



Semnan University

Journal of Transportation Infrastructure Engineering

Journal homepage: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

ISSN: 2821-0549



Research Article

Practical Effect of Increasing the Density of Construction Site Due to Pile Driving on Reducing Its Liquefaction Potential

Mohammad Taghi Mansouri Kia^a, Hamid Reza Sheybani^b, Elham Rajabi^b

^a PhD student, Department of Technology and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran and Manager of Dam and Power Plant Development Projects, K.W.P.A, Iran.

^b Assistant Professor, Department of Technology and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-12-29

Revised: 2025-02-16

Accepted: 2025-02-18

Keywords:

Reducing of liquefaction;
soil improvement;
prefabricated piles.

ABSTRACT

In this research, One method, based on the SPT test number, was used to evaluate liquefaction potential of the sand layers for river navigation at the Khorramshahr dam and shipping lock construction site. For fine-grained layers, another method have been used. For level 1 and level 2 earthquakes (with return periods of 75 and 475 years), the limit to ensure against the risk of liquefaction is assumed to be 1.5 and 1.1. For each pile, the number of blows to penetrate each meter of their length is calculated. Normaly, the compression caused by striking the first series of piles has increased the number of blows required to penetrate the second series of piles. The ratio of the increase in the number of blows necessary to penetrate each pile of the second series relative to the first series has been calculated. The obtained increase rate is assumed to be equal to the increase of SPT number. Calculations to determine the safety factor against liquefaction have been done again with new SPT numbers. Application of the proposed method shows reduction of the levels and depths of liquefaction caused by the density of layers due to penetration of the piles. In the example case (Mard dam and its ship), the relative increase of SPT number was nearly 20 percent. Therefore, the proposed method has reduced the liquefaction zones by 8%. In addition, in the areas that have been diagnosed as low liquefaction potential in the studies, but had a low confidence factor, a 9.5% increase in the confidence factor against liquefaction has also occurred. By increasing the SPT number, the proposed method can increase the accuracy of liquefaction calculations in the sites.

* Corresponding author.

E-mail address: kia551@yahoo.com

How to cite this article: Mansouri Kia, M. T. , Sheybani, H. R. and Rajabi, E. (2025). The practical effect of increasing the density of the construction site due to pile driving on reducing its liquefaction potential. *Journal of Transportation Infrastructure Engineering*, 11(1), 109-126. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.36354.1709>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Semnan University

مجله زیر ساخت های حمل و نقل

وبسایت نشریه: <https://jtie.semnan.ac.ir/?lang=en>

شاپا: 2821-0549



مقاله پژوهشی

تأثیر عملی افزایش تراکم بستر ساختگاه ناشی از کوبش شمع بر کاهش استعداد روان‌گرایی آن

محمد تقی منصوری کیا^{۱*}، حمیدرضا شیبانی^۲، الهام رجبی^۲

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران و مدیر طرح‌های توسعه سد و نیروگاه، سازمان آب و برق خوزستان، ایران.

^۲ استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۰۹ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۳۰ واژگان کلیدی: کاهش استعداد روان‌گرایی، اصلاح خاک، شمع‌های پیش‌ساخته.	در این تحقیق، از یک روش بر مبنای عدد SPT جهت ارزیابی استعداد روان‌گرایی لایه‌های ماسه‌ای محل ساختگاه پروژه سد و قفل کشتیرانی مارد خرمشهر برای حمل و نقل رودخانه‌ای استفاده شده است. برای ارزیابی استعداد روان‌گرایی بخش ریزدانه، روش دیگری به کار رفته است. برای زلزله‌های سطح ۱ و سطح ۲ (با دوره‌های بازگشت ۷۵ و ۴۷۵ سال)، حد مجاز برای ضریب اطمینان در برابر روان‌گرایی به ترتیب برابر ۱/۵ و ۱/۱ فرض شده است. تعداد ضربات منجر به کوبش هر یک متر از طول تمام شمع‌ها در ساختگاه محاسبه شده است. تراکم به وجود آمده ناشی از کوبش شمع‌های سری اول معمولاً سبب افزایش تعداد ضربات لازم برای کوبش شمع‌های سری دوم شده است. نسبت افزایش تعداد ضربات لازم برای کوبش شمع‌ها در دو حالت شمع‌های سری دوم نسبت به سری اول برابر نسبت افزایش عدد SPT فرض گردیده است. سپس، محاسبات تعیین ضریب اطمینان در برابر روان‌گرایی مجدداً با اعداد جدید SPT انجام شده است. به کارگیری روش مورد اشاره، کاهش سطوح و عمق‌های مستعد روان‌گرایی ناشی از تراکم لایه‌ها پس از کوبش شمع‌ها را نشان می‌دهد. در ساختگاه سد و قفل کشتیرانی مارد، افزایش نسبی عدد SPT نزدیک به ۲۰ درصد بوده است. لذا روش پیشنهادی سبب کاهش ۸ درصدی محدوده‌های مستعد روان‌گرایی شده است. ضمناً، در محدوده‌هایی که در مطالعات فاقد استعداد روان‌گرایی تشخیص داده ولی ضریب اطمینان کمی داشته‌اند نیز افزایش تقریباً ۹/۵ درصدی ضریب اطمینان در برابر روان‌گرایی رخ داده است. روش پیشنهادی با افزایش نسبی عدد SPT می‌تواند منجر به افزایش دقت محاسبات روان‌گرایی در ساختگاه‌ها گردد.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: kia551@yahoo.com

استناد به این مقاله: منصوری کیا، محمد تقی، شیبانی، حمید رضا و رجبی، الهام. (۱۴۰۴). تأثیر عملی افزایش تراکم بستر ساختگاه ناشی از کوبش شمع بر کاهش استعداد روان‌گرایی آن. مهندسی زیر ساخت های حمل و نقل، ۱۱(۱)، ۱۰۹-۱۲۶. <https://doi.org/10.22075/jtie.2025.36354.1709>

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱. مقدمه

یک سازه قفل کشتیرانی در رودخانه کارون در حال ساخت است (منصوری کیا و همکاران، ۲۰۲۴). مطالعات اولیه، روان‌گرایی در محل ساختگاه این سد را نشان داده است. روان‌گرایی خاک پدیده‌ای است که در آن توده خاک اشباع به دلیل ایجاد فشار اضافی آب منفذی و در نتیجه کاهش تنش مؤثر، به طور موقت استحکام خود را از دست می‌دهد. روان‌گرایی معمولاً در زمین‌های احیا شده مشاهده می‌شود (الگمال و همکاران، ۱۹۹۶) و زمانی اتفاق می‌افتد که زمین در اثر فعالیت‌های لرزه‌ای، لرزش شدیدی را تجربه می‌کند، که باعث می‌شود خاک‌های اشباع یا رسوبات با طبقه‌بندی ضعیف^۱ در نزدیکی سطح ضعیف‌تر شده و رفتاری مانند مایع از خود نشان دهند (فاتیما، ۲۰۲۳). روان‌گرایی خاک برای سازه‌هایی که در خاک شنی و خاک سیلتی ایجاد شده‌اند و در مناطق لرزه‌ای فعال واقع شده‌اند، یک خطر است (لی و همکاران، ۲۰۱۸). گسترش جانبی یک پیامد رایج روان‌گرایی خاک‌های پوسته‌ای با شیب ملایم یا خاک‌های مجاور سطوح آزاد است و ممکن است آسیب قابل توجهی به سازه‌های مجاور وارد کند. رسوبات اشباع شده و حساس به روان‌گرایی تحت تنش‌های برشی موجود و تحت تحریک لرزه‌ای تمایل به ایجاد جابجایی‌های جانبی بزرگ دارند (لی و همکاران، ۲۰۱۸). جابجایی‌های بزرگ زمینی ناشی از روان‌گرایی باعث آسیب شدید به بندر و تأسیسات بندر، پایه‌های پل و سازه و سایر زیرساخت‌ها شده است (لی و همکاران، ۲۰۱۸؛ ترنر و همکاران، ۲۰۱۶؛ کوبرینووسکی و رابینسون، ۲۰۱۶). رایج‌ترین آزمایش برای تشخیص روان‌گرایی خاک، آزمایش نفوذ استاندارد SPT است. آزمایش نفوذ استاندارد SPT در مدل‌های یک‌بعدی برای تخمین تغییرشکل ناشی از روان‌گرایی استفاده می‌شود، که تغییرشکل زمین را تنها در مکان‌های محدودی که SPT در آن انجام می‌شود ارائه

می‌کند (گوان و ونگ، ۲۰۲۲) روش‌های مقابله با روان‌گرایی در حالت کلی به کنترل زهکشی، متراکم‌سازی، تقویت‌کننده و تزریق دسته‌بندی می‌شوند و تمام این روش‌ها به طور مستقیم یا غیرمستقیم علل اولیه روان‌گرایی خاک را که تراکم‌پذیری خاک و نفوذپذیری آن است، دستکاری می‌کنند (ذکریا و جاکا، ۲۰۲۴). یکی از روش‌های رایج جهت حفاظت از سازه‌ها در برابر روان‌گرایی هنگام زلزله، استفاده از شمع‌های باربر می‌باشد (الگمال، ۲۰۰۵). شمع‌های کوبیده شده یکی از اقتصادی‌ترین راه‌حل‌ها برای افزایش تراکم خاک روان‌گرا است (فورد و پوپل، ۲۰۲۱). فرکانس غالب زلزله، سختی شمع، چگالی نسبی خاک و سختی نسبی شمع، می‌توانند به طور قابل توجهی بر پاسخ دینامیک شمع تأثیر بگذارند (سعیدی و همکاران، ۲۰۱۸). اثربخشی تقویت شمع برای کاهش تغییرشکل جریان زیاد در زمین روان‌گرا به طور قابل توجهی تحت تأثیر شرایط تعبیه شمع است (هوانگ، ۲۰۲۰). در تحقیقی توسط تاکور و روی (۲۰۲۴) و روی و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی روش‌های سنتی و مدرن برای حل مشکل روان‌گرایی پرداخته شد و به این نتیجه دست یافتند که روش‌هایی مبتنی بر اصول اصلاح سایت غیرفعال، اشباع جزئی القایی و ژئوتکنولوژی میکروبی می‌توانند مشکلات اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی مربوطه را تا حدودی حل کنند (ذکریا و جاکا، ۲۰۲۴). ادریس و بولانگر (۲۰۰۷) از برقراری ارتباط بین نتایج آزمایش‌های SPT و CPT برای تعیین روان‌گرایی بهره جستند. در تحقیقی، تاکاتا و همکاران (۲۰۲۴) به اصلاح خاک روان‌گرا با استفاده از دوغاب تراکمی پرداختند و اثر متقابل خاک روان‌گرای زمین ریزدانه را بررسی کردند. شیخ (۲۰۱۹) نشان داد که با دورتر شدن لایه روان‌گرا از سطح زمین، اضافه فشار آب حفره‌ای افزایش و مقدار نشست سطح زمین افزایش می‌یابد؛ ولی بعد از یک عمق معین، مقدار نشست فاقد تغییر بوده و در عوض مقدار

^۱ - Loosely packed sediments

ru افزایش می‌یابد و مقدار حداکثر شتاب‌نگاشت در سطح زمین کمتر می‌شود.

مل و همکاران (۲۰۲۴) به بحث و بررسی روش نوینی به نام اشباع جزئی القایی که وارد کردن حباب‌های گاز/ هوا به داخل آب منفذی خاک‌های شنی به منظور افزایش تراکم‌پذیری فاز سیال و سپس افزایش مقاومت در برابر روان‌گرایی است پرداختند و خوانندگان را تشویق به مطالعه بیشتر در این زمینه تحقیقاتی کردند. در تحقیقی توسط فدایی و حمیدی (۲۰۲۴) با تمرکز بر مدل‌سازی شمع‌های کوبشی در خاک‌های شنی کاملاً اشباع، این نتیجه حاصل گردید که حداکثر پتانسیل روان‌گرایی و نسبت فشار منفذی در یک سوم تا دو سوم طول شمع رخ می‌دهد. همچنین، بر اساس تحقیق ژان و همکاران (۲۰۲۴) در خاک شنی، کوبش شمع ارتعاشی^۱ با فرکانس بالا منجر به افزایش فشار آب منفذی و در نتیجه شبه‌روان‌گرایی خاک در فصل مشترک شمع-خاک می‌شود. با توجه به مشاهدات میدانی، افزایش فشار آب منفذی در خاک اطراف به نفوذ اصطکاکی نوک شمع و ارتعاش اصطکاکی شفت شمع نسبت داده می‌شود. اسپانیول-اسپینل (۲۰۲۳) با تمرکز بر تأثیر قطر تک‌پایل و تنش محدود بر ایجاد فشار حفره‌ای اضافی ناشی از زلزله در داخل پلاگین خاک با استفاده از تحلیل المان محدود به این نتیجه دست یافتند که فشار منفذی اضافی ناشی از زلزله در شاخه‌های خاک تحت تنش محدود تجمع کمتری دارد. بر اساس تحقیق خورشادی زاده و همکاران (۲۰۲۳) نتایج ابزار دقیق نشان می‌دهد که استفاده از شمع‌های محافظ پره‌دار با سطح مقطع مشابه با شمع‌های دایره‌ای عملکرد برتری را در اختلال در جریان خاک دارد و به طور قابل توجهی (حدود ۲۴ تا ۵۰ درصد) نیروی جانبی اعمال شده بر شمع‌های اصلی را کاهش می‌دهد. در تحقیق سینگ و غنی (۲۰۲۴) رویکرد جدید ابتکاری برای ارزیابی استعداد روان‌گرایی با ادغام

داده‌های آزمایش نفوذ مخروط دینامیک (DCPT) با فن-آوری پیشرفته یادگیری ماشین (که رایانه در آن به جای استفاده از دستورالعمل‌های واضح، از الگوها و استنباط به عنوان زیرمجموعه‌ای از هوش مصنوعی برای انجام وظایف استفاده می‌کند) ارائه دادند.

بر اساس پژوهش حسین و آلبوسودا (۲۰۲۲) علاوه بر بارهای عمودی شمع که در تحقیقات گذشته مورد توجه قرار گرفته‌اند، سایر ترکیب بارهای زلزله مانند بارهای محوری و جانبی نیز باید بیشتر مورد بررسی قرار گیرند. ردی و همکاران (۲۰۲۳) به اصلاح مقاومت‌های نفوذ استاندارد اصلاح شده و اصلاح نشده پرداختند و مشخص شد که تغییرات عدد SPT تأثیر قابل توجهی بر مقاومت در خاک روان‌گرا دارد.

۲. روش تحقیق

برای ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی خاک، از نتایج آزمایش نفوذ استاندارد (SPT) بر اساس استاندارد ASTM D1586/D1586M-18e1 استفاده می‌شود. این آزمایش از آزمایش‌های صحرایی بین‌المللی است که برای اهداف ژئوتکنیک اهمیت زیادی دارد. طبقه‌بندی خاک با آزمایش‌های متعارف صورت گرفته است. برای ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی نقاط مختلف زمین از روش سید و همکاران (۲۰۰۳) استفاده شد که برای ماسه‌های تمیز، ماسه‌های سیلتی با خواص خمیری کم و سیلت‌های غیرپلاستیک کاربرد دارد. بر اساس محاسبات انجام گرفته، نقاط با ضریب اطمینان کمتر از ۱ دارای پتانسیل روان‌گرایی هستند و باید اقدامات لازم جهت افزایش مقاومت خاک در برابر روان‌گرایی صورت گیرد. به این منظور، با افزایش عدد SPT به میزان تقریباً ۲۰٪ به اصلاح روان‌گرایی در نقاط مستعد به صورت محاسباتی پرداخته شد. در ادامه، چگونگی دسترسی به این عدد

^۱- Vibratory

توضیح داده شده است. در شرایط میدانی، یکی از روش‌های اصلاح ساختمان‌های مستعد روان‌گرایی، کوبش شمع می‌باشد. به منظور افزایش تراکم خاک در محیط روان‌گرا با استفاده از کوبش شمع، مقاومت زمین افزایش می‌یابد. به این منظور، به بررسی ظرفیت باربری شمع‌ها نیز پرداخته شد. در شکل ۱، جانمایی گمانه‌ها و محوطه بسته شده برای خشک‌اندازی محل قفل کشتیرانی مارد و نیز لایروب در حال عملیات مشاهده می‌شود.



شکل ۱. جانمایی تقریبی گمانه‌های ژئوتکنیک در رودخانه و سواحل کارون

در جدول ۱، دوره‌های بازگشت زلزله‌های طراحی و کنترلی و ضرایب اطمینان مرتبط برای جلوگیری از وقوع روان‌گرایی نشان داده شده است. شمع‌ها همگی ۱۲ و ۱۶ متری هستند. در همه شمع‌های تقویت شده یک آرماتور اضافی در هر ضلع شمع (مقاطع شمع‌ها مربعی است) وجود دارد. در همه گمانه‌ها استعداد روان‌گرایی برای محیط ریزدانه با استفاده از روش ونگ (۱۹۷۹)، روش اندروز و مارتین (۲۰۰۰) و روش سید و همکاران (۲۰۰۳) و در لایه‌های ماسه‌ای و سیلتی از روش بولتن سید و همکاران (۱۹۸۳) صورت گرفته است.

۲-۱. ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی خاک ریزدانه

۲-۱-۱. ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی خاک ریزدانه با معیار ونگ

با ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی بخش ریزدانه توسط معیار ونگ (۱۹۷۹) وجود همزمان سه شرط در خاک ریزدانه موجب مشکوک بودن آن خاک به روان‌گرایی می‌گردد: اول: مقدار رس (ذرات کوچکتر از ۰.۰۰۵ میلی‌متر) کمتر از ۱۵ درصد وزنی باشد. دوم: حد روانی کمتر از ۳۵ درصد باشد. سوم: مقدار رطوبت طبیعی بیشتر از ۰/۹ برابر حد روانی باشد.

۲-۱-۲. ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی خاک ریزدانه با معیار اندروز و مارتین (۲۰۰۰)

این روش (که اصلاح شده روش ونگ است) وجود همزمان سه شرط در خاک ریزدانه را موجب مستعد بودن آن خاک به روان‌گرایی می‌داند:

اول: خاک‌هایی با کمتر از ۱۰ درصد ریزدانه رسی (ذرات کوچکتر از ۰.۰۰۲ میلی‌متر) و حد روانی (حد روانی مربوط به بخش رد شده از الک نمره ۴۰) کمتر از ۳۲ درصد، مستعد روان‌گرایی‌اند.

دوم: خاک‌هایی با بیش از ۱۰ درصد ریزدانه رسی و حد روانی بیش از یا برابر ۳۲ درصد، مستعد وقوع روان‌گرایی ناشی از بارهای تناوبی نیستند.

سوم: برای ساختمان‌های بین این دو حالت، آزمایش روی نمونه‌ها لازم است.

۲-۱-۳. ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی خاک ریزدانه با معیار سید و همکاران (۲۰۰۳)

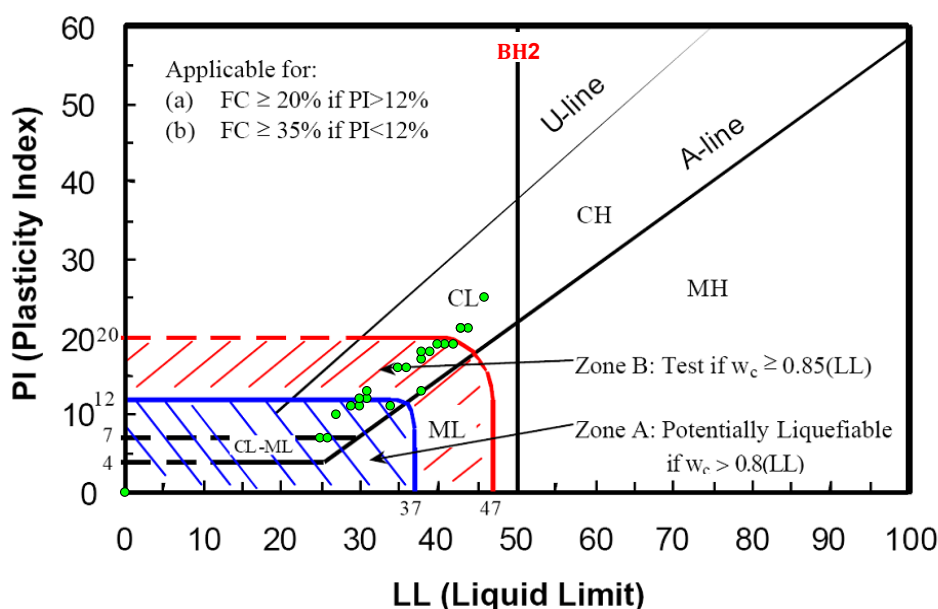
در این روش، یک شکل کاربردی (شبه شکل ۲) برای تشخیص سه ناحیه تعریف شده است. در این روش:

اول: اگر رطوبت طبیعی خاک‌های ناحیه A بیش از ۸۰ درصد حد روانی باشد مستعد روان‌گرایی هستند. دوم: اگر رطوبت طبیعی خاک‌های ناحیه B بزرگتر یا مساوی ۸۵ درصد حد روانی باشد، آزمایش‌های تکمیلی لازم است.

سوم: خاک‌هایی که در نواحی A و B نیستند (مشهور به ناحیه C) عمدتاً مستعد روان‌گرایی نمی‌باشند.

جدول ۱. اطلاعات زلزله طرح که از مطالعات تکتونیک و لرزه‌خیزی و ارائه طیف و شتابنگاشت‌های ویژه طیفی (ساحل امید ایرانیان و لار، ۲۰۲۴) به دست آمده است و ضرایب اطمینان در محاسبات برای جلوگیری از وقوع روان‌گرایی

نام زلزله	دوره بازگشت (سال)	بزرگای زلزله طرح (ریشتر)	بیشینه شتاب افقی در سطح زمین (g)	ضریب اطمینان برای جلوگیری از وقوع روان‌گرایی در طراحی
سطح ۱	۷۵	۵/۷	۰/۰۸۸	۱/۵
سطح ۲	۴۷۵	۶/۳	۰/۱۷۶	۱/۱



شکل ۲. نمودار ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی بر اساس معیار (سید و همکاران، ۲۰۰۳) برای گمانه BH2

۴-۱-۲. نتایج ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی خاک‌های

ریزدانه

برای سادگی محاسبات، ابتدا لایه‌های عمدتاً ماسه‌ای با قابلیت ذاتی روان‌گرایی در نظر گرفته شده‌اند. لیکن در همه گمانه‌ها سه معیار مورد اشاره برای خاک ریزدانه تحلیل شده و میانگین نتایج سه روش مبنای ارزیابی نهایی قرار گرفته است. برای مثال، در جدول ۲، به یک مورد از این گونه بررسی‌ها اشاره شده است.

در مثال ارائه شده، گمانه BH02 با معیار ونگ (۱۹۷۹) و نیز اندروز و مارتین (۲۰۰۰) هیچ نقطه‌ای دارای پتانسیل روان‌گرایی نیست. با این حال، بر اساس معیار دوم، بعضی از نقاط نیاز به آزمایش تکمیلی دارند. سید و همکاران (۲۰۰۳) دو نقطه پتانسیل روان‌گرایی دارند و در چند نقطه آزمایش تکمیلی لازم است. برای نقاطی که در محدوده بحرانی‌اند اما درصد رطوبت آنها مشخص نیست، اظهار نظر قطعی نیز مقدور نیست. البته از نگاه احتیاطی، همه نقاط نیازمند آزمایش تکمیلی و یا

تأثیر عملی افزایش تراکم بستر ساختگاه ناشی از کوبش شمع بر کاهش استعداد روان‌گرایی آن

با عدم امکان قضاوت قطعی، در ابتدا مستعد روان‌گرایی
فرض شده‌اند. پس در گمانه BH02، در ارتفاع‌های ۷/۵
تا ۱۰ متر (CD ۳/۸۷ - الی CD ۷/۳۷-)، ۱۴ تا ۱۵ متر
(CD ۱۱/۳۷ - الی CD ۱۲/۳۷-) و ۲۳ تا ۲۵ متر (CD ۲۰/۳۷ - الی CD ۲۲/۳۷-) پتانسیل روان‌گرایی وجود دارد.

جدول ۲. بررسی پتانسیل روان‌گرایی خاک ریزدانه در گمانه BH02 (ساحل امید ایرانیان و لار، ۲۰۲۴)

نوع خاک	عمق (m)	عمق CD (m)	LL	PI	درصد رس ذرات کمتر از ۰/۰۰۵ mm	درصد رس ذرات بزرگتر از ۰/۰۰۲ mm	استعداد روان‌گرایی			
							روش چینی	روش اندروز و مارتین	روش سید و همکاران	نتیجه‌گیری
رس	۲	۰/۶۳	۴۳	۲۱	۵۶	۳۹	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا
رس	۴	-۱/۳۷	۴۴	۲۱	۷۳	۵۱/۹	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا
رس	۶	-۳/۳۷	۴۳	۲۱	۶۷	۴۹/۶	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا
رس	۶/۷	-۴/۰۷	۳۱	۱۲	۳۷	۲۱/۹	غیرروان‌گرا	نیاز به تست	مستعد روان‌گرایی	مستعد روان‌گرایی
رس- لای	۹/۵	-۶/۸۷	۲۵	۷	۴۰	۳۰/۸	غیرروان‌گرا	نیاز به تست	فاقد کاربرد	مستعد روان‌گرایی
رس	۱۰/۶	-۷/۳۷	۴۱	۱۹	۶۰	۴۲/۵	غیرروان‌گرا	Non- Liq	نیاز به تست	غیرروان‌گرا
رس- لای	۱۳	-۱۰/۳۷	۲۶	۷	۳۰	۲۴/۷	غیرروان‌گرا	نیاز به تست	Non- Liq	غیرروان‌گرا
رس	۱۳/۵	-۱۰/۸۷	۲۷	۱۰	۳۸	۲۹/۵	غیرروان‌گرا	نیاز به تست	Non- Liq	غیرروان‌گرا
رس	۱۴	-۱۱/۳۷	۳۵	۱۶	۵۰	۳۸/۴	غیرروان‌گرا	Non- Liq	نیاز به تست	غیرروان‌گرا
رس	۱۴/۵	-۱۱/۸۷	۳۰	۱۱	۴۸	۳۴/۳	غیرروان‌گرا	نیاز به تست	فاقد کاربرد	مستعد روان‌گرایی
رس	۱۴/۸	-۱۲/۱۷	۲۹	۱۱	۶۴	۳۲/۸	غیرروان‌گرا	نیاز به تست	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا
رس	۱۵	-۱۲/۳۷	۳۹	۱۸	۶۵	۴۷/۳	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا
رس	۱۶/۴	-۱۳/۳۷	۴۰	۱۹	۷۰	۴۸/۹	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا
لای	۱۶/۷	-۱۴/۰۷	۳۸	۱۳	۷۲	۴۲/۵	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا
رس	۱۶	-۱۴/۳۷	۴۲	۱۹	۷۰	۴۲/۴	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا
رس	۱۷/۵	-۱۴/۸۷	۳۱	۱۳	۴۸	۳۴/۹	غیرروان‌گرا	نیاز به تست	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا
رس	۱۹/۴	-۱۶/۳۷	۳۴	۱۱	۳۰	۱۷/۳	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	فاقد کاربرد	غیرروان‌گرا
رس	۲۰/۵	-۱۷/۸۷	۳۰	۱۲	۴۹	۲۶/۸	غیرروان‌گرا	نیاز به تست	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا
رس	۲۱	-۱۸/۳۷	۳۶	۱۶	۶۵	۲۸/۶	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا
رس	۲۱/۵	-۱۸/۸۷	۳۸	۱۷	۶۷	۲۱/۷	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	فاقد کاربرد	غیرروان‌گرا
رس	۲۲/۳	-۱۹/۶۷	۴۶	۲۵	۷۵	۴۲/۱	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا
رس	۲۲/۵۵	-۱۹/۹۲	۳۸	۱۸	۶۵	۳۵/۲	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا	غیرروان‌گرا
لای	۲۵	-۲۲/۳۷	۰	۰	۲۵	۲۱/۸	غیرروان‌گرا	نیاز به تست	مستعد روان‌گرایی	مستعد روان‌گرایی

۲-۲-۲. ارزیابی استعداد روان‌گرایی بخش درشت-دانه و ریزدانه غیرخمیری

۲-۲-۲-۱. مبانی ارزیابی احتمال روان‌گرایی

روش‌های تعیین استعداد روان‌گرایی بخش درشت‌دانه و ریزدانه غیرخمیری یک ساختگاه شامل سه مجموعه هستند. هر کدام از این مجموعه‌ها خود شامل چند روش می‌شوند. در جدول ۳، دسته‌بندی این روش‌ها مشخص شده است.

۲-۲-۲. محاسبه پتانسیل روان‌گرایی از فرمول‌های

تجربی پرکاربرد (روش سید و ادريس اصلاح شده)

روش‌های مبتنی بر فرمول‌های تجربی معمولاً دقت قابل قبولی در مورد روان‌گرایی ساختگاه ارائه می‌دهند. در این روش‌ها، معمولاً ضریب اطمینان ساختگاه در برابر روان‌گرایی محاسبه می‌گردد که عمدتاً از تقسیم نسبت مقاومت تناوبی به نسبت تنش تناوبی به دست می‌آید.

جدول ۳. معرفی انواع روش‌های پرکاربرد در محاسبه استعداد روان‌گرایی ساختگاه

نام روش‌ها یا آزمایش‌ها روی لایه‌های خاک					نام مجموعه
آزمایش سرعت موج برشی	آزمایش مخروط نفوذ	آزمایش نفوذ استاندارد	تخمین مقاومت روان‌گرایی	تخمین تنش‌های برشی تناوبی	روش‌های تقریبی / فرمول‌های تجربی
معمولاً از به‌دست آوردن ضریب اطمینان از طریق تقسیم نسبت مقاومت تناوبی به نسبت تنش تناوبی بهره می‌گیرند					
آزمایش‌های تناوبی		تحلیل طیف پاسخ			روش‌های تحلیلی

r_d : ضریب کاهش تنش (چون خاک انعطاف‌پذیری دارد و صلب نیست).

لیائو و ویتمن (۱۹۸۶) روابط (۳) را برای تعیین ضریب کاهش تنش بر مبنای عمق ارائه داده‌اند.

برای تعیین نسبت مقاومت تناوبی لایه‌های خاک در برابر زلزله (CRR) روابط مختلفی وجود دارد. رابطه یود و ادیس (۲۰۰۱) برای زلزله به بزرگای ۷/۵ ریشتر، که در روش سید، یود و ادیس اصلاح شده (یود و ادیس ، ۲۰۰۱) نیز به‌کار رفته، به شرح رابطه (۴) است.

$$\begin{cases} z < 9.15 \text{ m} \rightarrow r_d = 1.0 - 0.007651 z \\ 9.15 < z < 23 \text{ m} \rightarrow r_d = 1.174 - 0.0267 z \\ 23 < z < 30 \text{ m} \rightarrow r_d = 0.744 - 0.008 z \end{cases} \quad (3)$$

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - N_{1,60}} + \frac{N_{1,60}}{135} + \frac{50}{(10N_{1,60} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (4)$$

Z : عمق توده خاک مورد بررسی بر حسب متر
 $N_{1,60}$: تعداد نرمالیزه شده ضربات چکش در آزمایش نفوذ استاندارد است. یعنی فشار سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال و نسبت انرژی چکش برابر ۶۰٪ ضربات چکش می‌باشد.
 برای تعیین آن فرمول زیر کاربرد دارد:

$$N_{1,60} = N_1 \times C_N \times C_R \times C_S \times C_B \times C_E \quad (5)$$

N_1 : تعداد ضربات به‌دست آمده از آزمون نفوذ استاندارد (که بیشتر بودن آن بیانگر مقاومت بیشتر خاک تلقی می‌گردد)

C_N : ضریب اصلاح نرمال‌سازی برای فشار سربار ۱۰۰ کیلوپاسکال

CR: ضریب اصلاح طول میله

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

که CRR نسبت مقاومت تناوبی لایه‌ها در برابر زلزله و CSR نسبت تنش تناوبی ناشی از وقوع زلزله است.

روش ارائه شده سید و ادیس متداول‌ترین روش بررسی استعداد روان‌گرایی است که در سال ۱۹۸۳ بر مبنای استفاده از نتایج آزمون نفوذ استاندارد (SPT) ارائه و در سال ۲۰۰۱ (یود و ادیس ، ۲۰۰۱) اصلاح گردید. این روش برای ماسه‌ها، ماسه‌های لای‌دار با خواص خمیری کم و نیز لای (سیلت)‌های غیرپلاستیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در آیین‌نامه JRA (۲۰۱۹) پدیده روان‌گرایی را محدود به ۲۰ متر بالای بستر خاکی می‌دانند؛ اما در عمل، لایه‌های با عمق بیشتر نیز تحلیل می‌شوند. در روش سید، یود و ادیس اصلاح شده (یود و ادیس ، ۲۰۰۱) که در این تحقیق مورد استفاده بوده است برای محاسبه نسبت تنش تناوبی از فرمول (۲) استفاده می‌گردد.

$$CSR = 0.65 \times \frac{a_{max}}{g} \times \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \times r_d \quad (2)$$

CSR: نسبت تنش تناوبی ناشی از وقوع زلزله
 a_{max} : بیشینه شتاب روی سطح افقی زمین ساختگاه (PGA)

g : شتاب گرانش زمین

σ_v : تنش عمودی روباره کل

σ'_v : تنش عمودی روباره مؤثر

CS: ضریب اصلاح مربوط به نمونه‌گیری

CB: ضریب اصلاح قطر گمانه

CE: ضریب تصحیح انرژی چکش

البته در عمل برای مقادیر $N_{1,60CS} > 30$ خاک مورد بررسی برای وقوع روان‌گرایی بسیار متراکم بوده و غیرروان‌گرا فرض می‌گردد.

تصحیحات نشریه ۲۲۴ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی نیز برای استفاده در محاسبات به کار می‌رود. ضرایب تجربی متفاوتی برای اصلاح تعداد ضربات SPT پیشنهاد شده که همواره تطابق خوبی با هم ندارند. در عمل، تفاوت این ضرایب و خطاهای مربوط به انجام آزمایش موجب می‌شود که تعیین دقیق تعداد ضربات SPT مشکل باشد.

پس از محاسبه عددی CSR و CRR می‌توان پتانسیل روان‌گرایی خاک را با تقسیم CRR بر CSR به دست آورد. حاصل این تقسیم برابر ضریب اطمینان در برابر روان‌گرایی است. در هر بخشی از خاک که این ضریب برابر یا کمتر از ۱ باشد، آن بخش مستعد روان‌گرایی است. برای هر بخش از خاک که این ضریب اطمینان بیشتر از ۱ باشد، استعداد روان‌گرایی وجود ندارد.

رابطه بالا در اصل برای ماسه‌های تمیز (یعنی مقدار زیر الک شماره ۲۰۰ کمتر از ۵٪ باشد) تعریف شده است. برای خاک‌های ماسه‌ای / سیلتی که مقدار ریزدانه آنها بیشتر از ۵ درصد است، باید $N_{1,60}$ با فرمول زیر اصلاح شود.

$$N_{1,60,CS} = \alpha + \beta \times N_{1,60} \quad (6)$$

α و β متغیرهای تابع درصد ریزدانه موجود در خاک (FC) هستند و با استفاده از روابط تجربی به دست می‌آیند. شرح کامل روش در مراجع معتبر قابل دسترسی است. عمده‌ی خاک ماسه‌ای موجود در طبیعت به صورت ماسه سیلتی و ماسه رسی غیرتمیز (مقدار زیر الک شماره ۲۰۰ بیش از ۵٪) است. با افزایش درصد ریزدانه، مقاومت خاک در برابر پدیده روان‌گرایی افزایش می‌یابد. اگر بزرگای زلزله متفاوت از ۷/۵ ریشتر باشد یک ضریب اصلاحی در ضریب اطمینان به دست آمده ضرب می‌گردد. مثلاً برای بزرگای بیشتر از ۷/۵ ریشتر ضریب اطمینان به دست آمده در عددی کوچکتر از یک ضرب می‌شود. ضریب اعمالی برای تصحیح ضریب اطمینان طبق معیارهای سید و ادیس و NCEER موجود در مرجع یود و ادیس (۲۰۰۱)، مطابق جدول ۴ در نظر گرفته شده است.

جدول ۴: ضریب اعمالی برای تصحیح ضریب اطمینان برای مقادیر به دست آمده در زلزله با بزرگای مختلف (یود و ادیس،

(۲۰۰۱)

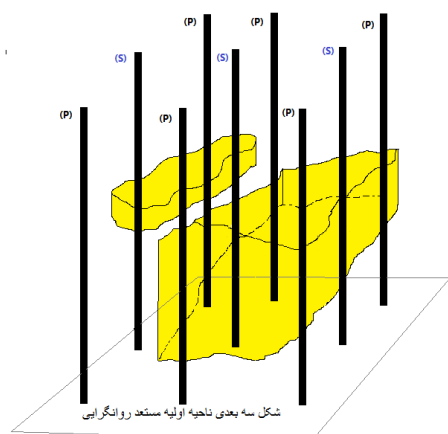
بزرگای زلزله (ریشتر)	۵/۵	۶/۰	۶/۵	۷/۰	۷/۵	۸/۰	۸/۵
ضریب اصلاحی برای اعمال بر ضریب اطمینان	۱/۴۳	۱/۳۲	۱/۱۹	۱/۰۸	۱	۰/۹۴	۰/۸۹

۲-۳. نمونه محاسبات انجام شده با روش پیشنهادی در این تحقیق

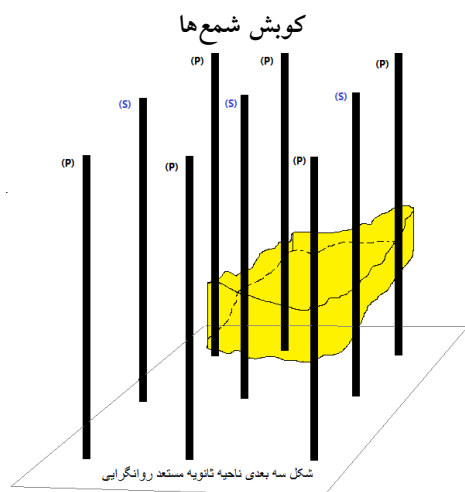
تغییرات تعداد ضربات لازم برای فرو رفتن هر یک متر طول از هر یک از شمع‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. پس از تعیین استعداد روان‌گرایی در بازه‌های مختلف در هر گمانه، می‌توان پلان سطوح مستعد روان‌گرایی در هر

تراز را در شکل‌هایی شبیه به شکل ۳ ترسیم نمود. شکل ۳ صرفاً به عنوان یک طرح‌واره برای درک بهتر روش تحقیق ارائه شده و فاقد ابعاد است. در این شکل، سطوح مستعد روان‌گرایی که در مطالعات ژئوتکنیک برای یک عمق مشخص حاصل شده است به رنگ سبز پُررنگ می‌باشند. پس از اجرای سری دوم شمع‌های کوبشی،

مورد تأکید است. پیشنهاد دوم استفاده از آزمون استاتیک و دینامیک روی نمونه‌هایی از شمع‌هاست که هر دوی این مورد در این ساختگاه انجام شده است. نتایج آزمون‌ها بیانگر افزایش مقاومت به‌دست آمده نسبت به محاسبات پیش فرض است که خود می‌تواند بیانگر صحت عملگریانه پیش فرض افزایش عملی عدد SPT پس از کوبش شمع‌ها در ساختگاه باشد. شکل ۴، کاهش محدوده‌های مستعد روان‌گرایی ناشی از افزایش عدد SPT به علت کوبش شمع‌ها را به صورت طرح‌واره نشان می‌دهد.

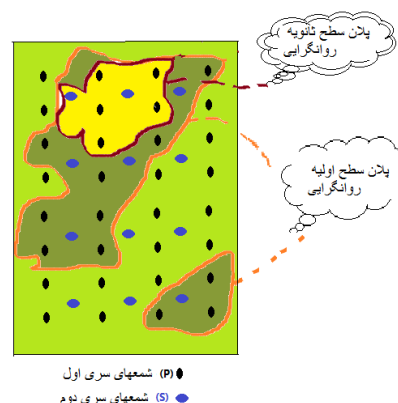


شکل ۴. محدوده فرضی مستعد روان‌گرایی که از مطالعات و محاسبات به‌دست می‌آید، یعنی محدوده اولیه پیش از



شکل ۵. کاهش محدوده فرضی مستعد روان‌گرایی به علت افزایش تراکم ناشی از کوبش شمع‌های سری اول در ساختگاه

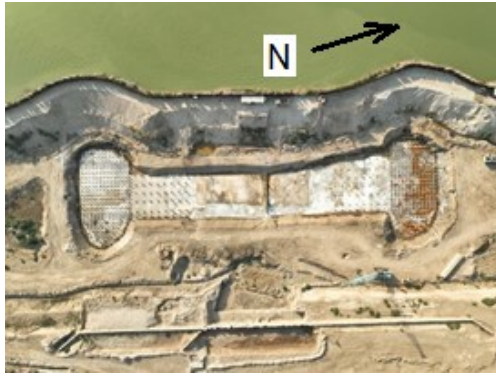
پیش‌بینی می‌گردد که سطوح مستعد روان‌گرایی به محدوده زرد رنگ کاهش یابند.



شکل ۳. جانمایی طرح‌واره (شماتیک) شمع‌های اجرا شده در مراحل اول و دوم و سطوح مستعد روان‌گرایی در ساختگاه

با در نظر گرفتن تمامی لایه‌های مستعد روان‌گرایی و کاهش احتمالی سطوح و عمق‌های مستعد مربوطه ناشی از تراکم به‌وجود آمده در اثر کوبش شمع‌های سری اول، شکل‌های تقریبی زیر حاصل خواهد شد. شکل ۴، محدوده مستعد روان‌گرایی ناشی از محاسبات اولیه و شکل ۵ کاهش محدوده مستعد روان‌گرایی به علت افزایش تراکم ناشی از کوبش شمع‌های سری اول در ساختگاه را نشان می‌دهد. فرض بر این است که نسبت افزایش عدد تعداد ضربات لازم برای نفوذ هر متر شمع سری دوم نسبت به شمع سری اول مجاور آن، برابر نسبت افزایش تعداد ضربات آزمایش نفوذ استاندارد در محل شمع سری دوم نسبت به شمع سری اول مجاور می‌باشد. این فرض می‌تواند سبب افزایش تعداد ضربات آزمایش نفوذ استاندارد و متناسب با آن اصلاح محاسبات تعیین روان‌گرایی گردد.

برای صحت‌سنجی این فرض لازم است آزمایش نفوذ استاندارد SPT پس از کوبش همه شمع‌ها در کنار حداقل یک گمانه قدیمی باز تکرار گردد زیرا در عمل شرایط آزمون مذکور با شرایط کوبش شمع تفاوت‌های ماهیتی دارد. لذا انجام این آزمون برای تحقیقات مشابه



شکل ۷. نمایی از شمع‌های اجرا شده در موقعیت گودبرداری محل قفل کشتیرانی سد مارد. سرشمع‌ها به صورت نقاط روی بتن مگر دیده می‌شوند.

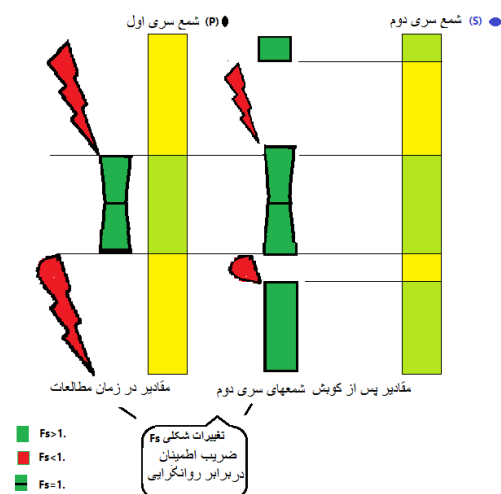


شکل ۸. شمع‌های اجرا شده در بستر رودخانه و موقعیت گودبرداری محل قفل کشتیرانی سد مارد

۳. بررسی و تحلیل نتایج

با استفاده از توضیحات ارائه شده در مورد نحوه تعیین استعداد روان‌گرایی ساختمانی مورد اشاره، نمودار تغییرات ضریب اطمینان خاک در برابر روان‌گرایی در اعماق مختلف، تا بیشینه عمق ۲۵ متری، برای لایه‌های ماسه‌ای و نیز لایه‌های ریزدانه سیلتی دارای استعداد روان‌گرایی رسم شده است. برای نمونه، اطلاعات جدول ۵، محل وقوع روان‌گرایی گمانه BH12 در زلزله سطح ۲ از عمق ۷ تا ۹ متر را نشان می‌دهد.

در صورت پیاده‌سازی مفاهیم شکل‌های ۴ و ۵، شکلی مشابه شکل ۶ قابل استنتاج است. در شکل ۶، تغییرات نواحی با ضریب اطمینان F_s کمتر از یک در برابر روان‌گرایی (که با رنگ زرد روی شمع سری اول یا دوم و نیز علامت خطر قرمز رنگ در خود لایه نشان داده شده است) از حالت اولیه در زمان مطالعات به عددی بیشتر از یک (که با رنگ سبز روی شمع و رنگ سبز پُررنگ در داخل لایه نشان داده شده است) می‌رسد.



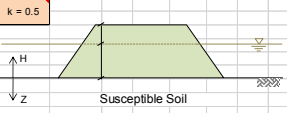
شکل ۶. تغییرات نواحی با ضریب اطمینان (F_s) مختلف در برابر روان‌گرایی. این شکل تقریبی بیانگر وجود استعداد روان‌گرایی در بالا و پایین یک شمع فرضی (تصویر سمت چپ) است. در تصویر سمت راست، بخشی از لایه‌های مستعد روان‌گرایی پس از اجرای شمع‌های مرحله اول، حذف شده است.

برای درک موقعیت شمع‌ها در شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب پلان جانمایی شمع‌های اجرا شده در قفل کشتیرانی و نیز یک تصویر از نزدیک مربوط به همان موقعیت ارائه شده است.

در حالی که در این گمانه هیچ نقطه‌ای در زلزله سطح ۱ روان‌گرا نشده لیکن یک محدوده کوتاه در زلزله سطح ۲ روان‌گرا شده است. جداول ۵ و ۶ نیز محاسبات مربوط به این گمانه را نشان داده‌اند. جهت اختصار، از ارائه سایر شکل‌ها و جداول مشابه برای سایر گمانه‌ها اجتناب شده است.

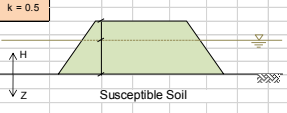
جدول ۵. نمونه‌ای از محاسبات منجر به تعیین ضرایب اطمینان در برابر

روان‌گرایی در ترازهای مختلف ساختگاه در گمانه BH12 برای زلزله سطح ۱ در مطالعات اولیه و قبل از کوبش شمع‌ها

$M_w = 5.7 \Rightarrow MSF = 2.019$										$H_u = 0.0 \text{ m}$ $g_{su} = 1.90 \text{ gr/cm}^3$				$H_{brg} = 0.0 \text{ m}$				$k = 0.5$													
$a_{max} = 0.085g \Delta \text{ Level I}$										$H_u = 0.0 \text{ m}$ $g_{su} = 1.50 \text{ gr/cm}^3$				$SWT = 0.0 \text{ m}$																	
$C_e = 1.0$ $C_s = 1.0$										$C_a = 1.0$ $FS_{sl} = 1.5$																					
BH12																															
		N_1	N_2	N_3	N	N_{14}	FC %	LL %	PL %	$g \text{ gr/cm}^3$	$s_v \text{ Kg/cm}^2$	$s_{v14} \text{ Kg/cm}^2$	$s_v' \text{ Kg/cm}^2$	$s_{v14}' \text{ Kg/cm}^2$	r_d	CSR _{eq}	C_u	C_k	C_{tot}	a	b	$N_{1,60}$	$N_{1,60,cs}$	CRR _{7.5}	K_u	SF					
S	3				13	13	22		0	2.00	0.6000	0.6000	0.3000	0.3000	0.9795	0.1121	0.85	1.70	1.45	3.88	1.09	18.79	24.38	0.28	1.00	5.00					
C	6				7	7	99	33	19	1.80	1.1400	1.1400	0.5400	0.5400	0.9577	0.1156	0.95	1.36	1.29	5.00	1.20	9.05	15.86	0.17	1.00	2.95					
C	8.5				5	5	99	31	21	1.80	1.5900	1.5900	0.7400	0.7400	0.9305	0.1144	0.95	1.16	1.10	5.00	1.20	5.52	11.63	0.13	1.00	2.25					
C	10.2				19	19	78	23	15	1.90	1.9130	1.9130	0.8930	0.8930	0.9008	0.1104	1.00	1.06	1.06	5.00	1.20	20.11	29.13	0.42	1.00	5.00					
C	12				49	49	94	28	14	2.10	2.2910	2.2910	1.0910	1.0910	0.8565	0.1029	1.00	0.96	0.96	5.00	1.20	46.91	61.29	1.00	0.96	5.00					
C	13.5				31	31	92	28	15	2.10	2.6060	2.6060	1.2560	1.2560	0.8107	0.0962	1.00	0.89	0.89	5.00	1.20	27.66	38.19	1.00	0.90	5.00					
C	15.5				45	45	98	32	20	2.10	3.0260	3.0260	1.4760	1.4760	0.7441	0.0873	1.00	0.82	0.82	5.00	1.20	37.04	49.45	1.00	0.82	5.00					
C	18.5				56	56	96	39	19	2.10	3.6560	3.6560	1.8060	1.8060	0.6536	0.0757	1.00	0.74	0.74	5.00	1.20	41.67	55.00	1.00	0.74	5.00					
C	22				100	100	29		0	2.15	4.4085	4.4085	2.2085	2.2085	0.5807	0.0663	1.00	0.67	0.67	4.62	1.14	67.29	81.58	1.00	0.67	5.00					
C	23.8				38	38	76	32	18	2.10	4.7865	4.7865	2.4065	2.4065	0.5552	0.0632	1.00	0.64	0.64	5.00	1.20	24.50	34.39	1.00	0.64	5.00					

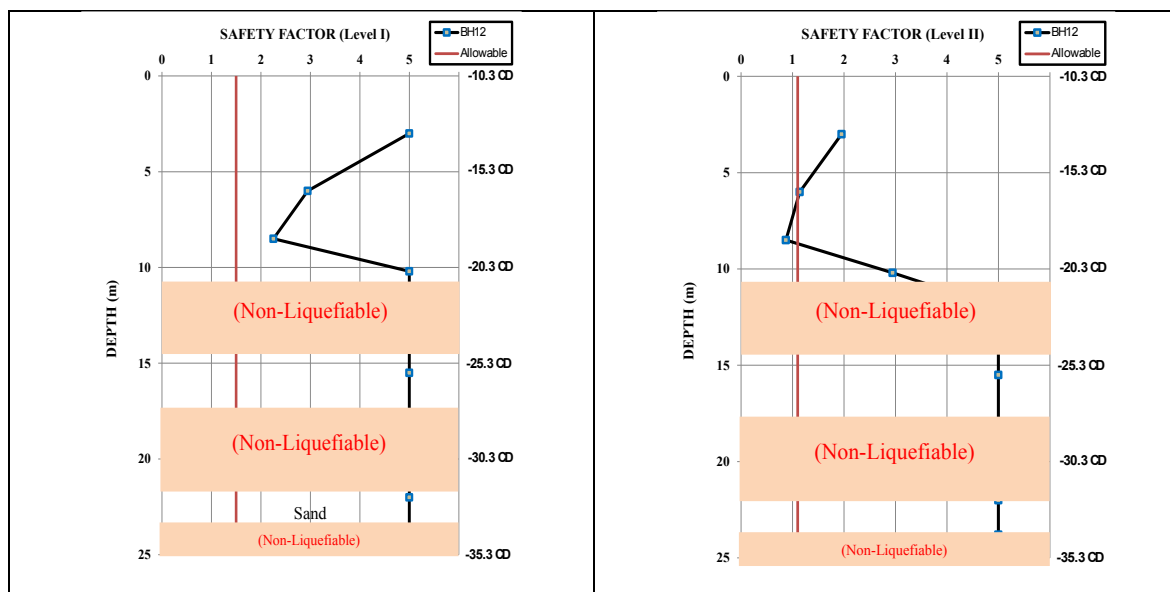
جدول ۶. نمونه‌ای از محاسبات منجر به تعیین ضرایب اطمینان در برابر روان‌گرایی در ترازهای مختلف ساختگاه در گمانه

BH12 برای زلزله سطح ۲ در مطالعات اولیه و قبل از کوبش شمع‌ها

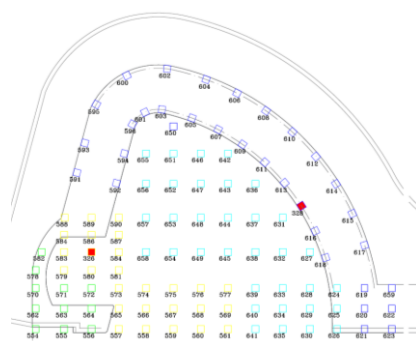
$M_w = 6.3 \Rightarrow MSF = 1.562$		$H_u = 0.0 \text{ m}$ $g_{su} = 1.90 \text{ gr/cm}^3$		$H_{brg} = 0.0 \text{ m}$	$k = 0.5$																																									
$a_{max} = 0.176g \Delta \text{ Level II}$		$H_u = 0.0 \text{ m}$ $g_{su} = 1.50 \text{ gr/cm}^3$		$SWT = 0.0 \text{ m}$																																										
$C_e = 1.0$ $C_s = 1.0$		$C_a = 1.0$ $FS_{sl} = 1.1$																																												
BH12																																														
		N_1	N_2	N_3	N	N_{eq}	FC %	LL %	PL %	$g \text{ gr/cm}^3$	$s_v \text{ Kg/cm}^2$	$s_{v14} \text{ Kg/cm}^2$	$s_v' \text{ Kg/cm}^2$	$s_{v14}' \text{ Kg/cm}^2$	r_d	CSR _{eq}	C_u	C_k	C_{tot}	a	b	$N_{1,60}$	$N_{1,60,cs}$	CRR _{7.5}	K_u	SF																				
S	3				13	13	22		0	2.00	0.6000	0.6000	0.3000	0.3000	0.9795	0.2241	0.85	1.70	1.45	3.88	1.09	18.79	24.38	0.28	1.00	1.95																				
C	6				7	7	99	33	19	1.80	1.1400	1.1400	0.5400	0.5400	0.9577	0.2313	0.95	1.36	1.29	5.00	1.20	9.05	15.86	0.17	1.00	1.14																				
C	8.5				5	5	99	31	21	1.80	1.5900	1.5900	0.7400	0.7400	0.9305	0.2287	0.95	1.16	1.10	5.00	1.20	5.52	11.63	0.13	1.00	0.87																				
C	10.2				19	19	78	23	15	1.90	1.9130	1.9130	0.8930	0.8930	0.9008	0.2208	1.00	1.06	1.06	5.00	1.20	20.11	29.13	0.42	1.00	2.95																				
C	12				49	49	94	28	14	2.10	2.2910	2.2910	1.0910	1.0910	0.8565	0.2058	1.00	0.96	0.96	5.00	1.20	46.91	61.29	1.00	0.96	5.00																				
C	13.5				31	31	92	28	15	2.10	2.6060	2.6060	1.2560	1.2560	0.8107	0.1924	1.00	0.89	0.89	5.00	1.20	27.66	38.19	1.00	0.90	5.00																				
C	15.5				45	45	98	32	20	2.10	3.0260	3.0260	1.4760	1.4760	0.7441	0.1745	1.00	0.82	0.82	5.00	1.20	37.04	49.45	1.00	0.82	5.00																				
C	18.5				56	56	96	39	19	2.10	3.6560	3.6560	1.8060	1.8060	0.6536	0.1514	1.00	0.74	0.74	5.00	1.20	41.67	55.00	1.00	0.74	5.00																				
C	22				100	100	29		0	2.15	4.4085	4.4085	2.2085	2.2085	0.5807	0.1326	1.00	0.67	0.67	4.62	1.14	67.29	81.58	1.00	0.67	5.00																				
C	23.8				38	38	76	32	18	2.10	4.7865	4.7865	2.4065	2.4065	0.5552	0.1263	1.00	0.64	0.64	5.00	1.20	24.50	34.39	1.00	0.64	5.00																				

با توجه به انجام محاسبات تعیین استعداد روان‌گرایی از جداول محاسباتی شبیه جداول ارائه شده می‌توان نیمرخ‌هایی شبیه شکل ۹ برای نمایش تغییرات ضرایب اطمینان در برابر روان‌گرایی برای ترازهای مختلف (در اینجا برای مثال گمانه BH12) را ارائه داد. در شکل ۱۰، شماره‌گذاری بعضی از شمع‌ها برای تحلیل آنها نشان داده شده است.

تأثیر عملی افزایش تراکم بستر ساختگاه ناشی از کوبش شمع بر کاهش استعداد روان‌گرایی آن



شکل ۹. نمونه‌ای از نمودار تغییرات ضرایب اطمینان در برابر روان‌گرایی برای ترازهای مختلف ساختگاه در گمانه BH12 برای زلزله‌های سطح ۱ (شکل سمت چپ) و زلزله سطح ۲ (شکل سمت راست)



شکل ۱۰. جانمایی بخشی از شمع‌ها در ضلع جنوب غربی (به شکل ۷ مراجعه نمایید) و دو تا از شمع‌های مورد مطالعه که با رنگ قرمز مشخص شده‌اند

جدول ۷. نمونه‌ای از محاسبات منجر به تعیین ضرایب اطمینان در برابر روان‌گرایی در شمع سری دوم به شماره ۳۲۶ نسبت به

شمع‌های سری اول پیرامون آن

شمع‌ها (روز)			تعداد ضربات چکش بر شمع‌ها برای رانش کامل			شماره شمع‌ها نسبت به همدیگر		
۳۴	۳۴	۳۴	۴۲۷	۴۳۸	۳۲۸	۵۸۷	۵۸۶	۵۸۴
۳۴	۰	۳۴	۲۰۲	۱۲۰	۲۹۲	۵۸۲	۳۲۶	۵۸۳
۳۴	۳۴	۳۴	۳۲۱	۲۷۴	۳۰۰	۵۸۱	۵۸۰	۵۷۹

۵۸۰، ۵۸۱، ۵۸۲، ۵۸۳، ۵۸۴، ۵۸۶ و ۵۸۷ پیرامون آن و ۳۴ روز پس از آن کوبیده شده‌اند) ضربات لازم برای فرورفتن حداکثر ۱۶ متری هر شمع (شمع سری اول به شماره ۳۲۶ و ۸ شمع مجاور آن) در جدول ۷ نشان داده

جدول ۷، نمونه‌ای از روش محاسباتی به‌کار گرفته شده برای تعیین تأثیر کوبش شمع‌های سری اول بر تعداد ضربات کوبش شمع‌های سری دوم را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، در شمع شماره ۳۲۶ (شمع‌های شماره ۵۷۹،

شده است. متوسط تعداد ضربات برای ۸ شمع پیرامونی شمع سری اول که ۳۴ روز بعد از شمع شماره ۳۲۶ کوبیده شده‌اند برابر ۳۲۳ بوده است. یعنی عدد تعداد ضربات از ۱۲۰ به ۳۲۳ افزایش (۲۶۸٪) یافته است. بررسی این گونه تغییرات در سایر شمع‌هایی که به صورت اتفاقی انتخاب شده‌اند بیانگر افزایش ۱۷- تا تقریباً ۳۰۰ درصدی تعداد ضربات لازم برای کوبش شمع‌های پیرامونی بوده است. البته در مواردی موضوع متفاوت بوده و حتی کاهش تعداد متوسط کل ضربات برای نفوذ شمع‌های پیرامونی (یعنی شمع‌های سری دوم) را شاهد بوده‌ایم. علت این وضعیت، وجود سه پدیده بود. علت نخست و اصلی اینکه در مواردی طول بعضی از شمع‌های پیرامونی اولیه ۱۶ متر و طول شمع‌های سری دوم ۱۲ متر بوده است. لذا، تعداد ضربات کوبش شمع‌ها صرفاً تا محدوده طول ۱۲ متر مبنای مقایسه قرار گرفت تا فرآیند محاسبات اصلاح گردید. دومین عامل خطا: بعضاً شمع‌های اولیه در لایه سخت‌تر و شمع‌های سری دوم در لایه‌های نرم‌تر کوبیده شده‌اند. سومین عامل خطا: اشتباه در انتقال داده‌های کارگاهی (داده‌های برداشت شده) بود که با بررسی‌ها و بازکنترل، نهایتاً اعداد صحیح استخراج شد و به کار رفت.

بررسی تعداد زیادی از شمع‌ها (کلاً داده‌های ۸۸۵ شمع وجود داشته است) برای پاسخ به این سؤال که آیا افزایش تراکم در لایه‌ها، ناشی از کوبش شمع‌ها، سبب کاهش استعداد روان‌گرایی در لایه‌های با تراکم اولیه کم می‌گردد یا خیر، صورت گرفته است. اهمیت این تحقیق نیز در راستای کمک به شفاف‌سازی پاسخ به این سؤال است. جواب سؤال "به احتمال قوی بله" است. سؤال پیوست اینکه آیا این تحقیق با قاطعیت پاسخ این سؤال را یافته است؟

جواب سؤال اخیر "خیر" است. در این تحقیق، داده‌های دقیق کوبش متر به متر شمع‌های ۱۲ تا ۱۶ متری مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. محدودیت تعداد

گمانه (خصوصاً نسبت به تعداد زیاد شمع‌ها)، خارج بودن تعدادی از گمانه‌ها از محل شمع‌کوبی‌ها، عدم انجام آزمایش SPT یا سایر آزمون‌های شناسایی ژئوتکنیک ساختگاهی پس از کوبش شمع‌ها (به جز آزمایش-های PDA و سایر آزمایش‌های مختص به خود شمع‌ها و نه محیط ژئوتکنیک) از نقاط ضعف داده‌های موجود است که سبب عدم قطعیت در پاسخ به این سؤال گردیده است. اما پیش‌فرض‌های علمی همچون افزایش تراکم لایه‌های سست با افزایش تعداد ضربات شمع‌های سری دوم نسبت به شمع‌های سری اول، غالباً درست از آب درآمده است. از سوی دیگر، در همه آزمون‌های برجای دینامیک و استاتیک انجام شده روی شمع‌ها، مقادیر به-دست آمده برای باربری شمع‌ها از مقادیر محاسباتی بیشتر است. با توجه به این ادله و نیز انتخاب نمونه‌هایی از شمع‌های سری دوم که شمع‌های پیرامونی آنها با فاصله زمانی نسبتاً زیاد کوبیده شده‌اند (محیط ژئوتکنیک فرصت کافی برای بازیابی میادین تنش و کرنش را داشته است) فرض افزایش عدد SPT متناسب با افزایش تعداد ضربات کوبش شمع‌ها در این ساختگاه منطقی به نظر می‌رسد. لیکن، لازم است این ایده در چند ساختگاه دیگر نیز مورد ارزیابی قرار گرفته و ترجیحاً آزمایش‌های تعیین عدد SPT جدید نیز در آنها انجام گیرد.

برای تحلیل اولیه، افزایش ضربات کوبش برای هر متر از طول شمع‌های مرحله دوم نسبت به مرحله اول مبنای بررسی قرار گرفت. لیکن پراکنش داده‌ها بسیار زیاد به دست می‌آمد. برای مثال، برای شمع سری دوم شماره ۳۲۶ به تعداد ۸ شمع پیرامونی وجود دارد. چون برای هر متر از ۱۲ متر طول شمع سری اول تعداد ۸ عدد کوبش شمع‌های اولیه وجود دارد، لذا در کل، ۹۶ عدد برای محاسبات مقایسه‌ای این شمع‌ها به کار رفته است. در شمع‌های پیرامونی شمع شماره ۳۲۶ این افزایش تعداد ضربات کوبش هر متر نسبت به ضربات اعماق مشابه در شمع‌های پیرامونی دارای تغییرات غیریکنواخت نسبت به

اعماق مختلف این شمع از ۱۷٪ تا ۶۸۳٪ بوده است! در عمل، بررسی دامنه بزرگی از تغییرات برای تعداد زیادی از شمع‌ها در یک ساختگاه جنبه عملیاتی ندارد. پس برای ایجاد قابلیت محاسباتی عملی، متوسط کل کوبش‌های شمع‌ها (به‌جای مقایسه هر تک متر شمع‌ها با همدیگر) بررسی گردید. در این حالت، متوسط افزایش ضربات شمع‌های سری دوم به شمع‌های سری اول بررسی شد. بدین ترتیب برای هر شمع تنها یک ضریب به دست آمد. برای مثال، شمع شماره ۳۲۶ ضریب ۲۶۸٪ حاصل شد. از آنجایی که دامنه تغییرات افزایش تعداد ضربات شمع-های سری دوم به سری اول حتی در حالت متوسط‌گیری از کل داده‌ها (ایجاد یک ضریب برای هر شمع سری دوم) نیز با پراکنش زیاد داده‌ها و تعداد زیاد آنها (به علت تعداد زیاد شمع‌ها) مواجه بود، به شکل محافظه‌کارانه مقادیر کمتر از مقدار متوسط افزایش مذکور در نظر گرفته شد. طبیعی است که داده‌ها بیانگر عدم تراکم یکسان در تمام لایه‌ها بوده است. لیکن انتخاب یک ضریب مثل عدد ۲۰ درصد برای افزایش عدد SPT در تمام لایه‌ها بدون توجه به جنس و بافت لایه بر مبنای انتخاب یک عدد نسبتاً کمینه از دامنه تغییرات وسیع مورد اشاره صورت گرفته و کاملاً محافظه‌کارانه است. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات تکمیلی سایر محققان حتماً آزمون‌های تکمیلی SPT

انجام شود تا امکان استفاده از ضرایب دقیق‌تر (و به احتمال قوی بزرگتر) فراهم گردد.

سرجمع، همه بررسی‌ها افزایش متوسط حدوداً ۲۰ درصدی تعداد ضربات شمع‌های سری دوم نسبت به سری اول را نشان داده است. در محاسبات، همین مقدار به عنوان افزایش عدد ضربات SPT فرض شده است. در جدول ۸، احتمال روان‌گرایی در گمانه‌های مختلف تحت تأثیر زلزله‌های سطح ۱ و سطح ۲ نشان داده شده است. در این جدول، طول بازه‌هایی که در آنها ضرایب اطمینان در برابر روان‌گرایی کمتر از حد مجاز است (یعنی استعداد روان‌گرایی وجود دارد) نوشته شده است. با توجه به جدول ۱، حد مجاز برای ضریب اطمینان در برابر روان‌گرایی در زلزله‌های سطح ۱ و سطح ۲ به ترتیب برابر ۱/۵ و ۱/۱ فرض شده است.

اطلاعات بررسی روان‌گرایی در همه گمانه‌ها در جدول ۸ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱، علامت = در جدول مذکور بیانگر نزدیک نبودن گمانه به محل اجرای شمع‌های کوبشی است. لذا، امکان مقایسه‌ای برای تحلیل آنها بر مبنای کوبش شمع‌های سری اول و دوم مهیا نبوده است. گمانه‌های BH2، BH6 و BH7 فاقد استعداد روان‌گرایی بوده‌اند.

جدول ۸. طول بازه‌هایی از گمانه‌ها (برابر مجموع ضخامت لایه‌هایی) که در زلزله‌های سطح ۱ و یا سطح ۲ مستعد روان‌گرایی

تشخیص داده شده‌اند

BHD1	BH13	BH12	BH11	BH10	BH9	BH8	BH7 new	BH5	BH4	BH3	BH1	نام گمانه <<<<<	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۲	۰	زلزله	شمع‌های سری اول <<
سطح ۱													
۲	۴/۵	۲	۲/۵	۳	۲/۵	۲/۵	۴	۹/۱	۷	۷	۴/۵	سطح ۲	شمع‌های سری دوم <<
زلزله													
سطح ۱													
سطح ۲													

در جدول مذکور بیانگر نزدیک نبودن گمانه به محل اجرای شمع‌های کوبشی است. لذا، امکان مقایسه‌ای برای

اطلاعات بررسی روان‌گرایی در همه گمانه‌ها در جدول ۸ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱، علامت =

تحلیل آنها بر مبنای کوبش شمع‌های سری اول و دوم مهیا نبوده است. گمانه‌های BH2، BH6 و BH7 فاقد استعداد روان‌گرایی بوده‌اند.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت مسأله روان‌گرایی در یک ساختگاه (محل سد و قفل کشتیرانی مارد خرمشهر)، در این پژوهش، ابتدا استعداد روان‌گرایی خاک در گمانه‌های آن پروژه با استفاده از روش‌های رایج مهندسی تعیین شده است. در این پروژه، بیش از ۸۰۰ شمع به صورت سری اول و سری دوم کوبیده شده‌اند. شمع‌های سری دوم در لابلای شمع‌های سری اول کوبیده شده و با توجه به فاصله زمانی زیاد بین اجرای شمع‌ها و افزایش تراکم نسبی محیط ژئوتکنیک، تعداد ضربات بیشتری برای کوبش آنها لازم بوده است. افزایش تعداد ضربات لازم برای نفوذ هر یک متر طول از یک شمع سری دوم نسبت به تعداد ضربات لازم برای نفوذ همان طول از شمع‌های سری اول مجاور آن، مستقیماً به میزان افزایش عدد نفوذ استاندارد SPT به عنوان یک شاخص مهم در تعیین روان‌گرایی ساختگاه فرض شده است. بدین ترتیب، روان‌گرایی ساختگاه مورد بررسی متأثر از تغییرات عدد SPT مجدداً مورد بررسی قرار گرفته است. از منظر ماهیتی، مشخص است که مفهوم تعداد ضربات آزمایش SPT برای نفوذ شاخص مربوطه به میزان ۰/۴۵ متر با تعداد ضربات کوبش شمع پیش‌ساخته برای نفوذ یک متر طولی از آن (که می‌تواند از متر اول شمع تا ۱۲ متر نهایی آن متغیر باشد) یکسان نیست. طبیعتاً تأثیر تواتر و جنس لایه‌ها، تغییرات مقاومت اصطکاکی جداره شمع‌ها در زمان کوبش آنها، تغییرات محیط پیرامونی در حفاری برای اجرای آزمایش SPT نسبت به فشرده‌سازی محیط برای کوبش شمع و.. سبب اختلاف ماهیت این دو روش می‌گردند. لیکن، ارزش این کار تحقیقاتی، پیشنهاد این

ایده است که بتوان رابطه‌ای عملیاتی بین این دو برقرار کرد. فرض منطقی این است که به احتمال قوی، افزایش تعداد ضربات کوبش یک شمع نسبت به شمع مجاور در یک محیط یکسان می‌تواند بیانگر افزایش تراکم محیط ناشی از کوبش شمع قبلی باشد. از سوی دیگر، تراکم بیشتر یک محیط ژئوتکنیک می‌تواند بیانگر افزایش عدد SPT باشد. بررسی‌های متعدد در شمع‌هایی که به صورت اتفاقی انتخاب شده‌اند بیانگر افزایش ۱۷- تا تقریباً ۳۰۰ درصدی تعداد ضربات لازم برای کوبش شمع‌های سری دوم نسبت به شمع‌های پیرامونی سری اول بوده است. متوسط افزایش تعداد ضربات مورد اشاره نسبتاً زیاد بوده است. البته متوسط ثقلی این افزایش برای کل شمع‌های بررسی شده ۸۰ درصد بوده است. در جهت اطمینان، درصد کمی از این افزایش مستقیماً به عنوان افزایش عدد SPT فرض شده است. یعنی به صورت محافظه‌کارانه، یک حداقل قابل قبول می‌بایست در فرضیات لحاظ شود. لذا، متوسط افزایش ۸۰ درصدی تعداد ضربات شمع کوب برای نفوذ کل یک شمع سری دوم نسبت به شمع‌های مجاور سری اول آن برابر افزایش تقریباً ۲۰ درصدی عدد SPT فرض شده است. این افزایش مقدار متوسط عدد مذکور در کل ساختگاه موجب خروج محدوده‌هایی از ساختگاه از استعداد روان‌گرایی می‌گردد. یعنی با افزایش عدد مذکور، بخش‌هایی از لایه‌هایی که قبلاً روان‌گرا محسوب می‌شدند دیگر روان‌گرا نبوده و می‌توان محاسبات قابلیت باربری پوسته شمع در آن لایه‌ها را نیز به ظرفیت باربری جداری (اصطکاکی) افزود. چنین موضعی تا به حال در محاسبات ظرفیت باربری شمع‌ها دخیل نشده است. لذا، برای توسعه این روش پیشنهاد می‌گردد آزمایش تعیین عدد نفوذ استاندارد بعد از کوبش شمع‌ها و دقیقاً در کنار گمانه‌هایی که قبلاً استعداد روان‌گرایی در آنها محرز شده است مجدداً انجام گیرد و تأثیر تغییرات عدد SPT در محاسبات اعمال شود.

۵. مراجع

- Andrews, D. C. A. and Martin, G. R. 2000. "Criteria for liquefaction of silty sands". World Conference on Earthquake Engineering, 12WCEE, Auckland, New Zealand.
- Bolton Seed, H., Idriss, I. M. and Arango, I. 1983. "Evaluation of liquefaction potential using field performance data". J. Geotech. Eng., 109(3): 458-482.
- Cubrinovski, M. and Robinson, K. 2016. "Lateral spreading: Evidence and interpretation from the 2010–2011 Christchurch earthquakes". Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 91: 187-201.
- Elgamal, A. 2005. "Liquefaction-induced settlement of shallow foundations and remediation: 3D numerical simulation". Earthq. Eng., 9: 17-45.
- Elgamal, A. W., Zeghal, M. and Parra, E. 1996. "Liquefaction of reclaimed island in Kobe". J. Geotech. Eng., 122: 39-49.
- Español-Espinel, C. 2023. "Liquefaction analysis of soil plugs within large diameter monopiles using numerical modelling". Bull. Earthq. Eng., 21(12): 5443-5458.
- Fadaei, S. and Hamidi, A. 2024. "Numerical evaluation of liquefaction during vibratory pile driving in saturated sand". Transport. Infrastruct. Geotech., 17: 1-23.
- Fatima, T. 2023. "A review on impacts and mitigation of liquefaction of soil around the tunnels". Failure Anal. Prev., 23: 1822-1840.
- Ford, L. E. and Poeppel, A. R. 2021. "Soil densification by driven piles to reduce liquefaction potential". International Foundations Congress and Equipment Expo 2021.
- Guan, Z. and Wang, Y. 2022. "Assessment of liquefaction-induced differential ground settlement and lateral displacement using standard penetration tests with consideration of soil spatial variability". Geotech. Geoenviron. Eng., 148: 402-421.
- Huang, D. 2020. "Effectiveness of pile reinforcement in liquefied ground". Earthq. Eng., 24(8): 1222-1244.
- Hussien, R. S. and Albusoda, B. S. 2022. "A review of the performance of piles in liquefiable soil". Association of Arab Universities J. Eng. Sci., 29(3): 01-11.
- Idriss, I. M. and Boulanger, R. W. 2007. "SPT and CPT-based relationships for the residual shear strength of liquefied soils". International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Dordrecht, The Netherlands.
- JRA. 2019. "Japan Road Association for Highway Bridges", Part V, Seismic Design.
- Khorashadizadeh, M., Hosseini, M. A. and Saeedi Azizkandi, A. 2023. "Performance of finned piles as a protection for a 2×2 group pile subjected to liquefaction-induced lateral spreading: A shake table investigation". Soil Dyn. Earthq. Eng., 170: 107-115.
- Li, W., Chen, Y., Stuedlein, A. W., et al. 2018. "Performance of X-shaped and circular pile-improved ground subject to liquefaction-induced lateral spreading". Soil Dyn. Earthq. Eng., 109: 273-281.
- Liao, S. S. C. and Whitman, R. V. 1986. "Catalogue of liquefaction and non-liquefaction occurrences during earthquakes". Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Mansouri Kia, M. T., Sheybani, H. R. and Hoback, A. 2024. "Determination of vessel unit number in river transportation". Hydrophys., 9(2), 89-104.
- Mele, L., Lirer, S. and Flora, A. 2024. "Induced partial saturation: From mechanical principles to engineering design of an innovative and eco-friendly countermeasure against earthquake-induced soil liquefaction". Geosci., 14(6): 140.
- Reddy, C. N. V. S., Eswara Rao, S. and Harika, A. 2023. "A study on the effect of field procedure corrections of SPT-N values on the liquefaction resistance of the subsoil strata along the coastline of Visakhapatnam". Geotech. Eng., 54(3): 50-66.
- Roy, J., Rollins, K. M., et al. 2023. "A comparative study of the dpt and cpt in evaluating liquefaction potential for gravelly soil at the port of Wellington, New Zealand". Geotech. Geoenviron. Eng., 149(11).
- Saeedi, M., Dehestani, M., et al. 2018. "Numerical analysis of pile-soil system under seismic liquefaction". Eng. Failure Anal., 94: 96-108.
- Sahil Omid Iranian. and Lar, M. 2024. "Tectonics and seismicity report and project presentation and special accelerogram for construction". Technical Report of Soil Liquefaction Assessment, 187: 139. [In Persian]
- Seed, R. B., Cetin, K. O., et al. 2003. "Recent advances in soil liquefaction engineering: A unified and consistent framework". Annual ASCE Geotechnical Spring Seminar, Los Angeles, USA, pp. 589-626.
- Sheikh, D. 2019. "The effect of liquefaction in depth on the seismic ground motion". M.Sc. Thesis, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Iran. [In Persian]

- Singh, S. V. and Ghani, S. 2024. "A smarter approach to liquefaction risk: harnessing dynamic cone penetration test data and machine learning for safer infrastructure". *Front. Built Environ.*, 10: 149-154.
- Takata, M. M., Sassa, S., et al. 2024. "The new compaction grouting method with improved upheaval control and enhanced liquefaction countermeasure effect". *International Ocean and Polar Engineering Conference*, Liege, Belgium.
- Thakur, I. C. and Roy, L. B. 2024. "An overview of liquefaction mitigation countermeasures". *Earth and Environmental Science Conference*, The University of Texas, Austin, USA.
- Turner, B. J., Brandenburg, S. J. and Stewart, J. P. 2016. "Case study of parallel bridges affected by liquefaction and lateral spreading". *Geotech. Geoenviron. Eng.*, 142: 50-61.
- Wang, W. 1979. "Some Findings in Soil Liquefaction". *Research Report*, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China.
- Youd, T. L. and Idriss, I. M. 2001. "Liquefaction resistance of soils: summary from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils". *Geotech. Eng.*, 127: 297-313.
- Zachariah, J. P. and Jakka, R. S. 2024. "State-of-the-art review on utilization of waste materials in the mitigation of soil liquefaction". *Indian Geotech. Eng.*, 29(2): 1-20.
- Zhan, J., Chen, J., et al. 2024. "In situ investigation on pore-water pressure response during vibratory pile driving with high frequency". *Acta Geotech.*, 19(5): 2649-2668.