



## مطالعه تاثیر پارامترهای مختلف خاک بر نشست دینامیکی شالوده‌های سطحی

دکتر علی معصومی<sup>۱</sup>، دکتر محمد داوودی<sup>۲</sup>، مهندس علی رضا خلدبرین<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه تربیت معلم (خوارزمی)

۲- استادیار پژوهشکده مهندسی ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- خاک و پی، دانشگاه تربیت معلم (خوارزمی)

massumi@tmu.ac.ir

### چکیده

در این مقاله از یک پی منفرد صلب با ابعاد و پارامترهای هندسی مشخص بر روی خاک ماسه رس‌دار استفاده شده است. مدل مذکور توسط نرم‌افزار تحلیلی FLAC به روش تفاضل محدود تحت مؤلفه قائم شتاب زمین از شتاب نگاشت زلزله فیروزآباد کجور (ایستگاه ساری) مورد تحلیل قرار گرفته است. سپس مقایسه‌ای از نشست دینامیکی بر اثر تغییر پارامترهای مختلف خاک نظیر زاویه اصطکاک (φ)، دانسیته (ρ)، میزان سربار (q)، ضریب پواسون (ν) و مدول الاستیسیته (E) صورت پذیرفته است. بدین صورت که اثر تغییر هر کدام از پارامترهای ذکر شده با فرض ثابت بودن پارامترهای دیگر بر نشست قائم پی در حالت دینامیکی لحاظ شده و نتایج مورد مقایسه و تحلیل قرار گرفته است. نتایجی که از تحلیلهای به‌عمل آمده حاصل شد نشان می‌دهد که شدت سربار نسبت به پارامترهای ذکر شده دیگر تاثیر بیشتری بر نشست دینامیکی پی دارد. همچنین افزایش زاویه اصطکاک، مدول الاستیسیته و ضریب پواسون سبب کاهش نشست دینامیکی می‌شود. از میان پارامترهای ذکر شده دانسیته تاثیر کمی بر نشست دینامیکی پی‌های سطحی دارد. در بخش پایانی این مقاله مقایسه‌ای از نشست دینامیکی و استاتیکی برای هر پارامتر انجام پذیرفت. مقایسه این دو حالت نشان می‌دهد نشست دینامیکی در اثر هر یک از پارامترها عدد بالاتری نسبت به نشست استاتیکی می‌باشد که این مقدار برای خاکهای سست و شدت بار بالا بیشتر و قابل ملاحظه می‌باشد.

کلمات کلیدی: نشست قائم دینامیکی، پی سطحی، FLAC، شتاب نگاشت زلزله، پارامترهای خاک

### مقدمه

تاریخچه بررسی نشست و ظرفیت باربری خاک زیر پی‌ها در شرایط بدون زلزله، به چند دهه قبل برمی‌گردد و توسعه تئوری‌ها و تحلیل‌های مربوط به آن از زمان ترزاقی [1] تا کنون در دهها مقاله و گزارش به چاپ رسیده است از آن جمله می‌توان به محققینی نظیر [3] Caquot and Kerisel (1953)، [2] Meyerhof (1951)، [5] Vesic (1973)، [6] Chen (1975) و بسیاری دیگر اشاره نمود. از طرفی گرچه بررسی عملکرد زلزله در حوزه ژئوتکنیک مورد بررسی بوده است، ولی به آن‌گونه که تعداد مقالات، گزارش‌ها و تنوع و تعدد محاسبات و تحلیل‌ها و آزمایش‌ها در خصوص شرایط استاتیکی (بدون زلزله) پی در دسترس می‌باشد، مباحث لرزه‌ای خاک مورد بحث و تحلیل قرار نگرفته است. بارهای دینامیکی وارد بر پی ممکن است توسط زلزله، انفجار، ارتعاش ماشین‌آلات و اثر امواج دریا ایجاد شوند. اگر یک سازه تحت ارتعاش‌های ناشی از زلزله واقع گردد، بارهای وارد بر پی این سازه در هنگام زلزله عبارت خواهند بود از بارهای متناوب قائم، بارهای متناوب افقی و لنگرهای متناوب حول یک یا چند محور. همچنین زلزله سبب ایجاد نیروی اینرسی در توده خاک زیر پی خواهد شد که این عامل نیز بر نشست پی تاثیرگذار می‌باشد. مطالعه پاسخ دینامیکی پی‌ها تحت شتاب‌نگاشت زلزله، از مسایل مهم طراحی مقاوم در برابر زلزله و مسایل اندرکنشی خاک و سازه می‌باشد. نتایج تحلیل‌های دینامیکی خاک زیر پی متأثر از پارامترهای مختلف خاک نظیر زاویه اصطکاک (φ)، دانسیته (ρ)، میزان سربار (q)، ضریب پواسون (ν) و مدول الاستیسیته (E) می‌باشد. چگونگی تأثیر این پارامترها می‌تواند برای طراحی بهینه پی در حالت دینامیکی راهکار مناسبی باشد. همچنین با توجه به نوع خاک می‌توان مناسب‌ترین روش را جهت بهسازی و افزایش ظرفیت باربری خاک انتخاب کرد.

متداول‌ترین روشهای موجود در تعیین نشست و ظرفیت باربری دینامیکی پی‌ها، روش‌های حدی هستند. این روش‌ها را می‌توان در سه گروه کلی به

شرح زیر دسته‌بندی کرد (عسکری و فرزانه، ۲۰۰۳) [۱۲]

- روش تعادل حدی (Limit Equilibrium Method)

- روش خطوط مشخصه (Slip Line Method)

- روش آنالیز 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 بهینه‌سازی 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 ریچارد و همکاران (Richard et.al, 1993) و بودهو و الکرني (Budehu and Al-Kerni, 1993) اشاره کرد.

در روش خطوط مشخصه از ترکیب معادلات تعادل با معادله سطح خمیری، دستگاهی از معادلات دیفرانسیل هذلولی به دست می‌آید که به معادلات تعادل خمیری موسوم هستند. 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 غالباً نمی‌توان جایگاه جواب به دست آمده را نسبت به حل دقیق تعیین کرد. در این زمینه روش‌های سوکولفسکی (Sokolovski, 1960) و کومار-موهان رائو (Kumar & Mohan Rao, 2002) قابل اشاره هستند.

در روش آنالیز حدی که به روش تحلیل حدی نیز موسوم است، 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 [9]. روش‌های دورمیکس-پکر (Dormieux & Pecker, 1995)، سوبرا (Souubra, 1997) و زو (Zhu, 2000) از این دسته هستند.

در یک طرح ایمن و اقتصادی لازم است علاوه بر بررسی اثر خاک زیر پی، تأثیر سربارهای استاتیکی و دینامیکی وارد بر پی و مقدار خروج از مرکز آن لحاظ شوند. برای کنترل پایداری پی علاوه بر تعیین میزان نشست‌ها، میزان دوران پی نیز لازم است محاسبه و کنترل شود. ظرفیت باربری پی توسط تئوری ترازایی و روش شبه استاتیکی پراکاش و ساران در حالات مختلف بررسی شده است.

پراکاش و ساران (Prakash and Saran, 1981) با فرض گسیختگی یک طرفه، یک راه حل تحلیلی برای تعیین ظرفیت باربری نهایی یک پی نواری تحت بار قائم خارج از مرکز ارائه داده‌اند. در عمل مشاهده شده است که گسیختگی این نوع پی‌ها به علت دوران به وقوع پیوسته است. نتایج محاسبات این محققین بر حسب ضرایب ظرفیت باربری و زاویه اصطکاک خاک و مقدار خروج از مرکز بیان شده است [4]. ریچارد (Richard, 1993) و همکاران تئوری ظرفیت باربری برای یک پی نواری متکی به خاک دانه‌ای را تحت بار سیکلی پیشنهاد کرده‌اند. شکل سطح گسیختگی تحت شرایط دینامیکی بر پایه فشار فعال و غیر فعال کلمب (Coulomb) در نظر گرفته شده است [8]. به احتمال زیاد، سارما و یوسیفلیس<sup>1</sup> (۱۹۹۰) از اولین محققینی بودند که تحلیل‌هایی در این زمینه انجام دادند (در تحلیل آنها مؤلفه افقی زلزله در بخشهای مختلف خاک مورد بررسی قرار گرفت). پس از آن بودهو و الکرني (۱۹۹۳)، مؤلفه قائم زلزله را مورد توجه قرار دادند. تکمیل همین ملاحظات در تحلیل‌ها توسط پژوهشگران بعدی صورت گرفت که از جمله باید به کومار و موهان (۲۰۰۲) اشاره نمود. روش دیگر روش ارایه شده توسط ریچارد و همکاران (۱۹۹۳ و ۲۰۰۳) می‌باشد که در آن نیروهای اینرسی داخل توده خاک، مقاومت خاک موجود را کاهش می‌دهد و در نتیجه ظرفیت باربری پی سطحی کاهش می‌یابد. از این روش نتیجه گرفته می‌شود که انتقال برش در فصل مشترک خاک-سازه همچنین ظرفیت باربری را کاهش می‌دهد. طی سالهای اخیر پژوهش‌های دیگری نیز در تکمیل تحلیل‌های قبلی ارایه گردید که از آن جمله می‌توان به مقالاتی که توسط عسکری و فرزانه (۲۰۰۳)، کناپکو و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۶)، مرلوس و رومو<sup>۳</sup> (۲۰۰۶) و سایرین اشاره نمود. نکته قابل توجه در دو مقاله اخیر این است که بعضاً از مشاهدات آزمایشگاهی مخصوصاً از دستگاه سانترفیوژ نیز استفاده شده است تا رفتار واقعی خاک هم مورد مشاهده قرار گیرد [11].

در تحلیل‌های دینامیکی اهمیت پرداختن به مؤلفه قائم شتاب نگاشت در تحلیل‌ها و آزمایش‌ها نیز مورد توجه و بررسی قرار گرفت از جمله این تحقیقات مطالعه آزمایشگاهی بود که توسط Varadi and Saxena (1980) انجام پذیرفت. در این آزمایش از یک پی دایروی روی خاک ماسه‌ای استفاده شد و انتقال عمودی بار در زیر پی مورد بررسی قرار گرفت و تنش‌های قائم خاک نسبت به عمق در شرایط استاتیکی با و بدون وجود پی و در حالت دینامیکی با و بدون وجود پی مورد مقایسه قرار گرفت. در این حالت همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، نتایج زیر حاصل گردید [7]:

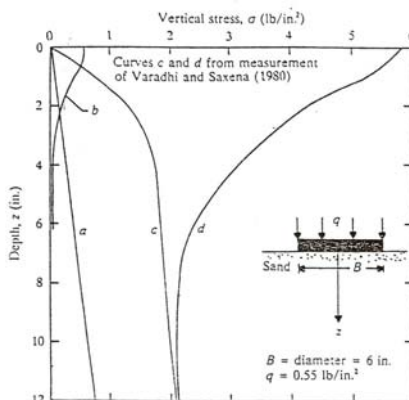
- ۱- حداکثر تنش عمودی دینامیکی در حالت وجود پی (منحنی d)، در حدود ۱۰ برابر بیشتر از فشار باربر استاتیکی است.
- ۲- در عمق دو برابر قطر پی (2B)، تأثیر جرم پی روی توزیع تنش عمودی ناچیز می‌باشد.

با توجه به توضیحات بیان شده و به جهت بررسی بیشتر موضوع، یک مدل عددی پی به وسیله نرم افزار تخصصی FLAC ساخته شد و تأثیر عوامل مختلف موثر بر روی نشست پی در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. در قسمتهای آبی جهت بررسی دقیق موضوع با استفاده از روش عددی یک فونداسیون با مشخصات معلوم مورد تحلیل قرار گرفت تا تأثیر مؤلفه قائم شتاب‌نگاشت زلزله بر روی آن مورد بررسی قرار گیرد.

<sup>1</sup> Iossifeilis

<sup>2</sup> Knappcu et.a

<sup>3</sup> Merlos and Romo



شکل ۱- تنش عمودی زیر یک پی دایروی بر اثر مؤلفه قائم زلزله در خاک ماسه‌ای [7]

### مشخصات مدل عددی ساخته شده

ابعاد و هندسه مدل به گونه‌ای انتخاب شده است که مرزها در نتایج تحلیلی مدل تأثیرگذار نباشند. مدل خاک تا سنگ بستر امتداد پیدا کرده است و شتاب زلزله از بستر سنگی به خاک اعمال می‌شود. به منظور بررسی صحت عملکرد مدل، ابعاد مدل شامل توده خاک به ابعاد  $30 \times 30$  متر در نظر گرفته می‌شود. شالوده در وسط مرز بالایی مدل به عرض ۲ متر و ارتفاع ۵۰ سانتی‌متر قرار گرفته است. برای مش‌بندی مدل از شبکه‌های مستطیلی به ابعاد  $0.5 \times 0.5$  متر در مجاورت پی و  $1 \times 1$  و  $0.5 \times 1$  متر در نواحی دورتر از پی استفاده شده است (شکل ۲). به منظور مدل‌سازی رفتار تنش و کرنش خاک، مدل ساختاری الاستوپلاستیک، به همراه معیار گسیختگی موهر-کولمب به کار رفته است. یکی از دلایل این انتخاب سادگی مدل می‌باشد. پارامترهای اصلی این مدل C و  $\phi$  می‌باشند که از طریق آزمایش‌های معمول مکانیک خاک به دست می‌آیند. در این برنامه پارامترهای دانسیته ( $\gamma$ )، مدول بالک (K)، مدول برشی (G)، چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) و زاویه اتساع ( $\psi$ ) برای تعریف مدل خاک مورد نیاز می‌باشد. برای خاک زیر پی از مصالح ماسه‌ای رس‌دار استفاده شده است. از آنجایی که در برنامه مقادیر مدول برشی و مدول بالک به عنوان ورودی گرفته می‌شود، با استفاده از رابطه‌های زیر می‌توان آنها را به دست آورد [10]:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

در این رابطه‌ها، E مدول الاستیسیته و  $\nu$  ضریب پواسون می‌باشد. مدل پی یک مدل الاستیک به عنوان المان خمشی می‌باشد که پارامترهای مدول الاستیسیته، دانسیته، مساحت و ممان اینرسی به آن تخصیص می‌یابد. در آغاز تحلیل، مدل خاک و سازه با فرض پارامترهای زیر مورد بررسی قرار می‌گیرد. ابعاد و پارامترها در مقیاس واقعی به مدل داده شده‌اند. سپس با ثابت نگه داشتن همه پارامترها و تغییر تنها یک پارامتر تأثیر آن بر نشست دینامیکی مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. مشخصات شالوده بتنی:

$$A = 1m^2, \rho = 2500kg/m^3, E = 2.5e10pa, I = 0.0208m^4$$

در این روابط A مساحت مقطع شالوده در مدل استفاده شده،  $\rho$  جرم حجمی شالوده بتنی، E مدول الاستیسیته و I ممان اینرسی مقطع شالوده می‌باشد.  
پارامترهای خاک:

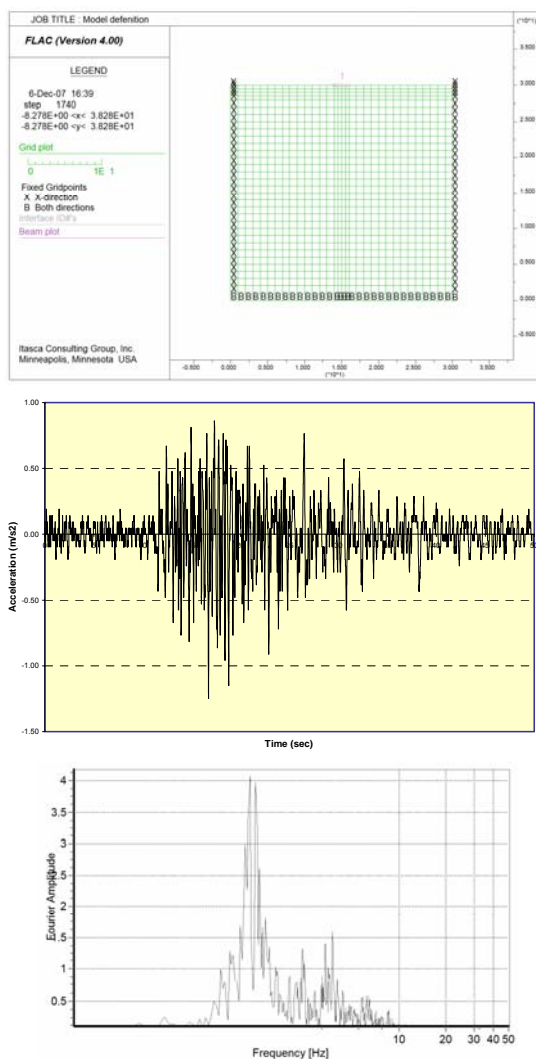
$$K = 1.36e8pa, \rho = 1715kg/m^3, \phi = 30,$$

$$G = 6.3e7pa, C = 2000pa, T \& di = 0$$

پارامترهای مشخص شده، مربوط به خاکی با مدل رفتاری موهر-کولمب می‌باشد که در آن، K مدول بالک،  $\rho$  دانسیته خاک،  $\phi$  زاویه اصطکاک داخلی، G مدول برشی، C چسبندگی، T مقاومت کششی و di زاویه اتساع می‌باشد.



برای مدل‌سازی دینامیکی، از میرایی رایلی با فرض ضریب میرایی  $D=0.05$  و فرکانس غالب  $f=1.6$  Hz استفاده شده است. لازم به ذکر است مقدار فرکانس مذکور بر اساس رابطه عمومی  $f = \frac{c_s}{4H}$  که در مطالعات تاثیر ساختگاه به کار می‌رود استفاده شده است. برای مدل‌سازی شالوده از المان‌های خمشی تیر (Beam element) استفاده شده که در آن گره‌ها (Nodes) به شبکه محاسباتی متصل هستند. شتاب‌نگاشت زلزله‌ای که در مدل بکار رفته است، مربوط به زمین‌لرزه فیروزآباد کجور می‌باشد که در تاریخ هشتم خردادماه ۱۳۸۳ رخ داده است. رکورد این شتاب‌نگاشت از شتاب‌نگار ایستگاه ساری که فاصله آن از مرکز زلزله ۱۳۵km می‌باشد، قرائت شده است. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن با استفاده از شتاب‌نگاشت‌های ثبت شده از این رویداد، بزرگای محلی را ۶/۱ ریشتر محاسبه کرد. حداکثر شتاب قائم ثبت شده این زلزله توسط شتاب‌نگار ذکر شده  $a=0.127g$  می‌باشد. رکورد ثبت شده با استفاده از نرم‌افزار Era<sup>1</sup> از سطح زمین به بستر سنگی انتقال یافته است. در شکل ۲ تاریخچه زمانی و محتوای فرکانسی شتاب‌نگاشت تصحیح شده و فیلتر شده روی بستر سنگی نشان داده شده است.

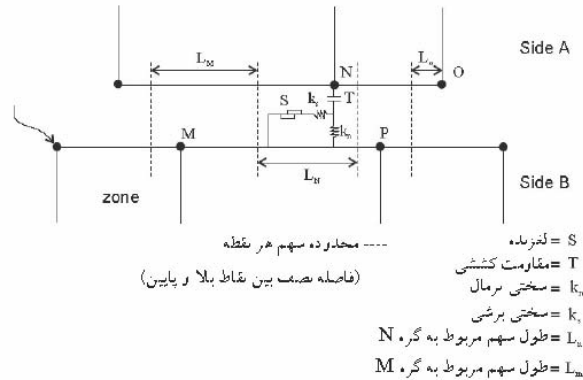


شکل ۲- الف- شکل کلی مدل ساخته شده، ب- تاریخچه زمانی شتاب در بستر سنگی، ج- محتوای فرکانسی طیف فوریه

در مسائل مرتبط با ژئوتکنیک بحث اندرکنش خاک و سازه از مسایل مهم و در عین حال پیچیده می‌باشد. نرم‌افزار FLAC یک برنامه بسیار توانمند در مسایل اندرکنشی می‌باشد. مدل مشخصه برای سطح مشترک (شکل ۳)، مدل الاستوپلاستیک کامل موهر کولمب است. پارامترهای سطح مشترک شامل

<sup>1</sup>University of Southern California, A computer program for Equivalent-Linear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits

چسبندگی (C)، زاویه اصطکاک ( $\phi$ )، زاویه اتساع ( $\psi$ )، سختی نرمال ( $K_n$ )، سختی برشی ( $K_s$ ) و مقاومت کششی (T) می‌باشند. یک سطح مشترک از اندرکنش بین دو صفحه به دست می‌آید. این دو صفحه که وجوه صفحه مشترک هستند، از طریق فنرهای نرمال و برشی با یکدیگر در تماس هستند.



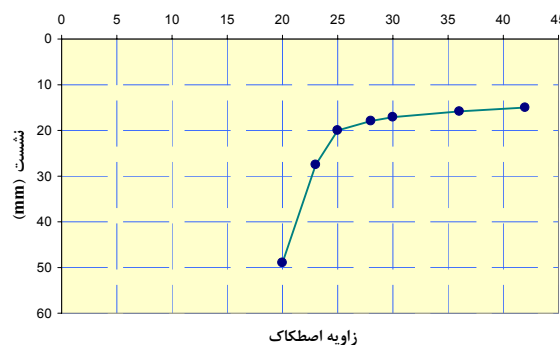
شکل ۳- سطح مشترک اتصال خاک-سازه برای دو جسم اتصال یافته توسط فنرهای نرمال و برشی [1]

### نتایج تحلیل

مدل نشان داده شده در شکل ۳ تحت تاثیر مولفه قائم شتاب زلزله قرار گرفت و توزیع نشست پی محاسبه شد. پس از کنترل صحت نتایج به دست آمده، با ثابت نگه داشتن مقادیر کلیه پارامترها و تغییر تنها یک پارامتر، تاثیر آن بر نشست سنجیده شد. در مطالب آتی تاثیر این پارامترها دیده می‌شود.

### تأثیر زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) در نشست دینامیکی

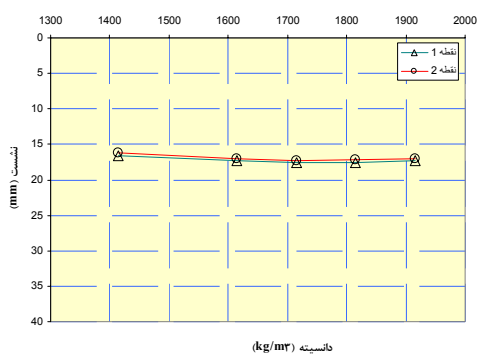
مقدار تغییر مکان پی، جهت رساندن خاک به حالت گسیختگی به زاویه اصطکاک خاک بستگی دارد. با افزایش زاویه اصطکاک داخلی، خاک در نشست بیشتری به حالت گسیختگی می‌رسد. در این حالت حداکثر سربار ۱۲۰ کیلو نیوتن لازم است تا خاک با زاویه اصطکاک داخلی  $\phi=20$  پایدار باقی بماند. لذا از این سربار استفاده شد. با ثابت نگاه داشتن کلیه پارامترهای خاک زاویه اصطکاک داخلی را به ترتیب به ۲۳، ۲۵، ۲۸، ۳۶ و ۴۲ افزایش داده و نمودار حداکثر نشست بر حسب تغییر زاویه اصطکاک مطابق شکل ۴ ترسیم می‌شود. از نمودار شکل ۴ 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. همچنین نتایج تحلیل نشان می‌دهد که حداکثر نشست زیر شالوده در قسمت میانی عرض شالوده رخ می‌دهد.



شکل ۴- تأثیر زاویه اصطکاک بر نشست دینامیکی خاک تحت سربار ۱۲۰kN و مؤلفه شتاب قائم زلزله

### تأثیر دانسیته در نشست دینامیکی

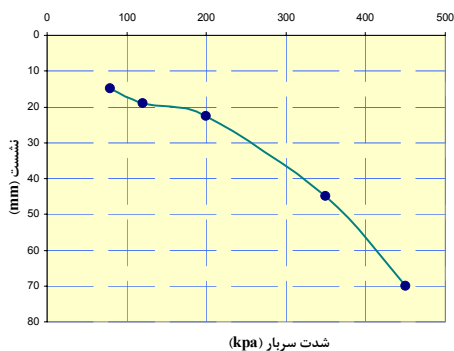
تغییرات نشست برای دانسیته های ۱۹۱۵، ۱۸۱۵، ۱۷۱۵، ۱۶۱۵ و ۱۴۱۵ کیلوگرم بر متر مکعب مورد بررسی قرار گرفت. در این حالت برای دو نقطه در زیر شالوده به مختصات ( $i=16, j=32$ ) و ( $i=16, j=31$ )، حداکثر نشست قرائت شد و مشخص گردید همانگونه که اختلاف نشستها در نمودار نشان می‌دهد، در این محدوده تغییر دانسیته باعث تغییرات زیاد در نشست نمی‌شود. در این حالت خطی تقریباً افقی در نمودار نشست و دانسیته ترسیم می‌گردد.



شکل ۵- تأثیر دانسیته بر نشست دینامیکی خاک تحت مؤلفه شتاب قائم زلزله

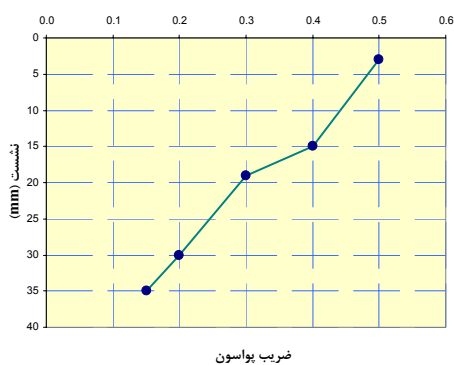
### تأثیر شدت سربار در نشست دینامیکی

واضح است که با افزایش مقدار سربار میزان نشست افزایش می‌یابد و همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، این افزایش با نشست رابطه‌ای تقریباً تصاعدی دارد. در اینجا میزان حداکثر نشست برای زاویه اصطکاک داخلی برابر ۳۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته و مشاهده شده است که میزان سربار بیشتر از ۴۵۰ kpa سبب گسیختگی خاک می‌شود.



شکل ۶- تأثیر شدت سربار بر نشست دینامیکی خاک تحت مؤلفه شتاب قائم زلزله

### تأثیر ضریب پواسون خاک (ν) در نشست دینامیکی

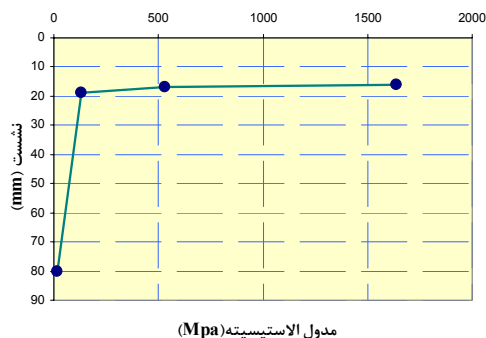


شکل ۷- تأثیر ضریب پواسون بر نشست دینامیکی خاک تحت مؤلفه شتاب قائم زلزله

شکل ۷ نشان‌دهنده اثر تغییرات ضریب پواسون خاک (ν) بر نشست شالوده است. مدل خاک و سازه با مقادیر مختلف ضریب پواسون برابر ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ مورد تحلیل قرار گرفت. همانگونه که در شکل ۷ 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 تقریباً به صورت خطی می‌باشد.

### تأثیر مدول الاستیسیته (E) در نشست دینامیکی

با توجه به اینکه معیار گسیختگی خاک در مطالعات انجام شده معیار موهر-کولمب در نظر گرفته شده است، پیش‌بینی می‌شود که مدول الاستیسیته خاک تأثیر زیادی بر نشست پی داشته باشد. نتایج به‌دست آمده نیز نشان‌دهنده همین موضوع است. مقادیر ۱۶، ۱۳۰، ۵۳۰ و ۱۶۴۰ مگا پاسکال برای مدول الاستیسیته در تحلیل مورد استفاده قرار گرفت. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد هرچه مدول الاستیسیته افزایش یابد، تغییر مکان لازم برای رسیدن به حالت گسیختگی کاهش و در نتیجه نشست کاهش می‌یابد. شکل ۸ نتایج به‌دست آمده را نشان می‌دهد.



شکل ۸- تأثیر مدول الاستیسیته بر نشست دینامیکی خاک تحت مؤلفه شتاب قائم زلزله

### نتیجه‌گیری

پارامترهای مختلف خاک همانطور که در بخشهای پیشین اشاره شد، تأثیر مستقیم یا معکوس بر نشست دینامیکی دارد. نمودارهای ترسیم شده می‌تواند در استخراج روابط ریاضی برای نشست و همچنین ظرفیت باربری، تسهیلات زیادی را به همراه داشته باشد. نمودار نشست بر حسب پارامترهای مختلف در حالت تحلیل استاتیکی ترسیم گردید و با حداکثر مقدار نشست در حالت دینامیکی مقایسه شد. نتایج زیر از ارزیابی انجام شده به‌دست آمد.

- ۱- در حالت دینامیکی برای زوایای اصطکاک ۲۳، ۲۵، ۲۸، ۳۰، ۳۶ و ۴۲ درجه به‌طور متوسط حداکثر نشست نسبت به حالت استاتیکی ۱۱ میلی‌متر افزایش می‌یابد. در این حالت میزان افزایش حداکثر نشست با افزایش زاویه اصطکاک کاهش می‌یابد. همچنین در زاویه اصطکاک کم (به عنوان مثال ۲۰ درجه)، نشست دینامیکی تا ۳۰ میلی‌متر نسبت به حالت استاتیکی افزایش می‌یابد.
- ۲- مدول الاستیسیته در محدوده ۱۳۰-۷۰۰ مگا پاسکال، حداکثر نشست دینامیکی را ۱۲ میلی‌متر افزایش می‌دهد و برای مدول ۱۶۴۰ مگا پاسکال میزان افزایش به ۱۵/۵ میلی‌متر می‌رسد. برای مدولهای با مقدار کم (به عنوان مثال ۸۰ مگا پاسکال) میزان نشست به مقدار ۳۰ میلی‌متر افزایش می‌یابد.
- ۳- با افزایش میزان سربار، حداکثر نشست دینامیکی نسبت به نشست استاتیکی افزایش می‌یابد. این میزان برای سربار ۸۰ کیلو پاسکال برابر ۱۱/۵ میلی‌متر و برای سربار ۴۵۰ کیلو پاسکال به ۴۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد.
- ۴- افزایش نشست دینامیکی نسبت به حالت استاتیکی با افزایش ضریب پواسون کاهش می‌یابد. اختلاف نشست دینامیکی نسبت به استاتیکی برای ضرایب پواسون ۰/۱۵ و ۰/۲ حدود ۹ میلی‌متر و برای ضرایب پواسون ۰/۳ و ۰/۴ حدود ۴ میلی‌متر و برای ضریب ۰/۵ برابر ۲ میلی‌متر می‌باشد.
- ۵- افزایش دانسیته میزان نشست دینامیکی را به مقدار تقریباً ثابتی نسبت به حالت استاتیکی افزایش می‌دهد. این عدد برای دانسیته‌های ۱۴۱۵، ۱۶۱۵، ۱۷۱۵، ۱۸۱۵ و ۱۹۱۵ کیلوگرم بر مترمکعب مقدار حدودی ۱۲ میلی‌متر می‌باشد.

### مراجع

- 1- Terzaghi, K (1943) Theoretical soil mechanics, Wiley, New York, 510
- 2- Meyerhof, G.G (1951) The ultimate bearing capacity of foundations, Geotechnique, The institution of Civil Engineers, London, 2, 301-332
- 3- Caquot, A., and Kerisel, J (1953) Sur le terme de surface dans le calcul des fondations en milieu pulverulent, Proc., 3rd Int. Conf. on Soil Mech. And Found. Engrg., ICOSOMES, Zurich, Vol I, 336-337
- 4- Parakash, S, C.A.V (1967) Response of Footing to Lateral Loads, Symposium on wave propagation and dynamic, ed. p. int., new mexico: properties of earth material Albuquerque, 679-691
- 5- Vesic, A.S (1973) Analysis of ultimate loads of shallow foundations, Proc, ASCE, 99(1), 45-73
- 6- Chen, W.F (1975) Limit analysis and soil plasticity. Elsevier Scientific Publishing Company, London, 637



- 7- Das Brajam, M. (1992) Principles of soil Dynamics, *PWS-KENT Publishing Company, Boston*
  - 8- Richards, R. and E.D.G.a.B.M. (1993) Seismic Bearing Capacity and Settlements of foundations. *Journal of Geotechnical Eng, ASCE, 119* (No.4): p. 662-674
  - 9- Abdul-Hamid, S. (1999) Upper-Bound solution for Bearing Capacity of foundations. *Journal of Geotechnical Eng., ASCE, 125* (No.1): p. 59-68
  - 10-FLAC (2000), Fast Lagrangian Analysis of Continua, *User manual*
  - 11-Knappett,J,A, H.S.K., Madabhushi.S.P.G, (2006), Mechanism of Failure for Shallow Foundations under Earthquake Loading Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Elsevier
- ۱۲- میرابوطالبی، مسعود، فرزانه، اورنگ و عسکری فرج ا...، ۱۳۸۴، ظرفیت باربری لرزه‌ای شالوده‌های سطحی با در نظر گرفتن توده خاک، نشریه فنی دانشگاه تهران، جلد ۳۹، شماره ۳، صص ۳۱۹-۳۲۷.