

ارزیابی پتانسیل روانگرایی شهر کرمان بر اساس آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)

عباس کنگی* و داود قطیعی^۲

(۱) دانشیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود، kangiabas@hotmail.com

(۲) کارشناس ارشد گروه زمین‌شناسی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شاهرود

(*) عهده‌دار مکاتبات

دریافت: ۹۰/۹/۱۰؛ دریافت اصلاح شده: ۹۱/۲/۱؛ پذیرش: ۹۱/۲/۴؛ قابل دسترس در تارنما: ۹۱/۳/۳۱

مکیده

شهر کویری کرمان، بر روی یک افق ماسه‌ای با منشأ بادی به ضخامت ۱۰ متر بنا شده است. در زیر این افق ماسه‌ای، خاک‌های رسی و سیلتی غیرقابل نفوذ قرار گرفته‌اند. در طی دو دهه اخیر، افزایش جمعیت شهر کرمان و استفاده از چاه‌های جذبی جهت دفع فاضلاب خانگی، باعث بالا آمدن سطح آب زیرزمینی شهری شده است. در بخش مرکزی شهر نیز سطح آب زیرزمینی به عمق ۳ متری رسیده است. این شرایط علاوه بر ایجاد مشکلات زیست محیطی باعث اشباع افق‌های ماسه بادی نیز شده است. این خاک‌های ماسه‌ای با عدد اسپی تی (SPT) پایین در شرایط اشباع دارای پتانسیل روانگرایی بالایی هستند. آنالیزهای انجام شده، بیانگر آن است که ضریب ایمنی حاصل از روانگرایی در بخش مرکزی شهر در شرایط بارگذاری لرزه‌ای کمتر از یک بوده و در نتیجه روانگرا خواهند شد. بنابراین، با در نظر گرفتن پتانسیل بالای لرزه خیزی شهر کرمان، این احتمال وجود دارد که در صورت وقوع زمین‌لرزه‌ای نیرومند، پدیده روانگرایی، خسارات بسیاری را به ساختمان‌ها و بناهای تاریخی شهر کرمان وارد نماید.

واژه‌های کلیدی: افق ماسه‌ای، چاه‌های جذبی، سطح آب زیرزمینی شهری، بارگذاری لرزه‌ای.

۱- مقدمه

دیگر را به همراه داشت. وقوع این پدیده، باعث افزایش توجه محققان به رفتار زهکشی نشده ماسه‌های اشباع در شرایط بارگذاری لرزه‌ای شد. بنابراین پدیده روانگرایی خاک به عنوان یکی از عوامل عمده در طراحی سازه‌های ساخته شده بر روی خاک‌های ماسه‌ای سست و اشباع در نظر گرفته شد. بنابراین روانگرایی خاک‌های دانه‌ای، اشباع و سست در طی زمین‌لرزه، یکی از خطرات اصلی در بسیاری از نقاط جهان محسوب می‌گردد. در طی وقوع زمین‌لرزه، روانگرایی خسارات مهمی را به سازه‌های مهندسی وارد می‌کند. این خسارات با تغییر شکل زمین، جوشش ماسه و نشست زمین همراه است (Zhang et al.

ترزاقی در سال ۱۹۲۵ برای نخستین بار اصطلاح روانگرایی را برای فروپاشی خاک‌های اشباع بکار برد، اما تا سال ۱۹۵۳ روانگرایی ناشی از بارگذاری لرزه‌ای به عنوان یک موضوع مهم مهندسی مورد توجه قرار نگرفت. پس از زمین‌لرزه سال ۱۹۴۸ توکیو، مورگان و کوبه (Mogami & Kubo 1953) برای نخستین بار روانگرایی خاک تحت تأثیر بارگذاری لرزه‌ای را مطرح نمودند. در زمین‌لرزه سال ۱۹۶۴ نیگاتای ژاپن، روانگرایی گسیختگی پی ساختمان‌ها، فروریختن پل‌ها، شنواری سازه‌های مدفون در خاک و بسیاری از تجهیزات ساخته شده

ارزیابی روانگرایی خاک با استفاده از SPT استفاده گردید.

۲- موقعیت زمین‌شناسی دشت کرمان

دشت کرمان در فرو رفتگی بین دو رشته کوه ماهان-کوهبنان در شرق و باداموئیه-داوران در غرب قرار گرفته است. بر اساس شواهد زمین ریخت‌شناسی، دشت کرمان در طول پلیستوسن همانند یک حوضه بسته دریافت‌کننده تمامی جریان‌های سیلابی حاصل از ارتفاعات مجاور بوده است. این شرایط سبب تشکیل دریاچه‌های فصلی در بخش‌های مختلف دشت در دوره‌ای بین یخچالی گردید (Farpoor & Krouse 2008). بنابراین نهشته‌های ناهمگن و ریزدانه دشت کرمان ماهیتی دوگانه دارند. این رسوبات حاصل تعامل دو فرایند رسوبگذاری سیلاب‌های رودخانه‌ای و نهشته‌های دریاچه‌ای می‌باشند. بنابراین رسوبات تشکیل‌دهنده دشت کرمان در بخش‌های کوهپایه‌ای درشت‌دانه و در بخش‌های مرکزی از ذرات ریزدانه درحد ماسه، سیلت و رس تشکیل شده است (Rahnama-Rad et al. 2010). بر اساس نتایج بدست آمده از مطالعات ژئوفیزیکی دشت کرمان (توسط سازمان آب انجام شده است)، ژرفای نهشته‌های آبرفتی دشت کرمان در حدود ۳۰۰ متر می‌باشد (کنگی و پورکرمانی ۱۳۹۰). آب و هوای خشک و نیمه‌خشک در منطقه مورد مطالعه، بعد از پایان یافتن دوره یخچالی ورم در ۱۲-۱۰ هزار سال پیش که بر انتهای پلیستوسن انطباق دارد، آغاز شده و تا به امروز ادامه دارد. دشت کرمان از شروع هولوسن به بعد شاهد رسوبگذاری مهم ناشی از فعالیت‌های سیلابی نبوده و تنها عامل قابل اشاره، فعالیت‌های بادی و رسوبگذاری بادی بوده است. در طی این دوره، ماسه‌های حمل شده توسط بادهای قوی در ریخت‌های متنوع، بسیاری از مناطق دشت کرمان را پوشانده است (Farpoor & Krouse 2008). این رسوبات بادی در ترانشه ضلع جنوبی میدان هفت باغ کرمان قابل مشاهده می‌باشند. در این بخش، تناوب لایه‌های ماسه بادی و لایه‌های آبرفتی نشان‌دهنده نوسان آب و هوایی می‌باشند. در این برش به طرف بالا به تدریج ضخامت لایه‌های آبرفتی کاهش و ضخامت لایه‌های ماسه بادی افزایش می‌یابد. اطلاعات حاصل از این برش و نتایج حاصل از گمانه‌های حفاری شده، بیانگر آن است که در محدوده شهر کرمان از سطح تا عمق ۱۰ متری اغلب رسوبات منشاء بادی دارند. در زیر این افق، ماسه بادی، خاک‌های رسی و سیلتی غیر قابل نفوذ با منشاء رودخانه‌ای-دریاچه‌ای قرار گرفته‌اند.

۳- لرزه‌خیزی

استان کرمان یکی از لرزه‌خیزترین استان‌های ایران بوده و در طول تاریخ همواره شاهد وقوع زمین‌لرزه‌های مخربی در این استان بوده‌ایم.

2002). هنگامی که نهشته‌های خاک در اثر حرکات لرزه‌ای به سرعت و به صورت دوسویه تحت برش قرار گیرند، فشار آب در داخل خلل و فرج خاک نیز افزایش می‌یابد. در خاک‌های غیر چسبنده اشباع سست، فشار آب منفذی به سرعت افزایش یافته و ممکن است این مقدار به حدی برسد که ذرات به صورت مجزا از یکدیگر معلق شوند و برای لحظاتی مقاومت و سختی خاک به طور کامل از بین برود. این پدیده در اصطلاح روانگرایی خاک نامیده می‌شود (Kramer & Elgamal 2001). روانگرا شدن خاک در حین وقوع زمین‌لرزه باعث از بین رفتن استحکام خاک خواهد شد. این عمل می‌تواند منجر به نشست سازه‌ها، وقوع زمین لغزش‌ها، تسریع گسیختگی‌های مربوط به سدهای خاکی یا بروز انواع دیگری از خطرها شود (Seed et al. 2003). روانگرایی معمولاً با افزایش آب منفذی، جوشش ماسه و حالت‌های مختلف تغییر شکل همراه است. اما این تغییر شکل‌ها، تنها زمانی که به اندازه‌ی کافی بزرگ بوده و به سازه‌ها آسیب برسانند، برای مهندسان معنی‌دار هستند (Yuan et al. 2010). به‌طور کلی تنها نهشته‌های اشباع یا نهشته‌هایی که قابلیت اشباع شدن با آب زیرزمینی را دارا باشند، به عنوان خاک‌های مستعد روانگرایی در نظر گرفته می‌شوند (Yuan et al. 2010). بنابراین اغلب در مناطق ساحلی به دلیل بالا بودن سطح آب زیرزمینی، پتانسیل روانگرایی مشاهده می‌شود. اما امروزه در شهرهای کویری، اشباع ماسه‌های بادی توسط فاضلاب‌های شهری، پتانسیل روانگرایی را ایجاد نموده که می‌توان در رویدادهای لرزه‌ای آینده شاهد آن بود. شهر کرمان نیز در طی سال‌های اخیر با چنین وضعیت بحرانی روبرو شده است. ارزیابی تغییر شکل‌های زمین ناشی از روانگرایی از طریق روش‌های عددی و روش‌های تحلیلی، مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و آزمایشی و روش‌هایی بر اساس آزمایش‌های صحرایی انجام می‌شود (Zhang et al. 2002). در سال‌های اخیر، روش‌های آزمایشگاهی و صحرایی متعددی جهت ارزیابی مقاومت روانگرایی خاک‌ها ارائه شده است. از جمله روش‌های ارزیابی صحرایی می‌توان به استفاده از آزمایش نفوذ استاندارد اس‌پی‌تی (Standard Penetration Test, SPT)، آزمایش نفوذ مخروط سی‌پی‌تی (Cone Penetration Test, CPT) و اندازه‌گیری سرعت موج برشی اشاره نمود. آزمایش نفوذ استاندارد SPT به عنوان روشی پایه برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی و نشست ناشی از آن در نظر گرفته می‌شود (Tokimatsu & Seed 1987).

در این پژوهش، از روش مقاومت نفوذ استاندارد جهت ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک‌های شهر کرمان، استفاده شد. در این راستا روش اصلاح شده سید و همکاران (Seed & Idriss 1971) و آیین‌نامه طراحی پل در بزرگراه‌های ژاپن (Seed et al. 1983) برای

وجود گسل‌های فعال از قبیل گسل‌های کوهبنان، گلبافت-سیرچ، گوک، شهادت، لاله‌زار و رفسنجان در کنار وقوع زمین‌لرزه‌های مخرب، نشان‌دهنده‌ی فعالیت بالای لرزه زمین‌ساختی در این استان می‌باشد (Walker et al. 2010). بررسی لرزه‌خیزی شهر کرمان از سال ۱۹۰۰ تاکنون، بیانگر وقوع ۹۲ زمین‌لرزه با بزرگی بیش از ۵ ریشتر می‌باشد. بزرگترین زمین‌لرزه، در ۲۸ ژولای سال ۱۹۸۱ در سیرچ و با بزرگی $MW=7/3$ ریشتر رخ داد (جدول ۱). این آمار بیانگر فعالیت‌های لرزه‌ای بالا در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات عمومی زمین‌لرزه‌های اصلی در منطقه مورد مطالعه.

منبع	تلفات و خسارات	مکان و بزرگی زمین‌لرزه	تاریخ رویداد
IIEES	خسارت شدید به بردسیر	بردسیر ($Ml=5.6$)	۳۱ ژولای ۲۰۱۰
Berberian 2005	۲۳ نفر کشته در زرنده، ۷ نفر کشته در کرمان و نفر کشته در راور	زرنده ($Mw=6.5$)	۲۲ فوریه ۲۰۰۵
Fielding et al. 2004, IIEES	خسارت شدید به فندقه و گوک	فندقه ($Mw=6.9$)	۱۴ مارس ۱۹۹۸
Berberian et al. 1984, IIEES	۱۳۰۰ نفر کشته و خسارت بسیار شدید به سیرچ و تخریب بخش‌هایی از شهر کرمان	سیرچ ($Mw=7.3$)	۲۸ ژولای ۱۹۸۱
IIEES	۱۰۷۱ نفر کشته و خسارت بسیار شدید به گلبافت	گلبافت ($Mw=6.6$)	۱۱ ژوئن ۱۹۸۱
Berberian et al. 1979, IIEES	۶۶۵ نفر کشته و خسارت شدید به زرنده	گیسک ($Mw=5.9$)	۱۹ سپتامبر ۱۹۷۷
Berberian et al. 2001, IIEES	خسارت به فندقه و گوک	گوک ($Ms=6$)	۵ ژولای ۱۹۴۸
IIEES	۲۰۰ نفر کشته و خسارت به سیرجان و بافت	لاله‌زار ($Mb=6.9$)	۲۲ سپتامبر ۱۹۲۳
Ambraseys & Melville 1982, Berberian 1995	خسارت به کرمان و روستاهای شمال کرمان	چترود (۸ مرکالی)	۱۷ ژانویه ۱۸۶۴
Ambraseys & Melville 1982, Berberian 1995	خسارت به شهر کرمان	هوجند (۸ مرکالی)	۱ نوامبر ۱۸۵۴

هر رویداد است). بدین منظور از روش پیشنهادی کیجکو و سلول (Kijko & Sellevoll 1992) که یکی از کامل‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری پارامترهای لرزه‌ای است استفاده شد.

برای محاسبه شتاب گرانش افقی قابل انتظار در شهر کرمان، محدوده‌ای به شعاع ۱۵۰ کیلومتر مورد بررسی قرار گرفت. در این محدوده کلیه سرچشمه‌های لرزه‌ای موجود اعم از پهنه‌ای (Area source) که با تجمع کانون زمین‌لرزه‌ها مشخص می‌گردد و سرچشمه-های خطی (Line source) که در پیوند با گسله‌های جنب‌اشیبی شده‌اند مورد آنالیز قرار گرفتند. حداکثر شتاب افقی زمین در محدوده شهر کرمان، از رابطه‌ی میرایی کمپبل و بزرگ‌نیا (Campbell & Bozorgnia 2003) محاسبه گردید.

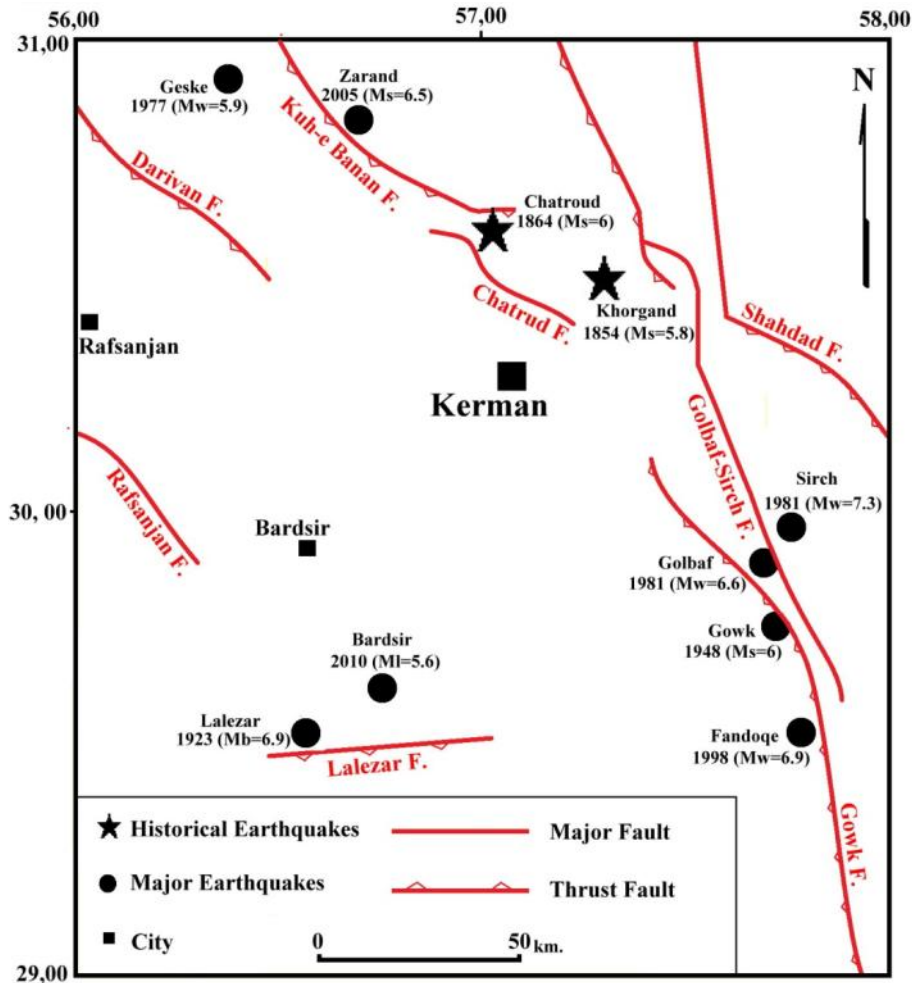
لازم به ذکر است که رابطه‌ی میرایی کمپبل بر اساس شتاب نگاشت‌های ثبت شده در شمال آمریکا و بعضی قسمت‌های جهان (از جمله زمین‌لرزه طبرس و منجیل در ایران) ارائه شده است. نتیجه‌ی حاصل از محاسبه احتمال خطر زمین‌لرزه در محدوده‌ی مورد مطالعه، با فرض عمر مفید ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ ساله ساختمان‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به جدول ۲، در طول عمر مفید ۵۰ ساله با احتمال رویداد ۶۴ درصد (زمین‌لرزه مبنای طرح، DBL) شتاب گرانش افقی برابر $g/21$ خواهد بود.

استان کرمان بخشی از واحد زمین‌ساختی ایران مرکزی می‌باشد، که در غرب بلوک لوت قرار دارد. واحدهای زمین‌ساختی ایران مرکزی و لوت توسط مجموعه گسل‌های فعال شمالی-جنوبی که عمدتاً امتدادلغز راستگرد می‌باشند، از یکدیگر جدا می‌شوند. سابقه فعالیت‌های بالای لرزه‌خیزی این مجموعه گسل‌ها و شواهد سطحی متعددی که بر سطح زمین بر جای گذارده‌اند، دلالت بر پیچیدگی ساختارهای زمین‌ساختی در این محدوده دارد. سیستم لرزه‌ای-تکتونیکی حاکم بر این گسل‌ها نشان‌دهنده‌ی بارگذاری متناوب بر روی آن‌ها می‌باشد. به عبارت دیگر چرخش خلاف عقربه‌های ساعت در بلوک لوت با جابجایی راست لغز گسل‌ها در حاشیه غربی بلوک لوت همراهی می‌گردد (Berberian 2005). بررسی رویدادهای لرزه‌ای قرن اخیر، نشان داد که در این منطقه ابتدا گسل کوهبنان، سپس گسل گلبافت-سیرچ و در نهایت گسل گوک به لرزه در می‌آیند (تصویر ۱). به نظر می‌رسد این فرایند به‌طور متناوب در حال تکرار است و رویدادهای لرزه‌ای بزرگی را به همراه خواهد داشت.

۱-۳- ارزیابی پارامترهای لرزه‌خیزی

در این تحقیق برای محاسبه‌ی احتمال وقوع و خطر سالانه زمین‌لرزه، از مدل تصادفی استوکاستیک (Stochastic model) با توزیع بواسون (Poisson process) استفاده شده (منظور مستقل بودن



تصویر ۱- موقعیت گسل‌های اصلی و رویدادهای مهم لرزه‌ای منطقه مورد مطالعه، (Berberian 2005, Ambraseys & Melville 1982)

جدول ۲- بیشینه شتاب گرانش افقی زمین در محدوده‌ی شهر کرمان به روش محاسبه احتمالات (بر حسب g).

با ۱۰٪ احتمال رویداد بیشینه زمین‌لرزه ممکن (MDL)			با ۶۴٪ احتمال رویداد (DBL) زمین‌لرزه مبنای طرح			دوره زمانی مورد ارزیابی
سال ۱۰۰	سال ۵۰	سال ۲۵	سال ۱۰۰	سال ۵۰	سال ۲۵	
۰/۳۶	۰/۳۲	۰/۲۷	۰/۲۴	۰/۲۱	۰/۱۷	بیشینه شتاب گرانش افقی

در این نمودار مقدار پارامتر $(N_1)_{60}$ تابعی از تنش موثر، نوع چکش دستگاه، طول میله و قطر گمانه و نمونه گیر است و از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$\text{رابطه (۱)} \quad (N_1)_{60} = N \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_S \cdot C_R \cdot C_B$$

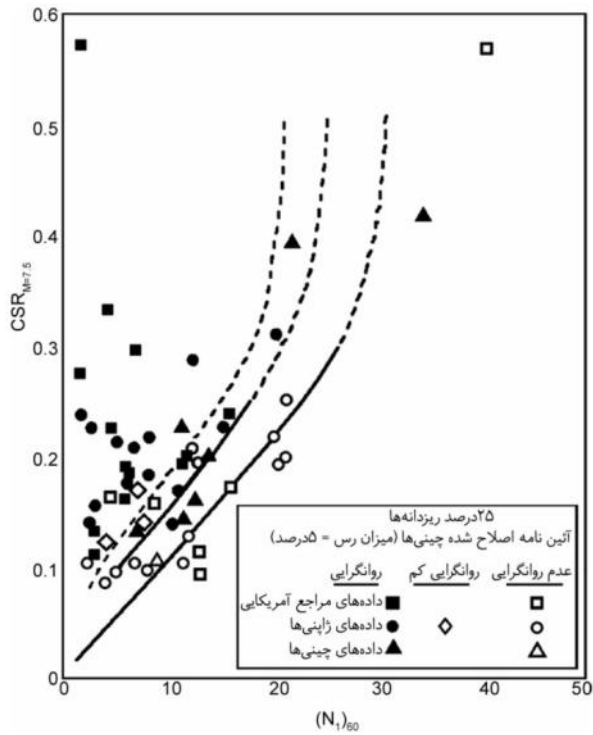
در این رابطه $N=SPT$ تعداد ضریبات، C_N ضریب اصلاح برای فشار سربار، C_E ضریب اصلاح انرژی چکش، C_S ضریب اصلاح نمونه‌گیر، C_B ضریب اصلاح قطر گمانه و C_R ضریب اصلاح طول میله می‌باشد. مقدار ضریب اصلاح فشار سربار از رابطه ۲ بدست می‌آید.

$$\text{رابطه (۲)} \quad C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma_v}\right)^{0.5} \quad P_a = 100 \text{ kpa}$$

مقدار ضرایب دیگر بر اساس جدول ۳ بدست می‌آید.

۴- پتانسیل روانگرایی با استفاده از روش مقاومت نفوذ استاندارد (SPT)

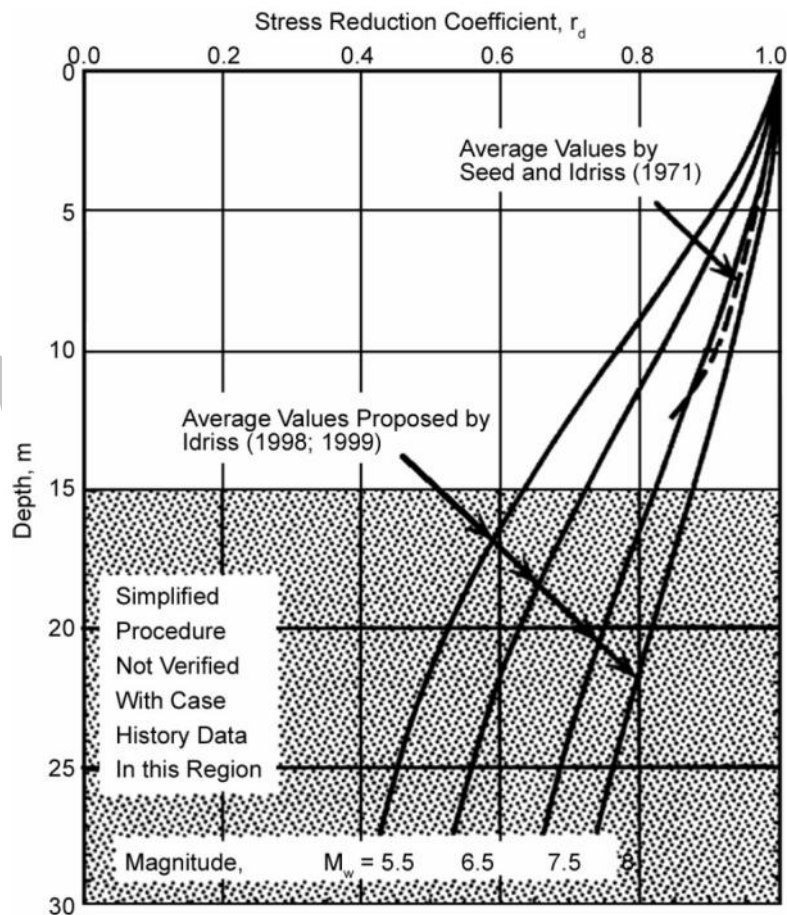
در ارزیابی پتانسیل روانگرایی خاک‌های ماسه‌ای با استفاده از نتایج آزمایش SPT، ابتدا مقدار نسبت مقاومت برشی تناوبی توده خاک (Cyclic Resistance Ratio, CRR) بر اساس نتایج آزمایش SPT پس از اعمال ضرایب اصلاحی (جدول ۳) و با استفاده از نمودار تصویر ۲ که توسط سید و همکاران (Seed et al. 1983) ارائه شده بدست می‌آید. بدین منظور بزرگی زمین‌لرزه برابر ۷ ریشتر فرض شده است. نسبت مقاومت برشی تناوبی توده خاک (Cool Running Rotor, CRR) در روش سید و همکاران (Seed et al. 1983) با استفاده از تصویر ۳ بدست می‌آید.



تصویر ۲- نمودار تخمین مقاومت برشی تناوبی خاک در روش SPT (Andrus 1994)

جدول ۳- ضرایب اصلاح عدد SPT (Andrus 1994)

عامل	مشخصات تجهیزات	عبارت	ضریب تصحیح
فشار سربار		C_N	(p_0/σ'_v) $C_N \leq 2$
نسبت انرژی	چکش دونات	C_E	۰/۵-۱
	چکش safety		۱/۲-۱/۲
	چکش دونات از نوع اتوماتیک		۰/۸-۱/۳
قطر گمانه	۶۵ تا ۱۱۵ میلی‌متر	C_B	۱
	۱۵۰ میلی‌متر		۱/۰۵
	۲۰۰ میلی‌متر		۱/۱۵
طول میله	۳ الی ۴ متر	C_R	۰/۷۵
	۴ الی ۶ متر		۰/۸۵
	۶ الی ۱۰ متر		۰/۹۵
	۱۰ الی ۳۰ متر		۱
	بیش از ۳۰ متر		< ۱
روش نمونه‌گیری	نمونه‌گیری استاندارد	C_S	۱
نمونه‌گیر بدون پوشش	نمونه‌گیری بدون پوشش		۱/۱-۱/۳



تصویر ۳- روش ارزیابی مقدار ضریب کاهش تنش (Seed et al. 2003)

بارندگی غیر قابل کنترل می‌گردد. بنابراین به نظر می‌رسد خطرات بالقوه‌ی بالا آمدن آب‌های زیرسطحی محدود به بافت قدیم شهر کرمان نیست و اثر آب‌های زیرسطحی بر ساختمان‌هایی نظیر بانک صادرات برج (بلوار جمهوری) و پارکینگ و زیرزمین برخی ساختمان‌ها در خیابان‌های امام جمعه، هزار و یکشب و الغدیر رسیده است. بنابراین تنها راه جمع‌آوری این آب‌ها استفاده از سیستم فاضلاب شهری می‌باشد.

۴- نتایج تست نفوذ استاندارد در خاک‌های شهر کرمان

به منظور برآورد پتانسیل روانگرایی شهر کرمان، اطلاعات ژئوتکنیکی ۵۹ گمانه و چاهک دستی حفاری شده در نواحی مختلف شهر و اطلاعات ترانسه‌های حاصل از گود برداری پی ساختمان‌های در حال ساخت جمع‌آوری و مورد استفاده قرار گرفت. در ابتدا، برای انجام آنالیز روانگرایی، با توجه به عمق آب زیرزمینی، نوع خاک و شرایط انجام آزمایش‌ها، ۱۵ گمانه، چاهک و ترانسه‌های محدوده بلوار جمهوری اسلامی (غرب شهر) انتخاب شدند. بررسی گمانه‌ها و ترانسه‌ها نشان داد که نهشته‌های زیر شهر کرمان را می‌توان به دو بخش اصلی تقسیم نمود. از سطح زمین تا عمق ۱۰ متری خاک‌های ماسه‌ای با منشاء بادی و از عمق ۱۰ تا ۲۰ متری رسوبات رسی و سیلتی با منشاء سیلابی و دریاچه‌ای قرار دارند. بر اساس نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)، خاک‌های ماسه‌ای با منشاء بادی عدد اس‌پی‌تی (SPT) پایینی دارند. در اغلب موارد عدد اس‌پی‌تی (SPT) در این افق‌های ماسه‌ای بین ۸ تا ۱۰ ضربه برای ۳۰ سانتیمتر نفوذ ثبت شده است (تصویر ۶). پایین بودن عدد اس‌پی‌تی (SPT) و اشباع شدن این افق ماسه‌ای توسط فاضلاب شهری، باعث افزایش پتانسیل روانگرایی در بخش‌های مرکزی شهر کرمان شده است. رسوبات اعماق ۱۰ تا ۲۰ متری شامل تناوبی از رس و سیلت می‌باشند، که دارای منشاء سیلابی و احتمالاً دریاچه‌های فصلی هستند. این رسوبات غیر قابل نفوذ دارای عدد اس‌پی‌تی (SPT) بالا بین ۲۰ تا ۲۵ بوده و فاقد پتانسیل روانگرایی می‌باشند (تصویر ۶).

۴-۱- بحث

محاسبه پتانسیل روانگرایی در سطح شهر کرمان توسط نرم افزار Liquefy4 انجام شد. این نرم افزار توانایی محاسبه نسبت تنش دوره‌ای (در شرایط بارگذاری لرزه ای، CSR) و نسبت مقاومت دوره‌ای خاک (CRR) را بر اساس داده‌های حاصل از تست‌های صحرائی SPT یا CPT دارد. در نهایت نتایج حاصل از تقسیم CRR

در مرحله دوم، ارزیابی پتانسیل روانگرایی، تعیین نسبت تنش برشی تناوبی توده خاک (CSR)، ایجاد شده توسط زلزله در عمق مورد مطالعه، با استفاده از رابطه سید و ادریس (Seed & Idriss 1971) محاسبه می‌گردد.

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma_v} = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \right) \times \Gamma_d \quad (3)$$

تنش برشی متوسط ایجاد شده بر اثر وقوع زمین‌لرزه در عمق مورد مطالعه τ_{av}

تنش کل در عمق مورد مطالعه σ_v

تنش موثر در عمق مورد مطالعه σ_v'

شتاب ثقل زمین g

ضریب کاهش تنش Γ_d

مقدار ضریب کاهش تنش بر اساس نمودار تصویر ۳ بدست می‌آید (Sykora 1987). مقدار ضریب اطمینان در مقابل روانگرایی با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

$$FS = CRR_j / CSR \quad (4)$$

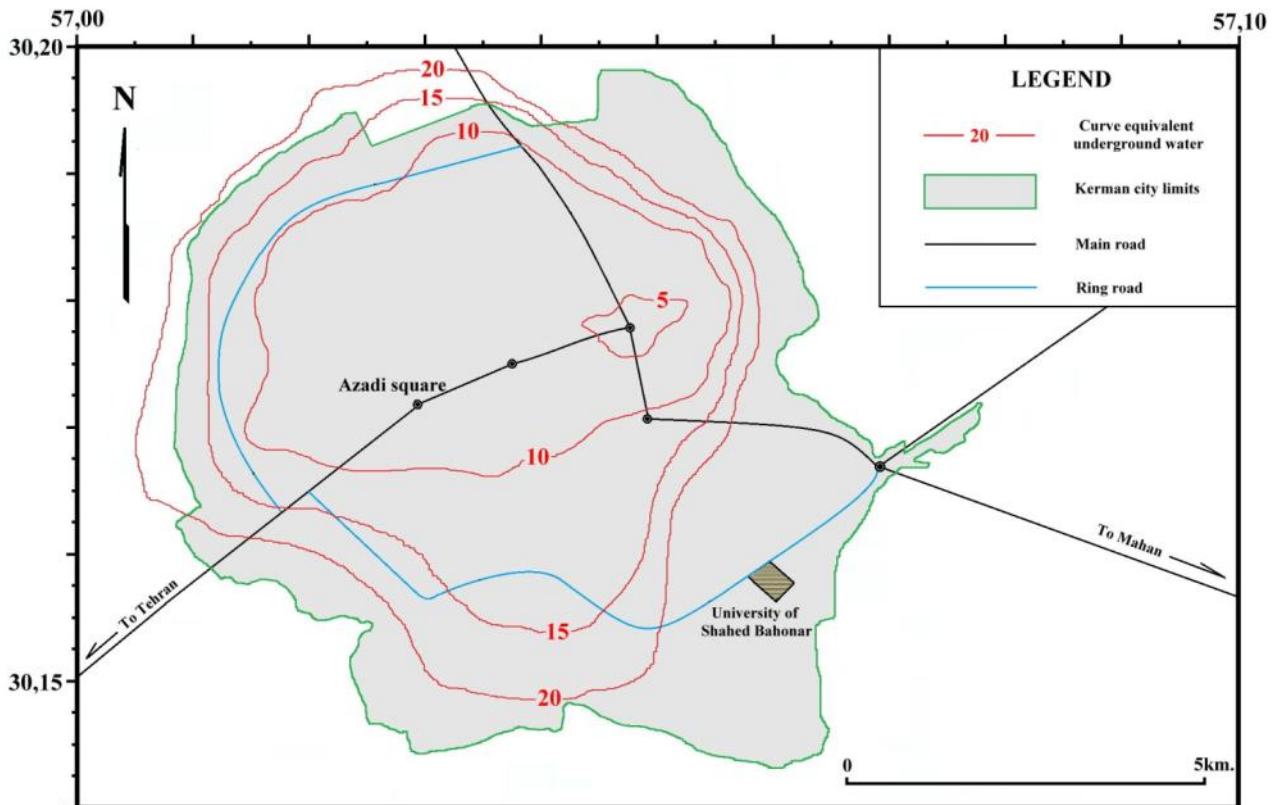
ضریب اطمینان کمتر از یک نشان‌دهنده احتمال وقوع روانگرایی در عمق مورد بررسی می‌باشد.

۵- بالا آمدگی آب زیرزمینی شهر کرمان

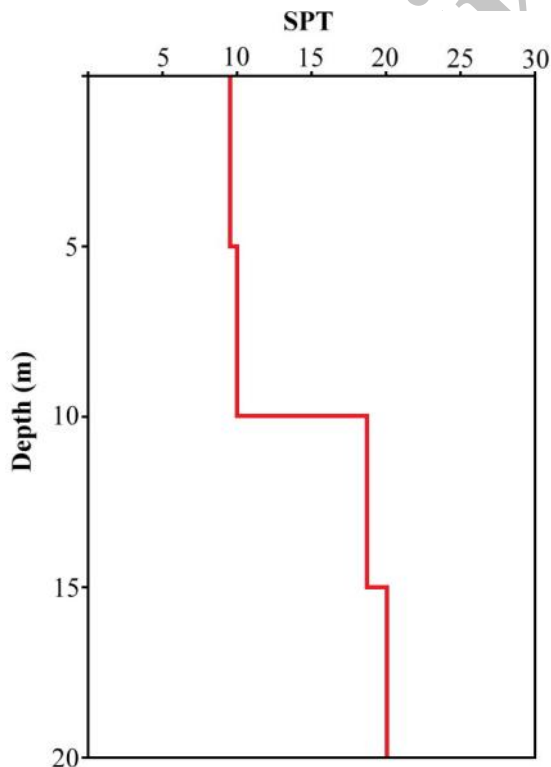
شهر کرمان بر روی نهشته‌های ریزدانه‌ی رسی-سیلتی با نفوذپذیری کم واقع شده است. ضخامت این نهشته‌ها به چند صد متر می‌رسد. در نیمه اول قرن بیستم، وسعت شهر کرمان ۱۵ تا ۱۰ درصد امروزی بوده و آب مورد نیاز ساکنان شهر از قنات‌ها و چاه‌های خانگی تأمین می‌شده است. فاضلاب شهری نیز به صورت سنتی از طریق چاه‌های جذبی به سفره‌ی آب زیرزمینی منتقل می‌گردید. افزایش جمعیت، توسعه‌ی شهر و صنایع، باعث تولید فاضلاب بیشتری خواهد شد. بنابراین میزان ورودی فاضلاب به زمین بیشتر از توان نفوذپذیری خاک بوده و در نتیجه سطح آب زیرزمینی شهری بالا خواهد آمد. طی دو دهه اخیر، بالا آمدگی سطح آب زیرزمینی و عدم وجود سیستم جمع‌آوری آن، در شهر کرمان شرایط بحرانی را ایجاد نموده است. به علت بالا آمدگی آب زیرزمینی شهر کرمان، در محدوده بافت قدیمی شهر عمق آب به ۳ متر رسیده است. در مناطق حاشیه‌ای شهر نیز عمق آب زیرزمینی بین ۱۰ تا ۲۰ متر متغیر می‌باشد (تصویر ۴).

بالا آمدگی سطح آب زیرزمینی شهری، ۸۰ درصد بناهای تاریخی کرمان از جمله حمام باغ لاله (واقع در خیابان سبز قبا) (تصویر ۵)، مسجد جامع و همچنین برج بانک صادرات را در شرایط نامناسبی قرار داده است. اگرچه پمپاژ مداوم آب در اطراف مسجد جامع کرمان سطح آب زیرزمینی را به صورت موقت پایین آورده، اما در زمان

بر روی CRS فاکتور ایمنی F.S. و میزان نشست سطح زمین در شرایط روانگرایی، به صورت نمودار ارائه گردید (تصویر ۷).



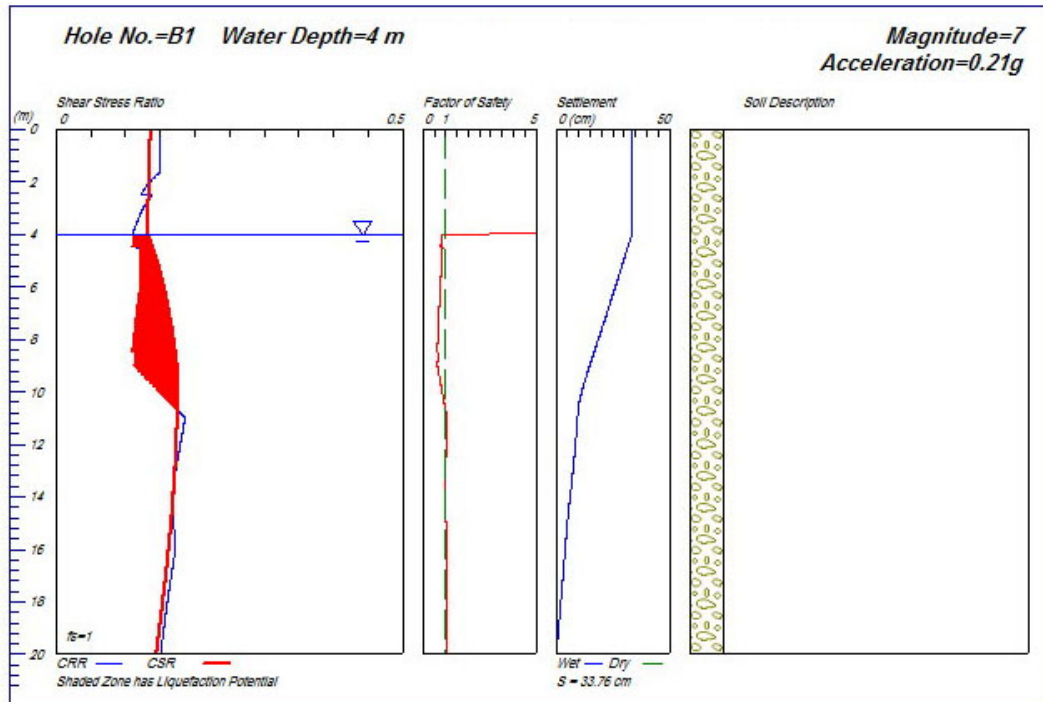
تصویر ۴- نقشه هم تراز سطح آب زیرزمینی در شهر کرمان



تصویر ۶- نتایج آزمایش نفوذ استاندارد SPT در گمانه B1 در ضلع جنوب شرق میدان مشتاق



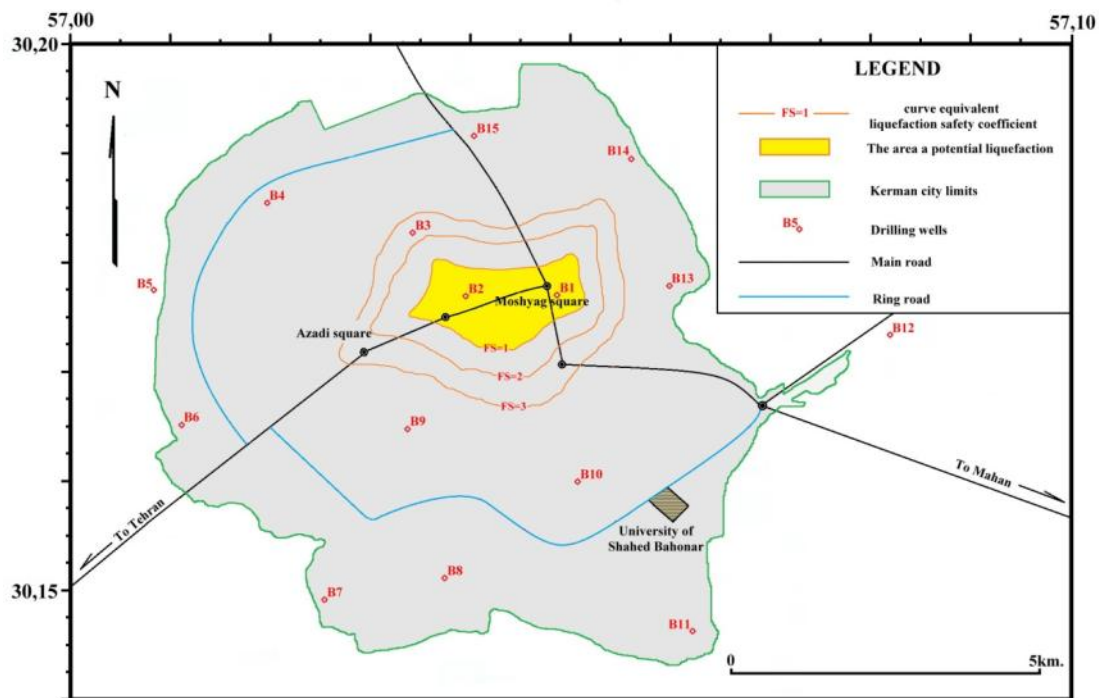
تصویر ۵- بالا آمدگی آب زیرزمینی شهری در حمام له له کرمان



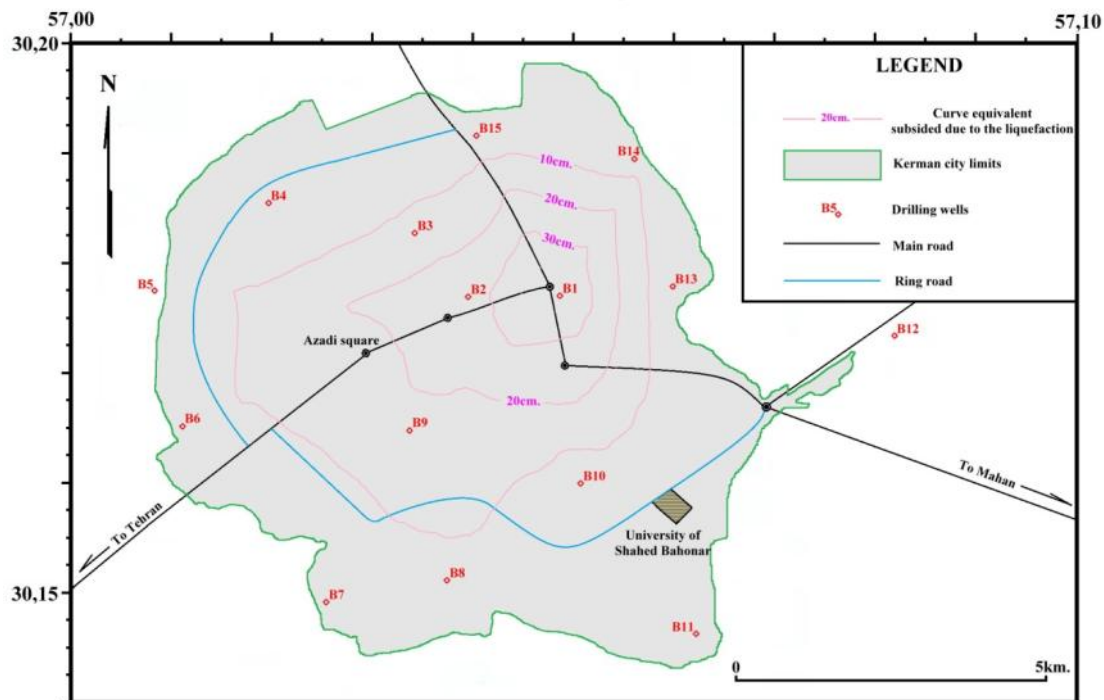
تصویر ۷- نمودار پتانسیل روانگرایی در گمانه B₁ واقع در ضلع جنوب شرق میدان مشتان (شهر کرمان)

بر اساس نتایج آنالیزهای انجام شده، پایینترین ضریب ایمنی F.S. حاصل از روانگرایی شهر کرمان در محدوده خیابان شریعتی بین میدان مشتاق تا باغ ملی می باشد. در این محدوده ضریب ایمنی خاک‌های ماسه‌ای اشباع در شرایط بارگذاری لرزه‌ای کمتر از یک و در نتیجه روانگرا خواهند شد (تصویر ۸). بنابراین رویداد زمین‌لرزه‌ای نیرومند

خسارات زیادی را به این بخش از شهر کرمان وارد خواهد نمود. چنین شرایطی نشست ناشی از روانگرایی در محدوده میدان مشتاق حدود ۳۰ سانتیمتر محاسبه شده، که تخریب سازه‌ها را به همراه دارد (تصویر ۹).



تصویر ۸- نقشه منحنی‌های هم تراز ضریب ایمنی روانگرایی در سطح شهر کرمان



تصویر ۹- نقشه منحنی‌های هم تراز نشست ناشی از روانگرایی در سطح شهر کرمان

۷- نتیجه‌گیری

پتانسیل بالای لرزه‌خیزی در استان کرمان و اشباع افق‌های ماسه بادی واقع در سطح تا عمق ۱۰ متری، احتمال رخداد روانگرایی را در سطح شهر افزایش داده است. وقوع زمین‌لرزه‌ای شدید، در محدوده میدان مشتاق، خسارات بسیاری را به ساختمان‌ها و بناهای تاریخی وارد خواهد نمود. بدون شک اجرای پروژه فاضلاب شهری، راهکاری نهایی برای برطرف نمودن مشکل شهر کرمان خواهد بود. این پروژه، به دلیل مشکلات اجرایی و مالی به کندی پیش می‌رود. در این شرایط شهرداری کرمان با حفر گالری‌های افقی در عمق ۱۰ تا ۱۲ متری و پمپاژ مداوم آب، راهکار موقتی و مناسبی را در پیش گرفته است. اما به دلیل ضریب هدایت هیدرولیکی پایین خاک‌های زیر شهر کرمان، این اقدامات کافی نبوده و افزایش این گالری‌ها در بخش‌های دارای پتانسیل روانگرایی ضروری می‌باشد.

تشکر و قدردانی

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود به دلیل حمایت مالی از انجام این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

مراجع

کنگی، ع. و پورکرمانی، م.، ۱۳۹۰، "نقش سیستم شکستگی‌ها در شرایط بارگذاری لرزه‌ای بر ناپایداری دیواره غربی معدن مس سرچشمه"، فصلنامه زمین‌شناسی کاربردی، سال ۷ (۱): ۷۶-۶۳.

Ambraseys, N. N. & Melville, C. P., 1982, "A history of Persian earthquakes", Cambridge University Press, Cambridge, 219 pp.

Andrus, R. D., 1994, "In Situ Characterization of Gravelly Soils that Liquefied in the 1983 Borah Peak Earthquake", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, 533 pp.

Berberian, M., Asudeh, I. & Arshadi, S., 1979, "Surface rupture and mechanism of the Bob-Tangol (southeastern Iran) earthquake of 19 December 1977", Earth and Planetary Science Letters, Vol. 42 (3): 456-462.

Berberian, M., Jackson, J., Ghorashi, M. & Kadjar, M. H., 1984, "Field and teleseismic observations of the 1981 Golbaf-Sirch earthquakes in SE Iran", Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, Vol. 77 (3): 809-838.

Berberian, M., 1995, "Natural hazards and the first earthquake catalogue of Iran", Historical Hazards in Iran Prior to 1900, Vol. 1, A UNESCO/IIEES Publication during UN/IDNDR, IIEES, Tehran, 649 pp.

Berberian, M., Jackson, J. A., Fielding, E., Parsons, B. E., Priestly, K., Qorashi, M., Talebian, M., Walker, R., Wright, T. J. & Baker, E., 2001, "The 1998 March 14 Fandoqa earthquake $M_w6.6$ in Kerman, southeast Iran: Re-rupture of the 1981 Sirch earthquake fault, triggering of slip on adjacent thrusts, and the active tectonics of the Gowk fault zone", Geophysics Journal Int., Vol. 146 (2): 371-398.

Berberian, M., 2005, "The 2003 Bam Urban Earthquake: A Predictable seismotectonic Pattern Along the Western

Soil Dynamics and Earthquake Engineering: 270–279.

Zhang, G., Robertson, P. K. & Brachman, R. W. L., 2002, "Estimating liquefaction-induced ground settlements from CPT for level ground", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 39: 1168–1180.

Walker, R.T., Talebian, M., Saiffiori, S., Sloan, R.A., Rasheedi, A., MacBean, N. & Ghassemi, A., 2010, "Active faulting, earthquakes, and restraining bend development near Kerman city in southeastern Iran", *Journal of Structural Geology*, Vol. 32 (8): 1046-1060.

Margin of the Rigid Lut Block, Southeast Iran", *Earthquake Spectra*, Vol. 21 (S1): S35–S99.

Campbell, K. W. & Bozorgnia, Y., 2003, "Updated near-source ground motion (attenuation) relations for the horizontal and vertical components of peak ground acceleration and acceleration response spectra", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 93: 314–331.

Fielding, E.J., Wright, T.J., Muller, J., Parsons, B.W., Walker, R., 2004, "Aseismic deformation of a fold-and-thrust belt imaged by synthetic aperture radar interferometry near Shahdad, southeast Iran", *Geology*, Vol. 32 (7): 577–580.

Farpoor, M. H. & Krouse, H. R., 2008, "Stable isotope geochemistry of sulfur bearing minerals and clay mineralogy of some soils and sediments in Loot Desert, central Iran", *Geoderma*, Vol. 146 (1-2): 283-290.

Kijko, A. & Sellevoll, M. A., 1992, "Estimation of earthquake Hazard parameters from incomplete data files. Part II, Incorporation of magnitude heterogeneity", *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 82: 120–134.

Kramer, S. L. & Elgamal, A. W., 2001, "Modeling soil liquefaction hazards for performance-based earthquake engineering", *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, 165 pp.

Mogami, T. & Kubo, K., 1953, "The behaviour of soil during vibration", *Proc. 3th Int. Conf., Soil Mech.*, Vol. 1: 152-153.

Rahnama-Rad, J., Firuzan, M. & Baraenejhad, M., 2010, "Soil collapsibility of Kerman city", *The First International Applied Geological Congress (IAGC)*, 26-28 Apr. 2010, Mashhad, Iran.

Seed, H. B. & Idriss, I. M., 1971, "Simplified procedure for evaluation soil liquefaction potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 97 (SM9): 1249–1273.

Seed, H. B., Idriss, I. M. & Arango, I., 1983, "Evaluation of liquefaction potential using field performance Data", *Journal of Geotech. Eng., ASCE*, Vol. 109 (3): 458-482.

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. & Faris, A., 2003, "Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework", *Technical Report No. EERC 2003-6, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley*, 72 pp.

Sykora, D. W., 1987, "Creation of a data base of seismic shear wave velocities for correlation analysis", *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station*, 114 pp.

Tokimatsu, K. & Seed, H. B., 1987, "Evaluation of settlements in sands due to earthquake shaking", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 113(8): 861–879.

Yuan X. M., Sun R, Chen L. and Tang F., 2010, "A method for detecting site liquefaction by seismic records",