

مدل‌سازی عددی ضرایب ظرفیت باربری خاک زیر پی تحت بار زلزله

پژمان فاضلی^۱، سهیل قره^۲

۱- استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد

۲- استادیار دانشگاه پیام نور واحد مشهد

چکیده

ارزیابی ضرایب ظرفیت باربری خاک زیر پی، تحت بار زلزله از گذشته تا به حال همواره مورد توجه محققین مختلف بوده است. در تمامی مطالعات و تحلیل‌های انجام شده، بار زلزله به صورت‌های مختلفی با عملکرد شبه استاتیک در نظر گرفته شده و موجب بدست آمدن نتایج متفاوتی شده است. در این تحقیق، ارزیابی ضرایب ظرفیت باربری خاک تحت بار زلزله، به کمک نرم افزار اجزاء محدود PLAXIS انجام شده و نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده توسط سایر محققین مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است. به علاوه تأثیر اینرسی توده خاک زیر پی بر ضرایب ظرفیت باربری خاک در حالت شبه استاتیک مدل‌سازی عددی گردید، نتایج حاکی از آن است که ضرایب ظرفیت باربری بدست آمده از بار شبه استاتیک در مدل‌سازی عددی تقریبی خوب و مناسب از نتایج ارائه شده توسط سایر محققین می‌باشد. از سویی دیگر با در نظر گرفتن اثر اینرسی توده خاک زیر پی، نتایج ارزیابی ضرایب ظرفیت باربری ناشی از بار شبه استاتیک در مدل‌سازی عددی نسبت به نتایج به دست آمده از سایر محققین محافظه کارانه تر بوده و در تمامی موارد در جهت اطمینان می‌باشد. در نهایت با توجه به این که بار شبه استاتیک به عنوان یک معیار کاملاً ایده‌آل جایگزین مناسبی برای تأثیر بار زلزله نمی‌باشد، اثر توده خاک زیر پی بر چگونگی و نحوه انتقال امواج زلزله تا رسیدن به بستر پی نیز، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی عددی، ظرفیت باربری پی، بار زلزله، بار شبه استاتیک

مقدمه

الف) به منظور در نظر گرفتن تأثیر بارهای سیکلیک زلزله بر روی ظرفیت باربری خاک، نیاز به وجود مدل رفتاری مناسبی می‌باشد که این امر مستلزم انجام آزمایش‌های مختلف در انواع خاک‌ها است [6].

ب) بر مبنای تجربیات و مشاهدات عینی، معمولاً آسیب دیدگی و تخریب‌های سازه‌ای به ندرت به

بررسی تاریخچه ظرفیت باربری خاک زیر پی در شرایط استاتیکی و بدون وجود بار زلزله به چند دهه گذشته و به زمان ترازایی بر می‌گردد و پس از آن نیز به طور گسترده در تحقیقات و تئوری‌های مختلف، این تئوری توسعه یافته است. از جمله دلایلی که منجر به این مسأله گردیده، در ادامه بحث می‌شود:

لازم به ذکر است علاوه بر تحقیقات سال های اخیر در تکمیل این مطالعات می توان به تحقیقات کومار و موهان (۲۰۰۲) اشاره نمود [7].

از جمع بندی روش های تحلیلی ارائه شده از سال ۱۹۵۰ و قبل از آن به این سو می توان کلیه محاسبات را در سه گروه قرار داد. گروه اول محاسباتی نظیر محاسبات مایوهوف و سوکولفسکی که در آن ها اثر زلزله به صورت یک بار افقی وارد بر سازه، پی و بخش روبار در نظر گرفته شده و از اینرسی حاصل از زلزله در توده خاک زیر پی صرف نظر گردیده است. گروه دوم محاسباتی، نظیر سارما و یوسی فلیس (۱۹۹۰) که عملکرد بار مایل در نظر گرفته می شود و در آن ها اثر مولفه افقی زلزله نه تنها بر سازه، پی و بخش روبار منظور شده، بلکه بر بخش های منطقه گسیختگی خاک زیر پی نیز منظور گردیده است. در نهایت گروه سوم محاسباتی که در آن ها مولفه قائم زلزله نیز منظور شده است، نظیر آن چه در محاسبات بودها و آلکارنی (۱۹۹۳) ارائه شده است. هدف در تمام تحلیل های محاسباتی ذکر شده بدست آوردن پارامتر ضرایب ظرفیت باربری N_c ، N_q و N_γ می باشد و با توجه به این که این ضرایب تابعی از زاویه اصطکاک خاک (ϕ) می باشند، نتایج نهایی به صورت نمودارها و جداولی بر حسب زاویه اصطکاک داخلی ارائه می شود. لذا با توجه به مستقل بودن مقادیر N_c و N_q از وزن خاک، مقادیر این دو ضریب دارای اختلاف زیادی نمی باشند، مگر آن که وضعیت سطح گسیختگی تصوری بر اساس روش تحلیل نیروها و یا بخش های مختلف خاک با یکدیگر متفاوت فرض شده باشند، در این شرایط هم اختلاف چشمگیری در نتایج ملاحظه نمی گردد، به علاوه برای

دلیل گسیختگی خاک زیر پی است، این مسأله بیانگر بالا بودن ضریب اطمینان طراحی پی ها با در نظر گرفتن بار زلزله می باشد [4].

ج) به کارگیری شرایط شبه استاتیک برای اعمال بار زلزله، در مهندسی ژئوتکنیک برخلاف مهندسی سازه مستلزم استفاده از فرضیات مختلفی می باشد، که اثبات انطباق این فرضیات با رفتاری واقعی خاک مشهود نمی باشد [4].

لازم به ذکر است ضرایب ظرفیت باربری در حالت بدون زلزله N_c ، N_q و N_γ و با در نظر گرفتن اثر زلزله با پارامترهای N_{ce} ، N_{qe} و $N_{\gamma e}$ معرفی می شوند، که از مقایسه این ضرایب در دو حالت ذکر شده، مقدار کاهش هر ضریب با در نظر گرفتن اثر زلزله نسبت به شرایط بدون زلزله حاصل می شود [4,7].

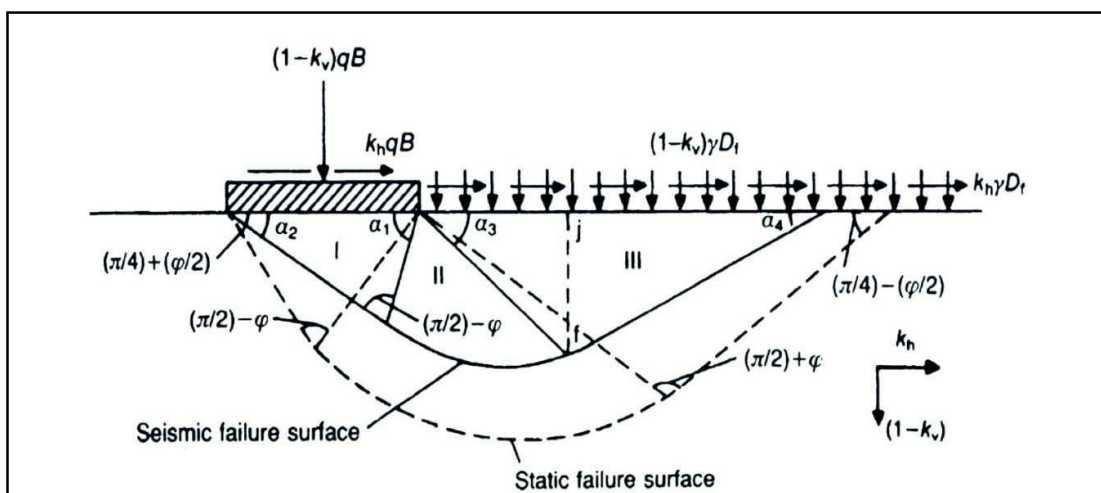
مایوهوف (۱۹۵۳)، سوکولفسکی (۱۹۶۰)، شینهورا و همکاران (۱۹۶۰) به بررسی ظرفیت باربری خاک در برابر بار مایل در شرایطی که مولفه افقی آن به عنوان جایگزینی برای نیروی زلزله منظور شود، پرداختند و در ادامه پراکاش و کومار (۱۹۶۷)، شیخیو و جاکولو (۱۹۷۷) با تحلیل های پیشرفته تر به مطالعات بیشتر در این زمینه پرداختند. همچنین اوکاماتو (۱۹۷۳) کاهش ظرفیت باربری در اثر زلزله را با کاهش زاویه اصطکاک داخلی خاک به اندازه $i = \tan^{-1} k_h$ مدل سازی کرد [4].

در تحقیقات گسترده تر علاوه بر تاثیر بار افقی زلزله بر پی و بر لایه رو بار ($q_0 = \gamma D_f$) تاثیر این بار بر بخش های مختلف خاک زیر پی نیز در نظر گرفته شد که سارما و یوسی فلیس (۱۹۹۰) به بررسی تاثیر مؤلفه افقی زلزله در بخش های مختلف خاک و بودها و آلکارنی (۱۹۹۳) به تاثیر مؤلفه قائم زلزله پرداختند.

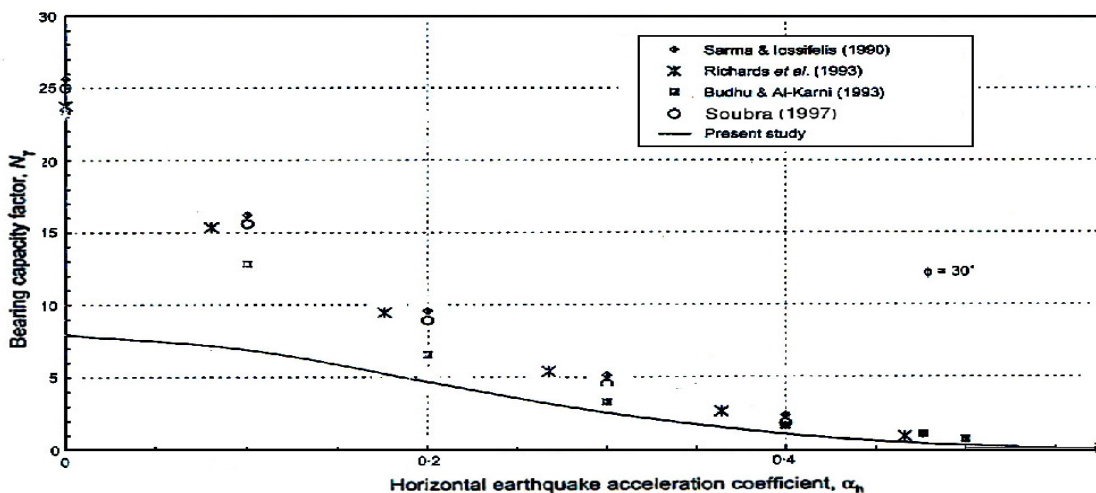
بخش‌های مختلف خاک زیر پی در محدوده گسیختگی در شرایط استاتیکی و لرزه ای نشان داده شده است. در این شکل مقدار و مولفه افقی نیروهای حاصل از زلزله به همراه زوایای داخلی مناطق گسیختگی فرض شده در تئوری بودهو و آلکارنی (۱۹۹۳) دیده می شود. همچنین نمونه ای از نتایج تحلیل ها در نمودار شکل ۲ نشان داده شده است.

N_p متفاوت بودن وضعیت سطح گسیختگی تصویری بر اساس روش تحلیل نیروها منجر به حاصل شدن نتایج مختلف و غیر قابل چشم پوشی این پارامتر می گردد [5].

در مطالعه حاضر دو نوع مقطع تحلیلی برای مکانسیم گسیختگی خاک در نظر گرفته شده است، تا به عنوان معیاری برای مقایسه استفاده گردد. در شکل ۱ مقطع عرضی یک پی نواری به عرض B و وضعیت



شکل ۱- مکانسیم گسیختگی خاک در شرایط استاتیکی و لرزه ای، فرض شده در تئوری بودهو و آلکارنی (۱۹۹۳) [۹]



شکل ۲- نمودار ضریب ظرفیت باربری N_p بر مبنای تغییرات ضریب فشار جانبی K_h برای خاک صرفاً اصطکاکی ($\phi = 30^\circ$) [۱۰].

روش تحقیق

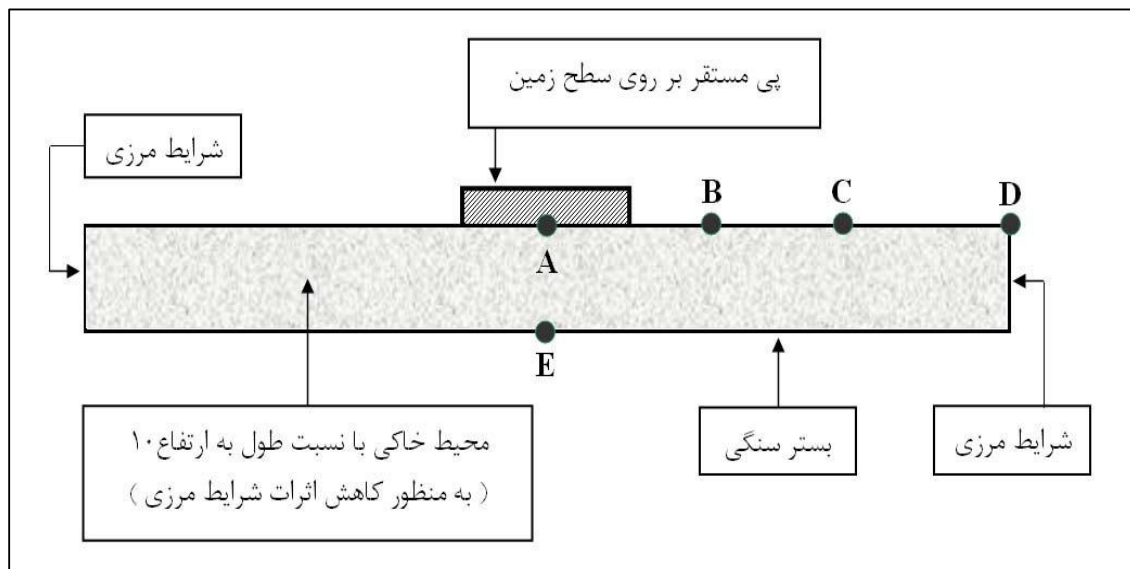
در مطالعه حاضر به منظور محاسبه پارامترهای ظرفیت باربری با استفاده از روش اجزاء محدود و در شرایط لرزه‌ای و شبه استاتیک، بار لرزه‌ای به صورت دینامیک و شبه استاتیک بر مجموعه پی و خاک وارد شده و نتایج حاصل از آن مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. مطالعات عددی با استفاده از نرم افزار PLAXIS و در سه حالت ذیل انجام گردید.

الف) بررسی اثر مولفه افقی نیروی زلزله در قالب بار شبه استاتیکی و تأثیر آن بر کاهش ظرفیت باربری خاک زیر پی.

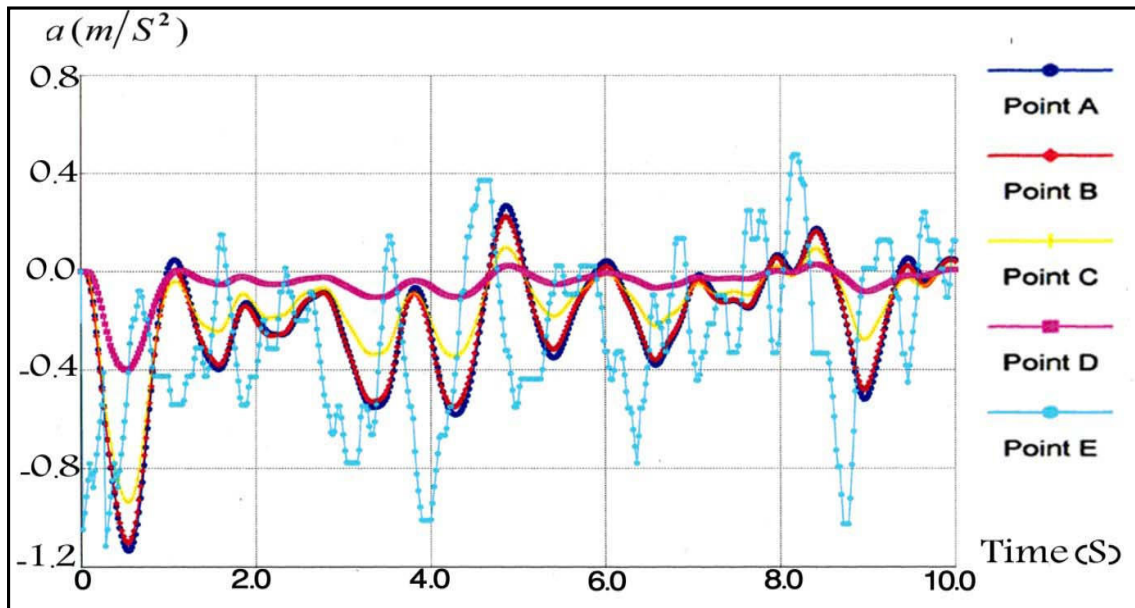
ب) بررسی اثر لایه‌های خاک زیر پی بر روی حرکت امواج زلزله از عمق به سطح و همچنین ارزیابی

تقویت و تضعیف این امواج به واسطه عبور از این لایه.

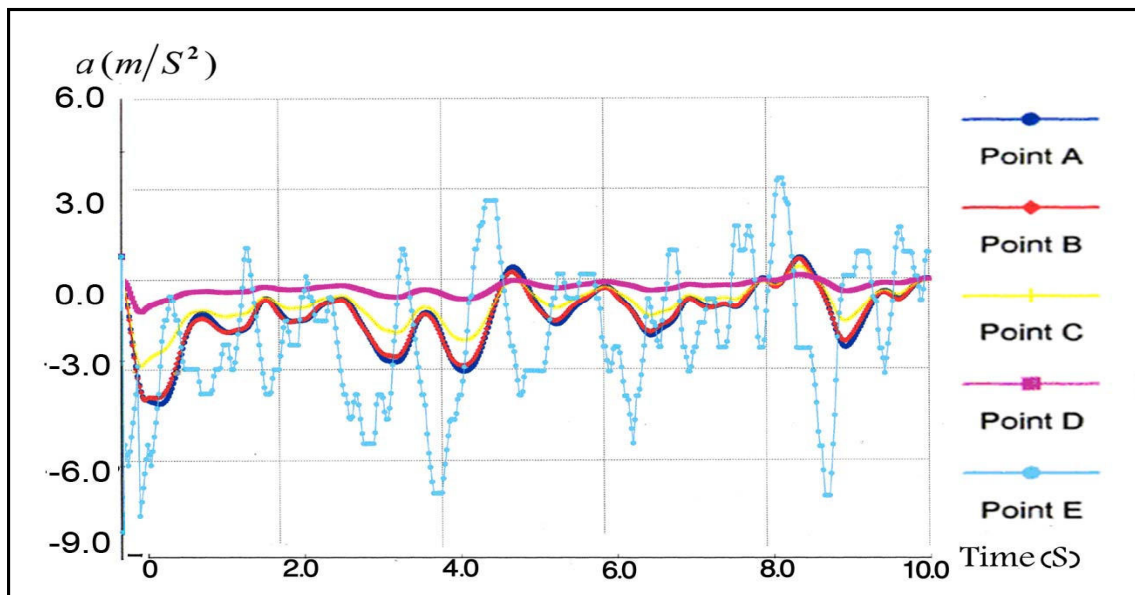
ج) بررسی تأثیر امواج زلزله بر ظرفیت باربری خاک با استفاده از شتابنگاشت، که در این رابطه محاسبات متعددی انجام گرفت که وضعیت نقاطی که نتایج حاصل شده در آنها بررسی گردیده در شکل ۳ و نمونه‌ای از نتایج بدست آمده در اشکال ۴ و ۵ نشان داده شده است. براساس نتایج بدست آمده، تأثیر میزان مقاومت لایه‌های خاکی، شدت امواج زلزله، مدت زمان اعمال زلزله و میرایی بر چگونگی انتقال امواج زلزله از عمق به سطح زمین بررسی شد، میزان تأثیر موج بر ظرفیت باربری خاک زیر پی متفاوت می باشد و کاهش یا تقویت امواج زلزله با توجه به تغییر شرایط موجود تغییر می‌نماید.



شکل ۳- موقعیت نقاطی که در آنها وضعیت امواج زلزله بررسی گردیده است



شکل ۴- نمایش تغییر شدت امواج زلزله از کف محیط خاکی به سطح زمین
(با در نظر گرفتن اثر زلزله، $\phi = 30^\circ$ ، $E = 100 \text{ MPa}$ و $a = 0.7 \text{ g}$)



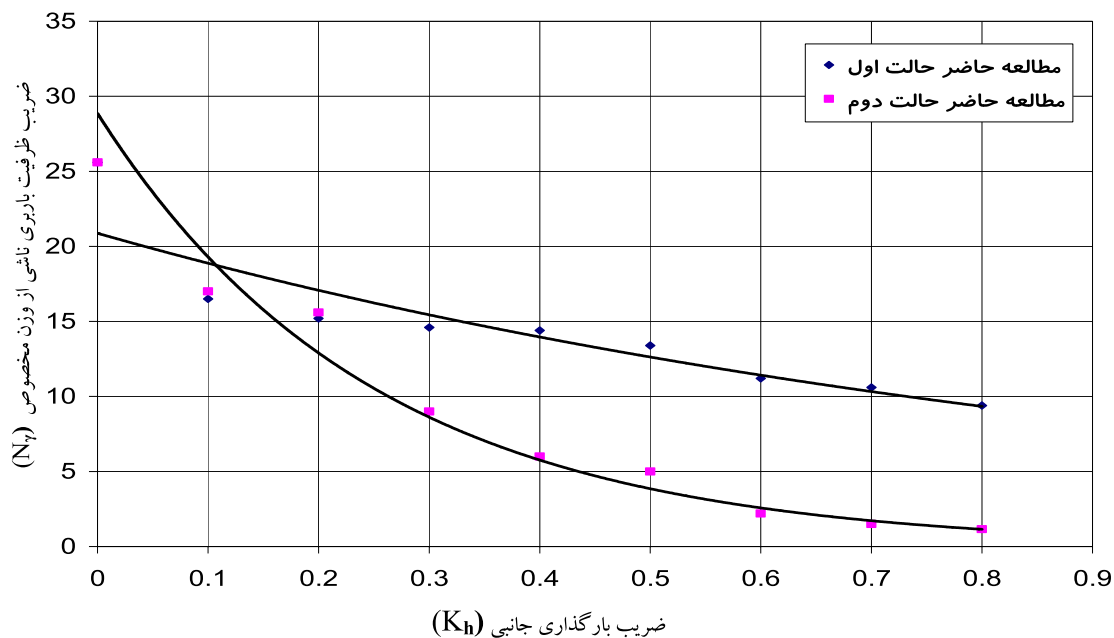
شکل ۵- نمایش تغییر شدت امواج زلزله از کف محیط خاکی به سطح زمین
(با در نظر گرفتن اثر میرایی، $\phi = 30^\circ$ ، $E = 100 \text{ MPa}$ و $a = 0.7 \text{ g}$)

مقدار ظرفیت باربری نهایی، در صورت وقوع زلزله با توجه به کم شدن ظرفیت باربری، امکان رسیدن به

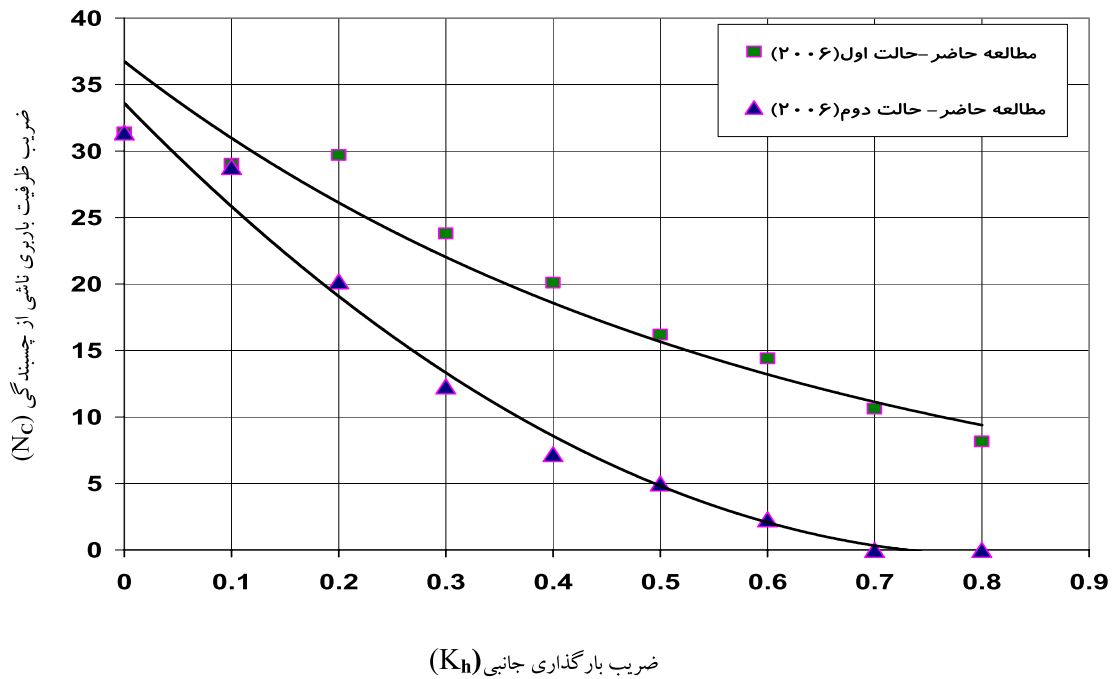
با فرض معلوم بودن ظرفیت باربری پی در شرایط استاتیکی و همچنین کم تر بودن بار وارد بر پی از

شد [۸]. به عبارتی دیگر انتشار امواج زلزله از عمق به سطح بر خاک زیر پی مقدم بر تأثیر زلزله به عنوان یک بار خارجی اعمال شده حاصل از پی بر خاک است و به طور مستقل می تواند در تغییر رفتار خاک زیر پی موثر باشد. در این مقاله برای بررسی تأثیر عملکرد بار افقی $K_h \cdot q$ بر گسیختگی خاک، اثر اینرسی بخشی از خاک زیر پی به صورت $K_h \cdot w$ در محاسبات منظور شده است و با انجام محاسبات متعددی، ترکیب‌های متفاوتی از بار قائم و افقی حاصل از زلزله در شرایط بحرانی (گسیختگی خاک) بدست آمده است. لازم به ذکر است شرایط بحرانی با شتاب‌های انتخابی مختلف مورد بررسی قرار گرفته و نتیجه نهایی آن در مورد ضرایب N_c و N_γ در نمودار اشکال ۶ و ۷ نشان داده شده است.

مرحله گسیختگی محتمل می باشد. از این رو با اعمال بار قائمی کمتر از باربری نهایی پی مثلاً در حدود ۸۰ تا ۹۵ درصد آن بر خاک و سپس اعمال اثر زلزله توسط شتاب نگاشت، خاک به مرحله گسیختگی نرسیده و بنابراین می توان ترکیبی از بار استاتیکی وارد بر خاک و شتاب حداکثر زلزله را که موجب گسیختگی می شود را بدست آورد و در مورد آن مجموعه تحلیل و قضاوت نمود. در این راستا و برای محاسبه ظرفیت باربری خاک در شرایط دینامیکی، محاسبات بسیار متعددی در شرایط مختلف بارگذاری و جنس خاک انجام گرفت که نتایجی را در بر نداشت. برای محاسبه ضرایب ظرفیت باربری خاک در صورت وجود زلزله، تأثیر این بار به صورت نیروی افقی شبه استاتیک $K_h \cdot q$ به همراه مؤلفه قائم زلزله واقع بر روی پی به صورت $(1-K_v \cdot q)$ اثر داده



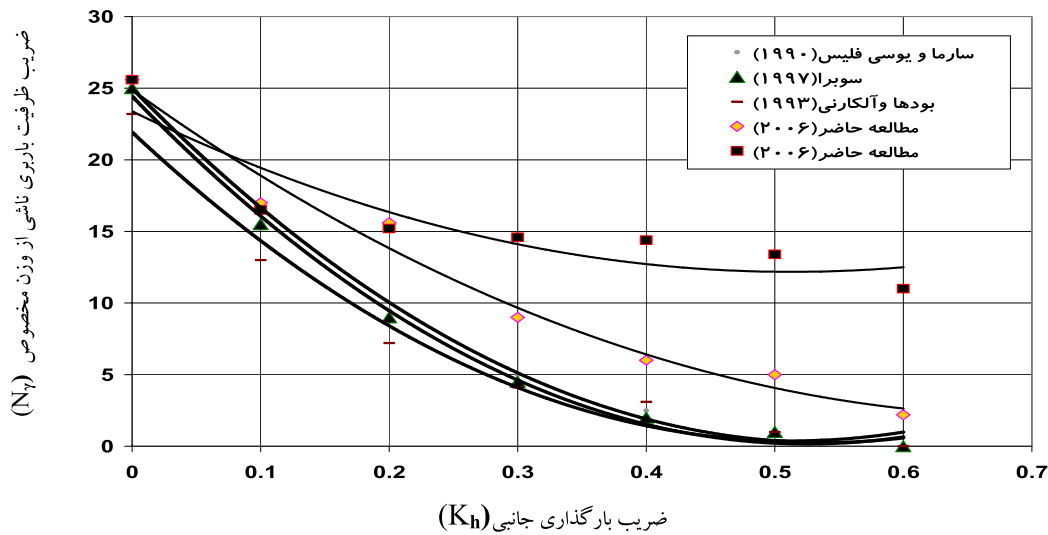
شکل ۶- تغییرات ظرفیت باربری ناشی از وزن مخصوص (N_γ) - ضریب بارگذاری جانبی (K_h) برای خاک با $c = 0$ و $\phi = 30^\circ$ (حالت اول: با در نظر گرفتن اینرسی توده خاک و حالت دوم: بدون در نظر گرفتن اینرسی توده خاک)



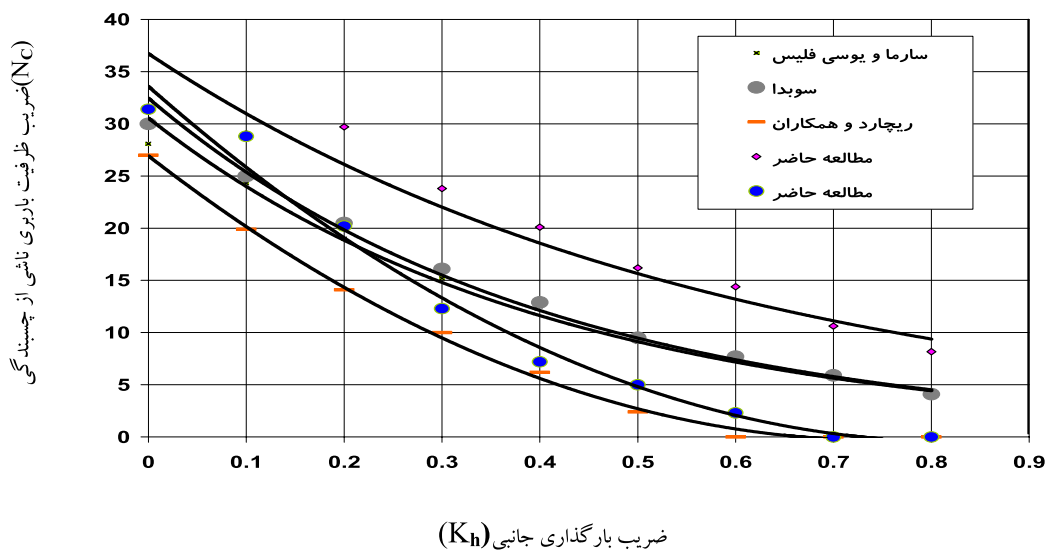
شکل ۷- تغییرات ظرفیت باربری ناشی از چسبندگی (N_c) - ضریب بارگذاری جانبی (K_h) برای خاک با $c = 50\text{KPa}$ و $\phi = 30^\circ$ (حالت اول: با در نظر گرفتن اینرسی توده خاک و حالت دوم: بدون در نظر گرفتن اینرسی توده خاک)

مقایسه نتایج حاصل با نتایج سایر پژوهشگران اشکال ۸ و ۹ ارائه گردیده است. در این اشکال، هر دو مقادیر بدست آمده برای ضرایب ظرفیت باربری N_c و N_γ در این مطالعه با در نظر گرفتن اثر اینرسی توده خاک زیر پی و بدون در نظر گرفتن آن با مقادیر بدست آمده از سایر پژوهشگران مورد مقایسه قرار گرفته است [۱، ۲ و ۳].

همان طور که در شکل های ۶ و ۷ مشاهده می گردد در حالت اول و با در نظر گرفتن اثر اینرسی توده خاک، در صورتی که نیروی افقی در محل بار قائم روی پی تأثیر داده شود منحنی تغییرات N_c و N_γ بر حسب ضریب K_h نسبت به حالتی که نیروی افقی زیر بخش خاک زیر پی اثر می کند به طور محسوسی پایین تر قرار می گیرد و در واقع آهنگ کاهش ظرفیت باربری در اثر زلزله محسوس تر می باشد. به منظور



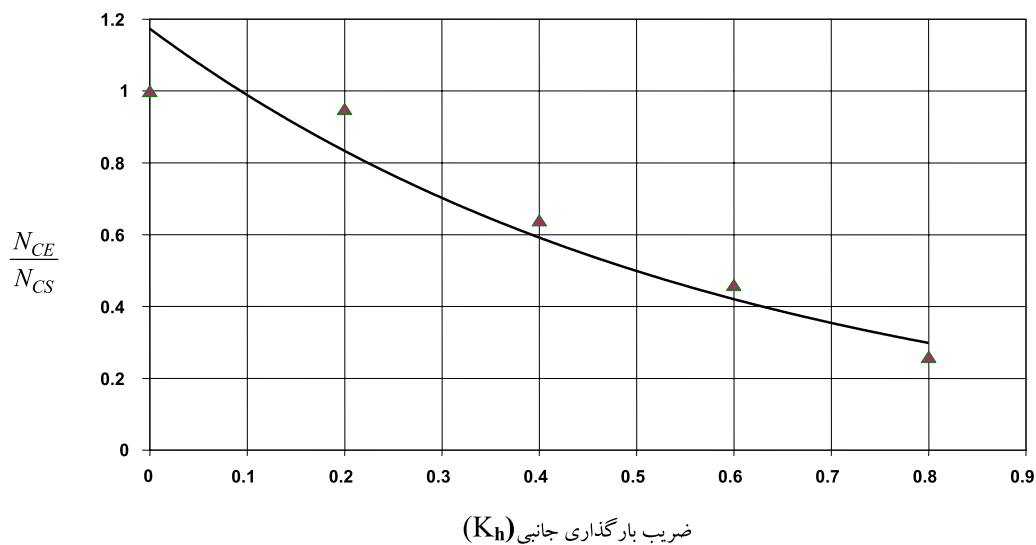
شکل ۸- مقایسه تغییرات ظرفیت باربری ناشی از وزن مخصوص (N_p) - ضریب بارگذاری جانبی (K_h) بدست آمده از مطالعه حاضر و نتایج سایر پژوهشگران (برای خاک با $c = 0$ و $\phi = 30^\circ$)



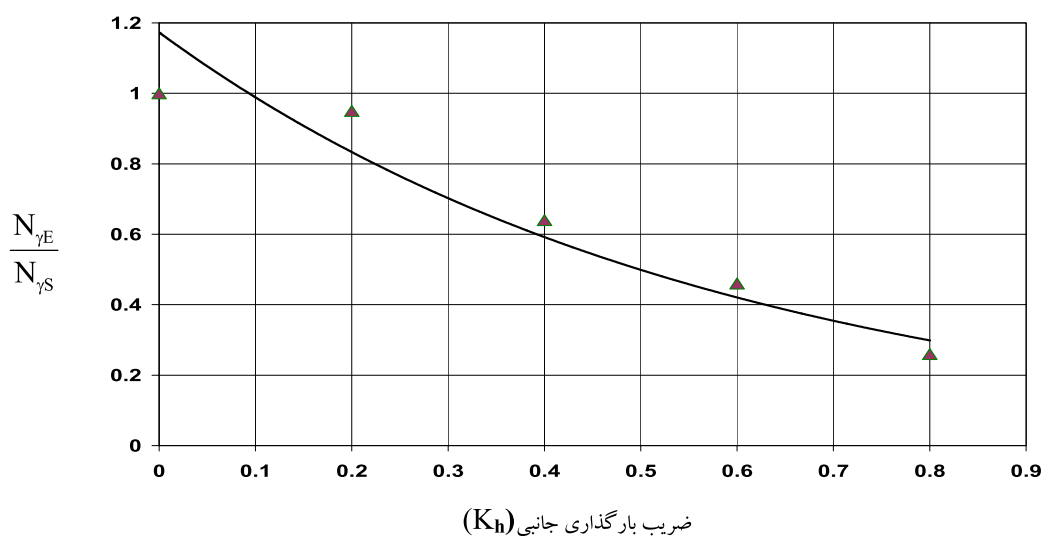
شکل ۹- مقایسه تغییرات ظرفیت باربری ناشی از چسبندگی (N_c) - ضریب بارگذاری جانبی (K_h) بدست آمده از مطالعه حاضر و نتایج سایر پژوهشگران (برای خاک با $c = 50\text{KPa}$ و $\phi = 30^\circ$)

به حالت استاتیکی در شرایطی که اینرسی توده خاک زیر پی در نظر گرفته شده، نشان داده شده است.

همچنین در شکل های ۱۰ و ۱۱ مقادیر نسبت ضریب ظرفیت باربری N_p و N_c در حالت شبه استاتیک



شکل ۱۰- مقادیر نسبت ضریب ظرفیت باربری N_e در حالت شبه استاتیک به حالت استاتیکی $(\frac{N_{CE}}{N_{CS}})$ ضریب بارگذاری جانبی (K_h)



شکل ۱۱- مقادیر نسبت ضریب ظرفیت باربری N_γ در حالت شبه استاتیک به حالت استاتیکی $(\frac{N_{\gamma E}}{N_{\gamma S}})$ ضریب بارگذاری جانبی (K_h)

نتیجه گیری

۲- نرم افزار اجزاء محدود PLAXIS توانایی برآورد ظرفیت باربری و پارامترهای آن را در شرایط شبه استاتیک دارد و قادر به در نظر گرفتن اثر اینرسی توده خاک زیر پی در برآورد ظرفیت باربری می باشد.

۱- نرم افزار اجزاء محدود PLAXIS متناسب با شرایط واقعی زمین اثر جنس لایه، میزان شتاب، میرایی و تقویت و تضعیف امواج زلزله از کف به سطح توده خاک زیر پی را مدل سازی می نماید.

خاک در زمان اعمال زلزله، افزایش آنی فشار آب منفذی در صورت وجود آب و تغییر پارامترهای مقاومتی خاک (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) در حین اعمال زلزله را به خوبی نشان دهد.

۳- آهنگ کاهش ظرفیت باربری به علت تأثیر زلزله، چنانچه اینرسی توده خاک زیر پی در نظر گرفته شود کم تر از حالتی است که کاهش ظرفیت باربری بدون تأثیر اینرسی توده خاک بررسی می شود.

۴- مدل سازی لرزه‌ای ظرفیت باربری خاک توسط بار شبه استاتیک نمی تواند تأثیر پارامترهایی مانند تراکم

Reference

- 1-Bolton MD, Lau CK (1993); Vertical bearing capacity factors for circular and strip footing on Mohr-Coulomb soil. Can Geotech Journal 30: 1024-33.
- 2-Budhu M, AL-Karni A. (1993); Seismic bearing capacity of soils geotechnique 43(1):181-187.
- 3-Dormieux, Land specker A. (1998); Seismic bearing capacity of Foundation on cohesion less soil, Journal of Geotechnical Engineering 121(3): 300-303.
- 4-Knappcu J.A, Haigh S.K, Madabhushi S.Y.G.(2006); Mechanism of failure for shallow footing under earthquake loading, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 26: 91-102.
- 5-Kumar J, Mohanrao V.B.K. (2002); Seismic bearing capacity factors for spread foundations, Geotechnique 52(2): 202-209.
- 6-Merlos J, Romo MP.(2006); Fluctuant bearing capacity of shallow foundation during earthquake, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 26: 103-114.
- 7-Paolucci R, Pecker A. (1997); Seismic bearing capacity of shallow strip footing on dry soils, Soils Found 37(3): 68-79.
- 8-Richards R, Elms DG, Budhu M.(1993); Seismic bearing capacity and settlement of foundations, ASCE Journal Geotech. Eng 119(4): 66274.
- 9-Sarma S.K, Isossifelis I.S.(2002); Seismic bearing capacity factors of shallow strip footing, Geotechnique 40(2): 265-273.
- 10-Soubra A-H,(1999); Upper-bound solutions for bearing capacity of foundations, ASCE J. Geotech. Geoenviron. Eng 125(1): 59-66.