

# بررسی تأثیر قطر شمع در مدول و ضریب عکس‌العمل افقی بستری با در نظر گرفتن اثرات بار محوری و ناهمگنی خاک

علی قربانی\* (استادیار)

یاسر پروایی لات لیلی (دانشجوی کارشناسی ارشد)  
دانشکده‌ی مهندسی، دانشگاه گیلان

در روابط تئوریک موجود، مدول عکس‌العمل افقی بستری شمع، که با استفاده از یک سری فنرهای کشسان خطی و غیرخطی مستقل تعیین می‌شود، مستقل از قطر شمع و یا تابعی خطی از آن در نظر گرفته می‌شود. اما در واقع، رفتار واقعی شمع به‌ویژه با سر آزاد، به دلیل بروز رفتار خمیری در خاک، از روابط به مراتب پیچیده‌تری پیروی می‌کند. در این پژوهش، اثر میزان قطر شمع در مدول عکس‌العمل افقی بستری شمع با استفاده از روش تفاضل محدود غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل‌های انجام شده نیز اثرات ناهمگنی و بار محوری بررسی شده است، که انجام این امر در روابط تئوریک موجود ممکن نیست. نتایج حاصله، بیانگر افزایش مقدار مدول و کاهش ضریب عکس‌العمل بستری با افزایش قطر و تأثیرات قابل ملاحظه‌ی ناهمگنی و بار محوری در این روند هستند.

واژگان کلیدی: شمع تک، مدول عکس‌العمل افقی شمع، ضریب عکس‌العمل افقی شمع، قطر شمع، ناهمگنی، بار محوری.

## ۱. مقدمه

موضوع شمع تحت بار جانبی در سازه‌های دریایی از ابتدا مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. بارهای جانبی ناشی از باد و امواج، مهم‌ترین عامل در طراحی چنین سازه‌هایی است. به‌طور کلی در طراحی شمع تحت بار جانبی، دو معیار باید ارضاء شوند که عبارت‌اند از: الف) شمع، ضریب اطمینان کافی در برابر پیشینه‌ی بار جانبی وارده را داشته باشد، و ب) تغییر مکان شمع تحت بار سرویسی در محدوده‌ی تغییر شکل مجاز رسا باشد.<sup>[۱]</sup>

در مهندسی ژئوتکنیک روش‌های مختلفی برای طراحی شمع‌ها تحت بار جانبی وجود دارند، که قدیمی‌ترین و در عین حال ساده‌ترین روش موجود، استفاده از یک تیر کشسان نازک با بارگذاری عرضی متکی بر یک سری فنرهای کشسان خطی است.<sup>[۲]</sup> این مدل که به مدل وینکلر معروف است، به دلیل سادگی در انجام محاسبات در مقایسه با سایر مدل‌ها کاربرد گسترده‌ی دارد. اما در عین حال، این روش به دلیل برخورداری از فرضیات ساده‌شونده، دارای مشکلاتی در رابطه با تعیین مدول عکس‌العمل افقی بستری  $(k_{\theta})$  است. لذا برای حل این مشکل در روش موسوم به روش  $p - y$ ، یک سری فنرهای غیرخطی جایگزین فنرهای خطی می‌شوند.<sup>[۳-۶]</sup>

در روش کشسان پیوسته، خاک به‌عنوان یک محیط کشسان پیوسته در نظر

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱/۱۹، اصلاحیه ۱۳۹۱/۸/۲۹، پذیرش ۱۳۹۱/۹/۲۰.

ghorbani@Guilan.ac.ir  
63.yaser@gmail.com

گرفته می‌شود و به کمک تحلیل المان مرزی پاسخ شمع تحت بار جانبی به‌دست می‌آید.<sup>[۷]</sup> این روش برای مسائل ساده‌ی که در آن ضریب کشسانی ثابت مانده است و یا به‌صورت خطی افزایش می‌یابد، کاربرد دارد. اما با این حال، استفاده از این روش در مسائل عملی به سادگی روش وینکلر نیست و به این دلیل روشی پر کاربرد نیست.

در واقع، با عنایت به بعد مدول عکس‌العمل افقی بستری (از جنس تنش بر واحد طول) می‌توان دریافت که این مدول، مفهومی انتزاعی است که بر پایه‌ی مفاهیم ریاضی توسعه یافته است و جزء خواص ثابت خاک نیست. همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، مدول عکس‌العمل بستری در یک عمق مشخص برابر با شیب خطی است که نقطه‌ی واقع بر منحنی  $p - y$  در عمق موردنظر را به مبدأ وصل می‌کند. شیب این خط، که مدول سکانت نامیده می‌شود، به عوامل گوناگونی نظیر قطر شمع، نوع بارگذاری، ناهمگنی و نسبت بواسون بستگی دارد. همچنین، مقدار آن علاوه بر خصوصیات مکانیکی خاک، شمع، و شرایط بارگذاری، تابعی از تغییر شکل جانبی و نیز عمق از سطح زمین است.

همچنین، مطابق شکل ۲، به ازاء تغییر شکل‌های کوچک، مدول عکس‌العمل بستری ثابت است؛ ولی برای تغییر شکل‌های بزرگ‌تر، مقدار آن تغییر می‌کند و با افزایش میزان تغییر شکل، کاهش می‌یابد.

در سال‌های اخیر، برخی مطالعات آزمایشگاهی برای بررسی تغییرات مدول و ضریب عکس‌العمل صورت پذیرفته است، که از آن جمله می‌توان به کارهای

عمق‌های زیاد، به مراتب بیش از مقدار واقعی است. و به این دلیل راه‌حلی ارائه شد که بر اساس آن روش  $p - y$  با یک ضریب پیشنهادی اصلاح می‌شود.

از جمله فرضیه‌های موجود در زمینه‌ی ارتباط بین مدول عکس‌العمل بستر و قطر شمع می‌توان به فرضیه‌های ترزاقی و لینگ اشاره کرد. بر اساس فرضیه‌ی ترزاقی ضریب عکس‌العمل بستر به صورت خطی با قطر تغییر کرده و در نتیجه مدول عکس‌العمل بستر مستقل از قطر شمع است.<sup>[۱۳]</sup> همچنین، بنا بر فرضیه‌ی لینگ، مدول عکس‌العمل بستر به صورت خطی با افزایش قطر افزایش می‌یابد.<sup>[۱۴]</sup> پژوهشگرانی نیز در سال ۲۰۰۳ بر پایه‌ی دو فرضیه‌ی مورد اشاره، اثر قطر شمع در مدول عکس‌العمل بستر را با استفاده از نتایج تست‌های بارگذاری ضربه‌ی مورد بررسی قرار دادند.<sup>[۱۵]</sup> بدین منظور، ۴ شمع با قطرهای مختلف مورد آزمایش قرار گرفتند. نتایج پژوهش مذکور نشان داد که با سادسدهای طبیعی محاسبه‌شده با روش ترزاقی، تطبیق خوبی با مقادیر اندازه‌گیری‌شده داشتند. از طرف دیگر، نسبت میرایی سیستم با تغییر قطر تغییر کرده و از ۳٪ برای شمع‌های با قطر ۴/۰ متر تا ۲۵٪ برای شمع‌های با قطر ۱/۲ متر تغییر می‌کند.<sup>[۱۵]</sup> عدم اتفاق نظر در مورد استفاده از یکی از دو فرضیه‌ی مورد اشاره و دقت متفاوت آنها در مسائل عملی، لزوم پژوهش بیشتر در این زمینه را نمایان می‌سازد.

## ۲. فرضیات و اهداف این پژوهش

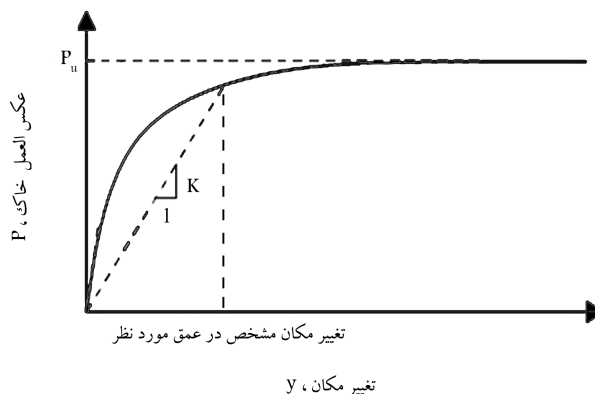
به لحاظ تئوری، رابطه‌ی دیفرانسیل خمش ارتجاعی حاکم بر تیر یا صفحه‌ی واقع بر بستر کشسان، به صورت رابطه‌ی ۱ است.

$$\frac{d^2}{dx^2} \left( EI \frac{d^4 w}{dx^4} \right) = -kw - p(x) \quad (1)$$

در این رابطه، ارتباط بین پارامتر  $k$  (پارامتر مربوط به خاک) و همچنین  $EI$  (پارامتر مربوط به سختی خمشی شمع) به روشنی مشخص است. ملاحظه می‌شود که رابطه‌ی بین  $k$  و قطر شمع در واقع رابطه‌ی بین پارامترهای  $k$  و  $EI$  در رابطه‌ی ۱ است، که درک این ارتباط از طریق بررسی اندرکنش مابین خاک و شمع با کمک مدل تفاضل محدود ارائه‌شده در پژوهش انجام می‌شود.

چنانچه پیش‌تر به آن اشاره شد، قطر شمع یکی از عوامل مؤثر در مقدار مدول عکس‌العمل بستر است. تأثیر این پارامتر، به ویژه در مورد شمع‌های با سر آزاد که امکان جابجایی برای سر شمع وجود دارد، بیشتر نمایان می‌شود. در این قبیل شمع‌ها، به دلیل بروز رفتار خمیری در خاک (به‌ویژه در سر شمع) و مدول  $p - y$ ، مقدار قطر شمع تأثیر بسزایی در منحنی عکس‌العمل افقی بستر خواهد داشت. لذا در این پژوهش، روند تغییرات مدول عکس‌العمل بستر شمع با تغییرات قطر شمع، در سطح تغییرشکل‌های کوچک و بزرگ مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، با انجام تحلیل‌های اولیه و بررسی نیروهای حاصله به ازاء تغییرمکان‌های اعمالی مختلف به سر شمع، تغییرمکان جانبی به میزان ۳ سانتی‌متر به سر شمع به‌عنوان مقدار مبنا جهت ایجاد نیروهای کمتر از بار نهایی<sup>۶</sup> و تغییرمکان جانبی ۵ سانتی‌متر به‌عنوان مقدار مبنا جهت ایجاد نیرویی برابر با بار نهایی تعیین شدند.

همچنین تأثیر بار محوری و ناهمگنی خاک در نحوه‌ی تغییرات مدول و ضریب عکس‌العمل بستر با افزایش قطر شمع مطالعه گردید و در نهایت، نتایج حاصله



شکل ۱. چگونگی تعیین مدول عکس‌العمل بستر در عمق‌های مختلف.<sup>[۱]</sup>



شکل ۲. تغییرات مدول عکس‌العمل بستر با تغییر مکان.<sup>[۱]</sup>

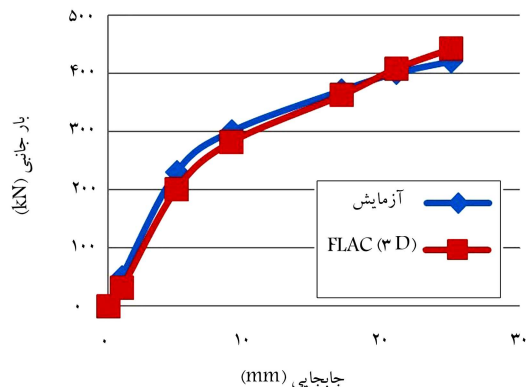
آزمایشگاهی انجام شده در سال ۲۰۰۶ اشاره کرد.<sup>[۹]</sup> که در آن با انجام تست‌های سانتریفیوژ، مدل سازی شمع تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی در خاک‌های مسئله‌دار، مدول عکس‌العمل افقی دینامیکی بستر شمع مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات دیگری نیز در سال ۲۰۰۹ با انجام تست‌های بارگذاری جانبی بر روی شمع ابرابندی‌شده انجام پذیرفته است.<sup>[۱۰]</sup> که در آن، به منظور تفسیر نتایج آزمایشگاهی از روش‌های پیشنهادی پالمر<sup>۱</sup>، تامپسون<sup>۲</sup> و دیویس-سون<sup>۳</sup> برای تعیین مدول و ضریب عکس‌العمل بستر استفاده شده است و نتایج حاصله نشان داد که در عمق‌های کمتر از ۴ متر، پیش‌بینی روش دیویس-سون محافظه‌کارانه و مقدار واقعی ضریب عکس‌العمل، به مراتب بیش از مقدار حاصل از این روش است. همچنین، برای عمق‌های بیش از ۴ متر، کلیه روش‌ها مقداری بیش از واقع ارائه داده‌اند.<sup>[۱۰]</sup> پژوهشگرانی دیگر در سال ۲۰۰۶، بر اساس نتایج تست‌های نفوذ استاندارد SPT<sup>۴</sup> و بارگذاری صفحه PLT<sup>۵</sup> بر روی خاک‌های شنی آبرفت تهران، به ارائه‌ی نمودارهایی برای برقراری ارتباط بین عدد SPT استاندارد و مدول عکس‌العمل بستر پرداختند.<sup>[۱۱]</sup> از طرف دیگر، در سال‌های اخیر برخی پژوهشگران مطالعاتی را با استفاده از مدل‌سازی عددی انجام داده‌اند که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌هایی در سال ۲۰۰۴ اشاره کرد که در مورد روش‌های متداول طراحی و فرضیه‌های به کاررفته در آن‌هاست.<sup>[۱۲]</sup> در پژوهش‌های مذکور با استفاده از روش‌های تحلیلی و اجزاء محدود سه‌بعدی به ارزیابی اثرات قطر شمع در سختی خاک - شمع پرداخته شده است و نتایج حاصله از آنها نشان داده است که مدول به‌دست‌آمده از روش  $p - y$

جدول ۱. مشخصات خاک در صحت‌سنجی مدل عددی [۶].

عمق لایه (m)	چسبندگی (kPa)	مدول برشی (MPa)	مدول بالک (MPa)
۵٫۵-۰	۱۰۵	۹٫۴۵	۴۴٫۰۴
۱۲٫۸-۵٫۵	۱۰۵	۹٫۴۵	۴۴٫۰۴
۲۰-۱۲٫۸	۱۶۳	۱۴٫۶۷	۶۸٫۳۶

جدول ۲. مشخصات شمع در صحت‌سنجی مدل عددی [۶].

نوع شمع	وزن مخصوص (Kg/m <sup>3</sup> )	مدول برشی (GPa)	مدول بالک (GPa)
بتنی (دایریبی)	۲۵	۱۰٫۰۷	۱۳٫۴۳



شکل ۴. مقایسه‌ی بین نتایج تحلیل عددی و آزمایش بارگذاری شمع انجام شده در منطقه‌ی هوستون.

جدول ۳. مشخصات خاک استفاده شده در تحلیل پارامتریک.

وزن مخصوص (Kg/m <sup>3</sup> )	چسبندگی زهکشی نشده (KPa)	مدول برشی (MPa)	مدول بالک (MPa)
۱۵۰۰	۵۰	۱۷٫۸۶	۸۳٫۳۳

جدول ۴. مشخصات شمع استفاده شده در تحلیل پارامتریک.

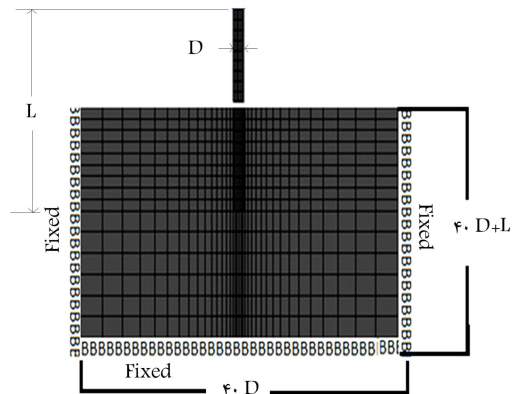
نوع شمع	وزن مخصوص (Kg/3 <sup>3</sup> )	مدول برشی (GPa)	مدول بالک (GPa)
بتنی (دایریبی)	۲۵	۱۰٫۰۴	۱۳٫۹

## ۵. مطالعه‌ی پارامتری و تفسیر نتایج

در مطالعه‌ی پارامتری، ۶ شمع مختلف با طول ثابت ۲۰ متر و قطرهای ۰٫۶، ۰٫۸، ۱٫۰، ۱٫۵ و ۲ متر مدل‌سازی شده‌اند. خاک مورد استفاده در این بررسی، رس متوسط است. مشخصات خاک و شمع به ترتیب در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است. مدول کشسانی خاک بر اساس رابطه‌ی ۲ با ضریب چسبندگی زهکشی نشده‌ی خاک ( $C_u$ ) مرتبط است [۱۶].

$$E = \alpha C_u \quad (2)$$

همچنین، در این رابطه مقدار  $\alpha$  بین ۳۰۰ و ۱۵۰۰ پیشنهاد شده است؛ که در این پژوهش، مقدار آن برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است.



شکل ۳. هندسه‌ی مدل خاک و شمع.

با روابط و روش‌های موجود مقایسه و میزان دقت و کارایی آنها ارزیابی شده است.

## ۳. مدل‌سازی شمع و خاک با استفاده از ۳D-FLAC

نحوه‌ی مدل‌سازی شمع و خاک در محیط نرم‌افزار ۳D-FLAC در شکل ۳ نشان داده شده است، که در آن قطر شمع و  $L$  طول شمع هستند. به علت تقارن محوری فقط نیمی از خاک و شمع مدل شده است.

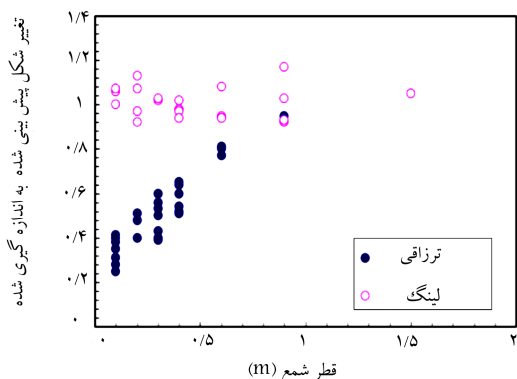
برای افزایش دقت تحلیل، شبکه‌بندی خاک در ناحیه‌ی نزدیک به شمع ریزتر از نواحی دیگر است. در این پژوهش، هدف بررسی پاسخ جانبی بر روی شمع با سر آزاد است و به این دلیل سر شمع تا ۱۰ سانتی‌متر بالاتر از سطح زمین امتداد داده شده است. بارگذاری مدل با اعمال تغییرمکان افقی ثابت به میزان ۳ سانتی‌متر به سر شمع انجام می‌شود.

برای مدل‌سازی رفتار خاک از مدل رفتاری کشسان - خمیری کامل و سطح تسلیم موهر - کولمب استفاده شده است، که به دلیل سادگی و در دسترس بودن پارامترهای آن یکی از پرکاربردترین مدل‌های رفتاری برای مدل‌سازی رفتار واقعی خاک است. این تذکر لازم است که معیار سطح گسیختگی موهر - کولمب فقط به تنش‌های اصلی بیشینه و کمینه ( $\sigma_1, \sigma_3$ ) بستگی دارد و مستقل از مقدار تنش میانی ( $\sigma_2$ ) است.

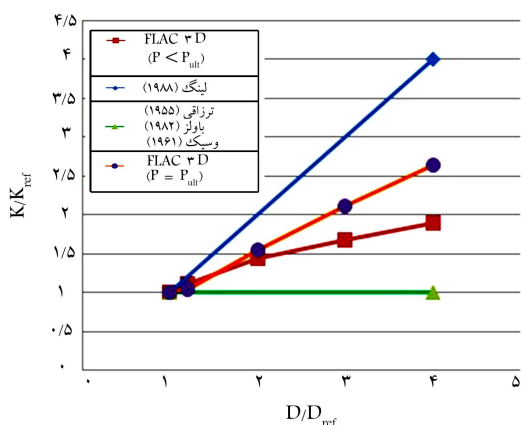
## ۴. صحت‌سنجی مدل

به منظور صحت‌سنجی مدل ساخته شده، از نتایج یک آزمایش بارگذاری جانبی شمع در مقیاس کامل، که در منطقه‌ی هوستون واقع در تگزاس آمریکا انجام شده، استفاده شده است [۶]. این آزمایش بر روی شمع با قطر ۷۶۲ میلی‌متر و طول ۱۲٫۸ متر انجام شده و خاک محل از نوع رس با وزن مخصوص خشک ۱۹۰۰ و وزن مخصوص اشباع ۱۹۹۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. سطح آب زیرزمینی نیز در عمق ۵٫۵ متری از سطح زمین قرار داشته است. مشخصات لایه‌های خاک محل آزمایش و شمع آزمایش شده به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است.

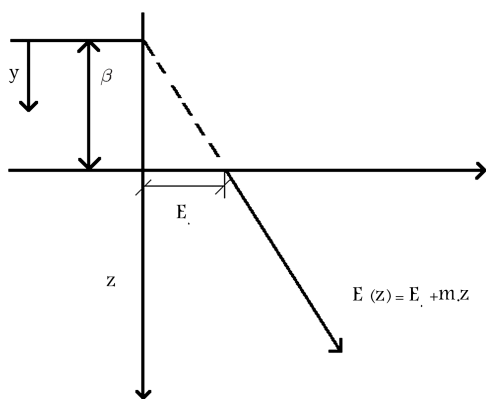
در شکل ۴، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و آزمایش شمع در محل مقایسه شده است. تطابق بسیار خوب نشان داده شده در این شکل، بیانگر صحت مدل‌سازی شمع با سر آزاد تحت بار جانبی است.



شکل ۵. مقایسه‌ی نسبت تغییرشکل پیش‌بینی شده به اندازه‌ی گرفته‌شده. [۱۴]



شکل ۶. تأثیر قطر شمع در مدل عکس‌العمل بستر و مقایسه‌ی آن با روابط موجود.



شکل ۷. نیم فضای کشسان ناهمگن در نظر گرفته‌شده برای خاک در تحلیل‌های پارامتریک انجام‌شده.

عددی لحاظ شده است:

$$E_s = E_0 + mz \quad (5)$$

در این رابطه،  $E_0$  مدول کشسانی در سطح نیم فضای ناهمگن و  $m$  شیب خط افزایش مدول کشسانی است.

نحوه‌ی تغییرات مدول کشسانی خاک در عمق، در روند تغییرات مدول عکس‌العمل بستر شمع همراه با افزایش قطر شمع تأثیرگذار است و نادیده‌گرفتن اثر آن منجر به خطا خواهد شد. بنابراین با در نظر گرفتن فاکتور  $\beta$  به صورت  $\beta = \frac{E_0}{m}$ ، اثر ناشی از تغییرات

## ۱.۵. بررسی تأثیر قطر شمع در مدل عکس‌العمل بستر

در پژوهشی در سال ۱۹۶۱، با استفاده از روش وینکلر و با فرض محیط کشسان پیوسته برای خاک اطراف شمع، رابطه‌ی ۳ برای محاسبه‌ی مدول عکس‌العمل بستر شمع ارائه شده است: [۱۷]

$$k = \frac{0.65 E_s}{(1 - \nu_s^*)} \left[ \frac{E_s D^4}{E_p I_p} \right]^{1/12} \quad (3)$$

که در آن،  $k$  مدول عکس‌العمل افقی بستر،  $E_s$  مدول کشسانی خاک،  $\nu_s$  ضریب پواسون خاک،  $D$  قطر شمع و  $E_p I_p$  سختی خمشی شمع است.

بنابر پیشنهاد باولز<sup>۸</sup> مقدار عددی رابطه‌ی  $\left[ \frac{E_s D^4}{E_p I_p} \right]^{1/12}$  در بیشتر موارد، تقریباً برابر با ۱ است. لذا برای محاسبه‌ی مدول عکس‌العمل بستر شمع، رابطه‌ی ۴ را پیشنهاد شده است:

$$k = \frac{E_s}{(1 - \nu_s^*)} \quad (4)$$

از طرف دیگر، بنا بر فرضیه‌ی ترازقی، تغییرات قطر شمع تأثیری در مدول عکس‌العمل بستر شمع ندارد. [۱۳] لینگ با استفاده از مدل هذلولی ارائه‌شده توسط کارتر<sup>۹</sup> و انجام آنالیز برگشتی، پاسخ شمع تحت بار جانبی را با کمک آزمایش‌های صحرایی مورد بررسی قرار داد. نتایج این بررسی در شکل ۵ نشان داده شده است، که در آن نسبت تغییرشکل پیش‌بینی شده به تغییرشکل واقعی سر شمع برای دو حالت استفاده از فرضیه‌ی ترازقی و لینگ با یکدیگر مقایسه شده است.

ملاحظه می‌شود که فرضیه‌ی ترازقی، در قطرهای کمتر از ۱ متر، تغییرشکل سر شمع را بسیار کمتر از مقدار واقعی آن ارائه می‌دهد. همچنین، برای شمع‌های با قطر بیش از ۱ متر، استفاده از فرضیه‌ی ترازقی منجر به تغییرشکل‌های بیش از مقدار واقعی آن در سر شمع خواهد شد. لینگ نشان داد که با فرض خطی در نظر گرفتن رابطه‌ی بین مدول عکس‌العمل بستر شمع و قطر آن، تغییرشکل‌های پیش‌بینی شده تا حد زیادی به مقدار واقعی آن نزدیک خواهند شد. [۱۴]

در شکل ۶، نتایج حاصل از مدل‌سازی انجام‌شده در این پژوهش ارائه و با نتایج روش‌های ترازقی و لینگ مقایسه شده است. در این شکل، قطر ۰٫۷ متر به عنوان قطر مبنا ( $D_{ref}$ ) و مدول عکس‌العمل آن به عنوان مدول عکس‌العمل مبنا ( $k_{ref}$ ) در نظر گرفته شده و قطر سایر شمع‌ها و مدول عکس‌العمل به دست آمده از آن‌ها به ترتیب بر قطر مبنا و مدول عکس‌العمل مبنا تقسیم شده است. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است، مدول عکس‌العمل بستر با افزایش قطر، افزایش می‌یابد. همچنین میزان افزایش مدول عکس‌العمل بستر شمع با افزایش قطر، در تغییرمکان‌های بیشتر از مقاومت نهایی خاک، بیشتر است. از طرف دیگر ملاحظه می‌شود که نتایج حاصله از مدل عددی به‌کار گرفته‌شده در این پژوهش، بسیار متفاوت با روش‌های مبتنی بر فرضیات ترازقی و لینگ است. در واقع، فرضیه‌ی ترازقی، مقدار مدول عکس‌العمل بستر را کمتر از مقدار واقعی و فرضیه‌ی لینگ، مقدار آن را بیش از مقدار واقعی به دست می‌دهد.

## ۲.۵. تأثیر قطر شمع بر مدول عکس‌العمل بستر با در نظر گرفتن

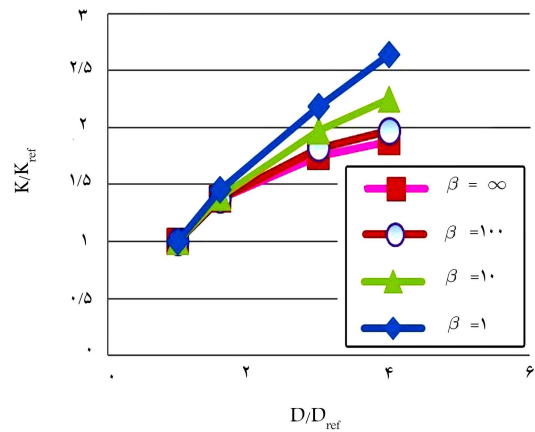
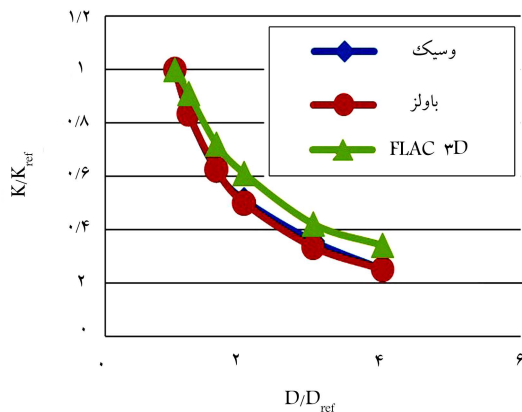
### ناهمگنی خاک

در این پژوهش، به منظور در نظر گرفتن اثر ناهمگنی خاک فرض می‌شود که مدول کشسانی همانند شکل ۷ با افزایش عمق افزایش یافته که با رابطه‌ی ۵ در مدل‌سازی

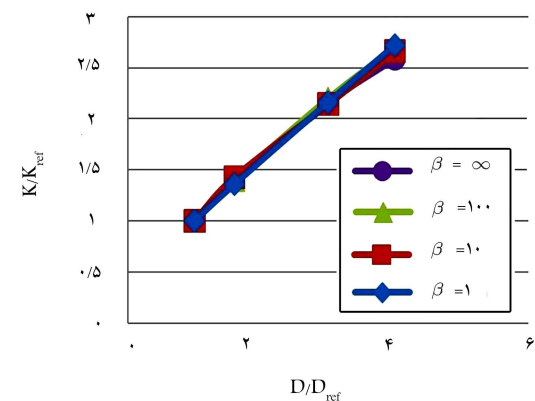
به دلیل پیچیدگی و دشواری‌های موجود در مسئله‌ی تنش - تغییر شکل در نیم فضای ناهمگن، روابط فراگیر و گسترده‌ی برای تعیین ضریب عکس‌العمل بستر موجود نیست. یک روش متداول برای حل این مشکل، استفاده از مدول کشسانی معادل ( $E_e$ ) برای در نظر گرفتن اثر ناهمگنی است. روش‌های متعددی جهت تعیین مدول کشسانی معادل نیم فضای ناهمگن پیشنهاد شده است. در این پژوهش فرض می‌شود که مدول کشسانی معادل از رابطه‌ی ۶ به دست آید: [۱۸، ۱۹]

$$E_e = m(D + \beta) \quad (6)$$

در این رابطه،  $\beta = \frac{E_c}{m}$  و  $D$  قطر شمع است. مطابق این رابطه، مدول کشسانی در سطح برابر با مقدار ثابت است و با افزایش عمق، به طور خطی افزایش می‌یابد. چنانچه پیش‌تر به آن اشاره شد، آهنگ افزایش مدول کشسانی، علاوه بر عمق، تابع قطر شمع است و اثر ناهمگنی با در نظر گرفتن این پارامتر ( $E_e$ ) حاصل می‌شود. به منظور به دست آوردن تأثیر قطر شمع در ضریب عکس‌العمل بستر و همچنین انجام مقایسه، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی برای درجات مختلف ناهمگنی خاک به همراه راه‌حل‌های وسیک و باولز در شکل‌های ۱۰ الی ۱۳ ارائه شده‌اند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، به ازاء کلیه‌ی درجات ناهمگنی و در تمامی روش‌های موجود و همچنین روش حاضر، مقدار ضریب عکس‌العمل بستر با افزایش قطر کاهش می‌یابد. فقط در حالت  $\beta = 1$  در روش وسیک، نمودار روند غیرمعمولی را طی می‌کند. به طوری که ضریب عکس‌العمل بستر همراه با افزایش



شکل ۸. تغییرات مدول عکس‌العمل بستر همراه با افزایش قطر در سطح تغییر مکان‌های کمتر از مقاومت نهایی خاک با در نظر گرفتن درجات مختلف ناهمگنی خاک.



شکل ۹. تغییرات مدول عکس‌العمل بستر همراه با افزایش قطر در سطح تغییر مکان‌های بیشتر از مقاومت نهایی خاک با در نظر گرفتن درجات مختلف ناهمگنی خاک.

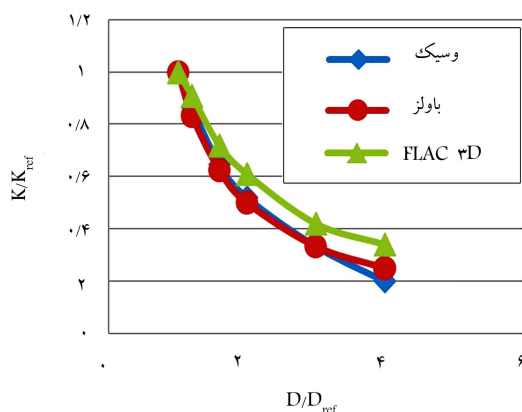
مدول کشسانی با افزایش عمق مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، میزان تغییرات مقدار مدول عکس‌العمل بستر شمع با قطر شمع، به ازاء ۴ مقدار مختلف  $\beta$ ، ( $\beta = 1, 10, 100, \infty$ )، محاسبه شده و نتایج حاصله، در شکل‌های ۸ و ۹ ارائه شده‌اند.

مطابق شکل ۸ ملاحظه می‌شود که در تغییر شکل‌های کمتر از مقاومت نهایی خاک، ناهمگنی خاک عاملی تأثیرگذار است و کاهش مقدار  $\beta$  یعنی افزایش میزان ناهمگنی خاک، منجر به افزایش مدول عکس‌العمل بستر شمع می‌شود. حال آنکه با توجه به شکل ۹، به ازاء تغییر شکل‌های بیشتر از مقاومت نهایی خاک، ناهمگنی خاک پارامتر تعیین‌کننده‌ی نیست و تغییرات آن، تأثیر بسزایی در روند تغییرات مدول عکس‌العمل بستر شمع با افزایش قطر ندارد.

### ۳.۵. تأثیر قطر شمع در ضریب عکس‌العمل بستر با در نظر گرفتن ناهمگنی خاک

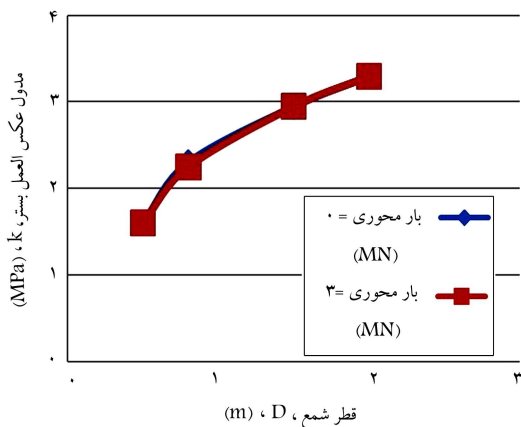
ضریب عکس‌العمل بستر از تقسیم مدول عکس‌العمل بستر بر قطر شمع به دست می‌آید. از طرف دیگر، همان‌طور که پیشتر مشاهده شد، مدول عکس‌العمل تابع غیر صریح از قطر است. بنابراین، ارتباط مشخص از پیش تعیین‌شده‌ی بین این ضریب و قطر وجود ندارد. در ادامه، با استفاده از نتایج تحلیل‌های عددی، روند تغییرات این ضریب نسبت به قطر شمع مورد بررسی قرار گرفته است.

شکل ۱۰. روند تغییرات ضریب عکس‌العمل بستر در مقابل قطر شمع برای حالت  $\beta = \infty$ .

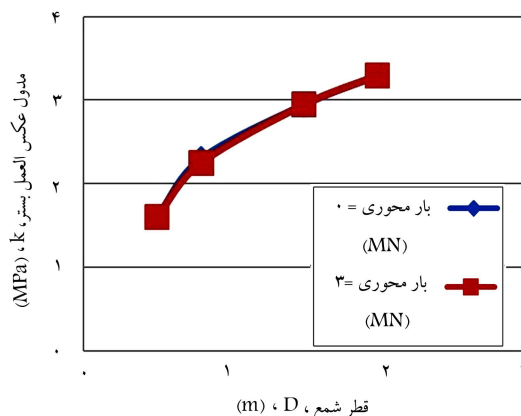


شکل ۱۱. روند تغییرات ضریب عکس‌العمل بستر در مقابل قطر شمع برای حالت  $\beta = 100$ .

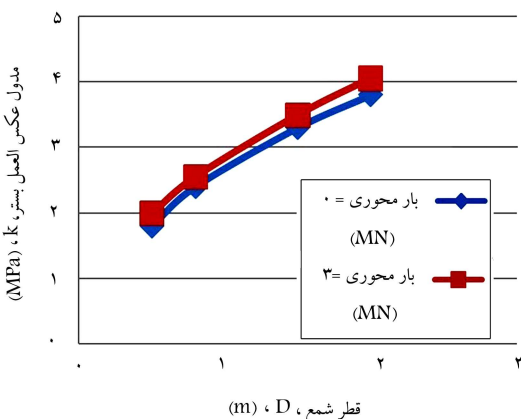
ناهمگنی کم)، بار محوری تأثیری بر مدول عکس‌العمل افقی بستر نخواهد داشت؛ ولی با توجه به شکل‌های ۱۶ و ۱۷، در مقادیر پایین  $\beta$  (درجات بالای ناهمگنی)، بار محوری تأثیرگذار است و باعث افزایش مدول عکس‌العمل افقی بستر می‌شود. به‌طورکلی یکی از مهم‌ترین نوآوری‌های این پژوهش بررسی توأمان بار محوری و بار جانبی بر مدول عکس‌العمل جانبی است، که نتایج مدل‌سازی نشان‌دهنده تأثیرات مهم این موضوع در خاک‌های ناهمگن نسبت به خاک‌های همگن است. از نظر فیزیکی شاید بتوان این مسئله را به این صورت توجیه کرد که در خاک‌های



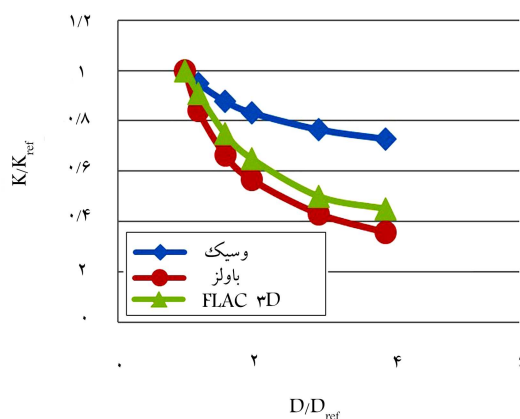
شکل ۱۳. اثر بار محوری بر مدول عکس‌العمل بستر برای حالت  $\beta = 10^\circ$ .



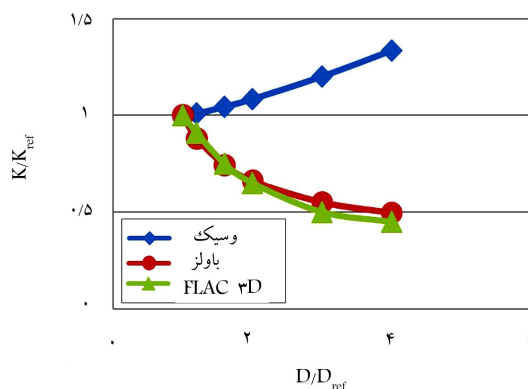
شکل ۱۴. اثر بار محوری بر مدول عکس‌العمل بستر برای حالت  $\beta = 100^\circ$ .



شکل ۱۵. اثر بار محوری بر مدول عکس‌العمل بستر برای حالت  $\beta = 10^\circ$ .



شکل ۱۶. روند تغییرات ضریب عکس‌العمل بستر در مقابل قطر شمع برای حالت  $\beta = 10^\circ$ .



شکل ۱۷. روند تغییرات ضریب عکس‌العمل بستر در مقابل قطر شمع برای حالت  $\beta = 1^\circ$ .

قطر شمع، افزایش می‌یابد. ریشه‌ی این خطا را نیز می‌توان در قسمت دوم معادله‌ی وسیک یعنی  $\left[ \frac{E_s D^4}{E_p T_p} \right]^{1/12}$  و تأثیر هم‌زمان قطر و مدول کشسانی معادل در پارامتر مورد اشاره بیان کرد.

به‌علاوه، چنانچه در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ به خوبی نشان داده شده است، به ازاء مقادیر بزرگ‌تر  $\beta$ ، راه‌حل عددی به‌کارگرفته‌شده در این پژوهش، مقادیر بزرگ‌تری نسبت به روش‌های وسیک و باولز ارائه می‌دهد. حال آنکه، به ازاء مقادیر کوچک  $\beta$ ، این روند معکوس می‌شود؛ به‌طوری‌که مقادیر حاصل از حل‌های وسیک و باولز، بیش از مقادیر حل عددی شده است.

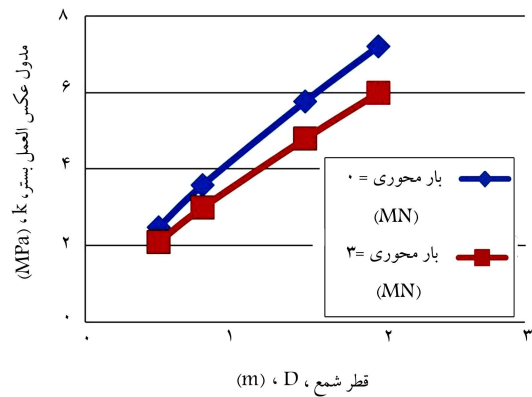
#### ۴.۵ اثر بار محوری بر مدول عکس‌العمل بستر

معمولاً شمع‌ها به منظور انتقال توأم بارهای محوری و جانبی طراحی می‌شوند. پس در بررسی رفتار شمع تحت بار جانبی نادیده‌گرفتن بارهای محوری می‌تواند باعث خطا در تحلیل شود. در این پژوهش، میزان تأثیر بار محوری اعمال‌شده بر سر شمع، به‌عنوان یکی دیگر از عوامل مؤثر در روند تغییرات مدول عکس‌العمل بستر مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، کلیه‌ی تحلیل‌های انجام‌شده با در نظر گرفتن بار محوری ۳ مگاپاسکال در سر شمع تکرار و روند تغییرات مدول عکس‌العمل بستر با افزایش قطر در نرخ ناهمگنی‌های متفاوت مجدداً بررسی شده است. نتایج حاصل از این بررسی در شکل‌های ۱۴ الی ۱۷ ارائه شده‌اند.

چنانچه در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود، به ازاء مقادیر بالای  $\beta$  (درجه‌ی

اثرات ناشی از وجود بار محوری و ناهمگنی خاک بر روند فوق مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج روش‌های مرسوم مقایسه شد. خلاصه‌ی نتایج به‌دست‌آمده به این شرح است:

- برخلاف پیشنهاد ترقاقی، وسیک، و باولز مبنی بر مستقل بودن مدول عکس‌العمل بستر از قطر شمع، با افزایش قطر شمع مدول عکس‌العمل افقی بستر نیز افزایش می‌یابد.
- تأثیر قطر شمع در نرخ افزایش مدول عکس‌العمل بستر در تغییرشکل‌های بزرگ (تحت بار نهایی و یا بیش از آن) به مراتب بیشتر از حالتی است که تغییرشکل‌های کوچک (در محدوده‌ی کمتر از بار نهایی) باشند.
- تغییرات مدول عکس‌العمل بستر بشدت تابع ناهمگنی خاک است و با افزایش درجه‌ی ناهمگنی، نرخ افزایش مدول عکس‌العمل بستر همراه با افزایش قطر شمع افزایش می‌یابد.
- در سطح تغییرمکان‌های کوچک (در محدوده‌ی کمتر از مقاومت نهایی خاک)، ناهمگنی تأثیر زیادی در روند افزایش مدول عکس‌العمل بستر با افزایش قطر دارد. در صورتی که در محدوده‌ی تغییرمکان‌های بزرگ (تحت بار نهایی و یا بیش از آن) اثر ناهمگنی قابل چشم‌پوشی است.
- با افزایش قطر شمع مقدار ضریب عکس‌العمل بستر شمع کاهش پیدا می‌کند. همچنین نرخ تغییرات ضریب عکس‌العمل بستر با افزایش درجه‌ی ناهمگنی روند کاهشی دارد.
- در خاک همگن بار محوری تأثیری در روند تغییرات مدول عکس‌العمل بستر ندارد، ولی با افزایش ناهمگنی تأثیر آن بیشتر و باعث افزایش مدول عکس‌العمل بستر می‌شود.



شکل ۱۷. اثر بار محوری بر مدول عکس‌العمل بستر برای حالت  $\beta = 1$ .

همگن به دلیل سختی یکسان در عمق لایه، تغییرات در بار محوری تأثیر کمتری در جابجایی قائم دارد و در نتیجه تأثیر آن در جابجایی افقی نیز کمتر است و لذا مدول عکس‌العمل بستر نیز تغییر چندانی پیدا نمی‌کند.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از نرم‌تفاضل محدود ۳D-FLAC، یک مدل عددی جهت تحلیل شمع تحت تأثیر بار جانبی ساخته شد که صحت مدل با استفاده از آزمایش برجای شمع در منطقه‌ی هوستون واقع در تگزاس آمریکا مورد ارزیابی قرار گرفت و سازگاری بسیار مناسبی بین نتایج مدل عددی و آزمایش حاصل شد. در ادامه، روند تغییرات مدول و ضریب عکس‌العمل بستر با افزایش قطر شمع و همچنین

## پانویس‌ها

1. Palmer
2. Thompson
3. Davisson
4. standard penetration test
5. plate load test
6.  $P_{ult}$
7. Houston
8. Bowels
9. Carter

## منابع (References)

1. Poulos, H.G. and Davis, E.H., *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley, New York (1980).
2. Winkler, E., *Die lehre von elasticizitat and festigkeit (on elasticity and fixity)*, Prague, 182 p. (1867).
3. Hetenyi, M., *Beams on Elastic Foundations*, Univ. of Michigan Press, Ann Arbor (1946).
4. Matlock, H. "Correlations for design of laterally loaded piles in soft clay", *Proc. of 2nd Annu. Offshore Technology Conf.*, Paper No. OTC 1204, Houston, Texas, pp. 577-594 (1970).
5. Reese, L.C., Cox, W.R. and Koop, F.D. "Analysis of laterally loaded piles in sand", *Proc. of 6th Offshore Technology Conference*, Paper 2080, Houston, Texas, pp. 473-483 (1974).
6. Reese, L.C. and Welch, R.C. "Lateral loading of deep foundation in stiff clay", *J. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, **101**(7), pp. 633-649 (1975).
7. Poulos, H.G. "Behavior of laterally loaded piles. I: Single piles", *J. Soil Mech. And Found. Div., ASCE*, **97**(5), pp. 711-731 (1971).
8. Poulos, H.G. "Analysis of piles in soil undergoing lateral movement", *J. Soil Mech. and Found. Div., ASCE*, **99**(5), pp. 391-406 (1973).
9. Fukushima, H., Nishimoto, S. and Tomisawa, K. "Coefficient of dynamic horizontal sub-grade reaction of pile foundations on problematic ground in Hokkaido", *Proc. of the Six International Conference on Physical Model-*

- ing in Geotechnics*, Hong Kong, China, **1**, pp. 993-1000 (2006).
10. Chin, T.Y., Sew, G.S. and Chung, F.C. "Interpretation of sub-grade reaction from lateral load test on spun piles in soft ground", Association of Consulting Engineers Malaysia (ACEM) Conference and Exhibition on Bridge Engineering (2009).
  11. ZiaeiMoayed, R. and Naeini, S.A. "Evaluation of sub-grade reaction ( $k_s$ ) in gravely soils based on SPT results", *Proc. of International Association for Engineering Geology (IAEG)*, Paper 505 (2006).
  12. Wiemann, J., Lensy, K. and Rickwien, W. "Evaluation of pile diameter effects on soil-pile stiffness", *Proc. of the 7th German Wind Energy Conference (DEWEK)*, Wilhelmshaven (2004).
  13. Terzaghi, K. "Evaluation of coefficients of sub-grade reaction", *Geotechnique*, **5**(4), pp. 297-326 (1955).
  14. Ling, L.F. "Back analysis of lateral load tests on piles", Report No.460, Civ. Engrg. Dept., University of Auckland (1988).
  15. Ashford, S.A. and Juirnarongrit, T. "Evaluation of pile diameter effect on initial modulus of sub-grade reaction", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, **129**(3), p. 234-242 (2003).
  16. Popescua, R., Deodatis, G. and Nobahar, A. "Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity", *Probabilistic Engineering Mechanics*, **20**(4), pp. 324-341 (2005).
  17. Vesic, A.S. "Beam on elastic sub-grade and the Winkler hypothesis", *Proc. of 5th Int. Conf. Soil Mech. and Found. Engrg.*, Paris, **1**, pp. 845-850 (1961).
  18. Parvaei Latleili, Y. "Evaluation of influence of pile diameter on horizontal coefficient of subgrade reaction under static lateral loading", MSc Thesis, University of Guilan, (In Persain) (2011).
  19. Torani Sama, S. "Evaluation of influence of foundation dimensions on horizontal coefficient of subgrade", MSc Thesis, University of Guilan, (In Persain) (2011).