تراکم دینامیکی: روشی مؤثر برای مقابله با پدیده روان‌گرایی، بررسی موردی: پروژه حوض خشک مجتمع کشتی‌سازی فرا ساحل ایران

یاسمین السادات هادیان، پیمان رضایی: دانشگاه هرمزگان

تاریخ: دریافت ۸٤/۱۲/۲۲ پذیرش ۸٦/۱۱/۱۰

چکیده

یکی از علل اصلی خرابی‌ها در هنگام زلزله و زمان اعمال نیروهای شدید، گسیخته شدن زمین است. گسیختگی زمین ممکن است به واسطه وجود ترک‌ها و شکاف‌ها، حرکاتی مانند خزش و یا از دست دادن مقاومت زمین به وقوع بپیوندد. پدیدهٔ از دست دادن مقاومت زمین در زمین‌های ماسه‌ای، ممکن است به دلیل افزایش فشار آب حفره‌ای روی دهد و این پدیده سیلان یا روان‌گرایی خاک نامیده می‌شود. یکی از روش‌های به‌سازی خاک برای افزایش مقاومت در هنگام اعمال بارهای دینامیکی، فرآیند تراکم دینامیکی است. معمولاً طراحی و کاربرد تراکم دینامیکی تا حد زیادی بر اساس ارزیابی‌های مهندسی و اجرای آن به صورت آزمایشی انجام می‌شود. تراکم دینامیکی یک طراحی فعال است که در حین اجرا با توجه به واکنش زمین در برابر ضربات وارده نیاز به بازنگری و اصلاح روش دارد. گسترهٔ مورد بررسی بر روی رسوبات ساحلی کواترنری در منتهی‌الیه جنوب غربی زاگرس چین‌خورده قرار دارد. در مناطق۱۲گانه بستر کارخانجات تعمیر و ساخت کشتی مجتمع کشتی‌سازی و صنایع فراساحل ایران واقع در۴۰ کیلومتری غرب بندرعباس، برای مقابله با پدیدهٔ روان‌گرایی از روش تراکم دینامیکی استفاده شده است. در حین اجرای مراحل مختلف تراکم دینامیکی، مشکلاتی از قبیل : تراوش آب در محل گمانه‌ها، تورم زمین‌های اطراف گمانه‌ها و تراوش آب در مرحلهٔ اتوکشی به‌وقوع پیوست. برای مقابله با آن‌ها این راه‌کارهای پیشنهاد می‌شود:۱. تخلیهٔ آب از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

درون گمانه‌ها با پمپ، ۲. انجام عملیات تراکم دینامیکی در دو مرحله به همراه در نظر گرفتن زمان کافی بین مراحل اعمال ضربات، ۳. لجن‌برداری زمین‌های اطراف و ریختن مخلوط درشت‌دانه و در نهایت، در صورت نیاز زه‌کشی نسبتاً عمیق در ناحیه وسیع.

واژه‌های کلیدی : تراکم دینامیکی، روان‌گرایی، آزمایش SPT.

مقدمه

یکی از روش‌های به‌سازی خاک، تراکم دینامیکی است. این روش با سقوط آزاد وزنه‌های سنگین از ارتفاع مشخص انجام می‌شود. در مجتمع کشتی‌سازی فراساحل خلیج فارس از این روش برای به‌سازی بستر کارخانجات تعمیر و ساخت کشتی مجاور حوض خشک به تفکیک نواحی ۱۲گانه به مساحت کل۷۰ هکتار استفاده شده است. بررسی ژئوتکنیکی که در دی ماه سال۸۲ به‌عمل آمد، حاکی از وجود لایه‌های رس سیلتی، ماسه سیلتی و شن- ماسه سیلتی به ضخامت متوسط ۲۰ تا۳۰ سانتی‌متر است که بر روی لایهٔ ماسه سیلتی واقع شده و آب زیر زمینی در فاصله۲الی۵ متری از سطح زمین قرار دارد. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند که لایه‌های ماسه سیلتی از عمق حدود۹ متری در اثر وقوع زلزله مبنای طرح دچار پدیده روان‌گرایی شده و انجام اقداماتی جهت به‌سازی این لایه‌های خاک به منظور جلوگیری از وقوع این پدیده ضروری است[۱]. به طور مشخص، اجرای پروژه روی آبرفت طبیعی به علت نشست غیرمتعارف پی‌ها،ماهیت رمبنده خاک و احتمال وقوع پدیدهٔ روان‌گرایی به‌هیچ وجه ایمن نیست. استفاده از پی‌های عمیق به‌طور گسترده نیز به علت هزینهٔ زیاد آن غیراقتصادی است. از این‌رو اصلاح کیفیت خاک برای جلوگیری از نشست غیرمتعارف، از بین بردن رمبندگی و روان‌گرایی ضروری است.

در این مقاله روش تراکم دینامیکی که در بستر کارخانه‌های تعمیر و ساخت کشتی مجتمع کشتی‌سازی و صنایع فراساحل ایران در نواحی ۱۲گانه‌ای که در شکل۲ آورده شده است، به مساحت کل۷۰ هکتار برای به‌سازی خاک مورد استفاده قرار گرفته است، بررسی خواهد شد. ابتدا شرایط ژئوتکنیکی مطرح خواهد شد؛ سپس با بیان علت انتخاب روش تراکم دینامیکی از

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

بین انواع روش‌های به‌سازی به تعیین عمق مؤثر به‌سازی، الگوی تراکم دینامیکی پیشنهادی، شرح آزمایش‌های انجام شده و نتایج حاصل از آن‌ها، تحلیل روان‌گرایی و تأثیر تراکم دینامیکی در کاهش پتانسیل روان‌گرایی و مشکلات مشاهده شده در حین انجام عملیات تراکم دینامیکی خواهیم پرداخت.

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی

مجتمع کشتی‌سازی و صنایع فرا ساحل ایران در۴۰ کیلومتری غرب بندر عباس واقع است (شکل۱). گسترهٔ بررسی شده منطقهٔ ۴ از نواحی۱۲ گانه بستر کارخانه‌های تعمیر و ساخت کشتی به مساحت کل۷۰ هکتار است.

سواحل ایرانی خلیج فارس و جزایر آن جزیی از رشته کوه زاگرس است. محدودهٔ بررسی شده نیز با توجه به تقسیم‌بندی واحدهای رسوبی- ساختمانی ایران در منطقهٔ زاگرس چین‌خورده واقع شده است. مجتمع کشتی‌سازی و صنایع فرا ساحل ایران در دشتی مسطح در مجاورت خلیج فارس بر روی رسوبات ساحلی کواترنری قرار گرفته است. در بالادست آن و در فاصلهٔ ۳ کیلومتری، سازند آغاجاری(میوسن پیشین- پلیوسن)(تناوب ماسه سنگ-گل سنگ قرمز تا قهوه‌ای) و سری رسوبی هرمز(پرکامبرین پسین- کامبرین پیشین)(شامل سنگ نمک، سنگ گچ، آندزیت، ریولیت، سنگ‌های آذر آواری،سنگ آهک و سنگ دولومیت) رخ‌نمون دارند. سری هرمز به شکل گنبد نمکی گچین، اشکال ناهمواری در این گستره را به شدت تحت تأثیر قرار داده است. گستردهٔ بررسی شده در دشتی ساحلی متشکل از رسوبات عهد حاضر قرار دارد. بر اساس نقشهٔ خطوط زمین‌لرزه در ایران، حداکثر معادل g ۳۴/. برای دوره بازگشت۵۰ ساله پیشنهاد شده است که وضعیت محل مورد بررسی مناسب با شتاب طرح معادل g ۰/۳ است. این منطقه بر اساس آیین‌نامهٔ طرح ساختمان‌ها در برابر زلزله وضعیت «با خطر نسبی زیاد» دارد.

بررسی‌های ژئوتکنیکی

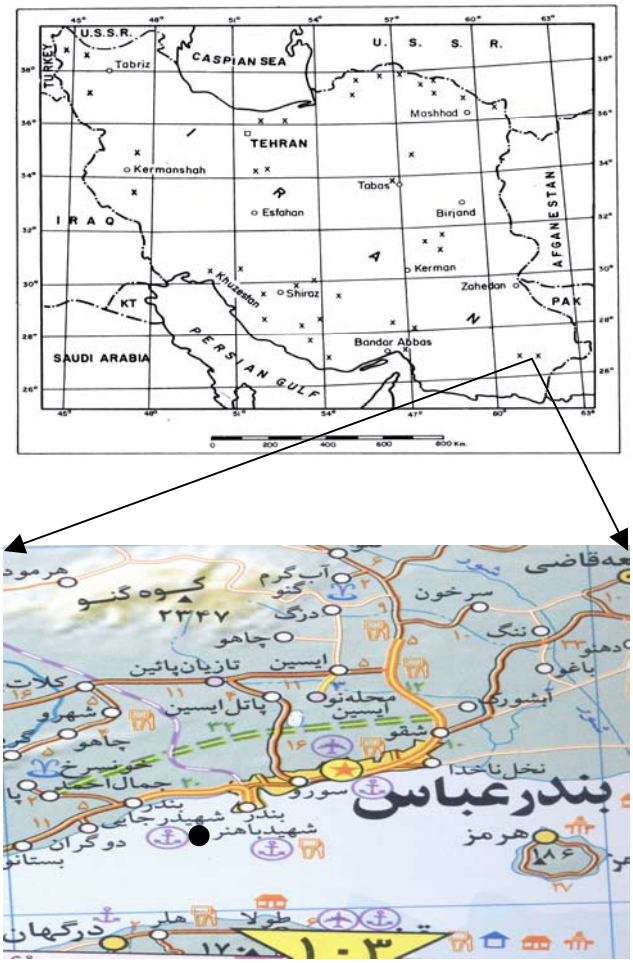
شکل۲ نمایی ازطرح کلی مناطق ۱۲گانه کارخانه‌های تعمیر وساخت کشتی مجتمع کشتی‌سازی وصنایع فراساحل ایران در مجاورت حوض خشک است. طبق بررسی‌های

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

ژئوتکنیک که مشاوران عمران راهوار در سال۸۲ اجام داده‌اند، وضعیت عمومی لایه‌بندی خاک در محل پروژه بدین شرح است:

- مخلـوط ماسـه سـیلت‌دار و رس سیلت‌دار سبزرنگ به ضخامت حدود ۳ متر (تا عمق حدود ۳ متری)
- تـناوب لایه‌های ماسه سیلت‌دار و سیلت ماسه‌دار به ضخامت حدود ٤ متر(عمق حدود ۳ تا ۷متری)



شکل۱. موقعیت جغرافیایی مجتمع کشتی‌سازی و صنایع فراساحل ایران[۳]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

- لایه سنگی به ضخامت متوسط ۲۰ سانتی‌متر (حدود ۷ متری)
- لایـه ماسه‌ای سیلت‌دار سبزرنگ (بعضاً شن‌دار) به ضخامت حدود ۲ متر(حدود ۷ تا ۹ متری)
- لایه رس سیلتی همراه با لجن به ضخامت حدود ۸ متر (از ۹ متری تا ۱۷ متری)
- ماسه سیلتی قرمز رنگ تا انتهای گمانه‌ها(بیش از ۱۷ متری).

شکل۳ موقعیت گمانه و چاله‌های دانستیه (چگالی)(Density) در جا در منطقهٔ ٤ را نشان مـی‌دهد و در شکل٤ یک مقطع ژئوتکنیکی از ناحیهٔ تراکم دینامیکی شده درمنطقهٔ ٤ رسم شده است(مقطع A-A).

علل انتخاب تراکم دینامیکی برای به‌سازی زمین

امروزه، روش‌های متعددی برای اصلاح خاک متداول است. این روش‌ها شامل تراکم دینامیکی، تحکیم با پیش بارگذاری، تزریق، تثبیت خاک با اختلاط، تثبیت حرارتی و روش خاک مسلح است. انتخاب هر یک ازاین روش‌ها بستگی به عوامل متعددی ازجمله نوع خاک وهزینه اقتصادی آن روش دارد.انتخاب تراکم دینامیکی برای به‌سازی لایهٔ ماسه سست، اشباع و تراکم‌پذیر در محدودهٔ مورد نظر به این دلایل مناسب تشخیص داده شد :

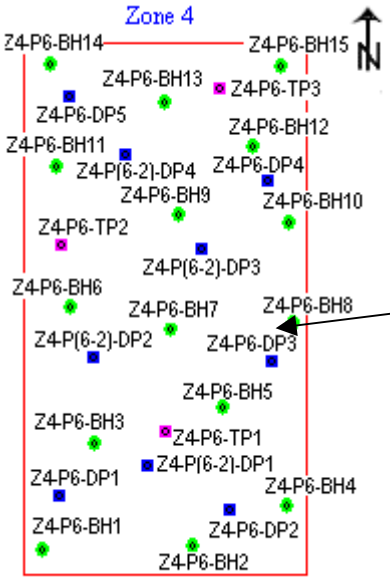
۱. بر اساس آزمایش‌های انجام شده، خاک‌های مستعد روان‌گرایی در محل پروژه، اغلب به صورت ماسهٔ لای‌دار هستند. لوکاس[1](۱۹۹۵) حد بالای مقادیر به‌دست آمده SPT پس از تراکم دینامیکی در پروژه‌های مختلف برای خاک‌های شن و ماسه در محدودهٔ ٤۰-۵۰ و برای خاک‌های لای ماسه‌دار در محدودهٔ ۳٤-٤۵ است(لوکاس۱۹۹۵) که این مقادیر از معیار به‌دست آمده برای حداقل مقدار SPT برای حذف پتانسیل روان‌گرایی بیش‌تر است. این معیار نشان می‌دهد که حداکثر مقدار SPT مورد نیاز در اعماق کم برابر ۱۸ و در اعماق بیش‌تر برابر با ۲۸ است.

۲. منحنی اندازهٔ ذرات مناسب بودن دانه‌بندی مصالح را برای به‌سازی به روش تراکم دینـــامیکی تأیید می‌کند. با توجه به شکل ۵ که میشل[2](۱۹۸۱)[۸] ارائه کرده است،

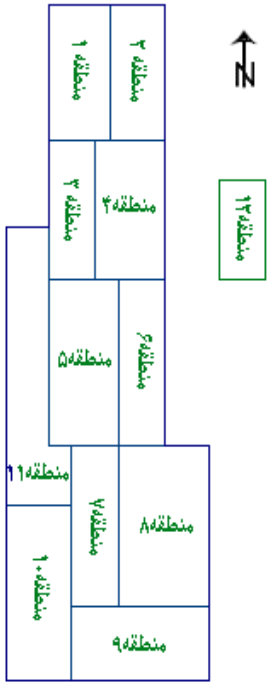
1.Lukas 2. Mitchell

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

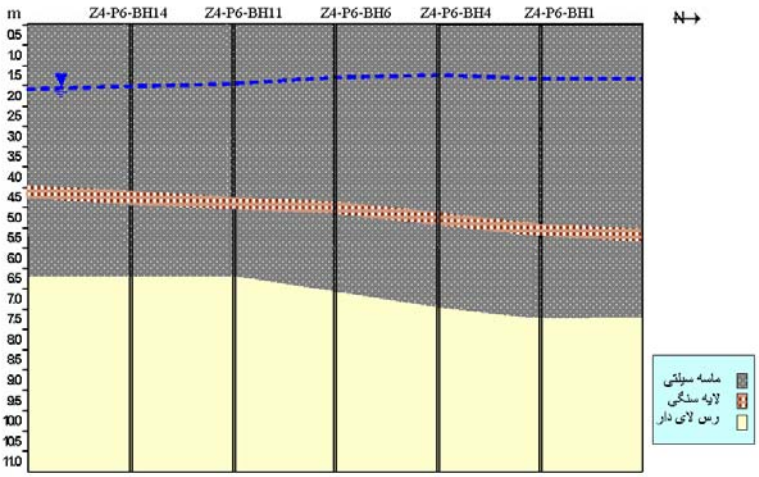
[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]



شکل ۳. پلان موقعیت گمانه‌ها و چاله‌های دانستیه در جا در منطقه ۴



شکل ۲. سایت پلان مناطق ۱۲ گانه کارخانجات تعمیر ساخت کشتی مجتمع کشتی‌سازی و صنایع فراساحل ایران



شکل ٤. مقطع زمین‌شناسی A-A (موقعیت مقطع در شکل ۳ نشان داده شده است) [۱]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

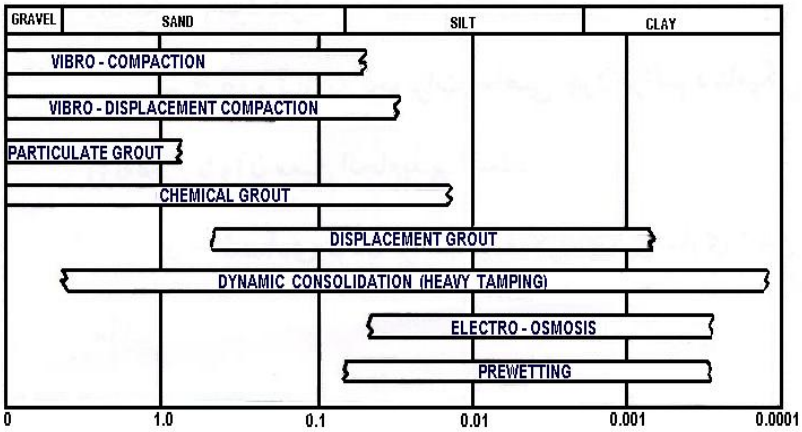
مناسب بودن تراکم دینامیکی با توجه به اندازهٔ ذرات در این پروژه تأیید می‌شود. شکل ٦ کاربرد تراکم دینامیکی برای به‌سازی خاک‌های مختلف همراه با پوش دانه بندی ماسه لای‌دار بالایی در پروژه مجتمع کشتی‌سازی فراساحل را نشان می‌دهد. با توجه به اشباع بودن و شاخص خمیری صفر این لایه و با توجه به جدول۱ که لوکاس(۱۹۹۵) ارائه کرده است، این مصالح در محدودهٔ عالی و مناسب از نظر کاربرد تراکم دینامیکی برای به‌سازی قرار می‌گیرند.

۳. وسعت زیاد منطقه استفاده از روش‌های سریع به‌سازی را ایجاب می‌کند و این سرعت زیاد در تراکم دینامیکی وجود دارد.

٤. عدم نیاز به تجهیزات خاص، تراکم دینامیکی با جراثقالی با ظرفیت مشخص و وزنه‌هایی با وزن معین انجام‌پذیر است.

۵. اقتصادی بودن تراکم دینامیکی برای به‌سازی زمین در مقایسه با سایر روش‌های به‌سازی عمیق خاک.

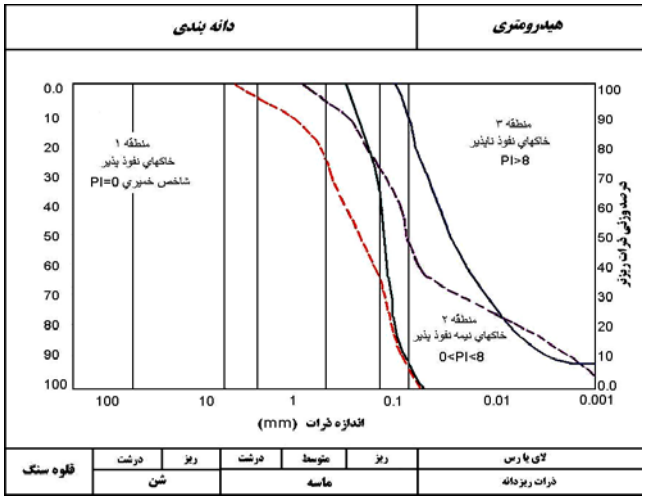
٦. نتایج آزمایش‌های چگالی قبل وبعد از تراکم نشان می‌دهد که عملیات تراکم دینامیکی باعث بهبود شرایط خاک و افزایش متوسط دانسیته خشک خاک شده است.



شکل ۵. روش‌های مختلف به‌سازی در رابطه با اندازهٔ ذرات[۸].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]



شکل ٦. پوش منحنی دانه‌بندی ماسه لای‌دار (پروژه مجتمع کشتی‌سازی فراساحل هرمزگان) همراه با بخش‌های سه‌گانه که لوکاس ارائه کرده است در مورد مناسب بودن تراکم دینامیکی با توجه به اندازهٔ ذرات، شرایط اشباع و شاخص خمیری [۱]

جدول۱. مناسب بودن مصالح برای کاربرد تراکم دینامیکی با توجه به اندازه ذرات، نفوذ پذیری، شاخص خمیری، خشک و یا اشباع بودن خاک [۷]

مناسب بودن تراکم دینامیکی	درجه اشباع	نفوذ پذیری	نوع خاک
عالی	بالا	$> 2\times10^{-4}$	خاک‌های نفوذ پذیر، اندازه ذرات بین قلوه سنگ تا ماسه بدون مصالح ریز دانه،منطقه ۱
عالی	پائین		
خوب	بالا	$> 2\times10^{-4}$	خاک‌های نفوذپذیر شامل حداکثر ۳۵ درصد لای، بخش ریز دانه منطقه ۱
عالی	پائین		
مناسب	بالا	2×10^{-6} تا 2×10^{-4}	خاک‌های نیمه نفوذپذیرلای با مقدار ماسه و کمتر از ۲۵ درصد رس،PI < ۸، منطقه۲
خوب	پائین		
توصیه نمی‌شود	بالا	$< 2\times10^{-6}$	خاک‌های نفوذ نا پذیر، رس با PI > ۸، منطقه ۳
مناسب-اگردرصد رطوبت کمتر از حد خمیری	پائین		

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

در این رابطه D عمق تأثیر بر حسب متر W وزن کوبه بر حسب تن و H ارتفاع سقوط بر حسب متر است. n ضریبی است که با استفاده از اطلاعات تجربی به‌دست می‌آید. مطابق توصیه لوکاس(۱۹۹۵) برای خاک‌های نیمه نفوذپذیر با درجهٔ اشباع بالا مقدار n در محدودهٔ ۰/۳۵–۰/۴۰ و برای خاک‌های نیمه نفوذپذیر با درجهٔ اشباع پایین در محدودهٔ ۰/۴۰ –۰/۵۰ قرار می‌گیرد. در این پروژه، با توجه به نمودار چاه‌پیمایی گمانه‌های حفاری شده و تراز آب در شرایط فعلی، مقدار n برابر با ۰/۴۲ در نظر گرفته می‌شود. بدیهی است که مقدار واقعی n برای شرایط پروژه با تحلیل نتایج به‌دست آمده از عملیات تراکم دینامیکی آزمایشی تعیین خواهد شد. برای عملیات تراکم دینامیکی آزمایشی ٤ الگوی مختلف به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

شماره الگوی کوبش	۱	۲	۳	٤
وزن کوبه (تن)	۱۸	۱۸	۲۰	۲۰
ارتفاع متوسط (متر)	۲۰	۱۵	۲۰	۲۵

میزان عمق تأثیر محاسبه شده برای هر یک از الگوهای ذکر شده بدین قرار است:

شماره الگو	۱	۲	۳	٤
عمق تأثیر (متر)	۷/۹۰	٦/۹۰	۸/٤۰	۹/۳۰

بر اساس توصیه لوکاس(۱۹۹۵) مقدار انرژی لازم در واحد حجم برای اصلاح خاک‌های نیمه نفوذپذیر بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ کیلوژول بر متر مکعب است. بر این اساس، مقدار انرژی مورد نظر در این پروژه برابر با ۳۰۰ kJ/m و یا عبارت دیگر ۵۰٪ میزان انرژی پروکتور استاندارد در نظر گرفته می‌شود. با ضرب کردن این انرژی در عمق تأثیر متناظر با هر الگوی کوبش، میزان انرژی در واحد سطح (AE) برای هر الگو به‌دست می‌آید:

شماره الگو	۱	۲	۳	٤
انرژی در واحد سطح AE (ton/m^2)	۲۳۹	۲۰۷	۲۵۲	۲۸۲

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

فاصله بین نقاط اعمال ضربه در روش تراکم دینامیکی معمولاً بین ۱/۵ تا ۲/۵ برابر قطر کوبه است. در عین حال بر اساس تحقیق چاو[3] و همکاران(۱۹۹۲)[٤] میزان بهینهٔ فاصلهٔ نقاط اعمال ضربه برابر با ۲/۱ برابر قطر کوبه است. در این پروژه قطر کوبه برابر با ۲/۲ متر در نظر گرفته شده و بنا بر این فاصله نقاط اعمال ضربه بین ۳/۳ متر تا ۵/۵ متر و مقدار بهینه آن برابر با ٤/٦ متر به‌دست می‌آید. انرژی وارد شده در واحد سطح در روش تراکم دینامیکی از این رابطه به‌دست می‌آید:

$$AE = \frac{W \cdot H \cdot N \cdot P}{S^2}$$

در این رابطه W وزن کوبه، H ارتفاع سقوط، N تعداد ضربات، P تعداد مراحل اعمال ضربه و S فاصله بین نقاط اعمال ضربه است. با معلوم بودن مقادیر S, AE , H, W می‌توان حاصل ضرب P و N را از رابطه ذکر شده برای الگوهای پیشنهادی به‌دست آورده و N و P را تعیین نمود:

شماره الگو	۱	۲	۳	٤
N×P	١٤	١٦/٢	١٣/٣	١١/٩
N	۷	۸	۷	٦
P	۲	۲	۲	۲

از سوی دیگر در مکان‌هایی که نمی‌توان با انجام مرحله اتوکشی نقاط بین شبکه را با اعمال ضربات اصلاح کرد، باید ضرباتی در طی فاز دوم عملیات تراکم دینامیکی بر این نقاط وارد شود که البته این مسئله پس از تحلیل نتایج حاصل از عملیات تراکم دینامیکی آزمایشی فاز اول و ارزیابی مهندسی مورد بررسی قرار گرفته و تعیین خواهد شد[۱].

آزمایش SPT[4]

دو مفهوم اصلی از پدیدهٔ روان‌گرایی در مسائل مهندسی از اهمیت بسیاری برخوردار است: ۱. شرایط شروع این پدیده که تحت عنوان تحلیل روان‌گرایی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و مقاومت سیکلی خاک نقش عمده‌ای در ارتباط با پدیدهٔ فوق ایفا می‌کند. ۲. عوارض متعاقب روان‌گرایی که با آن‌چه معروف به تحلیل پایداری بعد از زلزله است، مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد و مقاومت ماندگار خاک در این زمینه بیش‌ترین نقش را دارد. در مباحث ارائه شدهٔ

3. Chow 4. standard penetration test

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

ایشیهارا[5](۱۹۸۵) مراحل تحلیل روان‌گرایی خاک که در حال حاضر مبتنی بر استفاده از نتایج آزمایش‌های محلی در عمق لایه‌ها است، کاربرد این روش برای تعیین نشست‌های به‌وجود آمده حائز اهمیت است. شناخت مقاومت ماندگار خاک نیازمند ارزیابی کامل‌تری از رفتار زهکشی نشدهٔ خاک است که تحت تأثیر رفتار ماسه انقباضی[6] یا اتساعی[7] است. معیارهای خاص آزمایشگاهی برای رفتار انقباضی یا اتساعی ماسه بر حسب پارامترهای محلی خاک از قبیل عدد نفوذ استاندارد در آزمایش SPT و یا qc در آزمایش CPT معرفی و تبیین می‌شود. همچنین روابط تجربی مناسبی بین مقاومت ماندگار و پارامترهای محلی خاک وجود دارد که سازگاری مناسبی با گسیختگی و سیلان را در موارد متعددی که در زلزله‌های اخیر مناطق مختلف به وقوع پیوسته است نشان می‌دهد[۱].

به علت کیفیت بالای نمونه‌های دست نخورده، معمولاً سعی بر این است که حتی الامکان از آزمایش‌های محلی استفاده شود. به همین علت استفاده از آزمایش SPT از جمله متداول‌ترین آزمایش‌ها در ایران است. آزمایش دستگاه و نفوذ استاندارد از جمله روش‌های متداول در جهان و ایران برای پیش بینی روان‌گرایی است.

عملیات اصلاح خاک باید به نحوی انجام پذیرد که دانسیتهٔ خاک و در نتیجه آن عدد نفوذ استاندارد SPT متناظر با آن را تا حدی که مانع روان‌گرایی خاک شود افزایش دهد. بنا بر این، باید مقدار حداقل SPT مورد نیاز که رسیدن به آن موجب حذف پتانسیل روان‌گرایی خاک می‌گردد، در اعماق مختف تعیین شود. با استفاده از رابطه‌های سید[8] و همکاران(۱۹۸٤) [۸] می‌توان مقدار SPT را به نحوی محاسبه کرد که مقدار ضریب اطمینان روان‌گرایی بیش از ۱ شود. با انجام این تحلیل، معیار حداقل مقدار SPT مورد نیاز برای رفع پتانسیل روان‌گرایی برای تراز آب زیرزمینی در عمق ۱/۰ متری به‌دست آمده است. این معیار نشان می‌دهد که حداکثر مقدار SPT مورد نیاز در اعماق کم برابر ۱۸ و در اعماق بیش‌تر برابر با ۲۸ است. لازم به ذکر است که مقادیر SPT معیار مذکور علاوه بر اصلاحات معمول، برای درصد ریزدانه خاک نیز اصلاح شده‌اند. همچنین خاطر نشان می‌گردد که با رسیدن به مقادیر SPT معیار ذکر شده، مقادیر ظرفیت باربری مورد نیاز پروژه نیز تامین خواهد شد. بر اساس مرجع لوکاس

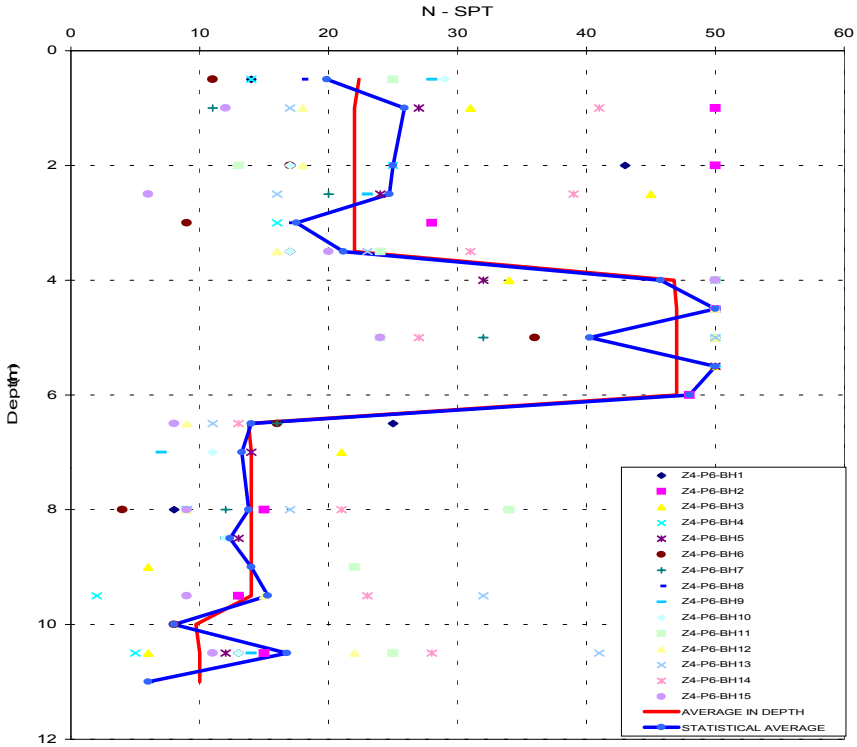
5. Ishihara 6. contractive 7. dilative 8. Seed

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

(۱۹۹۵)حد بالای مقادیر به‌دست آمدهSPT پس از تراکم دینامیکی در پروژه‌های مختلف برای خاک‌های شن و ماسه در محدوده٤۰-۵۰ و برای خاک‌های لای ماسه‌دار در محدوده ۳٤-٤۵ بوده است که این مقادیر از معیار به‌دست آمده فوق برای حداقل مقدار SPT برای حذف پتانسیل روان‌گرایی بیش‌ترند.

در شکل۷، مقادیر SPT به‌دست آمده از نمودار چاه‌پیمایی گمانه‌ها به همراه مقدار میانگین آماری و میانگین منطقه‌ای ارائه شده است. از مقادیر میانگین منطقه‌ای برای محاسبه مدول تغییر شکل خاک استفاده شده است. تفاوت منحنی‌های متوسط SPT با میانگین آماری احتمالاً به دلیل ناهمگنی خاک محل و خطاهای به‌وجود آمده در آزمایش SPT در اثر وجود قطعات سنگ است.



شکل ۷. نمودار تغییرات اعداد SPT متوسط بر حسب عمق در گمانه‌های حفرشده پس از تراکم دینامیکی در منطقه ٤(رجوع شود به شکل ۳)

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

تحلیل روان‌گرایی

روش‌های مختلفی برای بررسی و ارزیابی پدیده روان‌گرایی وجود دارند. در همهٔ این روش‌ها، مراحل اصلی ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی عبارت است از: الف) محاسبه تنش برشی تناوبی ایجاد شده در حین زلزله، ب) محاسبه مقاومت برشی تناوبی خاک، ج) مقایسه تنش برشی تناوبی با مقاومت برشی تناوبی و به‌دست آوردن ضریب اطمینان روان‌گرایی.

در ابتدا برای محاسبهٔ تنش برشی تناوبی، پارامتر نسبت تنش تناوب CSR با استفاده از تحلیل پاسخ لایه‌های خاک تحت ارتعاش زلزله و یا به وسیله روش ساده ارائه شده سید و همکاران (۱۹۸٤) [۹]، ازاین رابطه محاسبه می‌شود:

$$CSR = \left(\tau_{av} / \sigma'_0\right) = 0.65\left(\frac{a_{\max}}{g}\right).\left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\right).r_d$$

که در آن a_{max} شتاب افقی حداکثر ناشی از زلزله در سطح زمین، g شتاب ثقل، σ_v تنش کل عمودی، σ'_v تنش مؤثر عمودی و rd ضریب کاهش تنش بر حسب عمق (z) است که در سطح زمین مقدار آن برابر با یک بوده و با افزایش عمق کاهش می‌یابد.

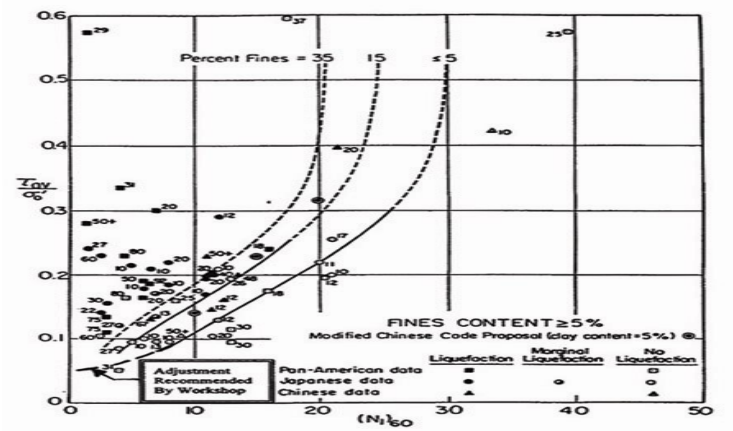
مقاومت برشی تناوبی یا به عبارت دیگر تنش برشی لازم برای افزایش فشار آب حفره‌ای و صفر شدن تنش مؤثر را می‌توان با استفاده از آزمایش‌های صحرایی نظیر آزمایش نفوذ استاندارد SPT محاسبه کرد. روابط متعددی برای محاسبهٔ نسبت مقاومت برشی تناوبCRR با استفاده از عدد SPT اصلاح شده، درصد ریزدانه و بعضاً خواص خمیری خاک ارائه شده است. سید و همکاران (۱۹۸٤)[۹] نمودار نشان داده شده در شکل ۸ را برای محاسبهٔ نسبت مقاومت برشی تناوبی($\tau av / \sigma'0$) ارائه کرده‌اند.

پس از محاسبهٔ نسبت مقاومت برشی تناوبی و نسبت تنش برشی تناوبی، در صورتی‌که نسبت تنش برشی تناوبی بیش از نسبت مقاومت برشی تناوبی باشد، پدیده روان‌گرایی اتفاق خواهد افتاد. در این بخش با استفاده از نتایج آزمایش‌هایSPT انجام شده در گمانه‌های حفاری شده بعد از اجرای تراکم دینامیکی، تحلیل روان‌گرایی با استفاده از روش سید و

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

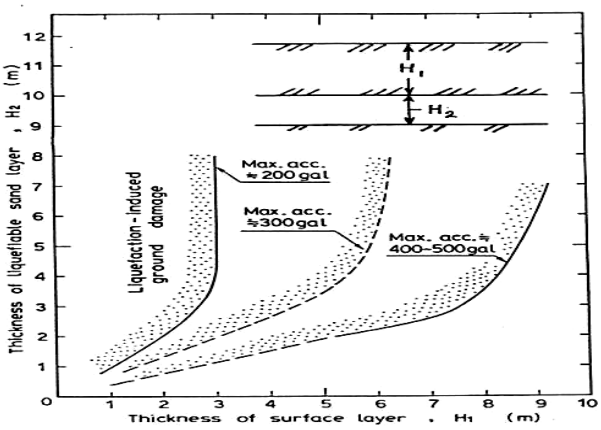
[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

ادریس[9](۱۹۷۱) با فرض وقوع زلزله‌ای به بزرگی۷/۰ و ایجاد شتاب ۰/۳g انجام شده است. بزرگی و شتاب زلزلهٔ مذکور تقریباً معادل زلزله مبنای طرح(DBL) است.



شکل ۸. نمودار سید و همکاران(۱۹۸۴)برای محاسبه نسبت مقاومت برشی تناوبی برحسب عدد SPT اصلاح شده [۹]

ایشیهارا و تاساکا[10](۱۹۸۵)[٥] برای بررسی احتمال بروز آثار تخریبی روان‌گرایی در سطح زمین نمودار نشان داده شده در شکل۹ را ارائه نموده است. H1 ضخامت لایه سطحی غیر روان‌گرا و H2 ضخامت لایه روان‌گرا است. با استفاده از این روش و با در نظر گرفتن حداقل ٦ متر لایه سطحی غیر روان‌گرا و همچنین ضخامت لایه روان‌گرا با فرض زلزله‌ای به شتاب.



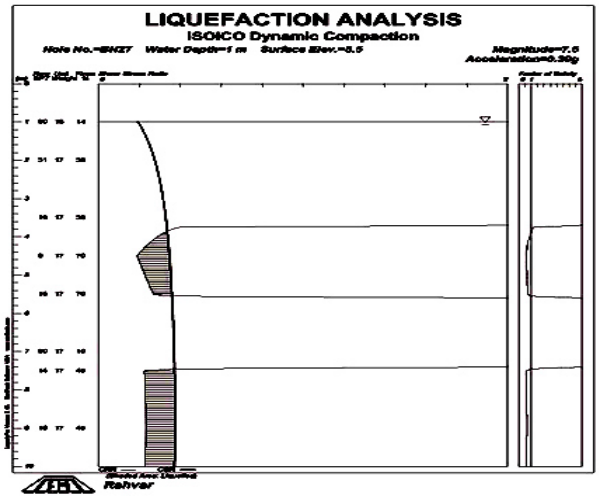
شکل ۹. ارزیابی احتمال بروز آثار تخریبی روان‌گرایی یک لایه واقع شده در زیر یک لایه غیرروان گرا[۹]

9. Idriss 10. Tasaka

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

مبنای طرح برابر با ۰/۳g(۳۰۰ gal)، در اثر وقوع روان‌گرایی در اعماق پایین‌تر آثار تخریبی در سطح زمین بروز نخواهند نمود. ضمن این‌که در این تفسیر اثر لایه سنگ بستر در جلوگیری از بروز آثار تخریبی روان‌گرایی لایه ماسه‌ای زیر آن در نظر گرفته نشده است

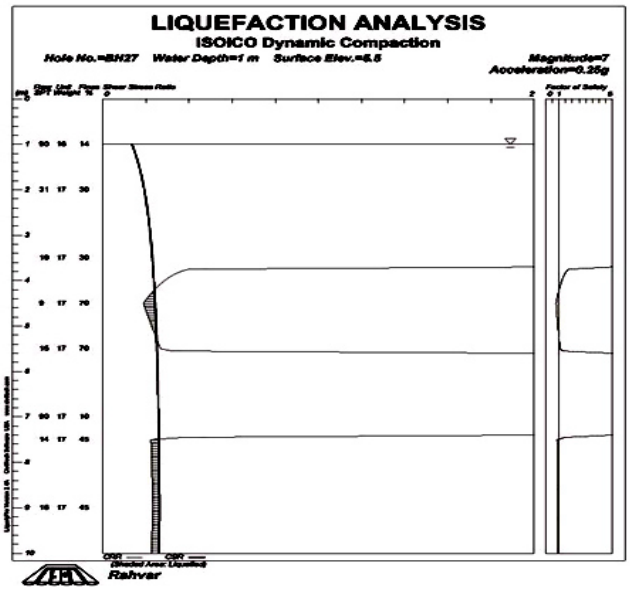
در ادامه، نتیجه تحلیل روان‌گرایی در یکی از گمانه‌های زده شده را به عنوان نمونه می‌آوریم. در کل با استفاده از نتایج آزمایش‌هایSPT انجام شده در گمانه‌های حفاری و همچنین نتایج آزمایش‌های دانه‌بندی انجام شده بر روی نمونه‌های اخذ شده، تحلیل روان‌گرایی با استفاده از روش سید و همکاران(۱۹۸٤) [۹] با فرض وقوع زلزله به شتابg ۰/۳ و بزرگی۷/۵ و قرار داشتن تراز آب در عمق ۱/۰متری انجام شده است. همچنین برای بررسی امکان وقوع پدیدهٔ روان‌گرایی در شرایط وقوع زلزله‌هایی با بزرگی و ایجاد شتاب کوچک‌تر نیز تحلیل‌هایی با فرض وقوع زلزله به بزرگی۷/۰ و ایجاد شتاب g ۰/۲۵ وهمچنین به بزرگی ٦/۵ و ایجاد شتابg ۰/۲۰ انجام شده‌اند که با توجه به نتایج به‌دست آمده از این تحلیل‌ها مشاهده می‌شود در گمانه BH27، لایه‌های ماسه‌ای و سیلتی بالای سنگ بستر و همچنین لایه ماسه‌ای واقع در زیر آن در محدودهٔ روان‌گرا قرار دارند. با کاهش شتاب و بزرگی زلزله بترتیب به ۰/۲۵ و ۷/۰ از ضخامت این ناحیه در قسمت بالای سنگ بستر کاسته شده، ولی ناحیه زِیر آن کماکان در محدودهٔ روان‌گرا باقی مانده است. با کاهش مجدد شتاب و بزرگی زلزله.



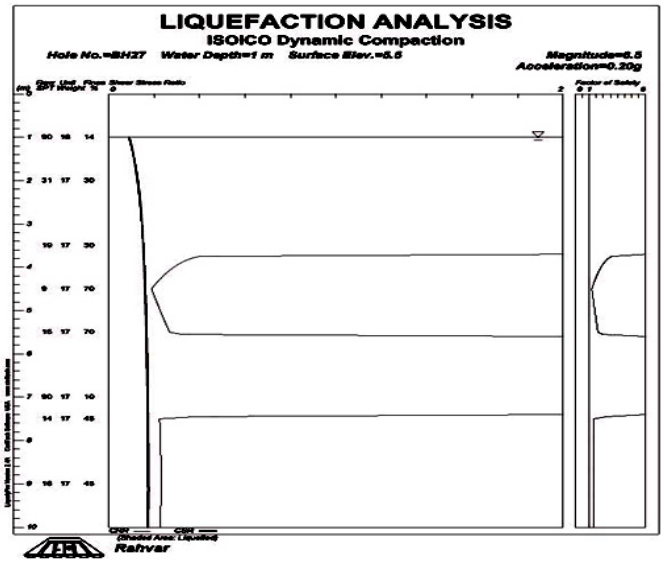
شکل۱۰. نتیجه تحلیل روان‌گرایی گمانهZ4-BH27 با فرض وقوع زلزله به شتاب g ۰/۳ و بزرگی ۷/۰ [۱]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]



شکل ۱۱. نتیجه تحلیل روان‌گرایی گمانه Z4-BH27 با فرض وقوع زلزله به شتاب g ۰/۲۵ و بزرگی ۷/۰ [۱]



شکل ۱۲. نتیجه تحلیل روان‌گرایی گمانه Z4-BH27 با فرض وقوع زلزله به شتاب g ۰/۲۰ و بزرگی ۶/۵ [۱]

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

به‌ترتیب به۰/۲۰ و ٦/٥، کلیه لایه‌های واقع در بالا و پایین سنگ بستر از محدوده روان‌گرا خارج شده‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهند که تراکم دینامیکی موجب کاهش پتانسیل روان‌گرایی گشته و عملیات به‌سازی خاک با استفاده از روش تراکم دینامیکی در این ناحیه موفقیت‌آمیز بوده است.

مشکلات مشاهده شده حین انجام عملیات تراکم دینامیکی و راهکارهای پیشنهادی

با انجام مراحل مختلف عملیات تراکم دینامیکی،مشکلاتی در روند تراکم ایجاد شده‌است که در شکل۱۳ مشاهده می‌شود. برای مقابله با این مشکلات با بررسی آن‌ها در ادامه راهکارهای مناسب بررسی می‌شود :

- تراوش آب در محل گمانه‌ها

در بعضی نقاط پس از پایان اعمال ضربات،از درون برخی از گمانه‌های ایجاد شده،تراوش آب صورت گرفته به نحوی که موجب پرشدن این گمانه‌ها شده است. در این شرایط وجود آب درون گمانه‌ها موجب لجنی شدن سطح زمین و بروز دشواری‌هایی در ادامهٔ کار تراکم دینامیکی و همچنین عدم امکان اجرای مرحله اتوکشی می‌شود. با توجه به این امر، پیشنهاد می‌شود که در حین انجام مرحلهٔ دوم تراکم دینامیکی آب درون گمانه‌هایی که بر اثر تراوش پر شده‌اند، با پمپ تخلیه شود و گمانه‌ها با مخلوط درشت‌دانه پر شوند. با انجام این کار از لجنی شدن زمین که موجب بروز مشکلات زیادی در ادامهٔ اجرای مرحله دوم عملیات تراکم و همچنین مرحله اتوکشی می‌شود جلوگیری به‌عمل خواهد آمد.

- تورم زمین‌های اطراف گمانه‌ها

تورم یا بالا آمدگی زمین در محل بین گمانه‌ها نشانه به‌وجود آمدن تغییرشکل‌های پلاستیک در خاک به همراه به‌وجود آمدن اضافه فشار آب حفره‌ای است. در این شرایط انجام عملیات تراکم در دو مرحله به همراه در نظر گرفتن زمان کافی بین مراحل اعمال ضربات موجب بهبود اثرات تورم زمین می‌شود و از آن‌جا که به هنگام وقوع پدیدهٔ تورم مقداری از انرژی تراکم جذب آب تحت فشار شده و در فرایند تراکم تأثیری نداشته است. پیشنهاد می‌شود در صورت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

وقوع تورم جهت حصول حداکثر کارایی عملیات تراکم دینامیکی، ضربات فاز دوم کوبش در دو مرحله اجرا، و یک ضربه به ضربات مرحله دوم فاز دو تراکم اضافه شود.

- تراوش آب در مرحله اتوکشی

در برخی از نواحی در حین انجام مرحلهٔ اتوکشی، بر اثر انرژی که در این مرحله به زمین وارد می‌شود فشار آب حفره‌ای به صورت موضعی بالا رفته و باعث جاری شدن آب در سطح زمین می‌شود. لذا پیشنهاد می‌شود قسمت‌هایی از زمین اطراف نقاط جوشش ماسه که بر اثر تراوش آب لجنی هستند لجن‌برداری شوند و با مخلوط درشت‌دانه پر شوند.

در صورتی‌که هیچ یک از سه راه حل اشاره شده در بندهای فوق رافع مشکل لجنی شدن و بالا آمدن آب در حین کویش نباشند، استفاده از زهکشی نسبتاً عمیق در ناحیه وسیع مانند ترانشه‌های طولی که با مصالح زهکش مناسب پر می‌شوند، باید بررسی و ارزیابی شوند.

شکل ۱۳.تصاویری از مشکلات مشاهده شده در پروژه در حین انجام عملیات تراکم دینامیکی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

نتیجه‌گیری

با توجه به این‌که پدیده روان‌گرایی یکی از عوامل خرابی سازه‌ها در حین زلزله در مناطق با خاک دانه‌ای سست و اشباع است انجام به‌سازی خاک با استفاده از روش‌های مناسب الزامی است. با توجه به موارد مذکور، این نتایج قابل توجه است:

مصالح موجود در محل پروژه ومعیار SPT، مناسب بودن روش تراکم دینامیکی را از میان روش‌های اصلاح خاک تأیید می‌کند.

تراکم دینامیکی موجب کاهش پتانسیل روان‌گرایی مقادیرSPT در اعماق حدود ۴/۵ متر کاهش رفته، که به نظر می‌رسد به دلیل وجود آب در این عمق و جذب انرژی ضربه توسط آن است.

در مقایسه با سایر روش‌ها روش اصلاح خاک با تراکم دینامیکی از ارزان‌ترین روش‌ها است.

با افزایش مصالح ریزدانه از عمق به‌سازی کاسته می‌شود، ولی خطر روان‌گرایی به علت حضور ریزدانه‌ها کاهش می‌یابد. پس با افزایش درصد مصالح ریزدانه شدت انرژی لازم برای رسیدن به انرژی اشباع افزایش می‌یابد، اما میزان نشست‌پذیری ناشی از کوبش کاهش می‌یابد.

تراکم دینامیکی روشی فعال است که در حین انجام پروژه، با توجه به رفتار زمین در برابر ضربات وارده، نیازبه اصلاح و بازنگری دارد.

در نهایت، برای حل جامع یک مسئلهٔ پیچیده در محیط خاک نظیر روان‌گرایی، بررسی‌های رفتار تنش- کرنش و سایر خواص خاک تنها یک جنبه از کار است و در کنار آن آگاهی از مبانی زمین‌شناسی مهندسی، تحقیقات آزمایشگاهی و صحرایی، ارزیابی اقتصادی و در نهایت تجربه و قضاوت مهندسی هم باید مورد توجه قرار گیرد.

منابع

۱. مهندسین مشاور پژوهش عمران راهوار، *"گزارش مطالعات ژئوتکنیک و تحلیل روان‌گرایی پس از تراکم دینامیکی"*، سال ۸۳، گزارش شماره ۱۱،۱۰،۲.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]

۲. میرحسینی، سید مجدالدین، " *دینامیک خاک* "، سال ۷۲، انتشارات موسسه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.

۳. موسسه گیتا شناسی، اطلس راه‌های ایران، ۱۳۸۴، ۴۲۵ص.

4. Chow, Y.K., Yong, D.M., Yong, K. Y. and Lss, S.L. "Dynamic compaction analysis," *J. of Geot. Engrg., ASCE*, Vol. 118, No. 8 (1992 a) 1141-1157

5.Ishihara , k ,Tassaka , F. " uadrained Deformation and liquifaction of sand undecydic stresses " *soil and fundation* Vol15 , No.1(1985).

6. Lukas,R.G,"Dynamic Compaction for Highway Construction" Vol.1,Design and Construction Guidelines,Federal Highway Administration, Office of Research and Development, U.S.D.O.T Washington,D.C. Report No. FHWA/RD -86/133,July(1986).

7.Lukas,R.G. "Dynamic Compaction engineering Consideration" Geotechnical special publication,Vol.2,No30, pub 1. by ASCE, NewYork, (1992) 940-953

8.Mitchell,J.K "Soil improvement :state-of-the-art", proc.10th. ICSFME. Stochholm ,Vol 4(1981) 509-565.

9. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, I. F., Chung, R. M., "The Influence of SPT Procedures in soil liquefaction resistance evaluation", Earthquake Engineering Research Center Report No. UCB/EERC-84/15, University of California Berkeley(1984).

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1386.2.2.6.8]