تاثیر نیروی دینامیکی بر رفتار پی‌های سطحی با روش‌های عددی

حامد طاهریان
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
taherianha@gmail.com

مهدی ملاباقر مخملباف
دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
mahdimakhmalbaf@gmail.com

محمود نیکخواه شهمیرزادی
استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
m.nikkhah@semnaniau.ac.ir

علیرضا مرتضایی
استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران
a.mortezaei@semnaniau.ac.ir

کلید واژه‌ها: *پی سطحی، نیروی زلزله ، نشست دینامیکی، ظرفیت باربری دینامیکی، روش‌های عددی*

چکیده

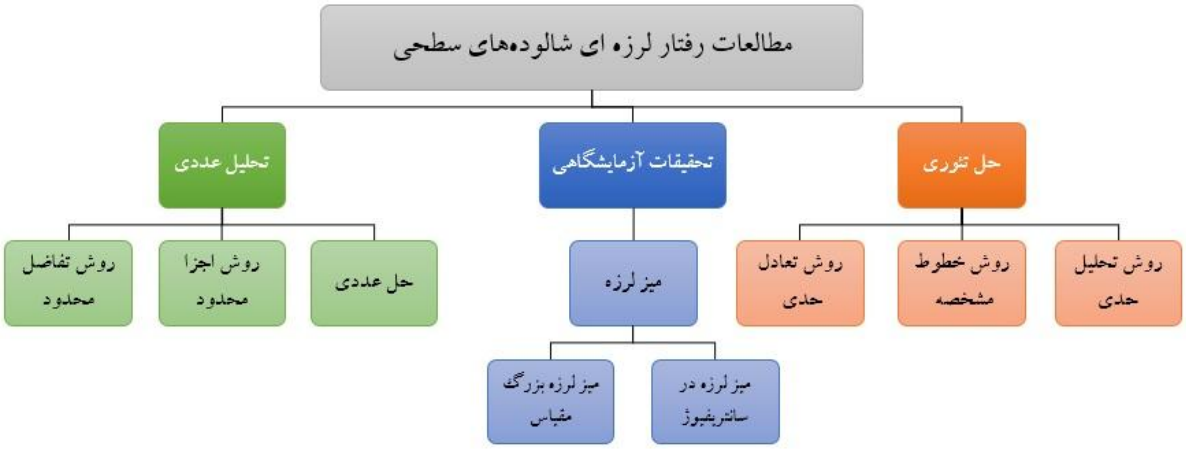
با توجه با لرزه خیزی کشور ایران و حاکم بودن نیروی جانبی لرزه‌ای ناشی از زلزله در طراحی سازه‌ها، مطالعه پاسخ دینامیکی پی‌ها تحت اثر نیروی زلزله، از مسایل مهم طراحی مقاوم در برابر زلزله و مسایل اندرکنشی خاک و سازه است. نتایج تحلیل‌های دینامیکی بر اثر تغییر پارامترهای مختلف خاک زیر پی، زلزله و روسازه و چگونگی تأثیر این پارامترها راهکاری مناسب برای طراحی بهینه پی، بهسازی و افزایش ظرفیت باربری خاک می‌باشد.

در این مقاله با هدف توسعه مفاهیم تحلیل و طراحی لرزه‌ای پی‌های سطحی روی خاک‌های ماسه‌ای با تاکید بر روش تحلیل عددی، به معرفی و مقایسه تئوری‌های کنونی، مطالعات آزمایشگاهی و یافته‌های عددی در این زمینه پرداخته شده‌است. همچنین مقایسه‌ای از نشست دینامیکی ناشی از نیروی زلزله بر اثر تغییر پارامترهای مختلف نظیر زاویه اصطکاک داخلی، دانسیته، ضریب پواسون و ضریب ارتجاعی خاک، شتاب بیشینه، مدت زمان اعمال شتاب و میزان سربار صورت پذیرفته است. نتایجی که از تحلیل‌های به عمل آمده حاصل گردیده نشان می‌دهد که شدت سربار نسبت به پارامترهای ذکر شده دیگر تاثیر بیشتری بر نشست دینامیکی پی دارد. همچنین افزایش زاویه اصطکاک، ضریب پواسون و ضریب ارتجاعی خاک سبب کاهش نشست دینامیکی می‌شود. از میان پارامترهای ذکر شده دانسیته خاک تاثیر کمی بر نشست دینامیکی پی‌های سطحی دارد.

مقدمه

با توجه با لرزه خیزی کشور ایران و حاکم بودن نیروی جانبی لرزه‌ای ناشی از زلزله در طراحی سازه‌ها، مطالعه پاسخ دینامیکی پی‌ها تحت اثر نیروی زلزله، از مسایل مهم طراحی مقاوم در برابر زلزله و مسایل اندرکنشی خاک و سازه است. در دهه‌های اخیر موضوع بررسی ظرفیت باربری دینامیکی شالوده‌های سطحی به سبب استفاده زیاد از این نوع پی‌ها در طراحی سازه‌ها، به یکی از موضوعات مورد علاقه بسیاری از محققان و مهندسان تبدیل گردیده است.

بررسی رفتار لرزه‌ای پی‌های سطحی در خاکهای مختلف با سه روش تحلیل تئوری، مطالعات آزمایشگاهی و تحلیل عددی انجام می‌پذیرد که شکل ۱ ساختار کلی آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱: ساختار کلی بررسی رفتار لرزه‌ای پی‌های سطحی

در این مقاله با هدف توسعه مفاهیم تحلیل و طراحی لرزه‌ای پی‌های سطحی روی خاک‌های ماسه‌ای با تاکید بر روش تحلیل عددی، به معرفی و مقایسه تئوری‌های کنونی، مطالعات آزمایشگاهی و یافته‌های عددی در این زمینه پرداخته شده‌است. خلاصه‌ای از روش‌ها بعد از هر بخش در قالب جدول ارائه گردیده‌است.

مطالعات تئوری

متداول‌ترین روشهای موجود در مطالعه نشست و ظرفیت باربری دینامیکی پی‌ها، روش‌های حدی هستند. این روش‌ها را می‌توان در سه گروه کلی به شرح زیر دسته بندی کرد:

- روش تعادل حدی (Limit Equilibrium Method)
- روش خطوط مشخصه (Slip Line Method)
- روش تحلیل حدی (Limit Analysis Method)

در روش تعادل حدی با انتخاب معیار گسیختگی و در نظر گرفتن یک مکانیزم گسیختگی فرضی، بار حدی به کمک حل تمام یا بخشی از معادلات تعادل در توده خاک گسیخته شده به دست می‌آید. با تغییر مکانیزم گسیختگی و بهینه سازی آن، مقدار بهینه بار حدی تعیین می‌گردد. در این روش یک حل تقریبی از بار گسیختگی انجام می‌پذیرد. با استفاده از این روش نمی‌توان مرز بالا و پایینی برای مدل در نظر گرفت و به حل دقیقی رسید، در این رابطه می‌توان به روش‌های Richards et al. (1993) و Budhu and Al-Kerni (1993) اشاره کرد.

در روش خطوط مشخصه از ترکیب معادلات تعادل با معادله سطح خمیری، دستگاهی از معادلات دیفرا نسیل هذلولی به دست می‌آید که به معادلات تعادل خمیری موسوم هستند. سپس حل این معادلات با در نظر گرفتن شرایط مرزی، منجر به تعیین میدان تنش در توده خاک مورد بررسی و در نهایت تعیین بار حدی می‌شود. در این روش نیز غالبا نمی‌توان جایگاه جواب به دست آمده را نسبت به حل دقیق تعیین کرد. در این زمینه روش‌های Sokolovski (1960) و Kumar and Mohan Rao (2002) قابل اشاره هستند.

در روش تحلیل حدی با انتخاب معیار خمیری و با استفاده از دو شیوه تحلیل مستقل در قالب قضایای حدی مرزهای بالا و پایین، بار گسیختگی تعیین می‌شود. این روش بر اساس قانون جریان در مصالح کولمب به حل دقیقی دست می‌یابد. روش‌های Dormieux and Pecker (1995) و Soubra (1997) از این دسته هستند.

Richards et al., (1993) در زمینه تنش نرمال زیر پی، گفته‌اند که تحت مولفه افقی زلزله، نیروهای اینرسی داخل توده خاک، مقاومت خاک موجود را کاهش می‌دهند و در نتیجه ظرفیت باربری پی سطحی کاهش می‌یابد. همچنین انتقال برش در فصل مشترک خاک - سازه ظرفیت باربری را نیز کاهش می‌دهد. Dormieux and Pecker (1995) با درنظر گرفتن سطح گسیختگی به شکل منحنی پراندل در زیر پی و کران بالا و پایین برای مدل، به این نتیجه رسیدند که کاهش ظرفیت باربری عمدتا ناشی از بار مایل بوده و نیروهای اینرسی ناشی از توده خاک اثر کمی بر روی ظرفیت باربری دارند. در این زمینه محققان دیگر نظیر Sarma and Iossifelis (1990)، Budhu and Al-Kerni (1993)، Soubra (1997)، Kumar and Mohan Rao (2002) و عسکری و همکاران (۱۳۸۴) با بررسی سطح گسیختگی زیر پی و تعیین بار حدی، نسبت‌های تقلیل را برای

ضرایب ظرفیت باربری درنظر گرفتند و بر این اساس نمودارهایی برای تعیین ضرایب ظرفیت باربری دینامیکی N_{cE}، N_{qE} و $N_{\gamma E}$ بر حسب زاویه اصطکاک ارائه کردند. در جدول ۱ خلاصه‌ای از فرضیات و روش‌های حدی مورد استفاده توسط محققین مختلف در تعیین نشست و ظرفیت باربری دینامیکی پی‌ها ارائه گردیده‌است.

جدول ۱: خلاصه‌ای از فرضیات و روش حدی مورد استفاده توسط محققین در تعیین نشست و ظرفیت باربری دینامیکی پی‌ها

محققین	روش حدی مورد استفاده	فرضیات	خروجی و نتایج
Sarma-Iossifelis (1990)	تعادل حدی	اثر اینرسی خاک و سربار در محاسبات وارد شده و از اثر فشار آب منفذی صرف نظر شده‌است، نیروی زلزله به صورت برش پایه وارد بر پی در نظر گرفته شده‌است.	نمودار تغییرات ضرایب ظرفیت باربری لرزه‌ای بر حسب ضریب شتاب بحرانی و زاویه اصطکاک خاک
Richards et al. (1993)	تعادل حدی	$\delta=0.5\varphi$	نمودار تغییرات نسبت مقادیر ضرایب ظرفیت باربری لرزه‌ای به ضرایب ظرفیت باربری استاتیکی با شتاب زلزله برای زوایای اصطکاک مختلف
Budehu and Al-Kerni (1993)	تعادل حدی	در نظر گرفتن مولفه شتاب افقی و قائم	روابط تعیین ضرایب ظرفیت باربری لرزه‌ای
Dormieux and Pecker (1995)	خطوط مشخصه	استفاده از مکانیسم گسیختگی پراندل	روابط تعیین ضرایب ظرفیت باربری لرزه‌ای
Soubra (1997)	تحلیل حدی	زلزله، تنها باعث افزایش نیروی رانشی روی پی می‌شود و از اثر زلزله در کاهش مقاومت برشی خاک صرف نظر شده است.	نمودار تغییرات ضرایب ظرفیت باربری لرزه‌ای با K_h و به ازای زوایای اصطکاک مختلف
Kumar and Mohan Rao (2002)	خطوط مشخصه	نیروهای ناشی از وزن خاک نیز در محاسبات وارد شده	نمودار تغییرات ضرایب ظرفیت باربری با شتاب زلزله و به ازای زوایای اصطکاک مختلف
Askari et al. (2005)	تعادل حدی	اثر زلزله به شکل نیروهای افقی و مساوی با حاصلضرب نیروهای قائم و ضریب شتاب لحاظ می‌گردد.	نمودار تغییرات ضرایب ظرفیت باربری لرزه‌ای با K_h و به ازای زوایای اصطکاک مختلف

تحقیقات آزمایشگاهی

از آزمایش میزلرزه و نتایج حاصل از آن می‌توان به عنوان روشی واقع گرایانه در بین روش‌های مطالعات موجود و نیز ابزاری برای صحت سنجی تئوری‌های پیشنهادی جدید نام برد. اغلب آزمایش‌های میزلرزه پیشرفته به صورت میزلرزه بزرگ مقیاس و همراه با سانتریفیوژ انجام می-پذیرد.

Maugeri et al. (2000) آزمایش‌های متعددی در زمینه ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های سطحی انجام داده‌اند. ایشان کاهش ظرفیت باربری نهایی را ناشی از تاثیر اینرسی خاک، تاثیر خروج از مرکزیت و اینرسی بارگذاری سازه‌ی فوقانی دانسته‌اند.

بررسی نتایج نشان می‌دهد در مکانیسم تحلیل کولمب ساده شده تاثیر نیروهای اینرسی خاک در کاهش ظرفیت باربری در حدود ۲۴ درصد است در حالی که تاثیر خروج از مرکزیت بر روی کاهش ظرفیت باربری در حدود ۱۱ درصد می‌باشد. مطابق روش کینماتیکی کاهش ظرفیت باربری ناشی از خروج از مرکزیت بار در حدود ۵۷ درصد است که بسیار بزرگتر از کاهش ۲۲ درصدی نیروهای اینرسی توده‌ی خاک می‌باشد. همچنین نتایج آزمایشگاهی نشان داد که با وجود خروج از مرکزیت، چرخش باقی مانده ۲۵ درجه و بدون خروج از مرکزیت در حدود ۱ درجه است.

Knappett et al. (2006) با انجام آزمایش‌هایی، مکانیسم گسیختگی خاک زیر پی نواری را در طول اعمال بار لرزه‌ای مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق از یک میز لرزه‌ای با شتاب 0.1g که یک پی نواری روی آن قرار گرفته، استفاده شده‌است. برای تعیین مکانیسم گسیختگی، از تکنیک تصویر برداری لحظه به لحظه‌ی سریع [1] (VIP) استفاده شده‌است. شتاب ورودی به صورت یک موج سینوسی و به مدت ۳ ثانیه به مدل اعمال شده‌است. به منظور بررسی تاثیر بزرگای شتاب، زلزله‌هایی با بزرگای مختلف اثر داده شده‌است.

نتایج به دست آمده از آزمایش نشان داد که مکانیزم گسیختگی متناظر با ظرفیت باربری لرزه‌ای نهایی در مواردی که شتاب موج ورودی برابر صفر است (سرعت حداکثر)، ظرفیت باربری کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. اما برای مواردی که شتاب موج ورودی حداکثر است (سرعت صفر)، بلند شدگی در پی رخ می‌دهد.

1- Particle Image Velocimetry

Shirato et al. (2008) آزمایش‌هایی در مقیاس بزرگ برای بررسی رفتار غیرخطی شالوده‌های کم عمق، تحت اثر بار زلزله انجام دادند. ایشان در این تحقیق از میز لرزه‌ای با شتاب 0.1g که در آن پی مربعی تحت بارهای برون محور سیکلی قرار می‌گیرد، استفاده نمودند و به بررسی تاثیر روش‌های بارگذاری (استاتیکی و دینامیکی)، حالت‌های لرزه‌ای ورودی (شدت و تعداد سیکل)، تراکم خاک (خاک‌های متراکم و خاک‌های با تراکم متوسط) و نسبت بارهای افقی و لنگر واژگونی پرداختند.

خلاصه‌ای از تحقیقات آزمایشگاهی صورت پذیرفته در این زمینه در جدول ۲ آمده‌است.

جدول ۲: تحقیقات آزمایشگاهی صورت پذیرفته در بررسی رفتار دینامیکی پی‌های سطحی واقع بر خاک ماسه‌ای

محققین	ابعاد میز لرزه (ارتفاع×عرض×طول) بر حسب mm	ابعاد پی (ارتفاع×عرض×طول) بر حسب mm	مشخصات خاک	هندسه پی	نوع بارگذاری دینامیکی	خروجی و نتایج
Maugeri et al. (2000)	5000×1000×1200	950×400×400	ماسه خشک	نواری	زلزله (بار مایل)	نشست قائم تحت اثر شتاب‌های بیشینه مختلف
Knappett et al. (2006)	750×300×500	100×50×300	ماسه خشک	نواری	زلزله	مکانسیم گسیختگی به ازای تغییر در بزرگی زلزله، فرکانس و عمق مدفون
Shirato et al. (2008)	8000×8000 Laminar box (4000×4000×2100)	500×500×250	ماسه خشک	مربعی	زلزله	نشست افقی و قائم استاتیکی و دینامیکی در اثر تغییر در حالت-های لرزه‌ای ورودی (شدت و تعداد چرخه‌ها) و تراکم خاک

یافته‌های عددی

روش دیگر تحلیل مسائل از این دست، روش‌های عددی است. استفاده از این روش‌ها به دلیل وجود نرم افزارهای پیشرفته و رایانه‌های قدرتمند، در حل مسائل مختلف ژئوتکنیکی افزایش یافته است. بهبود کالیبراسیون مدل‌های طراحی شده توسط مهندسین طراح برای پیش‌بینی ظرفیت باربری دینامیکی شالوده‌های سطحی، نیازمند داشتن اطلاعات عددی برای طراحی دقیق این مدل‌ها می‌باشد. دقت روش‌های عددی به مهارت کاربر در روش انتخابی، کیفیت داده‌های ورودی مساله و مدل رفتاری خاک بستگی دارد. این روش‌ها احتیاج به تلاش‌های محاسباتی و زمان تحلیل بیشتری دارند، اما این مزیت را نیز دارند که مسائل با هندسه یا مدل‌های رفتاری پیچیده را می‌توان با این روش‌ها تحلیل نمود. مطالعات عددی اندکی در زمینه ظرفیت باربری دینامیکی پی‌ها صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به مطالعات ذیل اشاره نمود.

Shafiee and Jahanandish (2010) با استفاده از نرم افزار PLAXIS اقدام به بررسی ضرایب ظرفیت باربری دینامیکی شالوده‌های نواری نمودند. در شکل ۲ برای خاک با زاویه اصطکاک داخلی ۳۰ درجه، ضرایب باربری دینامیکی به دست آمده از این تحقیق در مقایسه با سایر محققین ارائه شده‌است. ایشان نتیجه گرفتند با افزایش K_h (ضریب افقی زلزله)، ضرایب ظرفیت باربری کاهش می یابد و این کاهش در ضریب $N_{\gamma E}$ محسوس‌تر است. همچنین اینرسی توده خاک تاثیر چندانی بر ظرفیت باربری لرزه‌ای ندارد بطوریکه تاثیر آن بر کاهش ضرایب ظرفیت باربری لرزه‌ای نسبت به حالت عدم درنظرگیری اینرسی توده خاک کمتر از ۱۲/۵ درصد است.

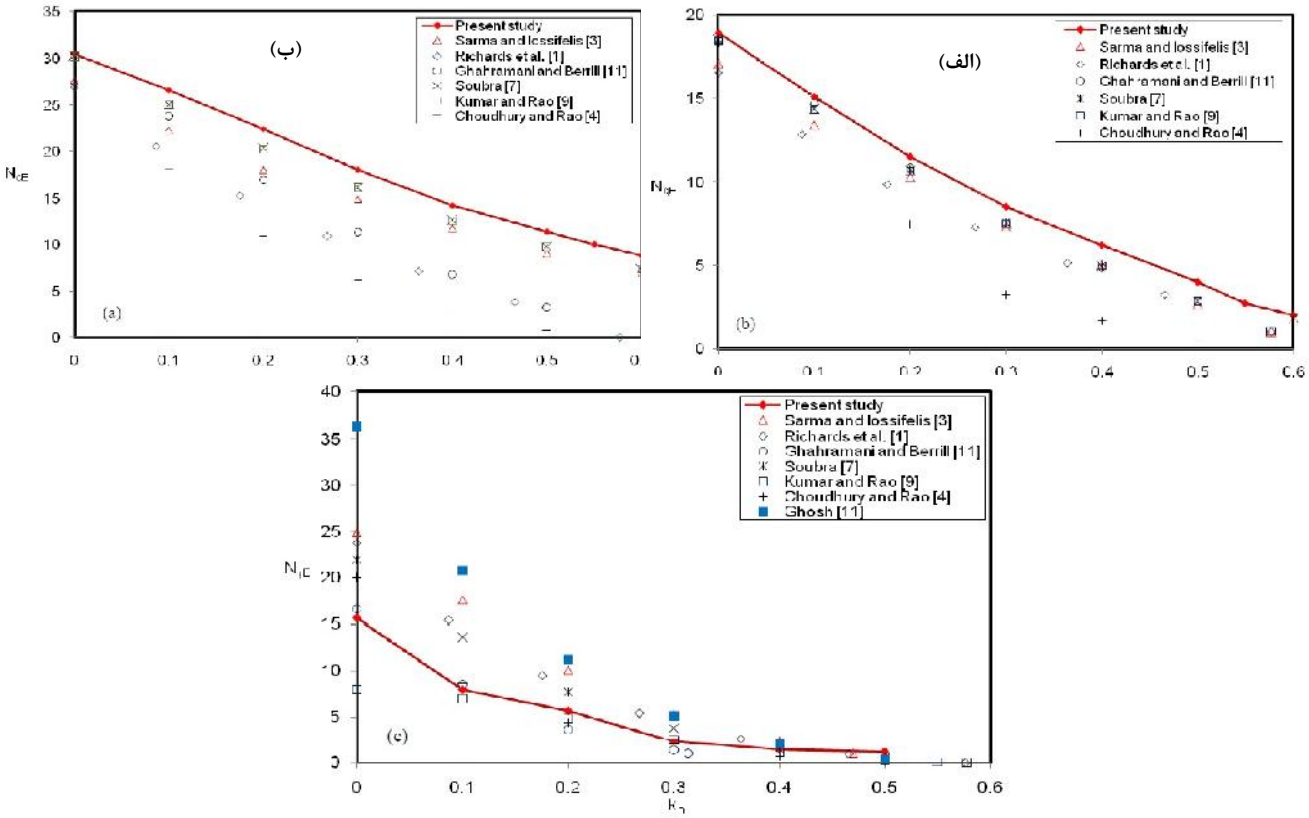
معصومی و همکاران (۱۳۸۷) به مطالعه تاثیر پارامترهای مختلف خاک بر نشست دینامیکی شالوده‌های سطحی و انجام مقایسه‌ای از نشست استاتیکی و دینامیکی برای هر پارامتر پرداختند. بدین صورت که با ساخت یک مدل عددی پی در نرم افزار تخصصی FLAC به روش تفاضل محدود تحت مؤلفه قائم شتاب زمین از شتاب نگاشت زلزله فیروزآباد کجور، اثر تغییر هرکدام از پارامترهای ذکر شده با فرض ثابت بودن پارامترهای دیگر بر نشست قائم پی در حالت دینامیکی لحاظ نموده و نتایج را مورد مقایسه و تحلیل قرار دادند.

ایشان با ارزیابی نمودارهای ترسیم شده در شکل ۳ و مقایسه نمودار نشست بر حسب پارامترهای مختلف در حالت تحلیل استاتیکی به نتایج زیر دست یافتند:

از نمودار شکل ۳ (الف) نتیجه می‌شود که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، میزان نشست کاهش می‌یابد و افزایش زاویه اصطکاک خاک بیش از ۳۰ درجه، تأثیر چندانی بر میزان نشست بار وارده بر شالوده ندارد. در حالت دینامیکی به طور متوسط حداکثر نشست نسبت به حالت استاتیکی ۱۱ میلیمتر افزایش می‌یابد.

همانگونه که در شکل ۳ (ب) مشاهده می‌شود، افزایش ضریب پواسون، باعث کاهش نشست خاک می‌شود. برای مقادیر بین ۰/۳ تا ۰/۴ شیب تغییرات نشست نسبت به ضریب پواسون ملایم‌تر از فواصل دیگر می‌باشد. برای فواصل دیگر این رابطه تقریبا به صورت خطی است. اختلاف

نشست دینامیکی نسبت به استاتیکی برای ضرایب پواسون ۰/۱۵ و۰/۲ حدود ۹ میلیمتر و برای ضرایب پواسون ۰/۳ و۰/۴ حدود ۴ میلیمتر و برای ضریب ۰/۵ برابر ۲ میلیمتر می‌باشد.



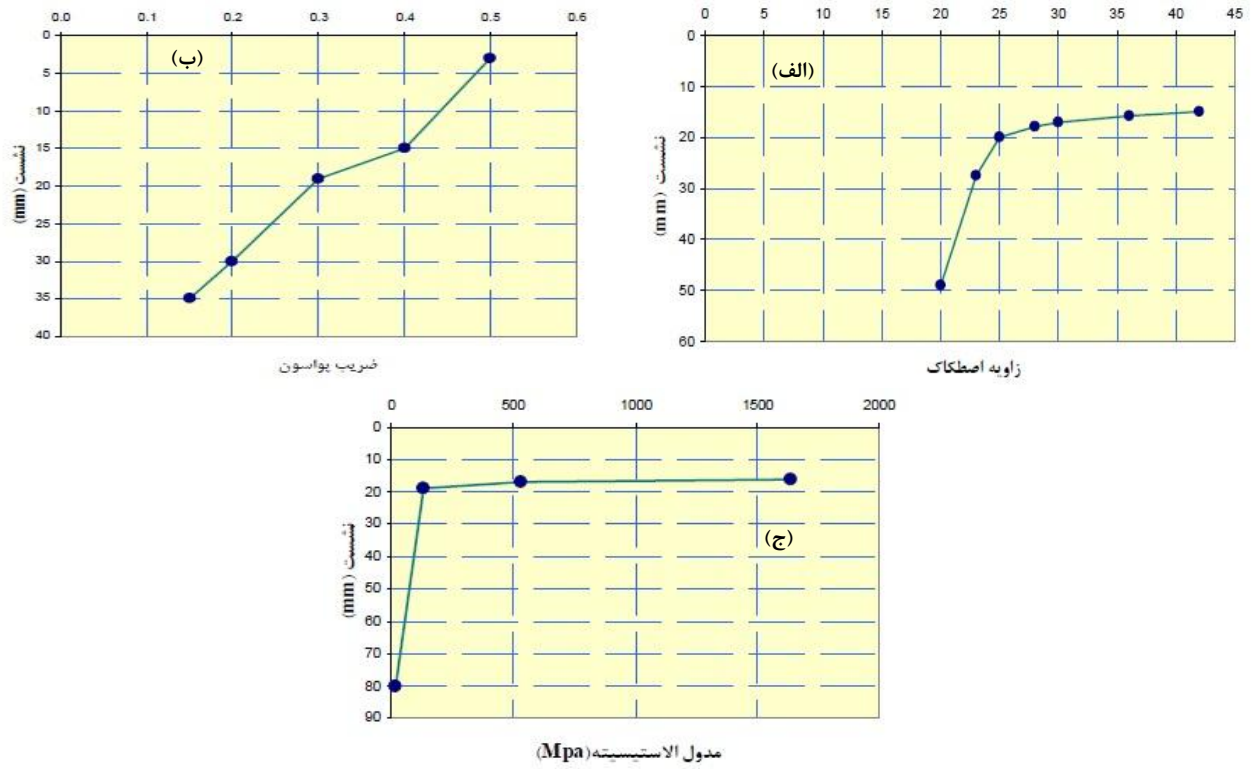
شکل ۲: مقایسه ضرایب ظرفیت باربری دینامیکی الف) N_{qE} ب) N_{cE} ج) $N_{\gamma E}$ (Shafiee and Jahanandish, 2010)

نتایج به دست آمده نشان می‌دهد هرچه ضریب ارتجاعی خاک افزایش یابد، تغییر مکان لازم برای رسیدن به حالت گسیختگی کاهش و در نتیجه نشست کاهش می‌یابد. شکل ۳ (ج) نتایج به دست آمده را نشان می‌دهد. ضریب ارتجاعی در محدوده ۱۳۰ تا ۷۰۰ مگاپاسکال، حداکثر نشست دینامیکی را نسبت به حالت استاتیکی ۱۲ میلیمتر افزایش می‌دهد و برای مدول ۱۶۴۰ مگاپاسکال میزان افزایش به ۱۵/۵ میلیمتر می‌رسد.

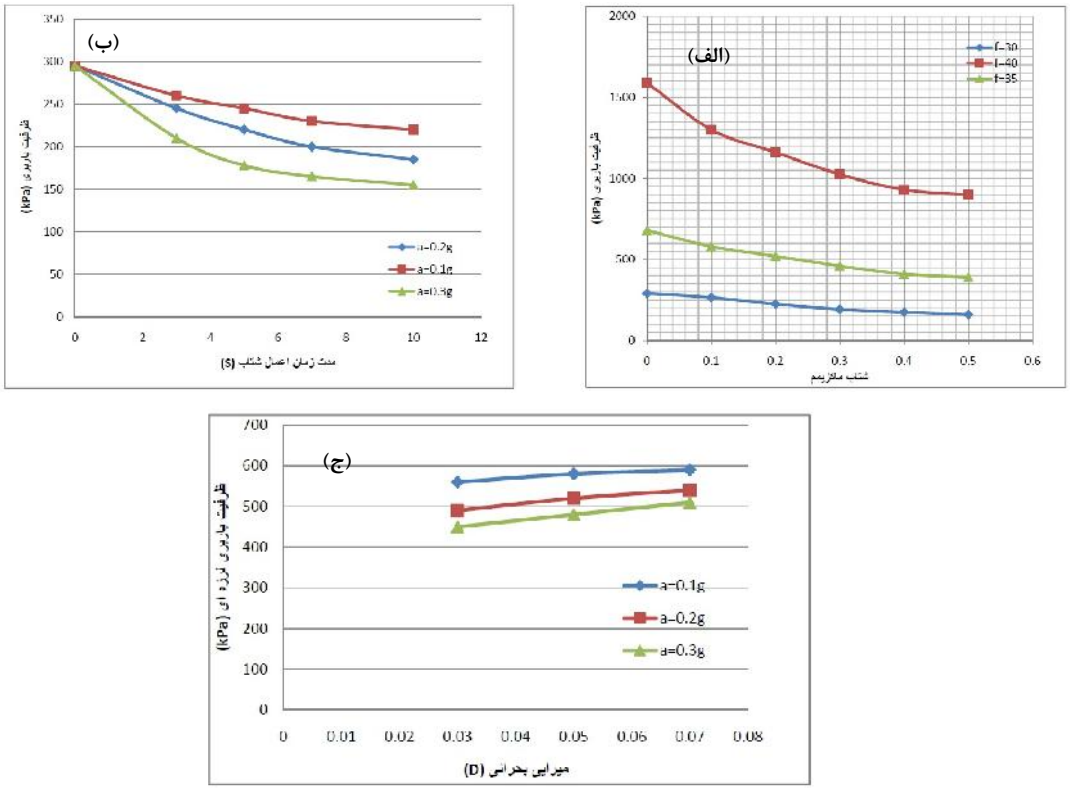
همچنین ایشان نتیجه گرفتند تغییر دانسیته خاک باعث تغییرات زیاد در نشست نمی‌شود. افزایش دانسیته میزان نشست دینامیکی را به مقدار تقریبا ثابتی نسبت به حالت استاتیکی افزایش می‌دهد؛ مقدار این عدد حدود ۱۲ میلیمتر است. با افزایش میزان سربار، حداکثر نشست دینامیکی نسبت به نشست استاتیکی افزایش می‌یابد. این میزان برای سربار ۸۰ کیلوپاسکال برابر ۱۱/۵ میلیمتر و برای سربار ۴۵۰ کیلوپاسکال به ۴۵ میلیمتر افزایش می‌یابد.

برخورداری و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از نرم افزار FLAC یک سری تحلیل جهت تعیین مکانیزم گسیختگی تحت شتاب لرزه‌ای و تاثیر شتاب بیشینه، مدت زمان اعمال شتاب و میرایی بر ظرفیت باربری لرزه‌ای پی‌های سطحی انجام دادند. ایشان مطابق نمودار شکل ۴ (الف) نتیجه گرفتند با افزایش شتاب، ظرفیت باربری کاهش می‌یابد. همچنین با بزرگتر شدن زاویه اصطکاک داخلی، شیب کاهش ظرفیت باربری تندتر می‌شود. نکته قابل توجه دیگر این است که نرخ کاهش ظرفیت باربری با افزایش شتاب کمتر می‌شود. همچنین با توجه به نمودار شکل ۴ (ب) با افزایش مدت زمان اعمال شتاب، ظرفیت باربری لرزه‌ای کاهش می‌یابد همچنین با افزایش آن آهنگ کاهش ظرفیت باربری کندتر می‌شود.

همانگونه که در شکل ۴ (ج) مشاهده می‌شود تغییرات میرایی تاثیر زیادی بر روی ظرفیت باربری لرزه‌ای شالوده‌های نواری ندارد. این امر در شتاب های پایین (0.01g) مشهودتر است ولی به طورکلی با بیشتر شدن میرایی، ظرفیت باربری لرزه‌ای نیز تا حدودی افزایش می‌یابد.



شکل ۳: تاثیر الف) زاویه اصطکاک داخلی ب) ضریب پواسون ج) مدول الاستیسیته بر نشست دینامیکی خاک تحت اثر مولفه شتاب قائم زلزله (معصومی و همکاران، ۱۳۸۷)



شکل ۴: تاثیر تغییرات ظرفیت باربری لرزه‌ای الف) تحت شتاب بیشینه مختلف برای خاک با زوایای اصطکاک متفاوت ب) در مدت زمان‌های مختلف اعمال شتاب ج) برای درصد میرایی بحرانی مختلف (برخورداری و همکاران، ۱۳۹۰)

خلاصه‌ای از مشخصات و نتایج مطالعات عددی بیان شده در جدول ۳ ارائه گردیده‌است.

جدول ۳: مشخصات و نتایج مطالعات عددی

محققین	نام نرم افزار	جهت بارگذاری	مشخصات خاک	هندسه پی	نوع بارگذاری دینامیکی	خروجی و نتایج
Shafiee et al. (2010)	PLAXIS	2-D	ماسه خشک	نواری	لرزه‌ای	نمودار ضرایب ظرفیت باربری دینامیکی بر حسب ضریب افقی زلزله و بررسی تاثیر اینرسی توده خاک بر ظرفیت باربری لرزه‌ای
معصومی و همکاران (۱۳۸۷)	FLAC	2-D	ماسه رس دار	نواری	زلزله (تحت مولفه قائم شتاب نگاشت)	نشست قائم پی در حالت دینامیکی به ازای تغییر پارامترهای مختلف خاک نظیر: زاویه اصطکاک، ضریب پواسون، ضریب ارتجاعی خاک و ...
برخورداری و همکاران (۱۳۹۰)	FLAC	2-D	ماسه خشک	نواری	زلزله	ظرفیت باربری لرزه‌ای و تعیین مکانیزم گسیختگی در اثر تغییر در شتاب بیشینه، مدت زمان اعمال شتاب و میرایی

نتیجه گیری

نتایج روش‌های تئوری، آزمایشگاهی و مطالعات عددی در تحلیل لرزه‌ای پی‌های سطحی به طور خلاصه بیان شد. با توجه به پر هزینه بودن روش آزمایشگاهی در حل دقیق مسائل ژئوتکنیکی، از تحلیل عددی می‌توان به عنوان روشی مناسب در این زمینه نام برد.

در حالت دینامیکی میزان حداکثر نشست، با افزایش زاویه اصطکاک کاهش می‌یابد. به عبارتی با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک، تاثیر نشست ناشی از زلزله کم رنگ‌تر می‌شود. به طور کلی پارامترهای مختلف خاک، زلزله و روسازه بر ظرفیت باربری و نشست دینامیکی تاثیر دارند. لذا بررسی بیشتر نتایج تحلیل‌های دینامیکی با توجه به شتاب نگاشت زلزله منتخب برای پروژه‌های خاص و تمامی پارامترهای موثر دیگر مانند فرکانس و چگونگی تاثیر این پارامترها (هرچند کوچک)، راهکاری مناسب برای طراحی بهینه پی، بهسازی و افزایش ظرفیت باربری دینامیکی خاک می‌باشد.

مراجع

برخورداری ک، احمدی م، و روانبخش ا (۱۳۹۰) مکانیسم گسیختگی برای پی‌های سطحی تحت بار لرزه‌ای با استفاده از روش‌های عددی، *ششمین کنفرانس بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله*

عسکری ف، فرزانه ا، و میرابوطالبی، م (۱۳۸۴) ظرفیت باربری لرزه‌ای شالوده‌های سطحی با در نظر گرفتن اینرسی توده خاک، *نشریه دانشکده فنی دانشگاه تهران*، جلد ۳۹، شماره ۳، صص ۳۱۹-۳۲۷

معصومی ع، داوودی م، و خلدبرین ع (۱۳۸۷) مطالعه تاثیر پارامترهای مختلف خاک بر نشست دینامیکی شالوده‌های سطحی، *چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران*، دانشگاه تهران، تهران، ایران

Budhu M and Al-karni A (1993) Seismic Bearing Capacity of Soils, *Journal of Geotechnical Eng., ASCE*, Vol. 43, pp. 181-187

Dormieux L and Pecker A (1995) Seismic Bearing Capacity of Foundation on Cohesionless Soil, *Journal of Geotechnical Eng., ASCE*, Vol. 121, pp. 300-303

Knappett JA, Haigh SK and Madabhushi SPG (2006) Mechanisms of Failure for Shallow Foundations under Earthquake Loading, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 26, pp. 91–102

Kumar J and Mohan Rao VBK (2002) Seismic Bearing Capacity Factors for Spread Foundations, *Journal of Geotechnical Eng., ASCE,* Vol. 25, pp. 79-88

Maugeri M, Musumeci G, Novita D and Taylor CA (2000) Shaking Table Test of Failure of a Shallow Foundation Subjected to an Eccentric Load, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering,* Vol. 20 , pp. 435–444

Richards R and EDGaBM (1993) Seismic Bearing Capacity and Settlements of Foundations, *Journal of Geotechnical Eng., ASCE,* 119(4): 662-674

Sarma SK and Iossifelis IS (1990) Seismic Bearing Capacity Factors of Shallow Strip Footing, *Journal of Geotechnical Eng., ASCE,* Vol. 40, pp. 265-273

Shafiee AH and Jahanandish M (2010) Seismic Bearing Capacity Factors for Strip Footings, *5th National Congress on Civil Engineering,* Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Shirato M, Kouno T, Asai R, Nakatani S, Fukui J and Paolucci R (2008) Large-scale Experiments on Macroscopic Non-linear Behavior of Shallow Foundations Subjected to Strong Earthquakes, *Soils and Foundation,* 48(5): 673-692

Sokolovski VV (1960) Statics of Soil Media, English Translation, Foundation Triandafilidis

Soubra AH (1997) Seismic Bearing Capacity of Shallow Strip Footings in Seismic Conditions, *Proc. Institution of Civil Engineers,* Geotechnical Engineering, 125 (4): 230- 241