

مطالعه‌ی رفتار ماسه‌ی بندرانزلی به‌کمک نتایج آزمایش‌های تانک شفاف و میز لرزه

امیر آصفی (کارشناس ارشد)

ابوالفضل اسلاهی (دانشیار)

میراحمد لشته نشانی (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه گیلان

در نوشتار حاضر برای شناخت خصوصیات رفتاری ماسه‌ی بندرانزلی، تحت لرزه و ارزیابی پتانسیل روان‌گرایی، با توجه به مطالعات گذشته و اطلاعات مربوط به گمانه‌های حفرشده، نهشته‌های سطحی منطقه بررسی و ارزیابی شدند. سپس، برای بررسی رفتار ماسه‌ی این منطقه تحت نیروهای ارتعاشی مشابه زلزله، دستگاهی از جنس پلاستیک شفاف شامل محفظه‌ی قرارگیری توده‌ی ماسه، میز لرزه و سیستم اعمال زه آب ساخته شد. این دستگاه از قابلیت ارتعاش توده‌ی خاک با فرکانس‌ها و دامنه‌های ارتعاش متفاوت، اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ی توسط پیژومترهای تعبیه‌شده در دیواره‌ی تانک شفاف، اعمال نیروی زه آب برای مدل‌کردن زه‌کشی در پروفیل دلخواه خاک، و نیز بررسی پدیده‌ی جوشش ماسه به‌عنوان یکی از عوارض روان‌گرایی برخوردار است. پس از تکمیل و کالیبراسیون دستگاه، آزمایش‌هایی برای بررسی رفتار ماسه‌ی بندرانزلی با تراکم‌های مختلف در حالت استاتیکی به‌کمک زیرفشار و جوشش ماسه‌ی، و در حالت دینامیکی تحت ارتعاش با شتاب‌های مختلف معادل $0.15g$ تا $0.3g$ و با چگالی‌های متنوع انجام شد. به‌کمک نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، شرایط متفاوت برای وقوع روان‌گرایی و ناپایداری از جنبه‌ی کمی و کیفی مورد بررسی قرار گرفت.

واژگان کلیدی: روان‌گرایی، ماسه‌ی انزلی، میز لرزه، تانک شفاف، ماسه‌ی شل اشباع.

۱. مقدمه

پدیده‌ی روان‌گرایی ماسه بیشترین خسارات را در نیگاناتای ژاپن و آلاسکا به بار آورده است. زلزله‌ی سال ۱۹۶۴ ژاپن به بزرگی ۷٫۵ ریشتر بوده و با این که مرکز آن حدوداً ۵۵ کیلومتری شهر نیگاتا قرار داشته، سبب روان‌گونه‌شدن خاک بخش وسیعی از این شهر شد و خسارات زیادی نیز بر جای گذاشت. بعد از این رخداد، توجه بسیاری از محققین در سراسر دنیا به شناخت ابعاد مختلف این پدیده معطوف شد. پدیده‌ی روان‌گرایی در ایران برای اولین بار در زلزله‌ی سال ۱۳۶۹ رودبار منجیل در استان گیلان (در شهرستان آستانه‌ی اشرفیه و روستاهای اطراف) مورد مشاهده قرار گرفت و ثبت علمی شد. پدیده‌ی روان‌گرایی در این منطقه به‌صورت نشست زمین به‌صورت متقارن یا نامتقارن، ایجاد ترک‌های عریض و طولی در سطح زمین، و تورم همراه با خروج ماسه بروز یافت که هرکدام به‌نحوی به تخریب یا آسیب ساختمان‌ها، تأسیسات شهری و بین شهری انجامیدند [۳۲].

بندرانزلی مهم‌ترین بندر شمالی کشور است و با توجه به خصوصیات برجسته‌ی این منطقه -- از جمله مبادلات تجاری، نزدیکی به ذخایر نفت گاز خزر، امکانات

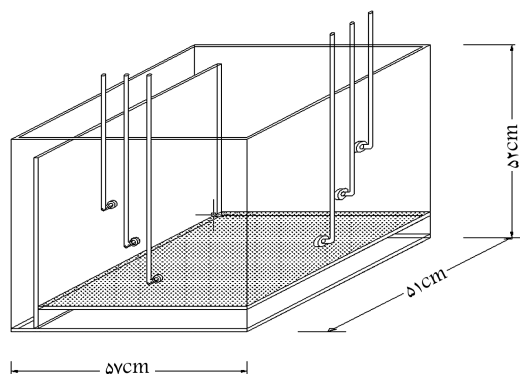
تاریخ: دریافت ۱۳۸۵/۸/۷، داوری ۱۳۸۶/۳/۵، پذیرش ۱۳۸۶/۹/۱۴.

am_asefi@yahoo.com
afeslami@aut.ac.ir
maln@gwilan.ac.ir

صیادی و غیره -- انجام ساخت و سازهای فنی در این منطقه ضرورت می‌یابد. با توجه به این که شهر انزلی در بخشی از پهنه‌ی وسیع دشت گیلان و منطقه‌ی ساحلی دریای خزر واقع شده و بخش مهمی از آن را ماسه‌های شل تشکیل می‌دهد و در نزدیکی کانون‌های فعال زلزله قرار دارد، خطر وقوع پدیده‌ی روان‌گرایی در این منطقه زیاد است [۵].

۲. بررسی نهشته‌های سطحی موجود در انزلی

طی بررسی بیش از ۵۰ گمانه‌ی حفرشده در منطقه‌ی بندر انزلی مشاهده شد که وضعیت عمومی لایه‌ی سطحی انزلی، شامل ماسه‌هایی با دانه‌بندی بد SP ، $SM - SP$ و با D_{50} حدود $0.25mm$ تا 1.8 است. لایه‌های ماسه‌ی معمولاً تا عمق ۱۴-۱۰ متری وجود دارند. این لایه‌های ماسه‌ی دربرگیرنده‌ی آثار و بقایای ریشه‌ی درختان در عمق‌های مختلف و صدف‌های متنوع دریایی ناشی از جزر و مد مداوم دریا در این منطقه است. با پیشروی به سمت تالاب انزلی، شاهد رسوبات مردابی و خاک‌های ناشی از تجزیه‌ی گیاهان بین لایه‌های سطحی خواهیم بود و



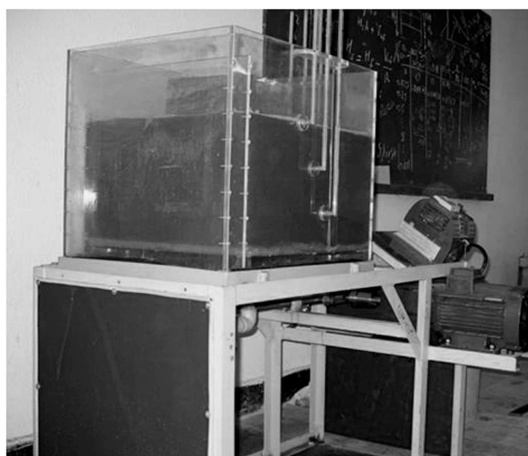
شکل ۱. نمای سه‌بعدی و ابعاد تانک شفاف.

افزایش می‌دهد. این کاهش و افزایش قابل تنظیم است و فرکانس مورد نظر در صفحه‌ی نمایش نشان داده می‌شود؛

- میل لنگ شاتون‌محور که میل‌لنگی فولادی است و با سه خروج از مرکزیت مختلف ۲cm، ۰/۹cm و ۰/۶cm تراشیده شده است. میل‌لنگ به روی شافت الکتروموتور قرار می‌گیرد. شاتون از یک طرف توسط یک پین به میل‌لنگ وصل شده، و از طرف دیگر توسط پین دیگری به محور متصل است. در واقع این قسمت، حرکت دورانی میل‌لنگ را به حرکت رفت و برگشت تبدیل می‌کند؛

- قاب فلزی متحرک و قاب ثابت که تانک شفاف روی آنها قرار گرفته و به وسیله‌ی پین‌هایی در داخل قاب محکم می‌شوند. این قاب فلزی متحرک بر روی چهار بلبرینگ قائم، و مماس با چهار بلبرینگ افقی در داخل قاب ثابت واقع شده و می‌تواند حرکت رفت و برگشت داشته باشد. قاب متحرک توسط یک بوش به محوری متصل شده و به وسیله‌ی این محور به شاتون و میل‌لنگ متصل می‌شود.

(ج) پایه‌ی هیدرولیکی: این قسمت از قابی به ابعاد $120 \times 100 \times 55$ سانتی‌متر تشکیل شده است. الکتروموتور با قدرت ۱/۵ اسب بخار برای اعمال سطح آب در زیر محل قرارگیری تانک شفاف در داخل قاب نصب شده که زه آب را از زیر به داخل تانک شفاف پمپ می‌کند. آب لازم برای انجام آزمایش‌ها در محفظه‌ی ذخیره‌ی آب که در زیر تانک قرار دارد، ریخته و از آن پمپ می‌شود. بر روی لوله، بین الکتروموتور و تانک، ۳ شیر نصب شده که عهده‌دار تنظیم آب ورودی به داخل تانک شفاف و



شکل ۲. تانک شفاف بر روی میز لرزه.

قشر ماسه شامل ماسه‌های شل، با تراکم متوسط و متراکم می‌شوند. در بین لایه‌های ماسه‌یی، میان‌لایه‌های رس و لای با خمیرسانی پایین (ML)، (CL) زیاد مشاهده می‌شود. وزن مخصوص خاک‌های ارگانیک که عمدتاً در اعماق پایین تر دیده شده‌اند اندک است؛ همچنین رطوبت، تخلخل و تراکم‌پذیری آنها زیاد است و حاوی مقدار قابل توجهی (بعضاً در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد) مواد آلی هستند. حجم این خاک‌ها پس از خشک شدن مقدار زیادی کاهش می‌یابد.

۳. معرفی دستگاه تانک شفاف و آزمایشات انجام‌شده

برای بررسی ملموس و عینی‌تر خصوصیات ژئوتکنیکی خاک‌ها -- به خصوص ماسه و پدیده‌ی روان‌گرایی در آن -- دستگاهی با نام «تانک شفاف»، که ملحقات اولیه‌ی آن قاب اعمال نیروی زه آب است، در آزمایشگاه خاک دانشکده‌ی فنی دانشگاه گیلان ساخته شد و از آن برای مدل‌کردن پروفیل خاک با لایه‌های دلخواه برای بررسی جریان آب در خاک و پوشش ماسه، و نیز مشاهده و بررسی کیفی روان‌گرایی ماسه بر اثر بار لحظه‌یی یا ضربه‌یی، جوشش ماسه و به عبارت دیگر روان‌گرایی استاتیکی استفاده می‌شود. پس از آن، برای بررسی رفتار ماسه تحت تأثیر نیروهای ارتعاشی مداوم میز لرزه‌یی ساخته شد که با استفاده از آن تانک شفاف محتوی ماسه‌ی اشباع تحت اثر بارهای سینوسی با فرکانس‌های مختلف قرار می‌گیرد و ضمن آن، روان‌گرایی دینامیکی خاک بررسی می‌شود. در ادامه به تشریح ساختمان و نحوه‌ی عملکرد تانک شفاف و میز لرزه می‌پردازیم.

الف) تانک شفاف: دستگاهی است به شکل مکعب مستطیل روباز، با ابعاد $57 \times 52 \times 51$ cm، از جنس پلکسی‌گلاس (پلاستیک فشرده)، و به ضخامت ۱ سانتی‌متر. این صفحات پلکسی‌گلاس توسط پیچ‌ها و چسب مخصوص به هم متصل و آب‌بندی شده‌اند. در سطح زیرین تانک، مجرایی به شکل لوله برای ورود و خروج آب تعبیه شده است که هنگام ارتعاش تانک شفاف توسط میز لرزه، مجرا آزاد و شیر آن بسته می‌شود.

در بالای صفحه‌ی زیرین به فاصله‌ی ۵ سانتی‌متر صفحه‌ی مشبکی با سوراخ‌های به فاصله‌ی ۱ سانتی‌متر روی پایه‌هایی قرار داده شده و روی آن با الک ۱۰۰ پوشانده شده است که همان نقش فیلتر یا سنگ متخلخل را دارد. به این ترتیب، ورود آب به داخل تانک و اعمال نیروی زه آب از پایین به صورت یکنواخت صورت می‌گیرد؛ از سوی دیگر هنگام تخلیه‌ی آب، ماسه‌ی داخل تانک به سمت بیرون خارج نمی‌شود و فقط آب تخلیه می‌شود.

یک دیواره‌ی اضافی از جنس پلکسی‌گلاس که ارتفاع آن از دیواره‌ی اصلی کوتاه‌تر است، در داخل تانک تعبیه شده که در صورت سرریز شدن آب، این آب اضافی از جداری کناری تخلیه می‌شود و از سرریز شدن آب جلوگیری می‌کند. در دو دیواره‌ی تانک شفاف ۶ پیزومتر (در هر دیواره ۳ پیزومتر) در ارتفاع‌های ۷/۵، ۱۷/۵ و ۲۷/۵ سانتی‌متری (از سطح تراز فیلتر) نصب شده است که فشار آب حفره‌یی اضافی را در سه عمق مختلف نشان می‌دهند. پیزومترها مدرج شده و برای مشخص بودن سطح آب جسم سبک رنگینی در آن قرار داده شده است (شکل ۱).
ب) میز لرزه: قسمت‌های تشکیل دهنده‌ی میز لرزه عبارت‌اند از:

- الکتروموتور و گیربکس با توان ۲/۲ کیلووات، شافت ۳۰ میلی‌متر، و دور ثابت ۲۰۰ دور در دقیقه؛

- اینپورتور زمینس $SINAMICS G 110$ با ظرفیت ۲/۲ کیلووات که دور موتور را از صفر تا ۱/۲ برابر دور طبیعی الکتروموتور یعنی ۰ تا ۲۴۰ دور در دقیقه

۲. تغییر شکل کوچک و بنابراین معادله‌ی تعادل قبل از تغییر شکل، با معادله‌ی تعادل بعد از تغییر شکل یکی است.

روش‌ها و تدابیر مختلفی در استفاده از ضرایب مقیاس در پدیده‌ی روان‌گرایی مطرح‌اند. مسئله‌ی مهم چگونگی مدل‌کردن رفتار خاک در ساختگاه است؛ رفتار خاک اشیاع در ساختگاه در پدیده‌ی روان‌گرایی به دو نوع رفتار -- رفتار با تغییر شکل جریانی و رفتار با تغییر شکل محدود -- تقسیم می‌شود.

در ماسه‌ی با تراکم متوسط تا متراکم، افزایش فشار آب حفره‌ی نزدیک فشار محصور در طی ارتعاش رخ می‌دهد؛ تغییر شکل خاک / سازه ادامه پیدا می‌کند و با تمام شدن تکان‌ها متوقف می‌شود. این نوع تغییر شکل «تحریک سیکلی» نامیده می‌شود و در آن کرنش در طی تکان افزایش پیدا می‌کند اما هرگز به حالت نرم‌شدگی (کرنش‌های خیلی بزرگ) نمی‌رسد. در این نوع تغییر شکل از λ_ε استفاده شده است. بهترین تخمین برای λ_ε از طریق سرعت امواج برشی صورت می‌گیرد [۶].

$$\lambda_\varepsilon = \lambda [(V_S)_P / (V_S)_m]^2 \quad (2)$$

در رابطه‌ی ۲، V_S نشان‌گر سرعت موج برشی در خاک است. اگر به دلایلی سرعت‌های موج برشی نامعلوم باشند، عموماً مدول برشی کشسانی G متناسب با ریشه‌ی دوم فشار محصور اولیه فرض می‌شود. چگالی خاک در مدل و ساختمان اصلی یکسان ($\lambda_P = 1$) فرض می‌شود:

$$\lambda_\varepsilon = \lambda^{0.5} \quad (3)$$

در جدول ۱ ضرایب تشابه مربوط به این حالت در ستون اول با قید نوع I ارائه شده است. در صورت بروز تغییر شکل نامحدود، به علت بزرگ بودن کرنش‌ها در این تغییر شکل دیگر نمی‌توان از λ_ε استفاده کرد بلکه استفاده از λ_P ضرورت می‌یابد. در مورد تغییر شکل‌های نامحدود (نرم‌شدگی کرنش) از ضرایب تشابه ستون دوم، نوع II جدول ۱، برای ارزیابی مدل استفاده می‌شود [۷].

۵. کاربردهای دستگاه تانک شفاف و میز لرزه

به کمک «تانک شفاف» بر روی پایه‌ی هیدرولیکی می‌توان پدیده‌ی ماسه‌ی روان^۱ را مشاهده کرد؛ به این صورت که جریان آب از فیلتر عبور کرده و فشار یکنواخت را

جدول ۱. ضرایب تشابه مدل ژئوتکنیکی در محیط ۱g برای حالات مختلف (۶).

فاکتورهای تشابه کاربردی			
کمیت	فاکتورهای تشابه عمومی	تیپ I ($\lambda_P = 1, \lambda_\varepsilon = \lambda^{0.5}$)	تیپ II ($\lambda_P = 1, \lambda_\varepsilon = 1$)
طول	λ	λ	λ
چگالی	λ_P	۱	۱
زمان	$(\lambda \lambda_\varepsilon)^{0.5}$	$(\lambda)^{0.75}$	$(\lambda)^{0.5}$
شتاب	۱	۱	۱
سرعت	$(\lambda \lambda_\varepsilon)^{0.5}$	$(\lambda)^{0.75}$	$(\lambda)^{0.5}$
جابه‌جایی	$\lambda \lambda_\varepsilon$	$(\lambda)^{1.5}$	λ
تنش	$\lambda \lambda_P$	λ	λ
کرنش	λ_ε	$(\lambda)^{0.5}$	۱
فشار حفره‌ی	$\lambda \lambda_P$	λ	λ

تخلیه‌ی آب به محفظه، یا تخلیه‌ی آب محفظه هستند. شمایی از مجموعه تجهیزات تانک شفاف، میز لرزه و پایه‌ی هیدرولیکی در شکل ۲ ارائه شده است.

۴. مکانیک مدل و روابط تشابه

آزمایش‌های میز لرزه روی مدل‌های کوچک یکی از مهم‌ترین روش‌های مطالعه در مهندسی ژئوتکنیک زلزله است. آزمایش‌های بسیار زیادی روی مدل‌های مقیاس شده انجام گرفته‌اند تا رفتار سازه‌های مرتبط با خاک را مورد بررسی قرار دهند. ساخت مدل کوچک و آزمایش آن به جای پروتوتایپ آسان است. آزمایش‌های مدل به آسانی قابل تکرارند و تغییر و کنترل شرایط آزمایش برای مطالعه‌ی یک پدیده امکان‌پذیر است. برای یافتن ضرایب تشابه در مکانیک مدل‌ها دو اصل اساسی وجود دارد: ۱. قانون رفتاری مواد؛ ۲. اصول مربوط به مکانیک سیستم‌ها (تعادل، بالانس جرم و...).

با نوشتن معادلات حاکم بر مسئله، و ترکیب دواصل فوق‌الذکر یک سری روابط بین کمیت‌های مدل و ساختمان اصلی به‌وجود می‌آید که آنها را «روابط تشابه» می‌نامند. چون هرکدام از اصول دوگانه‌ی یادشده خود مبتنی بر فرضیاتی دیگر هستند، حوزه‌ی اعتبار روابط تشابه حاصله در مورد هر مسئله محدود به دامنه‌ی فرضیات همان مسئله است.

استخراج روابط مرتبط با مدل خاک و پی سطحی برای آزمایش میز لرزه و تانک شفاف در شرایط عادی مبتنی بر نوشتن معادلات حاکم بر مسئله، شامل معادلات خاک اشیاع و معادلات پی سطحی و در نهایت ترکیب معادلات و استخراج روابط تشابه، از آنجا که خاک اشیاع محیطی دوفازه -- جامد (اسکلت خاک) و مایع (آب حفره‌ی) -- است، معادلات خاک اشیاع عبارت‌اند از: معادله‌ی ترازقی (تعریف تنش مؤثر)، قانون رفتاری تعادل کلی، تعادل جریان آب حفره‌ی، بالانس جرم و اعمال شرایط مرزی. معادلات مربوط به پی سطحی نیز همان موارد ذکرشده در معادلات خاک را شامل می‌شود، با این تفاوت که متغیرهای آب حفره‌ی در آنها حذف می‌شود.

معادلات حاکم بر مسئله باید هم در مدل و هم در پروتوتایپ ارضا شود. نسبت پارامترهای مدل و پروتوتایپ به صورت رابطه‌ی عمومی ۱ نوشته می‌شود:

$$(K)_P = \lambda_K \cdot (K)_m \quad (1)$$

که در آن K کمیت مورد بررسی، λ_K ضریب خطی مربوط به کمیت مورد نظر، P بیان‌گر پروتوتایپ، و m بیان‌گر مدل است.

در هر مسئله بسته به تعداد معادلات و شرایط موجود، تعداد ضرایب مستقل ثابت و معین است. انتخاب ضرایب مستقل به دلخواه و متناسب با نوع مسئله صورت می‌گیرد؛ سایر ضرایب نیز برحسب ضرایب مستقل محاسبه می‌شود. در این مسئله ضرایب مستقل اختیار شده عبارت‌اند از: ضریب مقیاس هندسی (λ)، ضریب مقیاس چگالی خاک اشیاع (λ_P)، و ضریب مقیاس کرنش خاک اشیاع (λ_ε).

روابط تشابه برای یک مدل ژئوتکنیکی -- که ضرایب مستقل سه‌گانه‌ی فوق برای آن انتخاب شد -- با فرض رفتار در محدوده‌ی کرنش‌های کوچک و متوسط به دست آمده‌اند (جدول ۱). مطالب مفصل‌تر در خصوص مکانیک مدل‌ها، به‌ویژه آزمایش‌های مدل دینامیکی، قابل دسترس‌اند [۶]. در استفاده از معادلات اصلی، فرضیات زیر مد نظر بوده‌اند:

۱. اسکلت خاک یک محیط پیوسته است؛

از سطح زیرین به توده‌ی خاک وارد می‌کند و در نتیجه زه آب به سمت بالا حرکت می‌کند. در این حالت هدهای مختلف آب در پیرومترها مشاهده می‌شود (شکل ۳). هد آب کم کم به حدی می‌رسد که منجر به بروز پدیده‌ی ماسه‌ی روان می‌شود -- به عبارت دیگر تنش‌های مؤثر بین‌دانه‌یی صفر می‌شود.

یکی از نمونه‌های عملی وقوع پدیده‌ی ماسه‌ی روان، جوشش ماسه در مصالح دانه‌یی پشت فرازبندها و نشیب‌بندها در مسیر رودخانه‌ها است. هنگام ساخت سدهای خاکی یا ساختمان‌های دیگر در آب، برای انجام عملیات ساخت و ساز آب رودخانه به‌کمک سپرها زه‌کشی شده و به‌وسیله‌ی سیستم چاه و پمپ آب پایین آورده می‌شود تا محل کارگاه خشک بماند و عملیات اجرایی تداوم یابد. به‌علت وجود زه آب از کناره‌ها و کف رودخانه، در صورت عدم وجود تنش کافی، گرادان هیدرولیکی برابر واحد می‌شود و باعث خرابی نشیب‌بندها، فرازبندها یا کل کارگاه می‌شود. چنین گسیختگی‌هایی معمولاً سریع اتفاق می‌افتد و بنابراین، اعمال ضریب اطمینان مناسب اهمیت زیادی دارد.

از موارد دیگر ناپایداری در پایین‌دست سدها به‌هنگام وقوع سیلاب، بالا رفتن گرادان هیدرولیکی در پایین‌دست سد و افزایش خطر جوشش ماسه‌یی است. همچنین این پدیده در محل‌های ترخیص فشار آرتزین یعنی لایه‌یی از آب زیرزمینی که با محلی از تجمع آب با هد بالاتر متصل است، اتفاق می‌افتد^[۸].

در راستای بررسی موارد ذکر شده، می‌توان توسط این دستگاه به ایجاد پروفیل خاک دلخواه با لایه‌بندی‌های متفاوت و مدل‌کردن بدنه‌ی سدهای خاکی، و یا پروفیل خاک پای سد و ایجاد نیروی زه آب با دبی مورد نظر و مشاهده‌ی هد آب در ارتفاع‌های مختلف دست یافت. از این طریق روش‌های طراحی فیلتر، تعیین ضخامت زهکش‌ها، چاه‌های فشار شکن و روش‌های حفاظت دامنه‌ی سدهای خاکی قابل بررسی و ارزیابی است^[۸].

پدیده‌ی دیگر «روان‌گرایی» است که ممکن است به‌صورت استاتیکی، تحت بارهای لحظه‌یی و اعمال ضربه اتفاق بیفتد (مصادق آن اعمال نیروهای زلزله، کوبش شمع یا انفجار بر نهشته‌های ماسه‌یی شل است) یا به‌صورت دینامیکی -- یعنی روان‌گرایی تحت نیروهای ارتعاشی متناوب یا نیروهای حاصل از زلزله -- مشاهده شود.



شکل ۳. تانک بر روی قاب اعمال نیروی زه.

در دستگاه تانک شفاف، با ریختن ماسه در داخل و اشباع‌کردن آن و بستن شیرهای خروجی و اعمال ضربه به بدنه‌ی تانک شفاف افزایش فشار آب حفره‌یی در توده‌ی ماسه قابل رؤیت خواهد بود. این افزایش فشار آب حفره‌یی چند ثانیه تا قبل از زه‌کشی آب به‌طول می‌انجامد و باعث از بین رفتن تنش مؤثر بین دانه‌ها، و نهایتاً کاهش یا فقدان پایداری خاک می‌شود. در این صورت است که روان‌گرایی استاتیکی مشاهده می‌شود و مدل پی قرار داده شده بر سطح ماسه به داخل ماسه فرو می‌رود که پس از مستهلک شدن فشار آب حفره‌یی دوباره تنش مؤثر به حالت اولیه برمی‌گردد.

دستگاه تانک شفاف و میز لرزه براساس شبیه‌سازی با طیف‌های زلزله، امواج سینوسی با شتاب معین را ایجاد می‌کند. با توجه به رابطه $\alpha = r\omega^2$ ، که در آن α شتاب ارتعاش، r تابع دامنه‌ی ارتعاش، و ω فرکانس ارتعاش است، تغییر دامنه‌ی ارتعاش و فرکانس منجر به اعمال ارتعاش‌های مختلف به نمونه می‌شود. چنان‌که در بخش پیشین توضیح داده شد، ضریب تشابه شتاب و تراکم خاک برای دو حالت مختلف برابر ۱ است. در حین آزمایش نوسانات فشار آب حفره‌یی در نمونه ناشی از اعمال نیروهای ارتعاشی، در پیرومترها قابل مشاهده است. ماسه‌هایی با تراکم‌های مختلف و پروفیل دلخواه، (به‌عنوان مثال عدسی‌های رس در ماسه) توسط این دستگاه تحت تأثیر نیروی چرخشی مورد نظر قرار می‌گیرد، و نهایتاً رفتار این خاک (به‌عبارت دیگر روان‌گرایی دینامیکی) تحت بارهای چرخه‌یی مذکور بررسی می‌شود. اثر زه‌کش‌های قائم و تأثیر سربار و دانه‌بندی، که از عوامل جلوگیری و کنترل روان‌گرایی هستند، نیز از موارد قابل بررسی توسط این دستگاه هستند.

مطالعات انجام‌شده روی نمونه‌ی ماسه‌های اشباع که توسط میز لرزه انجام شده است، نسبت به آزمایش‌های سه‌محوری چرخه‌یی و برش ساده‌ی چرخه‌یی امتیازاتی دارد. برای مثال در این روش می‌توان نمونه‌های نسبتاً بزرگی از ماسه‌ی اشباع را تحت شرایط h_e (رانس در حال سکون) که در عمل نیز گاهی چنین است مورد مطالعه قرار داد. در صورت نصب وسایل اندازه‌گیری در داخل خاک، با توجه به این که اثر نیروی اینرسی ناشی از وسایل اندازه‌گیری تعبیه‌شده در نمونه به‌دلیل کوچکی آن قابل اغماض است، تغییر شکل‌ها و شتاب‌های داخلی نمونه به‌سادگی قابل اندازه‌گیری‌اند. در این روش می‌توان آزمایش را طوری تنظیم کرد که تغییرات جابه‌جایی، سرعت یا شتاب تحت کنترل باشد. بنابراین می‌توان اطلاعات زیادی در خصوص اعمال نیروهای دینامیکی با شتاب‌ها و فرکانس‌های مختلف به دست آورد. همچنین می‌توان تغییرات فشار آب حفره‌یی و توزیع آنها را در توده‌های وسیعی از ماسه‌ی اشباع در خلال روان‌شدگی ماسه اندازه‌گیری کرده و تغییرات ایجاد شده در نمونه ماسه در خلال بارهای ارتعاشی را مستقیماً مورد بررسی و بازدید قرار داد.

۶. مصالح مورد استفاده در آزمایش

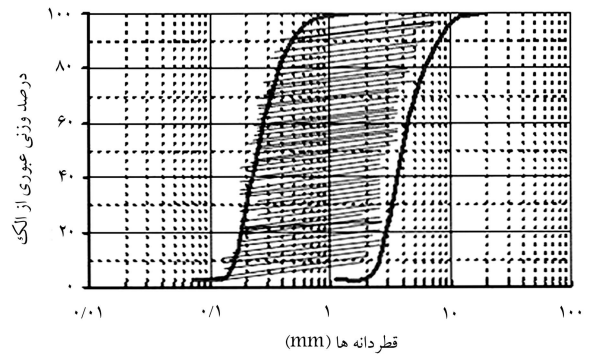
براساس نتایج متعدد به دست آمده از بررسی‌های انجام‌گرفته بر روی پدیده‌ی روان‌گرایی، مشخص شد که ماسه‌های ریزدانه‌ی یکنواخت در مقایسه با ماسه‌های درشت‌دانه در شرایط مشابه قابلیت روان‌شدن بیشتری دارند. در ماسه‌های درشت‌دانه از یک طرف به‌علت خارج شدن آب حفره‌یی بین دانه‌ها فشار آب حفره‌یی نسبت به ماسه‌های ریزدانه کم‌تر بالا می‌رود (بیشینه‌ی پایین‌تری دارد)، و از طرف دیگر به‌دلیل آن که فشار آب حفره‌یی بیشینه به‌سرعت مستهلک می‌شود، امکان تغییر شکل و جابه‌جایی بزرگ در سازه‌های بناشده بر روی ماسه‌های درشت‌دانه به‌مراتب کم‌تر است.

۲۰ سانتی‌متر و وزن مخصوص اشباع به ترتیب $1,999, 1,997, 1,992 \text{ ton/m}^3$ و 27° تن بر متر مکعب انجام گرفت.

۴. سری چهارم آزمایش‌ها با شتاب $0,25g$ و فرکانس $3,21$ هرتز و دامنه‌ی ارتعاش $0,6$ سانتی‌متر و وزن مخصوص اشباع به ترتیب $1,997, 1,992 \text{ ton/m}^3$ و $1,999$ و 27° تن بر متر مکعب اجرا شد.

۵. سری پنجم آزمایش‌ها با شتاب $0,2g$ و فرکانس $2,88$ هرتز و دامنه‌ی ارتعاش $0,6$ سانتی‌متر و وزن مخصوص اشباع به ترتیب $1,997, 1,992 \text{ ton/m}^3$ و $1,999$ و 27° تن بر متر مکعب اجرا شد.

۶. سری ششم آزمایش‌ها با شتاب $0,15g$ و فرکانس $2,49$ هرتز و دامنه‌ی ارتعاش $0,6$ سانتی‌متر و وزن مخصوص اشباع به ترتیب $1,997, 1,992 \text{ ton/m}^3$ و $1,999$ و 27° تن بر متر مکعب انجام شد.



شکل ۴. منحنی دانه بندی ماسه مورد استفاده قرار گرفته در آزمایش.

در بررسی بیش از پنجاه لوگ گمانه‌های حفر شده در محدوده‌ی ساحلی منطقه‌ی انزلی مشاهده شد که لایه‌های تحت‌الارضی خاک تا عمق حفاری شده معمولاً در ردیف SP (ماسه‌ی با دانه بندی بد)، در درجه‌ی دوم $SM - SP$ مطابق محدوده‌ی دانه بندی شکل ۴ ماسه با دانه بندی بد به همراه لای و نیز لایه‌های کم‌ضخامت از CL (رس با خاصیت خمیری پایین) و رسوبات مردابی بودند.

در مجموع با جمع‌آوری مطالعات ژئوتکنیکی انجام شده در منطقه، اطلاعات مربوط به 50 گمانه‌ی حفر شده در منطقه می‌توان دریافت که به جز موارد نادر و میان‌لایه‌های خاک، کل این منطقه متشکل از SP و $SM - SP$ با D_{50} حدود $1,8 \text{ mm}$ تا 25 است که عموماً تا عمق حدود 14 متر ادامه داشته است.

ماسه‌ی استفاده شده در آزمایش، از نوع ماسه‌ی انزلی و به رنگ خاکستری بوده که از نظر دانه بندی در رده‌ی SP قرار می‌گیرد. میانگین مشخصات ماسه‌ی مورد استفاده در قالب رابطه‌ی ۴، و محدوده‌ی منحنی دانه بندی آن در شکل ۴ ارائه شده است.

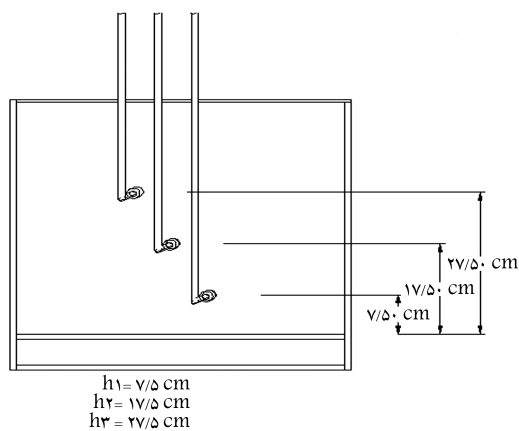
$$D_{50} = 1,8 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}, C_u = 1,76, C_c = 1,39 \quad (4)$$

۸. نتایج حاصله و تفسیر آنها

در آزمایش‌های انجام شده، تغییر پارامترهای فشار آب حفره‌ی عامل مهمی در بررسی پدیده‌ی روان‌گرایی است. در آزمایش‌های انجام گرفته تغییر پارامترهای فشار آب حفره‌ی مطابق با مشخصات پیرومترها در شکل ۵، در حین چرخه‌های بارگذاری و برحسب تراکم‌های مختلف ماسه، شتاب‌های مختلف و نیز برحسب دامنه‌های ارتعاش مختلف به شکل نمودارهایی تهیه شد.

لازم به ذکر است که آزادی زهکشی در سطح بالایی نمونه باعث کوتاه‌تر شدن زمان کل آزمایش شد که برای تعمیم این آزمایش به شرایط زمین طبیعی مدت زمان جهت وقوع ناپایداری خاک باید با دقت بیشتر مورد مطالعه قرار گیرد. در شکل‌های ۶ تا ۹ افزایش، رسیدن به مقدار بیشینه و کاهش فشار آب حفره‌ی برحسب زمان، بر اثر اعمال بارهای ارتعاشی با شتاب‌های مختلف بر ماسه‌ی با تراکم‌های مختلف برای چندین آزمایش به عنوان نمونه ارائه شده است.

در نمودار تمامی شکل‌ها، خطوط پر مربوط به پیرومتر ۱ (P_1) با ارتفاع h_1 از تراز فیلتر، و خطوط نقطه چین مربوط به پیرومتر ۲ (P_2) با ارتفاع h_2 هستند. در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ تغییرات نسبت فشار آب حفره‌ی به فشار سربار مؤثر ($r_u = \Delta u / \sigma'_v$) براساس وزن مخصوص‌های اشباع مختلف ارائه شده است.



شکل ۵. مشخصات پیرومترهای مورد استفاده برای اندازه‌گیری فشار آب حفره‌ی.

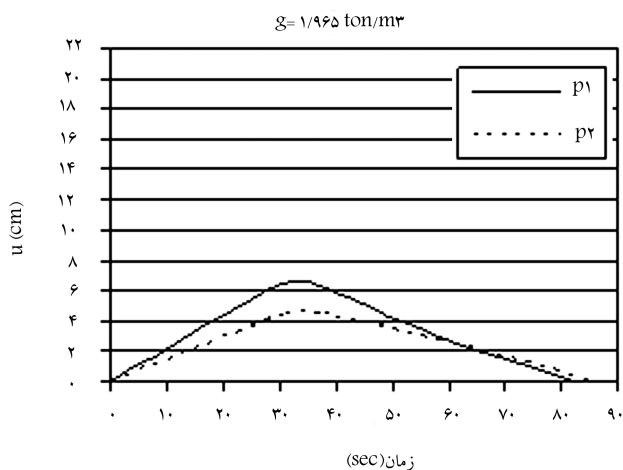
۷. معرفی آزمایش‌های انجام شده

هدف اصلی از انجام این آزمایش‌ها، بررسی پدیده‌ی روان‌گرایی در ماسه‌ی بندرانزلی، و به عبارت دیگر بررسی رفتار این نمونه ماسه تحت اثر نیروهای ارتعاشی است. در بررسی پدیده‌ی روان‌گرایی، چگونگی رفتار خاک تحت اثر بارهای ارتعاشی ناشی از تغییرات فشار آب حفره‌ی است، که بررسی آن منجر به بهتر شناخته شدن رفتار خاک می‌شود [۹] و [۱۰]. در این بخش ۶ سری آزمایش، شامل ۲۱ آزمایش ارتعاش ماسه تحت شتاب‌ها، تراکم‌ها و دامنه ارتعاش‌های مختلف اجرا شد که در ادامه جزئیات آن ذکر شده است:

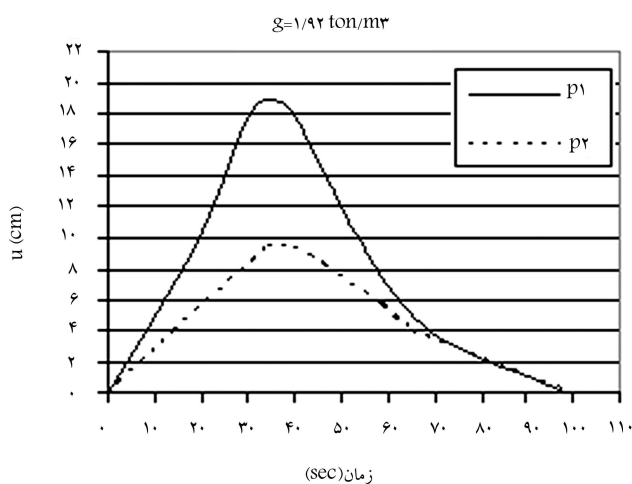
۱. سری اول آزمایش‌ها با شتاب $0,3g$ و فرکانس $3,52$ هرتز و دامنه‌ی ارتعاش $0,6$ سانتی‌متر و تراکم‌های اشباع به ترتیب $1,997, 1,992 \text{ ton/m}^3$ و $1,999$ و 27° بوده است.

۲. سری دوم آزمایش‌ها با شتاب $0,3g$ و فرکانس $2,87$ هرتز و دامنه‌ی ارتعاش $0,9$ سانتی‌متر و وزن مخصوص اشباع به ترتیب $1,997, 1,992 \text{ ton/m}^3$ و $1,999$ بوده است.

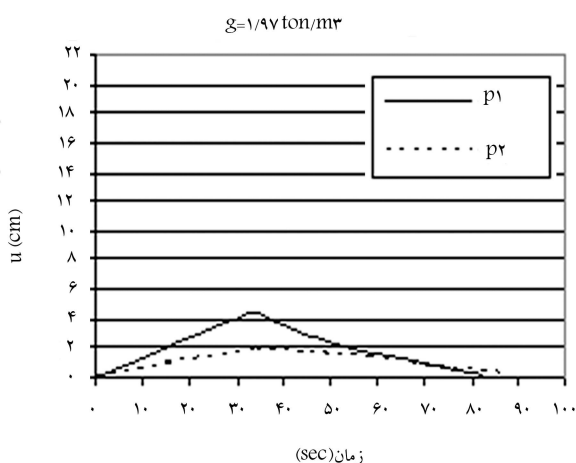
۳. سری سوم آزمایش‌ها با شتاب $0,3g$ و فرکانس $1,93$ هرتز و دامنه ارتعاش



شکل ۷. تغییرات فشار آب حفره‌یی برحسب زمان ارتعاش برای شتاب $a = 0.3g$ ، دامنه‌ی ارتعاش $r = 0.6cm$ و $\gamma = 1.965 ton/m^3$.



شکل ۸. تغییرات فشار آب حفره‌یی برحسب زمان ارتعاش برای شتاب $a = 0.25g$ ، دامنه‌ی ارتعاش $r = 0.6cm$ و $\gamma = 1.92 ton/m^3$.



شکل ۹. تغییرات فشار آب حفره‌یی برحسب زمان ارتعاش برای شتاب $a = 0.25g$ ، دامنه‌ی ارتعاش $r = 0.6cm$ و $\gamma = 1.97 ton/m^3$.

در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نیز تغییرات نسبت فشار آب حفره‌یی به فشار سربار مؤثر ($r_u = \Delta u / \sigma'_v$) براساس شتاب‌های مختلف ارائه شده است.

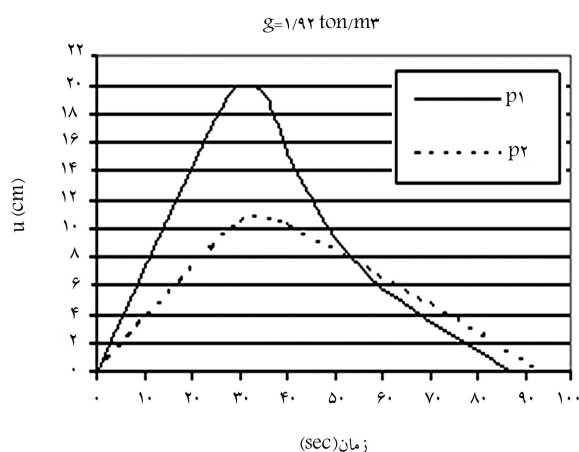
نتایج حاصله از مطالعات و آزمایش‌ها را می‌توان چنین تشریح کرد:

۱. از زمان شروع به ارتعاش توده‌ی ماسه اشباع تا رسیدن اضافه فشار آب حفره‌یی به بیشینه‌ی مورد نظر ۲۵ تا ۳۰ ثانیه طول می‌کشد و بین ۴ تا ۷ ثانیه این مقدار فشار آب حفره‌یی حفظ می‌شود (شکل ۶ تا ۹). کوتاه‌بودن زمان حفظ فشار آب حفره‌یی علت اصلی عدم جلوگیری از زهکشی آب در آزمایش‌ها است. جایگذاری غشاء لاستیکی برای جلوگیری از زهکش شدن آب پیشنهاد می‌شود.

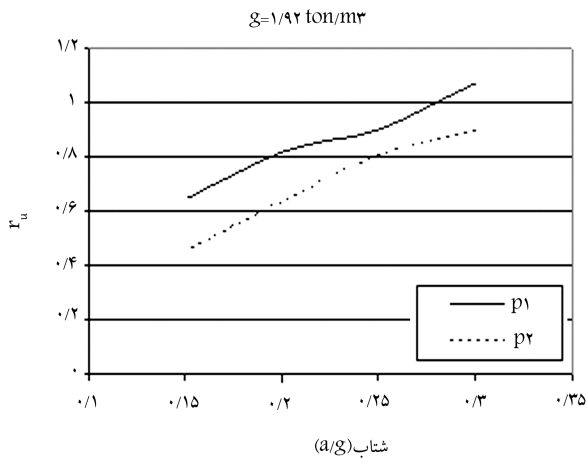
۲. پیرومتر (P1) در عمق بیشتری نسبت به پیرومتر (P2) قرار دارد. تراز آب در P1 همواره (غیر از نیمه‌ی پایانی زمان استهلاک آب) از تراز P2 بالاتر است که منطقی نیز به نظر می‌رسد و به علت وارد آمدن نیروی برشی بیشتر در عمق بیشتر است، که فشار آب حفره‌یی بالاتری را ایجاد می‌کند (شکل ۶ تا ۹). روند استهلاک فشار آب حفره‌یی برای هر دو پیرومتر تقریباً در یک زمان شروع می‌شود. بعد از حدود ۵۰ تا ۷۰ ثانیه، تراز آب در پیرومتر P1 با پیرومتر P2 برابر شده و در ثانیه‌های بعدی تا استهلاک کامل آب پیرومتر P2 تراز آب بالاتری را نشان می‌دهد که این موضوع ناشی از جریان یافتن آب به سمت بالا است که به نشست ماسه و جمع شدن آب در روی سطح ماسه می‌انجامد. این فرایند از آثار ناشی از روان‌گرایی است که در زلزله‌ی ۱۳۶۹ رودبار منجیل، در چندین محل از شهرستان آستانه به‌وضوح مشاهده شد.

۳. «چگالی نسبی» یکی از عواملی است که در روان‌گرایی ماسه نقش اساسی دارد. با افزایش چگالی نسبی خاک مقدار نشست‌ها و افزایش فشار آب حفره‌یی کاهش چشمگیری می‌یابد. براساس آزمایش‌های انجام شده در شتاب ارتعاش $0.3g$ ، ماسه‌هایی که وزن مخصوص آنها بیشتر از $1.99 ton/m^3$ بود هیچ‌گونه افزایش فشار آب حفره‌یی یا نشست محسوسی در آنها مشاهده نشد (شکل‌های ۶ و ۷). برای ماسه‌های با وزن مخصوص بالاتر از $1.97 ton/m^3$ ، این عدم افزایش فشار آب حفره‌یی در شتاب ارتعاش $0.25g$ مشاهده شد.

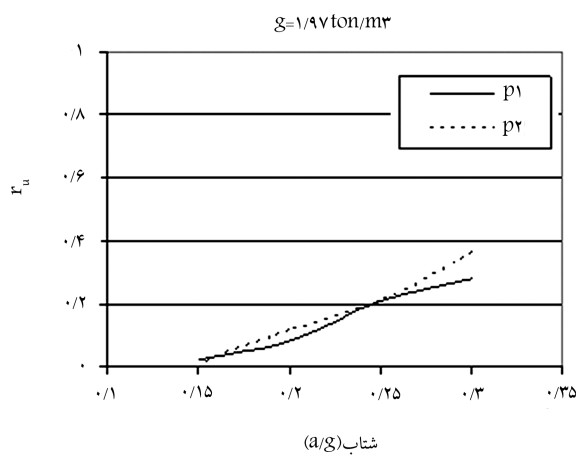
۴. در دوسری آزمایشی که با دامنه‌ی ارتعاش $0.6cm$ و $2cm$ انجام شد، نمودارهای به دست آمده (شکل‌های ۱۰ و ۱۱) نشان‌دهنده‌ی مقادیر r_u (نسبت تغییرات فشار آب حفره‌یی به تنش مؤثر اولیه) برحسب وزن مخصوص‌های مختلف



شکل ۶. تغییرات فشار آب حفره‌یی برحسب زمان ارتعاش برای شتاب $a = 0.3g$ ، دامنه‌ی ارتعاش $r = 0.6cm$ و $\gamma = 1.92 ton/m^3$.



شکل ۱۲. تغییرات $r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_v}$ برحسب شتاب‌های مختلف ($r = 270^\circ \text{ cm}$).



شکل ۱۳. تغییرات $r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_v}$ برحسب شتاب‌های مختلف ($r = 270^\circ \text{ cm}$).

۱۲ و ۱۳). فشار منفذی بالاتر در محل P_2 در وزن مخصوص‌های بیشتر، در آزمایش‌های مختلف مشاهده شد که به نظر نگارندگان می‌توان توجیه این قضیه را به سطح تنش، شرایط مرزی و تغییرات حالت ماسه از اتساعی‌بودن (در شروع) به حالت انقباضی تحت بارهای چرخه‌یی (در پایان) ربط داد.

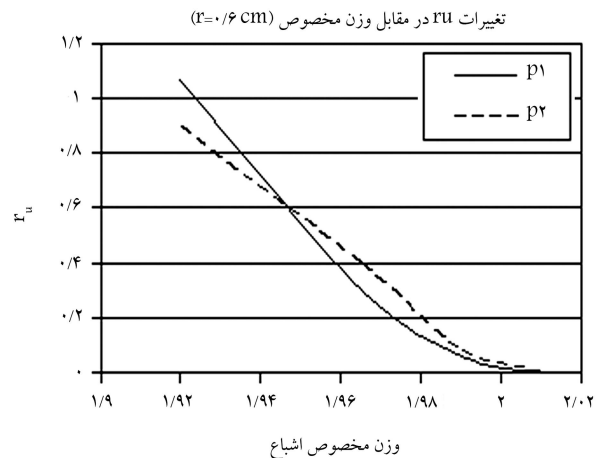
۹. نتیجه‌گیری

طی بررسی نتایج و داده‌های بیش از پنجاه گمانه‌ی حفرشده در منطقه‌ی بندرانزلی مشاهده شد که وضعیت عمومی لایه‌ی سطحی انزلی، شامل ماسه‌های با دانه‌بندی بد $SP - SM$ ، SP بوده و D_{50} آن حدود 0.25 mm تا 0.18 است. لایه‌های ماسه معمولاً تا عمق 10 تا 14 متری ادامه دارد که براین اساس اعداد N مربوط به SPT متفاوت‌اند. این لایه‌های ماسه آثار و بقایای ریشه‌ی درختان در عمق‌های مختلف، و صدف‌های متنوع دریایی ناشی از جزرو مد مداوم دریا در این منطقه را در خود جای داده است. در حرکت به سمت تالاب انزلی شاهد رسوبات مردابی و خاک‌های ناشی از تجزیه‌ی گیاهان بین لایه‌های سطحی بوده، و در لایه‌های عمقی ماسه‌های شل به ماسه‌هایی با تراکم متوسط و متراکم تبدیل می‌شوند. در بین لایه‌های

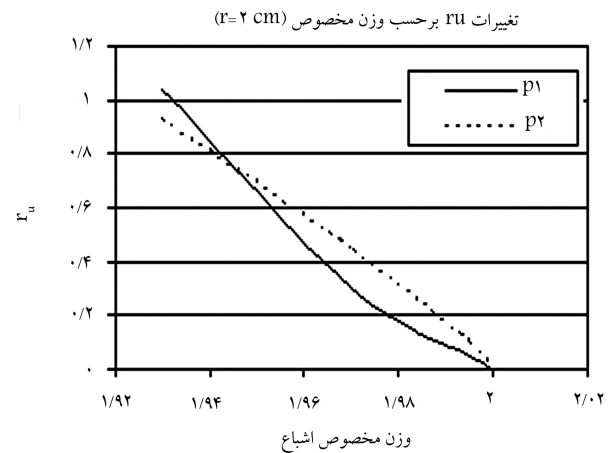
است. برابردن افزایش فشار آب حفره‌یی با تنش مؤثر محصورکننده ($r_u = 1$) را می‌توان به منزله‌ی شروع پدیده‌ی روان‌گرایی اختیار کرد. مطابق انتظار، با افزایش وزن مخصوص اشباع قابلیت روان‌گرایی ماسه تحت یک شتاب ثابت کاهش می‌یابد.

۵. برای نمونه‌های با وزن مخصوص اشباع کم‌تر از 1.945 ton/m^3 ، مقدار r_u در عمق‌های بیشتر (برای پیرومتر P_1) بیشتر است، و در وزن مخصوص‌های بالای 1.945 ton/m^3 نیز مقدار r_u در عمق کم‌تر (برای پیرومتر P_2) نسبت به نقاط عمیق بیشتر است. این بدان معناست که در نمونه‌های متراکم‌تر لایه‌های بالایی بیشتر قابلیت روان‌گرایی دارند ولی در ماسه‌های شل‌تر یا کم‌تراکم، لایه‌های عمیق بیشتر قابلیت روان‌گرایی دارند (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). البته صحت این موضوع و تعیین آن احتیاج به انجام آزمایش‌های بیشتر دارد و دلیل این رفتار ماسه قابل بررسی است.

۶. برای هر وزن مخصوص، آزمایش‌ها در چهار شتاب 0.15 g ، 0.2 g ، 0.25 g و 0.3 g انجام شد و قابلیت روان‌گرایی ماسه برحسب تغییرات شتاب ارتعاش برای وزن مخصوص اشباع 1.92 ton/m^3 و 1.97 ton/m^3 ارائه شده است. در ماسه‌یی با وزن مخصوص اشباع 1.97 ton/m^3 برای شتاب کم‌تر از 0.15 g مقدار r_u به عنوان شاخصی برای روان‌گرایی به سمت صفر میل می‌کند (شکل‌های



شکل ۱۴. تغییرات $r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_v}$ برحسب وزن مخصوص اشباع ($r = 0.6 \text{ cm}$).



شکل ۱۵. تغییرات $r_u = \frac{\Delta u}{\sigma'_v}$ برحسب وزن مخصوص اشباع ($r = 270^\circ \text{ cm}$).

انجام شده مشاهده شد که با افزایش تراکم ماسه قابلیت روان‌گرایی آن کاهش می‌یابد. همچنین براساس نتایج حاصل از آزمایش تانک شفاف و میز لرزه، ماسه‌های SP با تراکم‌های پایین‌تر از $۱/۹۲$ که معادل ماسه‌هایی با N مربوط به SPT پایین‌تر از حدود ۲۰ هستند، تحت شتاب ارتعاش $۰/۳g$ دارای پتانسیل روان‌گرایی بوده و در آنها r_u دارای نسبت بالایی بوده است. با کاهش شتاب ارتعاش مشاهده شد که در شتاب ارتعاش $۰/۱۵g$ برای ماسه‌ی SP با محدودی دانه‌بندی ذکر شده با تراکم‌های مختلف، قابلیت وقوع روان‌گرایی چندان محسوس نیست. بنابراین روان‌گرایی تحت ارتعاش کم‌تر از $۰/۱۵g$ برای این‌گونه خاک محتمل نیست. در مجموع، براساس مقادیر شتاب‌ها و دامنه‌های تحمیلی و وضعیت تراکم ماسه برای نهشته‌های ماسه‌ی بندر انزلی تا عمق ۱۴ متر وقوع روان‌گرایی محتمل است.

ماسه‌ی میان‌لایه‌های رس و لای با خمیرسانی پایین و بالا (ML) و (CL) مشاهده می‌شود. خاک‌های ارگانیکی که عمدتاً در اعماق پایین‌تر به آنها برخورد شده است، دارای وزن مخصوص کم، رطوبت، تخلخل و تراکم‌پذیری بسیار زیاد و مقدار قابل توجهی (بعضاً در حدود ۴۰ تا ۵۰ درصد) مواد آلی بوده‌اند. دستگاهی شامل تانک شفاف، میز لرزه و پایه‌ی هیدرولیکی ساخته شده که توسط آن می‌توان رفتار ماسه با چگالی‌های متفاوت را در شرایط ارتعاشی مختلف -- اعم از دامنه و شتاب‌های متنوع -- بررسی کرد. دستگاه به‌گونه‌ی است که شرایط وقوع روان‌گرایی به صورت استاتیکی یا دینامیکی در آن قابل مشاهده و ارزیابی است. رفتار ماسه با درصد تراکم‌های مختلف در دستگاه تانک شفاف و در شتاب‌های $۰/۱۵g$ تا $۰/۳g$ و دامنه‌ی ارتعاش $۲cm$ مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایش‌های

پانویس

1. quick sand.

منابع

- Haeri, S.M. "Liquefaction associated with 20 June 1990, Manjil earthquake, Iran", *Proceedings of SDEE 91 Conferences, Karlsruhe, Germany*, pp. 325-339 (1991).
- Haeri, S.M., and Zolfaghari, M.R. "On the earthquake induced liquefaction in astane, Iran", *Proceedings of 10 WCEE, Madrid, Spain*, **1**, pp. 129-134 (1992).
- Eslami, A. Foundation Engineering, Design and construction. BHRC, (437) (2005).
- Nazari, H. and Omrani, J. Geological Maps of Anzali Harbor, Geological and Mine Investigation Organization of IRAN (2001).
- Shariffar, A. Determining Geotechnical profile of Anzali and Evaluation of Deposits liquefaction, M.Sc. thesis Gilan University, Faculty of Eng. (2004).
- Iai, S. "Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g-gravitational field", *Soils and Foundations, JSSMFE*, **29**(1), pp.105-118 (1989).
- Iai, S., and Sugano, T. "Soil-structure interaction studies through shaking table tests," *Earthquake Geotechnical Engineering*, Secoe Pinto (ed.), pp. 927-940, Balkema, Rotterdam, ISBN (1999).
- Holtz, R.D., and Kovacs, W.D. "An introduction to geotechnical engineering", Prentice-Hall, 733p (1981).
- Accelerometer Records for 31 Khordad of Manjil Earthquake, **3** BHRC. (48) (1991).
- Kramer, S.L. "Geotechnical earthquake engineering", Prentice-Hall, Englewood CLIFFS (1996).