

## تحلیل عددی اثر خصوصیات مقاومتی فصل مشترک شمع - خاک بر سختی جانبی منحنی‌های p-y\*

(یادداشت پژوهشی)

حسن شرفی<sup>(۱)</sup> یزدان شمس‌ملکی<sup>(۲)</sup>

**چکیده** بررسی ظرفیت باربری جانبی شمع‌های تحت بار جانبی در مجاورت زمین‌های شیب‌دار و همچنین زمین‌های مسطح از جمله موضوعات مورد بحث در زمینه مهندسی شالوده‌های عمیق در دهه‌های اخیر می‌باشد. برآورد میزان سختی جانبی لایه‌های خاک، یا به شکل دیگر ضریب واکنش بستر جانبی، چالشی قدیمی در زمینه تشکیل منحنی‌های p-y تجربی (آزمایشگاهی) و تئوری بوده است. در این مقاله به کمک تحلیل‌های عددی صورت گرفته در نرم‌افزار تفاضل محدود سه‌بعدی FLAC<sup>3D</sup> اقدام به برآورد سختی جانبی خاک تابع عمق z در طول شمع‌های بتنی در عمق‌های مختلف در زمین‌های شیب‌دار و مسطح و در انواع خاک‌های چسبنده، اصطکاکی (دانه‌ای) و مختلط از نوع c-φ شده است. به منظور برآورد سختی جانبی خاک در عمق‌های مختلف به کمک این روش عددی، منحنی‌های p-y در عمق‌های مختلف در طول شمع بتنی با مقطع دایروی تحت بارگذاری جانبی استاتیکی تا حد تسلیم خاک استخراج شده است. از چندجمله‌ای درجه ششم برای تقریب رابطه مابین سختی جانبی خاک و پارامترهای بدون بعد مشخصه‌های هندسی و مقاومتی خاک، شمع و فصل مشترک شمع-خاک استفاده شده است که برای مؤلفه چسبندگی خاک به چندجمله‌ای درجه چهار کاهش یافته است. در پایان مقاله به منظور صحت‌سنجی روش عددی استخراج منحنی‌های p-y در این تحقیق، تعدادی آزمایش‌های معتبر بارگذاری جانبی شمع باروش تحقیق حاضر، مورد بررسی قرار گرفته‌اند و منحنی‌های بار-تغییر مکان سر شمع برای آنها محاسبه شده است. نتایج صحت‌سنجی، توافق خوبی مابین نتایج آزمایش‌ها و روش عددی تحقیق حاضر به دست می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی** شمع تحت بار جانبی، سختی جانبی خاک، منحنی‌های p-y تحلیل سه‌بعدی تفاضل محدود، روابط تجربی.

### Numerical Analysis of Pile-Soil Interface Strength Properties Effects on the Lateral Stiffness of p-y Curves

H. Sharafi

Y. Shams Maleki

**Abstract** Investigation of lateral bearing capacity of piles under lateral loading in the vicinity of soil slopes and level ground is one of the interesting issues in the engineering of the deep foundations in recent decades. In the meantime, the estimation of lateral stiffness of soil layers, coefficient of soil reaction,  $k_s$ , is an old challenge on the basis of the creation of empirical (testing) and theoretical p-y curves. In this paper, we attempt to estimate lateral soil stiffness in the length of concrete piles in various depths in sloped ground and level ground and in the all type of soils, including cohesive soil, frictional (granular) soil and mixed soil, i.e. c-φ soil with the aid of numerical analysis in three dimensional finite difference software, Flac<sup>3D</sup>. For the purpose of estimating lateral soil stiffness,  $K_i$ , in different depths by means of this numerical method, the p-y curves have been derived in several depths in the length of concrete pile with circular section under static lateral loading up to the threshold of the yielding of soil materials. The empirical relationship established between soil lateral stiffness  $K_i$  and the effective dimensionless parameters on the  $K_i$  in general is calculated as a six order polynomial, and this six order polynomial reduces to a fourth order polynomial for the cohesion component of the soil. At the end of the paper, some well documented lateral loading tests by the present numerical method have been investigated for validation of the numerical method of derivation of the p-y curves and pile-head load deflection curves, H-y curves have been calculated and are compared with other results obtained by other researchers and methods. There are good agreements between test results and the results obtained from the numerical method presented in this paper.

**Key Words** Pile under Lateral Loading, Soil Lateral Stiffness, p-y Curves, Three Dimensional Finite Difference Analysis, Empirical Relationships.

\* تاریخ دریافت مقاله ۹۳/۱۰/۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۵/۲/۱ می‌باشد.

Email: H\_sharafi@razi.ac.ir

(۱) نویسنده مسئول، استادیار، گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

(۲) دانشجوی دوره دکتری، مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه.

### مقدمه و دامنه پژوهش

شمع‌های بتنی درجاریز تحت بار جانبی استاتیکی از جمله شالوده‌های عمیق پر کاربرد در پروژه‌های مختلف مهندسی عمران می‌باشند. پیچیدگی‌های بارگذاری جانبی شمع‌ها، در مقایسه با بارگذاری محوری شمع، موضوع شمع‌های تحت بار جانبی را از جنبه‌های گوناگونی از سایر انواع بارگذاری‌های شالوده‌های شمعی متمایز ساخته است. از جمله جنبه‌های این تمایز، پیچیدگی رفتار واقعی خاک به عنوان محیطی پیوسته متشکل از سه فاز دانه‌های جامد، آب و هوا می‌باشد. در سال‌های اخیر به منظور برآورد ظرفیت باربری جانبی شمع‌ها عمدتاً از روابط مربوط به نظریه تیر بر شالوده غیرخطی وینکلر (BNWF) استفاده شده است [1]. در این نظریه محیط پیوسته خاک اطراف شمع با تعدادی فنر با سختی غیرخطی مدل‌سازی می‌شود و رفتار شمع بتنی به مثابه تیری ارتجاعی که بر این بستر فنری اتکا دارد، مدل‌سازی می‌گردد. در حقیقت در این روش، سختی فنرهایی که برای مدل‌سازی خاک در طول شمع و در عمق خاک به کار می‌روند، در واحد عمق (همان طول شمع) متغیر است و در حین افزایش عمق افزایش می‌یابد. برآورد میزان عددی این سختی جانبی که رابطه تنگاتنگی با ضریب عکس‌العمل بستر جانبی دارد، موضوع تحقیق مقالات متعددی در طول چند دهه اخیر بوده است. پس از این مرحله بر مبنای میزان سختی جانبی محاسبه شده در عمق‌های مختلف در طول شمع، محققان به ارائه روابط و منحنی اندرکنش خاک - شمع برای بارگذاری جانبی، منحنی‌های  $p-y$  پرداخته‌اند. در ویرایش اخیر مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان [۲]، سه گونه سازوکار برای گسیختگی خاک و شمع در حین بارگذاری جانبی در نظر گرفته شده است. در سازوکار اول فقط خاک اطراف شمع گسیخته می‌گردد و در سازوکار دوم در خود شمع به دلیل ضعف سازه‌ای شمع، گسیختگی سازه‌ای اتفاق می‌افتد و نهایتاً در سازوکار سوم، گسیختگی مرکب رخ می‌دهد، به طوری که در آن هر دو مصالح شمع و خاک دچار ضعف و گسیختگی می‌شوند [۲]. بدیهی است که به دلیل

تفاوت عمده بین خصوصیات مقاومتی شمع (بتنی یا فولادی) و خاک (از جمله اختلاف سختی مصالح شمع و خاک) در حین بارگذاری جانبی، در عمق‌های سطحی‌تر، ابتدا مکانیزم گسیختگی خاک رخ می‌دهد. منحنی‌های اندرکنش جانبی  $p-y$  هذلولوی در سال‌های اخیر به دفعات مختلف در منابع و مقالات متعدد پیشنهاد شده‌اند. از طرفی به سبب رفتار غیرخطی ارتجاعی - خمیری خاک و وجود گام خمیری (یعنی خط افقی در شکل این منحنی‌ها)، به نظر می‌رسد که به خوبی می‌توانند بیانگر رفتار غیر-خطی باربری جانبی خاک باشند.

### مرور ادبیات فنی موضوع

در این تحقیق منحنی‌های  $p-y$  برای عمق‌های مختلف در طول یک شمع بتنی دایروی به کمک روش تفاضل محدود سه بعدی صریح در نرم‌افزار FLAC3D استخراج شده‌اند [3]. سپس مقادیر شیب بخش ابتدایی این منحنی‌ها به منظور محاسبه سختی جانبی خاک و تشکیل منحنی‌های  $p-y$  هذلولوی در عمق‌های مختلف در طول شمع مورد محاسبه قرار گرفته است. منحنی‌های  $p-y$  برای بررسی رفتار اندرکنشی شمع و خاک تحت بارگذاری جانبی در طول چند دهه اخیر مورد مطالعه قرار گرفته است [4]. مؤلفه  $p$  در این منحنی‌ها پاسخ، عکس‌العمل یا فشار خاک بر حسب واحد (نیرو/ واحد طول شمع) و مؤلفه  $y$  در این منحنی‌ها مقدار تغییر شکل (تغییر مکان) جانبی شمع نسبت به راستای عمود بر جهت محوری شمع (یعنی طول شمع) بر حسب واحد (طول) می‌باشد. تاکنون منحنی‌های  $p-y$  برای انواع خاک‌های رسی نرم تا سخت زهکشی شده یا نشده، خاک‌های ماسه‌ای در زیر تراز آب زیرزمینی یا بالای آن و برخی از سنگ‌ها استخراج شده است [4]. رویکرد جدیدی که طی سال‌های اخیر برای بررسی شکل منحنی‌های  $p-y$  مورد بررسی قرار گرفته است، رهیافت منحنی‌های  $p-y$  هذلولوی می‌باشد. اخیراً [5,6] به استخراج منحنی‌های  $p-y$  به کمک روش اجزای محدود سه بعدی در نرم‌افزار PLAXIS3D Foundation [7] برای شمع‌های بتنی

چسبنده- اصطکاکی ارائه شده اند [4]. انواع حالات و شرایط اثرگذار مختلف برای خاک در زمینه‌های زهکشی یا عدم زهکشی، مجاورت شمع با شیب یا زمین مسطح، میزان تراکم خاک، عمق خاک، اثر موقعیت تراز آب زیرزمینی، مشخصات هندسی و مکانیکی شمع در این منحنی‌های پیشنهادی در نظر گرفته شده است [4]. علی‌رغم این نکات قوت، ضعف‌ها و نواقصی نیز در برآورد منحنی‌های  $p-y$  به کمک این روش‌های نظری و آزمایشگاهی وجود دارد. از آن جمله می‌توان به نوع مصالح شمع استفاده شده در بیشتر آزمایش‌های بارگذاری جانبی شمع اشاره نمود که بیشتر از نوع شمع‌های فولادی هستند و کمتر شمع بتنی، به دلیل سختی شرایط ساخت و بارگذاری، مورد توجه قرار گرفته است [4]. با اینکه به‌طور کلی رفتار مقاومت مصالح فولادی و بتن مسلح کاملاً متفاوت است. از جمله دیگر مشکلات، تمرکز این روش‌ها بر تغییر مکان‌های بسیار کوچک سرشمع است و پیش‌بینی مناسبی از رفتار  $p-y$  شمع در تغییر مکان‌های بزرگ‌تر سرشمع به دست نداده‌اند. از جمله ضعف‌های دیگر موجود در خصوص استخراج منحنی‌های  $p-y$  برای عمق‌های مختلف در روش‌های نظری فعلی، الگوی تکراری و موازی در شکل این منحنی‌ها، برای عمق‌های مختلف در طول شمع است. در حالی که در آزمایش‌های واقعی [10] دیده شده که الگوی منحنی‌های اندرکنشی  $p-y$  در عمق‌های مختلف در طول شمع متفاوت از یکدیگر است و همگی آنها در شرایط تغییر مکان  $y$  و فشار جانبی خاک  $p$  ثابت، رفتار و شکلی یکسان و موازی ندارند.

به علاوه بیشتر روش‌های نظری موجود شکل درستی از مراحل ارتجاعی خطی، ارتجاعی غیرخطی و خمیری در رفتار خاک در حین بارگذاری جانبی روی شمع را نشان نمی‌دهند [4]. با توجه به طبیعت رفتار ارتجاعی-خمیری به شدت غیرخطی خاک، در سال‌های اخیر، مدل «هذلولوی»، یا «هایپرولیک»، شکل (۱)، در تعریف منحنی‌های  $p-y$  مورد استفاده فراوانی قرار گرفته است. این معیار تا حدود بسیار زیادی به رفتار ارتجاعی-

با مقطع دایروی مجاور شیب‌های رسی زهکشی نشده اقدام شده است. آنها نیز از معیار منحنی  $p-y$  هذلولوی استفاده کرده‌اند [5]. میزان حداکثر تغییر مکان جانبی  $y_{max}$ ، که برای شمع در نظر گرفته شده است، در محدوده‌ای مابین ۰/۵ تا ۱ برابر قطر شمع‌ها می‌باشد [5]. قطر شمع‌ها هم در تحلیل‌های مختلف برابر ۰/۵ تا ۲ متر در نظر گرفته شده است. در این تحقیق اثر خصوصیات مقاومتی فصل مشترک شمع- خاک از قبیل چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی این ناحیه، بر میزان سختی اولیه (یعنی شیب بخش ابتدایی) منحنی‌های  $p-y$  مورد مطالعه قرار گرفته است. تحلیل‌های عددی تفاضل محدود سه بعدی (3D-FDA) مجزایی [3] در خصوص برآورد سختی جانبی مؤلفه‌های مختلف خاک شامل مؤلفه‌های چسبندگی، مؤلفه اصطکاک داخلی و اثر توأمان این دو مؤلفه از خاک، در خاک‌های از نوع  $c-\phi$  صورت گرفته است. معیار مقاومت برشی کولمب [3] بدین منظور در تحلیل‌های نرم‌افزاری برای تعریف رفتار مصالح در فصل مشترک شمع- خاک به کار برده شده است. از این معیار در سال‌های اخیر برای تعریف فصل مشترک شمع- خاک در تحلیل‌های تفاضل محدود استفاده‌های زیادی شده است، از آن جمله می‌توان به مطالعه گروه شمع‌ها در خاک چسبنده [8] و گروه شمع‌ها در خاک دانه‌ای [9] اشاره نمود. بارگذاری صورت گرفته در سرشمع‌های این تحقیق از نوع بارگذاری استاتیکی می‌باشد. در حقیقت در این تحقیق، بررسی اثر بارگذاری استاتیکی [3] بر میزان سختی جانبی خاک بسیج شده در عمق‌های مختلف اطراف شمع تحت بار جانبی در دو حالت زمین مسطح و مجاور شیب خاکی مورد تحقیق قرار گرفته است.

### مروری بر منحنی‌های هذلولوی

به منظور بررسی اندرکنش خاک و شمع‌های تحت بار جانبی استاتیکی، منحنی‌های اندرکنش انتقال بار جانبی، به شکل منحنی‌های  $p-y$  پیشنهاد شده است. این منحنی‌ها برای انواع خاک‌های چسبنده، اصطکاکی و مخلوط

انتهای شمع در محیط خاک به صورت شناور قرار گرفته و در مقابل دوران و انتقال آزاد می‌باشد. المان‌های فصل مشترک استوانه‌ای شکل، سه‌گانه‌ای، در اطراف سطح جانبی شمع به کار برده شده است. برای تعریف رفتار مصالح فصل مشترک شمع - خاک از معیار مقاومت برشی کولمب استفاده شده است [3].

این معیار قادر به در نظر گرفتن پارامترهای مقاومتی از خاک از قبیل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و زاویه اتساع در محل فصل مشترک شمع - خاک می‌باشد [3]. همچنین این معیار قادر به نفوذپذیر یا ناتراوا فرض کردن المان‌های فصل مشترک از طریق لحاظ یا عدم لحاظ فشارهای آب حفره‌ای می‌باشد.

برای مدل‌سازی سختی نسبی بین محیط خاکی و مصالح بتنی شمع، از سختی‌های نرمال  $k_n$  و برشی  $k_s$  در تعریف فصل مشترک شمع - خاک استفاده شده است. مقدار سختی‌های نرمال و برشی برابر ۲۰۰۰ مگاپاسکال بر متر در نظر گرفته شده است. رابطه عمومی تعریف معیار مقاومت برشی کولمب در فصل مشترک شمع - خاک، حداکثر نیروی برشی در محل گره‌های فصل مشترک را به شکل زیر محدود می‌کند:

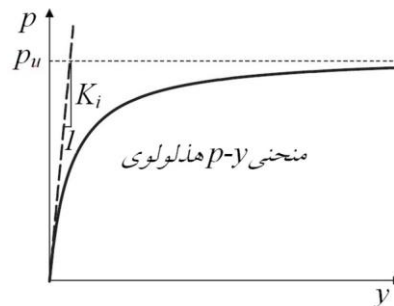
$$F_{s \max} = c_{\text{int}} A + \tan \phi_{\text{int}} (F_n - pA) \quad (2)$$

که در این رابطه  $c_{\text{int}}$  چسبندگی در طول فصل مشترک،  $\phi_{\text{int}}$  زاویه اصطکاک مصالح فصل مشترک،  $p$  فشار آب حفره‌ای که در این مطالعه برابر صفر فرض شده است،  $A$  مساحت نمایش دهنده متناسب با هر گره فصل مشترک،  $F_{s \max}$  حداکثر نیروی برشی در محل گره‌های المان‌های مثلثی فصل مشترک و  $F_n$  نیروی نرمال محاسبه شده در محل گره‌های فصل مشترک شمع - خاک است. در این تحقیق سه تحلیل مجزا فقط برای مؤلفه چسبندگی خاک با سه نسبت مقاومتی  $c_{\text{int}}/c_{\text{soil}}$  برابر صفر و نیم و یک و سه تحلیل مجزا برای مؤلفه اصطکاک خاک، یعنی نسبت زوایه اصطکاک داخلی مصالح فصل مشترک به مصالح خاکی معادل  $\tan \phi_{\text{int}} / \tan \phi_{\text{soil}}$  برابر صفر (zero) و نیم (half) و یک (full) و همچنین در تحلیل هر دو مؤلفه

خمیری غیرخطی خاک نزدیک است و براساس یافته‌های عددی مطالعه حاضر مشخص شده است که در بارگذاری‌های استاتیکی منحنی‌های  $p-y$  برای انواع مؤلفه‌های خاک از قبیل چسبندگی، اصطکاک و اثر توأمان این دو، به شکل هذلولوی است. درحقیقت در فضای دوبعدی  $p-y$  منحنی‌ها دارای یک بخش ارتجاعی (خطی و غیرخطی) شیب‌دار و یک بخش خمیری (خط افقی در منحنی‌ها) هستند، که به خوبی رفتار ارتجاعی - خمیری غیر خطی خاک را نشان می‌دهند. شکل کلی رابطه منحنی  $p-y$  هذلولوی به شکل معادله (۱) در زیر ارائه شده است [5,6]:

$$p = \frac{y}{\frac{1}{K_i} + \frac{y}{p_u}} : \text{unit} \left( \frac{F}{L} \right) : \left( \frac{N}{m} \right) \quad (1)$$

که در این رابطه  $y$  تغییر شکل جانبی شمع،  $p$  فشار (مقاومت یا عکس‌العمل) ایجاد شده در خاک در واحد طول شمع،  $p_u$  مقاومت نهایی خاک در واحد طول شمع و  $K_i$  سختی بخش ابتدایی منحنی‌های  $p-y$  برحسب یکای تنش (یعنی نیرو / سطح) می‌باشد.



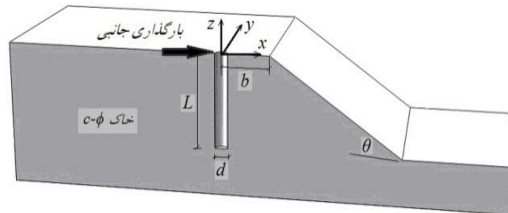
شکل ۱ منحنی  $p-y$  هذلولوی به همراه نمایش سختی جانبی  $K_i$

### جزئیات مدل‌سازی عددی

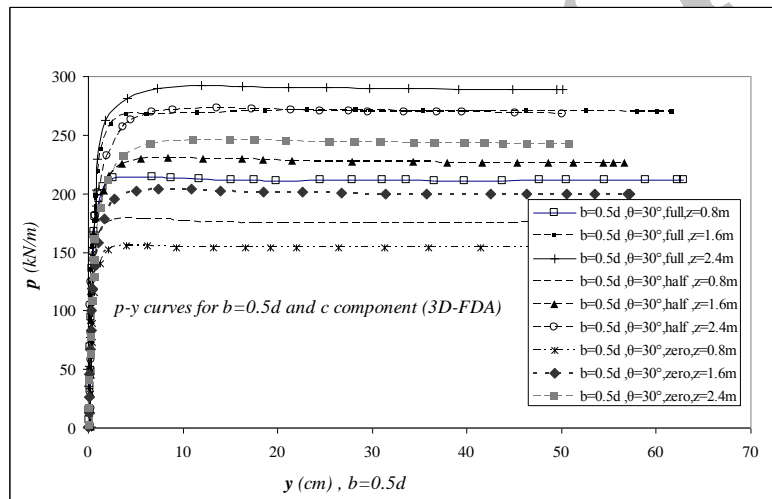
در این مطالعه مدل‌سازی عددی شمع‌های تحت بار جانبی در زمین‌های مسطح و شمع‌های مجاور شیب به کمک نرم‌افزار FLAC3D صورت گرفته است [3]. شمع‌های مدل شده از نوع بتنی انعطاف‌پذیر هستند. سرشمع در مقابل انتقال مقید و در مقابل دوران آزاد نگه داشته شده است [11]، بنابراین سر شمع از نوع سرشمع آزاد می‌باشد [11].

شکل (۲)، برابر ۰/۵، ۲/۵ و ۵/۵ برابر قطر شمع در نظر گرفته شده‌اند. شیب خاک مطابق شکل (۲)، ۳۰ درجه فرض شده و دو شیب اضافی ۲۰ و ۴۵ درجه نیز تحلیل شده است.

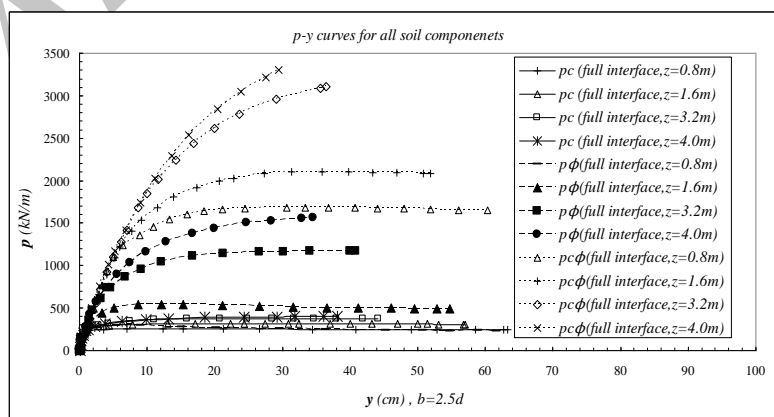
خاک، یعنی خاک مختلط چسبیده - اصطکاکی  $c-\phi$ ، اثر این نسبت‌های مقاومتی سه‌گانه برای هر دو مؤلفه خاک به‌طور هم‌زمان منظور شده است. شمع‌ها در زمین مسطح و زمین شیب‌دار با سه فاصله مجاورت از شیب،  $b$ ، مطابق



شکل ۲ هندسه شمع مجاور شیب خاکی به‌همراه نمایش محل محورهای مختصات دکارتی در تحلیل عددی سه‌بعدی



شکل ۳ منحنی‌های  $p-y$  برای شرایط مقاومتی فصل مشترک و عمق‌های مختلف مؤلفه چسبندگی خاک در شیبی ۳۰ درجه و  $b=0.5d$

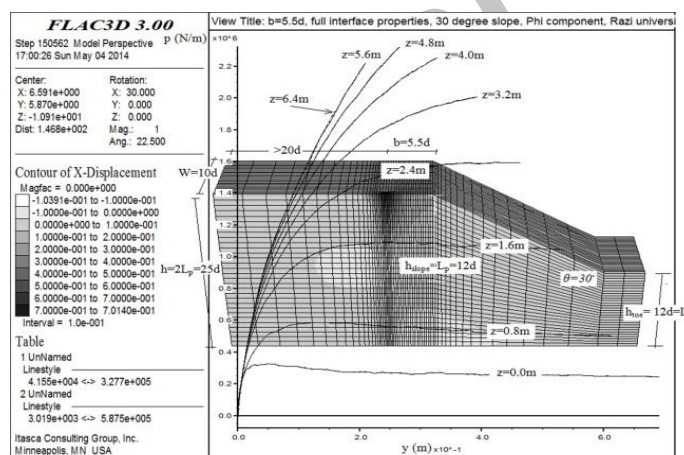


شکل ۴ منحنی‌های  $p-y$  برای شرایط نسبت مقاومتی فصل مشترک کامل و عمق‌های مختلف تمام مؤلفه‌های خاک در شیبی ۳۰ درجه و  $b=2.5d$

کم، باعث طولانی شدن هر یک از تحلیل‌ها، در حد ۱۲ تا ۲۴ ساعت شده است [۱۲]. برای مدل‌سازی محیط ارتجاعی - خمیری خاک اطراف شمع از مدل ارتجاعی - خمیری کامل «مور - کولمب» استفاده شده است. رفتار شمع ارتجاعی فرض شده و از مدل ارتجاعی خطی برای مدل‌سازی رفتار مصالح شمع بتنی استفاده شده است.

ابعاد بهینه‌شده مش بندی سه‌بعدی تفاضل محدود طوری در نظر گرفته شده است که از بروز اثرات مرزی ناشی از مش بندی جلوگیری شود [۱۲]. در این تحقیق پایداری بلندمدت خاک (شیب خاکی) در نظر گرفته شده است و محیط خاک زهکشی شده فرض شده است، یعنی از «اصل تنش‌های مؤثر» استفاده شده است. پروفیل خاک متشکل از دانه‌های شن حاوی خاک رس نرم تا متوسط با تراکم بالا می‌باشد. مشخصات مختلف خاک و شمع در تحلیل‌های سه‌بعدی، در جدول (۱) آورده شده است.

نحوه بارگذاری جانبی شمع از نوع «ریمپ یا شیب‌دار» می‌باشد. برای مدل‌سازی این شرایط در نرم‌افزار، سرعتی افقی و بسیار ناچیز برحسب یکای متر بر گام‌های محاسباتی، مشابه حرکت فک جک بارگذاری جانبی واقعی، به سرشمع اعمال می‌گردد [3]. به بیان دیگر ابتدا مقدار تغییر مکان مطلوب در قالب سرعتی بسیار ناچیز به سرشمع اعمال شده است و سپس مقاومت برشی خاک بسیج‌شده در قبال این تغییر مکان، به شکل تنش‌های نرمال و برشی ایجاد شده در فصل مشترک شمع - خاک در قالب الگوریتمی در زبان FISH در نرم‌افزار [3] به شکل منحنی‌های  $p-y$  مطابق شکل‌های (۳) تا (۵) و منحنی‌های  $H-y$  (بارافقی - تغییر شکل سرشمع) استخراج گردیده است. این سرعت‌ها براساس تجربیات مدل‌سازی قبلی، باید در حدی کوچک انتخاب گردند که باعث وارد آمدن شوک به مدل عددی نشوند [3]. از طرفی همین سرعت‌های بسیار



شکل ۵ منحنی‌های  $p-y$  برای مؤلفه اصطکاکی خاک، در نسبت مقاومتی فصل مشترک کامل و برای  $b=5.5d$  در نرم‌افزار  $FLAC^{3D}$

جدول ۱ مشخصات خاک و شمع در تحلیل‌های عددی

مشخصه‌های شمع بتن مسلح ارتجاعی		مشخصات خاک ارتجاعی - خمیری	
۰/۱	ضریب پواسون $\nu_p$	۰/۴	ضریب پواسون $\nu_s$
۲۹	مدول ارتجاعی $E_p$ : (GPa)	۵۰	مدول ارتجاعی $E_s$ : (MPa)
۱	قطر شمع $d$ : (m)	۵۰	چسبندگی $c$ : (kPa)
۱۲	طول شمع‌ها $L_p$ : (m)	۴۵	زاویه اصطکاک داخلی $\phi$ : (deg)
۰	زاویه اتساع $\psi$ : (deg)	۰	زاویه اتساع $\psi$ : (deg)
۲۵	وزن مخصوص $\gamma_c$ : ( $kN/m^3$ )	۲۲	وزن مخصوص $\gamma_t$ : ( $kN/m^3$ )

شمع- خاک و خاک،  $\phi_{soil}$  و  $\phi_{int}$  زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب در فصل مشترک شمع- خاک و خاک و  $b$  فاصله مرکز شمع از تاج شیب خاکی است. شایان توجه است که به دلیل تجربی بودن رابطه فوق «توافق ابعادی» در دو سوی معادله (۳) برقرار نیست، به طوری که پارامترهای ثابت اول تا چهارم، به لحاظ ابعادی «بدون بُعد» هستند و پارامتر  $K_i$  نیز براساس یکای تنش «مگاپاسکال» در نظر گرفته شده است.

در این رابطه سعی شده است که اثر تمام پارامترهای تأثیرگذار بر سختی جانبی سیستم شمع- خاک تحت بار جانبی [4] از قبیل پارامترهای هندسی و مقاومتی شمع و خاک، شیب خاکی و زمین مسطح، گنجانده شود. همچنین از طریق فرآیند ریاضی خم آمایی بهترین برازش برای یافتن منحنی تقریب زنده تابع  $f(x)$  به شکل کلی یک چندجمله‌ای خطی درجه ششم به صورت زیر حاصل شده است، که در مورد مؤلفه چسبندگی خاک، چندجمله‌ای درجه چهارم در تمام موارد جوابگوی تقریب مورد نظر بوده است:

$$y = f(x) = ax^6 + bx^5 + cx^4 + dx^3 + ex^2 + fx + cte. \quad (9)$$

در این رابطه ضرایب ثابت  $a, b, c, d, e, f$  و مقدار ثابت  $cte$  براساس محاسبات خم آمایی صورت گرفته بر نتایج تحلیل عددی تفاضل محدود سه بعدی می‌باشد، که برای شرایط مختلف، نمودارهای آنها در شکل‌های (۶) تا (۲۰) و مقادیر آنها همگی در جدول (۲) درج شده است. ضریب تعیین یا نمایه همبستگی،  $R^2$  این چندجمله‌ای‌ها که عددی مابین بازه صفر و یک هستند، همواره بزرگ‌تر از  $0.9$  (به معنی خم آمایی رضایت‌بخش) محاسبه شده‌اند. رابطه  $R^2$  به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i))^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \langle y_i \rangle)^2} \quad (10)$$

که در این رابطه

$$\langle y_i \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (11)$$

برابر میانگین  $n$  داده تابعی  $y_i$  از متغیرهای  $x_i$  می‌باشد.

## خروجی‌های تحلیل‌های پارامتری و تفسیر نتایج حاصل از روش تحلیل عددی

در این تحقیق استخراج «رابطه‌ای تجربی» براساس نتایج عددی حاصل از تحلیل‌های عددی تفاضل محدود متعدد، مدنظر قرار گرفته است. بدین منظور ایجاد پیوندی مابین خصوصیات مقاومتی و هندسی شمع و خاک و همچنین خصوصیات مقاومتی فصل مشترک شمع- خاک، بر سختی جانبی بخش ابتدایی منحنی‌های  $p-y$ ؛ یعنی  $K_i$ ، در عمق‌های مختلف دنبال شده است. براساس نتایج حاصل شده، این رابطه به شکل کلی زیر در نظر گرفته شده است:

$$K_i = f(x) : \text{unit} \left( \frac{F}{L^2} \right) : \text{MPa} \quad (3)$$

که در این رابطه تابع  $f(x)$  برابر سختی جانبی  $K_i$  منحنی‌های  $p-y$  در عمق‌های مختلف است و متغیر  $x$  نیز به شکل رابطه زیر به صورت حاصل جمع چهار پارامتر ثابت و بدون بُعد  $c_i$  در نظر گرفته شده است:

$$x = c_1 + c_2 + c_3 + c_4 \quad (4)$$

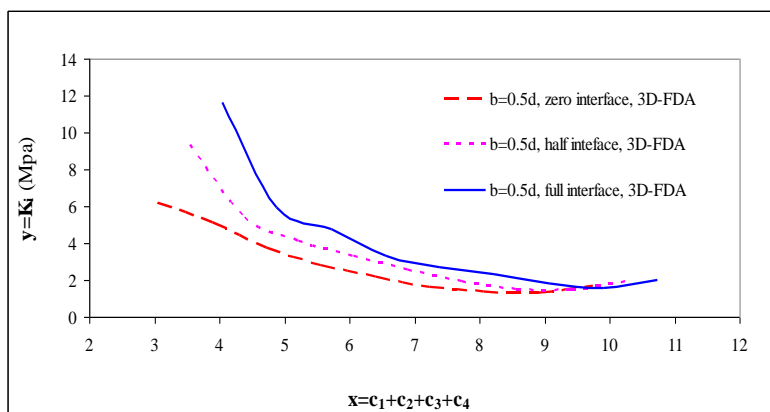
$$c_1 = \left( \frac{(d+z) \cos \theta}{10L_p} \frac{v_p E_p}{v_s E_s} \right) \quad (5)$$

$$c_2 = \frac{c_{int}}{c_{soil}} : c_2 = 0, 0.5, 1.0 \quad (6)$$

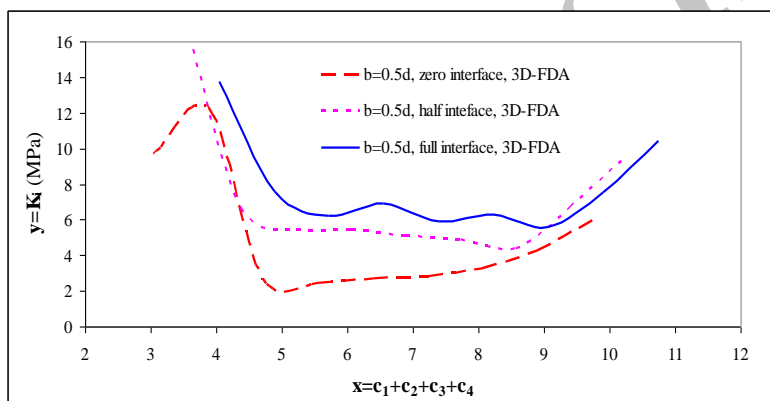
$$c_3 = \frac{\tan \phi_{int}}{\tan \phi_{soil}} : c_3 = 0, 0.5, 1.0 \quad (7)$$

$$c_4 = \frac{d}{b} : c_4 = 0.0 (\text{Level, ground}), 0.182, 0.4, 2.0 \quad (8)$$

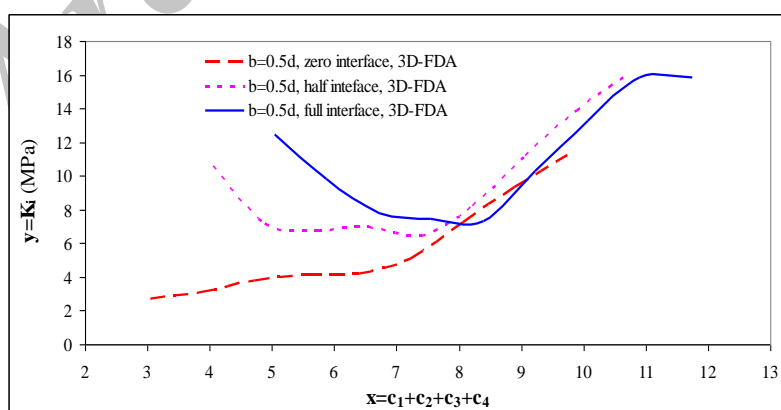
که در این روابط  $d$  قطر شمع بتنی،  $z$  عمق از سطح زمین (زمین مسطح یا شیب‌دار)،  $L_p$  طول شمع بتنی،  $\theta$  زاویه شیب خاکی با راستای افق،  $v_p$  و  $E_p$  به ترتیب نسبت پواسون و مدول ارتجاعی مصالح شمع بتنی،  $v_s$  و  $E_s$  نیز به ترتیب نسبت پواسون و مدول ارتجاعی خاک،  $c_{soil}$  و  $c_{int}$  به ترتیب چسبندگی تعریف شده برای مصالح فصل مشترک



شکل ۶ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه چسبندگی خاک در مجاورت شیب  $b=0.5d$

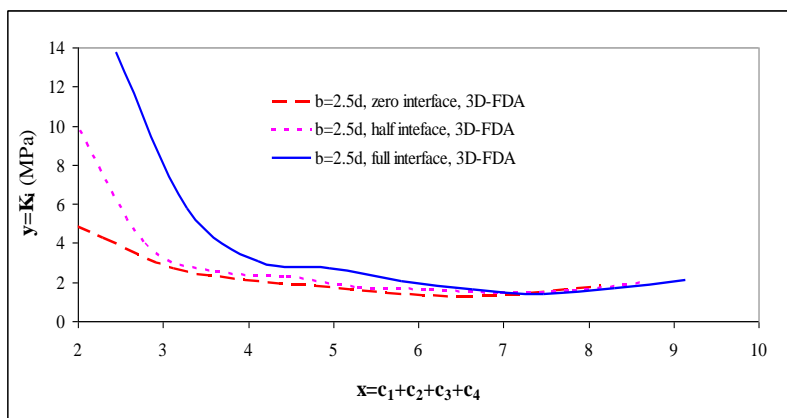


شکل ۷ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه اصطکاکی خاک در مجاورت شیب  $b=0.5d$

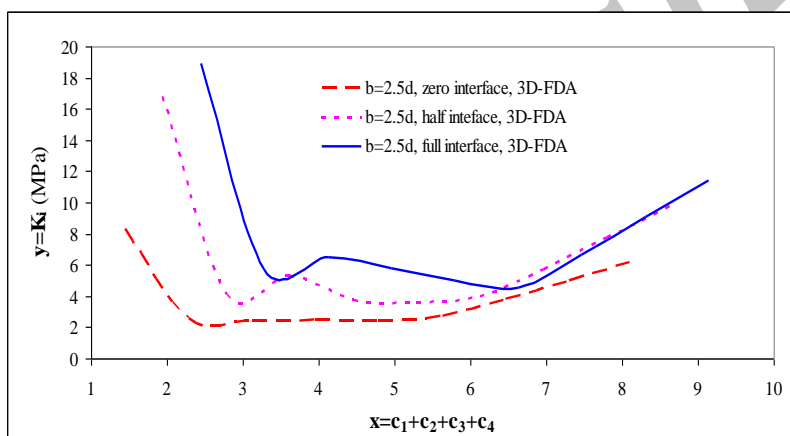


شکل ۸ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه چسبندگی - اصطکاکی خاک در مجاورت شیب  $b=0.5d$

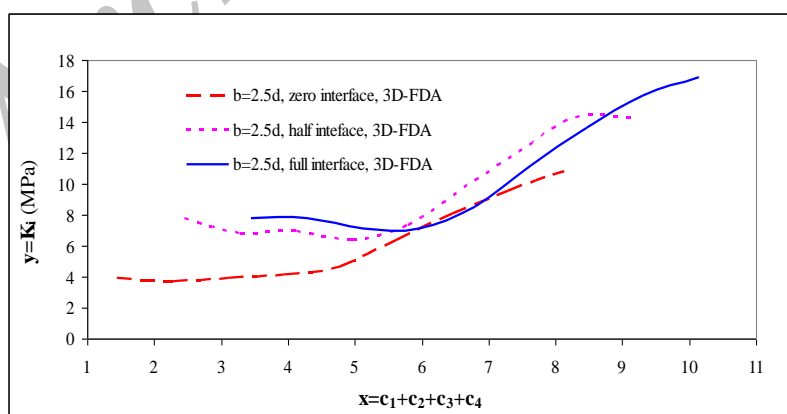




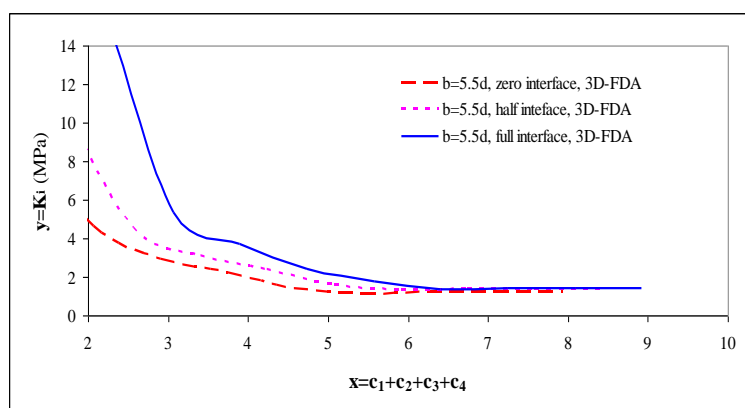
شکل ۹ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه چسبندگی خاک در مجاورت شیب  $b=2.5d$



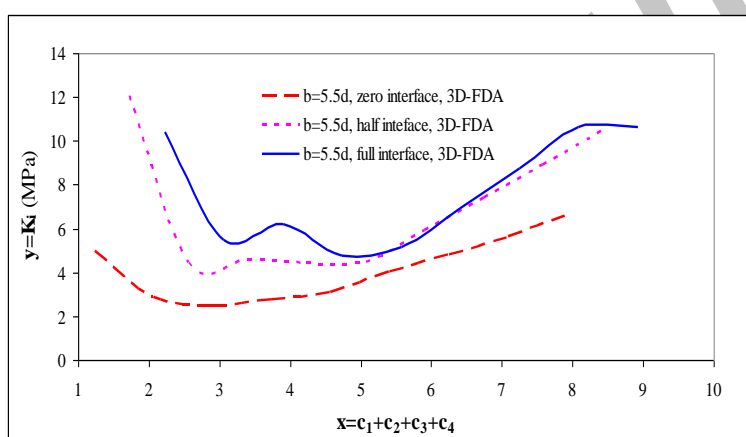
شکل ۱۰ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه اصطکاکی خاک در مجاورت شیب  $b=2.5d$



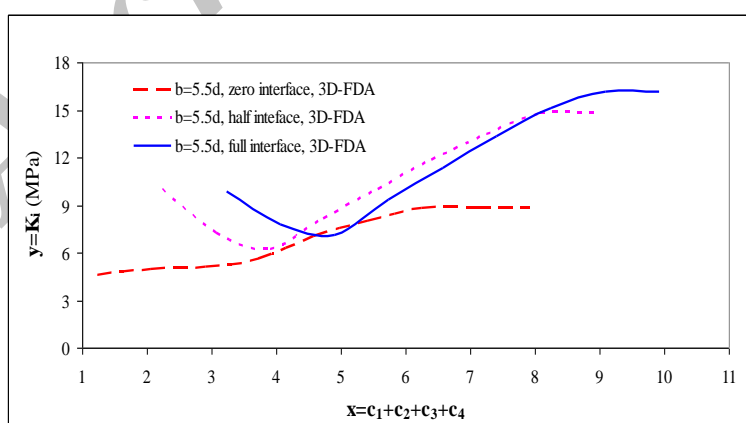
شکل ۱۱ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه چسبندگی - اصطکاکی خاک در مجاورت شیب  $b=2.5d$



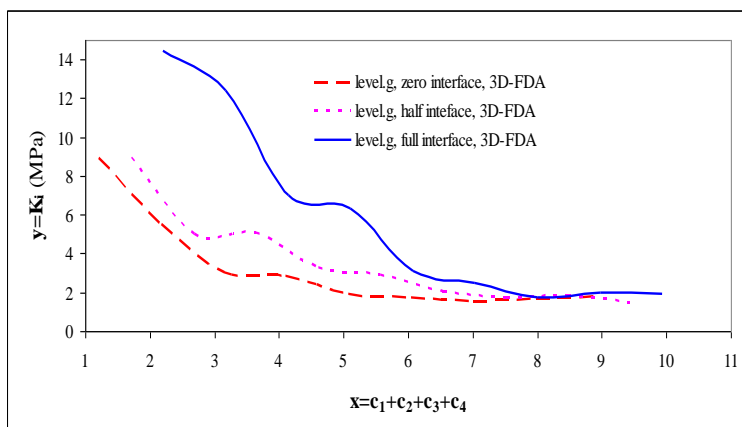
شکل ۱۲ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه چسبندگی خاک در مجاورت شیب  $b=5.5d$



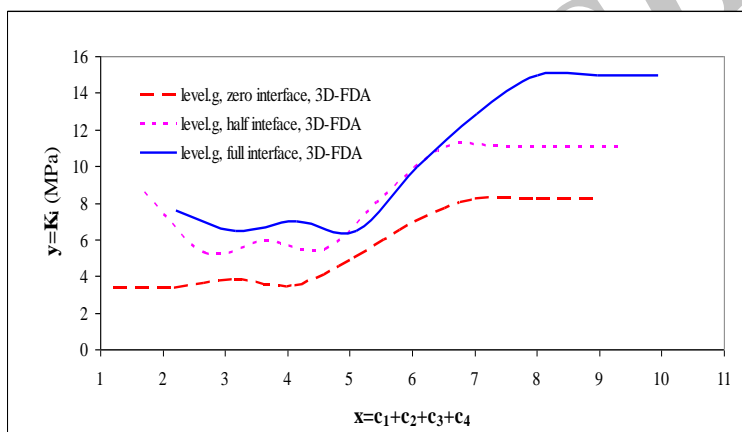
شکل ۱۳ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه اصطکاکی خاک در مجاورت شیب  $b=5.5d$



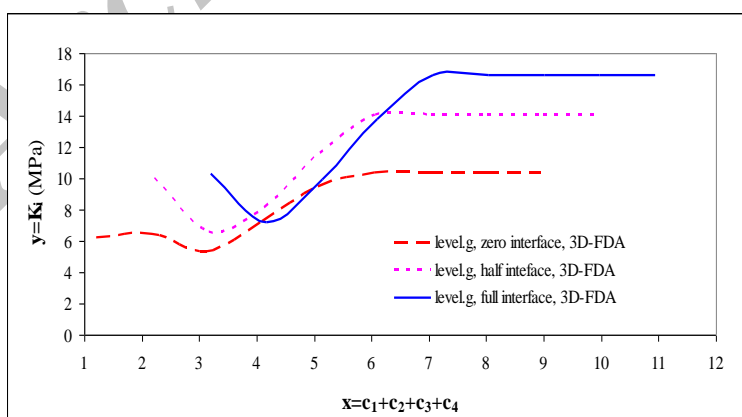
شکل ۱۴ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه چسبندگی - اصطکاکی خاک در مجاورت شیب  $b=5.5d$



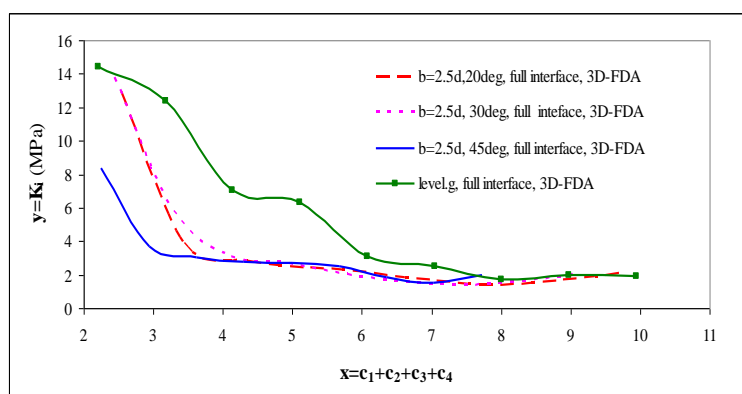
شکل ۱۵ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه چسبندگی خاک در زمین مسطح



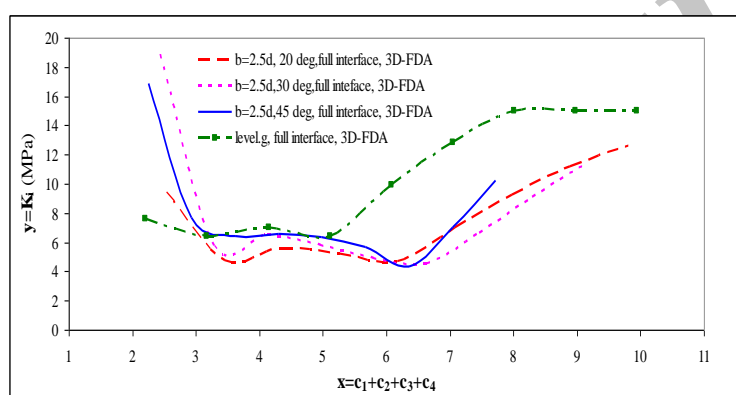
شکل ۱۶ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه اصطکاکی خاک در زمین مسطح



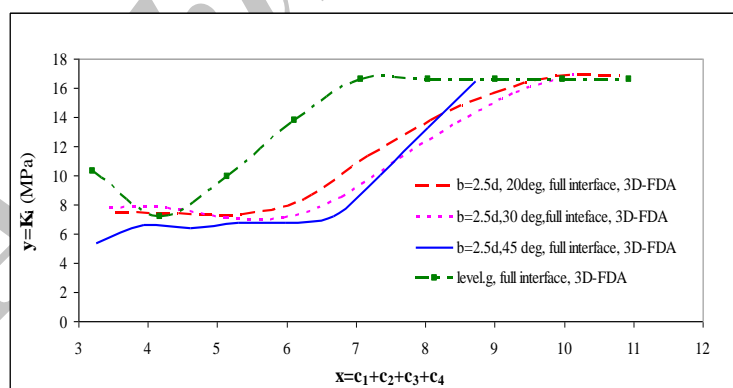
شکل ۱۷ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه چسبندگی-اصطکاکی خاک در زمین مسطح



شکل ۱۸ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه چسبندگی خاک در زمین مسطح و شیب‌های مختلف



شکل ۱۹ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه اصطکاکی خاک در زمین مسطح و شیب‌های مختلف



شکل ۲۰ نمودار سختی جانبی - پارامترهای بدون بعد، برای مؤلفه چسبندگی- اصطکاکی خاک در زمین مسطح و شیب‌دار

مثال عملی طراحی بر مبنای عملکرد (Performance Based Design:PBD) ارائه شده است، عملکرد مورد نظر در این بخش محدود کردن مقدار تغییر مکان جانبی در سر شمع از  $y(z=0)$  بر اساس محدودیت‌های طراحی می‌باشد. هدف از

### بررسی نحوه استفاده عملی از سختی جانبی در فصل مشترک شمع - خاک

در این قسمت به منظور تشریح نحوه کاربرد منحنی‌های سختی جانبی تجربی استخراج شده در این تحقیق، در یک

خاک (kPa) c، وزن مخصوص مؤثر آن  $\gamma'$  و زاویه اصطکاک داخلی آن  $\phi$  (deg) است، اندازه‌گیری‌ها در خاک پیرامون شمع نشان می‌دهد که در اثر فرایند نصب شمع، چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک در محل فصل مشترک شمع - خاک به نصف کاهش یافته است.

ارائه این مثال تشریح چگونگی کاربرد منحنی‌های سختی جانبی  $K_t$  تابع عمق در تعیین ظرفیت باربری جانبی شمع و نیز تعیین ظرفیت خمشی لازم برای یک تغییر مکان جانبی دل‌خواه در سطح زمین می‌باشد. شمعی با طول  $L_p$  متر و قطر  $d$  متر در زمینی مسطح مفروض است. چسبندگی

جدول ۲ ضرایب چندجمله‌ای برآورد سختی جانبی برای شرایط شیب - زمین افقی، فاصله مجاورت  $b$  و فصل مشترک شمع - خاک مختلف

ثابت‌های معادله	a (:ax <sup>6</sup> )	b (:bx <sup>5</sup> )	c (:cx <sup>4</sup> )	d (:dx <sup>3</sup> )	e (:ex <sup>2</sup> )	f (:fx)	cte.	R <sup>2</sup>
شرایط محاسبه								
b=0.5d, c, zero	-	-	-0.0007	0.0237	-0.1257	-1.3737	10.969	0.9978
0.5d, c, half	-	-	0.0261	-0.7617	8.2927	-40.5	78.392	0.9961
0.5d, c, full	-	-	0.0364	-1.158	13.701	-71.958	145.3	0.9924
b=0.5d, phi, zero	-0.0368	1.4716	-23.937	201.91	-927.66	2188.5	-2051.7	0.9708
0.5d, phi, half	0.0016	-0.0973	2.293	-27.088	170.89	-550.11	715.47	0.9973
0.5d, phi, full	-0.0016	0.0568	-0.6602	1.9007	17.846	-140.54	286.8	0.9880
b=0.5d, c-phi, zero	0.0030	-0.1237	2.0621	-17.554	80.282	-186.28	173.87	0.9993
0.5d, c-phi, half	0.0079	-0.3667	6.9717	-69.052	375.93	-1068	1246.1	0.9979
0.5d, c-phi, full	0.0035	-0.1804	3.7577	-40.606	241.16	-752.08	980.21	0.9959
b=2.5d, c, zero	-	-	0.0043	-0.0985	0.9628	-4.7755	11.008	0.9943
2.5d, c, half	-	-	0.0473	-1.1174	9.6413	-36.108	51.535	0.9879
2.5d, c, full	-	-	0.055	-1.4217	13.539	-56.539	89.756	0.9941
b=2.5d, phi, zero	0.006	-0.1939	2.522	-16.778	60.090	-109.74	82.227	1.000
2.5d, phi, half	0.0228	-0.7731	10.596	-74.698	284.90	-556.88	440.47	0.9924
2.5d, phi, full	0.0187	-0.7092	10.919	-86.916	376.34	-839.6	760.17	0.9986
b=2.5d, c-phi, zero	0.004	-0.1159	1.3041	-7.2873	21.398	-31.234	21.415	0.9995
2.5d, c-phi, half	0.0055	-0.194	2.737	-19.595	75.346	-148.48	124.77	0.9970
2.5d, c-phi, full	0.0010	-0.0337	0.367	-1.1934	-4.3285	34.259	-47.159	0.9998
b=5.5d, c, zero	-	-	0.0188	-0.422	3.5447	-13.405	20.869	0.9945
5.5d, c, half	-	-	0.0335	-0.7878	6.8165	-25.933	38.639	0.9866
5.5d, c, full	-	-	0.0633	-1.6044	14.894	-60.263	91.887	0.9835
b=5.5d, phi, zero	0.0022	-0.0634	0.7283	-4.3257	14.274	-24.999	20.666	0.9990
5.5d, phi, half	0.0133	-0.4295	5.5817	-37.258	134.65	-249.87	190.52	0.9980
5.5d, phi, full	0.0132	-0.4621	6.4946	-46.80	182.35	-364.95	299.62	0.9841
b=5.5d, c-phi, zero	-0.0009	0.0327	-0.4608	3.0868	-10.107	15.575	-4.0187	0.9985
5.5d, c-phi, half	-0.0066	0.2196	-2.9093	19.411	-67.168	111.02	-58.183	0.9983
5.5d, c-phi, full	-0.0047	0.1867	-2.9890	24.495	-106.90	232.48	-186.2	0.9985
level, c, zero	-	-	0.0083	-0.2086	1.9980	-8.8037	17.002	0.9920
level, c, half	-	-	0.0089	-0.2243	2.1198	-9.3912	19.620	0.9663
level, c, full	-	-	-0.0116	0.2821	-2.0822	2.7795	15.870	0.9820
level, phi, zero	0.0029	-0.0813	0.8850	-4.6542	12.4790	-16.026	11.030	0.9955
level, phi, half	0.0026	-0.0791	0.9719	-6.1797	22.295	-44.126	42.463	0.9647
level, phi, full	0.0034	-0.1134	1.4949	-9.8810	35.076	-64.574	55.537	0.9909
level, c-phi, zero	-0.0005	0.1617	-2.0305	12.5310	-39.053	57.139	-23.979	0.9986
level, c-phi, half	-0.0025	0.0818	-1.0247	5.7616	-12.551	-0.5776	30.768	0.9982
level, c-phi, full	-0.0018	0.0645	-0.873	4.9536	-6.5736	-33.960	95.836	0.9987
2.5d, full, 20deg, c	-	-	0.0523	-1.4123	13.910	-59.230	94.186	0.9768
2.5d, full, 30deg, c	-	-	0.0550	-1.4217	13.539	-56.539	89.756	0.9941
2.5d, full, 45deg, c	-	-	0.1031	-2.206	17.161	-57.747	73.815	0.9918
2.5d, full, level c	-	-	-0.0116	0.2821	-2.0822	2.7795	15.870	0.9820
2.5d, full, 20deg, phi	0.0098	-0.3774	5.8483	-46.575	200.75	-443.84	398.62	0.9966
2.5d, full, 30deg, phi	0.0187	-0.7092	10.9190	-86.916	376.34	-839.60	760.17	0.9986
2.5d, full, 45deg, phi	-0.0175	0.4472	-4.1915	16.359	-13.037	-71.841	142.17	0.9955
full, level, phi	0.0034	-0.1134	1.4949	-9.8810	35.076	-64.574	55.537	0.9909
2.5d, full, 20deg, c-phi	-0.0024	0.1107	-2.0973	20.494	-107.92	289.05	-299.98	0.9994
2.5d, full, 30deg, c-phi	0.001	-0.0337	0.3670	-1.1934	-4.3285	34.259	-47.159	0.9998
2.5d, full, 45deg, c-phi	-0.010	0.3384	-4.6859	34.3140	-140.81	307.89	-274.0	0.9970
full, level, c-phi	-0.0018	0.0645	-0.8730	4.9536	-6.5736	-33.960	95.836	0.9987

در این رابطه مقدار  $\bar{A}$  برحسب عمق به قطر شمع  $z/d$  از گراف موجود در مرجع [4] و یا از رابطه زیر که براساس برآزش گراف موجود در مرجع [4] به دست آمده، محاسبه می شود:

$$\begin{aligned} \bar{A} = \bar{A}(z) &= 0.0025(z/d)^4 - 0.0743(z/d)^3 \\ &+ 0.7933(z/d)^2 - 3.5086(z/d) + 6.6928 \\ R^2 &= 0.9906 \end{aligned} \quad (16)$$

همچنین در رابطه (۱۵) مقدار  $P_{ult\phi}$  برای زمین مسطح، معادل کوچک ترین مقدار حاصل از رابطه های زیر است [4]:

$$\begin{aligned} P_{ult\phi} = \gamma z &\left[ \frac{K_0 \tan \phi \sin \beta}{\tan(\beta - \phi) \cos \alpha} + \right. \\ &\left. + \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi)} (d + z \tan \beta \tan \alpha) \right] \\ &+ \gamma z [K_0 z \tan \beta (\tan \phi \sin \beta - \tan \alpha) - K_a d] \end{aligned} \quad (17)$$

$$P_{ult\phi} = K_a d \gamma z (\tan^8 \beta - 1) + K_0 d \gamma z \tan \phi \tan^4 \beta \quad (18)$$

$$\begin{aligned} K_0 &= 1 - \sin \phi = 1 - \sin 20 = 0.66 \\ \text{data : } K_a &= \tan^2 (45 - \phi / 2) = 0.49 \\ \beta &\approx 45 + \phi / 2 = 55^\circ \\ \alpha &= \phi / 2 = 10^\circ \\ \phi &= \phi_{soil} = 20^\circ \end{aligned} \quad (19)$$

و  $P_{ultc}$  نیز در زمینی مسطح برابر کوچک ترین مقدار حاصل از دو رابطه زیر است [4]:

$$P_{ultc} = \left( 3 + \frac{\gamma'}{c} z + \frac{J}{b} z \leq 9 \right) cd \quad (20)$$

$$P_{ultc} = 9cd \quad (21)$$

که در رابطه (۲۰)  $J$  ثابتی است که عمق را کنترل می کند، براساس پیشنهاد بوشان [19] معادل  $2/0$  برای رس

مقادیر منحنی های  $p-y$  به شکل تابع عمق  $p(z)-y(z)$  از عمق سطح زمین ( $z=0$ ) تا کف شمع ( $z=Lp$ ) در نمونه های یک متری به کمک مقادیر  $K_i(z)$  ارائه شده در نمودارهای قبلی و رابطه هذلولوی شماره (۱)، پس از آن، برای انجام طراحی سازه های شمع، لنگر خمشی در طول شمع با استفاده از مقادیر  $p(z)-y(z)$  هذلولوی محاسبه می گردد. تابع تغییر شکل مجاز شمع در طول آن  $y(z)$  نیز با رابطه زیر داده شده است:

$$y(z) = Ae^{-\left(\frac{A \cdot z}{d}\right)} = 0.01e^{-\left(\frac{0.01z}{d}\right)} \quad (12)$$

که در این رابطه  $A$  برابر دامنه حداکثر تغییر مکان جانبی دل خواه در طول شمع در سطح زمین ( $z/d=0.0$ ) برحسب سانتی متر است، که در این مثال معادل ۱ سانتی متر فرض شده است. پس مقدار عکس العمل خاک  $p$  در عمق  $z$  (یعنی  $p(z)$ ) براساس تئوری وینکلر [1] از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$p(z) = \frac{1}{d} \frac{\partial^2 M(z)}{\partial z^2} = \frac{y(z)}{\left( \frac{1}{K_i(z)} + \frac{y(z)}{p_u(z)} \right)} \quad (13)$$

یا به عبارت دیگر تغییر شکل جانبی شمع براساس مقدار لنگر خمشی در شمع عبارت است از:

$$y(z) = \frac{1}{E_p I_p} \int \int M(z).dz.dz + y'_0.z + y_0 \quad (14)$$

که در این رابطه  $y_0$  تغییر شکل مرزی در سر شمع است. از طرفی، اهتمام بر آن است که از رابطه (۱۳) استفاده شود، چرا که برخلاف رابطه معادل (۱۴) که فقط لنگر خمشی و تغییر شکل جانبی شمع را به هم مرتبط می کند، سختی جانبی  $K_i$  و مقدار عکس العمل خاک به شکل های نهایی  $P_u$  و  $p$  نیز در رابطه (۱۳) وارد شده است. همچنین روابط محاسبه مقدار  $P_u$  برای یک خاک مختلط چسبنده - اصطکاکی  $c-\phi$  در زمین مسطح (بدون شیب) به شرح زیر است [4]:

$$P_u(z) = p_{ult} = \bar{A} p_{ult\phi} + P_{ultc} \quad (15)$$

شده‌اند و آن هم عامل عمق از سطح زمین  $Z$  می‌باشد؛ به‌طوری‌که در مراجع [14-12] و نیز نتایج آزمایشی بزرگ‌مقیاس مرجع [4] می‌توان دید، تمامی منحنی‌های  $p-y$  به‌طور کلی تابعی از عمق می‌باشند و تلاش برای ارائه هر راه‌حلی برای استخراج آنها برحسب عامل عمق، تا حد زیادی به واقعیت و طبیعت مسئله شمع‌های تحت بار جانبی نزدیک خواهد شد.

### صحت‌سنجی روش عددی

به‌منظور صحت‌سنجی روش عددی سه‌بعدی استخراج منحنی‌های  $p-y$  در این مطالعه، شش آزمایش تمام‌مقیاس معتبر بین‌المللی بارگذاری جانبی شمع تحت شرایط مختلف [15-21] با روش همین تحقیق مدل‌سازی شده و نتایج آنها با نتایج آزمایش‌های تمام‌مقیاس [15-19] و روابط سایر محققان [5, 6, 20, 21] مقایسه شده است. آزمایش شماره (۱) آزمایش بارگذاری جانبی شمع Sabine [4,15] روی شمعی فولادی به‌طول ۱۲/۸ متر است، که در خاک رس نرم در زمینی مسطح کوبیده‌شده است. آزمایش شماره (۲) مربوط به همین شمع فولادی است [4,16] که در زمین مسطح متشکل از خاک رسی سخت کوبیده‌شده است. آزمایش شماره (۳) مربوط به آزمایش شمع بتنی گارستون [4,17] به‌طول ۱۲/۵ متر و قطر ۱/۵ متر می‌باشد که در زمین مسطح و خاک ماسه‌ای اجرا شده است. آزمایش (۴) تست بارگذاری جانبی انجام‌شده توسط اسماعیل [4,18] در کشور کویت بر روی شمعی بتنی به‌طول ۵ متر در خاک ماسه سیمانته شده (یعنی خاک دارای چسبندگی و اصطکاک داخلی همزمان نوع  $c-\phi$ ) و در زمین مسطح می‌باشد. آزمایش‌های شماره (۵) و (۶) آزمایش‌های بوشان [19] بر روی شمع‌های کوتاه بتنی درجا-ریز مجاور شیب‌های خاکی به‌ترتیب ۲۰ و ۵۵ درجه در خاک رس سخت (رس سیلنتی و ماسه سیمانته) می‌باشد. برای فصل مشترک شمع - خاک در مدل‌سازی عددی این آزمایش‌ها نیز از معیار

سخت فرض می‌گردد. همچنین متلاک [15] مقدار  $J$  را برای رس نرم برابر ۰/۵ و حدود ۰/۲۵ برای رس متوسط در نظر گرفته است. مقدار ۰/۵ به‌طور متناوب مورد استفاده قرار گرفته است. ریز و ولیچ [16] مقدار  $J$  را برابر ۰/۵ فرض کرده‌اند.

اما  $P_{ult\phi}$  و  $P_{ultc}$  که به‌ترتیب از روابط (۱۷) و (۱۸) و نیز (۲۰) و (۲۱) در بالا به‌دست می‌آید، برای زمین مسطح ارائه شده است، برای تبدیل آنها به مقادیر مناسب برای زمین شیب‌دار، از ضرایب تصحیح مطرح‌شده در مراجع [14-12] استفاده شود. در نهایت رابطه محاسبه مقدار لنگر خمشی در طول شمع برحسب عمق  $Z$ ،  $M(Z)$  پس از دو بار انتگرال‌گیری برای حذف عامل مشتق مرتبه دوم در رابطه (۱۳) در قبل، به شکل زیر قابل بیان است:

$$M(Z) = d \left( \iint \frac{y(z)}{\left( \frac{1}{K_i(z)} \right) + \frac{y(z)}{p_u(z)}} .dz.dz + M'_0.z + M_0 \right) \quad (22)$$

که در این رابطه  $M_0$  و مشتق آن، مقدار لنگر خمشی از نوع شرایط مرزی در سرشمع، بسته به نوع بارگذاری می‌باشد.  $K_i(z)$  نیز به شکل زیر از شکل (۱۷) در قبل به‌دست می‌آید، این پارامتر نیز تابعی از عمق  $Z$  خواهد بود:

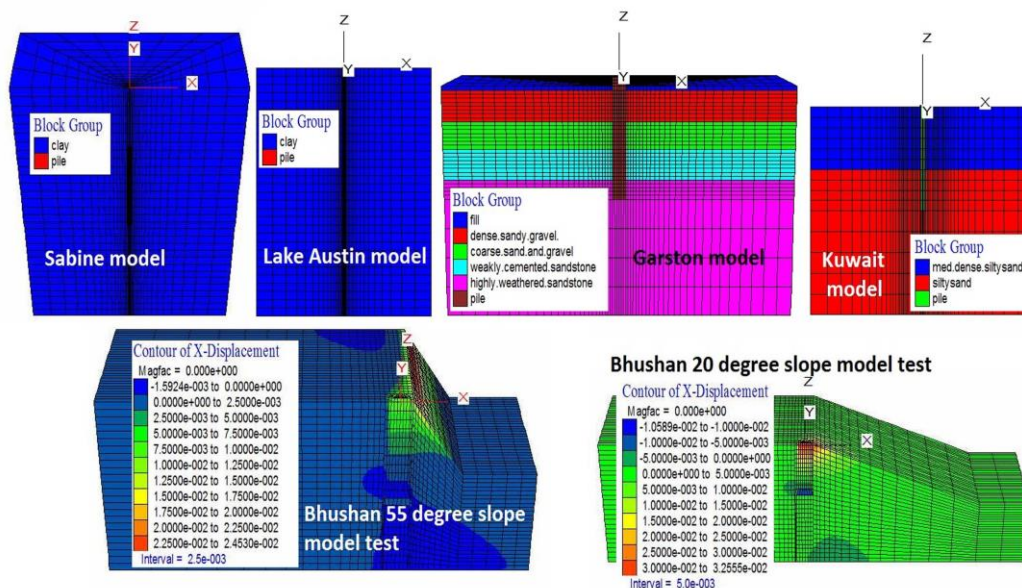
$$\begin{aligned} K_i(z) = y = & -0.0025x^6 + 0.0818x^5 - 1.0247x^4 + \\ & + 5.7616x^3 - 12.551x^2 - 0.5776x + 30.768 \\ R^2 = & 0.9982 \\ x = & c_1 + c_2 + c_3 + c_4 \end{aligned} \quad (23)$$

انتگرال‌های پیاپی موجود در رابطه (۲۲) را می‌توان پس از ساده‌سازی، به‌کمک راه‌حل‌های تحلیلی یا عددی حل کرد. چنانچه در روابط این بخش مشاهده شد، کلیه روابط تأثیرگذار از جمله به‌ترتیب روابط شماره (۱۲)، (۱۳)، (۱۵)، (۱۶) تا (۲۳) همگی برحسب یک عامل متغیر نوشته

معرف فاصله بین محل اعمال بار تا سطح خاک در طول شمع (خروج از مرکزیت بارگذاری در سرشمع)،  $t_w$  ضخامت جداره در شمع‌های فولادی لوله‌ای و  $E_{50}$  مدول ارتجاعی خاک چسبنده در ۵۰ درصد مقاومت محوری آن براساس کرنش  $\epsilon_{50}$  در آزمایش‌های سه‌محوری می‌باشد. سایر پارامترها نیز قبلاً در روابط و شکل‌ها تعریف شده‌اند.

مقاومت برشی کولمب استفاده شده است. خلاصه‌ای از مشخصات خاک و شمع در این آزمایش‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

توافق خوبی بین نتایج آزمایشی و نتایج عددی حاصل از روش این تحقیق مشاهده می‌شود. نمودارهای مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی این شش آزمایش به ترتیب در شکل‌های (۲۲) تا (۲۴) نمایش داده شده‌اند. در این جدول e



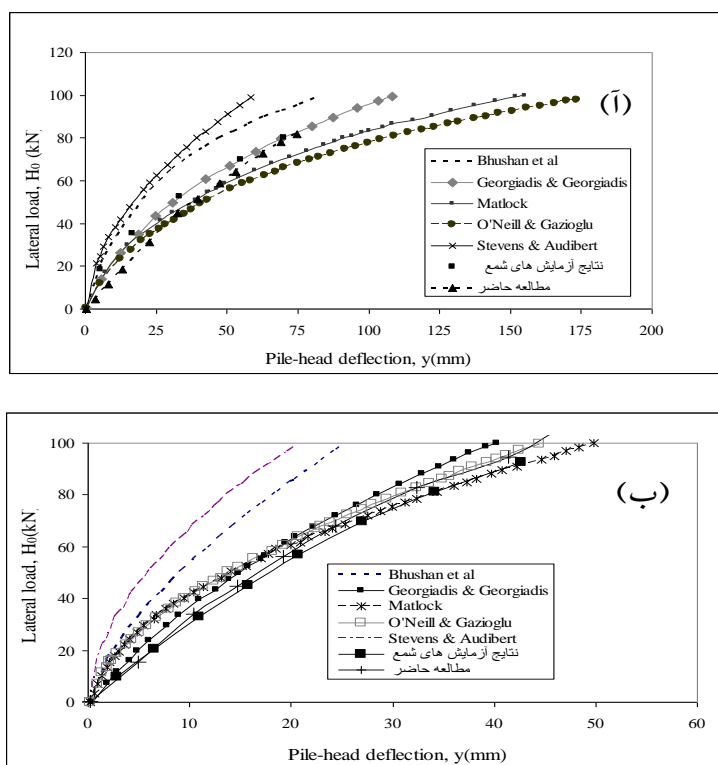
شکل ۲۱ مدل‌های عددی سه‌بعدی تفاضل محدود شش آزمایش مطرح شده برای صحت‌سنجی نتایج تحقیق (تغییر مکان‌ها بر حسب متر)

جدول ۳ خلاصه مشخصات شمع و خاک در آزمایش‌های مختلف مورداستفاده در صحت‌سنجی روش عددی مطالعه حاضر

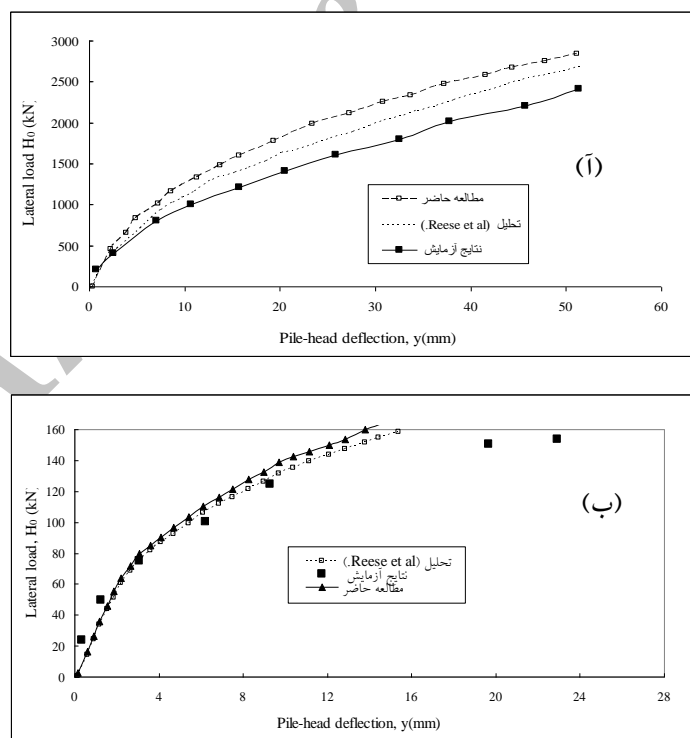
شماره آزمایش #	مشخصه‌های مکانیکی و هندسی شمع (بتنی یا فولادی)							مشخصات خاک			
	L (m)	d (m)	$E_p I_p$ (kN.m <sup>2</sup> )	e (m)	$\theta$ (deg)	$t_w$ (mm)	نوع خاک	C (or $C_u$ ) (kPa)	E (or $E_{50}$ ) (kPa)	$\phi$ (deg)	$\gamma$ (or $\gamma'$ ) (kN/m <sup>3</sup> )
1	12.8	0.319	31280	0.305	0°	12.7	c*	14.4	2060	0	5.5
2	12.8	0.319	31280	0.0635	0°	12.7	c*	32.25	2687.5	0	10
3	12.5	1.50	-	0.900	0°	-	$\phi^*$	0	$N_{SPT}$	43, 37	-
4	5.0	0.30	20200	-	0°	-	c- $\phi^*$	20, 0	$N_{SPT}$	35, 43	17.90, 19.10
5	5.185 (17ft)	1.22 (4ft)	$2.25 \times 10^6$	0.230	20°	-	c*	220	24,440	0	18.85
6	6.710 (22ft)	1.22 (4ft)	$2.25 \times 10^6$	0.230	55°	-	c*	479	95,800	0	18.85

$\phi$ -c\*: خاک چسبنده- اصطکاکی،  $\phi$ : خاک دانه ای دارای اصطکاکی داخلی (خاک دانه‌ای فاقد چسبندگی)، c: نماد خاک چسبنده

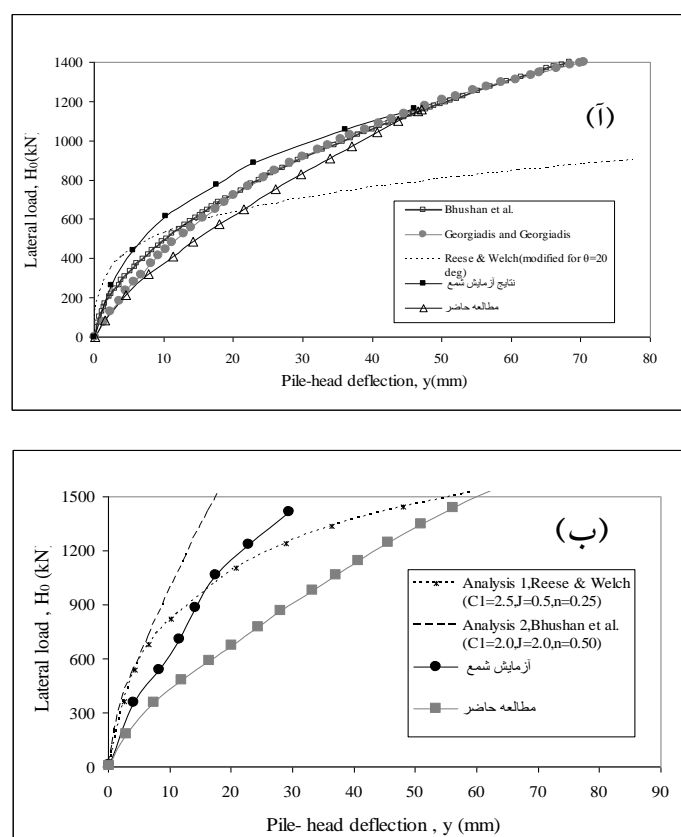




شکل ۲۲ منحنی بار- تغییر شکل جانبی سرشمع برای آزمایش بارگذاری جانبی شمع: (آ) رودخانه Sabine، (ب) دریاچه Lake Austin



شکل ۲۳ منحنی بار- تغییر شکل جانبی سرشمع برای آزمایش بارگذاری جانبی شمع: (آ) Garston در خاک بدون چسبندگی (ماسه)، (ب) Kuwait در خاک ماسه سیمانه شده (یعنی خاک از نوع  $c-\phi$ )



شکل ۲۴ منحنی بار- تغییر شکل جانبی سرشمع برای شمعی های حفاری شده: (الف) آزمایش بارگذاری جانبی بوشان برای شیب ۲۰ درجه در رس سیلتی سخت (CL-CH)، (ب) آزمایش بارگذاری بوشان در شیب ۵۵ درجه در ماسه سیمانته (SM)

### نتیجه گیری

زاویه اصطکاک داخلی فصل مشترک شمع- خاک را در نظر می گیرند و نیز پارامتری که اثر فاصله بدون بعد ( $d/b$ ) مرکز شمع تا تاج شیب را در نظر می گیرد. اهداف و نتایج عمده حاصل از تحقیق حاضر را می توان به شرح زیر برشمرد:

۱. در این تحقیق، منحنی های انتقال بار جانبی  $p-y$  برای انواع مؤلفه های چسبندگی، اصطکاک و اثر توأمان آنها در یک خاک مختلط از نوع  $c-\phi$  برای شمع در زمین مسطح و مجاور شیب با فواصل مجاورت مختلف از تاج شیب، محاسبه شده است.

۲. میزان سختی جانبی خاک تابع عمق  $z$  در طول شمع بتنی در عمق های مختلف برای مؤلفه های چسبندگی، مؤلفه اصطکاک و اثر هم زمان هر دو آنها در خاک مخلوط  $c-\phi$  به شکلی کاملاً مجزا با لحاظ کردن شرایط مقاومتی مختلف برای فصل مشترک شمع- خاک

در این تحقیق به بررسی اثر مؤلفه های مقاومتی فصل مشترک شمع- خاک شامل چسبندگی و اصطکاک داخلی مصالح این ناحیه بر رفتار منحنی های  $p-y$  و به ویژه سختی جانبی بخش ابتدایی این منحنی ها پرداخته شده است. هدف عمده این تحقیق، تمرکز بر محاسبه مقدار سختی جانبی خاک به منظور بررسی رفتار اندرکنش جانبی سیستم سازه ای شمع- خاک است. منحنی های برآزش دهنده رابطه بین سختی جانبی خاک و اثر چهار پارامتر ثابت تأثیرگذار بر آن در این تحقیق ارائه شده است. چهار پارامتری که به شکل بدون بُعد در طرف دوم روابط برآورد سختی جانبی تابع عمق در نظر گرفته شده اند، عبارتند از پارامتری که مشخصات هندسی و ارتجاعی شمع را در نظر می گیرد، پارامترهایی که نسبت خصوصیات مقاومتی چسبندگی و

به دلیل ماهیت تجربی رابطه ارائه شده می باشد.

۶. اصولاً با افزایش خصوصیات مقاومتی در فصل مشترک شمع- خاک، میزان عکس العمل یا فشار خاک  $p$  در واحد طول شمع افزایش می یابد، که افزایش آن منجر به تغییرات عمده در میزان سختی جانبی خاک و نیز تغییر مکان جانبی شمع می گردد. با تغییر مقادیر  $p$  و  $y$  به علت تغییر مشخصه های مقاومتی فصل مشترک شمع- خاک، مقادیر پارامترهای ثابت چندجمله ای های برآورد مقدار  $K_i$  نیز دچار تغییر می گردد.

۷. نتیجه مهم تحقیق حاضر آن است که رفتار خاک و شمع های بتنی در جاریز تحت بار جانبی چه در زمین مسطح و چه در مجاورت شیب، در حالت کلی تابع پارامتر عمق  $z$  است، به طوری که برای تقریب رفتار منحنی های اندرکنشی غیرخطی  $p-y$  می بایستی روابط حاصل به شکل تابع عمق ارائه شوند. بنابراین ارائه روابط تخمین  $K_i$ ،  $y$ ،  $\phi$ ،  $M$  و  $P_u$  برحسب عمق  $z$  در این تحقیق، حاکی از اهمیت عامل عمق می باشد.

۸. عامل عمق  $z$  در تعیین منحنی های  $p-y$  در روش های کلاسیک و تجربی [4] به خوبی در روابط شمع های تحت بار جانبی وارد نشده، از طرف دیگر روابطی برای تخمین  $K_i$  برای شمع های مجاور شیب ارائه نشده است، که در این تحقیق به تفصیل به آن پرداخته شده است.

محاسبه شده و در پایان منجر به استخراج رابطه تجربی منحنی های سختی جانبی  $K_i$  در طول شمع به ازای بارگذاری مشخص و با لحاظ اثر پارامترهای تأثیرگذار مختلف شده است.

۳. نتایج این تحقیق نشان می دهد که سختی جانبی خاک برای همه مؤلفه های خاک از قبیل چسبندگی و اصطکاک خاک، همواره با افزایش عمق، روندی افزایشی ندارد، بلکه میزان افزایش یا کاهش سختی جانبی خاک با افزایش عمق، بستگی به میزان نیروی برشی بسیج شده در اطراف شمع دارد، که مقدار آن بستگی به مقدار تغییر مکان جانبی شمع در آن عمق دارد.

۴. رابطه تجربی مابین سختی جانبی خاک و پارامترهای بدون بعد تأثیرگذار بر میزان سختی، در حالت کلی به شکل یک چندجمله ای درجه ششم محاسبه شده است. برای مؤلفه چسبندگی خاک، این چندجمله ای درجه ششم به چندجمله ای درجه چهارم تقلیل می یابد. ضریب تعیین  $R^2$  برای تمام منحنی های تجربی برابر عددی بزرگ تر از  $0/9$  به دست آمده، که نشانگر دقت مناسب و رضایت بخش خم آمایی است.

۵. سختی جانبی محاسبه شده در این مطالعه، دارای یکای تنش است و چهار پارامتر ثابت طرف دوم تمام روابط حاصل شده، بدون بعد هستند. در حالت کلی باید گفت که به لحاظ ابعادی دو طرف رابطه هم بعد نیست، که این

## مراجع

1. Winkler, E., "Theory of Elasticity and Strength", Prague: Dominicus, (1867).
۲. سازمان امور مقررات ملی ساختمان ایران، «مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان: پی و پی سازی»، ویرایش سوم، (۱۳۹۲).
3. Itasca, FLAC<sup>3D</sup>, "Fast Lagrangian Analysis of Continua", version 3.00-261: user's and theory manuals. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc., (2002).
4. Reese, L.C., Van Impe, W.F., "Single Piles and Pile Group under Lateral Loading", Rotterdam: A. A. Balkema publishers, (2007).
5. Georgiadis, K., Georgiadis, M., "Un-drained Lateral Pile Response in Sloping Ground", *J Geotech Geoenviron Eng*, ASCE, Vol. 136 (11), PP. 1489-500, (2010).
6. Georgiadis, K., and Georgiadis, M., "Development of p-y Curves for Undrained Response of Piles near Slopes", *Journal Computer and Geotechnic*, Vol. 40, PP. 53-61, (2012).

7. Brinkgreve, R.B.J., Swolfs, W.M., "Plaxis 3D Foundation Version 2 User's Manual", Plaxis BV, Netherlands, (2007).
8. Comodromos, E. M., Papadopoulou, M. C., "Explicit Extension of the p-y Method to Pile Groups in Cohesive soils", *J Computers and Geotechnics*, Vol. 47, PP. 28-41, (2013).
9. Comodromos, EM., Papadopoulou, MC., "On the Response Prediction of Laterally Loaded Fixed - head Pile Groups in Sands", *Journal Computers and Geotechnics*, Vol. 37, PP. 903-41, (2010).
10. Nimityongskul, N., Barker, P., Ashford, SA., "Effects of Soil Slope on Lateral Capacity of Piles in Cohesive and Cohesionless Soils", Final report of a research project funded by Caltrans under facilities contract No. 59A0645, The Kiewit center for infrastructure and transportation ,Oregon state university, USA, March (2012).
11. Poulos, HG., Davis, EH., "Pile Foundation Analysis and Design", John Wiley, New York, (1980).
۱۲. شمس ملکی، یزدان، «بررسی عددی شمع‌های قائم تحت بار جانبی و استخراج منحنی‌های طراحی p-y در حالات خاص»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه رازی کرمانشاه، (مهرماه ۱۳۹۲).
13. Sharafi, H., Shams Maleki, Y., "p-y Curves in c-φ Soils by Considering Pile-soil Interface Properties Effects", *Electrical Journal of Geotechnical Engineering*, EJGE, Vol. 19(D), PP. 955-970, (2014).
14. Sharafi, H., Shams Maleki, Y., Karimpour-Fard, M., "Three Dimensional Finite Difference Modeling of Static Soil-pile Interactions to Calculate p-y Curves in Pile-Supported Slopes", *Arab J Geosci*, Springer AJGS, DOI 10.1007/s12517-015-2051-9, PP:1-16 (2015).
15. Matlock, H., "Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay", *Proceedings of 2nd Annual Offshore Technology Conference*, Paper No. OTC 1204, Houston, Texas, PP. 577-9, (1970).
16. Reese, LC., Welch, RC., "Lateral Loading of Deep Foundations in Stiff Clay", *Journal Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 101(7), PP.633-49, (1975).
17. Price, G., Wardle, I. F., "Lateral Load Tests on Large Diameter Bored Piles", Contractor report, Transport and road research laboratory, Department of transport, Crowthorne; Berkshire, England, PP. 45-6, (1987).
18. Ismael, NF., "Behavior of Laterally Loaded Bored Piles in Cemented Sands", *Journal Geotech Engrg*, ASCE, Vol. 116(11), PP. 1678-99, (1999).
19. Bhushan, K., Haley, SC, Fong, PT., "Lateral Load Tests on Drilled Piers in Stiff Clays", *Journal Geotech Engrg Div*, Vol.105, No, 8, PP. 969-85, (1979).
20. Stevens, J. B., Audibert, J. M. E., "Re-examination of p-y Curve Formulation", *Proceedings of the 11<sup>th</sup> Offshore Technology Conf*, OTC, Houston , PP. 397-403, OTC 3402, (1980).
21. O'Neil, M. W., Gazioglu, S. M., "An Evaluation of p-y Relationships in Clays", Report Prepared for the American Petroleum Institute (API), University of Houston, Tex, (1984).