



مقایسه کارایی روابط تجربی ضریب عکس العمل جانبی خاک در تحلیل شمع تحت بار جانبی در خاک‌های ماسه‌ای بر اساس روش اجزا محدود سه بعدی

رضا ضیائی مؤید^۱، امید طاهری^۲

۱- دانشیار مهندسی عمران، گرایش خاک و پی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، گرایش خاک و پی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی قزوین

Reza_Ziaie_Moayed@Yahoo.com

Taheri.Omid@Gmail.com

خلاصه

نظریه عکس العمل بستر یا روش وینکلر، یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای پیش‌بینی تغییر شکل و لنگر خمشی شمع‌ها است. این روش بیانگر این ایده است که عکس العمل خاک در هر نقطه با تغییر مکان آن نقطه متناسب می‌باشد. در این روش از مدل تیر بر بستر الاستیک که توسط وینکلر^۱ در سال ۱۸۷۶ پیشنهاد شده است استفاده می‌شود. این مدل خاک را به صورت فنرهای مجزا در نظر می‌گیرد که فقط وقتی تغییر مکان می‌دهند که بار به آن‌ها اعمال شود. پاسخ تنش-تغییر شکل تک شمع‌های بلند، تحت بارگذاری جانبی معمولاً با استفاده از این روش پیش‌بینی می‌شود. ساده بودن روش و قابلیت اعمال فاکتورهای مثل تغییرات عکس العمل بستر با عمق، و اثر لایه‌های خاک از مزایای این روش در تحلیل جانبی شمع‌ها می‌باشد. مهمترین پارامتر رفتاری خاک موثر در تحلیل جانبی شمع‌ها ضریب عکس العمل جانبی خاک K_1 می‌باشد. بهترین روش برای تعیین دقیق پارامتر مذکور انجام آنالیز برگشتی (Back Analysis) است. در این تحقیق کارایی روابط تجربی موجود برای تعیین ضریب عکس العمل بستر افقی با نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدود سه بعدی بدست آمده از نرم افزار آباکوس مقایسه می‌گردد و مشخص می‌شود که ضریب عکس العمل بستر جانبی ثابت نیست و با تغییر عمق و تغییر شکل جانبی تغییر می‌کند.

کلمات کلیدی: ضریب عکس العمل بستر افقی، شمع تحت بارگذاری جانبی، سختی جانبی شمع-خاک، مدل وینکلر

۱. مقدمه

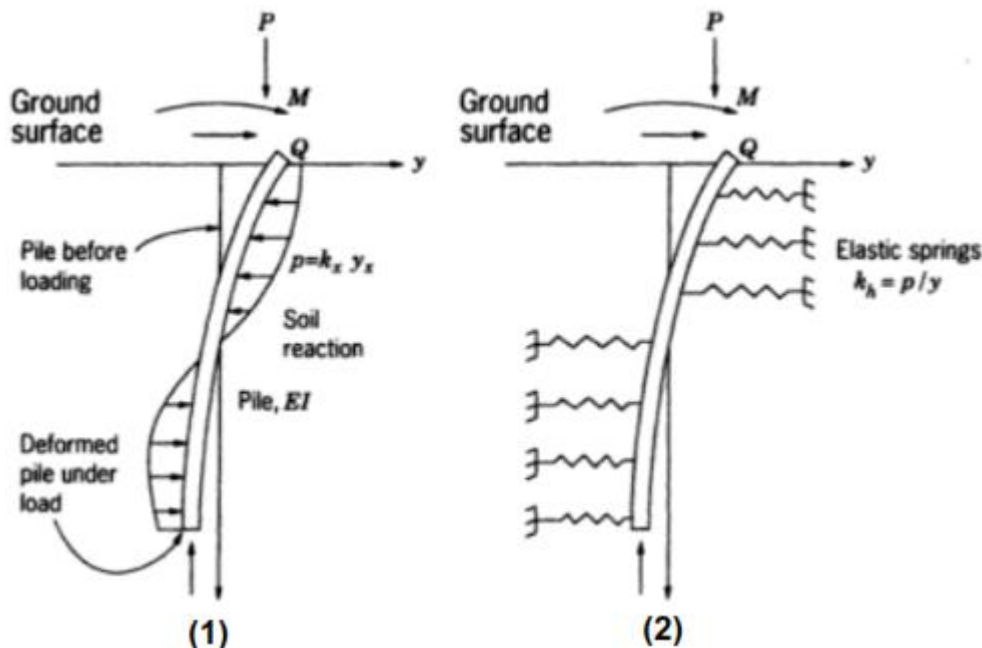
در مسائل روبرو با مقاومت جانبی خاک در برابر سازه‌های مدفون، مثل شمع‌ها، نیاز به اطلاعاتی در مورد ضریب عکس العمل بستر جانبی خاک می‌باشد. تعداد زیادی روابط تجربی و نیمه تجربی و نیز نمودارها و جداول برای برآورد ضریب عکس العمل بستر جانبی وجود دارد. علاوه بر این، انواع تکنیک‌های آزمایشگاهی و صحرایی مثل آزمایش‌های بارگذاری جانبی بر روی شمع با مقیاس واقعی، آزمایش نفوذ استاندارد، آزمایش بارگذاری صفحه، آزمایش تحکیم، آزمایش فشار ساده و آزمایش فشار سه محوری برای تعیین ضریب عکس العمل بستر جانبی استفاده می‌شود. اگرچه مقادیر استفاده شده برای ضریب عکس العمل بستر جانبی نقش مهمی در محاسبات مقاومت خاک شمع‌ها تحت بارگذاری جانبی دارد، محدوده مقادیر نسبتاً گسترده‌ای در ادبیات فنی بر اساس معادله، منحنی و جدول برای بدست آوردن این ضریب استفاده می‌شود. دقت و صحت روش‌های تحلیل ظرفیت باربری جانبی، اغلب توسط دقت مقادیر ضریب عکس العمل بستر جانبی در محاسبات تعیین می‌شود. در انتخاب یک روش برای بدست آوردن این ضریب در محاسبات ظرفیت باربری جانبی شمع، مهندس باید یک تعادل بین دقت و سادگی برقرار نماید. یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای محاسبه ضریب عکس العمل بستر جانبی، استفاده از روابط تجربی و نیمه تجربی که ضریب را به سایر ویژگی‌های شناخته شده خاک مرتبط می‌سازد. در این مقاله این چنین روابط برای خاک‌های دانه‌ای بررسی شده و با نتایج حاصل از تحلیل المان محدود مقایسه می‌گردد. طبق مدل وینکلر، یک محیط الاستیک، که در این حالت خاک اطراف شمع است، را می‌توان به وسیله یک سری فنر الاستیک نزدیک به هم جایگزین نمود. شکل ۱. در این حالت فرض می‌شود که شمع بر روی بستر الاستیک واقع است. لذا می‌توان نوشت:

¹ Winkler 1876



$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dz^4} + k_h y d = 0 \quad (1)$$

در این رابطه y تغییر شکل جانبی شمع، k_h ضریب عکس العمل جانبی خاک که نسبت بین فشار P و خیز y در هر نقطه را نشان می‌دهد، z عمق، E_p و I_p به ترتیب مدول الاستیسیته و ممان اینرسی شمع می‌باشند.



شکل ۱- ضریب عکس العمل بستر (۱) عکس العمل واقعی خاک بر شمع (۲) مدلسازی عکس العمل خاک با استفاده از فنرهای الاستیک [۱۲]

۲. روابط و جداول موجود برای تعیین k_h

ضریب عکس العمل بستر جانبی به وسیله روابط تجربی و نیمه تجربی متنوعی بدست می‌آید. ترزاچی^۱ (۱۹۵۵) نشان داد که:

$$k_h = n_h(Z/B) \quad (2)$$

که B قطر یا عرض شمع و Z عمق است. n_h ثابت عکس العمل افقی بستر است و برابر است با:

$$n_h = 2A\gamma/1.35$$

که A یک ثابت است. مقادیر رایج n_h برای ماسه‌ها در جدول ۱ داده شده است.

^۱ Terzaghi 1955

جدول ۱- مقادیر ثابت n_h بر حسب kcf [۱]

چگالی نسبی ماسه			پارامترها
متراکم	متوسط	شل	
۵۰ تا ۳۰	۳۰ تا ۱۰	۱۰ تا ۴	$N, (Blows/ft)$
۳۹	۳۴	۳۰	ϕ°
۱۱۲	۴۲	۱۴	n_h برای ماسه خشک یا مرطوب
۶۸	۲۸	۸	n_h برای ماسه اشباع

توجه: برای تبدیل kcf به KN/m^3 در $۱۵۷/۰۹$ ضرب شود.

جانسون و همکاران^۱ (۱۹۶۸) مقادیر n_h را برای خاک‌های دانه‌ای بالای تراز آب با استفاده از معیار ظرفیت باربری و با فرض برابر بودن مدول قائم و افقی در عمق‌های کوتاه در جدول ۲ ارائه داد.

جدول ۲- مقادیر پیشنهادی n_h توسط جانسون و همکاران [۲]

$N, (Blows/ft)$	۳۰	۲۰	۱۵	۱۰	۸
$n_h, (kcf)$	۹۲	۶۲	۴۷	۲۶	۱۷

توجه: برای تبدیل kcf به KN/m^3 در $۱۵۷/۰۹$ ضرب شود.

برای خاک‌های دانه‌ای، آیین نامه نیروی دریایی امریکا^۲ مقادیر پیشنهادی n_h را در جدول ۳ ارائه کرد. این مقادیر بسیار نزدیک به مقادیر ترزاقی است.

جدول ۳- مقادیر پیشنهادی n_h توسط آیین نامه نیروی دریایی امریکا [۳]

چگالی نسبی ماسه				پارامترها
بسیار متراکم	متراکم	متوسط	شل	
>۵۰	۵۰ تا ۳۰	۳۰ تا ۱۰	۱۰ تا ۴	$N, (Blows/ft)$
۴۲	۳۹	۳۴	۳۰	ϕ°
۱۰۸	۸۰	۴۴	۱۲	$n_h, (kcf)$

توجه: برای تبدیل kcf به KN/m^3 در $۱۵۷/۰۹$ ضرب شود.

زورابو و بوگایوا^۳ (۱۹۴۹) محدوده‌ی ضریب عکس‌العمل بستر افقی را برای استفاده در انواع خاک پیشنهاد کردند. مقادیر پیشنهادی آن‌ها برای خاک‌های دانه‌ای در جدول ۴ ارائه شده است. این مقادیر به طور قابل ملاحظه‌ای از مقادیر پیشنهادی توسط ترزاقی بزرگتر است.

جدول ۴- مقادیر ضریب عکس‌العمل بستر افقی k_h [۵]

نوع خاک	$k_h, (kcf)$
ماسه لای دار	۶۰۰ تا ۵۲۰
ماسه متوسط	۷۸۰ تا ۵۲۰
ماسه متراکم و رس	۳۴۶۰ تا ۲۶۰۰

توجه: برای تبدیل kcf به KN/m^3 در $۱۵۷/۰۹$ ضرب شود.

^۱ Johnson et al.

^۲ Navy Design Manual

^۳ Zurabov, G. & Bugayeva, D. E.



FHWA طبق تجربیات پروژه‌های گذشته مقادیر ضریب عکس‌العمل بستر افقی را براساس تابعی از پارامترهای مقاومت برشی خاک در جدولی ارائه کرد. مقادیر k_h برای خاک‌های دانه‌ای در جدول ۵ نشان داده شده است. این مقادیر، از مقادیر موجود در جدول ۱ بسیار کوچک‌تر است.

جدول ۵- مقادیر k_h برای خاک‌های دانه‌ای طبق *FHWA* [۶]

زاویه اصطکاک داخلی	k_h , (kcf)
۱۰	۵۰
۲۰	۸۷
۳۰	۱۶۸
۴۰	۳۷۴

توجه: برای تبدیل kcf به KN/m^3 در $۱۵۷/۰۹$ ضرب شود.

سوگ^۱ (۱۹۸۱) رابطه (۴) را برای بدست آوردن محدوده مقادیر k_h برای شمع‌هایی کوتاه پیشنهاد کرده است:

$$k_h = (2 \text{ to } 30)Z/B \quad (4)$$

که در این رابطه B قطر یا عرض شمع و Z عمق است.

بولز^۲ (۱۹۸۲) رابطه زیر را برای برآورد ضریب عکس‌العمل بستر پیشنهاد کرد:

$$k_h = 12\gamma BN\gamma + 24\gamma ZN_q \quad (kcf) \quad (5)$$

همچنین جدول (۴) را برای ارائه مقادیر ضریب عکس‌العمل افقی بستر ارائه داد:

جدول ۶- مقادیر ضریب عکس‌العمل بستر افقی k_h [۸]

نوع خاک	k_h , (kcf)
ماسه خوب	۱۲۰۰ تا ۵۰۰
ماسه متوسط	۱۸۰۰ تا ۷۰۰
ماسه درشت با چگالی متوسط	۲۰۰۰ تا ۱۰۰۰
ماسه شن‌دار متراکم	۲۵۰۰ تا ۱۴۰۰

توجه: برای تبدیل kcf به KN/m^3 در $۱۵۷/۰۹$ ضرب شود.

ریسه و همکاران^۳ (۱۹۷۴) با انجام آزمایش بارگذاری شمع در مقیاس واقعی در خاک ماسه‌ای اشباع، مقادیر m_h را بدست آورد که این مقادیر ۲/۵ تا ۳/۹ برابر، از مقادیر پیشنهاد شده توسط ترزاقی بزرگتر است. این مقادیر در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷- مقادیر پیشنهادی m_h برای ماسه اشباع [۹]

چگالی نسبی			پارامتر m_h , Kcf
متراکم	متوسط	شل	
۲۱۶	۱۰۴	۳۵	

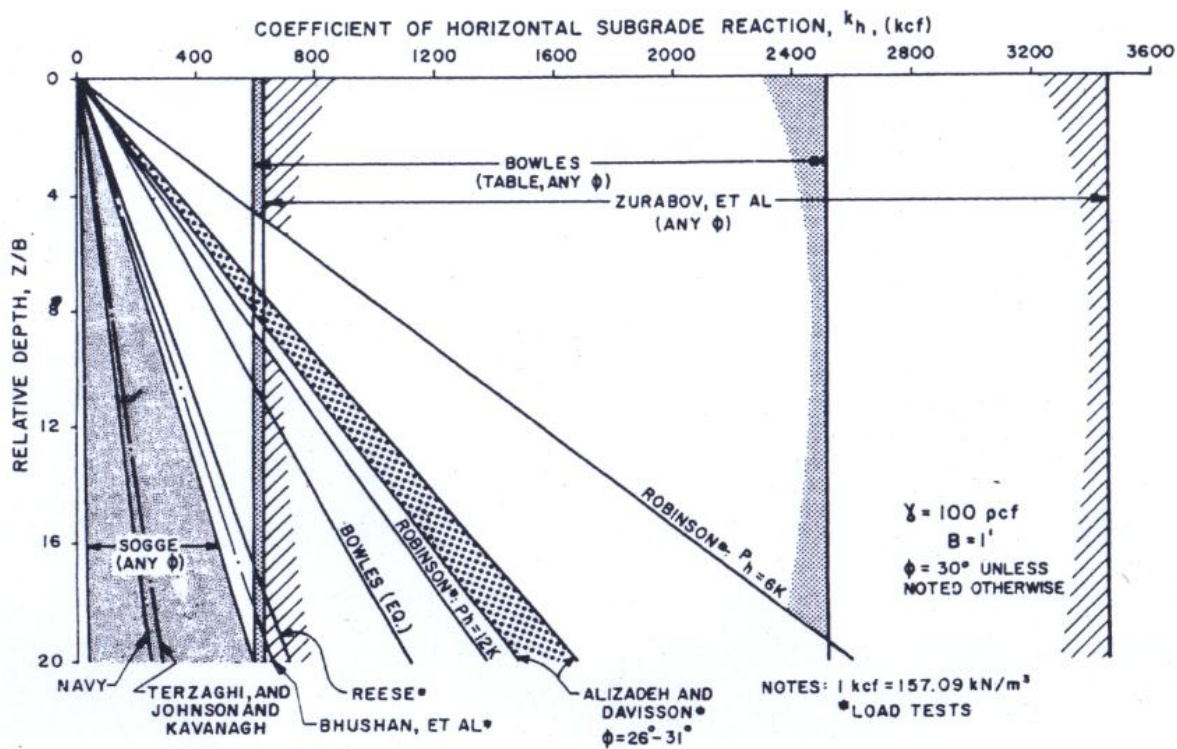
¹ Sogge, R.L.

² Bowles, J. E.

³ Reese



محدوده مقادیر ضریب عکس‌العمل افقی بستر پیشنهاد شده توسط نویسندگان مختلف برای $\phi = 30^\circ$ در شکل ۲ نشان داده شده است. در رسم این نمودار، در صورت لزوم، از معادله ۲ برای بدست آوردن k_h استفاده شده است. مقادیر پیشنهادی توسط ترزاقی برای خاک ماسه‌ای خشک یا مرطوب است؛ مقادیر پیشنهادی علیزاده و داویسون، و باشن و همکاران برای شمع با تغییرشکل جانبی $12/7$ میلیمتر ($0/5$ اینچ) است؛ مقادیر رابینسون برای بارهای نشان داده شده است. مقادیر ریسه و همکاران مربوط به مدول مماسی اولیه است، و مقادیر سوگ برای شمع‌های کوتاه است. معادله بولز بر اساس تغییرشکل $25/4$ میلیمتر (۱ اینچ) است.

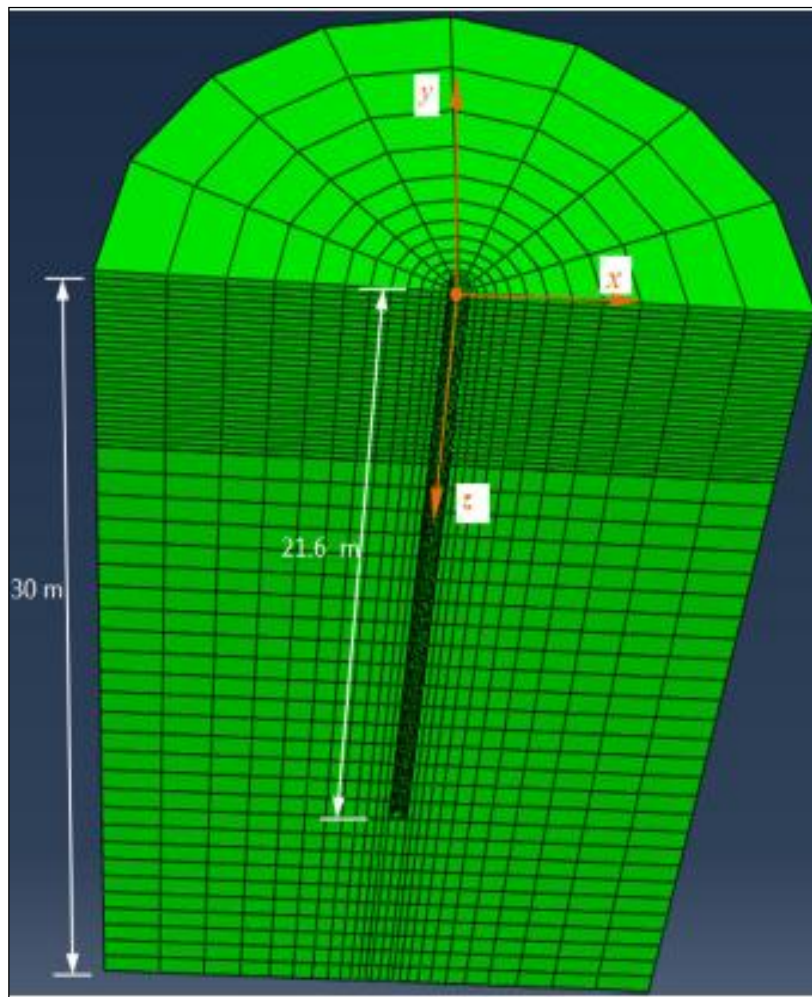


شکل ۲- مقایسه مقادیر k_h بدست آمده از منابع مختلف [۱۱]

۳. تحلیل المان محدود بکار رفته در این تحقیق

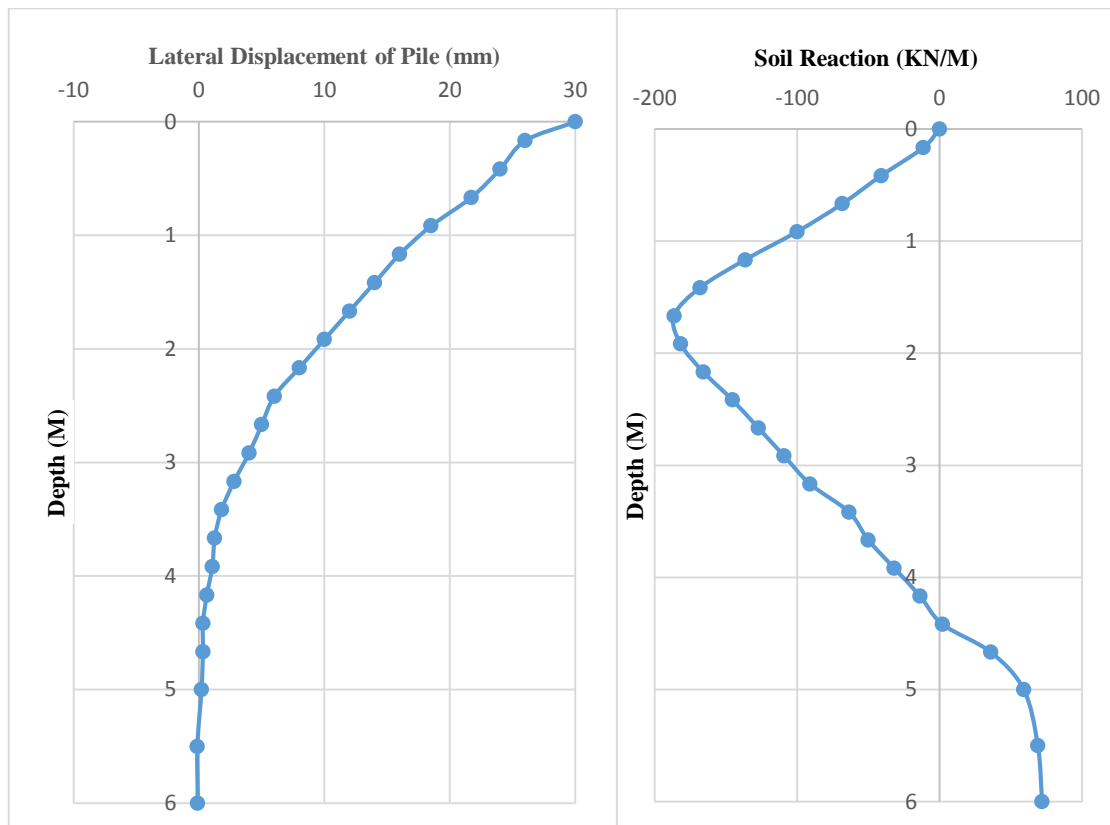
برای محاسبه ضریب عکس‌العمل بستر جانبی خاک ماسه‌ای با استفاده نرم افزارهای المان محدود، از نتایج مقاله عددی هاو لادر و همکاران^۱ (۲۰۱۳) استفاده شد. در این مقاله با استفاده از نرم افزار آباکوس، رفتار شمع فولادی به طول $21/6$ متر و قطر $0/6$ متر در خاک ماسه‌ای تحت بار جانبی بررسی شد. ماسه اطراف شمع با استفاده از مدل موهر کولمب مدلسازی شد. همچنین تغییرات غیرخطی مدول الاستیسیته خاک با میانگین تنش موثر در نظر گرفته شده است. مدل سازی عددی، هندسه، شرایط مرزی و مش المان محدود در شکل ۳ نشان داده شده است. خاکی با محدوده 20 متر قطر و 30 متر طول برای این مدل در نظر گرفته شد. شمع در مرکز خاک قرار دارد.

^۱ Hawlader

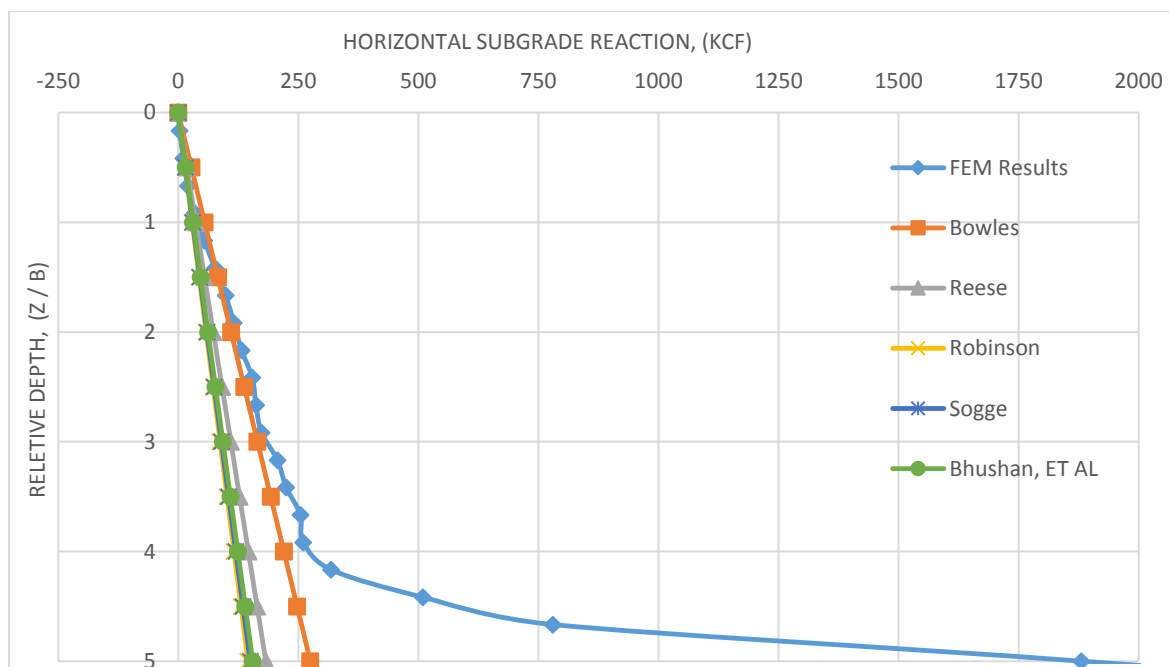


شکل ۳- مدل سازی عددی و مش المان محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس [۱۰]

نمودارهای حاصل از این تحلیل برای حداکثر بار $266/6$ کیلونیوتن، که بار بحرانی وارد بر شمع است، در شکل های ۴ و ۵ نشان داده شده است. در شکل ۴ عکس العمل جانبی خاک در عمق و در شکل ۵ نمودار تغییر شکل جانبی شمع در عمق رسم شده است. با استفاده از این دو نمودار می توان نمودار تغییرات ضریب عکس العمل بستر جانبی k_{11} در مقابل عمق را رسم کرد. شکل ۶ نمودار تغییرات ضریب عکس العمل بستر جانبی k_{11} را برای برخی از روابط پیشین و مدل المان محدود نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می کنید، در نمودار المان محدود سختی فنر با عمق افزایش و با تغییر شکل جانبی کاهش می یابد.



شکل ۴- عکس العمل جانبی خاک برای بار ۲۶۶/۶ کیلونیوتن شکل ۵- تغییر شکل جانبی خاک اطراف شمع برای بار ۲۶۶/۶ کیلونیوتن



شکل ۶- تغییرات ضریب عکس العمل بستر جانبی k_1 در عمق برای شمع فولادی در خاک ماسه‌ای



۴. نتیجه گیری

روابط تجربی و نیمه تجربی همانند جداول و نمودارها برای برآورد ضریب عکس العمل بستر جانبی بررسی شد و نشان می‌دهند که رنج گسترده‌ای از ضریب عکس العمل بستر جانبی بسته به نوع جدول، نمودار و روابط مورد استفاده می‌توان بدست آورد. از بررسی اطلاعات آزمایش‌های بارگذاری شمع موجود، مشاهده می‌شود که در بین فاکتورهای زیادی که بر روی ضریب عکس العمل بستر جانبی اثر دارند، بزرگی تغییر شکل جانبی شمع، فشار روباره موثر و چگالی نسبی خاک نقش مهمی دارند. ضریب عکس العمل بستر جانبی ثابت نیست و با تغییر این پارامترها تغییر می‌کند. در این مقاله تحلیل عددی برای شمع فولادی انعطاف پذیر انجام شد. با توجه به شکل ۶ تغییرات ضریب عکس العمل بستر جانبی با نمودارهای حاصل از روابط بولز و ریسه تطابق خوبی دارد. پس می‌توان در تخمین ضریب عکس العمل بستر جانبی برای شمع‌های بلند و انعطاف پذیر در خاک دانه‌ای، از این روابط استفاده کرد.

۵. مراجع

1. Terzaghi, K., "Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction," *Geotechnique*, vol. 5, No. 4, Dec. 1955, pp. 297-326
2. Johnson, M.S. and Kavanagh, C.T., *The Design of Foundations for Buildings*, McGraw Hill, New York, 1968
3. Navy Design Manual, *Foundations and Earth Structure*, Design Manual 7.2, Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command, May 1982.
4. Robinson, K.E., "Horizontal Subgrade Reaction Estimated From Lateral Loading Tests on Timber Piles," *Behavior of Deep Foundations. STP 670*, American Society of Testing and Materials, Philadelphia, 1979, pp. 250-536
5. Zurabow, G. G. and Bugayeva, D. E., *Vysokie Syaynue Rostverki Mostov*, Moscow, 1949.
6. Soletanche Design Criteria, Permanent Ground Anchors, Final Report No. FHWA/RD-81/50, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Sept. 1982, pp. 18-22
7. Sogge, R.L., "Laterally Loaded Pile Design," *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol.107, No. GT 9, Sept. 1981, pp. 1179-1199
8. Bowles, J. E., *Foundation Analysis and Design*, McGraw Hill, New York, 1982.
9. Reese, L.C. Cox, W. R., and Koop, F. D., "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand", *6th Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Tex., 1974.
10. Md. Iftakharuzzaman and Bipul C Hawlader, "Numerical Modeling of Lateral Response of Long Flexible Piles in Sand", *Geeotechnical Engineering Journal of the SEAGS \$ AGSSEA Vol.44 No.3* September 2013 ISSN 0046-5828, pp. 25-31
11. Habibagahi, K. and Langer, J.A., "Horizontal Subgrade Modulus of Granular Soils," *Laterally Loaded Deep Foundations: Analysis and performance*. ASTM STP 835, J. A. Langer, E. T. Mosley, and C. D. Thompson, Eds., American Society for Testing and Material, 1984, pp. 21-34.
12. Ir. Tan Yean Chin, Ir. Dr. Gue See Sew & Ir. Fong Chew Chung, "Interpretation of Subgrade Reaction from Lateral Load Tests on Spun Piles in soft Ground", *G&P Geotechnics Sdn Bhd*, Kuala Lumpur, Malaysia.