given depth

D_{50} : Mean grained size

N_j : SPT number based on Japan code

Iwasaki et al. showed that in the area with PI more than 15 the liquefaction potential is high and in the area with PL less than 5 the liquefaction hazard tends to minimum value.

2.1.2. Geography information system (GIS)

GIS is a system designed to capture, store, manipulate, analyze, manage, and present spatial or geographic data. GIS applications are tools that allow users to create interactive queries (user-created searches), analyze spatial information, edit data in maps, and present the results of all these operations. The results of liquefaction potential calculation have been zonation by the aim of Geo-Statistical Analyst tool box in the ArcGIS software.

3. Results and discussion

In order to zonation the results from liquefaction analysis, RBF method is utilized in the geo-statistical analysis. Results are presented in the form of colorful maps to show the distribution of factor of safety against liquefaction phenomena. These maps were prepared for each 2 meter depth up to 10 meter. Fig. 1. shows one of the output maps for factor of safety between 0 and 2 meter depth of Boushehr city.

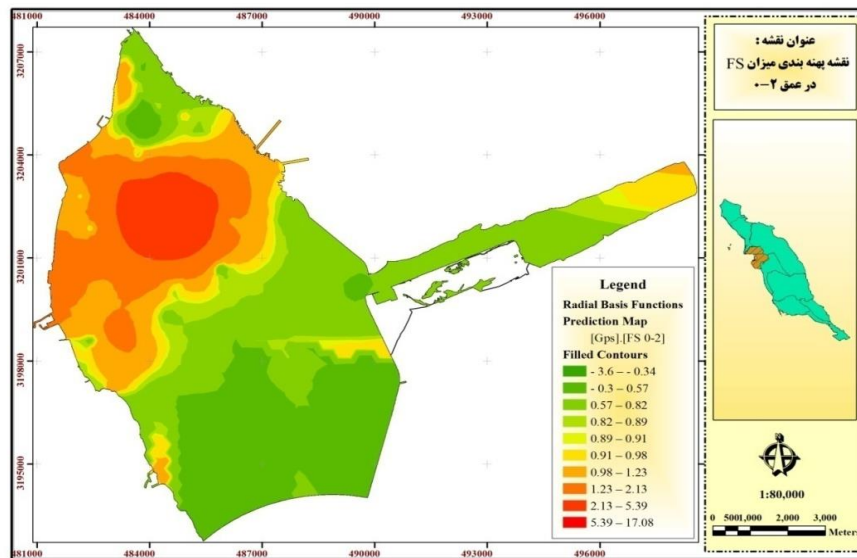


Fig. 1. Zonation map of FS in depth 0-2 meter based on RBF method

4. Conclusions

Based on Seed and Idriss (1971) and Iwasaki et al. (1982) methods, the following results may be calculated. In the central and east parts of Boushehr city up to 10 meter depth, liquefaction potential is high and some precise investigation must be done to select the methods for decreasing the liquefaction hazard in these areas. In the west part of the city, in the depth between 2 to 10 meter, the liquefaction hazard is high. In the north parts of Boushehr city and in the depth between 4 to 10 meter, the liquefaction potential is high. In the other depths and other parts of the city the liquefaction potential is medium or low.

5. References

- Seed HB, Idriss IM, "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", Journal of Soil Mechanics and Foundations Div, 1971.
- Iwasaki T, Tokida K, Tatsuoka F, Watanabe S, Yasuda S, Sato H, "Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods", In Proceedings of the 3rd international conference on microzonation, Seattle, 1982, Vol. 3, pp. 1310-1330.