

## ارزیابی خطر روانگرایی در مسیر خط ۲ مترو رشت با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

علی ارومیه‌ای<sup>۱</sup>، الهه السادات رضوی<sup>۲</sup> و وحید باقری<sup>۳</sup>

استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
 کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، تهران، ایران  
 دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
 تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۷/۱۸

### چکیده

شهر رشت مرکز استان گیلان و یکی از کلان‌شهرهای ایران در حاشیه جنوبی دریای خزر به شمار می‌آید. از دیدگاه زمین‌شناسی، این شهر در شمال پهنه ساختمانی البرز و در پهنه رسوبی گرگان-رشت جای گرفته است. گسل‌های بسیاری در این منطقه وجود دارند و تأثیرگذارترین آنها، گسل خزر است که می‌تواند بیشینه شتاب لرزه‌ای معادل  $0.3g$  را برای یک زمین‌لرزه بزرگ به وجود آورد. با استناد به داده‌های ژئوتکنیکی به دست آمده از حفاری‌های اکتشافی، خاک‌های محدوده شهری در مسیر خط ۲ مترو شامل تناوبی از سیلت و رس و میان‌لایه‌هایی از ماسه و شن هستند. با توجه به بالا بودن سطح آب زیرزمینی، فراوانی نهشته‌های ریزدانه، لرزه‌خیزی بالای منطقه و همچنین تولید ارتعاش توسط حرکت قطار مترو، امکان بروز خطر پدیده روانگرایی در مسیر ساخت مترو پیش‌بینی می‌شود. بر این مبنای، هدف مقاله ارزیابی خطر روانگرایی در مسیر خط ۲ متروی شهر رشت از راه تهیه نقشه پهنه‌بندی تعیین شده است. در این راستا با استفاده از اطلاعات ۱۴ گمانه اکتشافی حفر شده تا ژرفای بیشینه ۴۰ متر از سطح زمین و با بهره‌گیری از نرم‌افزار ArcGIS و به کارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، پهنه‌بندی خطر روانگرایی انجام شد. لایه‌های اطلاعاتی مورد توجه در این پژوهش شامل نوع خاک، عدد آزمایش نفوذ استاندارد، ژرفای گمانه‌ها (فشار روپاره)، شاخص خمیری و بیشینه شتاب لرزه‌ای بوده‌اند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که خطر روانگرایی در مسیر خط ۲ مترو، میان کم تا خیلی زیاد متغیر است و بیشترین خطر در ایستگاه BC2 (محدوده کوی سازمان آب) و I2 (محدوده حسین آباد) پیش‌بینی شده است. تأثیرگذارترین عامل در بروز خطر روانگرایی جنس خاک و شرایط آب زیر زمینی بوده است.

**کلیدواژه‌ها:** خط ۲ مترو شهر رشت، خطر روانگرایی، نرم‌افزار ArcGIS، FAHP

**نویسنده مسئول:** علی ارومیه‌ای

E-mail: uromiea@modares.ac.ir

### ۱- پیش‌نویس

جدری شیبانی و همکاران (۱۳۹۱) تأثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در حفاری مکانیزه تونل خط ۷ متروی تهران را مورد توجه قرار دادند. میزان نشست سطحی زمین از دیدگاه ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی مسیر خط ۲ مترو توسط قبادی و بابازاده (۱۳۹۱) بررسی شد. ارزیابی سامانه نگهداری تونل خط ۴ متروی تهران در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زمین‌لرزه به وسیله سعیدی و همکاران (۱۳۹۲) مطالعه شد. حیاتی و همکاران (۱۳۹۲) با تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر روانگرایی، پایداری مسیر متروی شهر اهواز را بررسی کردند. ارزیابی پدیده روانگرایی در نهشته‌های آبرفتی خط ۱ متروی تبریز توسط خبازی و همکاران (۱۳۹۱) مطالعه شد. حجتی و همکاران (۱۳۹۳) خطر لرزه‌ای بر پایداری خط ۲ متروی تبریز را تجزیه و تحلیل کردند. Talkhablou et al. (2015) استعداد روانگرایی نهشته‌های کواترنری در بندر امام را مورد مطالعه قرار دادند. Hashemi et al. (2104) نهشته‌های هولوسن منطقه بندر انزلی را از دیدگاه ژئوتکنیکی مطالعه و الگویی برای توالی نهشته‌های رسوبی منطقه ارائه کردند. بر پایه الگویی ارائه شده، سه لایه با ویژگی‌های ژئوتکنیکی در منطقه شناسایی شد که از سطح به ژرفا به ترتیب شامل نهشته‌های ماسه‌ای سست با خاصیت روانگرایی بالا (لایه بالایی)، نهشته‌های رسی با استقامت پایین و قابلیت نشست پذیری بالا (لایه میانی) و نهشته‌های ماسه‌ای با استقامت بالا (لایه زیرین) می‌شود.

ارزیابی خطر روانگرایی در دیگر کشورهای جهان نیز مورد توجه بوده است. برای نمونه Unutmaz (2014) استعداد روانگرایی خاک پیرامون تونل‌های دوگانه را در کشور ترکیه بررسی کرد و نتیجه گرفت که ژرفای تونل از سطح زمین و بیشینه شتاب لرزه‌ای بیشترین تأثیر را در پدیده روانگرایی دارند نه ابعاد هندسی تونل. Chou et al. (2001) میزان آسیب‌های وارده به تونل‌های سپرگذاری شده در اثر پدیده روانگرایی را مطالعه کردند. خطر روانگرایی لرزه‌ای برای تونل‌های مترو در کشور چین توسط Jie (2014) مطالعه شد.

امروزه با توجه به گسترش شهرها و افزایش جمعیت شهرنشینی، در بیشتر شهرهای بزرگ استفاده از وسایل حمل و نقل عمومی از جمله مترو توصیه می‌شود. از مزایای فراوان این استفاده می‌توان بهره‌وری از سرعت و ایمنی رفت‌وآمد، کاهش آلودگی‌های صوتی و زیست‌محیطی و صرفه‌جویی در مصرف سوخت را عنوان کرد. از این رو در طرح‌های توسعه شهری، امروزه توجه بیشتری به گسترش فضاهای زیرزمینی و حفر تونل‌های ارتباطی می‌شود. برای پیش‌بینی و ارزیابی حجم مخاطرات زمین‌شناسی احتمالی به هنگام حفر تونل و فضاهای زیرزمینی، ضرورت دارد مطالعات فشرده زمین‌شناسی مهندسی در مسیر خطوط ارتباطی صورت گیرد. یکی از این مخاطرات، پدیده روانگرایی است که یکی از عوامل اصلی آسیب‌پذیری و ویرانی سازه‌های زیربنایی به شمار می‌آید. روانگرایی خاک پدیده‌ای است که در خاک‌های دانه‌ای اشباع به علت افزایش فشار آب منفذی و از بین رفتن مقاومت برشی به هنگام رویداد زمین‌لرزه رخ می‌دهد. در این شرایط خاک همانند یک سیال رفتار می‌کند و به صورت جوشش ماسه‌ای در سطح زمین تخلیه می‌شود. بدین ترتیب ساختار خاک تغییر می‌یابد و سبب نشست‌های نامتوازن سطحی و آسیب‌رسانی به سازه‌ها و تأسیسات زیربنایی می‌شود.

پروژه خط ۲ مترو رشت در حدود ۱۲ کیلومتر طول دارد و ضمن گذر از مرکز شهر، مسیر ارتباطی نقاط جنوب خاور و شمال خاور شهر را با ۱۳ ایستگاه فراهم می‌کند. در این مسیر ۱۴ گمانه اکتشافی در مرحله اول حفر شد و حفر ۶ گمانه اکتشافی دیگر برای تکمیل مطالعات نیز برنامه‌ریزی شده است. جانمایی مسیر خط ۲ مترو رشت و موقعیت حفر گمانه‌های اکتشافی و ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک در موقعیت گمانه‌ها به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند.

موضوع ارزیابی خطر روانگرایی در مسیر خط مترو مورد توجه بسیاری از پژوهشگران در سال‌های اخیر بوده است و در این راستا کارهای پژوهشی بسیاری صورت گرفته که به چند مورد اشاره می‌شود. برای نمونه

## ۲- موقعیت زمین‌شناسی شهر رشت

شهر رشت در دامنه شمالی ارتفاعات البرز و در مختصات جغرافیایی طول‌های خاوری 00° 50' - 30° 49' و عرض‌های شمالی 30° 37' - 00° 37' جای گرفته است. این شهر مرکز استان گیلان و پس از تهران دارای بیشترین تراکم جمعیتی است. با توجه به بافت کهن مرکز شهر و حجم سنگین ترافیک در این محدوده، برنامه‌ریزی برای ساخت خطوط مترو برای این شهر از سال ۱۳۹۱ مورد توجه شهرداری قرار گرفت.

دیدگاه‌های متفاوتی برای بیان جایگاه زمین‌شناسی گستره شهر رشت توسط پژوهشگران مختلف معرفی شده است. به نظر اشتوکلین شهر رشت در شمال باختر پهنه ساختاری رسوبی البرز جای می‌گیرد (Stocklin, 1968). در صورتی که نبوی (۱۳۵۵) موقعیت شهر رشت را در انتهای باختری پهنه ساختاری رسوبی گرگان رشت قرار می‌دهد. در آخرین تقسیم‌بندی، آقاباتی (۱۳۸۵) موقعیت شهر را در پهنه ساختاری رسوبی پارتی‌تیس می‌گذارد. موقعیت زمین‌شناسی شهر رشت از دیدگاه‌های مختلف پژوهشگران در شکل ۳ نشان داده شده است. در تقسیم‌بندی افتخارزاد (۱۳۵۹) بخش بزرگی از این پهنه به نام منطقه فرونشست دریای خزر یاد شده است. از دیدگاه علوی، این پهنه ساحل جنوبی دریای خزر را شامل می‌شود و در بخش شمالی گسل البرز جای دارد که بیشتر توسط نهشته‌های رسوبی کواترن، شامل نهشته‌های رودخانه‌ای، دلتایی و ساحلی پوشیده شده است (Alavi, 1996). با توجه به شبست‌های کم دگرگون شده جنوب گرگان، زمان پیدایش این پهنه به پیرکامبرین نسبت داده می‌شود. اما در نواحی باختری (استان گیلان) رختمون سنگ‌های اسلیتی فیلیتی با سن کربنیفر کهن‌ترین سنگ‌های منطقه را تشکیل می‌دهند (نبوی، ۱۳۵۵). واحدهای پالئوزوئیک در مناطق گسلی و به صورت برگه‌های روراند در باختر منطقه دیده می‌شوند. وجود گدازه‌های کشتی نوع الکانل در واحدهای آتشفشانی رسوبی ژوراسیک تا کرتاسه نشانگر تکون حوضه‌های تراکشی حوضه خزر است (درویش‌زاده، ۱۳۷۰).

## ۳- ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک

ویژگی‌های ژئوتکنیکی خاک در مسیر خط مترو با حفر ۱۴ گمانه اکتشافی و انجام آزمایش‌های مختلف صحرائی و آزمایشگاهی تعیین شد. موقعیت حفر گمانه‌ها و ویژگی‌های خاک در شکل ۲ نشان داده شده است. برای ارزیابی شاخص‌های مقاومتی خاک، در همه گمانه‌ها و در ژرفاهای مختلف آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) انجام شد. عدد نفوذ استاندارد (N) با در نظر گرفتن عوامل تأثیرگذار مانند فشار روباره، قطر چاه، انرژی وارده و خطی بودن ضربه به دست آمد. با انجام آزمایش‌های حدود آتربرگ، شاخص‌های خمیری از جمله حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری تعیین شدند. محاسبه فشار روباره و فشار آب منفذی با توجه به ژرفای مسیر خط مترو به ترتیب از سطح زمین و تراز ایستایی آب به دست آمد.

با استفاده از نتایج آزمایش SPT و اندازه‌گیری سرعت موج برشی می‌توان استعداد روانگرایی یک منطقه را بر پایه تقسیم‌بندی NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program) ارزیابی کرد (Wair et al., 2012). در این روش خاک (مطابق جدول ۱) به ۶ رده تقسیم‌بندی می‌شود که رده A بهترین کیفیت و رده F بدترین کیفیت را به خود اختصاص می‌دهند. بدین ترتیب هر چه کیفیت خاک بهتر و یا بدتر باشد قابلیت روانگرایی آن به ترتیب کمتر و بیشتر است. Samadi and Mehrabi (2009) با انجام برداشت‌های لرزه‌نگاری فشرده کیفیت خاک را در سطح شهر بر این مبنای تقسیم‌بندی کردند. نتایج بررسی‌ها در شکل ۴ ارائه شده است. مطالعات نشان می‌دهد بیشتر شهر در رده D، بخش‌هایی نیز در رده E و مقدار کمی در رده C قرار می‌گیرند. بنابراین بیشتر نقاط شهر به ویژه آنجایی که در رده E قرار دارد، استعداد بالایی برای روانگرایی دارند. چگونگی رده‌بندی خاک بر پایه NEHRP به همراه ویژگی‌های خاک برای هر رده در جدول ۱ ارائه شده است.

## ۴- مفهوم روانگرایی در خاک

روانگرایی یکی از مخاطرات زمین‌شناسی مهندسی است که در محیط‌های اشباع و فعال بودن از نظر عملکرد نیروهای دینامیکی شکل می‌گیرد. این پدیده زمانی رخ می‌دهد که محیط (زمین) دربرگیرنده خاک‌های ریزدانه و بدون چسبندگی باشد و مقاومت برشی آنها تنها توسط زاویه اصطکاک داخلی و تنش قائم کنترل شود (Cernica, 1995; Hunt, 1984). به هنگام رویداد زلزله و با فعال شدن هرگونه نیروی دینامیکی، جنبش تولید شده در زمین به صورت موج‌های فشاری (موج P) و برشی (موج S) به توده خاک اعمال می‌شود. حرکت موج P سبب فشردن شدن ذرات جامد و بالا رفتن موضعی فشار آب منفذی و در نتیجه کاهش تنش مؤثر میان‌دانه‌ای می‌شود (Coch, 1995). زمانی که فشار آب منفذی برابر با تنش مؤثر و یا بیش از آن شود، مقاومت برشی خاک از بین می‌رود و دانه‌های جامد خاک در آب شناور می‌شوند. مصالح خاک مانند بک سیال رفتار می‌کنند و به همراه جریان آب جابه‌جا می‌شوند. این جابه‌جایی سبب حرکت آب از مناطق پرفشار به مناطق کم‌فشار و تخلیه مصالح خاک به سطح زمین می‌شود. در اثر این فرایند ساختمان درونی خاک سست می‌شود و با از دست دادن استقامت خود، سبب نشست‌های نامتقارن در خاک و گسیختگی سازه‌های سطحی می‌شود.

پدیده روانگرایی به هنگام رویداد زمین‌لرزه منجبل ۱۳۶۹ آسیب‌های بسیاری در شهرهای ساحلی از جمله آستانه اشرفیه، رودسر و بخش‌هایی از شهر رشت به وجود آورد (حائری، ۱۳۶۹). با توجه به مساعد بودن شرایط خاک در محدوده شهر رشت در مسیر خطوط مترو، لازم است خطر بروز این پدیده در مسیر خطوط مترو مورد مطالعه قرار گیرد.

## ۵- عوامل مؤثر در روانگرایی

نخستین گام در ارزیابی خطر روانگرایی شناسایی و معرفی عوامل تأثیرگذار در بروز این پدیده در منطقه مورد مطالعه است. با توجه به اطلاعات گمانه‌های حفاری شده در مسیر خط ۲ مترو و با در نظر گرفتن شرایط لرزه‌خیزی منطقه، پنج عامل که می‌تواند بیشترین تأثیرگذاری را در روانگرایی داشته باشند به شرح زیر برای شهر رشت معرفی شدند. گفتنی است که تأثیر حضور آب زیرزمینی به خاطر اشباع بودن محیط در تراز مسیر خط مترو و بکسان بودن تأثیرگذاری آن نادیده گرفته شد.

### ۵-۱. جنس خاک

جنس خاک تأثیر مستقیم در ارزیابی روانگرایی زمین دارد و خاک‌های ریزدانه با ساختار دانه‌ای و بدون چسبندگی بیشترین توانایی را برای روانگرایی دارند. دامنه گسترده‌ای از انواع مختلف خاک در گستره شهر رشت و در مسیر خط ۲ مترو دیده می‌شوند. گوناگونی خاک‌ها در تراز تونل خط مترو در شکل ۵ الف نشان داده شده است. خاک‌های ماسه‌ای بیشترین تمرکز را در مناطق مرکزی شهر و خاک‌های سیلتی و رسی گسترش بیشتری در حاشیه جنوبی شهر دارند.

### ۵-۲. ژرفای سطح

ژرفای تراز خط مترو از سطح زمین سبب خاک و با به عبارت دیگر فشار روباره را بر تونل نشان می‌دهد. به‌طور کلی هر چه ژرفای تونل از سطح زمین بیشتر باشد تأثیر فشار روباره بیشتر می‌شود و ابزارهای مقاوم‌سازی بیشتری برای پایدارسازی تونل مورد نیاز خواهد بود. از آنجا که ژرفای تراز تونل مترو نسبت به سطح زمین متغیر است، فشار روباره اعمال شده در طول مسیر متفاوت به دست آمده است. تغییرات ژرفای تونل مترو از سطح در شکل ۵ ب ارائه شده است.

### ۵-۳. عدد نفوذ استاندارد

عدد نفوذ استاندارد (N) یکی از شاخص‌های مناسب برای ارزیابی استقامت خاک است و بر پایه آن می‌توان شاخص‌های مقاومتی خاک را ارزیابی کرد. عدد نفوذ استاندارد بزرگتر نشانه استقامت بیشتر و حساسیت کمتر در برابر روانگرایی است. تغییرات عدد نفوذ استاندارد در مسیر تونل در شکل ۵ ج نشان داده شده است. در بیشتر بخش‌های مسیر عدد نفوذ استاندارد در محدوده میان ۱۰ تا ۶۰ به ثبت رسیده است.

#### ۴-۵. شاخص خمیری

شاخص خمیری (PI) دامنه چسبندگی خاک را نشان می‌دهد و تابعی از میزان فراوانی رس در خاک است. هر چه درصد فراوانی کانی رس در خاک بیشتر باشد شاخص خمیری آن نیز بیشتر است. خاک‌های چسبنده در مقایسه با خاک‌های دانه‌ای استعداد کمتری برای روانگرایی دارند. تغییرات شاخص خمیری خاک در مسیر خط مترو در شکل ۵ نشان داده شده است.

#### ۵-۵. پیشینه شتاب لرزه‌ای

پیشینه شتاب لرزه‌ای (PGA) از دیگر شاخص‌های منظور شده برای پهنه‌بندی خطر روانگرایی در مسیر خط مترو است. با استناد به مطالعات صورت گرفته توسط (Zare (2012)، Moinfar et al. (2012) و آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی ۱۳۹۳)، شهر رشت در پهنه خطر لرزه‌خیزی بالا قرار دارد و پیشینه شتاب لرزه‌ای ۰/۲۴ تا ۰/۳۵ شتاب ثقل (g) برای آن در نظر گرفته شده است. در این پژوهش برای انجام محاسبات لرزه‌ای، پیشینه شتاب لرزه‌ای ۰/۳ g برای شهر رشت به کار گرفته شد. افزون بر پیشینه شتاب لرزه‌ای در نظر گرفته شده، حرکت دایمی قطار نیز ممکن است ارتعاشات موضعی داشته باشد. تغییرات این شاخص در مسیر خط مترو در شکل ۵ نشان داده شده است.

ویژگی‌های عوامل باد شده در بروز خطر روانگرایی و میزان تأثیرگذاری هر کدام در جدول ۱ ارائه شده است.

#### ۶- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی

روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP; Analytical Hierarchy Process) یک شیوه تصمیم‌گیری چند معیاره است که به وسیله Saaty and Vargas (1991) برای تجزیه و تحلیل اطلاعات مدیریتی و صنعتی پیشنهاد شد. امروزه این روش کاربرد گسترده‌ای در همه زمینه‌ها از جمله مباحث زمین‌شناسی پیدا کرده است. برای نمونه، شیرمرد و همکاران (۱۳۹۴) از آن برای تعیین نقاط پهنه حفاری در کانسار مس پورفری نیسان استفاده کردند. (Moradi et al. (2012 این روش را برای تهیه نقشه خطر زمین‌لغزش در منطقه دنا به کار گرفتند. (Mondal and Maiti (2014 روش تحلیل سلسله مراتبی را برای ارزیابی زمین‌لغزش خیزی حوضه آبریز شی‌کولا در ارتفاعات هیمالایا استفاده کردند.

برای استفاده از این روش تجزیه و تحلیل، ابتدا ساختار برنامه بر پایه هدف تعیین شده رسم می‌شود. سپس معیارهای مورد ارزیابی معرفی و گزینه‌ها انتخاب می‌شوند. هدف پایانی در این پژوهش، تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر روانگرایی در مسیر خط ۲ متروی رشت بوده است. معیارهای ارزیابی منظور شده در این پژوهش شامل ۵ عامل جنس خاک، ژرفا، عدد N، شاخص خمیری و مقدار PGA است. الگوی ساختاری تعریف شده برای این روش در شکل ۶ نشان داده شده است.

فرایند تحلیل سلسله مراتبی، امکان استفاده از متغیرهای کیفی در کنار متغیرهای کمی را دارد و مبتنی بر نظرات کارشناسی است. وزن هر کدام از عوامل یاد شده در ایجاد خطر روانگرایی بر پایه ماتریس مقایسه زوجی عوامل مطابق جدول ۲ تعیین می‌شود. در سال‌های اخیر به منظور افزایش دقت روش AHP، این روش با روش فازی تلفیق، پیاده‌سازی شده و در قالب الگوی Fuzzy-AHP معرفی می‌شود. در مقایسه زوجی به روش تحلیل سلسله مراتبی معمولی (AHP)، ارزش‌ها بر پایه برآوردهای تصادفی به کار برده می‌شوند؛ در صورتی که در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (F-AHP) شرایط واقعی‌تری برای ارزش‌گذاری برای عوامل تعریف شده فراهم می‌شود.

ارزش‌گذاری عوامل از دید ماتریس مقایسه زوجی بر پایه اعداد فازی مطابق جدول ۳ نیز انجام پذیرفت. سپس مقدار تأثیرگذاری هر عامل (M) مطابق جدول ۴ به دست آمد. در روش تحلیل توسعه‌ای، برای هر یک از سطوح ماتریس مقایسات زوجی، مقدار Sk که خود یک عدد مثلثی است، به صورت جدول ۵ و پس از آن،

درجه بزرگی Skها (V) نسبت به هم مطابق جدول ۶ به دست آمد. در پایان، در این روش وزن شاخص‌ها در ماتریس مقایسه زوجی به صورت جدول ۷ به دست آمد. چارچوب کلی کار با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به صورت خلاصه به شرح زیر است:

- ۱) انتخاب معیارهای مورد نظر (تعیین ساختار).
- ۲) ارزیابی گزینه‌های تأثیرگذار بر پایه معیارهای انتخاب شده (تعیین ضریب اهمیت معیارها و زیرمعیارها و وزن دادن به جایگزین‌ها برای رسم ساختار؛ لازم است هدف، معیارها و گزینه‌ها مشخص شوند).
- ۳) مقایسه زوجی و تعیین وزن معیارهای مختلف با توجه به هدف صورت گرفته (ترکیب ضریب اهمیت گزینه‌ها و ترکیب وزن‌ها).
- ۴) گردآوری داده‌ها در ارتباط با معیارهای تعریف شده.
- ۵) مقایسه زوجی هر کدام از گزینه‌ها به تفکیک هر کدام از معیارها (آزمایش سازگاری).
- ۶) تحلیل نایح، تعیین وزن پایانی هر کدام از گزینه‌ها و تعیین اولویت هر یک از آنها.
- ۷) مقایسه معیارها با توجه به میزان تأثیرگذاری به صورت زوجی و نشان دادن وزن هر کدام روی ماتریس‌های سنجشی.
- ۸) ضرب وزن‌های تعیین شده برای هر کدام از معیارها و زیرمعیارها در محیط نرم افزار ArcGIS در رده‌ها و لایه‌های اطلاعاتی مربوط.

#### ۷- پهنه‌بندی خطر روانگرایی خط مترو

امروزه در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی مخاطرات زمین‌شناسی از ابزار و نرم‌افزارهای کارآمدی استفاده می‌شود. این ابزارها با بهره‌گیری از مدل‌های ریاضی پیچیده و پیشرفته امکانات زیادی برای تحلیل دقیق‌تر ویژگی‌های زمین‌شناسی در اختیار می‌گذارند. از سوی دیگر سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (ArcGIS) توانایی زیادی برای تولید نقشه‌های پهنه‌بندی دارند و نمایش بصری بهتری در اختیار کاربران قرار می‌دهد. با تلفیق الگوهای ریاضی با کاربری‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی، امکان تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی و نمایش دامنه عملکرد مخاطرات مبسر می‌شود. با استناد به این گونه نقشه‌ها می‌توان بحران‌های ناشی از بروز مخاطرات زمین‌شناسی احتمالی را پینی کرد و شیوه‌های مناسب مقاوم‌سازی سازه‌ها و با بهسازی زمین را برای کاهش اثرات آنها پیشنهاد داد.

نقشه پهنه‌بندی خطر روانگرایی شهر رشت در مسیر خط ۲ مترو، بر پایه پنج لایه اطلاعاتی تعریف و به کمک نرم‌افزار ArcGIS و بر پایه تحلیل سلسله مراتبی فازی تهیه شد. ویژگی‌های این نقشه در شکل ۷ ارائه شده است. در این نقشه خطر روانگرایی در مسیر خط ۲ مترو در ۵ پهنه تقسیم‌بندی شد. بیشترین محدوده خطر پیرامون ایستگاه I2 (خیابان سعدی و محله باقرآباد) و به مقدار کمتر در محدوده ایستگاه C2 (نواحی جنوبی خط) وجود دارد. شرایط با خطر کم پیرامون میدان امام، مصلی و ایستگاه‌های E2 تا F2 دید می‌شود. بخش‌های دیگر مسیر در پهنه‌های با خطر متوسط قرار می‌گیرند.

#### ۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله خطر روانگرایی در مسیر خط ۲ متروی شهر رشت بررسی شد. در این بررسی ضمن بررسی شرایط زمین‌شناسی و لرزه‌خیزی منطقه، از اطلاعات ژئوتکنیکی ۱۴ گمانه حفاری شده در مسیر خط مترو نیز استفاده شد. با بهره‌گیری از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در محیط ArcGIS نقشه پهنه‌بندی خطر روانگرایی در مسیر خط ۲ مترو و در تراز حرکت قطار بر پایه ۵ لایه اطلاعاتی تهیه شد. لایه‌های اطلاعاتی در نظر گرفته شده در این پژوهش شامل جنس خاک، شاخص خمیری، عدد SPT، فشار روباره و پیشینه شتاب لرزه‌ای است. وزندهی و امتیازبندی هر لایه اطلاعاتی بر پایه روش سلسله مراتبی فازی صورت گرفت. نتایج به دست آمده را می‌توان به شرح زیر مورد بررسی قرار داد.

ژرفا در گمانه‌های مختلف متفاوت و این نشانه تأثیر سطح آب زیرزمینی و گوناگونی جنس نهشته‌های آبرفتی است.

فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی، امکان استفاده از متغیرهای کیفی در کنار متغیرهای کمی را دارد و متنی بر نظرات کارشناسی است. برای ارزیابی و تعیین درجه اهمیت شاخص‌ها نسبت به یکدیگر در این پروژه از روش F-AHP استفاده شده است تا ارزیابی به شرایط واقعی نزدیک‌تر باشد.

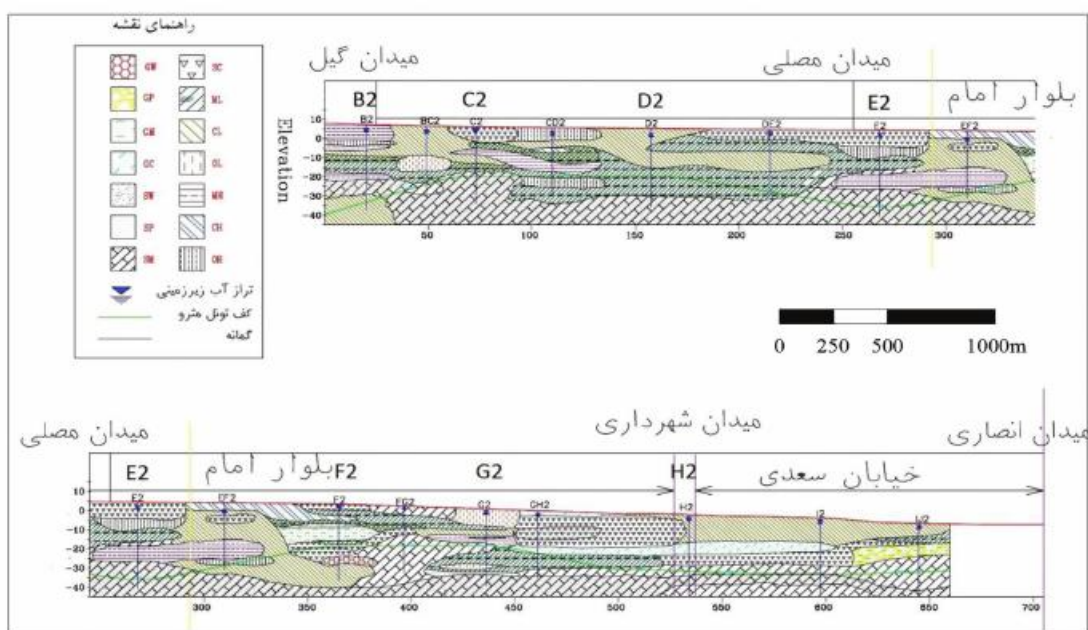
با توجه به نقشه پهنه‌بندی تهیه شده، خطر بروز پدیده روانگرایی در مسیر خط ۲ مترو میان ۳۸ تا ۹۱ درصد متغیر است. ایستگاه‌های I2 و C2 (مناطق حسین‌آباد و کوی سازمان آب منطقه‌ای) با بیشترین احتمال بروز خطر (۷۲ تا ۹۱ درصد) روبه‌رو هستند؛ در برابر آن ایستگاه‌های B2، F2 و E2 (مناطق شهرک سپیدرود و شهرک شهید رجایی) کمترین احتمال رخداد روانگرایی را دارند.

گستره شهر رشت در پهنه فعال زمین‌ساختی جای گرفته است و با توجه به عملکرد گسل‌های اصلی منطقه (مانند گسل تالش، گسل البرز، گسل رودبار و گسل لاهیجان) خطر لرزه‌خیزی به نسبت بالا و شتاب لرزه‌ای بیشینه بر پایه  $\frac{g}{0.3}$  تعیین شد. با توجه به ویژگی‌های در مسیر خط مترو که بیشتر از نوع ریزدانه مانند SM و SC هستند، حضور میان‌لایه‌هایی از ماسه‌های SW و SP در ترازهای مختلف میان آنها و بالا بودن سطح آب زیرزمینی، امکان بروز خطر روانگرایی در منطقه زیاد پیش‌بینی شده است.

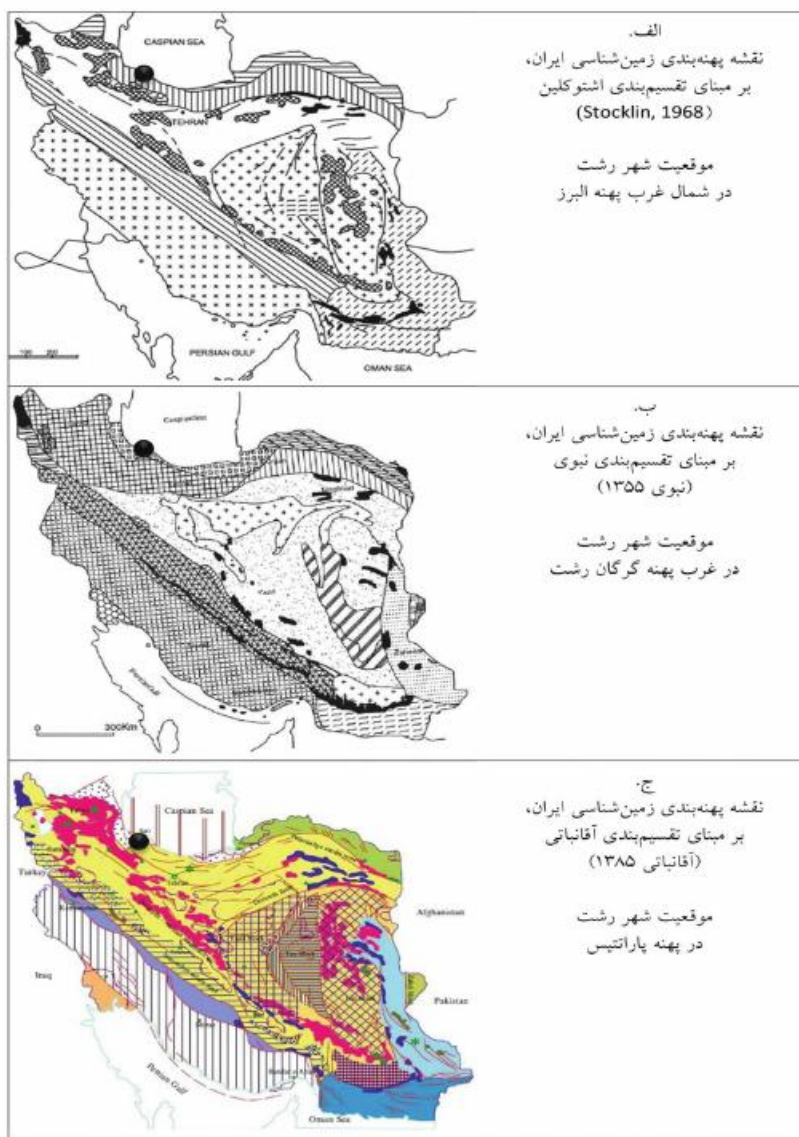
عدد آزمایش نفوذ استاندارد (N) به دست آمده از آزمایش‌های SPT میان ۱۰ تا ۶۰ متغیر و این نشانه اختلاف جنس و استقامت خاک در مسیر خط مترو است. بیشترین مقدار در گمانه‌های GH2 و IJ2 (مناطق صیقلان، شیخ‌آباد و بافرآباد) و کمترین مقدار در گمانه I2 (منطقه حسین‌آباد) به ثبت رسیده‌اند. رابطه عدد (N) با



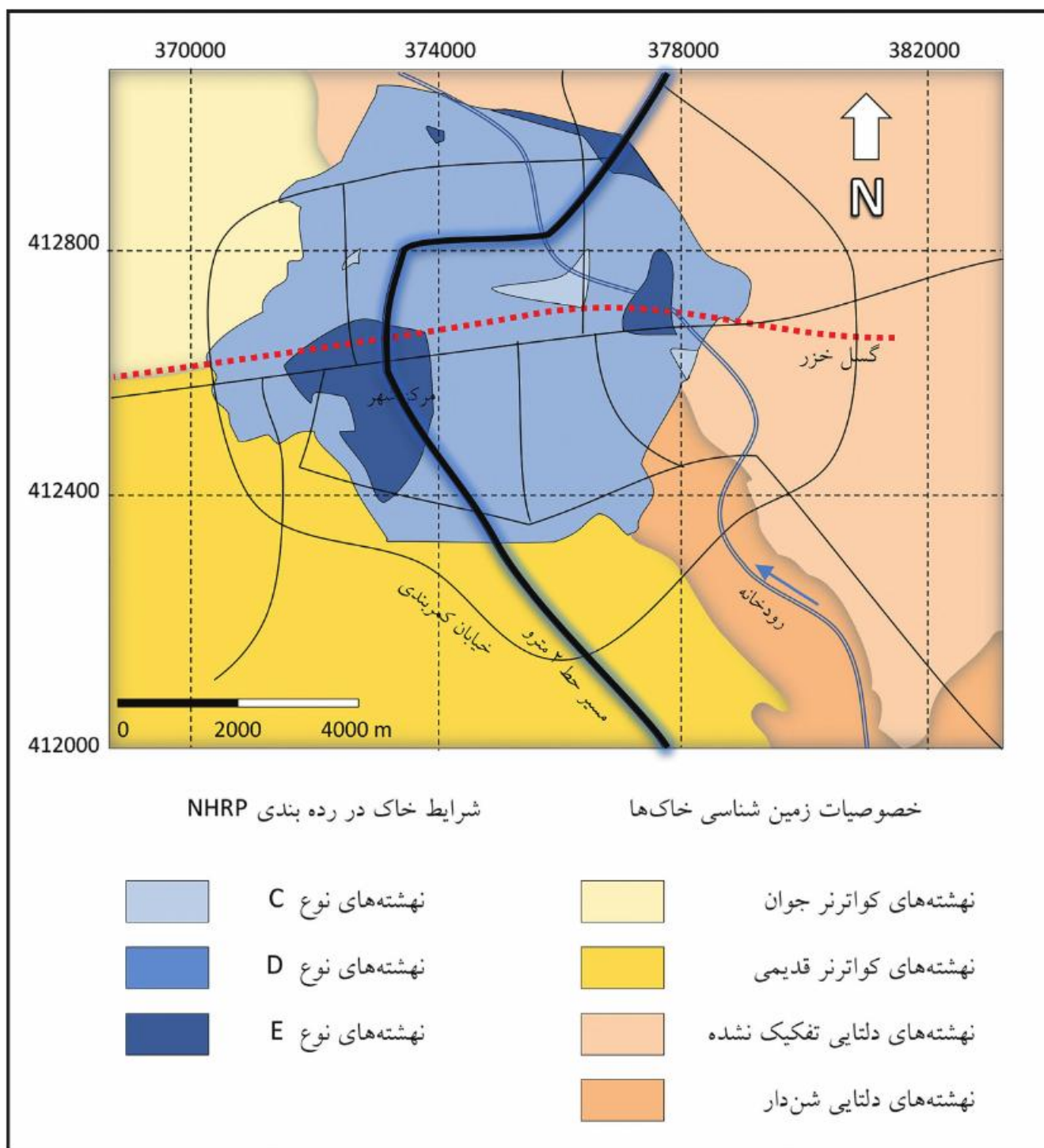
شکل ۱- موقعیت جغرافیایی شهر رشت و جانمایی مسیر خط ۲ مترو.



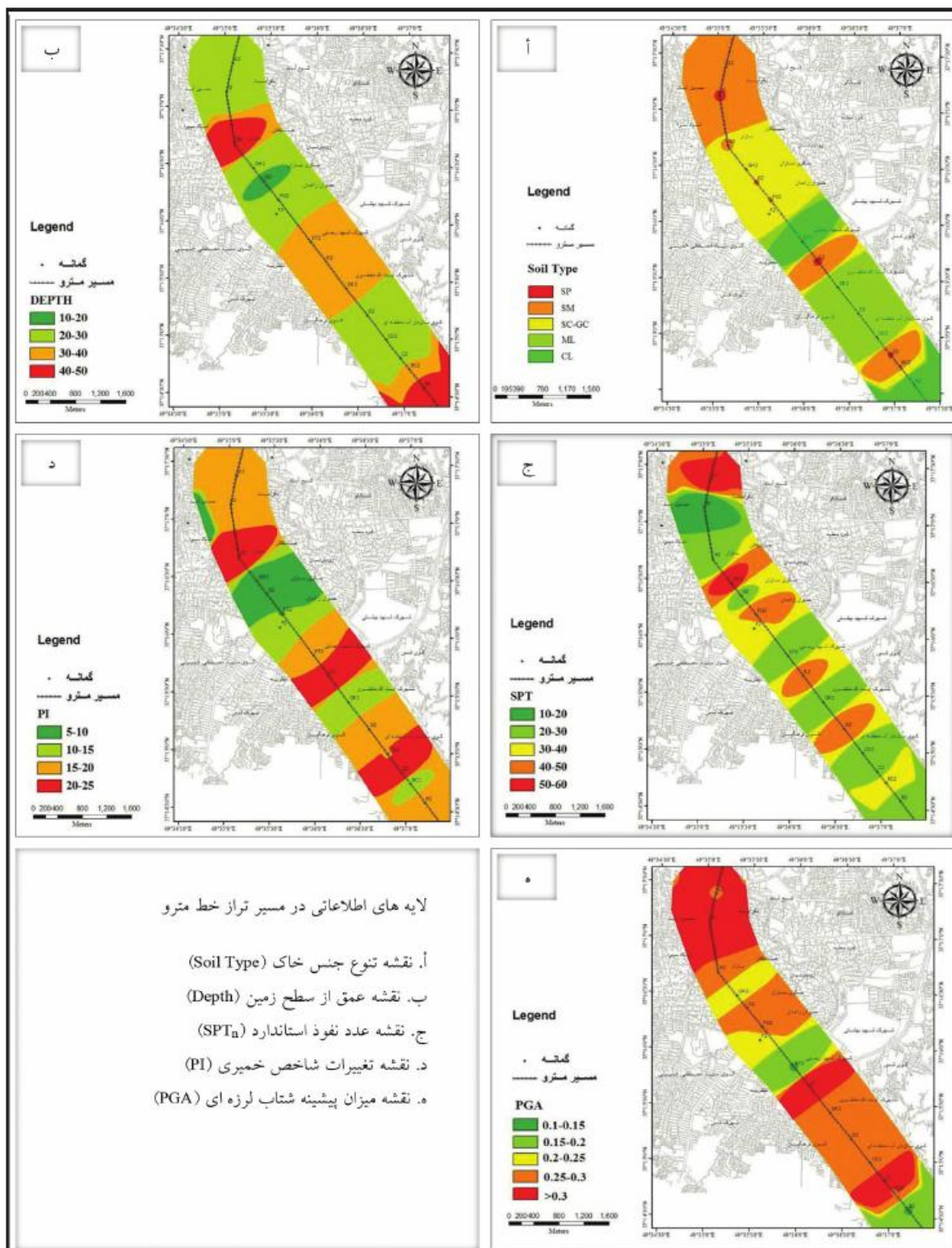
شکل ۲- نیرخ طولی خاک و گوناگونی آن در مسیر خط ۲ مترو.



شکل ۳- موقعیت زمین‌شناسی شهر رشت از تقسیمات ساختری- روسی.



شکل ۴- ویژگی‌های زمین‌شناسی خاک و رده‌بندی آنها بر پایه تقسیم‌بندی NHRP شهر رشت.



لایه‌های اطلاعاتی در مسیر تراز خط مترو

ا. نقشه تنوع جنس خاک (Soil Type)

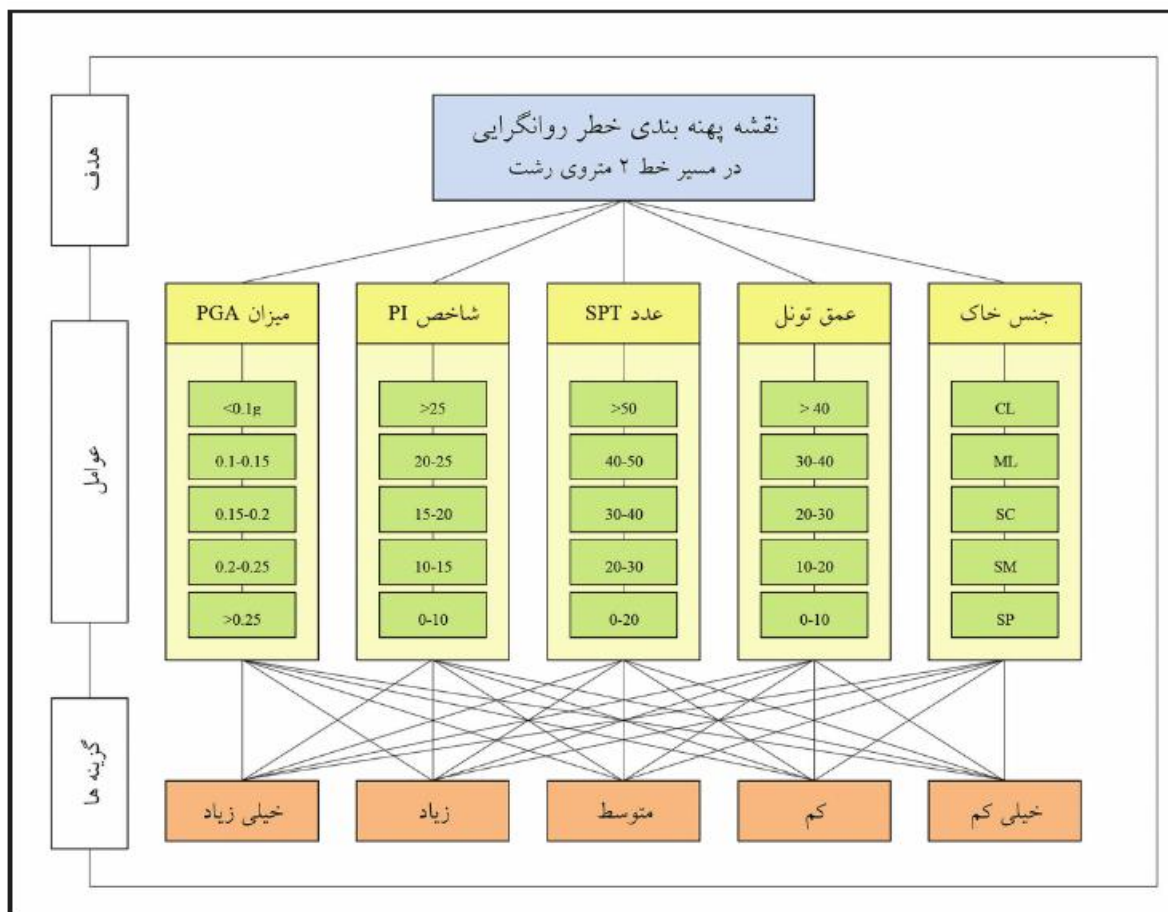
ب. نقشه عمق از سطح زمین (Depth)

ج. نقشه عدد نفوذ استاندارد ( $SPT_n$ )

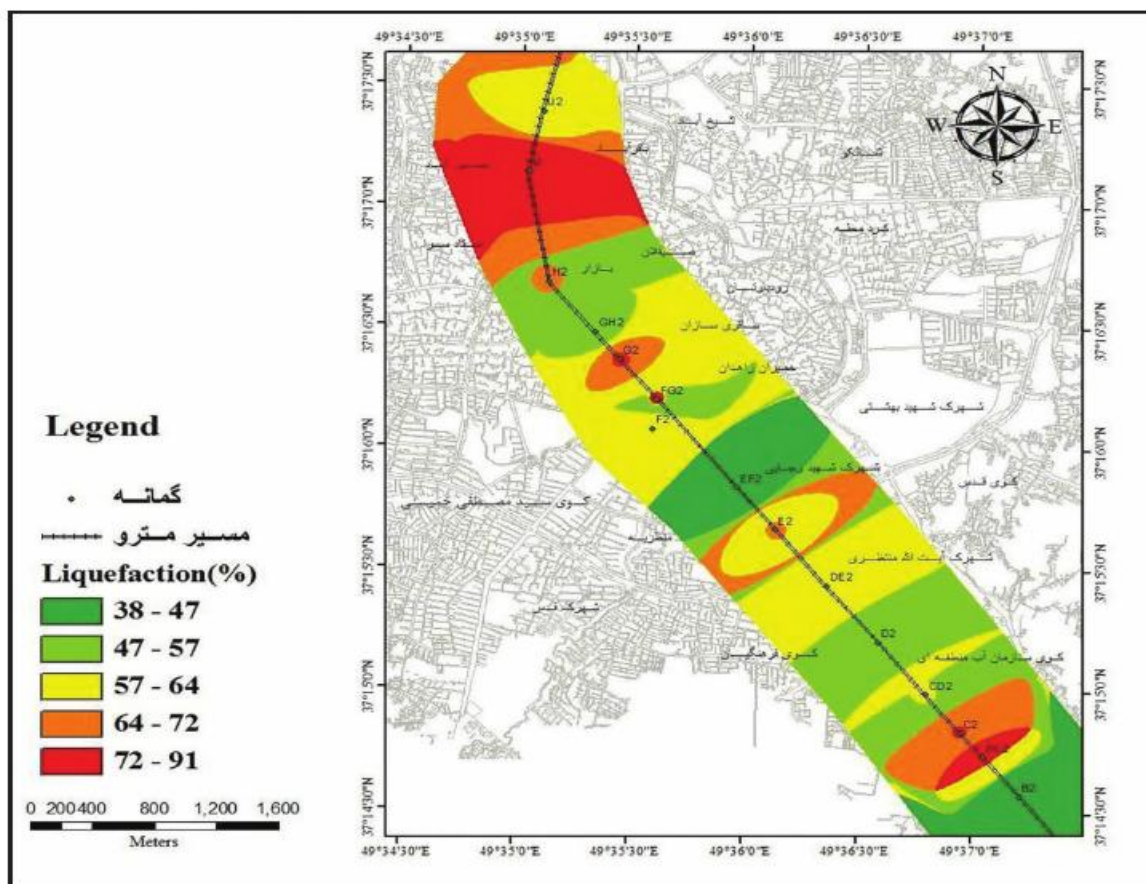
د. نقشه تغییرات شاخص خمیری (PI)

ه. نقشه میزان پیشینه شتاب لرزه ای (PGA)

شکل ۵- نقشه لایه‌های اطلاعاتی مورد استفاده در تهیه نقشه پهنه‌بندی.



شکل ۶- ساختار تحلیل سلسله مراتبی فازی تعریف شده برای ارزیابی خطر روانگرایی مسیر خط ۲ متروی رشت.



شکل ۷- نقشه پهنه بندی خطر روانگرایی در مسیر خط ۲ متروی رشت.



جدول ۱- عوامل مؤثر در خطر روانگرایی مسیر خط ۲ مترو رشت.

توانایی روانگرایی	احتمال روانگرایی	عوامل تأثیرگذار				
		مقدار PGA (g)	عدد SPT	شاخص خمیری	ژرفا از سطح (m)	نوع خاک
خیلی کم	0% - 20%	کمتر از ۰/۱	بیش از ۵۰	بیش از ۲۵	بیش از ۴۰	CL
کم	20% - 40%	1/0 - 15/0	40 - 50	20 - 25	30 - 40	ML
متوسط	40% - 60%	15/0 - 2/0	30 - 40	15 - 20	20 - 30	SC-GC
زیاد	60% - 80%	2/0 - 25/0	20 - 30	10 - 15	10 - 20	SM
خیلی زیاد	80% - 100%	بیش از ۰/۲۵	0 - 20	0 - 10	0 - 10	SP

جدول ۲- ماتریس مقایسه زوجی عوامل تأثیرگذار بر پایه اعداد واقعی.

مقدار PGA	ژرفا از سطح	شاخص PI	نوع خاک	عدد SPT	
1	2	1	5/0	1	عدد SPT
2	4	2	1	2	نوع خاک
1	2	1	5/0	1	شاخص PI
5/0	1	5/0	25/0	5/0	ژرفا از سطح
1	2	1	5/0	1	مقدار PGA

جدول ۳- ماتریس مقایسه زوجی عوامل تأثیرگذار بر پایه اعداد فازی.

مقدار PGA			ژرفا از سطح			شاخص PI			نوع خاک			عدد SPT			
U	M	L	U	M	L	U	M	L	U	M	L	U	M	L	
1	1	1	3	2	1	1	1	1	1	5/0	33/0	1	1	1	عدد SPT
3	2	1	5	4	3	3	2	1	1	1	1	3	2	1	نوع خاک
1	1	1	3	2	1	1	1	1	1	5/0	33/0	1	1	1	شاخص PI
1	5/0	33/0	1	1	1	1	5/0	33/0	33/0	25/0	2/0	1	5/0	33/0	ژرفا از سطح
1	1	1	3	2	1	1	1	1	1	5/0	33/0	1	1	1	مقدار PGA

جدول ۴- مقدار M برای هر عامل در محاسبه فازی.

مقدار PGA	ژرفا از سطح	شاخص PI	نوع خاک	عدد SPT	
7 - 5/5 - 3/4	3/4 - 7/2 - 2/2	7 - 5/5 - 3/4	15 - 11 - 7	7 - 5/5 - 3/4	مقدار M

جدول ۵- مقدار عدد مثلثی فازی S<sub>k</sub> برای عوامل مختلف بر پایه محاسبه فازی.

مقدار PGA	ژرفا از سطح	شاخص PI	نوع خاک	عدد SPT	
16/0 09/0 - 05/0	11/0 06/0 - 03/0	06/0 04/0 - 02/0	06/0 04/0 - 02/0	04/0 02/0 - 01/0	مقدار S <sub>k</sub>

جدول ۶- ماتریس مقایسه زوجی عوامل تأثیرگذار برای تعیین درجه بزرگی (V).

مقدار PGA	ژرفا از سطح	شاخص PI	نوع خاک	عدد SPT	
1	1	1	77/0		عدد SPT
1	1	1		1	نوع خاک
1	1		77/0	1	شاخص PI
8/0		8/0	63/0	8/0	ژرفا از سطح
	1	1	77/0	1	مقدار PGA

جدول ۷- ضراب وزنی عوامل تأثیر گذار برای تهیه نقشه پهنه‌بندی.

مقدار PGA	ژرفا از سطح	شاخص PI	نوع خاک	عدد SPI	ضریب وزنی
22805/0	00127/0	22805/0	31458/0	22805/0	ضریب وزنی
2	3	2	1	2	امتیازدهی

## کتابکاری

- آفانیانی، س. ع.، ۱۳۸۵- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۶۴ ص.
- انختارزاد، ج.، ۱۳۵۹- تشکیل بخش‌های مختلف ایران از نظر وضع ساختمانی در ارتباط با حوضه‌های رسوبی، نشریه انجمن نفت، شماره ۸۲، صص. ۱۹ تا ۲۸.
- حائری، م.، ۱۳۶۹- مطالعه مقدماتی پدیده روانگرایی در منطقه گیلان بر اثر زلزله ۳۱ خرداد ۱۳۶۹ منجیل- رودبار، مؤسسه زلزله‌شناسی، ۷۵ ص.
- حجتی، م.، ارومیه‌ای، ع. و قنبری، ع.، ۱۳۹۳- تحلیل خطر زلزله با نگرشی بر پروژه‌های مترو ریلی (مطالعه موردی خط ۲ متروی تبریز)، پنجمین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.
- حیاتی، م.، ارومیه‌ای، ع. و قنبری، ع.، ۱۳۹۲- بررسی ناپایداری تونل خط یک قطار شهری اهواز با کمک نرم افزار Arc-GIS و مدل حساسیت نسبی، چهارمین کنفرانس ملی زلزله و سازه، جهاد دانشگاهی استان کرمان، صص. ۱۲۸ تا ۱۳۶.
- حیدری شیبانی، ر. زارع، ش. میرزائی نصیرآباد، ح. و فروغی، م.، ۱۳۹۱- بررسی تأثیر فشار جبهه کار بر نشست سطح زمین در تونل سازی مکانیزه در زمین نرم- مطالعه موردی: تونل قطعه شرقی- غربی خط ۷ متروی تهران، نشریه مهندسی تونل و فضاها، زیرزمینی، دوره ۱، شماره ۱، صص. ۵۷ تا ۶۸.
- خجازی، ا.، خامه‌چیان، م. و اصغری، ا.، ۱۳۹۱- بررسی پدیده روانگرایی در رسوبات آبرفتی مسیر تونل متروی تبریز، دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، تهران، دانشگاه تربیت مدرس، صفحه ۵-۶۷.
- درویش‌زاده، ع.، ۱۳۷۰- زمین‌شناسی ایران. مؤسسه انتشارات امیرکبیر، تهران.
- سعیدی، م.، موسوی، م. و نژادشاه‌محمد، م.، ۱۳۹۲- ارزیابی سامانه نگهداری تونل خط متروی تهران در تقاطع غیر هم سطح با تونل توحید و تونل خط ۷ متروی تهران در برابر بارهای دینامیکی ناشی از زلزله، نشریه مهندسی تونل و فضاها، زیرزمینی، دوره ۲، شماره ۱، صص. ۱ تا ۱۱.
- شیرمرد، ح.، بحرودی، ع. و عادل، ا.، ۱۳۹۶- روش تحلیل سلسله مراتبی فازی در سامانه اطلاعات مکانی به منظور تعیین نقاط بهینه حفاری در کانسار میس پورفیری نیسان، فصلنامه اطلاعات جغرافیایی، دوره ۲۴، شماره ۹۳، صفحه ۹۱ تا ۱۰۰.
- تبادی، م. ح. و بابازاده، ر.، ۱۳۹۱- بررسی‌های زمین‌شناسی مهندسی در مسیر خط ۲ متروی تبریز به منظور ارزیابی نشست سطحی زمین، نشریه زمین‌شناسی مهندسی، دوره ۶، شماره ۲، صص. ۱۵۰۱ تا ۱۵۲۴.
- مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۳۹۳- آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش چهارم، نشریه شماره ۲۵۳- مجموعه استانداردها و آیین‌نامه‌های ساختمانی ایران، ۲۱۲ ص.
- نبوی، م. ح.، ۱۳۵۵- دیباچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۰۹ ص.

## References

- Alavi, M., 1996- Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran. *Journal of Geodynamics*, 21(1), pp. 1-33.
- Chou, H. S., Yang, C. Y., Hsieh, B. J. and Chang, S. S., 2001- A study of liquefaction related damages on shield tunnel, *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 16, issue (3), pp: 185-193.
- Coch, N. K., 1995- *Geohazards, Natural and Human*, Prentice Hall, New Jersey, 481 pages.
- Hamshehi, M., Nikoudel, M. R., Hafezi Moghaddas, N. and Khamehchiyan, M., 2014- Engineering geological conditions of Holocene sediments of Anzali area, South Caspian Sea, North Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, vol. 7, iss. 6, pp: 2339-2352.
- Hunt, R. E., 1984- *Geotechnical engineering investigation manual*, McGraw Hill Book Company, 983 pages.
- Jie, Y. U., 2014- Hazard of seismic liquefaction for metro tunnel structural engineering and countermeasures, *Journal of Railway Engineering Society*, vol. 31m issue (2), pp: 115-118, China.
- Moinfar, A. A., Naderzadeh, A. and Nabavi, M. H., 2012- New Iranian seismic hazard zoning map for new edition of seismic code and its comparison with neighbor countries, *Proceeding of 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, pp: 181-191.
- Mondal, S. and Maiti, R., 2014- Integrating the analytical hierarchy process (AHP) and the frequency ratio (FR) model in landslide susceptibility mapping of Shiv-Khola watershed, Darjeeling Himalaya, *International Journal of Disaster Risk Science*, vol. 4, issue 4, pp: 200-212.
- Moradi, M., Bazayr, M. H. and Mohammadi, Z., 2012- GIS-based landslide susceptibility mapping by AHP method, a case study, Denat City, Iran, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, vol. 2 issue 7, pp: 6715-6723.
- Saaty, T. L. and Vargas, I., 1991- *Prediction, projection and forecasting*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 251 pages.
- Samadi, L. and Mehrabi, B., 2009- Shallow subsurface geology and Vs characteristics of sedimentary units throughout Rasht City, Iran, *Annals of Geophysics*, vol. 52, no. 2, pp: 149-166.
- Stocklin, J., 1968- Structural history and tectonics of Iran, *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin* V. 52, No. 7, PP: 1229-1258.
- Talkhablou, M., Fatemi Agda, M., Motamedi, M. and Mehregan, Z., 2015- Evaluation of liquefaction potential in Bandar Imam Khomeini quaternary deposits, *Quaternary Journal of Iran*, vol. 1 no. 1.
- Unutmaz, B., 2014- liquefaction potential of soils around circular double tunnel, *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 14, issue 2, pp: 391-411.
- Wair, B. R., DeJong, J. and Shantz, T., 2012- *Guideline for estimation of shear wave velocity profiles*, PEERC Publication, University of California, Berkeley, 68 pages.
- Zare, M., 2012- Development of seismic hazard zoning map for Iran, based on new seismic source determination, *Proceeding of 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, pp: 232-241.

## Evaluation of liquefaction hazard along Line 2 of Rasht Metro by the use of AHP fuzzy method

A. Uromelky<sup>1\*</sup>, E. Sadat Razavi<sup>2</sup>, V. Baghr<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>M.Sc., Department of Geology, Islamic Azad University, North Tehran Branch, Tehran, Iran

<sup>3</sup>Ph.D., Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 2016 March 02

Accepted: 2016 October 09

### Abstract

Rasht City is capital of Gilan Province and is considered as one of the metropolitans along the south coast of the Caspian Sea. In terms of geological setting, the city is situated to the north of the Alborz Mountains and in the Gorgan-Rasht sedimentary zone. The area is characterized by many active faults, with the Khazar fault being regarded as the most effect one, which can produce a gravity acceleration of 0.3g for a major earthquake. According to geotechnical data from exploration boreholes, the ground surface along Line 2 of Metro in the city comprises mainly a sequence of silts and clays with interlayers of gravel and sand. Due to high level of groundwater table, abundance of fine-grained soils, high seismicity potential, and production of ground vibration during movement of the train, liquefaction can be expected to occur along the Metro line. The aim of this paper is therefore to evaluate the liquefaction hazard potential along the Line 2 of Metro of the Rasht City by preparing a hazard zonation map. Liquefaction hazard zonation mapping was carried out using data gathered from 14 exploration boreholes drilled to a depth down to 40 meters integrated into Analytical Hierarchy Process (AHP) in the GIS modelling system. In this regards, five layers of information including soil type, SPT number, overburden pressure, plastic index and maximum gravity acceleration were considered. The results indicate that the range of liquefaction hazard varies between low to very high, and the maximum rate of liquefaction is expected in BC2 and I2 stations (Sazeman-e-Ab and Husain Abad areas, respectively). Soil type and groundwater table are recognized to be the most effective agents in inducing potential liquefaction.

**Keywords:** Line 2 Metro of Rasht City, liquefaction potential, hazard zonation map, ArcGIS, AHPF method.

For Persian Version see pages 227 to 236

\*Corresponding author: A. Uromelky; E-mail: uromelky@modares.ac.ir