

ارزیابی پتانسیل روانگرایی در استان مازندران با کمک مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی با نگاهی بر معیار ایشیهارا

حسین ملاحی (کارشناسی ارشد)

رضا جمشیدی چناری* (استادیار)

دانشکده فنی، دانشگاه گیلان

مهندسی عمران شریف
دوره ۲-۲۸، شماره ۴، ص. ۱۲۷-۱۳۵، (پادداشت شنی)

عموماً روانگرایی در خاک‌های ماسه‌یی ریزدانه و اشباع رخ می‌دهد که می‌تواند منجر به جابجایی‌های مخرب زمین در حین زلزله شود. پتانسیل رخداد این پدیده تابع جنس خاک، سطح آب زیرزمینی، زلزله‌خیزی منطقه و همچنین عمق لایه‌ی سربار است. این نوشتار ضمن معرفی اثر لایه‌ی سربار غیر روانگرا در توانایی جلوگیری از روانگرایی لایه‌ی روانگرایی زیرین در قالب معیار ایشیهارا، ضریب اطمینان تصحیح شده در برابر روانگرایی را برای برخی نواحی استان مازندران محاسبه می‌کند و نهایتاً به ارائه‌ی پهنه‌بندی روانگرایی در بخش‌های مرکزی و غرب و همچنین شرق استان مازندران می‌پردازد. پهنه‌بندی ارائه شده فقط کلی و کیفی است و با توجه به کم بودن تعداد گمانه‌های مربوط به آزمایش‌های صحرایی در سطح استان می‌تواند فقط به منزله‌ی راهنمای کلی جهت ضرورت مطالعات بیشتر در بخش‌هایی از نوار ساحلی تلقی شود. در تعدادی از شهرهای نوار ساحلی همچون محمودآباد و بابلسر به نظر می‌رسد مهندسان طراح باید توجه ویژه‌ی به پدیده‌ی روانگرایی داشته باشند و با در نظر گرفتن تمهیداتی چون پی‌های گسترده و عمیق، چاه‌های شنی، زهکش‌های فنیله‌یی و غیره به مقابله با این پدیده‌ی ویرانگر بپردازند. بدیهی است اظهار نظر قطعی در مورد وقوع این پدیده و پتانسیل رخداد آن ملزم به ارائه‌ی طرح آزمایش‌های برجا به خصوص برای پروژه‌های با درجه‌ی اهمیت بالا در آیین‌نامه‌ی زلزله‌ی ایران است.

واژگان کلیدی: پتانسیل روانگرایی، مازندران، لایه‌ی سربار، معیار ایشیهارا، زلزله.

۱. مقدمه

(۱۳۸۱)، مطالعات روانگرایی شهر قم (کمالیان، ۱۳۸۵)، مطالعات روانگرایی شهر بوشهر (داوری، ۱۳۸۷) و طرح‌های کالبدی سازمان مسکن و شهرسازی اشاره کرد. روش‌های متعددی برای شناسایی و ارزیابی پتانسیل روانگرایی پیشنهاد شده است که یکی از مفیدترین و کاربردی‌ترین این روش‌ها، به‌کارگیری پهنه‌بندی و تهیه‌ی نقشه‌ی پتانسیل روانگرایی است. روانگرایی وابسته به عواملی نظیر شرایط زلزله‌خیزی منطقه، جنس خاک و تراکم نسبی آن و موقعیت سطح آب زیرزمینی است. به دلیل قرارگرفتن ایران در کمربند زلزله، اهمیت این تحقیقات و بررسی‌ها واضح است. در مناطق شمالی کشور به خصوص با توجه به فراوانی لایه‌های خاک ماسه‌یی و سیلنتی و بالا بودن سطح آب زیرزمینی و همچنین وجود خطر نسبی بالا برای وقوع زمین‌لرزه، اهمیت انجام این مطالعات دو چندان است. در این راستا و به منظور آشکارساختن شرایط منطقه از جایگاه سامان‌دهی و مکان‌یابی شهرها، وزارت مسکن و شهرسازی طرح‌هایی را موسوم به طرح کالبدی منطقه‌یی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ در قالب انجام مطالعات زمین‌شناسی - ژئوتکنیکی در سطح کشور در ۱۰ منطقه در دست انجام دارد. در این باره می‌توان به طرح‌های کالبدی انجام شده در مناطق

یکی از پدیده‌هایی که به هنگام وقوع زمین‌لرزه خسارت‌های زیادی به ساختمان‌ها و تأسیسات وارد می‌کند، پدیده‌ی روانگرایی است که به صورت از بین رفتن مقاومت برشی خاک در حین زمین‌لرزه بروز می‌کند. این پدیده منجر به ایجاد نشست، چرخش، و کج شدن سازه‌ها و در نهایت خرابی در بناها، جاده‌ها، و دیگر سازه‌ها و وارد آمدن خسارت جانی و مالی می‌شود. مثلاً می‌توان به روانگرایی ناشی از زمین‌لرزه‌ی مهیب منجیل (خرداد ۱۳۶۹) اشاره کرد که خرابی‌های گسترده‌یی را به ویژه در منطقه‌ی آستانه‌ی اشرافیه بجای گذاشت. دانشمندان و پژوهشگران مختلف تحقیقات بسیار گسترده‌یی در زمینه‌ی بررسی علل وقوع روانگرایی و همچنین ارزیابی پتانسیل روانگرایی انجام داده‌اند.^[۱] در کشور ما نیز مطالعات متنوعی در زمینه‌ی روانگرایی و پتانسیل وقوع آن انجام گرفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعات روانگرایی رخ داده در زلزله‌ی منجیل (قهرمانی، ۱۳۶۹)، مطالعات لرزه‌یی استان لرستان (جعفری، ۱۳۷۸)، مطالعات تکمیلی ریز پهنه‌بندی جنوب تهران (میرحسینی و عسکری،

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۵/۲۵، اصلاحیه ۱۳۹۰/۲/۱۱، پذیرش ۱۳۹۰/۵/۳.

آذربایجان، خوزستان، زاگرس، البرز جنوبی و نوار ساحلی شمال کشور اشاره کرد.^[۴] یکی از مناطق دهگانه‌ی طرح کالبدی منطقه‌ی کشور، منطقه‌ی ساحلی شمال نامیده می‌شود که شامل استان‌های گلستان، مازندران و گیلان با مساحت حدود ۵۸۳۲۰ کیلومتر مربع است. نتایج اولیه مربوط به طرح کالبدی این منطقه حاکی از آن است که مناطقی از استان‌های مذکور مستعد بروز پدیده‌ی روانگرایی‌اند، لذا تهیه‌ی پهنه‌بندی پتانسیل روانگرایی برای این استان‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در پژوهشی نیز به بررسی پتانسیل روانگرایی در استان گلستان پرداخته شده است.^[۴] در این نوشتار پتانسیل روانگرایی در استان مازندران به کمک معیار ایشیهارا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. روش‌های پهنه‌بندی پتانسیل روانگرایی

تاکنون پژوهشگران مختلف روش‌های متعددی را جهت ارزیابی پتانسیل روانگرایی ارائه کرده‌اند. یکی از این روش‌ها به کارگیری نقشه‌های پهنه‌بندی روانگرایی و در نتیجه شناسایی مناطق مستعد مخاطرات لرزه‌ی است. آیین‌نامه‌های لرزه‌ی متفاوتی در زمینه‌ی پهنه‌بندی روانگرایی وجود دارد که یکی از پرکاربردترین آن‌ها، آیین‌نامه‌ی TC۴ است که این روش‌ها در آن به‌طور کلی به سه درجه طبقه‌بندی می‌شوند (جدول ۱).^[۵]

در پهنه‌بندی نوع سوم که کامل‌ترین نوع است، با به انجام رسانیدن مطالعات دست اول (حفر گمانه‌های اکتشافی) برای هر یک از واحدهای نقشه‌ی ژئوتکنیکی پایه و استفاده از روش‌های عددی و تحلیلی، پتانسیل روانگرایی می‌تواند با دقت نسبتاً بالا ارزیابی شود. طبعاً هزینه‌ی این‌گونه مطالعات هم بیشتر از هزینه‌ی روش‌های پیشین است. مراحل مطالعات در پهنه‌بندی درجه‌ی سوم عبارت است از:

-- ارزیابی و برآورد مقاومت برشی سیکلی و تنش‌های برشی تناوبی لازم جهت روانگرایی خاک؛

-- برآورد تنش برشی ایجادشده در لایه‌های خاک بر اثر ارتعاشات زمین لرزه؛

-- ارزیابی پتانسیل روانگرایی در قالب محاسبه‌ی ضریب اطمینان به کمک نتایج مراحل قبل.

تنش برشی تناوبی لازم برای روانگرشدن خاک را می‌توان با انجام آزمایش‌های صحرایی یا آزمایشگاهی برآورد کرد. نظر به اینکه نمونه‌گیری آزمایش‌های آزمایشگاهی در خاک‌های مستعد روانگرایی ممکن نیست، لذا آزمایش‌های برجا به آزمایش‌های آزمایشگاهی ترجیح داده می‌شوند. به همین دلیل در سال‌های اخیر، مطالعات زیادی در زمینه‌ی ارتباط میان اطلاعات مربوط به آزمایش‌های درجا و پارامترهای مشخصه‌ی خاک انجام شده است. در این میان برخی از متداول‌ترین روش‌های برآورد پتانسیل روانگرایی عبارت‌اند از:

-- ارزیابی پتانسیل روانگرایی براساس نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)؛

-- ارزیابی پتانسیل روانگرایی براساس نتایج آزمایش نفوذ مخروط (CPT)؛

-- روش‌های مبتنی بر آزمایش انبساط‌سنجی (DMT)؛

-- برآورد پتانسیل روانگرایی براساس سرعت موج برشی (Vs).

۳. پهنه‌بندی روانگرایی در استان مازندران

با توجه به اطلاعات ژئوتکنیکی موجود اعم از نقشه‌ی ژئوتکنیک پایه، سطح آب زیرزمینی و پهنه‌بندی لرزه‌ی در استان مازندران، می‌توان به بررسی پتانسیل روانگرایی در این استان پرداخت. البته به دلیل گستردگی منطقه و کافی نبودن تعداد گمانه‌های ژئوتکنیکی، پهنه‌بندی روانگرایی ارائه‌شده در این تحقیق یک پهنه‌بندی کیفی است و دقت چندان بالایی ندارد. در عمل با توجه به گسترش روزافزون عملیات ساختمانی و پروژه‌های با درجه‌ی اهمیت بالا لازم است با کمک مطالعات ژئوتکنیکی وسیع‌تر مربوط به هر منطقه، به ریز پهنه‌بندی روانگرایی پرداخته شود و نتایج آن در اختیار مهندسان قرار گیرد تا در ملاحظات طراحی در نظر گرفته شود.

۱.۳. نقشه‌ی ژئوتکنیک پایه

نقشه‌ی ژئوتکنیک پایه، نوعی نقشه‌ی زمین‌شناسی مهندسی است که نمایش تعمیم یافته‌ی از همه‌ی سازندهای محیط پیرامونی که در برنامه‌ریزی کاربردی زمین و در طراحی، ساخت و نگهداری سازه‌های مهندسی باید مورد توجه قرار گیرند، طراحی،

جدول ۱. پهنه‌بندی روانگرایی با دقت‌های گوناگون.^[۵]

شرح	پهنه‌بندی اجمالی و کلی (درجه‌ی ۱)	پهنه‌بندی با دقت متوسط (درجه‌ی ۲)	پهنه‌بندی با دقت زیاد (درجه‌ی ۳)
روانگرایی	زلزله‌های تاریخی، اسناد و مدارک قدیمی، نقشه‌های زمین‌ریخت‌شناسی و زمین‌شناسی	اطلاعات ژئوتکنیکی موجود، عکس‌های هوایی و سنجش از دور، بررسی‌های صحرایی، مصاحبه با اهالی محل، سوابق تاریخی، استفاده از آمارها و داده‌های بارندگی و پوشش گیاهی	تحلیل‌های عددی و بررسی‌های ژئوتکنیکی
مقیاس	۱ : ۱/۰۰۰/۰۰۰	۱ : ۱۰۰/۰۰۰	۱ : ۲۵/۰۰۰
نقشه	۱ : ۵۰۰/۰۰۰	۱ : ۵۰/۰۰۰	۱ : ۵/۰۰۰
مزایا	هزینه و زمان کم	دقت بیشتر، امکان تهیه‌ی انواع نقشه‌های پهنه‌بندی	دقت بسیار بیشتر، امکان تهیه‌ی انواع نقشه‌های پهنه‌بندی
معایب	دقت کم	هزینه و زمان بیشتر	هزینه و زمان خیلی بیشتر

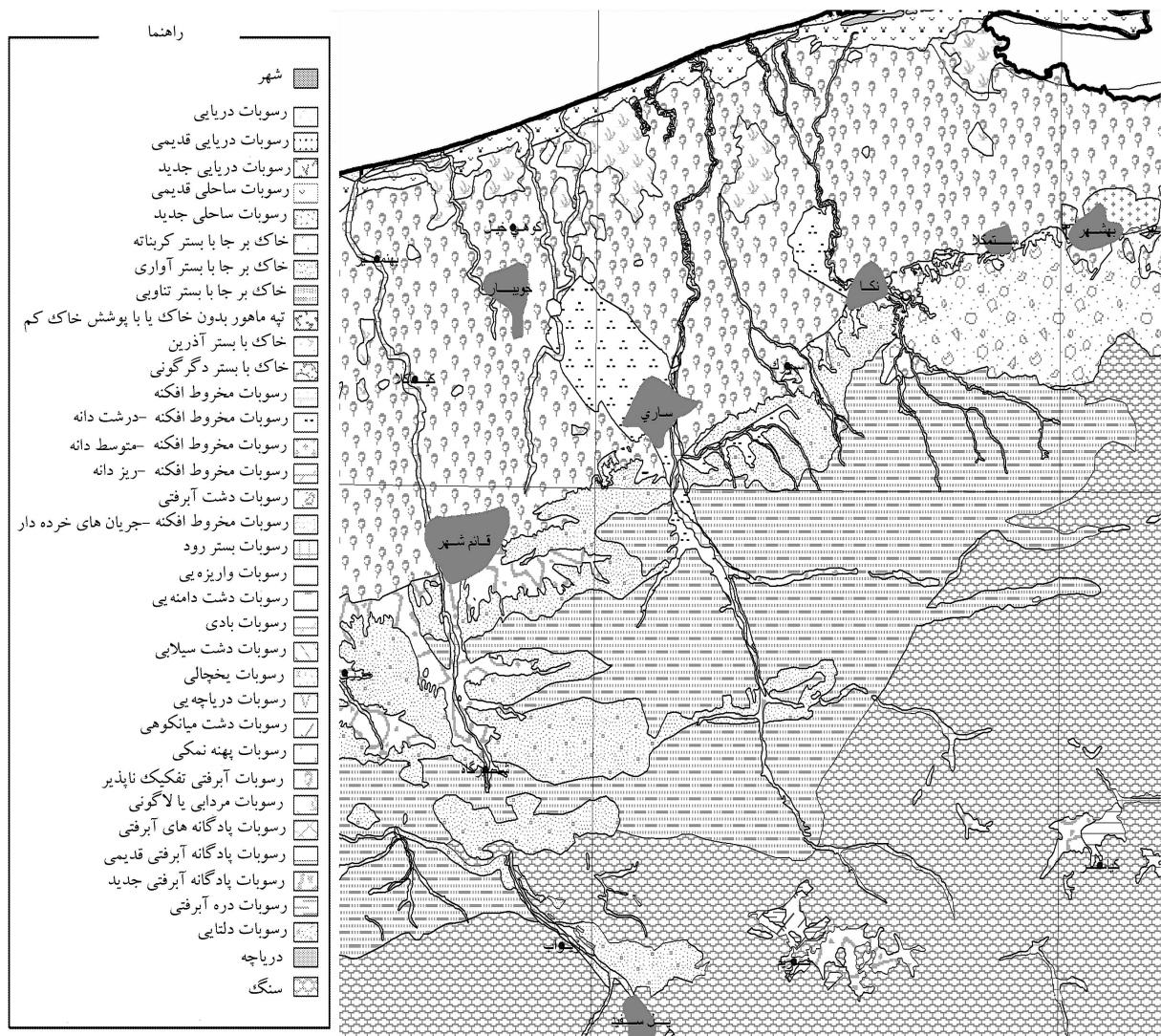
ماهورایی و نقشه‌های زمین‌شناسی و در نهایت رقمی کردن تمام نقشه‌های تهیه‌شده توسط نرم‌افزار GIS، نقشه‌ی ژئوتکنیکی پایه تهیه می‌شود. شکل ۱، قسمتی از نقشه‌ی ژئوتکنیک پایه‌ی چهارگوشه‌ی ۱ ساری واقع در استان مازندران را نشان می‌دهد.

با استفاده از نقشه‌های ژئوتکنیک پایه (با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰)، محدوده‌ی رسوبات مختلف و مناطق سنگی به صورت رسوبات درشت‌دانه، ماسه‌یی، سیلتی، و ریزدانه، و همچنین مناطق سنگی تفکیک شده‌اند. شاخص پتانسیل روانگرایی مرتبط با هر یک از سازندهای نقشه‌ی ژئوتکنیکی پایه در آیین‌نامه‌ی لزره‌یی TC۴ اشاره شده است. مثلاً روانگرایی در تنوع رسوباتی سنگی، تپه‌ی ماهوری و شنی رخ نمی‌دهد.

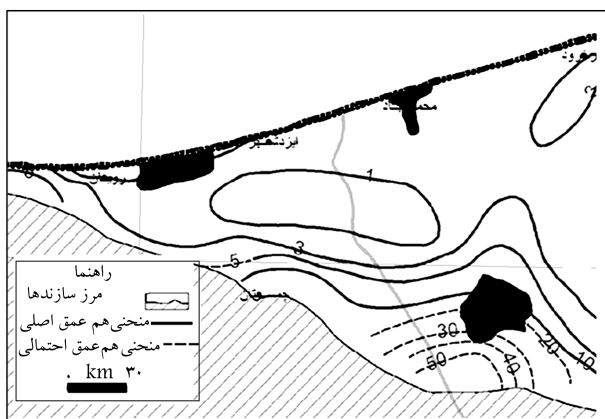
در آیین‌نامه‌ی TC۴ با توجه به نوع و سن رسوبات می‌توان پتانسیل روانگرایی را به‌طور تخمینی ارائه کرد. مثلاً واحدهای مختلف زمین ریخت‌شناسی چهارگوشه‌ی ساری در گستره‌ی طرح به این شرح ارزیابی شد: رسوبات ساحلی جوان در این چهارگوشه شامل ماسه، سیلت و مقدار کمی رس به همراه پوسته و صدف جانوران دریایی هستند که این رسوبات معمولاً فاقد چسبندگی‌اند و در اثر وزش باد و جریان

را فراهم می‌آورد. مثلاً می‌توان به استفاده از این نقشه‌ها در برنامه‌ریزی کاربرد زمین جهت بهره‌برداری همه‌جانبه و توسعه‌ی مناطق با ویژگی‌های گوناگون و با ابعاد بسیار وسیعی که می‌تواند از محدوده‌ی یک شهر تا سراسر خاک یک کشور را در برگیرد، اشاره کرد.^{۱۶} در ذیل جمع‌بندی مختصری از مراحل تهیه‌ی نقشه‌ی ژئوتکنیکی پایه ارائه شده است.

در اولین مرحله، کلیه‌ی اطلاعات زمین‌شناسی موجود جمع‌آوری شده از سازمان‌ها و مؤسسات دولتی اعم از کتب، گزارش‌ها، عکس‌های ماهورایی و نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، خاک‌شناسی و منابع آب بررسی شده است تا بدین ترتیب کاستی‌های اطلاعاتی موجود مشخص شود و از سویی دیگر دید نسبتاً کاملی از منطقه به دست آید. به منظور تهیه‌ی یک طبقه‌بندی بنیادی از تشکیلات موجود براساس اطلاعات سنگ‌شناسی، مطالعات مفصلی صورت پذیرفته است و واحدهای بنیادی که اهمیت بیشتری دارند، تعیین شدند. بدین ترتیب تفکیک واحدها به مناسب‌ترین وجهی که در برگرفته‌ی نوع تقسیمات موردنظر باشد، انجام می‌گیرد. با توجه به تقسیمات در نظر گرفته‌شده برای واحدهای انتخابی در این مرحله و جداسازی واحدهای مختلف خاک و سنگ بر روی منبع اصلی و به کمک تصاویر



شکل ۱. قسمتی از نقشه‌ی ژئوتکنیکی پایه‌ی چهارگوشه‌ی ساری.



شکل ۳. خطوط هم تراز آب در بخشی از استان مازندران.

جدول ۳. شتاب مبنای طرح در شهرهای مختلف استان مازندران.

ردیف	شهر	شتاب طرح (a_{max}/g)	توصیف مخاطرات
۱	شهرهای ساحلی	۰٫۲۵	متوسط
۲	ساری	۰٫۳	زیاد
۳	آمل	۰٫۳	زیاد
۴	قائم شهر	۰٫۳	زیاد
۵	بابل	۰٫۲۵	متوسط

۳.۳. سطح آب زیرزمینی

برای تعیین سطح آب زیرزمینی ابتدا نقشه‌ی آب‌های هم عمق زیرزمینی که در بخش مطالعات هیدروژئولوژی تهیه شده است، مورد مطالعه قرار گرفت. سپس با توجه به گمانه‌های حفرتی در کل محدوده، اطلاعات سطح آب زیرزمینی به دست آمده از این گمانه‌ها مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت و با توجه به این اطلاعات، سطح آب زیرزمینی در پهنه‌های مختلف به دست آمد.^[۷] چنانکه در قبل نیز اشاره شد، پدیده‌ی روانگرایی در خاک‌هایی اتفاق می‌افتد که در زیر سطح آب زیرزمینی قرار داشته و اشباع یا نزدیک به حالت اشباع باشند. قسمتی از نقشه‌ی مربوط به خطوط هم عمق آب در غرب استان مازندران برای نمونه در شکل ۳ ارائه شده است.

با توجه به نقشه‌های هم عمق آب‌های زیرزمینی و سایر اطلاعات، مناطقی که سطح آب زیرزمینی در آن‌ها پایین‌تر از ۱۰ متر است، از نظر روانگرایی غیرفعال و نامستعد شناخته شده‌اند. شایان ذکر است در برخی گمانه‌های جمع‌آوری شده، اطلاعات مربوط به سطح آب زیرزمینی ذکر نشده بود که با رجوع به سایر اطلاعات موجود تخمین زده و روانگرایی نیز ارزیابی شد.

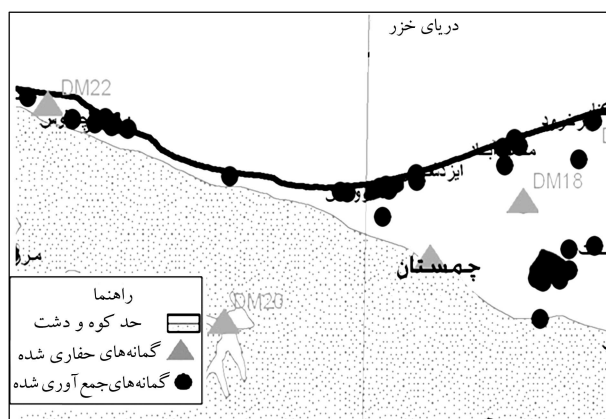
۴.۳. نقشه‌های هم شتاب

با توجه به نقشه‌ی پهنه‌بندی لرزه‌ی ایران (ارائه‌شده در آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰)، شتاب مبنای طرح مربوط به مناطق مختلف استان مازندران تعیین شده است و بر مبنای آن احتمال وقوع پدیده‌ی روانگرایی در مناطق مختلف برآورد شد. واضح است که هرچه شتاب و در نتیجه شدت زلزله در منطقه‌ی بیشتری باشد، احتمال روانگرایی خاک نیز بیشتر است. جدول ۳، شتاب مبنای طرح را برای برخی از شهرهای استان مازندران نشان می‌دهد.^[۸]

ساحل به حرکت در می‌آید. رسوبات ساحلی قدیمی شامل ماسه‌ی لای‌دار بد دانه‌بندی شده به همراه پوسته‌های خردشده‌ی جانوران دریایی‌اند. این رسوبات در امتداد ساحل و از خلیج گرگان تا فریدون‌کنار گسترش یافته‌اند که هرچه این رسوبات تحت امواج دریایی قوی‌تری قرار گیرند، پدیده‌ی روانگرایی احتمال وقوع کمتری دارد.

۲.۳. طبقه‌بندی اطلاعات ژئوتکنیکی در استان مازندران

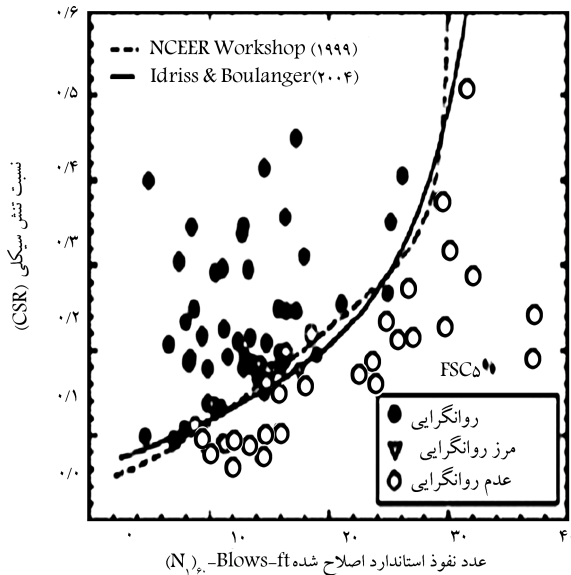
در این بخش از مطالعات، ابتدا گزارش‌های مطالعات ژئوتکنیکی جمع‌آوری شده از شرکت‌ها و ادارات، سازمان‌ها و مراجع ذیربط،^[۲] مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. هدف از جمع‌آوری اطلاعات گمانه‌های ژئوتکنیکی این است که هر محدوده‌ی مشخص شده در نقشه‌ی ژئوتکنیکی پایه، دست‌کم دارای یک گمانه‌ی شاهد باشد که بتوان مشخصات آن گمانه را به کل آن محدوده نسبت داد. نتایج حاصل از گزارشات به صورت نقاط اطلاعاتی بر روی نقشه‌ی ژئوتکنیکی پایه پیاده شده است (شکل ۲). برای هر گمانه‌ی شاهد که نشان‌دهنده‌ی وضعیت کلی و غالب محدوده است، یک لوگ مبنای بازوبسی شده که شامل اطلاعات فیزیکی و مکانیکی خاک آن منطقه است، تهیه شده است (جدول ۲).



شکل ۲. قسمتی از جانمایی گمانه‌ها در استان مازندران.

جدول ۲. مشخصات گمانه‌ی جمع‌آوری شده در سایت GM ۲۸ - ساختمان مسکونی در شهر چمستان.

عمق (m)	N_{SPT}	تشریح
۰	-	
۲	۹	CL
۴	۱۲	
۶	۷	
۸	۶	
۱۰	-	
۱۲	۱۱	ML
۱۴	-	
۱۵	۲۲	CL
۱۶	-	
۱۷	۱۶	
۱۸	-	CL-MI
۱۹	۱۴	
۲۰	-	



شکل ۵. ارزیابی پتانسیل روانگرایی به کمک نتایج آزمایش نفوذ استاندارد [۴].

که در این رابطه، a_{max}/g نسبت شتاب مبنای طرح، σ_v تنش قائم کل، σ'_v تنش قائم مؤثر، r_d ضریب کاهش تنش.

شکل ۵، نمودار مربوط به نسبت تنش سیکلی، CSR برحسب عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده $(N_1)_{60}$ را نمایش می‌دهد. براساس این نمودار می‌توان پتانسیل روانگرایی را برآورد کرد.

عدد نفوذ استاندارد SPT، بر مبنای انرژی وارده ناشی از سربار، شرایط اجرا (قطر گمانه، شرایط نمونه‌گیری، طول طناب و نوع چکش دستگاه) و همچنین اثر ریزدانه با توجه به درصد عبوری الک ۲۰۰، طبق روش یاد و ادیس [۹] برای محاسبه‌ی روانگرایی اصلاح شده است. جدول ۴، نمونه‌ی از تصحیح‌های اعمال شده به عدد نفوذ استاندارد را ارائه می‌کند. در این جدول، C_N ضریب تصحیح مربوط به انرژی وارده‌ی ناشی از سربار، C_E نوع چکش، C_B قطر گمانه، C_R طول طناب و C_S بیانگر شرایط نمونه‌گیر هستند. $(N_1)_{60}$ عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده مربوط به اثرات سربار و $(N_1)_{60,cs}$ عدد نفوذ استاندارد تصحیح شده مربوط به اثرات درصد ریزدانه‌اند.

پتانسیل روانگرایی از روش بولانژر و ادیس [۲] ارزیابی و ضریب اطمینان در برابر پدیده‌ی روانگرایی محاسبه شده است. شکل ۶، نمونه‌ی از نمودارهای مربوط به ارزیابی پتانسیل روانگرایی که با روش‌های مختلف محاسبه شده است، را نمایش می‌دهد. در این شکل FC درصد ریزدانه، W درصد رطوبت، LL حد روانی، PI شاخص روانی، N_{SPT} تعداد ضربات SPT، $(N_1)_{60}$ و $(N_1)_{60,cs}$ اعداد اصلاح شده مربوط به ضربات SPT هستند.

۶.۳. معیار ایشیهارا

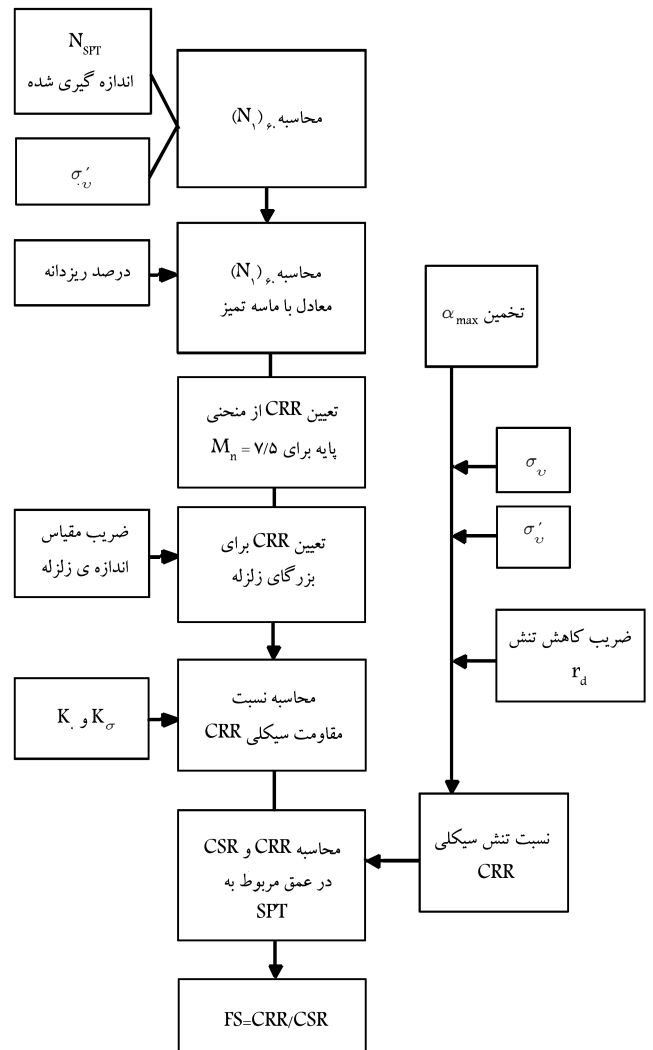
با توجه به روابط متداول در دنیا، ضریب اطمینان در برابر روانگرایی در هر گمانه و برای اعماق مختلف محاسبه می‌شود. در برخی از گمانه‌ها تمام عمق گمانه روانگرا نمی‌شود و ضخامت بخش غیر روانگرای بالایی در مقایسه با لایه‌ی روانگرای زیرین محسوس است. در این صورت لایه‌ی روانگرا توسط لایه‌ی غیر روانگرای بالایی آن محسوس می‌شود و بنابراین در موقعیت موردنظر می‌توان از آثار روانگرایی صرف‌نظر کرد. بنابراین برای تشخیص امکان وقوع روانگرایی

۵.۳. ارزیابی پتانسیل روانگرایی در گمانه‌های ژئوتکنیکی

پس از جمع‌آوری اطلاعات مربوط به سطح آب‌های زیرزمینی، شتاب مبنای طرح و نتایج گمانه‌های ژئوتکنیکی، پتانسیل روانگرایی در موقعیت هر یک از گمانه‌ها ارزیابی شده است. شکل ۴، نمودار مربوط به مراحل مختلف ارزیابی پتانسیل روانگرایی را نشان می‌دهد. در نهایت با استفاده از شاخص‌های اطلاعات مربوط به پارامترهای مختلف و با استفاده از روابط متداول در دنیا، [۹، ۱۰] پتانسیل روانگرایی در موقعیت گمانه‌های مختلف ارزیابی و در قالب ضریب اطمینان در برابر روانگرایی ارائه شده است.

در شکل ۴، ضریب اطمینان در برابر روانگرایی به صورت حاصل تقسیم نسبت مقاومت سیکلی، $(CRR)^2$ به نسبت تنش سیکلی، $(CSR)^3$ معرفی شده است. نسبت تنش سیکلی از رابطه‌ی ۱ محاسبه شده و نسبت مقاومت سیکلی نیز با توجه به نتایج آزمایش‌های درجا قابل محاسبه است. [۱۱] در این تحقیق از نتایج آزمایش نفوذ استاندارد، SPT به‌منظور برآورد نسبت مقاومت سیکلی استفاده شده است.

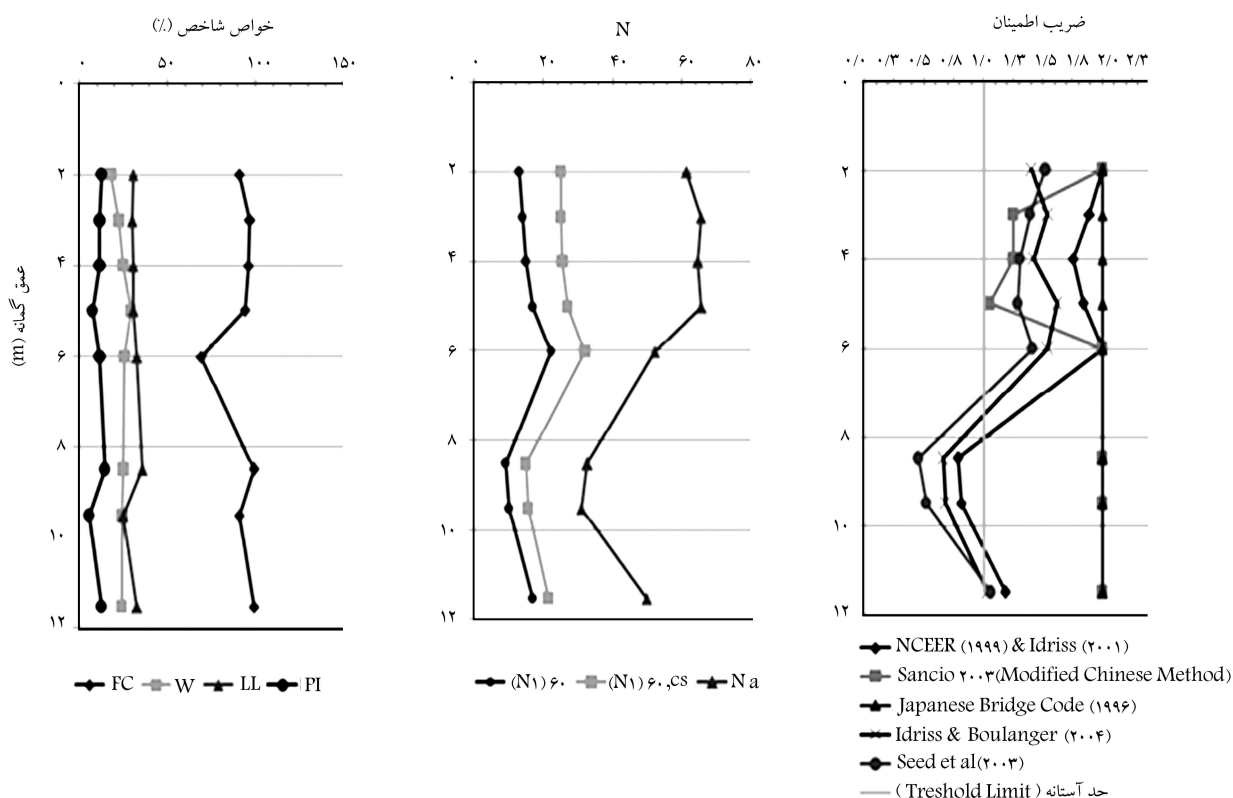
$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) (r_d) \quad (1)$$



شکل ۴. نمودار گردش محاسباتی مربوط به ارزیابی پتانسیل روانگرایی.

جدول ۴. تصحیح عدد SPT برای گمانه‌ی ۵۸ GM واقع در شهر ساری با توجه به پیشنهاد‌های ارائه‌شده‌ی یاد و ادريس. [۹]

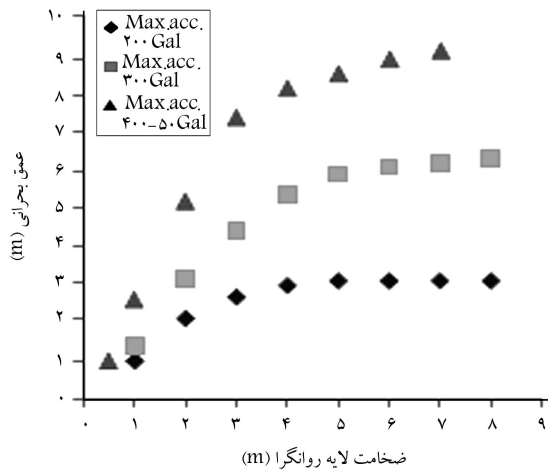
عمق (m)	N_{SPT}	C_N	C_E	C_B	C_R	C_S	$N_{1(60)}$	$N_{1(60)cs}$
۲	۱۳	۱٫۴۱	۱	۱	۰٫۷۵	۱	۱۲٫۶	۲۵٫۲
۳	۱۴	۱٫۳۴	۱	۱	۰٫۹۵	۱	۱۶٫۴	۲۵٫۷
۴	۱۵	۱٫۲۸	۱	۱	۰٫۹۵	۱	۱۶٫۷	۲۶٫۱
۵	۱۷	۱٫۲۲	۱	۱	۱	۱	۱۹٫۰	۲۷٫۹
۶	۲۲	۱٫۱۷	۱	۱	۱	۱	۲۳٫۶	۳۳٫۳
۸٫۵	۹	۱٫۰۶	۱	۱	۱	۱	۸٫۷	۱۵٫۵
۹٫۵	۱۰	۱٫۰۲	۱	۱	۱	۱	۹٫۳	۱۶٫۲
۱۱٫۵	۱۷	۰٫۹۵	۱	۱	۱	۱	۱۴٫۸	۲۲٫۷



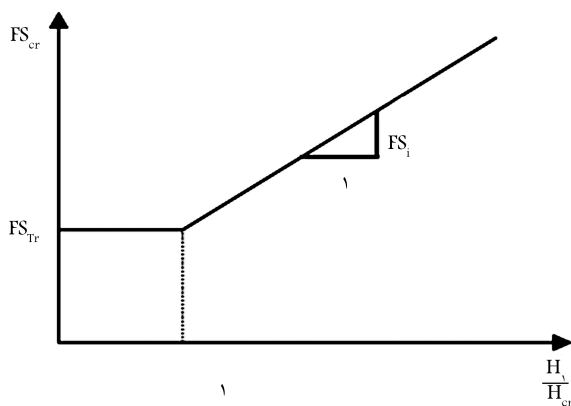
شکل ۶. ارزیابی پتانسیل روانگرایی با روش‌های مرسوم برای گمانه‌ی ۵۸ GM واقع در شهر ساری.

در این مدل که با عنوان مدل لایه‌ی شناور معرفی می‌شود، وزن لایه‌ی غیر روانگرایی بالایی (W)، در اثر بالا رفتن فشار آب حفره‌ی در لایه‌ی پایینی که تابع جنس لایه و شتاب زلزله است، طوری تعیین می‌شود تا بتواند نیروی شناوری (U) را تحمل کند. مثلاً در موقعیت مربوط به گمانه‌ی مورد مطالعه در شکل ۶، یک لایه‌ی زیرین به ضخامت حدود ۴ متر که روانگراست؛ با لایه‌ی غیر روانگرایی بالایی به ضخامت ۸ متر محبوس شده است و با توجه به شتاب مینای ۰٫۳ برای ناحیه‌ی مورد مطالعه و بهره‌گیری از معیار ایشیهارا در شکل ۷، ضخامت لایه‌ی غیر روانگرایی بالایی باید دست‌کم ۵٫۵ متر باشد تا روانگرایی در لایه‌ی پایینی اتفاق نیفتد. بنابراین با توجه به اینکه ضخامت لایه‌ی مزبور حدوداً ۸ متر است، روانگرایی اتفاق نمی‌افتد.

در محل مورد نظر با توجه به ضخامت لایه‌ی روانگرا و ضخامت لایه‌ی غیر روانگرایی بالای آن و با توجه به شتاب طرح منطقه از معیار ایشیهارا [۱۰] استفاده می‌شود (شکل ۷). در این شکل با توجه به ضخامت لایه‌ی روانگرایی زیرین، ضخامت لایه‌ی غیر روانگرایی بالایی طوری تعیین می‌شود که در مجموع روانگرایی اتفاق نیفتد. بنابراین برای هر یک از منحنی‌ها که مربوط به یک شتاب طرح بخصوص هستند، سمت راست منحنی عدم روانگرایی و سمت چپ وقوع روانگرایی را نشان می‌دهد. در واقع اثر لایه‌ی غیر روانگرایی بالایی در جلوگیری از وقوع روانگرایی در لایه‌ی پایینی را می‌توان با مدل ساده‌ی شکل ۸ نشان داد. [۱۰]



شکل ۹. عمق بحرانی سربار در معیار ایشیهارا.



شکل ۱۰. تصحیح ضریب اطمینان روانگرایی برحسب عمق لایه سربار غیر روانگرا.

می‌توان یک رابطه اصلاحی برای ضریب اطمینان در برابر روانگرایی ارائه کرد (رابطه ۲).

$$FS_{cor} = FS_i(H_1/H_{cr} - 1) + FS_{Tr} \quad (H_1 > H_{cr}) \quad (2)$$

در این رابطه، FS_{cor} ضریب اطمینان تصحیح شده، FS_i ضریب اطمینان به دست آمده از روابط تجربی قبلی، H_1 ضخامت لایه سربار غیر روانگرا، H_{cr} عمق بحرانی سربار، FS_{Tr} ضریب اطمینان آستانه که به ازای آن روانگرایی اتفاق می‌افتد (معمولاً ۱ فرض می‌شود).

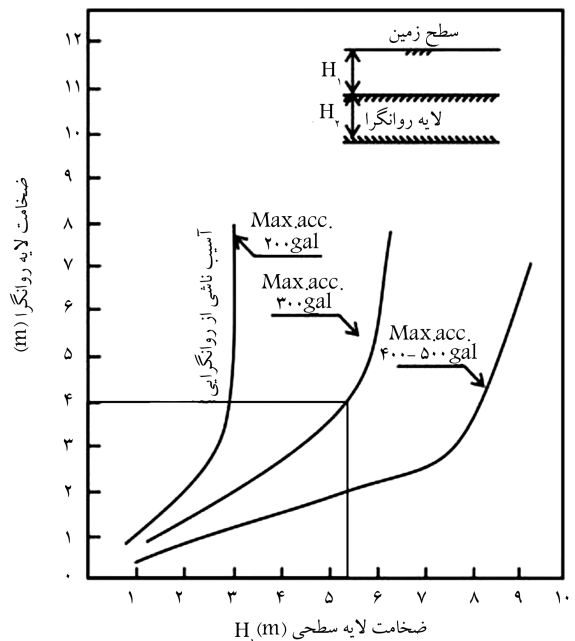
جدول ۵ ضریب اطمینان تصحیح شده را برای گمانه‌ی مورد مطالعه در شکل ۷ به همراه ضریب اطمینان اولیه که با معیار بولانژر و ادریس [۲] محاسبه شده است، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، اعماق ۸ تا ۱۲ متر که طبق معیار بولانژر و ادریس روانگرا هستند، با در نظر گرفتن اثر سربار ۸ متری در معیار ایشیهارا غیر روانگرا محسوب می‌شوند.

۷.۳. پهنه‌بندی روانگرایی

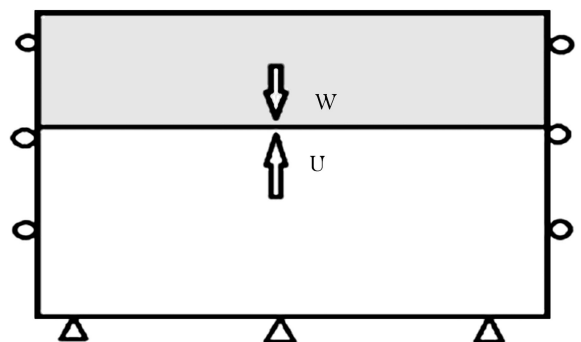
به علت نداشتن دقت بالای انجام آزمایش‌های ژئوتکنیکی توسط شرکت‌های مختلف و خطاهای دیگر، نمی‌توان با قاطعیت احتمال وقوع روانگرایی را محاسبه کرد. پتانسیل روانگرایی در این تحقیق به نواحی با پتانسیل زیاد، متوسط، کم، و هیچ تقسیم شده

حال با استفاده از معیار ایشیهارا و نمودارهای ارائه شده در شکل ۷ می‌توان یک عمق بحرانی سربار تعریف کرد که عبارت است از کمینه‌ی ضخامت لایه غیر روانگرایی بالایی که در اثر سربار ناشی از آن، لایه‌ی پایینی با پتانسیل روانگرایی، روانگرا نشود. شکل ۹ تغییرات عمق بحرانی را با ضخامت لایه‌ی روانگرایی پایینی برای شتاب‌های مختلف طرح نمایش می‌دهد. در شکل‌های ۷ و ۹ واحد شتاب به صورت گال Gal (سانتی‌متر بر مجذور ثانیه) در نظر گرفته شده است.

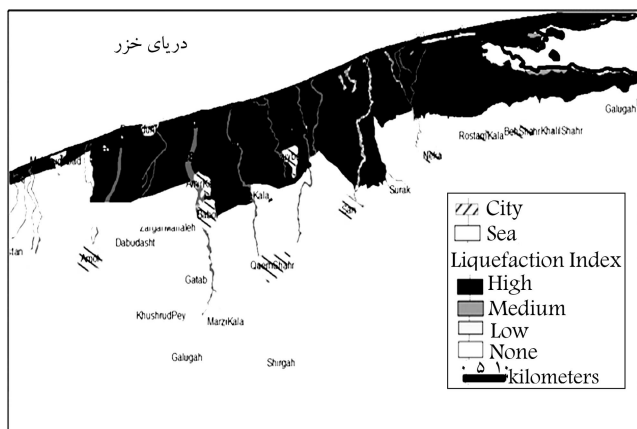
با در نظر گرفتن معیار ایشیهارا و لحاظ اثر لایه‌ی غیر روانگرایی بالایی مطابق شکل ۱۰، در شرایطی که ضخامت لایه‌ی سربار غیر روانگرایی بالایی کمتر از ضخامت یا عمق بحرانی باشد؛ بدین معنی است که روانگرایی در لایه‌ی روانگرایی زیرین اتفاق می‌افتد و بنابراین از آنجایی که انتخاب مقادیر کمتر از ۱ برای ضریب اطمینان آستانه بدون مفهوم است، لذا در این شرایط ($H_1 < H_{cr}$) ضریب اطمینان برابر با ضریب اطمینان آستانه‌ی روانگرایی، FS_{Tr} در نظر گرفته شده است و اما در شرایطی که ضخامت لایه‌ی سربار بیشتر از عمق بحرانی باشد؛ فرض شده است که ضریب اطمینان به صورت خطی با افزایش ضخامت لایه‌ی سربار افزایش می‌یابد و بنابراین



شکل ۷. بررسی اثر ضخامت لایه‌ی سربار غیر روانگرا در معیار ایشیهارا. [۱۰]



شکل ۸. مدل ساده‌ی لایه‌ی شناور در معیار ایشیهارا.



شکل ۱۲. پهنه‌بندی روانگرایی در شرق استان مازندران.

در نظر گرفتن راهکارهایی برای مقابله با این پدیده کند. طبیعی است با اعمال تمهیداتی چون پی‌های رادیه، پی‌های عمیق، چاه‌های شنی و زهکش‌های فتیله‌یی می‌توان تا حدودی از خسارات ناشی از پدیده‌ی روانگرایی کاست.

علاوه بر این همان‌طوری که از پهنه‌های ارائه شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ پیداست، به نظر می‌رسد در شهرهای قائم‌شهر و بهشهر خطر چندانی از بابت وقوع پدیده‌ی روانگرایی وجود نداشته باشد. عموماً با توجه به پایین بودن سطح آب زیرزمینی و یا عمق زیاد سربراب خطر روانگرایی در این شهرها کمتر است. با این حال برای اظهار نظر دقیق‌تر در ارتباط با پتانسیل روانگرایی مناطق ذکر شده لازم است سازمان‌های ذیربط با جمع‌آوری اطلاعات مدون و مستند به ارزیابی دقیق‌تر و با جزئیات بیشتر در ارتباط با پدیده‌ی روانگرایی و پتانسیل آن در مناطق مختلف ساحلی بپردازند.

۴. نتیجه‌گیری

این تحقیق با بررسی و ارزیابی پتانسیل روانگرایی در نواحی و شهرهای مختلف استان مازندران به کمک داده‌های آزمایش‌های برجا (SPT)، به معرفی اثر لایه‌ی غیر روانگرایی بالایی در کاهش پتانسیل روانگرایی لایه‌های زیرین می‌پردازد. بدین منظور از معیار ایشیهارا به منزله‌ی مبنای اصلاحات مربوط به ضریب اطمینان در برابر روانگرایی بهره گرفته شده و نهایتاً یک ضریب اطمینان اصلاحی در برابر روانگرایی ارائه شده است.

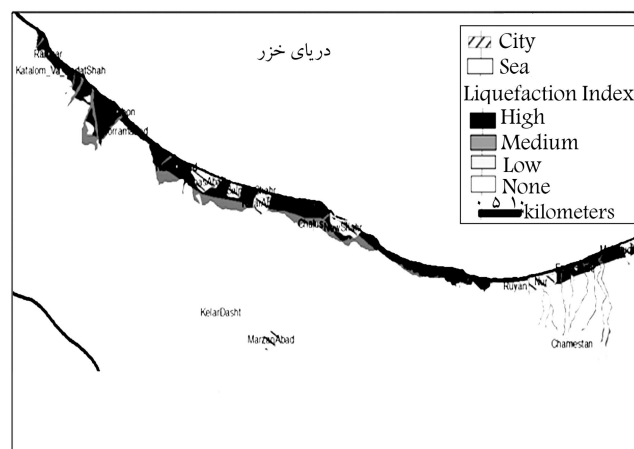
نواحی مورد مطالعه، از جنوب به رشته‌کوه البرز و از شمال به دریای خزر محصور است. لذا کرانه‌ی جنوبی آن با توجه به کوهستانی بودن و پایین بودن تراز آب زیرزمینی دارای پتانسیل روانگرایی پایین‌تری است و انتظار می‌رود با نزدیک شدن به دریا احتمال روانگرایی افزایش یابد.

در محدوده‌ی مورد مطالعه، پهنه‌های رسوبات بستر رودخانه و حوضه‌ی سیلابی جوان و رسوبات دره‌ی آبرفتی دارای پتانسیل روانگرایی متوسط‌اند، که البته سطح شتاب منطقه نیز در این مورد مؤثر است. نوار ساحلی عمدتاً از رسوبات دریایی با بیشترین پتانسیل روانگرایی تشکیل یافته و در قسمت شرق محدوده، قسمتی از پهنه که از کوه‌های البرز فاصله گرفته و در منطقه با پتانسیل لرزه‌خیزی بالا قرار گرفته است، دارای پتانسیل روانگرایی زیاد است. در جنوب این پهنه به دلیل شرایط خاص دانه‌بندی و توپوگرافی پتانسیل روانگرایی چندانی وجود ندارد. در بخش‌های نزدیک دریا، پهنه‌های با پتانسیل زیاد روانگرایی نیز موجود است.

است. با توجه به مباحث مطرح شده در محدوده‌ی مورد مطالعه، پهنه‌های مختلف با توجه به جنس و دانه‌بندی رسوبات و همچنین سطح آب زیرزمینی و نیز مقاومت خاک محل مورد مطالعه قرار گرفتند. جنس و دانه‌بندی رسوبات با توجه به نقشه‌ی پایه‌ی ژئوتکنیک و نیز گمانه‌های حفاری شده در منطقه تعیین و مقاومت خاک نیز با توجه به نقشه‌ی کیفیت توانمندی خاک و نیز نگاه مجدد به گمانه‌های حفاری شده و نتایج استخراج شده از آن‌ها تعیین شد. برای تعیین پتانسیل روانگرایی، با توجه به شتاب مبنای طرح در منطقه و با داشتن سایر اطلاعات از پهنه‌های مختلف مانند جنس و دانه‌بندی رسوبات، مقاومت خاک محل در قالب نتایج آزمایش‌های درجا و سطح آب زیرزمینی محدوده‌ی مورد نظر از نظر پتانسیل روانگرایی بررسی و توسط نرم‌افزار GIS ارائه شد. شکل‌های ۱۱ و ۱۲ پهنه‌بندی روانگرایی را به ترتیب برای نواحی مرکزی و غرب مازندران و شرق استان مازندران نشان می‌دهد. نتایج مربوط به پهنه‌بندی نمایان‌گر آن است که در مناطق ساحلی باید نگران رخ دادن پدیده‌ی روانگرایی در مواقع زلزله بود و بنابراین لازم است برای انجام ساخت و سازهای شهری در این مناطق، شهرداری‌ها و سازمان نظام مهندسی استان حساسیت دو چندانی را داشته باشند و با اعمال قوانین سخت‌گیرانه‌تر مهندسان طراح را وادار به

جدول ۵. ضریب اطمینان روانگرایی تصحیح شده برای گمانه‌ی مورد مطالعه در شکل ۶.

عمق (m)	FS_i	FS_{cor}
۲	۱٫۴	۱٫۴
۳	۱٫۵۴	۱٫۵۴
۴	۱٫۴۲	۱٫۴۲
۵	۱٫۶۴	۱٫۶۴
۶	۱٫۵۴	۲
۸٫۵	۰٫۶۶	۱٫۳۵
۹٫۵	۰٫۶۸	۱٫۳۷
۱۱٫۵	۱٫۰۳	۱٫۰۳



شکل ۱۱. پهنه‌بندی روانگرایی در مرکز و غرب استان مازندران.

از پی‌های گسترده و عمیق، چاه‌های شنی و غیره با انجام آزمایش‌های برجا اعم از SPT و CPT به تکمیل بانک اطلاعاتی موجود پرداخت تا در آینده بتوان پهنه‌بندی دقیق‌تری ارائه داد.

قدردانی

نویسندگان این نوشتار از شرکت مهندسان مشاور دریا خاک پی که در تهیه‌ی بخشی از منابع این تحقیق همکاری کرده‌اند، تشکر می‌کنند.

به‌طورکلی در محدوده‌ی مورد مطالعه، پهنه‌هایی که پتانسیل قابل توجه روانگرایی دارند، زیاد نیست و قسمت عمده‌ی از منطقه نیز پتانسیل روانگرایی ندارد. هرچه به سمت شرق پیش می‌رویم، پهنای محدوده با پتانسیل روانگرایی بالا افزایش می‌یابد که شهرهای ساحلی از جمله محمودآباد و بابلسر با بیشترین پتانسیل روانگرایی، در معرض مخاطرات ژئوتکنیکی قرار دارند.

در مجموع پهنه‌بندی ارائه‌شده کلی و کیفی است و در تعدادی از شهرها که پتانسیل روانگرایی بالایی برآورد شده است، لازم است ضمن اعمال تمهیدات زیرساختی اعم

پانویس‌ها

1. four angle
2. cyclic resistance ratio
3. cyclic stress ratio

منابع (References)

1. Seed, R.B.; Cetin, K.O.; Moss, R.E.S.; Kammerer, A.; Wu, J.; Pestana, J.; Riemer, M.; Sancio, R.B.; Bray, J.D.; Kayen, R.E. and Faris, A., *Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: A Unified and Consistent Framework*, Keynote presentation, 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Long Beach, CA (2003).
2. Boulanger, R.W. and Idriss, I.M. "State normalization of penetration resistance and the effect of overburden stress on liquefaction resistance", *Proceedings 11th SDEE and 3rd ICEGE*, Berkeley, CA (2004).
3. Gatmiri, B., Alamzadeh, A., Tatari, A., Soltani, M. and Molaabasi, H. "Physical plan of North Coastal area" Iran Urban and architectural research center (2008).
4. Molaabasi, H. "Zonation of liquefaction potential in golestan province with lateral spreading consideration" In Partial Fulfillment of the requirements the degree of master of science Faculty of Engineering, The University of Guilan, (In Persian) (2010).
5. Technical Committee for Earthquake Geotechnical Engineering, *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards*, TC4, ISSMFE (1999).
6. Goodman, R.E., *Engineering Geology-Rock in Engineering Construction*, John Wiley and sons, Inc. (1993).
7. Sedaghat, M. "Underground waters" Payam Noor Publication, Tehran (2006).
8. Iranian Code of Practice for seismic resistant design of buildings (Standard No. 2800-03), (2005).
9. Youd, T.L. and Idriss, I.M. "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, ASCE*, **127**(10), pp. 817-833 (2001).
10. Ishihara, K. "Stability of natural deposits during earthquakes", *Proc. of the 11th Intern. Conf. on Soil Mech. and Found. Engineering*, San Francisco, **9**, pp. 1249-1273 (1985).

تعیین ظرفیت باربری شمع‌های کوبیده‌شده در خاک‌های غیرچسبنده با رویکرد شبکه‌ی عصبی موجکی

محمدعلی لطف‌اللهی یقین* (استاد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

بهمن نادری‌نیا (کارشناس ارشد)

دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین

افشین پورتقی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

تعیین ظرفیت باربری شمع‌های کوبیده‌شده در خاک‌های غیرچسبنده با وجود منابع علمی زیاد، کماکان توأم با پیچیدگی است. یک شبکه‌ی عصبی موجکی، توابع موجکی را به‌منزله‌ی توابع فعال‌ساز نرون‌های لایه‌ی پنهان از شبکه‌ی عصبی پیش‌خورده به‌کار می‌گیرد. در این شبکه‌ها هر دو پارامتر انتقال و مقیاس موجکی‌ها در کنار وزن‌هایشان بهینه می‌شوند. در رویکردی خاص از ساخت این نوع شبکه‌ها، با عنوان ویونت، پارامترهای انتقال و مقیاس ثابت می‌ماند و فقط وزن‌ها بهینه می‌شوند. در این نوشتار، با در نظر گرفتن رویکرد فوق در مورد داده‌های صحرایی موجود، به پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌های کوبیده‌شده در خاک‌های غیرچسبنده پرداخته شده است. مقایسه‌ی مقادیر ظرفیت باربری نهایی حاصل از آزمایش‌های صحرایی با مقادیر پیش‌بینی‌شده از شبکه‌ها، حاکی از عملکرد بهتر آن‌ها بالاخص شبکه‌ی ویونت پیشنهادی است.

واژگان کلیدی: ظرفیت باربری خاک، شبکه‌ی عصبی مصنوعی، موجکی، ویونت.

۱. مقدمه

علی‌رغم تحقیقات گسترده در خصوص تعیین ظرفیت باربری شمع‌های کوبیده‌شده در خاک‌های ماسه‌یی، تاکنون روش کاملاً مطمئنی برای دستیابی به این هدف ارائه نشده است. خواص فیزیکی و مکانیکی منحصر به فرد خاک همچون ناهمگونی، ناهمسانی، وجود آب یا بی‌آبی، تنوع ترکیب‌های مختلف خاک در طبیعت، استعداد خزش، رفتار پیچیده تنش و کرنش از یک سو و تنوع شمع‌ها از لحاظ جنس مصالح، شکل مقاطع، روش‌های اجرا، نصب و سایر موارد از سوی دیگر موجب پیچیدگی اندرکنش سازه‌یی شمع و خاک اطراف آن می‌شود.^[۱] لذا مدل‌کردن چنین شرایط پیچیده‌یی با دخالت متغیرهای مختلف در آن دشوار است. این مسئله موجب کاهش دقت در تعیین ظرفیت باربری شده و متعاقباً استفاده از روش‌های تحلیلی را با مشکلات بسیاری مواجه ساخته است.

برای غلبه بر مشکلات موجود در رابطه با ارزیابی ظرفیت باربری شمع، آزمایش‌های محلی، از قبیل آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)^۱، آزمایش نفوذ مخروطی (CPT)^۲ و آزمایش پرسیمتری (PMT)^۳ در موارد متعددی انجام می‌شود. اگرچه این آزمایش‌ها تا حدودی شرایط طبیعی خاک را بیان می‌کنند، اما به‌نوبه‌ی خود

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۹/۷/۳، اصلاحیه ۱۳۸۹/۱۲/۹، پذیرش ۱۳۸۹/۱۲/۱۵.

محدودیت‌های بسیاری را به همراه خواهند داشت. علاوه بر آزمایش‌های محلی، روش‌ها و فرمول‌های تجربی متعددی نیز با استفاده از پارامترهای مختلف خاک و شمع حاصل از آزمایش‌های مربوط جهت باربری نوک شمع و ظرفیت باربری اصطکاکی جداره‌ی شمع ارائه شده است. از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به روش‌های مایرهورف^۴، تاملینسون^۵، پولوس و دوپس، کوپل و کاستاو و مؤسسه‌ی نفت امریکا اشاره کرد.^[۲] با وجود این، روش‌های مذکور نیز سازگاری مناسبی با نتایج ندارند. لاجرم ارائه‌ی روشی نسبتاً مطمئن به‌منظور تعیین ظرفیت باربری، اهمیت و ارزش بالایی خواهد داشت. در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های هوش مصنوعی به‌طور موفقیت‌آمیزی در مهندسی ژئوتکنیک به‌کار رفته است. محققان مختلفی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی به پیش‌بینی ظرفیت باربری شمع‌ها در خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده پرداخته‌اند. در سال‌های ۱۹۹۴ و ۱۹۹۵، یک مدل شبکه‌ی عصبی ارائه شد که با استفاده از آن به پیش‌بینی ظرفیت باربری اصطکاکی شمع‌ها در خاک رس پرداخته شده بود.^[۳] این شبکه با استفاده از داده‌های صحرایی شامل طول شمع، قطر و تنش مؤثر سربار و مقاومت برشی زهکشی‌نشده به‌عنوان داده‌های ورودی و مقاومت جانبی شمع به‌عنوان داده‌های خروجی آموزش داده شد. همچنین در سال‌های ۱۹۹۵ و ۱۹۹۶، مدل‌های دیگری از شبکه‌ی عصبی