

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 لرزیمی به روانگرا شدن خاک زیر شالوده منتهی می‌شوند، موضوع تازه‌ی 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 نسیست، شاهد کاهش و در حالت خاک نسیست 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

نابایداری‌های ناشی از روانگرایی در زمره‌ی خسارت‌بارترین مخاطرات زلزله قرار دارند. در حین روانگرایی به دلیل افزایش فشار آب حفره‌ی اضافی، تنش مؤثر در خاک کاهش یافته و به حدود صفر تقلیل می‌یابد. این پدیده بیشتر در لایه‌های ماسه‌یی نسیست 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 احداث شده بر روی توده‌ی ماسه‌یی نسیست اشباع با استفاده از مدل‌سازی سانتی‌فیوژ بررسی و پارامترهای مورد مطالعه در آن، شامل: دامنه و بسامد تحریک ورودی، نوع فابریک، و نفوذپذیری خاک بوده و این نتایج به دست آمده است:

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

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

* نویسنده مسئول

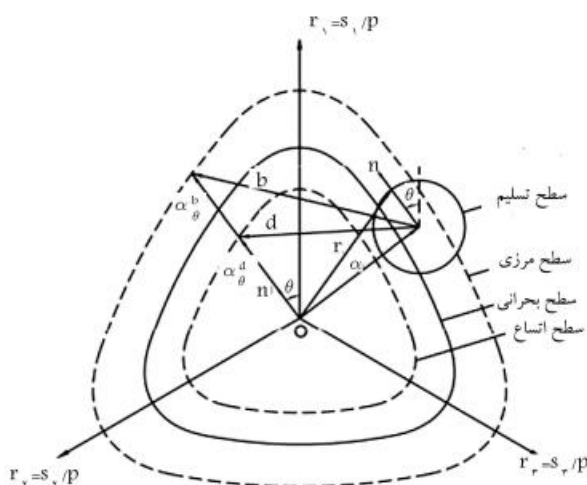
تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۳/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۳/۸/۱، پذیرش ۱۳۹۳/۱۰/۲۰

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 سانتی‌فیوژی، تأثیر بهسازی در کاهش نشست شالوده بر روی خاک روانگرا مورد مطالعه قرار گرفته و این نتیجه به دست آمده است که با افزایش عرض و عمق منطقه‌ی بهسازی شده، نشست شالوده‌ی سطحی کاهش یافته است.

همچنین در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۹^[۳] توسط آزمایش‌های سانتی‌فیوژ که شامل خاک با ۳ لایه‌ی مختلف و سازه‌های در نظر گرفته شده 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



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

جدول ۱. پارامترهای مدل رفتاری ارائه شده در سال ۲۰۰۴ [۵]، کالیبره شده برای ماسه‌ی نوادا [۹].

عملکرد پارامتر	نشانه‌ی پارامتر	مقدار پارامتر
کشش	G_c (kpa)	۱۵۰
	ν	۰٫۰۵
حالت بحرانی	M	۱٫۱۴
	c	۰٫۷۸
	λ_c	۰٫۲۷
	e_c	۰٫۸۳
	ξ	۰٫۴۵
سطح تسلیم	m	۰٫۰۲
مدول خمیری	h_c	۹٫۷
	c_h	۱٫۰۲
	n^b	۲٫۵۶
اتساع	A_c	۰٫۸۱
	n^d	۱٫۰۵
تانسور فابریک	Z_{max}	۵
	c_z	۸۰۰

شهر (۲۰۰۹) [۱] پارامترهای مدل رفتاری ارائه شده در پژوهش اخیر [۱] را برای ماسه‌ی نوادا^۲ 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 به صورت سه بعدی است. در این پژوهش از تحلیل کاملاً همبسته‌ی دینامیکی در حوزه‌ی زمان با فرمول‌بندی

آزمایش‌های مختلف انجام شده، تأثیر پارامترهای مختلف در میزان نشست ناشی از هر مکانیزم را به صورت کیفی ارائه و برای برآورد کمی میزان تأثیر هر پارامتر، انجام آزمایش‌های بیشتر را پیشنهاد کرده‌اند.

در پژوهش دیگری نیز در سال ۲۰۰۸ [۱۱] با مدل‌سازی آزمایش‌های سانتریفیوژ، تأثیر پارامترهای مختلف در بهسازی خاک زیر شالوده‌ی سطحی بررسی و الگوریتمی ارائه شده است که به کمک آن بهسازی به صورت 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 برده‌اند که باعث افزایش خطا می‌شود. لذا در پژوهش حاضر با مدل‌سازی سه بعدی 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 ممتوم برای کل المان؛ ۲. معادله‌ی تعادل ممتوم برای فاز سیال؛ ۳. معادله‌ی تعادل جرم.

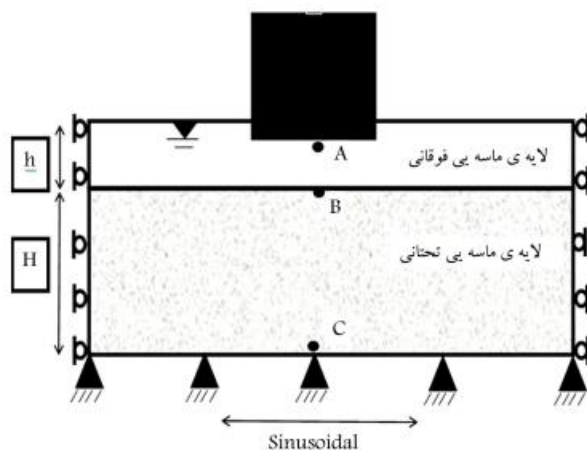
در پژوهشی در سال ۱۹۸۸ [۱۶] با انجام آنالیزهای مختلف نشان داده شده است که ترم u_s (جاب‌جایی فاز جامد است) در معادله‌ی تعادل ممتوم فاز سیال، تأثیر ناچیزی در نتایج دارد و از طرف دیگر، این ترم باعث غیرممتقان شدن ماتریس ضرایب کل و بروز مشکلات عددی در حل دستگاه معادلات نیز می‌شود و لذا می‌توان از ترم ذکر شده صرف‌نظر کرد. در نهایت، معادلات به صورت روابط ۱ و ۲ در آمده و شامل دو مجهول U و P است:

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

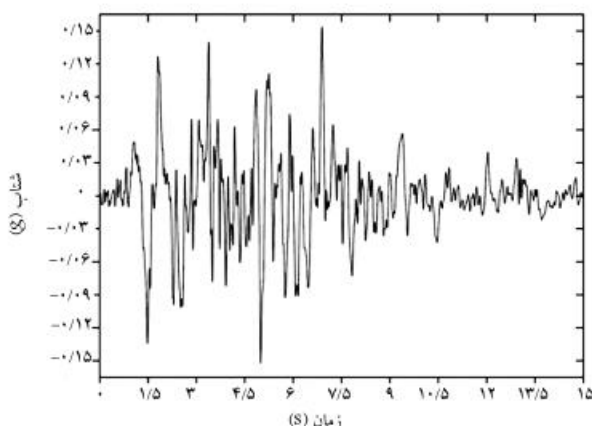
$$Q^T \dot{U} + HP + \dot{S}P - f^{(p)} = 0 \quad (2)$$

که در آن‌ها، M ماتریس جرم سیستم، B ماتریس کرنش - جاب‌جایی، Q ماتریس همبستگی دو معادله، S ماتریس تراکم‌پذیری، و H ماتریس نفوذپذیری است. بردارهای $f^{(p)}$ و $f^{(s)}$ شامل تمام اثرات نیروهای حجمی و سطحی تعریف شده 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 ارائه شده 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 به صورت 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 بیان شده، [۵] ارائه شده است.



شکل ۳. شرایط مسئله ی مورد بررسی.



شکل ۴. تحریک ورودی برای مدل سازی آزمایش های سانتریفیوژ.

جدول ۳. پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش.

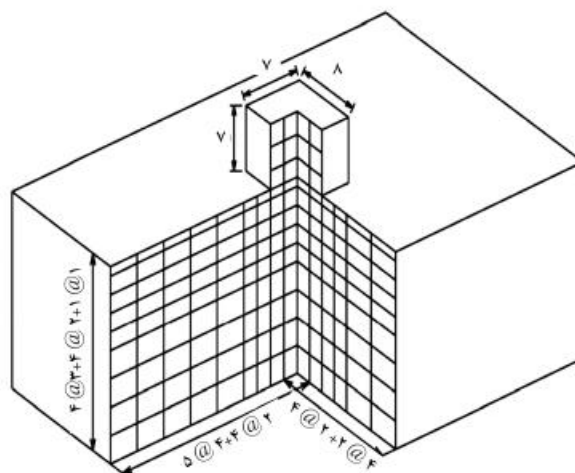
پارامترها	مقادیر در نظر گرفته شده
نسبت عمق لایه ی فوقانی به کل دامنه $(\frac{h}{h+H})$	۰٫۵۷ و ۰٫۳۳ و ۰٫۱۴
شتاب بیشینه ی بار سیکلیک $\frac{m}{s^2}$	۰٫۳۵g و ۰٫۲۵g و ۰٫۱۵g
عرض پی (m)	۱۶ و ۸٫۴
بسامد بار سیکلیک (Hz)	۵ و ۳٫۱

در این پژوهش تأثیر ۴ پارامتر: شتاب بیشینه ی تحریک ورودی، بسامد تحریک ورودی، عرض شالوده، و نسبت عمق لایه ی متراکم به کل دامنه تحت بار سینوسی مطابق جدول ۳ مورد بررسی قرار گرفته است.

۱.۳. حالت خاک متراکم بر روی خاک سست

در این قسمت به بررسی نتایج حاصل از تحلیل پارامتریک در حالت اول، یعنی خاک متراکم بر روی خاک سست پرداخته و نتایج حاصل از تحلیل در بخش های آتی ارائه شده است. محیط خاکی بررسی شده شامل یک لایه ی خاک غیرروانگراست، که بر روی خاک روانگرایی زیرین قرار گرفته است. برای این منظور مدل پایه یی با نسبت ضخامت لایه ی متراکم به کل برابر ۰٫۳۳، شتاب بیشینه ی ۰٫۱۵g، بسامد ۳ هرتز و عرض شالوده برابر ۸ متر در نظر گرفته شده است.

u-P، که از روش های دقیق بررسی پدیده ی روانگرایی است، استفاده شده است. برای صحت سنجی مدل و بررسی اعتبار نتایج مدل عددی از نتایج آزمایش های سانتریفیوژ، که در پژوهشی در سال ۲۰۰۲ در دانشگاه UC Davis انجام شده است،^[۱۲] استفاده شده و مدل سازی عددی آزمایش های سانتریفیوژ در مقیاس واقعی انجام شده است. شبکه ی اجزاء محدود به کار رفته در این مدل سازی ها، شامل یک شبکه ی سه بُعدی با ۱۹۶۰ المان مکعبی ۸ گرهی است (شکل ۲). بار وارده از طرف سازه می توان انتظار داشت که شرایط زمین آزاد با دقت مناسبی برقرار است. لذا، با بستن درجات آزادی تغییر مکان افقی مرزهای جانبی به هم، می توان شرایط واقعی را مدل سازی کرد. این روش در مدل سازی های متعددی،^[۱۱،۱۰] استفاده شده است. برای مدل سازی سازه از المان های مکعبی صلب استفاده شده است. مدل سازی هر آزمایش در ۳ مرحله انجام شده است. در مرحله ی اول، آنالیز تحت بار گرانشی خاک و سازه انجام شده است. پس از اعمال کامل بار و رسیدن به حالت تعادل استاتیکی و هیدرواستاتیکی، مقادیر تنش و فشار منفذی به عنوان مقادیر اولیه برای آنالیز مرحله ی دوم مورد استفاده قرار گرفته است. در مرحله ی دوم، بارگذاری زلزله به مدل اعمال شده است. همچنین به دلیل تغییر نفوذپذیری خاک در حین روانگرایی از مدل نفوذپذیری متغیر ارائه شده ی شهیر و محققان،^[۱۲] در تحلیل ها استفاده شده است. پس از اتمام بارگذاری زلزله، اجازه ی زهکشی به آب منفذی تا رسیدن به شرایط تعادل هیدرواستاتیکی داده شده است. درستی نتایج حاصل از مدل سازی عددی در مقایسه با مقادیر ثبت شده در آزمایش های سانتریفیوژ هاسلر (۲۰۰۲) در پژوهشی در سال ۲۰۱۴،^[۱۳] ارائه شده است. همچنین نمودار بارگذاری با سعی و خطا و در نظر گرفتن مقادیر مختلف برای به دست آوردن بهترین نتایج انتخاب شده است. مشخصات لایه های خاک مطابق جدول ۲ و شکل ۳ می باشد. همچنین تحریک ورودی مورد استفاده برای مدل سازی آزمایش های سانتریفیوژ در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۲. مدل عددی به کار رفته برای مدل سازی آزمایش های سانتریفیوژ.

جدول ۲. مشخصات لایه های خاک.

مشخصات خاک	$D_r = 30\%$	$D_r = 85\%$
نسبت تخلخل	۰٫۷۸۱	۰٫۵۸۶
وزن واحد حجم خاک اشباع (kn/m^3)	۱۹	۲۰٫۱۵
نفوذپذیری (m/s)	۰٫۰۰۰۰۰۴	۰٫۰۰۰۰۰۲۵

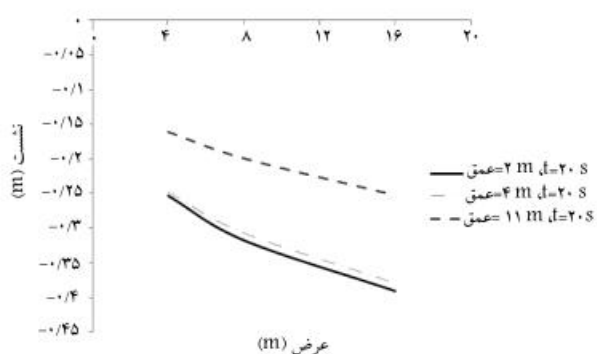
۱.۱.۳. تأثیر عرض شالوده

در این قسمت با در نظر گرفتن 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 به وجود آمده 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.

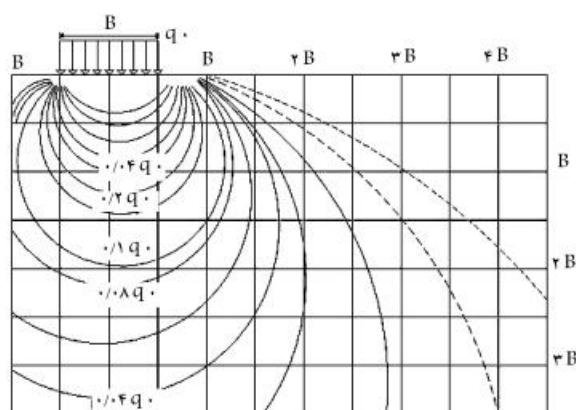
در شکل ۶ مشاهده می‌شود که با افزایش عرض پی، نشست شالوده و خاک زیر آن افزایش می‌یابد. در همه‌ی نمودارها، بسامد غالب لرزه‌ها ۳ Hz است. همان‌طور که بیان شده است، در مکانیک خاک کلاسیک با فرض رفتار کشسان برای خاک، عمق تأثیر شالوده‌ی مربعی دو برابر عرض آن است. در نتیجه با افزایش عرض شالوده، میزان عمق تأثیر 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 اتفاق افتاده 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 به صورت 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.

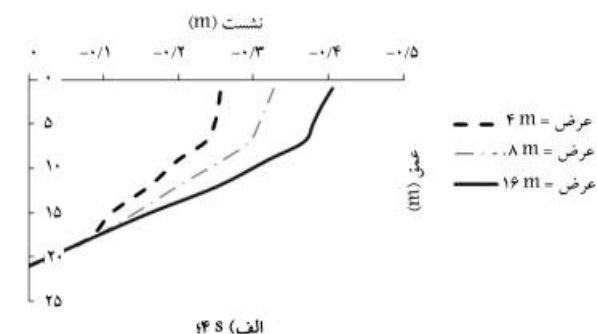
با توجه به شکل ۸، علاوه بر تأیید مطالب گفته شده در پاراگراف اخیر، می‌توان بیشتر شدن تأثیر عرض پی به مرور زمان را مشاهده کرد، که مطابق آن در ثانیه‌های اولیه‌ی لرزش، اختلاف چندانی بین نشست ایجاد شده توسط پی‌ها به وجود نیامده است، در حالی که بعد از گذشت ۲۵ ثانیه، نشست شالوده‌ها اختلاف بیشتری را نشان می‌دهند.



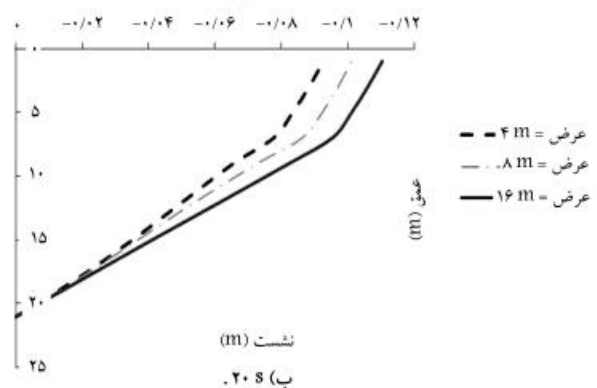
شکل ۷. تغییرات نشست در عمق ۲ متر برای عرض‌های مختلف.



شکل ۵. عمق تأثیر بر اساس جناب‌های تنش برای پی مربعی.

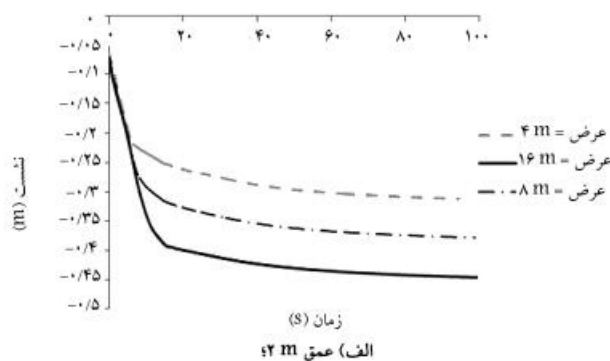


الف) ۴ s

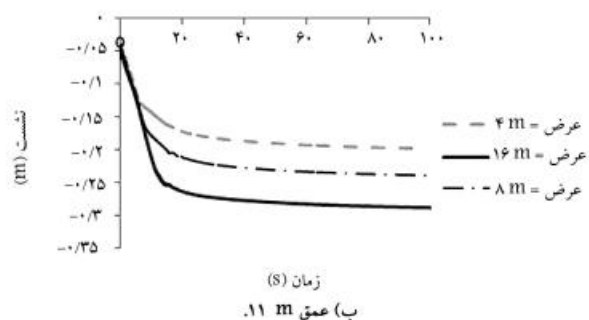


ب) ۲۰ s

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

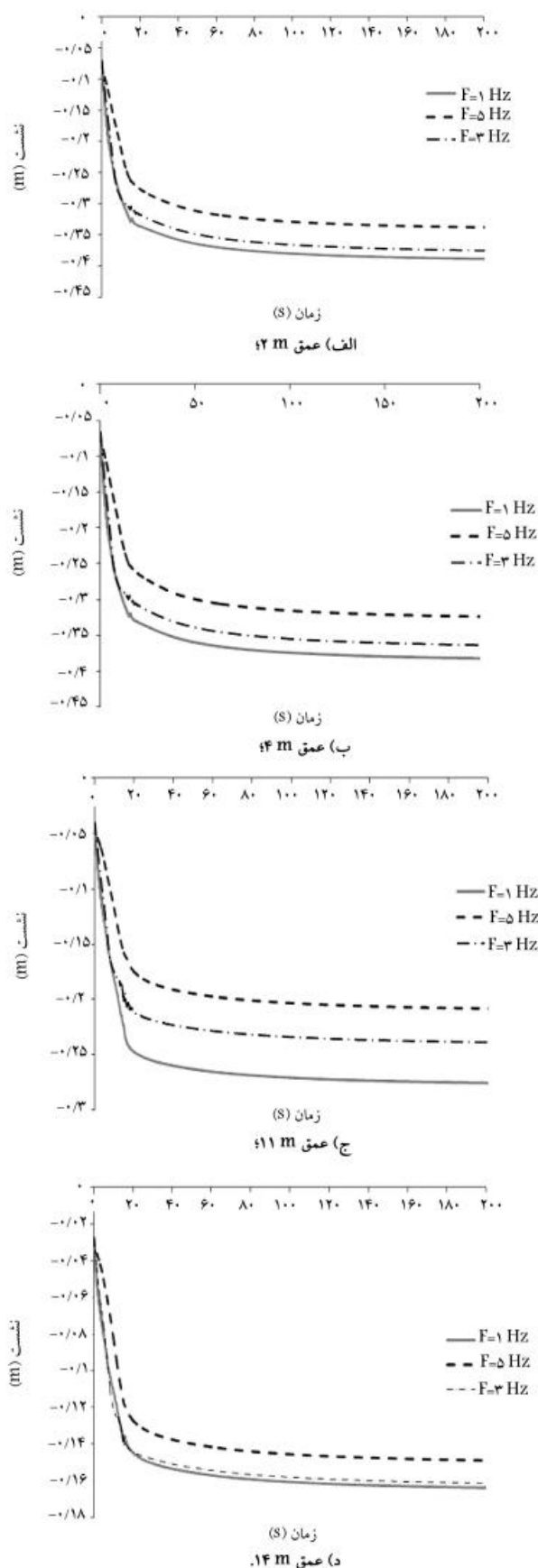


الف) عمق ۲ m



ب) عمق ۱۱ m

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



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

۳.۱.۳. تأثیر بسامد تحریک ورودی

در این بخش تغییرات نشست شالوده برای ۳ بسامد مختلف ۱، ۳ و ۵ هرتز بحث شده است. همان‌طور که 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.

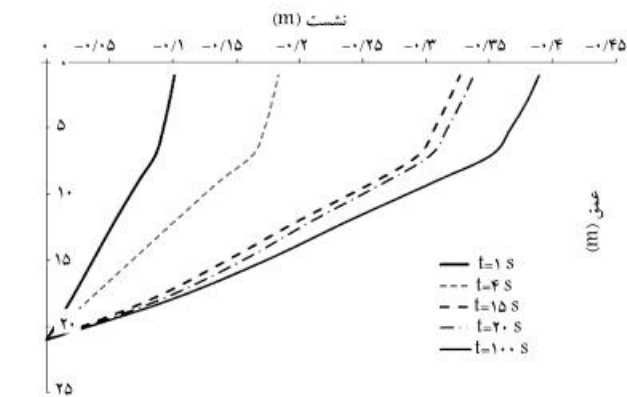
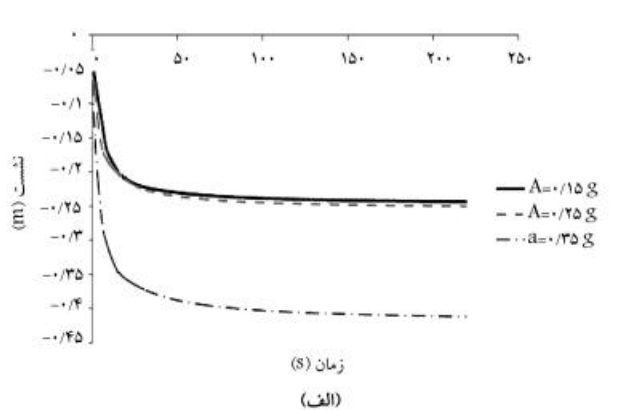
با توجه به شکل ۹ می‌توان مشاهده کرد که نشست در بسامدهای پایین با شیب بیشتری اتفاق افتاده است و این نشست تا ثانیه‌هایی بعد از اتمام تحریک ورودی افزایش یافته و بعد از آن روند کاهشی آن شروع شده و با کاهش شیب، رو به مقداری ثابت رفته و بعد از ثانیه‌ی ۵۰، تقریباً نشست اتفاق نیفتاده است. این تذکر لازم است که 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، به دلیل تأثیر مستقیم ویژگی‌های تحریک ورودی در نشست ناشی از روانگرایی، نشست‌ها متفاوت می‌شود و بعد از اعماق میانی لایه‌ی نشست، باز هم نشست‌ها به هم 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 ۱۴، 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 همان‌طور که 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. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در عمق ۱۵ متر، تغییر شیب در نمودار نشست در عمق اتفاق افتاده است.

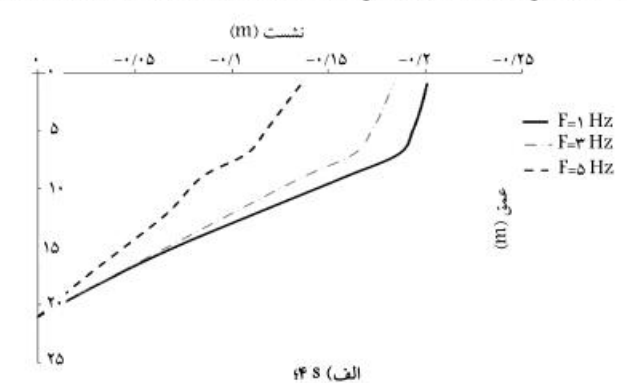
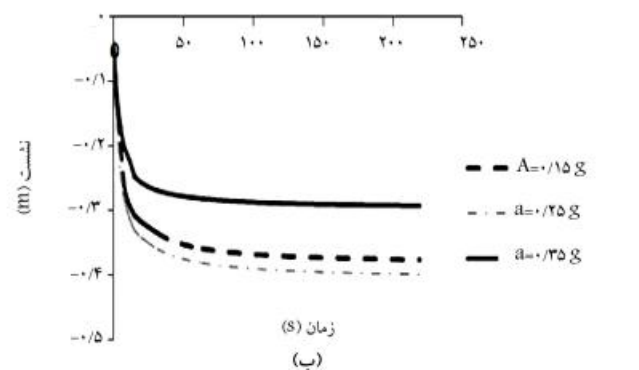
در شکل ۱۱ تغییرات نشست سازه در عمق برای بسامدهای مختلف نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان شیب نمودار نشست در عمق برای بسامد ۵ از بقیه بیشتر است. یعنی تغییرات نشست شالوده در عمق برای این بسامد به نسبت مقادیر ۱ و ۳ مقدار کمتری است. همچنین با مقایسه‌ی شکل مذکور با شکل ۱۰ می‌توان مشاهده 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

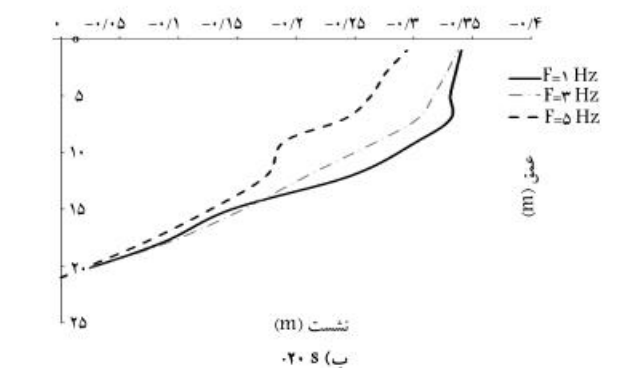
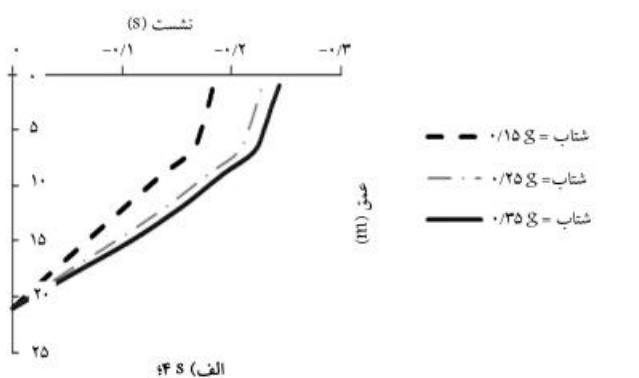
در این بخش تأثیر دامنه‌ی تحریک ورودی در عملکرد شالوده مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود که افزایش شتاب بیشینه‌ی تحریک ورودی، میزان نشست شالوده را افزایش داده است. این موضوع به دلیل افزایش دامنه‌ی تکان‌های شدیدی است که بر سازه و شالوده وارد شده است و باعث افزایش نشست‌های به وجود آمده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



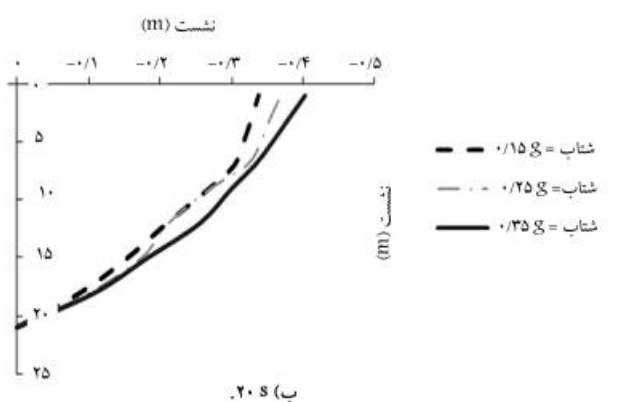
شکل ۱۰. تغییرات نشست در عمق برای مدل با بسامد ۳ Hz در زمان های مختلف.



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



شکل ۱۲. تغییرات نشست در عمق (برای بسامدهای ۱، ۳ و ۵ هرتز).

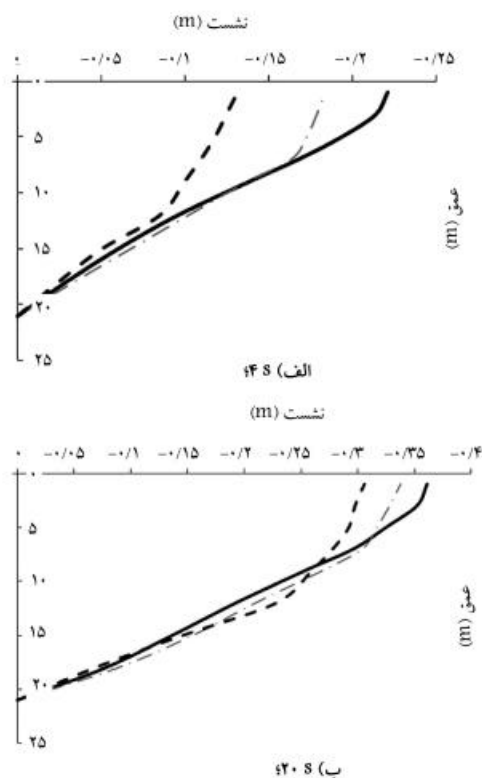


می‌شود که در اعماق سطحی، نمودارهای شتاب ۰/۲۵ بینابین دو مقدار شتاب دیگر قرار دارد، ولی در عمق پایین‌تر، نمودار شتاب ۰/۲۵ به نمودار شتاب ۰/۱۵ نزدیک شده است. این موضوع احتمالاً به دلیل رخداد روانگرایی در عمق ۱۱ متری و عدم وقوع آن در اعماق سطحی است. به نظر نگارندگان می‌توان یک مقدار شتاب بحرانی تعریف کرد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

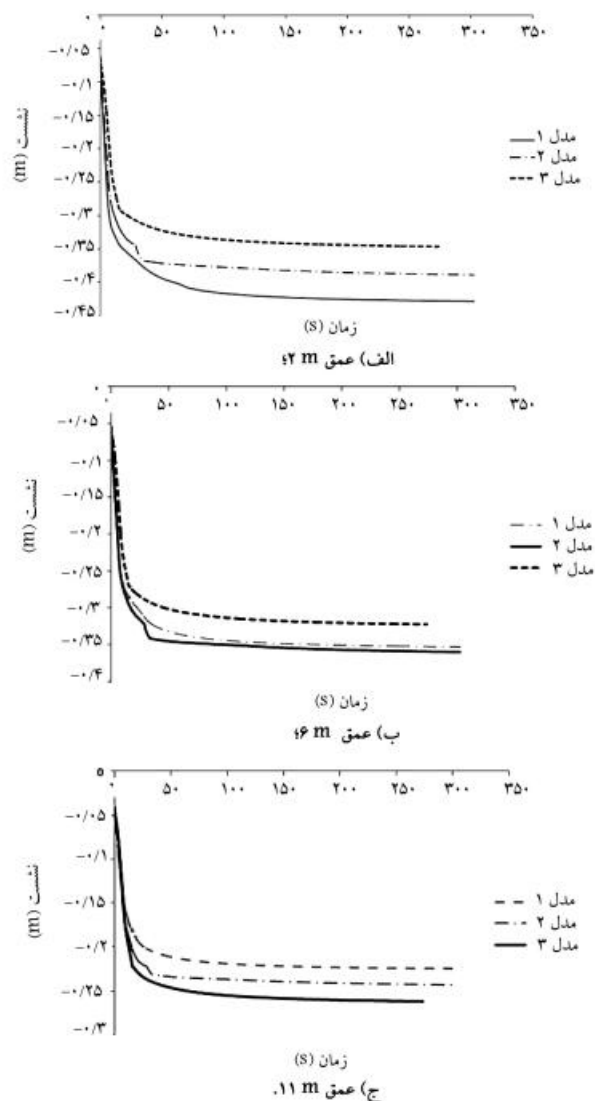
در این حالت برای سه نسبت ۰/۱۴، ۰/۳۳ و ۰/۵۷ تحلیل‌ها انجام شده است. همان‌طوری که در شکل ۱۴ مشاهده می‌شود، نمودارهای ارائه‌شده نشان‌دهنده‌ی کاهش نشست شالوده در اعماق سطحی با افزایش عمق لایه‌ی متراکم هستند و با

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



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

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. [۱۳، ۱۴] 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 کاهش تراکم بودن 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، [۱۳، ۱۴] گزارش شده است، افزایش نشست ناشی از تراکم کامل لایه‌ی خاک گزارش نشده است. ولی در آزمایش‌های سانتریفیوژ انجام شده 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 ارائه شده، مدل‌های ۱ الی ۳ به ترتیب نشان‌گر نسبت‌های ۰٫۳۳، ۰٫۱۴ و ۰٫۵۷ است.



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

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 نشست 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 به دست آمده برای عمق‌های پایین‌تر متوجه می‌شویم که تغییری در روند مشاهده شده 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 وارد شده (به دلیل وزن بیشتر لایه‌ی متراکم نسبت به لایه‌ی نشست در بالای ناحیه نشست) 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 نشست در مدل ۰٫۱۴، و مرز دو لایه در مدل ۰٫۳۳ و

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

همان‌طور که 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 وجود آمده 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 وجود آمده 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

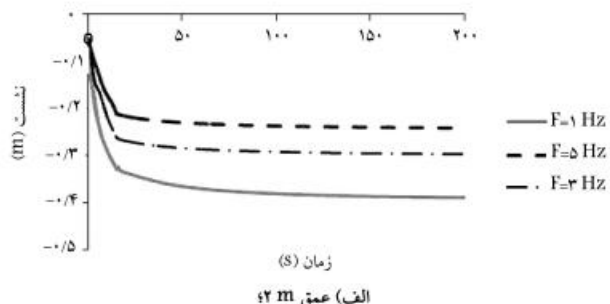
در این بخش مانند حالت قبل، تغییرات نشست برای ۳ بسامد مختلف ۱، ۳ و ۵ هرتز بحث شده است. در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که تأثیر بسامد در نشست مانند حالت قبل است و با افزایش بسامد، کاهش نشست خواهیم داشت.

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 تأثیر کم مکانیزم‌های فعال بعد از لرزه در این حالت است.

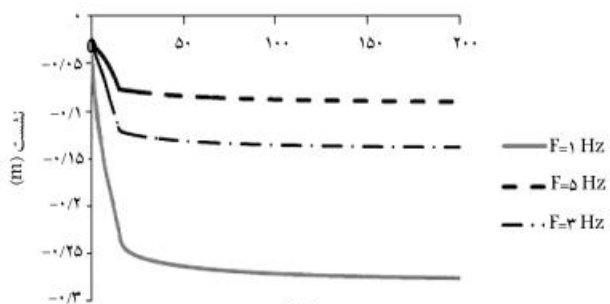
۳.۲.۳. تأثیر شتاب بیشینه‌ی بار سیکلیک ورودی

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.

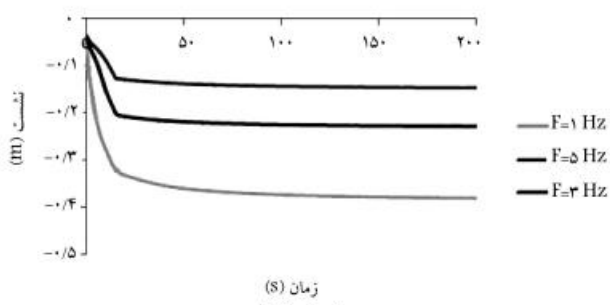
در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود که با افزایش شتاب تحریک ورودی مطابق انتظار شاهد افزایش نشست هستیم. همچنین مشاهده می‌شود که نمودار مربوط به شتاب



الف) عمق ۴ m

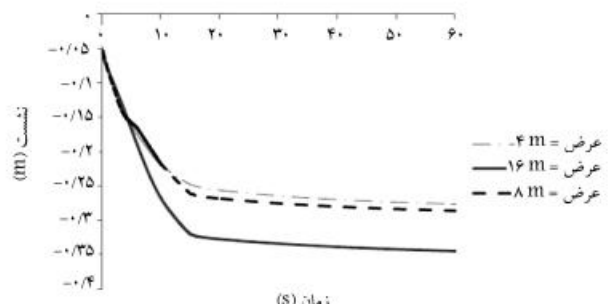


ب) عمق ۴ m

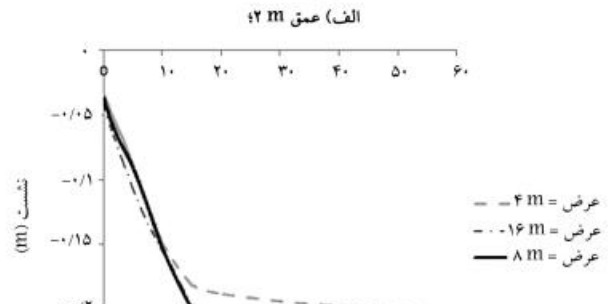


ج) عمق ۱۱ m

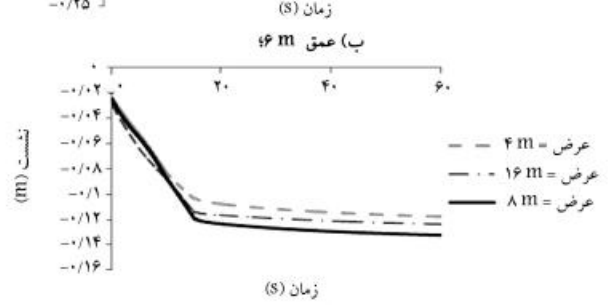
شکل ۱۷. تاریخچه‌ی زمانی نشست خاک (برای بسامدهای ۱، ۳ و ۵ هرتز).



الف) عمق ۴ m



ب) عمق ۶ m



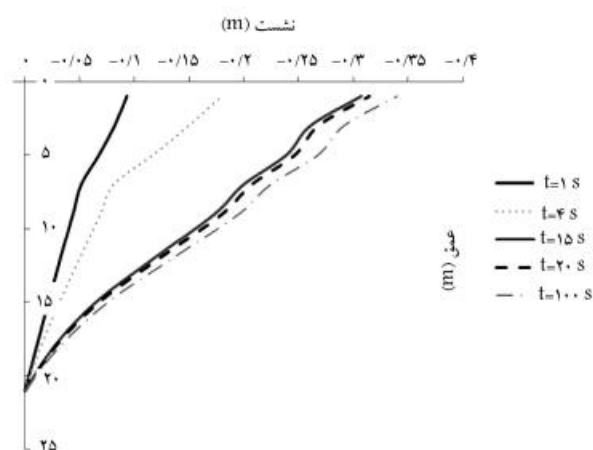
ج) عمق ۱۱ m

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

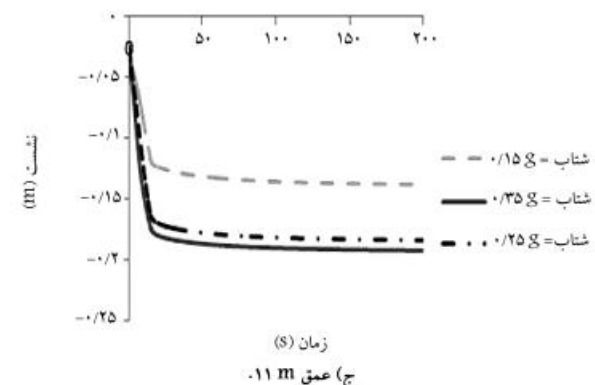
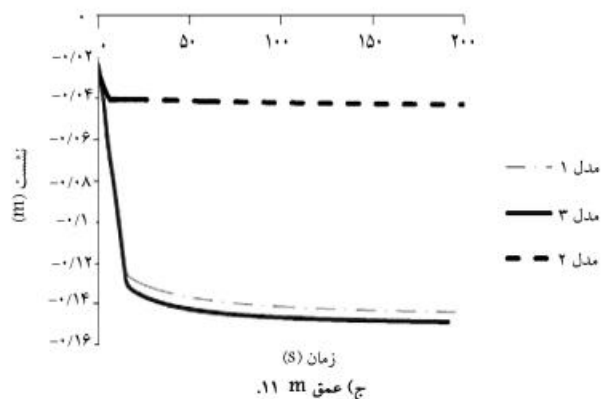
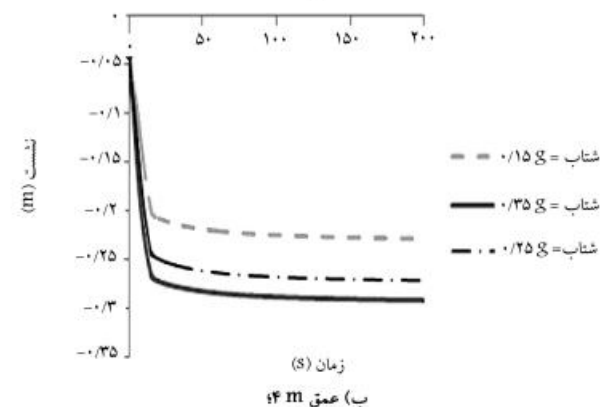
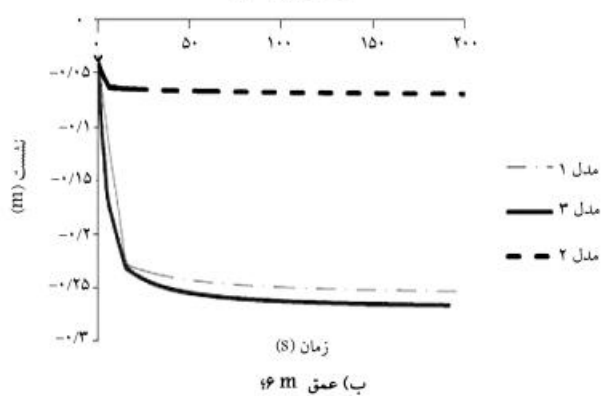
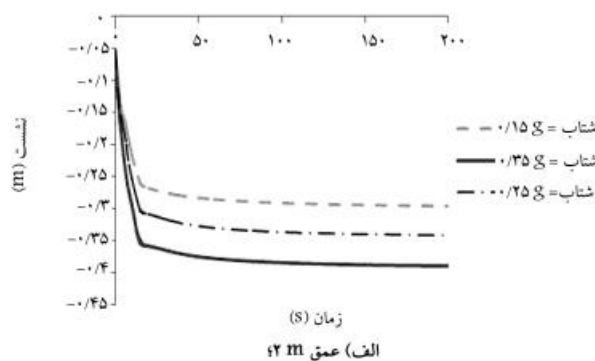
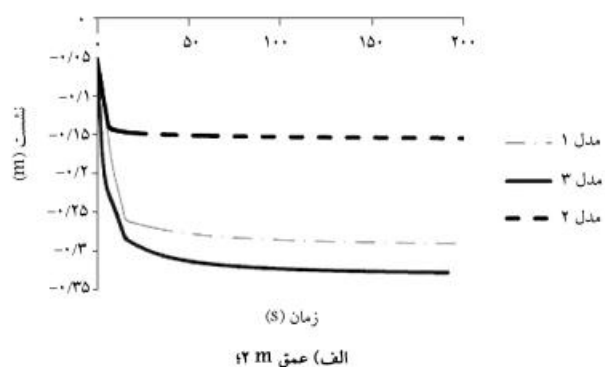
۰/۲۵ با افزایش عمق به سمت نمودار شتاب ۰/۳۵ حرکت می‌کند. در این حالت می‌توان گفت شتاب‌های ۰/۲۵ و ۰/۳۵ تقریباً عملکرد یکسانی دارند.

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 قرار گرفته است. همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، نمودارهای ارائه شده نشان‌دهنده‌ی کاهش نشست شالوده با افزایش ضخامت لایه‌ی متراکم هستند. برخلاف حالت قبل، در این حالت لایه‌ی متراکم در زیر لایه‌ی نشست قرار دارد و همین موضوع باعث تغییر در روند نشست مشاهده شده 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 روانگر موجود است. همچنین با توجه به شکل ۲۰ مشاهده می‌شود که در خاک زیر شالوده با افزایش عمق لایه‌ی نشست، تغییر در میزان نشست مدل‌ها نسبت به یکدیگر در عمق‌های مختلف به وجود آمده



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



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

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

محیط خاکی بررسی شده شامل خاک دو لایه‌ی 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 در نظر گرفتن اثر اندرکنشی بین شالوده و خاک در نظر گرفته شده و هدف از این پژوهش، توسعه‌ی یک روش عددی برای تخمین میزان نشست شالوده واقع بر روی خاک دو لایه‌ی ماسه‌ی پی بوده است.

به طور کلی در مقایسه بین دو حالت مورد بحث در این پژوهش می‌توان به تأثیر بیشتر لایه‌ی خاک متراکم قرار گرفته 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 مورد نظر، تأثیر مشخصی در نشست شالوده داشته است، به طوری که می‌توان گفت با افزایش بسامد به دلیل کاهش دامنه‌ی نوسانات سازه، نشست شالوده کاهش می‌یابد.

با افزایش شدت اعمال لرزه، شدت تنش‌های برشی تناوبی تشدید و باعث افزایش میزان فشار آب حفره‌ی پی 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، به دلیل تأثیر در دامنه‌ی تحریکات ورودی، عملکردی مخالف بسامد دارد و افزایش آن، دامنه‌ی نوسان سازه را افزایش می‌دهد و همین مسئله باعث افزایش تغییر مکان 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 نشست قرار دارد، افزایش عرض شالوده، به دلیل افزایش فشار محصورکننده‌ی وارد بر خاک زیر شالوده، باعث افزایش ظرفیت تولید فشار آب حفره‌ی 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 حفره‌ی پی رخ می‌دهد، زیرا در این وضعیت آب مجبور است مسیر بیشتری را برای زهکش شدن طی کند و در نتیجه فشار آب حفره‌ی پی 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 به صورت 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 نشست کمتری در زیر شالوده مشاهده شده است، که حکایت از تأثیر بیشتر لایه‌ی متراکم قرار گرفته در عمق دارد.

است. در واقع، نقاط نشان داده شده در شکل ۲۰، مرز لایه‌ی متراکم و نشست در ۳ مدل مورد بررسی هستند. در عمق ۲ متر، با افزایش عمق لایه‌ی نشست شاهد افزایش نشست شالوده هستیم. این موضوع با بررسی نشست در عمق‌های ۶ متر (مرز در مدل ۳۳) و ۱۱ متر (مرز در مدل 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 بیشتر بودن ضخامت لایه‌ی نشست شرایط بهتری ایجاد می‌کند، بلکه این موضوع تأثیر بیشتر نزدیک بودن لایه‌ی متراکم به مرکز زلزله را بدون تغییر ضخامت لایه‌ی نشست بیان می‌کند.

همان‌طور که عنوان شده است، لایه‌ی متراکم با ضخامت زیاد می‌تواند باعث افزایش نشست به وجود آمده در شالوده شود. البته در این مدل‌ها که ضخامت لایه‌ی متراکم در فاصله‌ی 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 نشست 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 ۳۳/۰ و ۵۷/۰ 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 نشست قرار گرفته و در حالت دوم، عکس این وضعیت در نظر گرفته شده است. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار OpenSEES استفاده شده است، که قادر به تحلیل دینامیکی همبسته‌ی محیط متخلخل اشباع به صورت سه بعدی 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،^[۵] که توانایی خود را در بررسی رفتار ماسه تحت بارگذاری‌های تناوبی و یک‌سویه نشان داده است. فرمولاسیون این مدل بر اساس حالت خمیری سطح مرزی در فضای نسبت تنش انحرافی و در چارچوب مکانیک خاک حالت بحرانی است.

پانویس‌ها

3. Nevada

1. peak ground acceleration
2. critical state soil mechanics

(References) منابع

- Gutierrez, A.M. "Centrifuge modeling of surface structure on normally consolidated silty sand deposited in layers under water and subjected to seismic", Thesis Ph.D., Rensselaer Polytechnic Institute (1998).
- 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).
- 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).
- Shahir, H. "Assessment of effectiveness 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).
- 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).
- Wood, D.M., *Soil Behavior and Critical State Soil Mechanics*, Cambridge University Press (1990).
- Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A. "Yielding of clays in states wetter than critical", *Geotechnique*, **13**(3), pp. 211-240 (1963).
- Schofield, A.N. and Wroth, C.P., *Critical State Soil Mechanics*, Lecturers in Engineering at Cambridge University (1968).
- Arulmoli, K., Muraleetharan, K.K., Hossain, M.M. and Fruth, L.S., *VELACS Laboratory Testing Program: Soil Data Report*, The Earth Technology Corporation (1992).
- 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).
- 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).
- 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).
- Ayoubi, P. "Settlement of shallow foundation on liquefiable layered soil subjected to earthquake loading", Ms.c Thesis, Sharif University of Technology (2014).
- 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).
- 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).
- Zeienkiewicz, 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).