



تحلیل عددی پاسخ شمعهای تحت بارگذاری جانبی در خاکهای با رفتار الاستو-پلاستیک

برقیان مجید^۱، ابراهیمی بهنام مرتضی^۲

۱- استادیار گروه سازه دانشکده عمران دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه دانشکده عمران دانشگاه تبریز

barghian@tabrizu.ac.ir

خلاصه

علاوه بر تحمل نیروی محوری، شمع قادر به مقاومت در برابر بار جانبی نیز می‌باشد. شمعهای دارای بارگذاری جانبی در بعضی سازه‌ها نظیر سازه‌های ساحلی و نیز پلهای یکپارچه وجود دارند. تحت اثر بار جانبی شمع دچار تغییر شکل جانبی شده و این امر سبب اعمال نیروهای فشاری از طرف خاک احاطه کننده به شمع خواهد شد. یکی از روشهای تخمین این نیروها که به طور گسترده توسط مهندسين به کار می‌رود روش منحنی-های P-Y است. این منحنی‌ها تجربی بوده و با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی حاصل می‌گردد. در این مقاله ابتدا با استفاده از روش اجزاء محدود، شمعهای منفرد تحت بارگذاری جانبی و کوبیده شده در خاکهای رسی، ماسه‌ای، رسی با لایه ماسه‌ای و خاک ماسه‌ای با لایه رسی مورد تحلیل قرار گرفت و اثرات لایه‌های مختلف بررسی گردید؛ سپس نتایج بدست آمده از روش اجزاء محدود برای ایجاد منحنی‌های P-Y به کار گرفته شد و در نهایت این منحنی‌ها با منحنی‌های بدست آمده از روشهای تجربی مقایسه گردید.

کلمات کلیدی: رفتار الاستو-پلاستیک، منحنی‌های P-Y، روش اجزاء محدود.

3.5 cm

مقدمه

روش منحنی‌های P-Y که توسط Reese و همکارانش [۱] ارائه گردیده است، بطور گسترده در طراحی شمعهای در معرض بارگذاری جانبی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش بر پایه تئوری ارائه شده توسط Winkler، اندرکنش جانبی خاک-شمع را با فنرهای غیر خطی که سختی آنها بصورت تجربی حاصل شده است، مدل می‌کند. پیشرفت تکنولوژی در زمینه کامپیوتر باعث شده است که این مسئله با بکار بردن روش اجزاء محدود مطالعه گردد. با این وجود در مطالعه این روش به شیوه اجزاء محدود هنوز کارهای چندانی صورت نگرفته است. Desai و Maqtadir [۲] گروه شمعها را با استفاده از مدل ۳ بعدی و در نظر گرفتن رفتار غیر خطی خاک بررسی نمودند. همچنین Poulos و Pressley [۳] از مدلی متقارن با رفتار الاستو-پلاستیک کامل خاک استفاده کردند. Kimura و همکارانش [۴] و نیز Wakai و همکاران وی [۵] تعدادی از مدلهای آزمایشگاهی با گروه شمعهای دارای تکیه‌گاه گیرداری و یا آزاد در سر شمع را ایجاد نمودند. سپس همین گروه شمعها را بصورت ۳ بعدی و در نرم افزار مدلسازی کردند. در این مدلسازی از رفتار الاستو-پلاستیک مصالح استفاده گردید. رابطه خوبی بین نتایج آزمایشگاهی و تحلیل اجزاء محدود از این مطالعات مشاهده گردید. همه این نتایج نشان می‌دهد که روش اجزاء محدود نموده‌های لازم برای مسائل غیر خطی را داراست. البته این نکته قابل ذکر است که هنوز در شمعهای دارای بارگذاری جانبی و در خاکهای لایه‌ای مطالعات به روش اجزاء محدود گزارش نشده است. علاوه بر این مطالعات بسیار محدودی روی اثرات خاکهای لایه‌ای بر روی منحنی‌های P-Y وجود دارد. در این مقاله ۴ مدل دو بعدی از شمعهای دارای بارگذاری جانبی و کوبیده شده در خاکهای لایه‌ای به روش اجزاء محدود ایجاد گردید. برای مدلسازی و تحلیل از نرم افزار Opensees [۶] استفاده شد. همچنین برای بدست آوردن لنگرهای خمشی مقاطع شمعها از انتگرال گیری تنشهای حاصل شده از روش اجزاء محدود استفاده گردید و سپس برای محاسبه و ترسیم دیاگرامهای نیروی برشی و فشار جانبی خاک روی شمع توسط روش مشتقات عددی از دیاگرام لنگر خمشی به ترتیب یک و دو بار مشتق گیری به عمل آمد. در نهایت منحنی‌های P-Y ایجاد و با منحنی‌های P-Y حاصل شده از روشهای تجربی مقایسه گردید.

^۱ استادیار گروه سازه

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد سازه

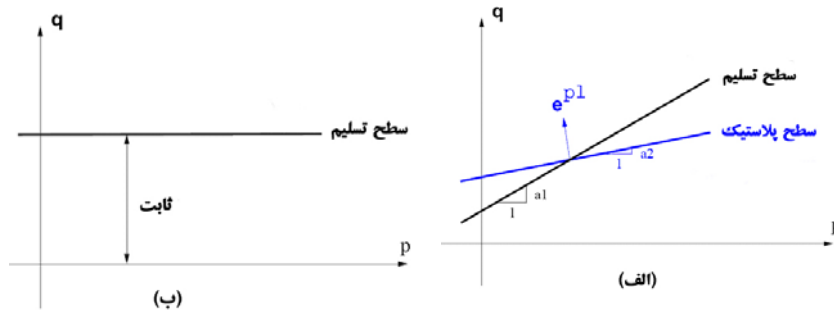
فرضیات و متغیرهای مورد استفاده در مدل

برای مدلسازی رفتار خاک در نرم افزار از دو مدل ساده استفاده گردید. از آنجاییکه مقاومت نهایی خاک رس تنها توسط مقاومت برشی زهکشی نشده آن تعیین می‌گردد؛ بنابراین برای مدلسازی آن از مدل فون میسز استفاده گردید. همچنین برای مدلسازی خاک ماسه‌ای نیز مدل Drucker-Prager بکار گرفته شد. شکل ۱ سطوح تسلیم در هر دو مدل را نشان می‌دهد. در هر دو مدل، مدول یانگ نسبت به تنشهای محبوس بصورت معادله (۱) تغییر می‌کند.

$$E = E_o \left(\frac{P}{P_a} \right)^a \quad (1)$$

که در آن E_o : مدول یانگ در فشار اتمسفر، P : متوسط تنشهای مؤثر قائم اصلی، P_a : فشار اتمسفر و a : ثابتی است برای نسبت تخلخل مشخص که در این مقاله برابر ۰/۵ در نظر گرفته شده است.

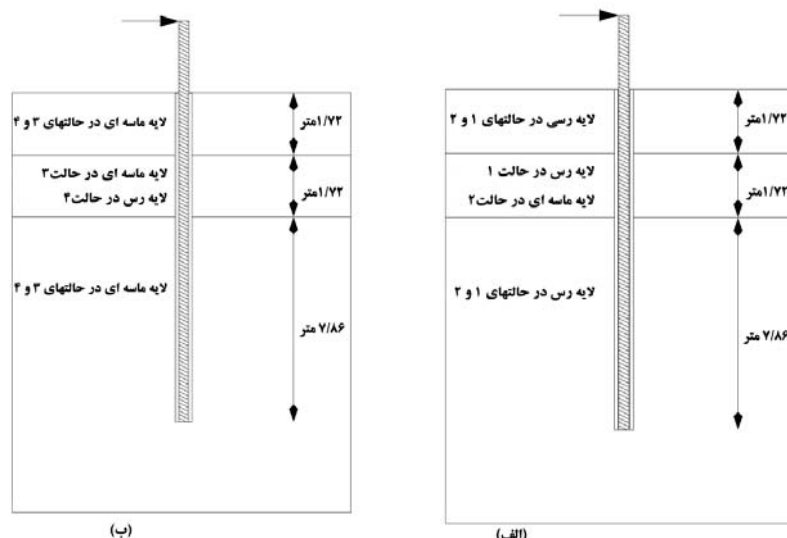
برای مدلسازی خاک ماسه‌ای $\phi = 37^\circ$ ، مدول برشی در عمق ۱۳/۷ متر برابر 8960 kPa ($E_o = 17400 \text{ kPa}$)، ضریب پواسون برابر ۰/۳۵، وزن مخصوص مساوی $\gamma = 14.5 \text{ kN/m}^3$ استفاده گردید. مقاومت برشی زهکشی نشده، مدول یانگ، ضریب پواسون و وزن مخصوص خاک رس به ترتیب برابر 21.7 kPa ، 11000 kPa ، 0.45 و 13.7 kN/m^3 انتخاب شد.



شکل ۱-ب- مدل فون میسز برای مدلسازی خاک رسی [۶]

شکل ۱-الف- مدل Drucker-Prager برای مدلسازی خاک ماسه‌ای [۶]

برای انجام تحلیل بار افزون استاتیکی (pushover) چهار مدل در نرم افزار ایجاد گردید که دو مدل شامل شمع کوبیده شده در خاکهای رسی و ماسه-ای یکنواخت و دو مدل دیگر شامل شمع کوبیده شده در خاکهای لایه‌ای می‌باشد. بنابراین در این مقاله چهار حالت مورد مطالعه قرار گرفت. حالت اول مربوط به خاک رسی نرم یکنواخت، حالت دوم شامل خاک لایه‌ای که لایه‌های بالا و پایین خاک رسی نرم و لایه میانی خاک ماسه‌ای با چگالی متوسط می‌باشد. حالت سوم مربوط به خاک ماسه‌ای یکنواخت با چگالی متوسط و حالت چهارم شامل خاک لایه‌ای که لایه‌های بالا و پایین ماسه‌ای و لایه میانی خاک رس می‌باشد. شکل ۲ جزئیات مربوط به چهار حالت را نشان می‌دهد.

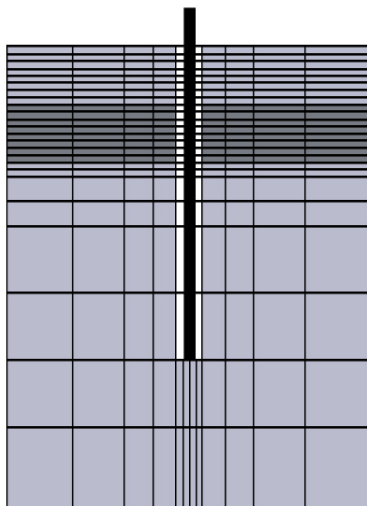


شکل ۲-ب- جزئیات لایه‌های بکار رفته در حالت‌های ۲ و ۳

شکل ۲-الف- جزئیات لایه‌های بکار رفته در حالت‌های ۱ و ۲



شکل ۳ نحوه مش بندی برای انجام تحلیل بارافزون استاتیکی را نشان می‌دهد. با توجه به تغییر شکل زیاد خاک در قسمتهای فوقانی نزدیک به سر شمع فواصل مش بندی کوچک انتخاب گردید و رفته رفته این فواصل بزرگتر گردید. در مدل عرض شمع فولادی برابر با ۴۰ سانتی متر انتخاب گردید. همچنین همه المانهای بین سطوح بوسیله مدل Drucker-Prager با زاویه اصطکاک ۲۵ درجه مدلسازی گردیدند.



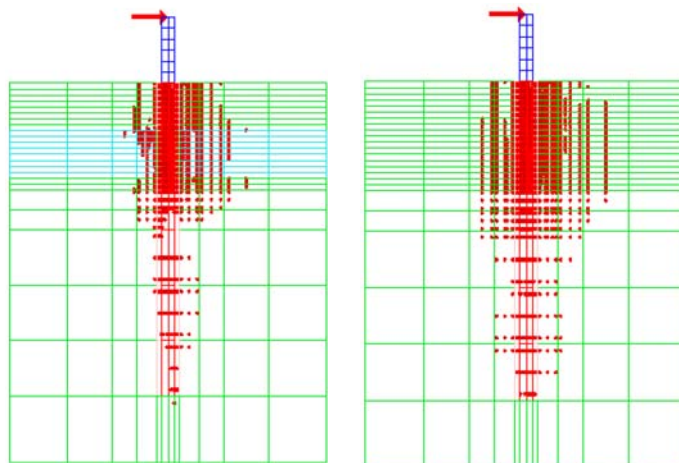
شکل ۳- نحوه مش بندی لایه خاک در مدلسازی به روش اجزاء محدود

نتایج تحلیل بارافزون

- گسترش نواحی پلاستیک

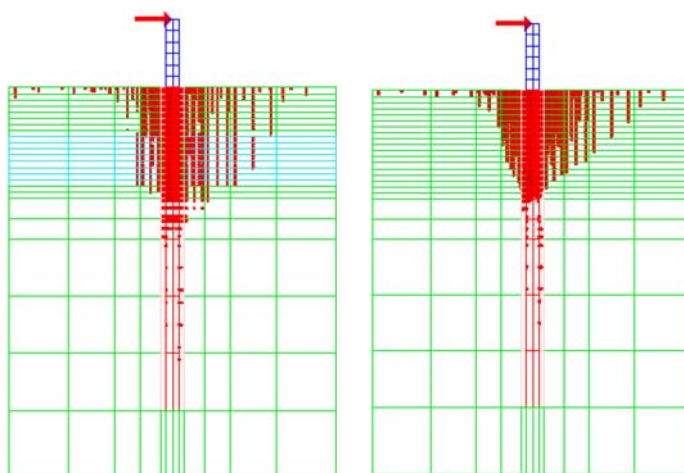
بار پوش اور در قسمت سر شمع اعمال و تحلیل بارافزون انجام گرفت. در انجام تحلیل بارافزون مد بکار رفته برای توقف تحلیلها کنترل نیرو بود. در شکل‌های ۴ و ۵ گسترش نواحی پلاستیک در چهار حالت نشان داده شده است. شکل ۴-الف گسترش ناحیه پلاستیک را در حالت خاک رس یکنواخت نشان می‌دهد. نکته قابل توجه این است که ناحیه پلاستیک تا قسمتهای عمیق تر از سر شمع وجود دارد ولی به هر حال در جهت‌های افقی چندان از شمع دور نمی‌باشد. علاوه بر این قسمت فشاری (طرف راست) دارای ناحیه پلاستیک بزرگتری نسبت به قسمت کششی (طرف چپ) است. شکل ۴-ب نیز گسترش ناحیه پلاستیک را در خاک رس دارای لایه ماسه‌ای نشان می‌دهد. مقایسه این حالت با حالت خاک رسی یکنواخت نشان می‌دهد که ناحیه پلاستیک نمی‌تواند به اندازه حالت رسی یکنواخت گسترش یابد؛ زیرا در این حالت وجود لایه ماسه‌ای باعث سخت تر شدن خاک و در نتیجه جابجایی-های کوچکتر شمع می‌گردد.

شکل‌های ۵-الف و ۵-ب گسترش ناحیه پلاستیک را به ترتیب در خاک ماسه‌ای یکنواخت و خاک ماسه‌ای دارای لایه رسی نشان می‌دهد. جالب است توجه داشته باشیم که گسترش ناحیه پلاستیک شبیه به مکانیزم گسیختگی حالت‌های active و passive به طرف سطح خاک گسترش می‌یابد و تفاوت بین زاویه گسیختگی برابر $\frac{\pi}{2}$ می‌باشد. مطابق شکل ۵-ب در حالت خاک ماسه‌ای دارای لایه رسی ناحیه پلاستیک عمیق تر است ولی به اندازه حالت خاک ماسه‌ای یکنواخت نیست.



شکل ۴-ب- گسترش ناحیه پلاستیک
در حالت ۲ تحت بار 400 kN

شکل ۴-الف- گسترش ناحیه پلاستیک
در حالت ۱ تحت بار 400 kN

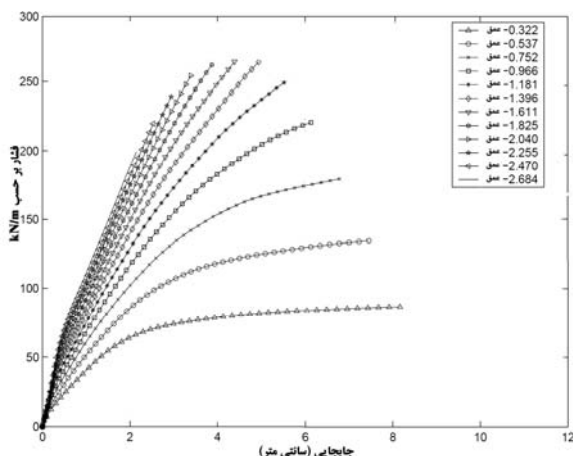


شکل ۵-ب- گسترش ناحیه پلاستیک
در حالت ۴ تحت بار 400 kN

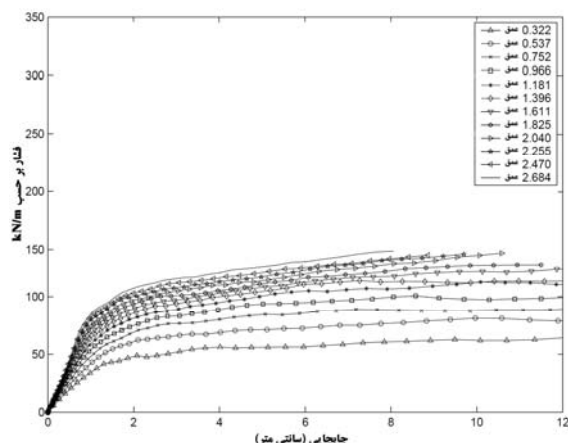
شکل ۵-الف- گسترش ناحیه پلاستیک
در حالت ۳ تحت بار 400 kN

- منحنی‌های P-Y

نتایج حاصله از تحلیل بارافزون استاتیکی برای ایجاد منحنی‌های P-Y بکار گرفته شد. این منحنی‌ها با استفاده از فشارهای محاسبه شده (P) و جابجایی‌های بدست آمده در عمق‌های مختلف خاک ایجاد گردید. شکل ۶ منحنی‌های ایجاد شده برای شمع کوبیده شده در خاک رس یکنواخت را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، بیشتر قسمت‌های خاک رس (حداقل تا عمق ۲/۶ متری) به مقاومت نهایی رسیده‌اند. شکل ۷ نیز این منحنی‌ها را برای خاک ماسه‌ای یکنواخت نشان می‌دهد. نکته جالب توجه در این حالت این است که فقط لایه بالایی خاک ماسه‌ای در عمقی به اندازه ۰/۳ متر به مقاومت فشاری نهایی خود رسیده است. همچنین جابجایی‌ها در حالت خاک ماسه‌ای یکنواخت بسیار کوچکتر از حالت مربوط به خاک رسی یکنواخت است (تقریباً نصف حالت مربوط به خاک رسی).

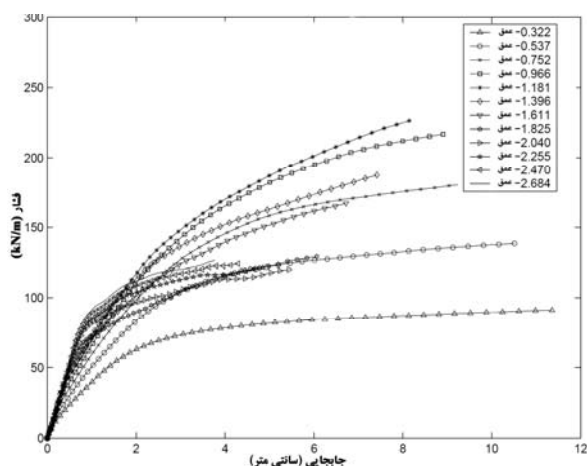


شکل ۷- منحنی P-Y برای خاک ماسه‌ای یکنواخت

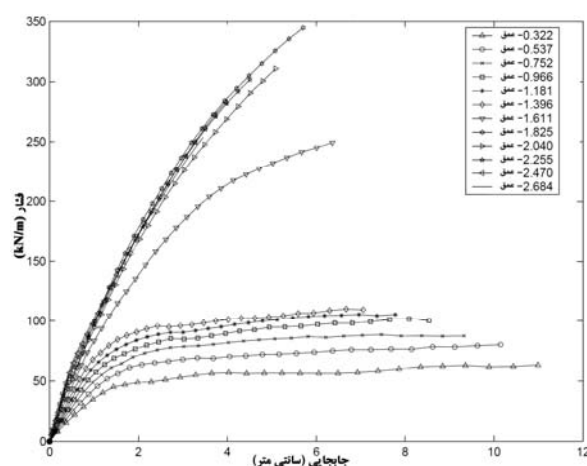


شکل ۶- منحنی P-Y برای خاک رسی یکنواخت

در شکل ۸ منحنی‌های P-Y تولید شده برای خاک رسی دارای لایه ماسه‌ای نشان داده شده است. این منحنی‌ها فقط برای لایه بالایی خاک رس و لایه میانی خاک ماسه‌ای تا عمق ۲/۷ متر ایجاد گردیده‌اند. با توجه به این منحنی‌ها، سخت‌شدگی بزرگی در خاک رس نزدیک به لایه ماسه‌ای (عمق ۱/۶۱ متر) دیده می‌شود که در حالت خاک رس یکنواخت (شکل ۶) وجود ندارد. همچنین افزایش در فشار خاک اعمالی از طرف خاک به شمع در جابجایی ۶ سانتی متر بیشتر از ۲ برابر حالت خاک رس دارای لایه ماسه‌ای است. در نهایت منحنی‌های P-Y برای خاک ماسه‌ای دارای لایه رسی در شکل ۹ نشان داده شده است. این منحنی‌ها تا عمق کوچکی از خاک رسی رسم شده است که مشابه با حالت خاک ماسه‌ای یکنواخت است. با مقایسه این منحنی‌ها با حالت خاک ماسه‌ای یکنواخت تفاوت قابل توجهی مشاهده می‌گردد. برای مثال منحنی P-Y در حالت خاک ماسه‌ای یکنواخت در عمق ۱/۶۱ متری و در جابجایی ۰.۰۴۲ m دارای فشاری به اندازه $P = 265 \text{ kN/m}$ می‌باشد؛ در حالیکه در خاک ماسه‌ای دارای لایه رسی در همان جابجایی دارای فشاری برابر با $P = 140 \text{ kN/m}$ می‌باشد. همچنین نمونه‌های مشابه دیگری در سطح تماس رس و ماسه دیده می‌شود.



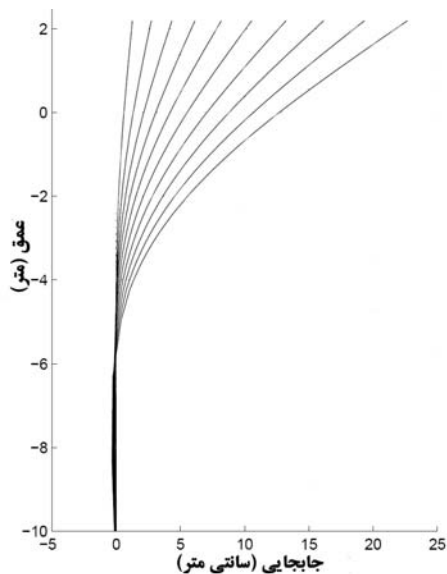
شکل ۹- منحنی P-Y برای خاک ماسه‌ای دارای لایه رسی



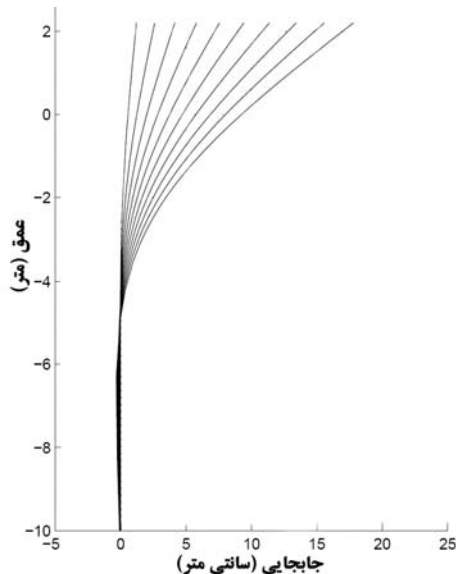
شکل ۸- منحنی P-Y برای خاک رسی دارای لایه ماسه‌ای

مقایسه جابجایی‌های شمع در خاکهای یکنواخت و لایه لایه

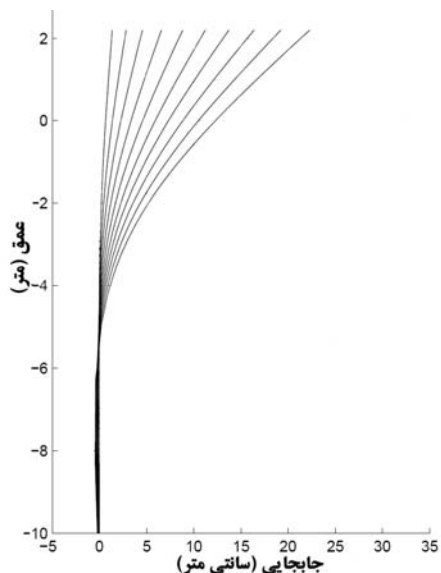
شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب توزیع جابجایی را برای حالت ماسه‌ای یکنواخت و خاک ماسه‌ای دارای لایه رسی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل‌ها مشاهده می‌شود که وجود لایه رسی باعث افزایش جابجایی سر شمع از 0.17 m به 0.22 m شده است. همچنین نقطه عطف (یعنی نقطه‌ای که جابجایی صفر شده و سپس تغییر علامت داده است) به طرف پایین حرکت کرده است. شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب نیز توزیع جابجایی را به ترتیب برای خاک رسی یکنواخت و خاک رسی دارای لایه ماسه‌ای نشان می‌دهد. در این حالت وجود لایه ماسه‌ای باعث افزایش سختی خاک و در نتیجه کاهش جابجایی نسبت به حالت رسی یکنواخت شده است.



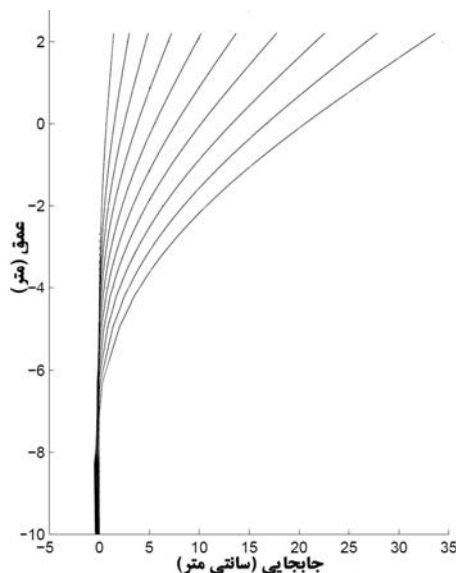
شکل ۱۰-ب- جابجایی شمع در خاک ماسه‌ای دارای لایه رسی



شکل ۱۰-الف- جابجایی شمع در خاک ماسه‌ای یکنواخت



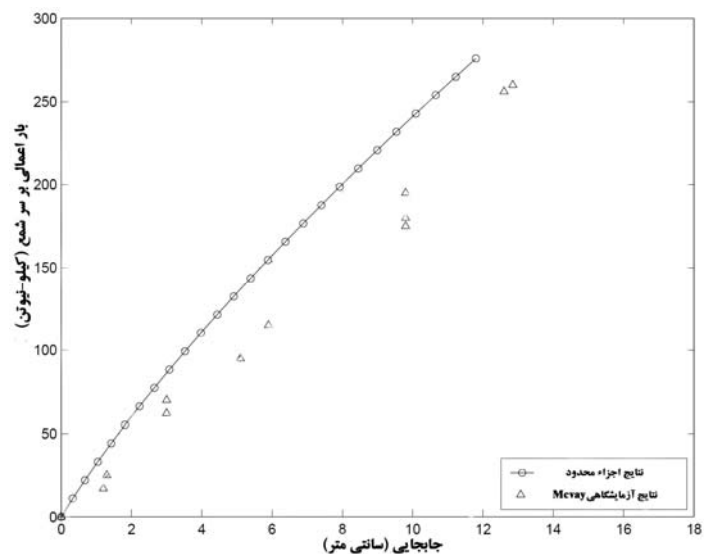
شکل ۱۱-ب- جابجایی شمع در خاک رسی دارای لایه ماسه‌ای



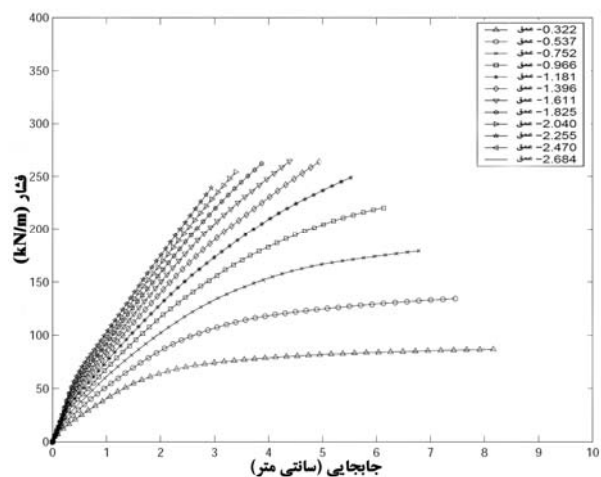
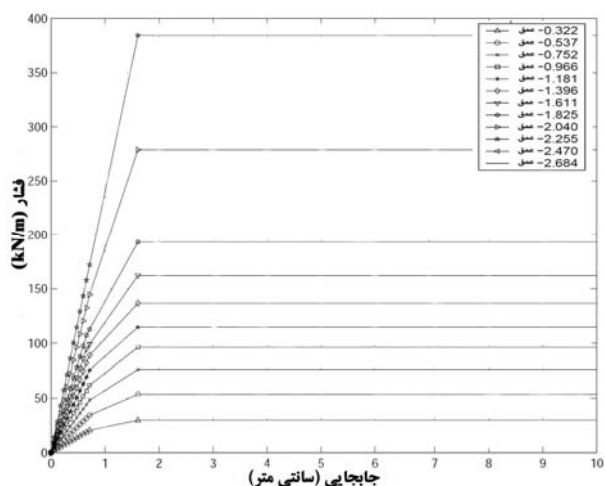
شکل ۱۱-الف- جابجایی شمع در خاک رسی یکنواخت

- مقایسه روش اجزاء محدود با نتایج تجربی و آزمایشگاهی

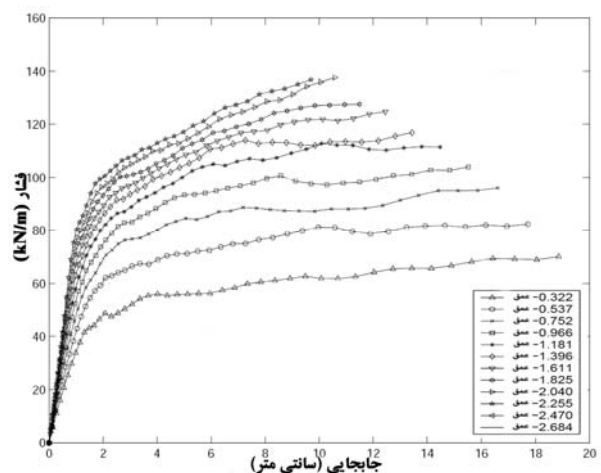
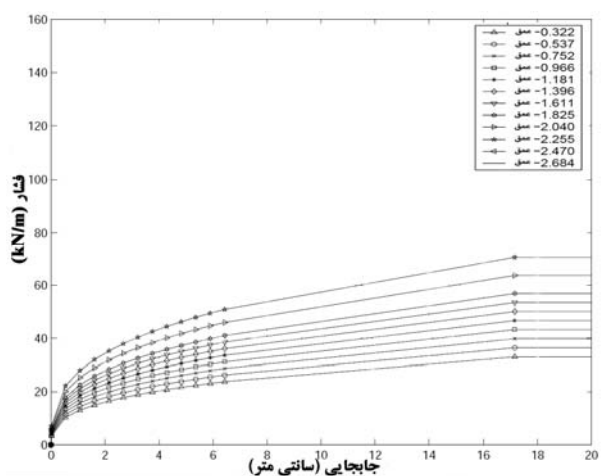
در شکل ۱۲ جابجایی سر شمع بدست آمده از نتایج اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی حاصل از کار Mcvay [۷] و همکارانش برای خاک ماسه‌ای یکنواخت مقایسه گردیده است. با توجه به این شکل اختلاف جزئی بوده و توافق قابل قبولی بین نتایج وجود دارد. همچنین در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ نیز به ترتیب منحنی‌های P-Y با استفاده از روش ارائه شده توسط Reese [۱] و نیز نتایج اجزاء محدود برای خاک ماسه‌ای و رسی یکنواخت رسم شده است. با مقایسه این نمودارها مشاهده می‌گردد که در خاک ماسه‌ای روش ارائه شده توسط Reese [۱] مقاومت کمتری را در عمق‌های نزدیک به سطح زمین نشان می‌دهد؛ در حالیکه در خاک رسی این کاهش مقاومت در عمق‌های پایین تر قابل مشاهده است.



شکل ۱۲- جایجایی سر شمع حاصل شده از نتایج اجزاء محدود و نتایج آزمایشگاهی حاصل از کار Mecvay



شکل ۱۳- منحنی P-Y حاصل از الف) روش اجزاء محدود ب) روش تجربی برای خاک ماسه‌ای با مشخصات $\Phi=37^\circ$ و $\eta_k=8970 \text{ kN/m}^3$



شکل ۱۴- منحنی P-Y حاصل از الف) روش اجزاء محدود ب) روش تجربی برای خاک رسی با مشخصات $C_u=20 \text{ kPa}$ و $\epsilon_{50}=0.02$



نتیجه گیری

در این مقاله رفتار شمعهای کوبیده شده در خاکهای با رفتار الاستو-پلاستیک به روش اجزاء محدود مورد مطالعه قرار گرفت. این تحلیلها در چهار نوع خاک شامل رس یکنواخت، ماسه یکنواخت، خاک رس دارای لایه ماسه‌ای و خاک ماسه‌ای دارای لایه رسی انجام گرفت. نتایج بدست آمده از تحلیلها نشان می‌دهد که استفاده از روش اجزاء محدود و مدل خیلی ساده الاستو-پلاستیک برای رفتار خاک با دقت زیاد قادر به تخمین جابجایی سر شمع می‌باشد. مهمترین یافته‌های این مطالعه عددی بصورت زیر است:

- در حالت خاک رسی دارای لایه ماسه‌ای افزایش در فشار جانبی خاک رس در محدوده‌ای برابر با ۲ برابر عرض شمع از سطح تماس با خاک ماسه‌ای اتفاق می‌افتد. از این رو اثرات لایه‌ای خاک در این حالت چندان مؤثر نیست.
- در حالت خاک ماسه‌ای دارای لایه رسی کاهش در فشار جانبی خاک ماسه‌ای در محدوده گسترده‌تری برابر با ۴ برابر عرض شمع از سطح تماس با رس اتفاق می‌افتد. از این رو اثرات لایه‌ای خاک در این حالت مهمتر است.
- علاوه بر این مقایسه نتایج بدست آمده از روشهای تجربی با روش اجزاء محدود برای منحنی‌های P-Y حاکی از تفاوت بین مقاومت نهایی در لایه‌های کم عمق خاک می‌باشد.

مراجع

1. Reese, L. C., Wang, S. T., Isenhower, W. M., and Arrellaga, J. A., (2000) LPILE plus 4.0 Technical Manual, version 4.0 ed. ENSOFT, INC.
2. Muqtadir, A., and Desai, C. S. (1986) three dimensional analysis of a pile-group foundation. *International journal for numerical and analysis methods in geomechanics* 10, 41-58.
3. Pressley, J. S., and Poulos, H. G. (1986) Finite element analysis of mechanisms of pile group behavior. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 10, 213-221.
4. Kimura, M., Adachi, T., Kamei, H., and Zhang, F. (1995) 3-D Finite element analyses of the ultimate behavior of laterally loaded cast-in-place concrete piles. In *Proceedings of the Fifth International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, NUMOG V*, G. N. Pande and S. Pietruszczak, Eds., A. A. Balkema, pp. 589-594.
5. Wakai, A., Gose, S., and Ugai, K. (1999) 3-d elasto-plastic Finite element analysis of pile foundations subjected to lateral loading. *Soil and Foundations* 39, 97-111.
6. OpenSees Development Team (Open Source Project). OpenSees: open system for earthquake engineering simulations. , 1998-2002.
7. McVay, M., Zhang, L., Molnit, T., and Lai, P. (1998) Centrifuge testing of large laterally loaded pile groups in sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 124, 1016-1026.