مهندسی عمران شریف، (پاییز ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۲ - ۳۲، شماره‌ی ۳/۱، ص. ۱۳-۲۳

Original Article

ارزیابی میزان تأثیر عوامل مختلف در نشست شالوده‌های سطحی واقع بر خاک‌های دو لایه‌ی روانگرا تحت بار سیکلیک

پیمان ایوبی * **(دانشجوی کارشناسی ارشد)**
علی پاک (استاد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

اغلب ساختمان‌های معمول بر روی شالوده‌ی سطحی ساخته می‌شوند. بررسی نشست شالوده‌های سطحی خصوصاً وقتی بارهای لرزه‌یی به روانگراشدن خاک زیر شالوده منتهی می‌شوند، موضوع تازه‌یی است. در این نوشتار سعی شده است با مدل‌سازی عددی، تأثیر عوامل مختلف در نشست شالوده‌ی سطحی بر روی خاک دو لایه‌ی روانگرا در دو حالت مختلف مورد بررسی قرار گیرد. در همین راستا، پارامترهای عرض شالوده، بسامد تحریک ورودی، بیشینه‌ی دامنه‌ی تحریک ورودی، و نسبت عمق لایه‌ی بالایی به کل ضخامت خاک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی صورت‌گرفته نشان می‌دهد که با افزایش عرض شالوده، کاهش بسامد، و افزایش دامنه‌ی تحریک ورودی، میزان نشست سازه افزایش می‌یابد. همچنین هر چه نسبت عمق لایه‌ی بالایی به کل دامنه بیشتر باشد، در حالت خاک متراکم بر روی خاک سُست، شاهد کاهش و در حالت خاک سُست بر روی خاک متراکم، شاهد افزایش نشست سازه خواهیم بود.

واژگان کلیدی: شالوده‌ی سطحی، روانگرایی، مطالعه‌ی پارامتریک، نشست، مدل عددی.

peyman.ayoubi@yahoo.com
pak@sharif.edu

۱. مقدمه

ناپایداری‌های ناشی از روانگرایی در زمره‌ی خسارت‌بارترین مخاطرات زلزله قرار دارند. در حین روانگرایی به دلیل افزایش فشار آب حفره‌یی اضافی، تنش مؤثر در خاک کاهش یافته و به حدود صفر تقلیل می‌یابد. این پدیده بیشتر در لایه‌های ماسه‌یی سُست و اشباع به وقوع می‌پیوندد، که بعضاً توسط توده‌یی از خاک متراکم پوشیده شده‌اند. در این پژوهش سعی شده است با توجه به اهمیت و کاربرد زیاد شالوده‌های سطحی در طراحی سازه‌ها، و همچنین اهمیت پدیده‌ی روانگرایی و اثرات مخرب متعاقب آن، با مدل‌سازی عددی و بررسی دقیق عملکرد شالوده‌ی سطحی بر روی بستر دو لایه با قابلیت روانگرایی، درک درستی از مکانیزم‌های مرتبط با آن ارائه شود.

در پژوهشی در سال ۱۹۹۸،[۱] اثر بارگذاری زلزله در دایک بتنی احداث‌شده بر روی توده‌ی ماسه‌یی سُست اشباع با استفاده از مدل‌سازی سانتریفیوژ بررسی و پارامترهای مورد مطالعه در آن، شامل: دامنه و بسامد تحریک ورودی، نوع فابریک، و نفوذپذیری خاک بوده و این نتایج به‌دست آمده است:

۱. نشست سازه با افزایش (PGA)[۱] افزایش یافته است.

۲. نشست سازه به‌طور قابل توجهی با افزایش بسامد تحریک کاهش یافته است.

۳. در این آزمایش‌ها تأثیر فابریک خاک در نشست سازه مورد ارزیابی قرار گرفته است.

۴. افزایش نفوذپذیری ماسه به اندازه‌ی ۲ برابر، تأثیر قابل توجهی در نشست سازه نداشته است.

در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۲،[۲] با انجام آزمایش‌های سانتریفیوژی، تأثیر بهسازی در کاهش نشست شالوده بر روی خاک روانگرا مورد مطالعه قرار گرفته و این نتیجه به‌دست آمده است که با افزایش عرض و عمق منطقه‌ی بهسازی‌شده، نشست شالوده‌ی سطحی کاهش یافته است.

همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۹،[۳] توسط آزمایش‌های سانتریفیوژ که شامل خاک با ۳ لایه‌ی مختلف و سازه‌های در نظرگرفته‌شده شامل ۳ سازه با ابعاد و فشار تماسی مختلف بوده‌اند، نشان داده شده است که نشست سازه‌ها با شروع لرزش شروع و در زمان کوتاهی مقدار آن بیشتر از میزان نشست در زمین آزاد اطراف می‌شود. نیروهای اینرسی ناشی از اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش نرم‌شوندگی ناشی از افزایش فشار منفذی در زیر شالوده می‌شود، که این موضوع باعث کاهش سختی خاک زیر شالوده و افزایش نشست می‌شود. پژوهشگران مذکور، ۵ مکانیزم عمده برای نشست سازه بر روی زمین روانگرا عنوان کرده‌اند و با بررسی

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۳/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۳/۸/۱۰، پذیرش ۱۳۹۳/۱۰/۲۰.

آزمایش‌های مختلف انجام‌شده، تأثیر پارامترهای مختلف در میزان نشست ناشی از هر مکانیزم را به‌صورت کیفی ارائه و برای برآورد کمّی میزان تأثیر هر پارامتر، انجام آزمایش‌های بیشتر را پیشنهاد کرده‌اند.

در پژوهش دیگری نیز در سال ۲۰۰۸،[۴] با مدل‌سازی آزمایش‌های سانتریفیوژ، تأثیر پارامترهای مختلف در بهسازی خاک زیر شالوده‌ی سطحی بررسی و الگوریتمی ارائه شده است که به کمک آن بهسازی به‌صورت بهینه انجام شود.

در پژوهش حاضر ضمن بررسی پارامترهای تأثیرگذار در نشست شالوده‌ی سطحی، میزان تأثیر هر پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با بررسی دو حالت مختلف پروفیل خاک، شرایط موجود در طبیعت و تأثیر آن در نشست سازه‌ها کاملاً مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین در بسیاری از مطالعات، محققان از امکان مدلسازی مساله بصورت دوبعدی سود برده اند که باعث افزایش خطا میشود. . لذا در پژوهش حاضر با مدل‌سازی سه بُعدی دینامیکی کاملاً همبسته، پاسخ خاک و شالوده مورد بررسی قرار گرفته است.

۲. مفاهیم و معادلات پایه

معادله‌ی حاکم بر یک محیط متخلخل اشباع با یک فاز سیال در حالت کلی شامل سه معادله است: ۱. معادله‌ی تعادل ممنتوم برای کل المان؛ ۲. معادله‌ی تعادل ممنتوم برای فاز سیال؛ ۳. معادله‌ی تعادل جرم.

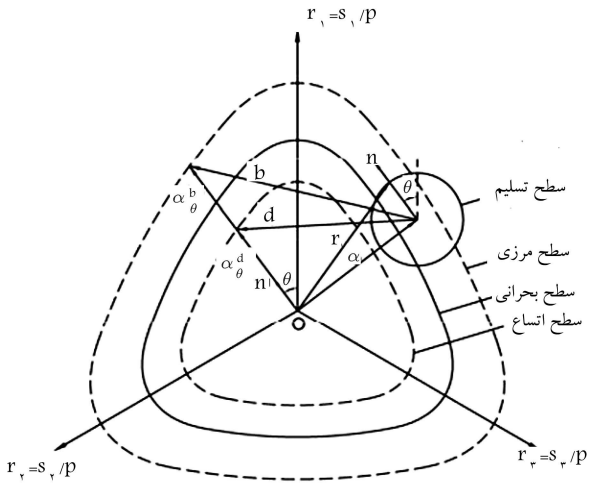
در پژوهشی در سال ۱۹۸۸[۱۶] با انجام آنالیزهای مختلف نشان داده شده است که ترم $\ddot{u}_s$ (u_s جابه‌جایی فاز جامد است) در معادله‌ی تعادل ممنتوم فاز سیال، تأثیر ناچیزی در نتایج دارد و از طرف دیگر، این ترم باعث غیرمتقارن‌شدن ماتریس ضرایب کل و بروز مشکلات عددی در حل دستگاه معادلات نیز می‌شود و لذا می‌توان از ترم ذکرشده صرف‌نظر کرد. در نهایت، معادلات به‌صورت روابط ۱ و ۲ درآمده و شامل دو مجهول P و U است:

$$M\ddot{U} + \int_v B^T \sigma' dV - QP - f^{(s)} = 0 \qquad (1)$$

$$Q^T \dot{U} + HP + S\dot{P} - f^{(p)} = 0 \qquad (2)$$

که در آن‌ها، M ماتریس جرم سیستم، B ماتریس کرنش ـ جابه‌جایی، Q ماتریس همبستگی دو معادله، S ماتریس تراکم‌پذیری، و H ماتریس نفوذپذیری است. بردارهای $f^{(s)}$ و $f^{(p)}$ شامل تمام اثرات نیروهای حجمی و سطحی تعریف‌شده در مرزها هستند.

برای انجام مدل‌سازی عددی، انتخاب مدل رفتاری مناسب یک شرط لازم است. این مدل باید متناسب با شرایط مسئله، رفتار خاک را به بهترین نحو پیش‌بینی کند. مدل ارائه‌شده که در پژوهشی در سال ۲۰۰۴ مورد استفاده قرار گرفته است،[۵] یک مدل حالت حدی است. فرمولاسیون مدل مذکور براساس حالت خمیری سطح مرزی در فضای نسبت تنش‌های انحرافی و در چارچوب مکانیک خاک حالت بحرانی[۲] ارائه شده است. مفهوم مکانیک خاک حالت بحرانی را می‌توان بدون توجه به نوع خاصی از مدل رفتاری،[۶] و یا براساس ترکیب تئوری CSSM و تئوری‌های عمومی رفتاری مانند حالت خمیری،[۷] جهت مطالعه‌ی رفتار خاک‌ها مورد استفاده قرار داد. در حالت بحرانی، تغییرشکل نمونه تحت تنش‌های ثابت و با نرخ کرنش حجمی صفر به‌صورت مستمر ادامه می‌یابد.[۸] در شکل ۱، نمایش شماتیک سطوح بحرانی، مرزی و اتساع این مدل در صفحه‌ی π نشان داده شده است. توضیحات بیشتر در رابطه با مدل بیان‌شده،[۵] ارائه شده است.



شکل ۱. نمایش شماتیک مدل ارائه‌شده،[۵] در صفحه‌ی π.

جدول ۱. پارامترهای مدل رفتاری ارائه‌شده در سال ۲۰۰۴[۵]، کالیبره‌شده برای ماسه‌ی نوادا.[۹]

عملکرد پارامتر	نشانه‌ی پارامتر	مقدار پارامتر
کشسان	G_0 (kpa)	۱۵۰
	υ	۰/۰۵
حالت بحرانی	M	۱/۱۴
	c	۰/۷۸
	λ_c	۰/۰۲۷
	e_0	۰/۸۳
	ξ	۰/۴۵
سطح تسلیم	m	۰/۰۲
مدول خمیری	h_0	۹/۷
	c_h	۱/۰۲
	n^b	۲/۵۶
اتساع	A_0	۰/۸۱
	n^d	۱/۰۵
تانسور فابریک	$Z_{\max}$	۵
	c_z	۸۰۰

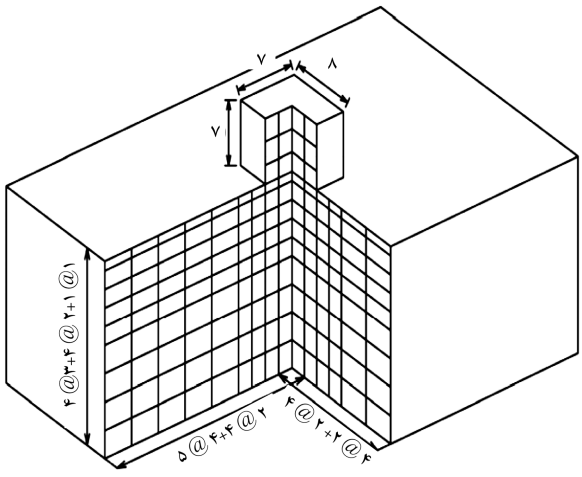
شهیر (۲۰۰۹)،[۴] پارامترهای مدل رفتاری ارائه‌شده در پژوهش اخیر،[۱] را برای ماسه‌ی نوادا[۳] کالیبره کرده است. این پارامترها براساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی Earth–Technology Corporation در جریان پروژه،[۹] کالیبره شده‌اند. این ۱۵ پارامتر در جدول ۱ برای ماسه‌ی نوادا ارائه شده‌اند.

۳. مدل‌سازی عددی و بررسی نتایج

برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار OpenSEES استفاده شده است، که قادر به تحلیل دینامیکی همبسته‌ی محیط متخلخل اشباع به‌صورت سه بُعدی است. در این پژوهش از تحلیل کاملاً همبسته‌ی دینامیکی در حوزه‌ی زمان با فرمول‌بندی

u-P، که از روش‌های دقیق بررسی پدیده‌ی روانگرایی است، استفاده شده است. برای صحت‌سنجی مدل و بررسی اعتبار نتایج مدل عددی از نتایج آزمایش‌های سانتریفیوژ، که در پژوهشی در سال ۲۰۰۲ در دانشگاه UC Davis انجام شده است،[۲] استفاده شده و مدل‌سازی عددی آزمایش‌های سانتریفیوژ در مقیاس واقعی انجام شده است. شبکه‌ی اجزاء محدود به‌کاررفته در این مدل‌سازی‌ها، شامل یک شبکه‌ی سه بُعدی با ۱۹۶۰ المان مکعبی ۸ گره‌یی است (شکل ۲). بار وارده از طرف سازه هم ۱۰۰ کیلوپاسکال است. با درنظرگرفتن فاصله‌ی مناسب از دو طرف سازه میتوان انتظار داشت که شرایط زمین آزاد با دقت مناسبی برقرار است. لذا، با بستن درجات آزادی تغییرمکان افقی مرزهای جانبی به هم، میتوان شرایط واقعی را مدل‌سازی کرد. این روش در مدل‌سازی‌های متعددی،[۱۰و۱۱] استفاده شده است. برای مدل‌سازی سازه از المان‌های مکعبی صلب استفاده شده است. مدل‌سازی هر آزمایش در ۳ مرحله انجام شده است. در مرحله‌ی اول، آنالیز تحت بارگرانشی خاک و سازه انجام شده است. پس از اعمال کامل بار و رسیدن به حالت تعادل استاتیکی و هیدرواستاتیکی، مقادیر تنش و فشار منفذی به‌عنوان مقادیر اولیه برای آنالیز مرحله‌ی دوم مورد استفاده قرارگرفته است. در مرحله‌ی دوم، بارگذاری زلزله به مدل اعمال شده است. همچنین به دلیل تغییر نفوذپذیری خاک در حین روانگرایی از مدل نفوذپذیری متغیر ارائه‌شده‌ی شهیر و محققان،[۱۲] در تحلیل‌ها استفاده شده است. پس از اتمام بارگذاری زلزله، اجازه‌ی زهکشی به آب منفذی تا رسیدن به شرایط تعادل هیدرواستاتیکی داده شده است. درستی نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی در مقایسه با مقادیر ثبت شده در آزمایش‌های سانتریفیوژ هاسلر (۲۰۰۲) در پژوهشی در سال ۲۰۱۴،[۱۳] ارائه شده است. همچنین نمو بارگذاری با سعی و خطا و درنظرگرفتن مقادیر مختلف برای به‌دست‌آوردن بهترین نتایج انتخاب شده است.

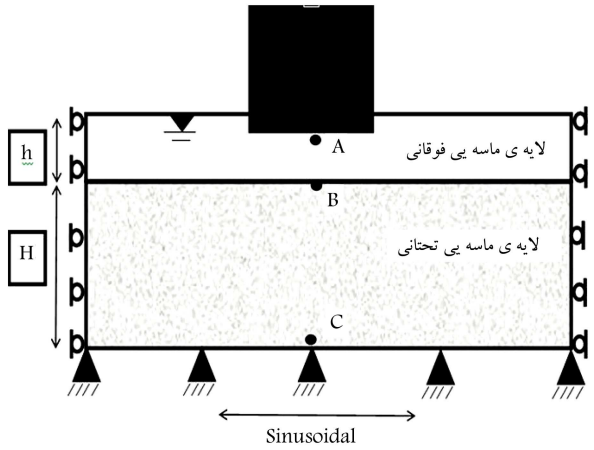
مشخصات لایه‌های خاک مطابق جدول ۲ و شکل ۳ می‌باشد. همچنین تحریک ورودی مورد استفاده برای مدل‌سازی آزمایش‌های سانتریفیوژ در شکل ۴ ارائه شده است.



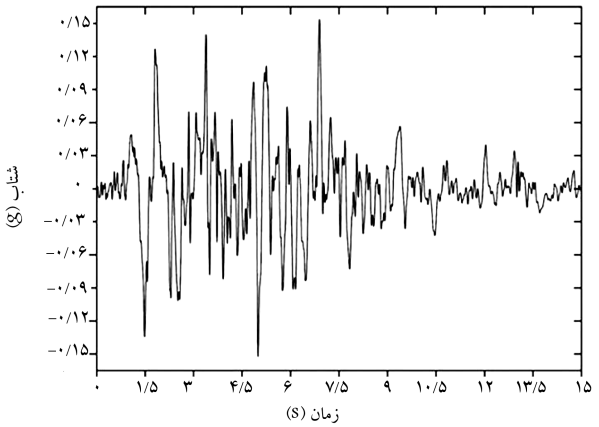
شکل ۲. مدل عددی به‌کاررفته برای مدل‌سازی آزمایش‌های سانتریفیوژ.

جدول ۲. مشخصات لایه‌های خاک.

مشخصات خاک	$D_r = \%۳۰$	$D_r = \%۸۵$
نسبت تخلخل	۰٫۷۸۱	۰٫۵۸۶
وزن واحد حجم خاک اشباع (kn/m^3)	۱۹	۲۰٫۱۵
نفوذپذیری (m/s)	۰٫۰۰۰۰۴	۰٫۰۰۰۰۲۵



شکل ۳. شرایط مسئله‌ی مورد بررسی.



شکل ۴. تحریک ورودی برای مدل‌سازی آزمایش‌های سانتریفیوژ.

جدول ۳. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش.

پارامترها	مقادیر در نظرگرفته‌شده
نسبت عمق لایه‌ی فوقانی به کل دامنه ($\frac{h}{h+H}$)	۰٫۱۴، ۰٫۳۳ و ۰٫۵۷
شتاب بیشینه‌ی بار سیکلیک $\frac{m}{S^2}$	۰٫۱۵g، ۰٫۲۵g و ۰٫۳۵g
عرض پی (m)	۴، ۸ و ۱۶
بسامد بار سیکلیک (Hz)	۱، ۳ و ۵

در این پژوهش تأثیر ۴ پارامتر: شتاب بیشینه‌ی تحریک ورودی، بسامد تحریک ورودی، عرض شالوده، و نسبت عمق لایه‌ی متراکم به کل دامنه تحت بار سینوسی مطابق جدول ۳ مورد بررسی قرارگرفته است.

۱.۳. حالت خاک متراکم بر روی خاک سُست

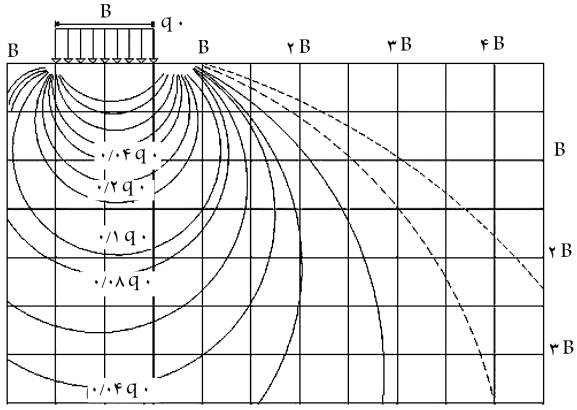
در این قسمت به بررسی نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک در حالت اول، یعنی خاک متراکم بر روی خاک سُست پرداخته و نتایج حاصل از تحلیل در بخش‌های آتی ارائه شده است. محیط خاکی بررسی‌شده شامل یک لایه‌ی خاک غیرروانگراست، که بر روی خاک روانگرای زیرین قرارگرفته است . برای این منظور مدل پایه‌یی با نسبت ضخامت لایه‌ی متراکم به کل برابر ۰٫۳۳، شتاب بیشینه‌ی ۰٫۱۵ g، بسامد ۳ هرتز و عرض شالوده برابر ۸ متر در نظرگرفته شده است.

۱.۱.۳. تأثیر عرض شالوده

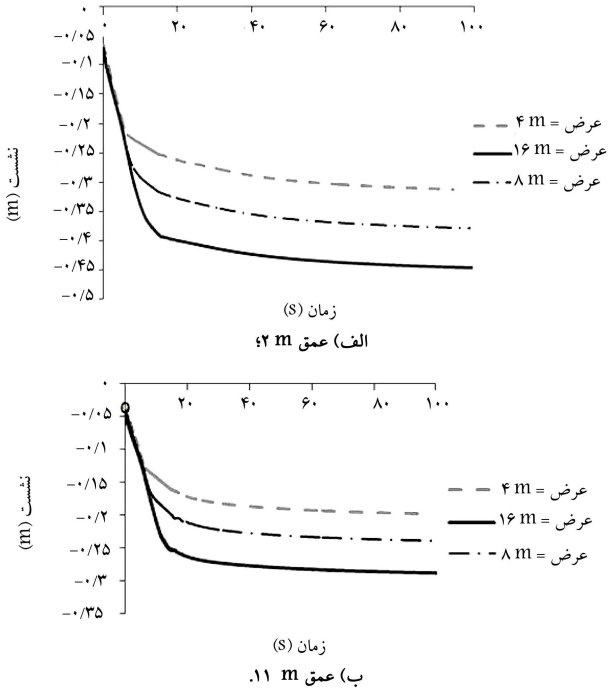
در این قسمت با درنظرگرفتن ابعاد مختلف برای شالوده، تأثیر این پارامتر در نشست شالوده سنجیده شده است. در این بررسی مطابق جدول ۳، عرض‌های ۴، ۸ و ۱۶ متر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ابتدا با توجه به مفهوم عمق تأثیر، می‌توان این‌طور بیان کرد که نشست به‌وجودآمده در زیر شالوده‌ی سطحی به شدت تابع عمق تأثیر آن است (شکل ۵). در محدوده‌ی عمق تأثیر شالوده، بیشترین نشست رخ داده و درصد زیادی از آن در نیمه‌ی بالایی یعنی عمقی برابر با عرض شالوده اتفاق افتاده است.

در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش عرض پی، نشست شالوده و خاک زیر آن افزایش می‌یابد. در همه‌ی نمودارها، بسامد غالب لرزه‌ها ۳ Hz است. همان‌طور که بیان شده است، در مکانیک خاک کلاسیک با فرض رفتار کشسان برای خاک، عمق تأثیر شالوده‌ی مربعی دو برابر عرض آن است. در نتیجه با افزایش عرض شالوده، میزان عمق تأثیر شالوده بیشتر در ناحیه‌ی روانگرا وارد شده و همین موضوع باعث افزایش نشست شالوده می‌شود. پس هر چه نسبت عرض شالوده به ضخامت لایه‌ی متراکم در این حالت بیشتر باشد، نشست اتفاق‌افتاده بیشتر است. این تغییر در نشست قابل توجه است و با توجه به شکل ۶ می‌توان به اهمیت تغییر عرض شالوده پی برد. با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که تغییرات نشست شالوده نسبت به عرض آن تقریباً به‌صورت خطی است. تأثیر عرض شالوده در نشست و ارتباط آن با عمق تأثیر پی در این شکل هم مشهود است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، مقدار نشست برای عمق‌های ۲ و ۴ متر در شالوده‌ی ۴ متری تفاوت چندانی با هم ندارند، در حالی که برای شالوده‌ی ۱۶ متری اختلاف بیشتری را نشان می‌دهد.

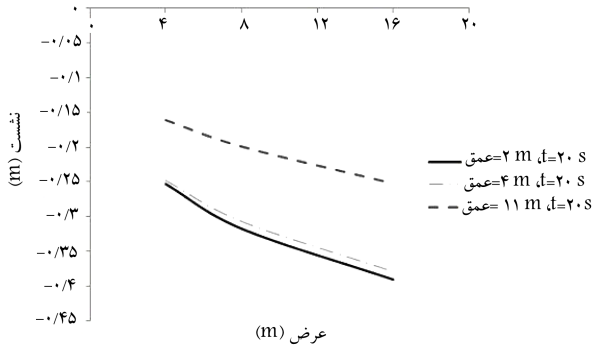
با توجه به شکل ۸، علاوه بر تأیید مطالب گفته‌شده در پاراگراف اخیر، می‌توان بیشترشدن تأثیر عرض پی به مرور زمان را مشاهده کرد، که مطابق آن در ثانیه‌های اولیه‌ی لرزش، اختلاف چندانی بین نشست ایجادشده توسط پی‌ها به‌وجود نیامده است، در حالی که بعد از گذشت ۲۰ ثانیه، نشست شالوده‌ها اختلاف بیشتری را نشان می‌دهند.



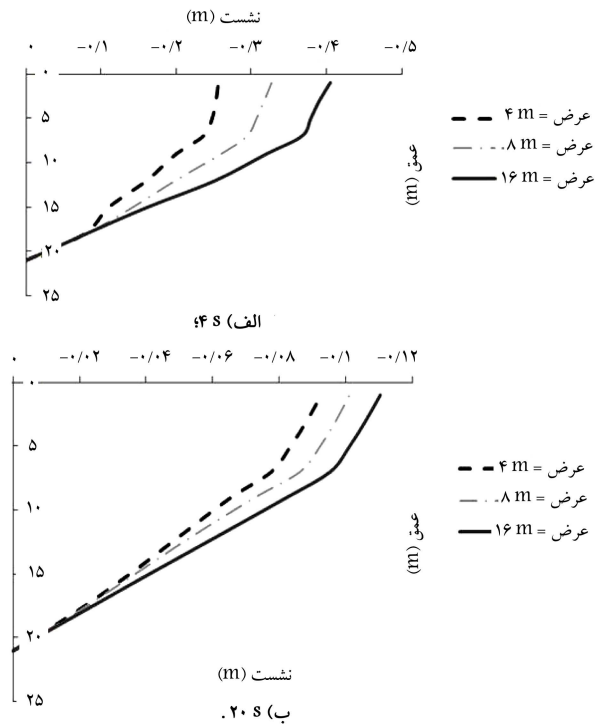
شکل ۵. عمق تأثیر براساس حباب‌های تنش برای پی مربعی.



شکل ۶. تاریخچه‌ی زمانی نشست سازه برای عرض‌های ۴، ۸ و ۱۶.



شکل ۷. تغییرات نشست در عمق ۲ متر برای عرض‌های مختلف.



شکل ۸. تغییرات نشست در عمق برای عرض‌های ۴، ۸ و ۱۶.

۳.۱.۲. تأثیر بسامد تحریک ورودی

در این بخش تغییرات نشست شالوده برای ۳ بسامد مختلف ۱، ۳ و ۵ هرتز بحث شده است. همان‌طورکه در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش بسامد تحریک ورودی، میزان نشست سازه کاهش یافته است. زیرا در این وضعیت، رفت و برگشت سازه سریع‌تر شده و در نتیجه، دامنه‌ی نوسان آن کاهش یافته است، که این موضوع باعث کاهش نشست سازه می‌شود.

با توجه به شکل ۹ می‌توان مشاهده کرد که نشست در بسامدهای پایین با شیب بیشتری اتفاق افتاده است و این نشست تا ثانیه‌هایی بعد از اتمام تحریک ورودی افزایش یافته و بعد از آن روند کاهشی آن شروع شده و با کاهش شیب، رو به مقداری ثابت رفته و بعد از ثانیه‌ی ۵۰، تقریباً نشستی اتفاق نیفتاده است. این تذکر لازم است که در لایه‌ی خاک متراکم فوقانی، اختلاف خاصی بین بسامدهای ۱ و ۳ در نشست وجود ندارد. ولی بعد از عبور از مرز بین دو لایه، به‌دلیل تأثیر مستقیم ویژگی‌های تحریک ورودی در نشست ناشی از روانگرایی، نشست‌ها متفاوت می‌شود و بعد از اعماق میانی لایه‌ی سُست، باز هم نشست‌ها به‌هم نزدیک می‌شود. در عمق ۱۴ متر هم که جزء عمق‌های پایینی لایه‌ی خاک محسوب می‌شود، مشاهده می‌شود که باز هم روندی همانند لایه‌ی متراکم تکرار می‌شود و نمودارهای بسامد ۱ هرتز و ۳ هرتز، باز هم به هم نزدیک می‌شوند.

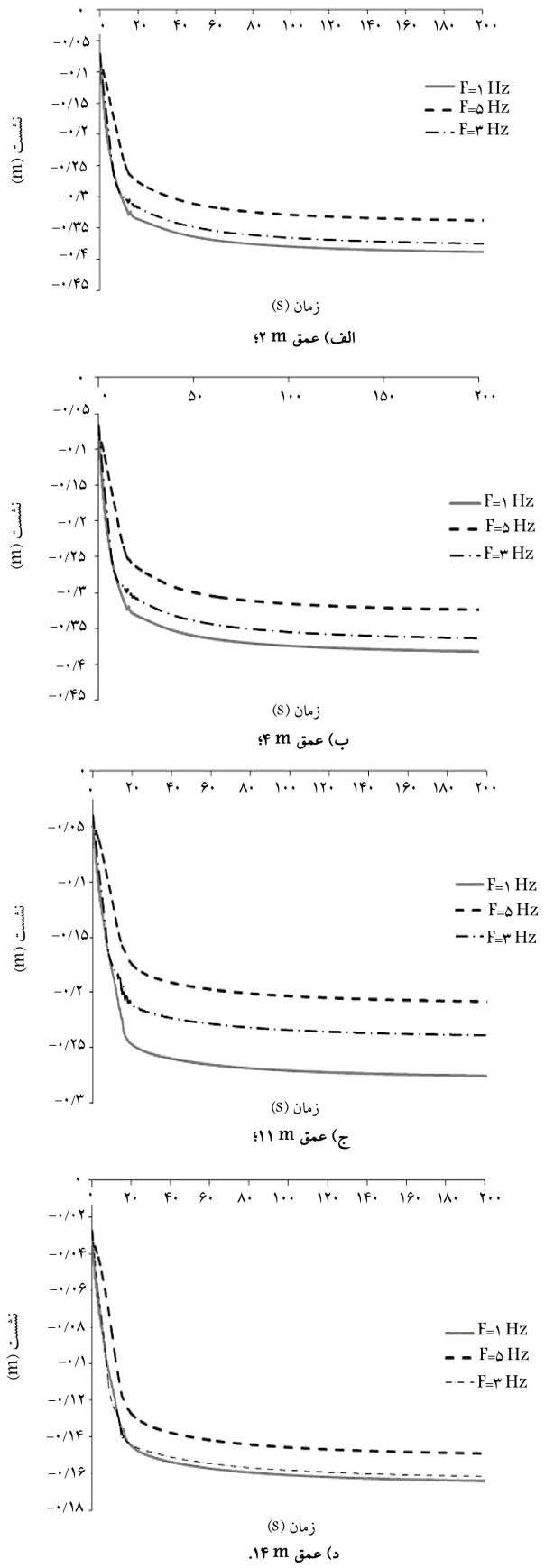
در شکل ۱۰، تغییرات نشست در عمق، برای زمان‌های مختلف برای مدل پایه رسم شده است. بیشترین مقدار نشست در طول بارگذاری رخ داده است. می‌توان بیان کرد که نشست از اولین لرزش سنگین شروع می‌شود، یعنی در ثانیه‌ی ۱ هم که اولین سیکل تمام می‌شود، حدود ۳ سانتی‌متر نشست در زیر شالوده وجود دارد و در ثانیه‌ی ۴ام، یک سوم کل نشست خاک زیر شالوده اتفاق افتاده است. در طول ۳ ثانیه در ابتدای لرزش‌ها، ۱۰ سانتی‌متر نشست رخ داده، است؛ در حالی که بعد از اتمام لرزش (ثانیه‌ی ۱۵) تا ثانیه‌ی ۲۰، میزان نشست در خاک زیر شالوده فقط ۴ سانتی‌متر است، که تأیید دیگری بر تأثیر زیاد لرزش‌ها در میزان نشست است.

همچنین با توجه به شکل ۱۰ می‌توان نتیجه گرفت که نشست شالوده بیشتر ناشی از عمق‌های میانی است. زیرا همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در بالای مرز دو لایه، نشست در عمق ثابت است و بیشترین مقدار نشست در عمق‌های بین ۶ تا ۱۵ متری از شالوده رخ داده است و عمق‌های پایین‌تر از آن تأثیر نسبتاً کمتری در میزان نشست دارند. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، در عمق ۱۵ متر، تغییر شیب در نمودار نشست در عمق اتفاق افتاده است.

در شکل ۱۱ تغییرات نشست سازه در عمق برای بسامدهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، میزان شیب نمودار نشست در عمق برای بسامد ۵ از بقیه بیشتر است. یعنی تغییرات نشست شالوده در عمق برای این بسامد به نسبت مقادیر ۱ و ۳ مقدارکمتری است. همچنین با مقایسه‌ی شکل مذکور با شکل ۱۰ می‌توان مشاهده کرد که تغییرات نشست برای مدل‌های با بسامد ۱ و ۳ به هم نزدیک هستند و این بازه‌ی تغییر بسامد، اختلاف زیادی در نشست پی در عمق ایجاد نکرده است.

۳.۱.۳. تأثیر شتاب بیشینه‌ی بار سیکلیک ورودی

در این بخش تأثیر دامنه‌ی تحریک ورودی در عملکرد شالوده مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که افزایش شتاب بیشینه‌ی تحریک ورودی، میزان نشست شالوده را افزایش داده است. این موضوع به‌دلیل افزایش دامنه‌ی تکان‌های شدیدی است که بر سازه و شالوده وارد شده است و باعث افزایش نشست‌های به‌وجودآمده در زیر شالوده شده است. در شکل ۱۲ مشاهده



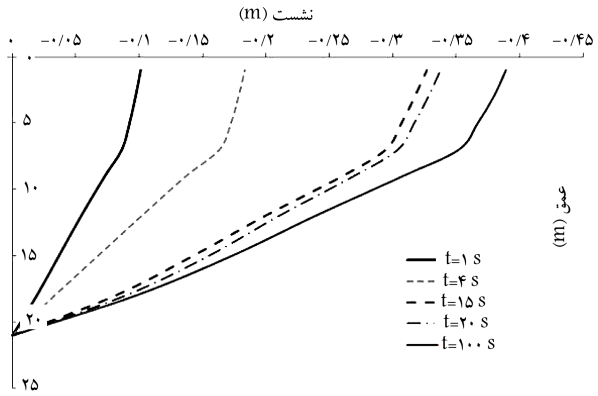
الف) عمق m ۲؛

ب) عمق m ۴؛

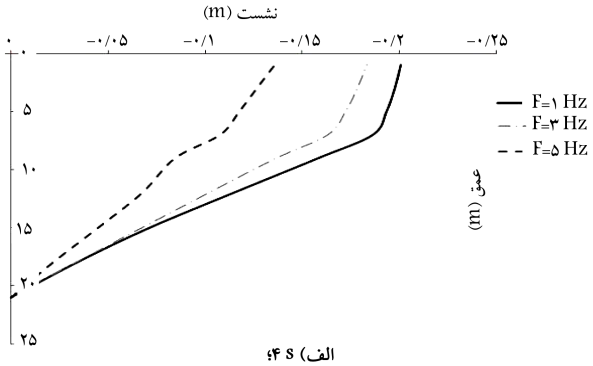
ج) عمق m ۱۱؛

د) عمق m ۱۴.

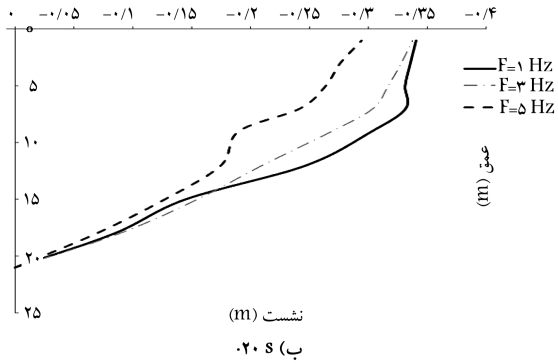
شکل ۹. تاریخچه‌ی زمانی نشست خاک (برای بسامدهای ۱، ۳ و ۵ در مدل پایه).



شکل ۱۰. تغییرات نشست در عمق برای مدل با بسامد ۳Hz در زمان‌های مختلف.



الف) s ۴؛



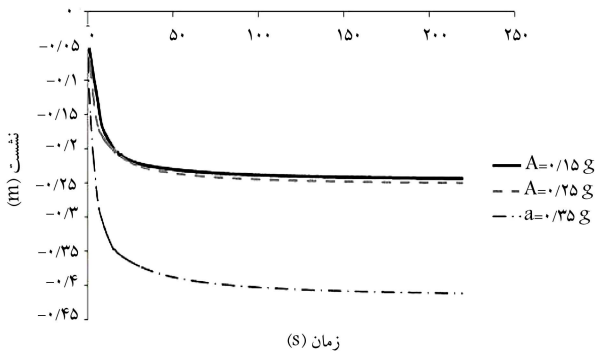
ب) s ۲۰.

شکل ۱۱. تغییرات نشست در عمق (برای بسامدهای ۱، ۳ و ۵ هرتز).

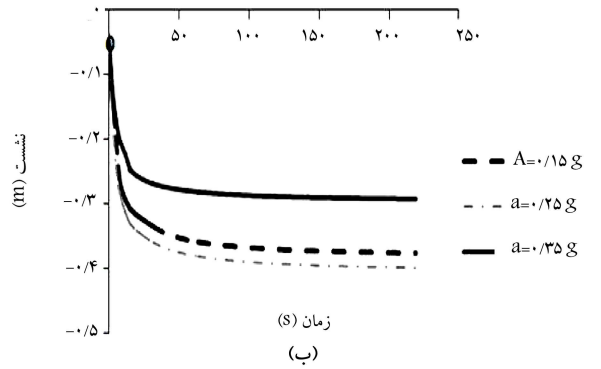
می‌شود که در اعماق سطحی، نمودارهای شتاب ۰٫۲۵ بینابین دو مقدار شتاب دیگر قرار دارد، ولی در عمق پایین‌تر، نمودار شتاب ۰٫۲۵ به نمودار شتاب ۰٫۱۵ نزدیک شده است. این موضوع احتمالاً به دلیل رخداد روانگرایی در عمق ۱۱ متری و عدم وقوع آن در اعماق سطحی است. به نظر نگارندگان می‌توان یک مقدار شتاب بحرانی تعریف کرد که در شرایط وقوع روانگرایی شتاب‌های کمتر از آن، تغییر چندانی در نشست نقاط واقع در منطقه‌ی روانگراشده به‌وجود نمی‌آورند. همین موضوع به کمک شکل ۱۳ هم قابل بیان است و می‌توان دید که با ورود به ناحیه‌ی سُست و وقوع روانگرایی، تغییر در روند نمودار مربوط به شتاب ۰٫۲۵ g محسوس است.

۴.۱.۳. تأثیر نسبت عمق لایه‌ی متراکم به کل دامنه

در این حالت برای سه نسبت ۰٫۱۴، ۰٫۳۳ و ۰٫۵۷ تحلیل‌ها انجام شده است. همان‌طوری که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، نمودارهای ارائه‌شده نشان‌دهنده‌ی کاهش نشست شالوده در اعماق سطحی با افزایش عمق لایه‌ی متراکم هستند و با

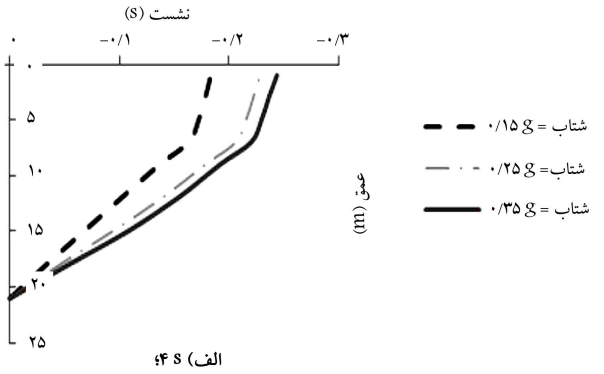


(الف)

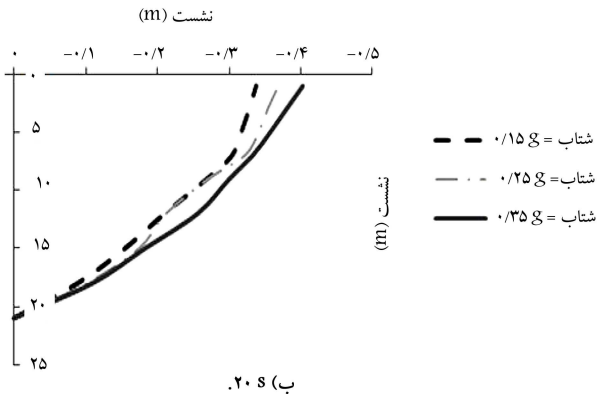


(ب)

شکل ۱۲. تاریخچه‌ی زمانی نشست برای شتاب‌های ۰٫۱۵، ۰٫۲۵ و ۰٫۳۵ برابر شتاب جاذبه‌ی زمین در عمق‌های ۴ و ۱۱ متر.

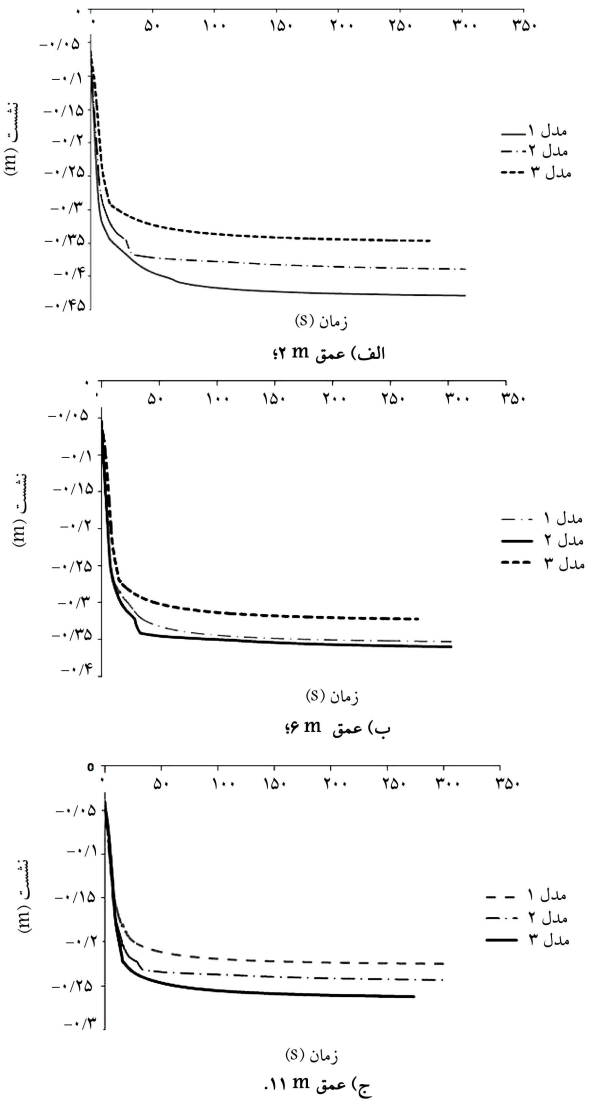


الف) s ۴؛



ب) s ۲۰.

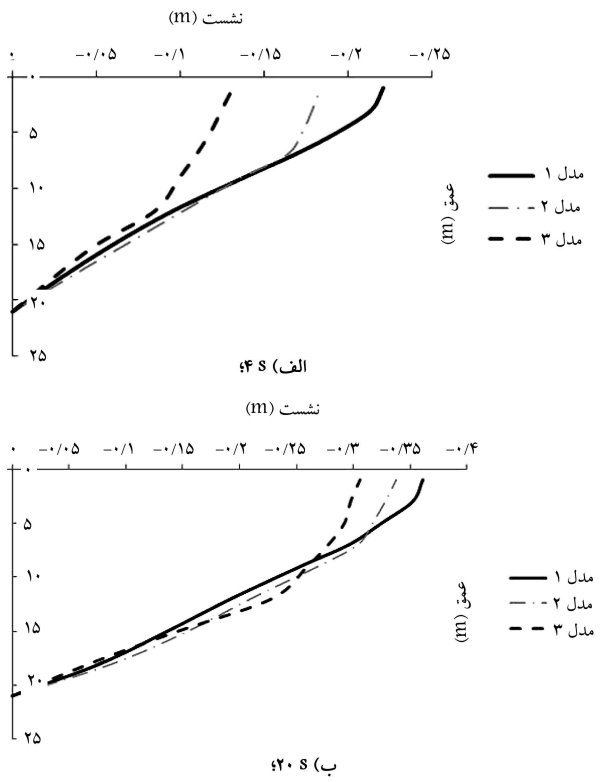
شکل ۱۳. تغییرات نشست در عمق برای شتاب‌های ۰٫۱۵، ۰٫۲۵ و ۰٫۳۵ و شتاب جاذبه‌ی زمین.



شکل ۱۴. تاریخچه‌ی زمانی نشست برای نسبت‌های ۰/۱۴، ۰/۳۳ و ۰/۵۷.

گسترش عمق لایه‌ی متراکم، نشست شالوده با نرخ بیشتری کاهش یافته است.

با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می‌شود که جایگیری نمودارهای سه حالت برای نشست خاک زیر شالوده با افزایش عمق لایه‌ی متراکم تغییر کرده است. نقاط تغییر جایگیری نمودارها در شکل ۱۵، در واقع مرز لایه‌ی متراکم و سُست در ۳ مدل مورد بررسی هستند. در عمق ۲ متری، همان‌طوری که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت لایه‌ی متراکم، شاهد کاهش نشست شالوده هستیم. با بررسی نتایج به‌دست‌آمده برای عمق‌های پایین‌تر متوجه می‌شویم که تغییری در روند مشاهده‌شده رخ داده است. به این دلیل که با توجه به ورود تحریک‌ها از پایین بر خاک و شالوده، لایه‌ی متراکم فوقانی فقط می‌تواند در ناحیه‌ی داخلی خود تأثیر مطلوب داشته باشد و در نواحی زیرین با افزایش میزان تنش وارده (به دلیل وزن بیشتر لایه‌ی متراکم نسبت به لایه‌ی سُست در بالای ناحیه سُست) افزایش نشست مشاهده می‌شود. این موضوع با بررسی نشست در عمق‌های ۶ متری (مرز در مدل ۰/۳۳) و ۱۱ متری (مرز در مدل ۰/۵۷) کاملاً مشهود است که تراکم لایه‌ی بالایی، تأثیر مطلوبی در خاک در اعماق بیشتر از عمق لایه‌ی متراکم ندارد. همان‌طوری که در عمق ۶ متری مشاهده می‌شود (این نقطه در ناحیه‌ی سُست در مدل ۰/۱۴، و مرز دو لایه در مدل ۰/۳۳ و



شکل ۱۵. تغییرات نشست در عمق برای نسبت‌های ۰/۱۴، ۰/۳۳ و ۰/۵۷.

در ناحیه‌ی متراکم در مدل ۰/۵۷ است)، انتظار می‌رود که نشست مدل آخر کمتر از بقیه باشد و نشست مدل دوم به دلیل وزن بیشتر وارد از طرف ناحیه‌ی متراکم بیشتر باشد، که همین موضوع قابل رؤیت است. این موضوع که در عمق‌های زیر مرز دو لایه‌ی نشست افزایش می‌یابد، برای شالوده‌های سطحی چندان حائز اهمیت نیست؛ زیرا همان‌طوری که عنوان شد، نشست خود شالوده و خاک اطراف آن مهم است، ولی برای سازه‌های مدفون می‌تواند حائز اهمیت باشد و بهتر است تأثیر این لایه‌ی متراکم در طراحی‌ها لحاظ شود. همچنین ممکن است با متراکم‌سازی بیشتر خاک، از عمقی به بعد با افزایش ضخامت لایه‌ی متراکم، شاهد افزایش نشست شالوده باشیم. زیرا افزایش تراکم باعث افزایش مقدار شتاب اعمالی به سازه می‌شود.[۱۲و۲] در نتیجه بارگذاری دینامیکی ناشی از جرم سازه افزایش می‌یابد، که این امر باعث افزایش تنش برشی دینامیکی در توده‌ی خاک و افزایش نشست می‌شود. لذا در صورتی که تأثیر کاهشی متراکم‌بودن لایه‌ی فوقانی در نشست کمتر از تأثیر افزایشی بارگذاری دینامیکی در تنش برشی باشد، افزایش عمق لایه‌ی متراکم باعث افزایش نشست می‌شود. این تذکر لازم است که با وجود اینکه افزایش مقادیر شتاب با افزایش محدوده‌ی متراکم در آزمایش‌های سانتریفیوژ در برخی پژوهش‌ها،[۱۲و۲] گزارش شده است، افزایش نشست ناشی از تراکم کامل لایه‌ی خاک گزارش نشده است. ولی در آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام‌شده توسط برخی پژوهشگران،[۱۵] بر روی دو مدل با عمق متراکم‌سازی کامل و عرض‌های تراکم‌سازی ۱ و ۳ برابر عرض شالوده مشاهده شده است که نشست شالوده حین لرزش در مدل با عرض متراکم‌سازی بزرگ‌تر، بیشتر از مدل با عرض متراکم‌سازی کوچک‌تر است، که دلیل آن افزایش بار دینامیکی سازه با افزایش محدوده‌ی خاک متراکم عنوان شده است. این تذکر لازم است که در نمودارهای ارائه‌شده، مدل‌های ۱ الی ۳ به ترتیب نشان‌گر نسبت‌های ۰/۱۴، ۰/۳۳ و ۰/۵۷ است.

۲.۳. حالت خاک سُست بر روی خاک متراکم

در این بخش برخلاف حالت قبل، تأثیر قرارگیری لایه‌ی سُست بر روی خاک متراکم، بر نشست شالوده‌ی سطحی در حالت‌های مختلف بررسی شده است.

۱.۲.۳. عرض شالوده

همان‌طورکه بیان شده است، ابعاد ۴، ۸ و ۱۶ متر برای عرض شالوده مانند حالت قبل مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طوری که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، با افزایش عرض شالوده، تغییر خاصی در نشست به وجودآمده در شالوده حاصل نشده است.

در همه‌ی نمودارها، بسامد غالب لرزه‌ها ۳ Hz است. مکانیزم مؤثر در افزایش نشست ناشی از افزایش عرض شالوده در بخش قبل تشریح شده است. تفاوت قابل ذکر این منحنی‌ها نسبت به حالت قبل، نشست کمتر نمونه‌ها و همچنین رفتار یکسان مدل‌هاست، که به دلیل قرارگرفتن این نقاط در خاک متراکم است. در واقع در این حالت، عمق لایه‌ی روانگرا به حدی نیست که عرض شالوده تغییر به‌سزایی در نشست به وجودآمده ایجاد کند. همچنین به دلیل عدم وقوع روانگرایی، نمی‌توان مکانیزم‌های خاصی که به دلیل روانگرایی اتفاق می‌افتد، را در این نتایج دخیل دانست.

۲.۲.۳. بسامد شتاب ورودی

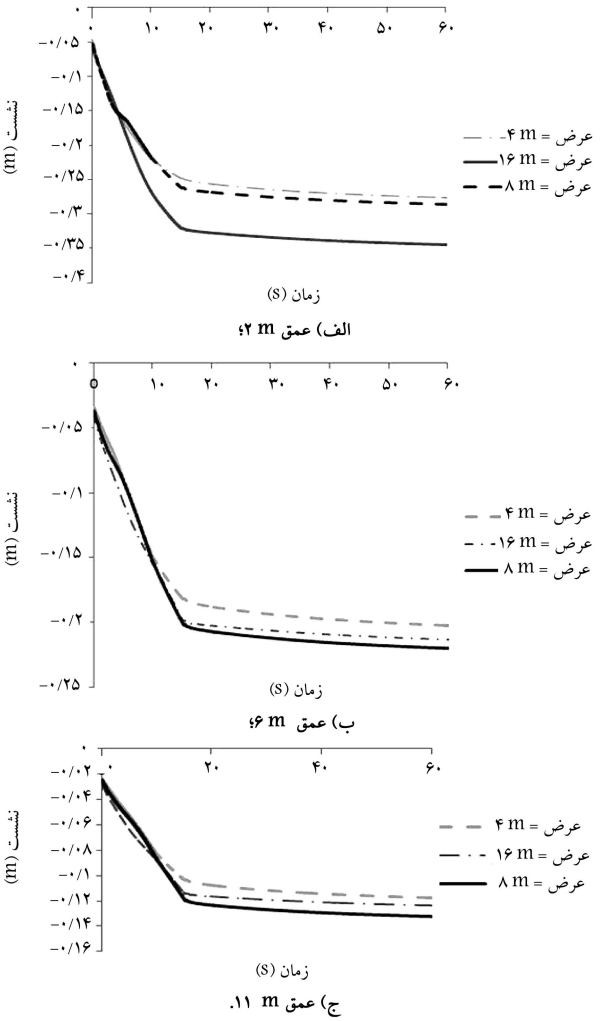
در این بخش مانند حالت قبل، تغییرات نشست برای ۳ بسامد مختلف ۱، ۳ و ۵ هرتز بحث شده است. در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که تأثیر بسامد در نشست مانند حالت قبل است و با افزایش بسامد، کاهش نشست خواهیم داشت.

در شکل ۱۸، تغییرات نشست در عمق برای مدل پایه رسم شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود، روند کاملاً شبیه شکل ۱۰ است، با این تفاوت که در این نمودار به محض ورود به لایه‌ی متراکم، تغییر در شیب نمودار در عمق ۶ متری رخ داده است، که نشان‌دهنده‌ی تأثیر مطلوب لایه‌ی متراکم در کاهش میزان نشست‌هاست. مورد قابل ذکر دیگر عدم تفاوت در نمودارهای نشست پس از پایان لرزه‌هاست، که نشان از تأثیرکم مکانیزم‌های فعال بعد از لرزه در این حالت است.

۳.۲.۳. تأثیر شتاب بیشینه‌ی بار سیکلیک ورودی

در این بخش تأثیر شتاب بیشینه در عملکرد شالوده، در حالت لایه‌ی متراکم در زیر لایه‌ی سُست مورد بررسی قرار گرفته است، که در این حالت شتاب‌های ۰٫۱۵، ۰٫۲۵ و ۰٫۳۵ برابر شتاب جاذبه‌ی زمین مد نظر گرفته شده است. مقدار بسامد برابر ۳ Hz و مقدار عرض شالوده مساوی ۸ متر بوده است.

در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که با افزایش شتاب تحریک ورودی مطابق انتظار شاهد افزایش نشست هستیم. همچنین مشاهده می‌شود که نمودار مربوط به شتاب

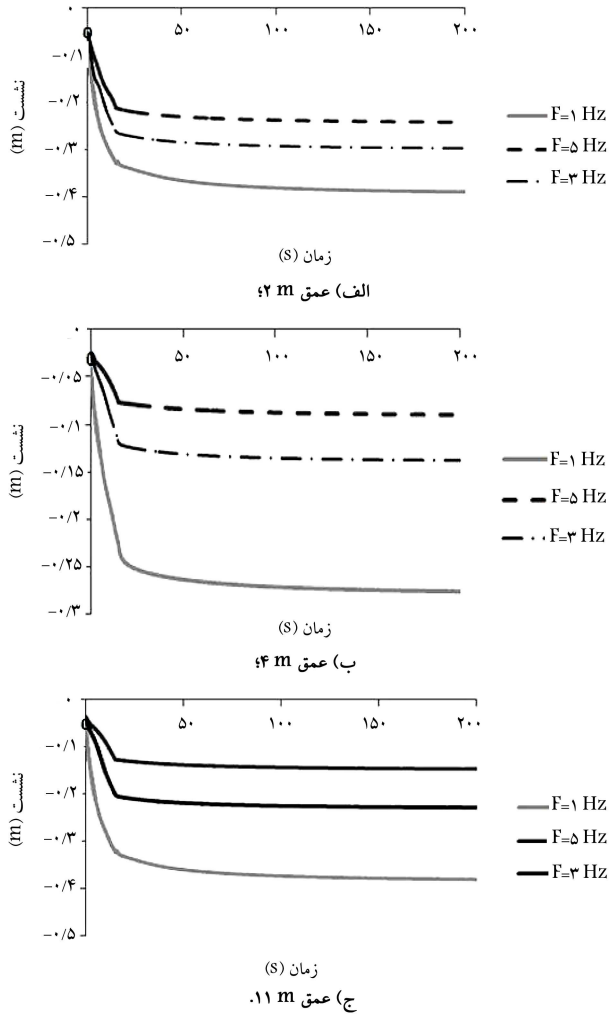


الف) عمق ۲ m؛

ب) عمق ۶ m؛

ج) عمق ۱۱ m.

شکل ۱۶. تاریخچه‌ی زمانی نشست سازه برای عرض‌های ۴، ۸ و ۱۶.

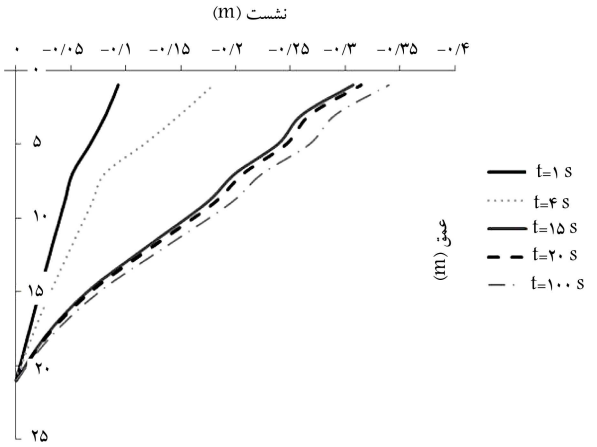


الف) عمق ۲ m؛

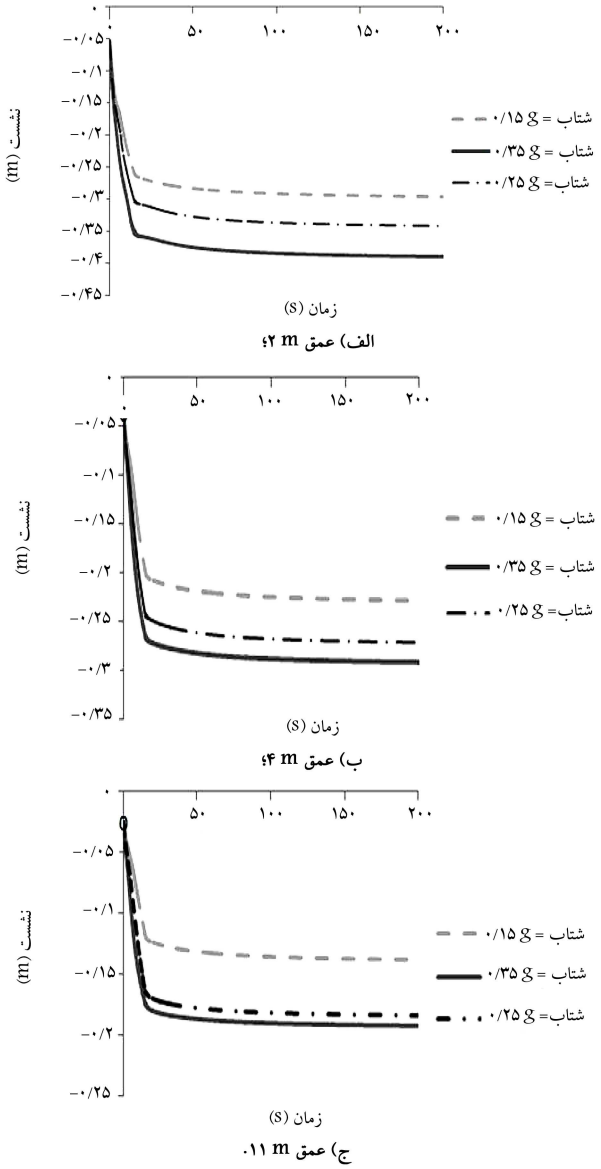
ب) عمق ۴ m؛

ج) عمق ۱۱ m.

شکل ۱۷. تاریخچه‌ی زمانی نشست خاک (برای بسامدهای ۱، ۳ و ۵ هرتز).



شکل ۱۸. تغییرات نشست در عمق برای مدل پایه در زمان‌های مختلف.



الف) عمق m ۲؛

ب) عمق m ۴؛

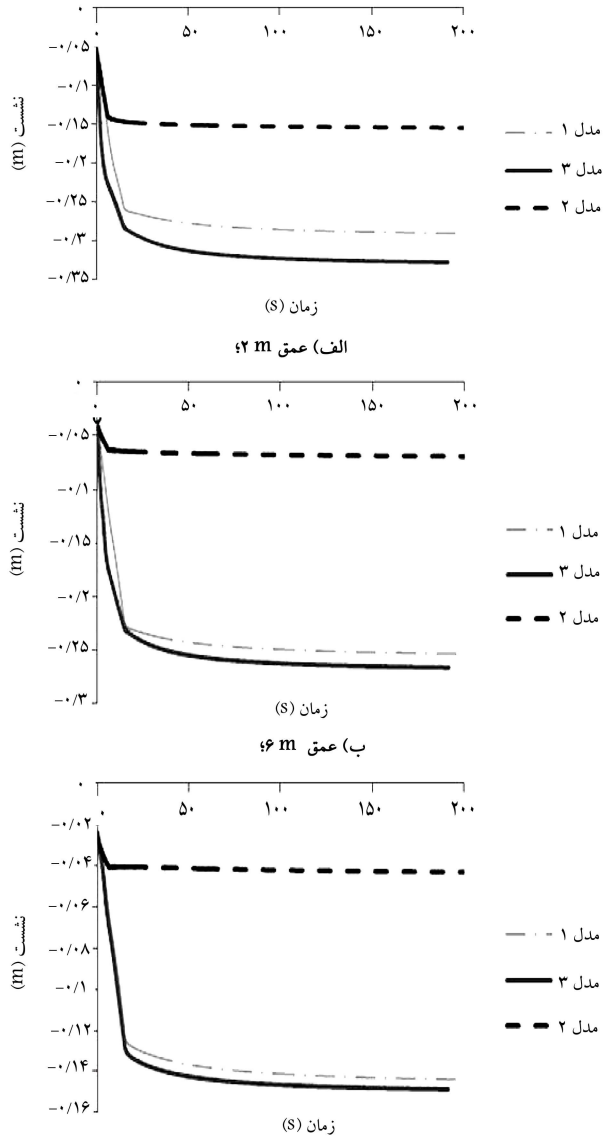
ج) عمق m ۱۱.

شکل ۱۹. تاریخچه‌ی زمانی نشست برای شتاب‌های ۰/۱۵، ۰/۲۵ و ۰/۳۵ برابر شتاب جاذبه‌ی زمین.

۰/۲۵ با افزایش عمق به سمت نمودار شتاب ۰/۳۵ حرکت می‌کند. در این حالت می‌توان گفت شتاب‌های ۰/۲۵ و ۰/۳۵ تقریباً عملکرد یکسانی دارند.

۴.۲.۳. تأثیر نسبت لایه‌ی متراکم به کل دامنه

در این حالت هم برای سه نسبت ۰/۱۴، ۰/۳۳ و ۰/۵۷ تحلیل‌ها انجام و نشست مورد بررسی قرارگرفته است. همان‌طورکه در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، نمودارهای ارائه‌شده نشان‌دهنده‌ی کاهش نشست شالوده با افزایش ضخامت لایه‌ی متراکم هستند. برخلاف حالت قبل، در این حالت لایه‌ی متراکم در زیر لایه‌ی سُست قرار دارد و همین موضوع باعث تغییر در روند نشست مشاهده‌شده در مدل‌های مختلف شده است. بدین صورت که در مدل‌هایی با عمق لایه‌ی متراکم بیشتر (مدل با نسبت ۰/۱۴)، کمترین نشست و در مدل با نسبت ۰/۵۷، بیشترین نشست را شاهد هستیم. زیرا به ترتیب کمترین و بیشترین عمق لایه‌ی روانگرا موجود است. همچنین با توجه به شکل ۲۰ مشاهده می‌شود که در خاک زیر شالوده با افزایش عمق لایه‌ی سُست، تغییر در میزان نشست مدل‌ها نسبت به یکدیگر در عمق‌های مختلف به وجود آمده



الف) عمق m ۲؛

ب) عمق m ۶؛

ج) عمق m ۱۱.

شکل ۲۰. تاریخچه‌ی زمانی نشست برای نسبت‌های ۰/۱۴، ۰/۳۳ و ۰/۵۷.

است. در واقع، نقاط نشان داده‌شده در شکل ۲۰، مرز لایه‌ی متراکم و سُست در ۳ مدل مورد بررسی هستند. در عمق ۲ متر، با افزایش عمق لایه‌ی سُست شاهد افزایش نشست شالوده هستیم. این موضوع با بررسی نشست در عمق‌های ۶ متر (مرز در مدل ۰٫۳۳) و ۱۱ متر (مرز در مدل ۰٫۵۷) کاملاً مشهود است که لایه‌ی متراکم در اعماق بیشتر، تأثیر مطلوب‌تری در کاهش نشست شالوده و خاک زیر آن دارد. البته باید توجه کرد که منظور از این جمله این نیست که بیشتربودن ضخامت لایه‌ی سُست شرایط بهتری ایجاد می‌کند، بلکه این موضوع تأثیر بیشتر نزدیک‌بودن لایه‌ی متراکم به مرکز زلزله را بدون تغییر ضخامت لایه‌ی سُست بیان می‌کند.

همان‌طور که عنوان شده است، لایه‌ی متراکم با ضخامت زیاد می‌تواند باعث افزایش نشست به وجودآمده در شالوده شود. البته در این مدل‌ها که ضخامت لایه‌ی متراکم در فاصله‌یی از شالوده‌ی اعمال شده است، امکان رخداد چنین مکانیزمی نسبتاً کم است. ولی احتمال دارد در صورتی که عمق لایه‌ی متراکم به اندازه‌ی کل لایه‌ی خاک باشد، این پدیده مشاهده شود.

نکته‌ی مهم دیگر در شکل ۲۰، کاهش قابل توجه نشست نسبت به حالت قبل است. با اینکه در هر دوی این حالت‌ها، خاک شامل دو قسمت سُست و متراکم با ویژگی‌های یکسان بوده است، مشاهده شده است که در حالت دوم نشست کمتری برای مدل‌ها نتیجه می‌شود، که این موضوع به تأثیر بیشتر لایه‌ی متراکم در حالت دوم اشاره دارد. این موضوع نشان می‌دهد که هر چه لایه‌ی متراکم به محل اعمال لرزه‌ها نزدیک‌تر باشد، تأثیر مطلوب‌تری در نشست شالوده و خاک زیر آن خواهد داشت.

این تذکر لازم است که در اعماق ۶ و ۱۱ متری، به دلیل اینکه ضخامت لایه‌ی متراکم در زیر این نقاط در مدل‌های با نسبت ۰٫۳۳ و ۰٫۵۷ برابر است، نشست‌های برابری قابل انتظار است، که این موضوع در شکل ۱۹ قابل مشاهده است.

۴. نتیجه‌گیری

این پژوهش مشتمل بر ارزیابی رخداد نشست شالوده‌های سطحی ناشی از روانگرایی، روی خاک‌های دو لایه در دو حالت مختلف است. در حالت اول، لایه‌ی متراکم بر روی لایه‌ی سُست قرارگرفته و در حالت دوم، عکس این وضعیت در نظرگرفته شده است. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار OpenSEES استفاده شده است، که قادر به تحلیل دینامیکی همبسته‌ی محیط متخلخل اشباع به صورت سه بُعدی است. در این پژوهش از تحلیل کاملاً همبسته‌ی دینامیکی در حوزه‌ی زمان با فرمول‌بندی u-P که از روش‌های دقیق بررسی پدیده‌ی روانگرایی است، استفاده شده است. برای بررسی رفتار ماسه‌ی اشباع، از مدل رفتاری Dafalias & Manzari (۲۰۰۴) استفاده شده است،[5] که توانایی خود را در بررسی رفتار ماسه تحت بارگذاری‌های تناوبی و یک‌سویه نشان داده است. فرمولاسیون این مدل براساس حالت خمیری سطح مرزی در فضای نسبت تنش انحرافی و در چارچوب مکانیک خاک حالت بحرانی است.

محیط خاکی بررسی‌شده شامل خاک دو لایه‌یی است که در حالت اول، لایه‌ی متراکم بر روی لایه‌ی روانگرا و در حالت دوم، عکس این وضعیت بوده است. تأثیر پارامترهای عرض شالوده، دامنه، و بسامد تحریک ورودی و نسبت ضخامت لایه‌ی بالایی به کل ضخامت خاک در ارزیابی نشست شالوده‌های سطحی با درنظرگرفتن اثر اندرکنشی بین شالوده و خاک در نظرگرفته شده و هدف از این پژوهش، توسعه‌ی یک روش عددی برای تخمین میزان نشست شالوده واقع بر روی خاک دولایه‌ی ماسه‌یی بوده است.

به‌طورکلی در مقایسه بین دو حالت مورد بحث در این پژوهش می‌توان به تأثیر بیشتر لایه‌ی خاک متراکم قرارگرفته در عمق (حالت دوم) اشاره کرد، که در این حالت نشست زیر شالوده به مراتب کمتر از حالت قبل پیش‌بینی شده است.

پارامتر بسامد تحریک ورودی به دلیل تغییر در روند اعمال تحریک ورودی و متعاقب آن روند لرزش سازه‌ی موردنظر، تأثیر مشخصی در نشست شالوده داشته است، به طوری که می‌توان گفت با افزایش بسامد به‌دلیل کاهش دامنه‌ی نوسانات سازه، نشست شالوده کاهش می‌یابد.

با افزایش شدت اعمال لرزه، شدت تنش‌های برشی تناوبی تشدید و باعث افزایش میزان فشار آب حفره‌یی شده است، که خود باعث شکست زودتر اسکلت ماسه خواهد شد. پس می‌توان انتظار داشت که با افزایش دامنه‌ی شتاب تحریک ورودی، نشست سازه بیشتر شود. شتاب بیشینه‌ی تحریک ورودی، به‌دلیل تأثیر در دامنه‌ی تحریکات ورودی، عملکردی مخالف بسامد دارد و افزایش آن، دامنه‌ی نوسان سازه را افزایش می‌دهد و همین مسئله باعث افزایش تغییرمکان قائم ساختمان و نشست آن در هر دو حالت می‌شود.

در رابطه با عرض شالوده می‌توان عنوان کرد در حالتی که لایه‌ی متراکم بر روی لایه‌ی سُست قرار دارد، افزایش عرض شالوده، به دلیل افزایش فشار محصورکننده‌ی وارد بر خاک زیر شالوده، باعث افزایش ظرفیت تولید فشار آب حفره‌یی اضافی در خاک زیر شالوده می‌شود. این افزایش اگر چه در حدی نیست که باعث روانگرایی خاک زیر شالوده شود، به دلیل افزایش مسیر زهکشی آب حفره‌یی رخ می‌دهد، زیرا در این وضعیت آب مجبور است مسیر بیشتری را برای زهکش‌شدن طی کند و در نتیجه فشار آب حفره‌یی در زیر شالوده بیشتر از اطراف آن خواهد بود، که این موضوع باعث افزایش زمان تحکیم در نشست پی سطحی می‌شود. در حالت دوم که به دلیل عمق نسبتاً کم لایه‌ی روانگرا، میزان نشست تقریباً یکسانی برای عرض‌های مختلف به دست آمده است، این انتظار می‌رود که با کاهش نسبت عرض به عمق لایه‌ی متراکم، تأثیر عرض شالوده به‌صورت محسوس‌تری مشاهده شود.

با افزایش عمق لایه‌ی متراکم، نشست شالوده کاهش یافته است. البته افزایش بیشتر عمق لایه‌ی متراکم می‌تواند باعث تشدید اثرات لرزه شود. همچنین مشاهده شده است که در عمق‌های پایین‌تر از مرز دو لایه، تراکم تأثیر نامطلوبی در میزان نشست دارد، که به دلیل وزن اضافه‌شده‌ی ناشی از لایه‌های متراکم بالایی است. در حالت دوم، به دلیل قرارگیری لایه‌ی متراکم در زیر لایه‌ی سُست، نشست کمتری در زیر شالوده مشاهده شده است، که حکایت از تأثیر بیشتر لایه‌ی متراکم قرارگرفته در عمق دارد.

پانوشت‌ها

3. Nevada

1. peak ground acceleration
2. critical state soil mechanics

منابع (References)

1. Gutierrez, A.M. "Centrifuge modeling of surface structure on normally consolidated silty sand deposited in layers under water and subjected to seismic", Thesis PhD., Rensselaer Polytechnic Institute (1998).
2. Hausler, E.A. "Influence of ground improvement on settlement and liquefaction:A study based on field case history evidence and dynamic geotechnical centrifuge tests", Ph.D Dissertation, University of California, Berkeley (2002).
3. Dashti, S., Bray, J., Pestana, J., Riemer, M. and Wilson, D. "Mechanisms of seismically induced settlement of buildings with shallow foundations on liquefiable soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **136**(1), pp. 151-164 (2009).
4. Shahir, H. "Assessment of effectivness of compaction improvement for liquefaction mitigation of saturated sand deposits based on performance levels of shallow foundations", Ph.D Dissertation, Sharif university of Technology (2009).
5. Dafalias, Y.F. and Manzari, M.T. "Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects", *Journal of Engineering Mechanics*, **130**(6), pp. 622-634 (2004).
6. Wood, D.M., *Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press (1990).
7. Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A. "Yielding of clays in states wetter than critical", *Geotechnigue*, **13**(3), pp. 211-240 (1963).
8. Schofield, A.N. and Wroth, C.P., *Critical State Soil Mechanics*, Lecturers in Engineering at Cambridge University (1968).
9. Arulmoli, K., Muraleetharan, K.K., Hossain, M.M. and Fruth, L.S., *VELACS Laboratory Testing Program: Soil Data Report*, The Earth Technology Corporation (1992).
10. Koutsourelakis, S., Prevost, J.H. and Deodatis, G. "Risk assessment of an interacting structure-soil system due to liquefaction", *Earthquake Engineering and Structures Dynamics,* **31**(4), pp. 851-879 (2002).
11. Lopez-Caballero, F. and Modaressi Farahmand-Razavi, A. "Numerical simulation of liquefaction effects on seismic SSI", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(2), pp. 85-98 (2008).
12. Shahir, H. Pak, A., Taiebat, M., and Jeremic, B., . "Evaluation of variation of permeability in liquefiable soil under earthquake loading", *Computers and Geotechnics,* **40**, pp. 74-88 (2012).
13. Ayoubi, P. "Settlement of shallow foundation on liquefiable layered soil subjected to earthquake loading", Ms.c Thesis, Sharif University of Technology (2014).
14. Liu, L. and Dobry, R. "Seismic response of shallow foundations on liquefiable saturated sand", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **123**(6), pp. 557-567 (1997).
15. Coelho, P.A.L.F., Haigh, S.K., Madabhushi, S.P.G. and O'brien, T.S. "Post earthquake behaviour of footing employing densification to mitigate liquefaction", *Ground Improvement,* **11**(1), pp. 45-53 (2007).
16. Zeienkiewicx, O.C., Chan, A.H.C., pastor, M., schrefler, B.A., and shiomi, T., computational Geomechanics with special Reference to Earthquake Engineering, Wiley, (in Persian) (1988).