

بررسی تغییرات منحنی های P-Y برای تحلیل شمع های بتن آرمه تحت بار جانبی در اثر شرایط مختلف شمع

جواد هدایتی^۱، مسعود سلطانی محمدی^۲، محمود یزدانی^۳

۱- دانشجوی دکترای زلزله دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار گروه زلزله دانشگاه تربیت مدرس

۳- استادیار گروه خاک و پی دانشگاه تربیت مدرس

hedayati_javad@modares.ac.ir

خلاصه

یکی از روش های تحلیل شمع تحت بار جانبی، استفاده از منحنی های P-Y است. این منحنی ها بر مبنای تحقیقات آزمایشگاهی، برحسب پارامترهای مختلفی همچون نوع، چگالی و مقاومت برشی خاک، قطر شمع و عمق، توسط محققان مختلف و آیین نامه هایی مانند آیین نامه API بیان شده است. ولی به نظر می رسد پارامترهای دیگری نیز در رفتار شمع تحت بار جانبی موثرند که از آن جمله می توان به سختی، نوع، رفتار مصالح و شرایط تکیه گاهی شمع و نیز میزان بار قائم وارد بر شمع اشاره نمود. روش دیگر برای محاسبه منحنی های P-Y، مدل سازی شمع و خاک به صورت محیط پیوسته است. در این روش به راحتی می توان تأثیر کلیه پارامترهای فوق را مورد بررسی قرار داد. در این تحقیق از نرم افزار اجزا محدود COM3 برای مدل سازی شمع (با استفاده از المان فایبر) و خاک اطراف آن (با استفاده از المان ۲۰ گرهی مکعبی) استفاده شده است. پس از مقایسه نتایج حاصل از نرم افزار با نتایج آزمایشگاهی و اعتبارسنجی نرم افزار و مدل ارائه شده، تأثیر پارامترهای مختلف بر منحنی های P-Y با مطالعه پارامتریک مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین نتایج حاصله با روابط آیین نامه ای مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: شمع، منحنی P-Y، مدل محیط پیوسته، COM3

۱. مقدمه

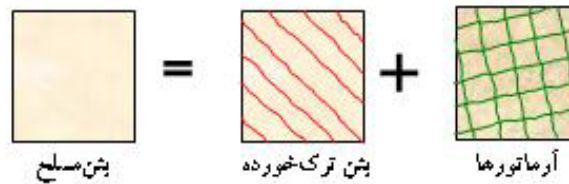
کاربرد شمع در سازه ها، دارای طیف بسیار گسترده ای است که از موارد استفاده آنها می توان به پی ساختمان های بلند ساخته شده در زمین های سست، پی پل ها، پی اسکله ها و ... اشاره کرد. با توجه به کاربرد گسترده شمع ها در سازه های مختلف، بررسی آن تحت بارهای جانبی مانند زلزله اهمیت ویژه ای پیدا می کند. [۱۶ و ۱۷] یکی از روش های تحلیل شمع تحت بار جانبی، استفاده از منحنی های P-Y است. این روش یکی از روش های ساده و در عین حال کارآمد و قابل قبول به منظور مدل سازی خاک بر اساس فرض فترهای غیر خطی وینکلر می باشد که بیان کننده میزان مقاومت بسیج شده خاک (P) در یک عمق دلخواه در برابر خیز جانبی شمع (Y) در همان عمق است. این منحنی ها برای رس ها و ماسه ها به طور جداگانه به ترتیب بر اساس تحقیقات متلاک^۱ [۱] در سال ۱۹۷۰ و پارکر و ریس^۲ [۲] در سال ۱۹۷۰ بدست آمده اند. این منحنی ها بر مبنای تحقیقات آزمایشگاهی، با فرض رفتار خطی برای شمع بدست آمده اند و در آن پارامترهای مربوط به شمع از قبیل نوع شمع، رفتار مصالح، شرایط تکیه گاهی و اثرات ناشی از لاغری و رفتار غیرخطی هندسی و مصالح شمع ها وارد نشده است. روش دیگر برای محاسبه این منحنی ها، مدل سازی شمع و خاک به صورت محیط پیوسته، با در نظر گرفتن المان تماسی بین شمع و خاک است. بدین ترتیب که شمع و خاک با توجه به مشخصات مصالح بتن، فولاد و خاک مدل سازی می شوند. المان تماسی بین شمع و خاک برای در نظر گرفتن جدایش و فرورفتگی و لغزش قرار می گیرد. سپس به روش اجزاء محدود شمع تحت بار جانبی افزایش یافته تحلیل می شود. با مشتق گیری از برش ایجاد شده در شمع، بار گسترده وارد بر طول شمع از طرف خاک بدست می آید که برابر با متغیر P در منحنی P-Y است. متغیر Y از تغییر مکان شمع در ارتفاع های مختلف بدست می آید.

¹ - Matlock

² - Parker & Reese

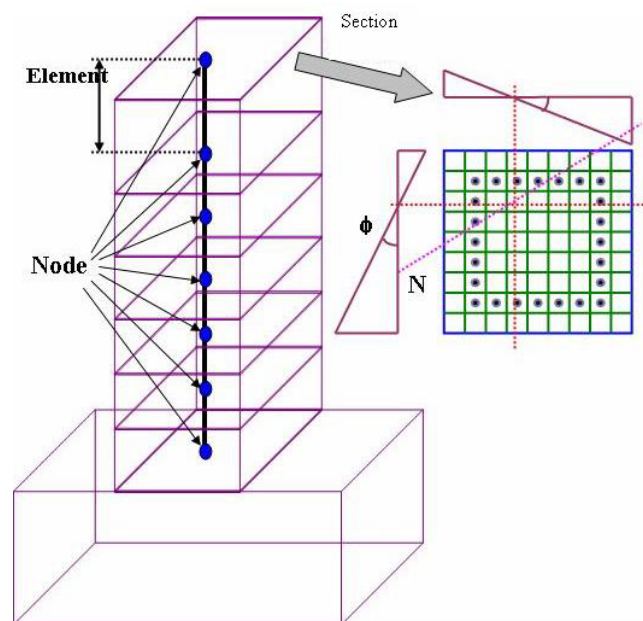
۲. مدل سازی

در این تحقیق مدل سازی شمع و خاک اطراف آن به صورت محیط پیوسته در نرم افزار COM3 انجام شده است. مدل سازی بتن مسلح با استفاده از قوانین رفتاری بتن قبل و بعد از ترک خوردگی و میلگردهای مسلح کننده صورت می گیرد. مکانیزم اصلی و موثر در رفتار غیر خطی اعضاء بتن مسلح ترک خورده با ایده آل سازی قسمت ترک خورده به صورت ترک گسترده و با توجه به معادلات تعادل و شرایط سازگاری و استفاده از مدل های رفتاری متوسط بتن و فولاد مدل می گردد. در این تحقیق از معادلات رفتاری که در دانشگاه توکیو توسط مایکاو^۱ و اکامورا^۲ توسعه یافته است استفاده شده که از ترکیب مدل رفتاری بتن و میلگرد ایجاد می گردد (شکل ۱). این معادلات رفتاری، رابطه بین تنش متوسط - کرنش متوسط هستند [۳].



شکل ۱ - نحوه مدل سازی المان صفحه ای بتن مسلح (RC) [۳]

مدل رفتاری خاک که در این تحقیق از آن استفاده شده، مدل خاک اساکي^۳ است که یک رابطه غیرخطی بین تنش برشی و کرنش برشی خاک تعریف می کند. [۴] اطلاعات بیشتر در مورد مدل های رفتاری در مرجع [۳] آمده است. برای المان های منشوری بتن آرمه از قبیل تیرها، ستون ها و شمع ها، می توان از المان های محوری با مقاطع عمودی تعریف شده به نام المان فایبر استفاده نمود (شکل ۲).



شکل ۲ - شکل و مقطع المان فایبر

همانطور که المان صفحه ای سه بعدی قابل تجزیه به صورت یک صفحه دو بعدی با در نظر گرفتن ضخامت آن است، المان قابی نیز قابل تجزیه به حالت یک بعدی با در نظر گرفتن مقطع می باشد. به این صورت که اولاً فرض شده است گسترش سه بعدی حوزه کرنش از مفروضات تئوری اولر-کیرشهوف

¹ -Maaekawa

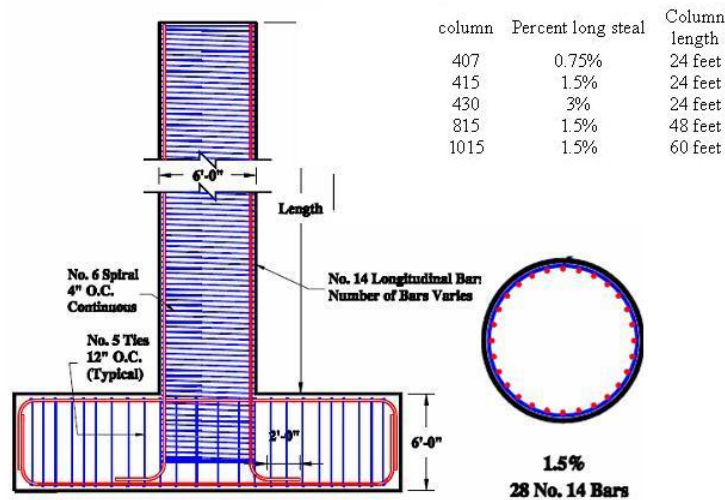
² -Okamura

³ -Ohsaki

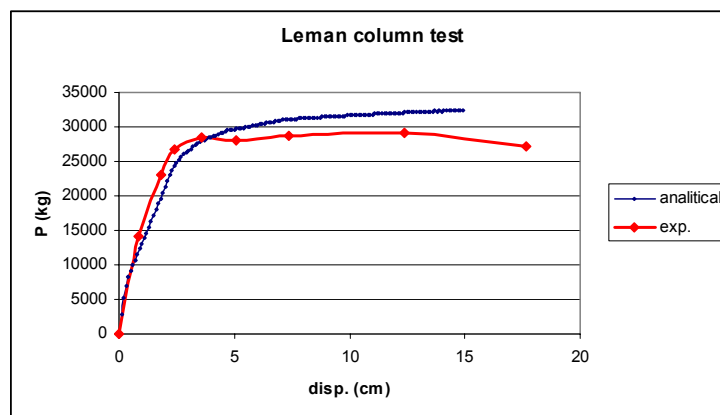
پیروی می کند، یعنی مقطع صفحه ای به صورت یک صفحه (نه لزوما عمود بر محور عضو) باقی می ماند. ثانیا تنش های عرضی که به صورت قائم بر محور عضو اعمال می شوند، ناچیزند. تأثیر تنش های عرضی (محدود کننده) ناشی از وجود خاموت ها می تواند در مدل رفتاری تک محوره مصالح منظور شود. فرضیات اولر-کیرشهوف اجازه می دهد المان سه بعدی ۲۰ گرهی با المان سه بعدی همسانگرد قابی با دو یا سه گره جایگزین شود. هر گره از المان قابی دارای سه درجه آزادی تغییر مکانی و سه درجه آزادی دورانی است [۵].

۳. اعتبارسنجی مدل و نرم افزار

برای بررسی صحت عملکرد المان فایبر در نرم افزار COM3، یک ستون بتنی که نتایج آزمایشگاهی آن موجود است مدل سازی شد. این نتایج آزمایشگاهی توسط لمن و موهل^۱ در سال ۲۰۰۰ ارائه شد که در آن چند نمونه ستون بتنی تحت بار سیکلی قرار گرفت [۶]. یکی از ستون ها به نام ۴۱۵ که تحت آزمایش قرار گرفته بود توسط نرم افزار با المان فایبر مدل سازی شده و تحت بار جانبی افزایشی قرار گرفت. نمای ستون و مقطع آن در شکل ۳ آمده است. همچنین مقایسه نتایج حاصل از تحلیل و نتایج آزمایشگاهی تحت بار جانبی افزایشی در شکل ۴ مشاهده می شود.



شکل ۳ - مشخصات مقطع و ارتفاع ستون



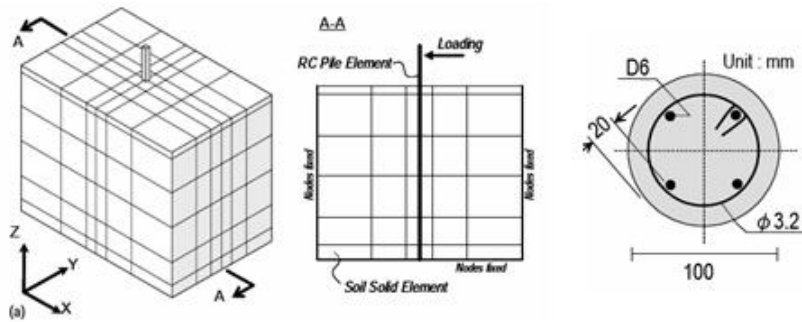
شکل ۴ - مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی برای ستون ۴۱۵ آزمایش Lehman

^۱ -Leman & Moehle

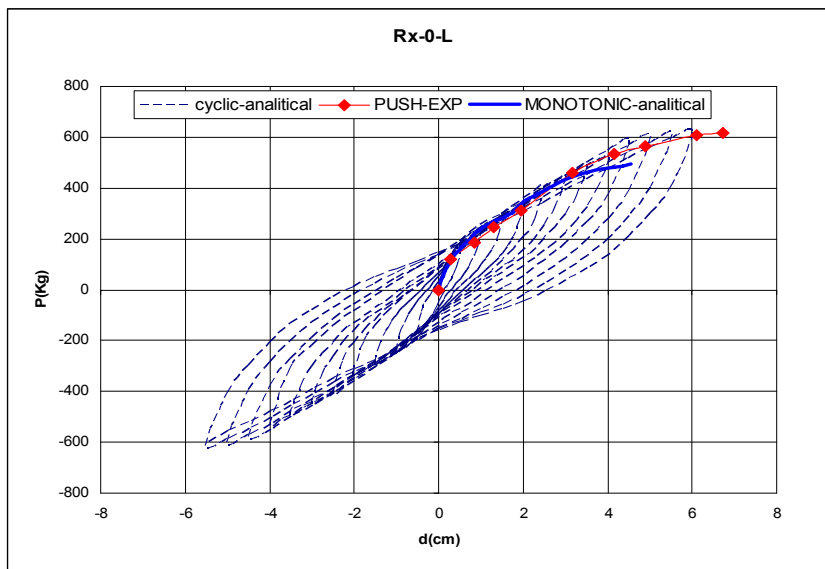
برای کنترل صحت نتایج اندرکنش شمع-خاک تحت بار سیکلی در نرم افزار از نتایج آزمایشگاهی ماکي و ماتسویوشی^۱ [۷ و ۸] در سال ۲۰۰۳ استفاده شد. شمع های این آزمایش با مقطع مربعی و دایره ای به ارتفاع ۱/۵ متر بودند که درون یک محفظه خاک قرار داشتند. پایه این شمع ها به صورت گیردار بوده است. برای نمونه یک مدل از شمع های موجود در این مقاله توسط نرم افزار مدل سازی شد. این مدل با نام RX-0-L دارای شمع با مقطع دایره بدون بار محوری بوده است. خاک مورد استفاده از نوع ماسه سست گیفو^۲ بوده که مشخصات آن در جدول ۱ آمده است. همچنین شکل و ابعاد مقطع و چگونگی مش بندی سیستم در شکل ۵ مشاهده می شود. مقایسه نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی مدل RX-0-L در شکل ۶ آمده است.

جدول ۱ - مشخصات ماسه گیفو

جرم حجمی	چسبندگی	ϕ	درصد تراکم	G_s	نشانه خلا ^e
0.0014 Kg/cm^3	0.01 Kg/cm^2	۲۷/۵ درجه	۵۵/۵ %	۲/۶۴۳	۰/۸۹۹



شکل ۵ - مشخصات مقطع و چگونگی مش بندی سیستم



شکل ۶ - مقایسه نتایج مدل RX-0-L

همانطور که در شکل مشاهده می شود در نمودار مربوط به مدل RX-0-L پوش نمودار آزمایشگاهی، همخوانی خوبی با نمودار مونوتونیک و سیکلی دارد. لازم به ذکر است برای بررسی منحنی های P-Y مدل فوق مبنا قرار داده شده است.

¹ -Maki & Mutsuyoshi

² -Gifu sand

۴. روابط آیین نامه‌ای برای محاسبه منحنی‌های P-Y [۲]

همان‌طور که اشاره شد بررسی‌های مربوط به منحنی‌های P-Y بر مبنای مدل ارائه شده در بخش قبل انجام شده است که در آن از خاک ماسه‌ای استفاده شده است. لذا در این بخش تنها روابط مربوط به خاک‌های ماسه‌ای بر مبنای تحقیقات پارکر و ریس که در آیین‌نامه API^۱ آمده است، ارائه می‌شود که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$p = \eta A p_u \tanh \left[\frac{K dx}{A p_u} y \right] \quad (1)$$

$$p_u = \min(p_{u1}, p_{u2}) \Rightarrow \begin{cases} p_{u1} = (c_1 x + c_2 d) \lambda' x \\ p_{u2} = c_3 d \lambda' x \end{cases} \quad (2)$$

$$c_1 = \frac{k_0 \tan \phi \sin \beta}{\tan(\beta - \phi) \cos \alpha} + \frac{\tan^2 \beta \tan \alpha}{\tan(\beta - \phi)} + k_0 \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) \quad (3)$$

$$c_2 = \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} - k_a \quad (4)$$

$$c_3 = k_0 \tan \phi \tan^4 \beta + k_a (\tan^8 \beta - 1) \quad (5)$$

در رابطه بالا x عمق و y تغییر شکل جانبی شمع در عمق مورد نظر و d قطر شمع است. η پارامتر مربوط به شکل شمع است که برای شمعهای مدور و منشوری برابر یک می‌باشد. A ضریبی است که بستگی به بارگذاری استاتیکی یا تناوبی دارد که در حالت سیکیلی برابر 0.9 و در حالت استاتیکی برابر 0.8 با $3 - 0.8(x/d) \geq 0.9$ منظور می‌شود. K مدول اولیه عکس العمل بستر، که تابعی از زاویه اصطکاک داخلی بوده و می‌توان آن را از نمودار 6.8.7-1 آیین‌نامه API که در شکل ۷ آمده است، بدست آورد.

γ' وزن واحد حجم موثر خاک است. همچنین k_0 ضریب فشار جانبی خاک است که در حالت سکون که از رابطه $1 - \sin \phi$ بدست می‌آید. ϕ زاویه اصطکاک داخلی موثر ماسه، $\beta = \frac{\phi}{2} + 45$ ، $\alpha = \frac{\phi}{2}$ و k_a فشار محرک رانکین می‌باشد که برابر با $\tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right)$ می‌باشد.

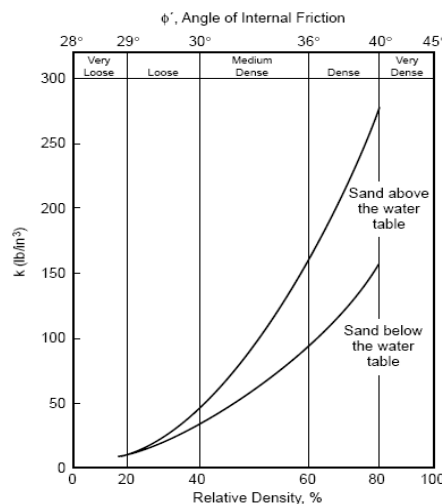


Figure 6.8.7-1—Relative Density, %

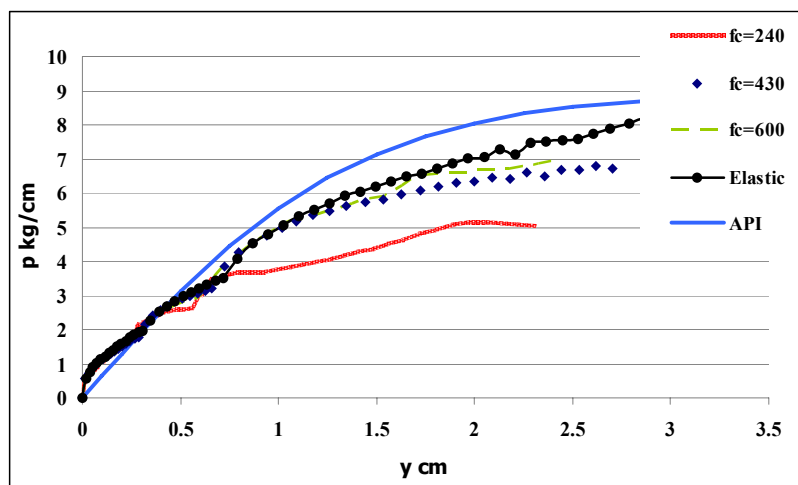
شکل ۷ - نمودار محاسبه ضریب عکس‌العمل بستر [۲]

¹ American Petroleum Institute

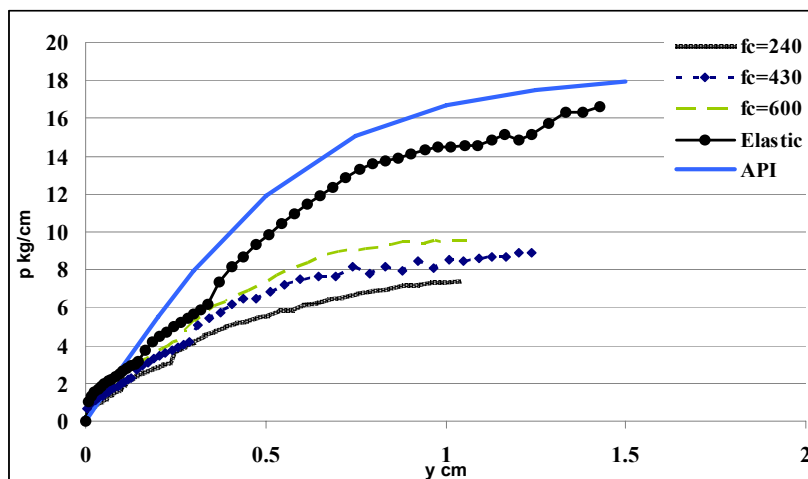
همان‌طور که مشاهده می‌شود، در روابط فوق پارامترهای مربوط به شمع وجود ندارند و پارامتر d که در روابط آمده است عرض گوه گسیختگی خاک را مشخص می‌کند و بقیه پارامترها مربوط به خاک هستند.

۵. مطالعه پارامتریک

همان‌طور که در شکل ۵ مشاهده شد مدل‌سازی اندرکنش شمع و خاک با استفاده از این نرم‌افزار و مدل‌های رفتاری که به آن اشاره شد به خوبی قابل انجام است. با توجه به این موضوع منحنی‌های $P-Y$ با مدل محیط پیوسته قابل محاسبه است. لذا برای بررسی تاثیر مقاومت بتن، بر منحنی $P-Y$ و مقایسه آن با منحنی ارائه شده در آیین‌نامه API، مدل معرفی شده در بخش قبل با مقاومت‌های ۲۴۰، ۴۳۰ و ۶۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و همچنین یک نمونه نیز با مدل رفتاری الاستیک تحت بار جانبی افزایش یافته تحلیل شد. برای نمونه در دو عمق ۶۵ و ۹۵ سانتیمتر منحنی‌های $P-Y$ ، با مشتق‌گیری عددی برش در طول شمع بدست آمد. همچنین با توجه به پارامترهای خاک مورد استفاده و روابط آیین‌نامه‌ای که به آن اشاره شد، منحنی مربوط به آیین‌نامه API نیز بدست آمد. منحنی‌های مربوط به عمق ۶۵ سانتیمتر در شکل ۸ و منحنی‌های مربوط به عمق ۹۵ سانتیمتر در شکل ۹ مشاهده می‌شود.



شکل ۸ - مقایسه منحنی‌های $P-Y$ در عمق ۶۵ سانتیمتری

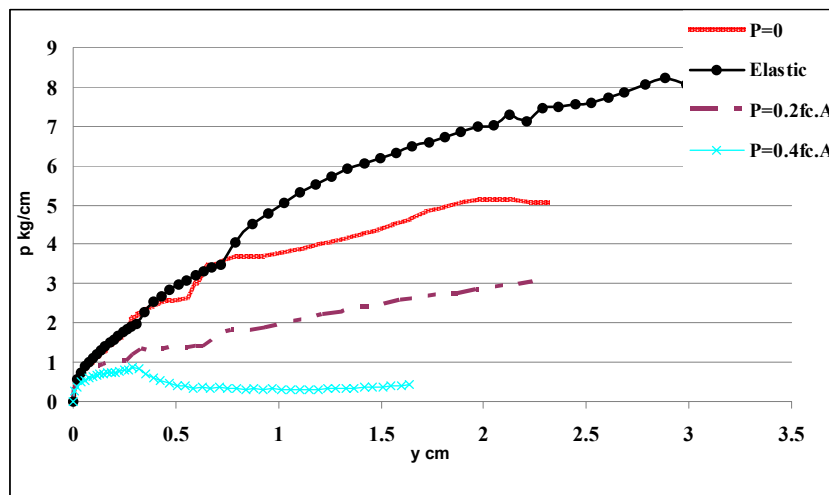


شکل ۹ - مقایسه منحنی‌های $P-Y$ در عمق ۹۵ سانتیمتری

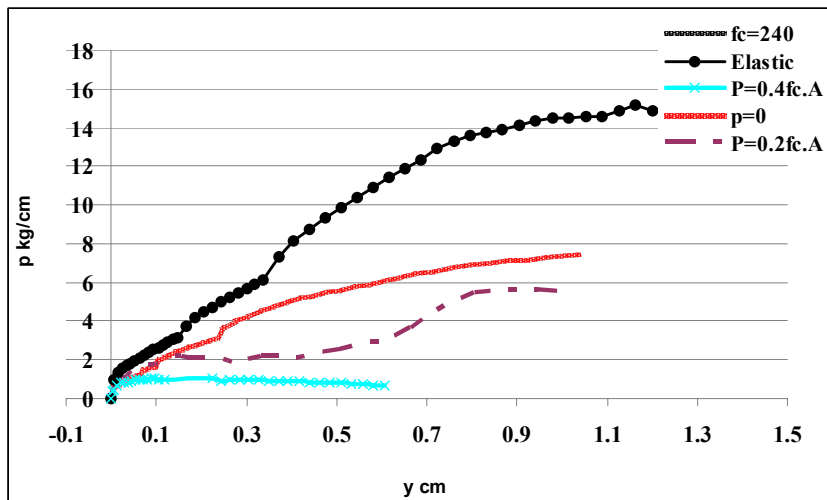
همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاف مشهودی بین نمودارهای بدست آمده از روش محیط پیوسته و روش API وجود دارد. ولی شکل کلی نمودار یکسان است. در محدوده خطی اختلافی بین منحنی‌ها وجود ندارد ولی در محدوده غیر خطی میزان P_{II} با کاهش مقاومت فشاری شمع کاهش یافته

است که این موضوع نشان می‌دهد رفتار غیرخطی مصالح شمع در اندرکنش خاک با شمع موثرند و باعث تغییر در منحنی‌های P-Y می‌شوند. همچنین می‌توان دید که نموداری که از تحلیل الاستیک بدست آمده به منحنی بدست آمده از روش API بسیار نزدیک است.

مورد دیگری که می‌تواند بر روی منحنی‌های P-Y مؤثر باشد، وجود و یا عدم وجود منحنی بار محوری بر روی شمع‌های لاغر و اثرات غیرخطی هندسی است. با توجه به اینکه در بسیاری از موارد کاربرد شمع انتقال بار از سطوح سست به اعماق پایین‌تر می‌باشد، در نتیجه این مورد می‌تواند بسیار مهم باشد. بدین منظور در دو مدل، ابتدا بارهای محوری معادل ۲۰ و ۴۰ درصد ظرفیت باربری شمع ($f'_c \times A$) به شمع اعمال شد و سپس شمع تحت بار جانبی افزایش یافته قرار گرفت. نتایج مربوط به این تحلیل‌ها در مقایسه با حالت بدون بار محوری و حالت الاستیک در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ آمده است.



شکل ۱۰- مقایسه منحنی‌های P-Y تحت نیروهای محوری مختلف در عمق ۶۵ سانتیمتر با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی هندسی



شکل ۱۱- مقایسه منحنی‌های P-Y تحت نیروهای محوری مختلف در عمق ۹۵ سانتیمتر با در نظر گرفتن اثرات غیر خطی هندسی

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این مورد میزان کاهش P_{II} بسیار زیاد است و هرچه میزان بار محوری افزایش می‌یابد این کاهش بیشتر به چشم می‌خورد. این مورد می‌تواند دلیل وجود لنگرهای ثانویه در اثر تغییر شکل‌های جانبی ناشی از اعمال اثرات غیرخطی هندسی باشد.



۶. نتیجه گیری

همان‌طور که مشاهده شد، علاوه بر مشخصات ژئوتکنیکی، رفتار غیرخطی هندسی و مصالح شمع و همچنین میزان بار محوری اعمالی بر شمع در اندرکنش سازه شمع با خاک تاثیر گذار است. همچنین با توجه به موارد فوق می‌توان نتیجه گرفت که نوع شمع و نیز شرایط تکیه گاهی آن نیز می‌تواند در منحنی‌های P-Y تاثیر بگذارد که با توجه به محدودیت حجم مقاله امکان ارائه نتایج آن وجود ندارد. اگرچه در بسیاری از آیین‌نامه‌ها و دستورالعمل‌ها توصیه می‌شود شمع طوری طراحی شود که در محدوده خطی باقی بماند اما ترک خوردگی در شمع‌های بتنی به عنوان اولین نقطه آغاز رفتار غیرخطی اجتناب ناپذیر است و از طرفی برخی محققین بر این اعتقادند که در بعضی موارد تشکیل مفصل پلاستیک در شمع می‌تواند باعث بهبود عملکرد لرزه‌ای سازه متکی بر شمع شود [۱۰ و ۹]. در طراحی به روش حدی نهایی نیز، نیاز به ظرفیت نهایی شمع‌ها می‌باشد. لذا در این موارد باید نسبت به استفاده از منحنی‌های P-Y معرفی شده در آیین‌نامه‌ها احتیاط نمود. همچنین با توجه به اینکه محاسبه منحنی‌های P-Y با در نظر گرفتن همه پارامترهای موثر به سادگی امکان‌پذیر نمی‌باشد، مدل‌سازی محیط پیوسته اندرکنش خاک-شمع با اعمال اثرات غیر خطی خاک و شمع می‌تواند گزینه مناسبی در بررسی این موضوع باشد.

۷. مراجع

1. Branderberg S. J., (2005) "Behaviour of pile foundation in liquefied and laterally spreading ground," PhD thesis, University of California, Davis.
2. American Petroleum Institute (2000), "API Recommend Practice 2A-WSD (RP 2A-WSD)" Twenty-first Edition.
3. Okamura H., Maekawa K., (1991), "Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete," Tokyo, Japan: Gihodo-Shuppan.
4. Maekawa K., Pimanmas A., Okamura H., (2003), "Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete," SPON Press.
5. Maekawa K., (2006), "GENERAL INFORMATION for COM3 Version 9.11 in MULTI-COM," Department of Civil Engineering, University of Tokyo.
6. Lehman D. E., Moehle J. P., (2000), "Seismic Performance of Well-Confined Concrete Bridge Columns," PEER Report, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.
7. Maki T., Mutsuyoshi H., (2004), "Seismic behavior of reinforced concrete piles under ground," Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 2, no. 1, pp. 37-47.
8. Maki T., Maekawa K., Mutsuyoshi H., (2005), "RC pile-soil interaction analysis using a 3D-finite element method with fiber theory- based beam elements," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, John Wiley & sons, 99, pp. 1-26.
9. Hutchinson T. C., Boulanger R. W., Chai Y. H., Idriss I. M., (2002), "Inelastic Seismic Response of Extended Pile Shaft Supported Bridge Structures," PEER Report, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.
10. Sugita H., Tanimoto S., (2002), "Seismic performance of bridge foundation with hinge at pile head," Proceedings of the 22nd US-Japan Bridge Engineering Workshop, pp.202-212.