

# بررسی باربری جانبی تک شمع قائم مجاور شیب تسلیم شده با تریشه‌های موکت به شیوه‌ی توزیع تصادفی

سید محمدعلی زاهدیان\* (استادیار)

بخش مهندسی آب، دانشگاه شیراز

مجتبی دهقان ابنوی (کارشناس ارشد)

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

مهندسی عمران شریف  
دوری ۲-۲۸، شماره ۳، ص. ۳۸-۳۱

در این نوشتار تأثیر تسلیم یک شیب ماسه‌یی با تریشه‌های موکت به شیوه‌ی توزیع تصادفی<sup>۱</sup> بر باربری جانبی تک شمع قائم مجاور شیب مطالعه شده است. برنامه‌ی مطالعات آزمایشگاهی شامل بررسی تأثیر پارامترهای گوناگونی از قبیل درصد وزنی، نسبت ابعاد مختلف تریشه‌های موکت، طول مدفون، اصطکاک جدار و شکل مقطع شمع، میزان تراکم، زاویه و فاصله‌ی شمع از لبه‌ی تاج شیب بر باربری جانبی تک شمع مجاور شیب ماسه‌یی است. درصد وزنی و نسبت ابعاد بهینه‌ی تریشه‌ها به ترتیب ۱/۵٪ و ۳٪ به دست آمده است که با این مقادیر بیشترین بهبود در باربری جانبی شمع‌ها حاصل شده است. براساس آزمایش‌های انجام شده بر روی مدل‌های کوچک مقیاس (مدل‌های فیزیکی) مشخص شد که استفاده از روش تسلیم، اثرات مفید و مناسبی بر بهبود ظرفیت باربری جانبی شمع‌های مجاور شیب داشته است.

واژگان کلیدی: شمع، بارجانبی، ماسه، شیب مسلح، تریشه‌های موکت.

## ۱. مقدمه

غالباً شمع‌ها علاوه بر بار قائم، تحت اثر نیروهای جانبی نیز قرار دارند. مثلاً به بار جانبی ناشی از برخورد کشتی با سازه‌های پهلوگیری اسکله‌ها، بار جانبی ناشی از فشار جانبی خاک بر دیوار حائل، بار ناشی از حرکت و ترمز اتومبیل بر روی پل‌ها، و بار ناشی از باد وارد به توربین‌های بادی غول‌پیکر می‌توان اشاره کرد. نیروهای افقی گاهی اوقات بسیار بیشتر از وزن خود سازه‌اند و نقش عمده‌یی در طراحی دارند، بنابراین سیستم‌های پی در چنین مواقعی باید برای مقابله با هر دو نیروی محوری و جانبی طراحی شوند.

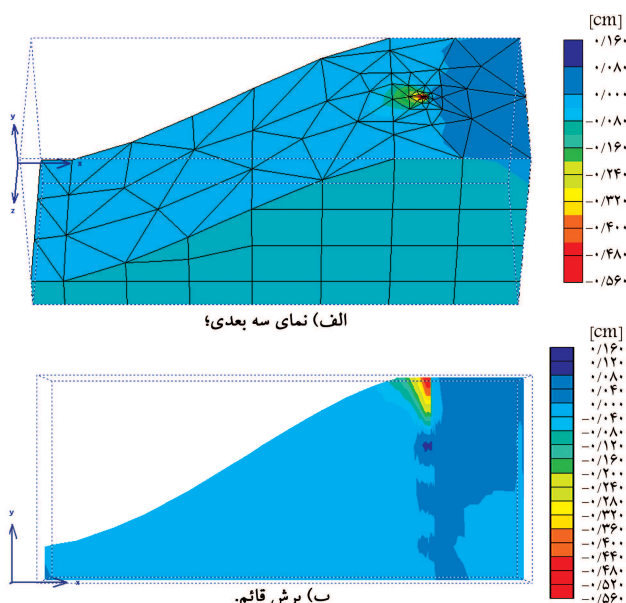
در گذشته، مطالعات عددی و آزمایشگاهی بسیاری بر روی تک شمع و گروه شمع‌های تحت بار جانبی و مستقر بر زمین‌های با سطح صاف و افقی انجام شده است.<sup>[۱-۴]</sup> گاهی اوقات ممکن است سازه‌های متکی بر شمع‌های قائم در مجاورت شیب‌ها و بردگی‌های طبیعی یا مصنوعی قرار گیرند. مثلاً به دکل‌های انتقال برق، پایه‌های پل‌ها، و ساختمان‌های بلندمرتبه می‌توان اشاره کرد. رفتار جانبی پی‌های شمعی و سازه‌های متکی بر آن‌ها در چنین مواقعی با رفتار آن‌ها زمانی که بر روی زمین صاف و افقی قرار گرفته‌اند، متفاوت است. زیرا شمع‌ها نه فقط ممکن است باعث القای گسیختگی در شیب (به خصوص در لایه‌های سطحی) شوند،

\* نویسنده مسئول

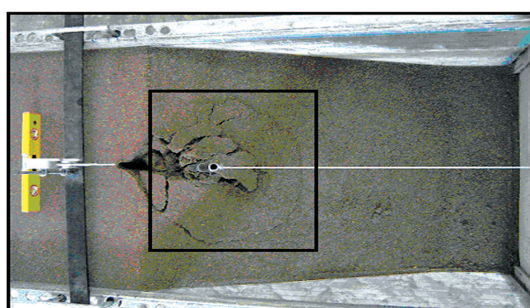
تاریخ: دریافت ۱۷/۱۲/۱۳۸۸، اصلاحیه ۱۸/۸/۱۳۸۹، پذیرش ۹/۲/۱۳۸۹.

mzomorod@shirazu.ac.ir  
modehghan\_17233@yahoo.com

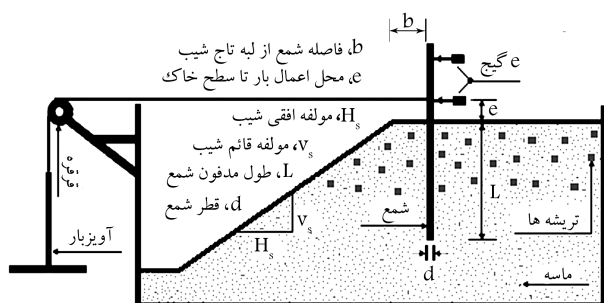
بلکه ممکن است ظرفیت باربری جانبی خود شمع‌ها نیز تا حد زیادی کاهش یابد. مطالعات عددی و آزمایشگاهی محدودی بر روی اثرات شیب‌دار بودن سطح زمین بر ظرفیت باربری جانبی شمع قائم مجاور شیب‌ها گزارش شده است.<sup>[۵-۱۴]</sup> به جز تحقیق از ال سواف که در آن رفتار باربری جانبی تک شمع و گروه شمع قائم مجاور شیب ماسه‌یی تسلیم شده با ژئوگرید مورد مطالعه قرار داده شده است، پژوهش‌های سایر محققان بر روی شیب‌های تسلیم نشده معطوف بوده است. برای افزایش مقاومت و پایداری زمین‌های شیب‌دار و به تبع آن بهبود رفتار سازه‌ها و پی‌های متکی بر آن‌ها، می‌توان از روش‌های مختلفی از قبیل میخ کوبی<sup>۲</sup>، تسلیم با المان‌های ممتد (برای مثال ژئوگرید)، نصب شمع‌ها یا سپرها استفاده کرد. با این حال آثار استفاده از روش تسلیم شیب با الیاف، رشته‌ها و تریشه‌ها به شیوه‌ی توزیع تصادفی بر باربری جانبی شمع قائم مجاور شیب، تاکنون مورد تحقیق و بررسی قرار نگرفته است. از طرفی پیشرفت‌های سریع علوم و تکنولوژی و توسعه‌ی روزافزون صنایع موجب به جاماندن مقدار زیادی ضایعات و به تبع آن بروز مشکلات عدیده‌ی زیست‌محیطی و اقتصادی شده است. این حجم عظیم ضایعات نیاز به محل‌های وسیع برای دفن دارند، که این امر به خصوص در کشورهای پر جمعیت که زمین گرانبهاست، به هیچ‌وجه مقرون به صرفه نیست. علاوه بر این، حتی به شرط تأمین زمین به منظور دفن ضایعات و یا استفاده از روش‌های دیگر چون سوزاندن آن‌ها، به نظر راهکاری مناسب و منطقی نمی‌آید. زیرا هر دوی این موارد موجب



شکل ۱. منحنی های هم تراز جابجایی های افقی.



شکل ۲. محدوده‌ی گسیختگی شمع تحت بار جانبی مجاور شیب.



شکل ۳. نمایی شماتیک از جعبه‌ی آزمایش.

## ۲.۲. خاک و المان تسلیح

برای انجام آزمایش‌ها از نوعی ماسه‌ی رودخانه‌یی یکنواخت استفاده شده است. ماسه براساس طبقه‌بندی متحد که مورد تأیید استاندارد ASTM نیز است، دانه‌بندی یکنواخت داشته است و در رده‌ی ماسه‌ی بد دانه‌بندی شده (SP) قرار می‌گیرد. منحنی دانه‌بندی ماسه مطابق شکل ۴ است. سایر مشخصات ماسه‌ی مورد آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

المان تسلیح مورد استفاده از جنس پلی پروپیلن است که از برش دادن نوارهای زائده کارخانه‌ی موکت شیراز به صورت تریشه‌هایی با ابعاد مختلف تهیه شده است. این تریشه‌ها دارای چگالی ( $G_s=1$ ) هستند و مقاومت کششی بیشینه و مدول کشسانی

آلودگی‌های زیست‌محیطی و به مخاطره افتادن سلامتی انسان‌ها می‌شوند. یکی از روش‌ها برای کمک به حل این مشکلات می‌تواند استفاده‌ی مجدد از آن‌ها در کاربردهای مهندسی عمران از قبیل ساخت سازه‌های حائل، خاکریزها، پایداری زیرساز راه‌ها، و بستری‌ها باشد، تا با یک تلاش دو هدف مهم یعنی به نوعی استفاده‌ی مجدد و در ابعاد وسیع از این قبیل ضایعات و علاوه بر آن اصلاح خواص مهندسی و رفتار مکانیکی خاک را تأمین کرد. بنابراین هدف اصلی در این پژوهش بررسی میزان تأثیر استفاده از نوعی زوائد پلیمری-الیافی (تریشه‌های موکت) به عنوان المان تسلیح بر رفتار جانبی تک شمع قائم مجاور شیب ماسه‌یی است. برای نیل به این هدف مجموعه‌ی آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی مدل کوچک مقیاس شمع مجاور شیب ماسه‌یی تسلیح شده با تریشه‌های موکت به شیوه‌ی توزیع تصادفی انجام شده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۲.۱. جعبه‌ی آزمایش

براساس مطالعات انجام شده پیرامون مبحث باربری جانبی شمع‌ها، مشخص شده است که حضور مرزهای صلب قرارگرفته در فواصل بیشتر از  $10^\circ$  برابر قطر شمع (فاصله از مرکز شمع)، تأثیری بر پاسخ سیستم ندارد. زیرا ناحیه‌ی تحت تنش مؤثر توده‌ی خاک در حدود  $10^\circ$  برابر قطر شمع، در جهت اعمال بار جانبی به شمع گزارش شده است.<sup>[۱۶،۱۵]</sup> بنابراین با توجه به مطالب ذکرشده، تخمین‌های اولیه برای انتخاب ابعاد جعبه‌ی آزمایش در نظر گرفته شد، اما برای اطمینان بیشتر از تناسب ابعاد تخمینی برای جعبه‌ی آزمایش، یک سری مطالعه‌های تجزیه و تحلیل ابعادی با نرم افزار Plaxis ۳D Foundation V۱.۸ و در نظر گرفتن اهداف اصلی تحقیق انجام شد. با توجه به مدل‌سازی عددی انجام شده با نرم‌افزار مذکور، مشخص شد که جابه‌جایی‌های ایجادشده در اثر بارگذاری جانبی شمع، اغلب در محدوده‌ی اطراف بدنه‌ی شمع رخ داده است، به طوری که بیشترین مقادیر جابجایی در نزدیکی سطح خاک است. مضاف بر این، براساس نتایج مدل‌سازی‌های عددی مشخص شد که این تغییرات به مرزهای مدل نرسیده و به نظر می‌رسد که این موضوع در جهت تأیید کافی و تناسب ابعاد جعبه به نظر اجتناب از اثرات مرزهای مدل بر باربری جانبی شمع است. نمونه‌یی از منحنی‌های هم تراز جابجایی‌های افقی حاصل از تحلیل‌های انجام شده با نرم‌افزار Plaxis ۳D Foundation در شکل ۱ نشان داده شده است. نحوه‌ی گسیختگی و الگوهای جابجایی مشاهده شده در حین انجام آزمایش‌ها نیز کافی و تناسب ابعاد انتخاب شده برای جعبه‌ی آزمایش را تأیید می‌کنند (شکل ۲). با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که ناحیه‌ی گسیختگی به مرزهای جانبی جعبه‌ی آزمایش نرسیده است. بنابراین با توجه به مطالب مذکور، جعبه‌ی آزمایش با ابعاد داخلی  $m$  در دو وجه طولی جعبه‌ی آزمایش، شیشه‌ی سکوریت (جداره‌های صاف و صیقلی) به ضخامت  $10^\circ$  میلی‌متر قرار گرفته است و با این تدبیر، پیاده‌سازی الگوی شیب و لایه‌های پیاپی خاک امکان پذیر شده است. علاوه بر این، وجوه شیشه‌یی مقابل یکدیگر امکان مشاهده‌ی عینی مراحل آماده‌سازی نمونه و جابجایی‌های ایجادشده در توده‌ی خاک را طی مراحل مختلف آزمایش فراهم کرده است. در سیستم بارگذاری از یک سیم فولادی به قطر  $3$  میلی‌متر استفاده شده است که این سیم از یک سو به وسیله‌ی بست فلزی به سرشمع و از سوی دیگر به وسیله‌ی یک قلاب، پس از عبور از روی قرقره به آویز بار متصل شده است. در شکل ۳، نمایی شماتیک از جعبه‌ی آزمایش، سیستم بارگذاری، و معرفی پارامترهای مختلف نشان داده شده است.

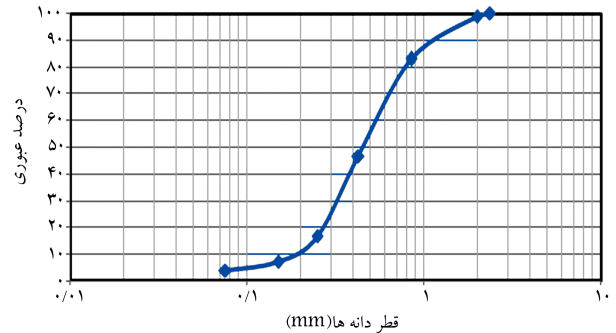
جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی مورد آزمایش.

$\gamma_d(\max)$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\gamma_d(\min)$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$G_s$	$D_{10}$ (mm)	$D_{30}$ (mm)	$D_{50}$ (mm)	$D_{60}$ (mm)	$C_u$	$C_c$
۱۶٫۹۹	۱۴٫۱۳	۲٫۶۹	۰٫۲	۰٫۳۲	۰٫۴۵	۰٫۵۴	۲٫۷	۰٫۹۵

آزمایش ریخته شد و به اندازه‌ی مشخص با کوبه‌های خاصی که برای متراکم کردن خاک در نظر گرفته شده بودند، کوبیده شد. عمل ریختن و کوبیدن لایه‌های پیاپی ماسه تا رسیدن به تراز‌ی که باید شمع نصب شود (این تراز به طول مدفون شمع بستگی دارد)، ادامه یافت. در این مرحله شمع در محل از پیش تعیین شده (این محل در جهت عرضی، درست در وسط عرض جعبه و در جهت طولی با توجه به فاصله‌ی شمع از لبه‌ی تاج شیب متغیر بود) به وسیله‌ی یک گیره به صورت قائم (برای کنترل قائم بودن شمع از تراز دستی استفاده شد) بر تراز لایه مهار شد. میزان تراکم شیب به وسیله‌ی جعبه‌های کوچک استوانه‌یی که این جعبه‌ها حین مراحل ساخت درون شیب قرار می‌گرفتند، کنترل شد. این مراحل در حالت تسلیح نشده تا رسیدن به سطح لایه‌ی آخر ادامه یافت؛ اما در حالت تسلیح شده، پس از توزین میزان تریشه‌های لازم برای تسلیح، تریشه‌ها و ماسه برای اختلاط بهتر به چهار قسمت مساوی تقسیم شدند و هر قسمت از تریشه‌ها با یک قسمت از ماسه، یک بار با دست و یک بار با بیل به هم خوردند و در نهایت هر چهار قسمت به وسیله‌ی بیل با یکدیگر مخلوط شدند. سپس مخلوط ماسه و تریشه‌ها با دقت و به آرامی در جعبه‌ی آزمایش ریخته و متراکم شدند. برای جلوگیری از جداشدگی یا به عبارتی شناور شدن تریشه‌ها به هنگام اختلاط با ماسه، تریشه‌ها به میزان مشخصی مرطوب شدند. پس از پایان کوبش لایه‌ی آخر با خارج کردن ماسه‌های اضافی از جعبه‌ی آزمایش، سطح نمای شیب با استفاده از خطکش چوبی و با توجه به الگوی شیب ترسیم شده بر روی وجوه شیشه‌یی مقابل یکدیگر به آرامی و با دقت بسیار زیاد ساخته شد. برای به کمینه رساندن اثرات کف جعبه، شیب‌های مدل بر روی یک پایه‌ی ماسه‌یی به ضخامت ۲۵ سانتی‌متر قرار گرفتند. پس از تکمیل شدن شیب، بار جانبی به صورت تدریجی تا رسیدن به حالت گسیختگی بر شمع‌های مدل اعمال شد و در هر گام بارگذاری، جابجایی افقی سر شمع با گیج‌های صفحه‌ی ساعتی اندازه‌گیری شدند.

## ۵.۲. برنامه‌ی آزمایش‌ها

آزمایش‌های انجام شده را می‌توان در سه بخش مجزا تفکیک کرد. سری یک: آزمایش‌هایی در حالت شیب تسلیح نشده، سری دو: آزمایش‌هایی در حالت شیب تسلیح شده با درصد‌های وزنی و نسبت ابعاد مختلف تریشه‌های موکت (این سری از آزمایش‌ها به منظور بررسی تأثیر تسلیح شیب با تریشه‌های موکت به شیوه‌ی توزیع تصادفی بر باربری جانبی تک شمع قائم مجاور شیب و نیز به دست آوردن مقادیر بهینه‌ی تریشه‌ها انجام شده است) و در نهایت آزمایش‌های سری سه در حالتی که شیب با مقادیر بهینه‌ی تریشه‌ها (این مقادیر بهینه از آزمایش‌های سری دو حاصل شده‌اند) تسلیح شده بود، انجام شده است. آزمایش‌های سری یک و سه به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلفی از قبیل طول مدفون، اصطکاک جدار و شکل مقطع شمع، زاویه، تراکم و فاصله‌ی شمع از لبه‌ی تاج شیب بر باربری جانبی تک شمع‌های قائم مجاور شیب ماسه‌یی انجام شده‌اند. در جدول ۲ برنامه‌ی آزمایش‌ها به صورت خلاصه همراه با پارامترهای ثابت و متغیر دخیل در هر آزمایش ارائه شده است. باید متذکر شد که به غیر از موارد مربوط به شمع مربعی و شیب با زاویه‌ی



شکل ۴. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده شده در پژوهش.

اولیه‌ی آن‌ها به ترتیب ۸۰۰ و ۷۳۰ کیلوپاسکال است. مقطع تریشه‌ها به صورت مستطیلی (به طول ۲۰ و عرض ضخامت موکت) ۵ میلی‌متر، طول آن‌ها ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ میلی‌متر (به ترتیب معادل با نسبت ابعاد ۱، ۲، ۳ و ۴) و درصد‌های وزنی مورد استفاده ۰٫۳، ۰٫۶، ۰٫۹، ۱٫۲، ۱٫۵ و ۱٫۸ درصد وزن ماسه‌ی خشک هستند.

## ۳.۲. مشخصات شمع‌های مورد استفاده

از لوله‌ی فولادی به قطر خارجی ۲۱٫۳ و قطر داخلی ۱۶٫۱ میلی‌متر (شمع دایره‌یی) و قوطی فولادی به بعد خارجی ۲۰ و بعد داخلی ۱۷ میلی‌متر (شمع مربعی) استفاده شده است. در خاک‌های غیرچسبیده ضریب سختی ( $T$ ) با استفاده از فرمول ۱ محاسبه می‌شود:

$$T = \sqrt{\frac{E_{PI}P}{n_h}} \quad (1)$$

در این رابطه  $E_{PI}P$  سختی خمشی شمع (در این پژوهش  $1361 \text{ N.m}^2$ ) و  $n_h$  مدول ثابت عکس‌العمل افقی بستر است. مقادیر  $n_h$  برای ماسه‌های سست، نیمه متراکم، و متراکم، به ترتیب ۱۹۰۰، ۶۰۰۰ و  $13500 \text{ (kN/m}^2)$  در نظر گرفته شده است.<sup>[۱۷]</sup> بر اساس پیشنهاد برامز ۱۹۶۴، برای یک شمع سر آزاد، طول مدفون شمع برای اینکه رفتاری مشابه با یک شمع صلب کوتاه داشته باشد، باید کوچک‌تر یا مساوی  $2T$  و برای اینکه رفتاری مشابه یک شمع طویل انعطاف‌پذیر داشته باشد، باید بزرگ‌تر یا مساوی  $4T$  باشد. طول مدفون شمع‌های مورد استفاده در این پژوهش، ۳۰ سانتی‌متر ( $L/d=14/1$ ) کوچک‌تر از  $2T$ ، ۳۸٫۵ سانتی‌متر ( $L/d=18/1$ ) بین  $2T$  و  $4T$  و در نهایت ۶۴٫۵ سانتی‌متر ( $L/d=30/3$ ) بزرگ‌تر از  $4T$  در نظر گرفته شده‌اند.

## ۴.۲. روش انجام آزمایش

ارتفاع سطح خاک در جعبه‌ی آزمایش به ۱۲ قسمت مساوی (هر قسمت ۶ سانتی‌متر) با علامت‌گذاری بر روی وجوه شیشه‌یی مقابل یکدیگر تقسیم شده است و هر قسمت حکم یک لایه‌ی خاک را دارد. ماسه‌ی مرطوب با دقت به درون جعبه

۱ قائم: ۲ افقی (این موارد در جدول با آزمایش‌های شماره‌ی ۵، ۶، ۱۲ و ۱۳ مشخص شده‌اند)، مابقی آزمایش‌های جدول ۲ بر روی شمع‌های دایره‌یی مجاور شیب ۱ قائم: ۱/۵ افقی، انجام شده‌اند.

### ۳. نتایج و بحث

کلیدهای پارامترهای ثابت و متغیرهای دخیل در آزمایش‌هایی که به‌منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلف انجام و نتایج آن‌ها در این بخش ارائه شده است، مطابق با جدول ۲ است.

#### ۱.۳. اثرات درصد وزنی و نسبت ابعاد مختلف تریشه‌ها

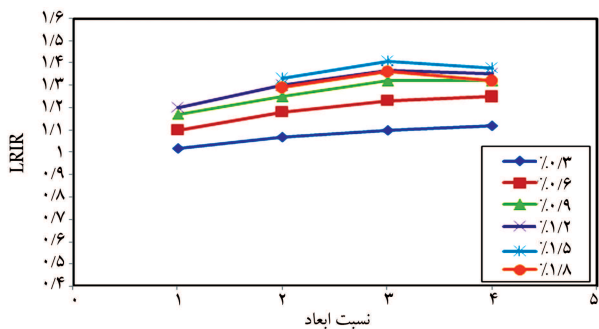
بهبود باربری جانبی شمع ناشی از اثرات تسلیح شیب، به‌صورت پارامتر بی‌بعد نسبت باربری جانبی بهبودیافته (LRIR)<sup>۲</sup> معرفی شده است. این پارامتر به‌صورت نسبت بار جانبی یک شمع مشخص مجاور شیب تسلیح‌شده، به بار جانبی همان شمع اما مجاور شیب تسلیح‌نشده و در یک جابجایی جانبی مشخص تعریف می‌شود. جابجایی افقی سرشمع (y) نیز به‌صورت یک پارامتر بی‌بعد (d قطر شمع) و برحسب درصد معرفی شده است. با توجه به مطالعات موجود<sup>[۱۳،۱۴]</sup> ظرفیت باربری جانبی شمع نیز از منحنی‌های بار جانبی -نسبت جابجایی (y/d)، با در نظر گرفتن بار جانبی متناظر با نسبت جابجایی جانبی ۲۰٪ تعیین شده است.

تأثیر مسلح‌کردن شیب با درصدهای وزنی و نسبت ابعاد مختلف تریشه‌ها بر باربری جانبی شمع، به‌صورت پارامتر LRIR در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که کم‌ترین مقدار LRIR، ۱/۰۲۳ (تریشه‌های با نسبت ابعاد ۱ و درصد وزنی ۰/۳) و بیشترین مقدار این پارامتر، ۱/۴۱۴ (تریشه‌های با نسبت ابعاد ۳ و درصد وزنی ۱/۵) به‌دست آمده است. در شکل ۵، نمونه‌یی از منحنی‌های بار جانبی -نسبت جابجایی (y/d) که مربوط به شیب‌های تسلیح‌شده با نسبت ابعاد ۳ و درصدهای وزنی ۰/۳ تا ۱/۸ و همچنین شیب تسلیح‌نشده می‌باشد، نشان داده شده است.

به‌طور کلی می‌توان گفت که افزودن تریشه‌ها به ماسه، موجب افزایش باربری جانبی شمع مجاور شیب شده است. این افزایش باربری جانبی شمع را می‌توان به مکانیزم عمل و رفتار خاک مسلح که می‌تواند بر اثرات متقابل بین خاک و المان تسلیح است، مرتبط دانست. با توجه به اینکه خاک در حالت متراکم است، مکانیزم قفل‌شوندگی و درگیری دانه‌های خاک با تریشه‌ها موجب خواهد شد تا در فصل مشترک خاک و تریشه‌ها، تنش برشی بسیج شود. عکس‌العمل این تنش‌ها، بسیج مقاومت کششی در تریشه‌ها در برابر تنش کششی اعمال‌شده خواهد بود. بنابراین به‌نظر می‌رسد که اندرکنش توده‌ی خاک جلوی شمع و تریشه‌ها موجب انتقال تنش از خاک به تریشه‌ها و به‌تبع آن افزایش باربری جانبی شمع شده است. در شکل ۶، منحنی تغییرات LRIR در مقابل درصدوزنی تریشه‌ها نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که تأثیر تریشه‌ها در افزایش پارامتر LRIR، در درصدهای وزنی پایین عمده‌تر بوده است و به‌تدریج با افزایش درصد وزنی، نرخ

جدول ۲. برنامه‌ی آزمایش‌های انجام‌شده.

شماره‌ی آزمایش	پارامترهای ثابت	پارامترهای متغییر	سری آزمایش
۱	چگالی نسبی $b/d = 2, (D_r) = 75\%$	$L/d = 14, 18, 19, 30, 33$	سری یک (بدون تسلیح)
۲	$b/d = 2, L/d = 18, 1$	چگالی نسبی (درصد) $(D_r) = 30, 53, 75$	
۳	چگالی نسبی $L/d = 18, 1, (D_r) = 75\%$	$b/d = 0, 2, 6, 12$	
۴	چگالی نسبی $b/d = 2, L/d = 18, 1, (D_r) = 75\%$	زبری جداره شمع	
۵	چگالی نسبی $b/d = 2, L/d = 18, 1, (D_r) = 75\%$	شکل مقطع شمع (مربعی)	
۶	چگالی نسبی $b/d = 2, L/d = 18, 1, (D_r) = 75\%$	زاویه شیب (۱ قائم: ۲ افقی یا ۲۶/۶ درجه)	
۷	چگالی نسبی $b/d = 2, L/d = 18, 1, (D_r) = 75\%$	درصد وزنی $= 15, 17, 20, 29, 30, 36, 37, 38$ و ۱/۸ درصد نسبت ابعاد $= 3, 2, 1$	سری دو (تسلیح‌شده با درصدهای وزنی و نسبت ابعاد مختلف تریشه‌ها)
۸	چگالی نسبی $b/d = 2, (D_r) = 75\%$	$L/d = 14, 18, 19, 30, 33$	سری سه (تسلیح‌شده با ۱/۵ درصدوزنی تریشه‌ها با نسبت ابعاد ۳)
۹	$b/d = 2, L/d = 18, 1$	چگالی نسبی (درصد) $(D_r) = 30, 53, 75$	
۱۰	چگالی نسبی $L/d = 18, 1, (D_r) = 75\%$	$b/d = 0, 2, 6, 12$	
۱۱	چگالی نسبی $b/d = 2, L/d = 18, 1, (D_r) = 75\%$	زبری جداره شمع	
۱۲	چگالی نسبی $b/d = 2, L/d = 18, 1, (D_r) = 75\%$	شکل مقطع شمع (مربعی)	
۱۳	چگالی نسبی $b/d = 2, L/d = 18, 1, (D_r) = 75\%$	زاویه شیب (۱ قائم: ۲ افقی یا ۲۶/۶ درجه)	



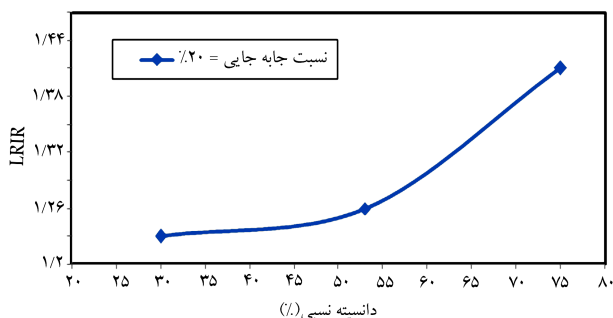
شکل ۷. تغییرات LRIR درمقابل نسبت ابعاد تریشه‌ها.

می‌شوند؛ به طوری که ماحصل این جابجایی ذرات کاهش تراکم است. علاوه بر مطالب ذکر شده، زمانی که درصد وزنی تریشه‌ها از حد مشخصی بیشتر شود، اختلاط آن‌ها با خاک تقریباً غیرعملی است و تضمینی برای توزیع یکنواخت و همگن تریشه‌ها در خاک وجود ندارد. به هرحال افزایش میزان LRIR برحسب درصد وزنی تریشه‌ها، به طور مشخص در ارتباط با بسیج شدن بیشتر نیروهای کششی در ناحیه‌ی برشی قابل تفسیر است. در شکل ۷ مشاهده می‌شود که تأثیر نسبت ابعاد تریشه‌ها بر پارامتر LRIR، مشابه تأثیر درصد وزنی بر این پارامتر است.

به نظر می‌رسد زمانی که نیروی کششی بزرگ و طول تریشه‌ها کوتاه باشد، این نیرو بر نیروی مقاوم در برابر برون‌کشی غلبه می‌کند و بنابراین قفل و بست بین خاک و المان تسلیخ از هم گسسته می‌شود (لغزش). به عبارتی در نسبت ابعاد پایین، طول مناسب برای بسیج تنش‌های کافی در تریشه‌ها وجود ندارد. به دلیل تاخوردگی و غیرمستقیم ماندن تریشه‌ها در نسبت‌های ابعاد بالا، کاهش طول مؤثر تریشه‌ها موجب کاهش مقاومت برشی بسیج شده می‌شود.

### ۲.۳. اثرات چگالی نسبی

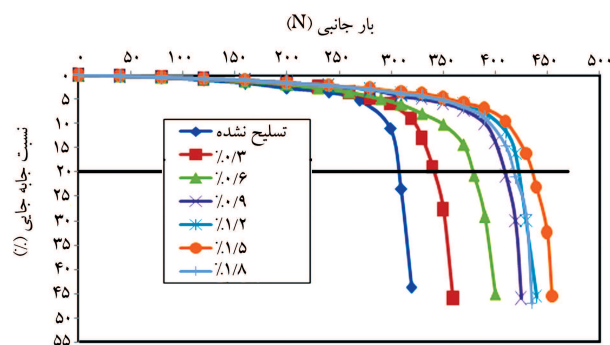
در شکل ۸، تغییرات LRIR درمقابل چگالی نسبی شیب ماسه‌ی نشان داده شده است. از این شکل به روشنی می‌توان دریافت که تأثیر تسلیخ بر بهبود باربری جانبی شمع واقع در شیب‌های ماسه‌ی نیمه متراکم تا متراکم نسبت به شمع واقع در شیب‌های ماسه‌ی سست تا نیمه متراکم، خیلی بیشتر است. به نظر می‌رسد بهبود باربری جانبی شمع با افزایش چگالی نسبی، ناشی از اندرکنش ماسه - تریشه‌ها - شمع، باشد. زمانی که شیب متراکم است، قفل و بست و درگیری اجزای محیط مرکب با یکدیگر بیشتر است و این امر باعث ایجاد یک باند قوی‌تر در فصل مشترک دانه‌های ماسه و تریشه‌ها نسبت به حالت نیمه متراکم و سست می‌شود و به تبع آن مقاومت و باربری محیط مرکب افزایش می‌یابد.



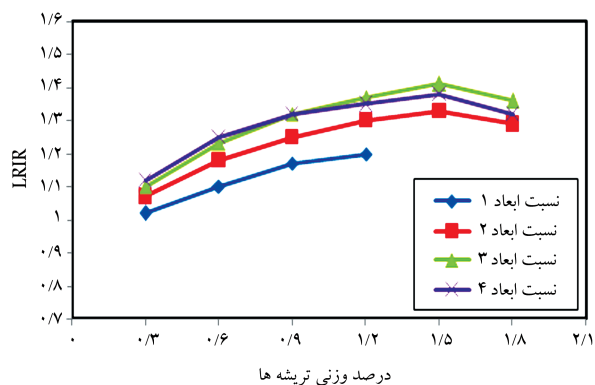
شکل ۸. تغییرات LRIR درمقابل چگالی نسبی شیب ماسه‌ی.

جدول ۳. پارامتر LRIR برای درصدهای وزنی و نسبت ابعاد مختلف تریشه‌ها (بارها براساس  $y/d=20\%$ ).

درصد وزنی	نسبت ابعاد			
	۴	۳	۲	۱
۰٫۳	۱٫۱۲۳	۱٫۱۰۳	۱٫۰۷۱	۱٫۰۲۳
۰٫۶	۱٫۲۵۶	۱٫۲۳۰	۱٫۱۸۴	۱٫۱۰۳
۰٫۹	۱٫۳۲۴	۱٫۳۲۴	۱٫۲۵۶	۱٫۱۷۱
۱٫۲	۱٫۳۵۳	۱٫۳۷۲	۱٫۳۰۴	۱٫۲۰۱
۱٫۵	۱٫۳۸۵	۱٫۴۱۴	۱٫۳۲۷	-
۱٫۸	۱٫۳۲۴	۱٫۳۵۹	۱٫۲۹۱	-



شکل ۵. تغییرات بار جانبی - نسبت جابجایی شیب تسلیخ شده با نسبت ابعاد ۳.



شکل ۶. تغییرات LRIR درمقابل درصدوزنی تریشه‌ها.

افزایش LRIR کاهش می‌یابد تا اینکه افزودن تریشه‌ها بیش از ۱٫۵٪ وزنی موجب کاهش LRIR شود.

این رفتار از این منظر منطقی و قابل تفسیر است که در درصدهای وزنی بالا به تدریج با جایگزین شدن تریشه‌ها به جای دانه‌های خاک و با توجه به اینکه این تریشه‌ها حجم نسبتاً زیادی را در محیط مرکب متشکل از ماسه و تریشه اشغال می‌کنند، از یک سو میزان ماسه‌ی لازم برای اینکه تریشه‌ها را در خود جای دهد و قفل و بست و درگیری مناسبی با آن‌ها ایجاد کند، ناکافی شده است و از سوی دیگر، رفتار این محیط مرکب تحت تأثیر تریشه‌ها قرار می‌گیرد و به عبارتی تریشه‌ها کنترل‌کننده‌ی رفتار نمونه‌ها می‌شوند. به نظر می‌رسد شبیه چنین رفتاری را بتوان در تفسیر منحنی تراکم مشاهده کرد که در رطوبت‌های بالاتر از رطوبت بهینه و در یک حجم ثابت خاک متراکم شده، قسمتی از ذرات آب در حقیقت جایگزین ذرات خاک

### ۳.۳. اثرات طول مدفون شمع

طول مدفون شمع نه فقط نشان دهنده‌ی نوع رفتار شمع (صلب یا انعطاف پذیر) می‌باشد، بلکه بر باربری جانبی آن نیز تأثیرگذار است. در شکل ۹، تغییرات LRIR در مقابل نسبت بی‌بعد طول مدفون به قطر شمع ( $L/d$ )، نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که افزایش طول مدفون شمع، موجب بهبود باربری جانبی شمع شده است. سختی خاک در اعماق سطحی شیب ماسه‌یی متراکم کم‌تر است (این سختی کم‌تر ناشی از وجود خود شیب است) و بنابراین جابجایی‌های جانبی در این بخش‌ها بیشتر می‌باشد. در حالی که با بیشتر شدن عمق، این جابجایی‌ها به دلیل مقاومت بیشتر خاک احاطه‌کننده‌ی شمع کاهش می‌یابد.

بنابراین به نظر می‌رسد بهبود باربری جانبی، با افزایش طول مدفون شمع را بتوان با افزایش مقاومت خاک اطراف شمع و به تبع آن کاهش جابجایی خاک که با بیشتر شدن عمق اتفاق می‌افتد، مرتبط دانست.

### ۴.۳. اثرات محل قرارگیری شمع نسبت به لبه‌ی تاج شیب

فاصله‌ی شمع از لبه‌ی تاج شیب با نسبت بی‌بعد ( $b/d$ ) مشخص شده است. در شکل ۱۰، تغییرات LRIR در مقابل نسبت  $b/d$  نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که بیشینه‌ی اثرات مفید تسلیح مربوط به زمانی است که شمع درست در لبه‌ی تاج شیب ( $b/d=0$ ) قرار گرفته باشد. با دور شدن شمع از لبه‌ی تاج شیب، پارامتر LRIR کاهش می‌یابد، هرچند باربری جانبی شمع مجاور شیب نیز افزایش یافته است. کاهش در نسبت باربری جانبی بهبود یافته تا نسبت  $b/d=7$  آشکار است و پس از این مقدار، کاهش متوقف می‌شود و تأثیر شیب بر رفتار شمع ناچیز و قابل اغماض است.

### ۵.۳. اثرات زاویه‌ی شیب

با توجه به جدول ۴ مشاهده می‌شود که باربری جانبی شمع مجاور شیب کندتر ( $26/6$  درجه)، در هر دو حالت تسلیح نشده و تسلیح شده، بیشتر از باربری جانبی شمع مجاور شیب تندتر ( $33/7$  درجه) به دست آمده است، اما نسبت باربری جانبی بهبود یافته در حالت شیب تندتر بیشتر می‌باشد. به نظر می‌رسد با افزایش زاویه‌ی شیب، فشار مقاوم توده‌ی ماسه در بخش جلویی شمع کاهش یافته است و این امر موجب کاهش باربری جانبی شمع شده است.

### ۶.۳. اثرات اصطکاک جداری

آزمایش‌های این مرحله بر روی شمع‌های با جداری صاف و زبر (زبری جداری خارجی شمع با چسباندن کاغذ سمباده‌ی شماره‌ی ۶۰ تأمین شده است) انجام گرفته است. با توجه به جدول ۵ ملاحظه می‌شود که با زبر شدن جداری خارجی شمع، باربری جانبی در هر دو حالت تسلیح نشده و تسلیح شده، کمی افزایش یافته (این افزایش چندان قابل ملاحظه نیست و به نظر می‌رسد این موضوع ناشی از نوع کاغذ سمباده‌ی مورد استفاده در این پژوهش باشد که نتوانسته است تأثیر چندان‌ی بر افزایش اصطکاک جداری مدل‌های شمع بگذارد) و نسبت باربری جانبی بهبود یافته اندکی کاهش یافته است.

### ۷.۳. اثرات شکل مقطع شمع

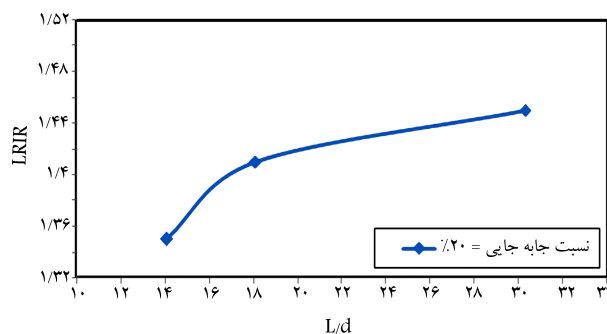
با توجه به جدول ۶ ملاحظه می‌شود که با تغییر مقطع شمع از دایره به مربع، باربری جانبی شمع در هر دو حالت تسلیح نشده و تسلیح شده افزایش یافته است، اما نسبت باربری جانبی بهبود یافته در هر دو حالت تقریباً یکسان است.

جدول ۴. تأثیر زاویه‌ی شیب بر LRIR (بارها براساس  $y/d=20\%$ ).

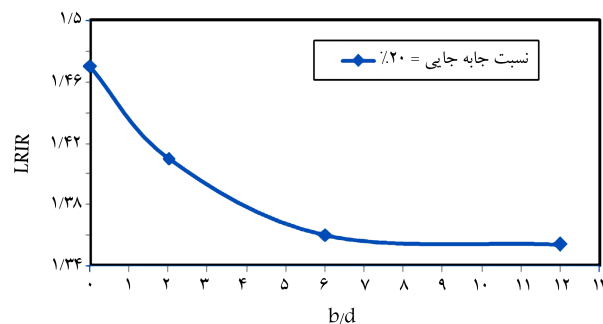
زاویه‌ی شیب	بارجانبی در حالت تسلیح نشده (N)	بارجانبی در حالت تسلیح شده (N)	نسبت باربری جانبی بهبود یافته (LRIR)
۱ قائم: ۱/۵ (درجه) (۳۳/۷)	۳۰۹	۴۳۷	۱/۴۱۴
۱ قائم: ۲ افقی (درجه) (۲۶/۶)	۳۳۶	۴۵۴	۱/۳۵۱

جدول ۵. تأثیر اصطکاک جداری بر LRIR (بارها براساس  $y/d=20\%$ ).

وضعیت جداری شمع	بارجانبی در حالت تسلیح نشده (N)	بارجانبی در حالت تسلیح شده (N)	نسبت باربری جانبی بهبود یافته (LRIR)
جداری صاف	۳۰۹	۴۳۷	۱/۴۱۴
جداری زبر	۳۲۳	۴۴۸	۱/۳۸۷



شکل ۹. تغییرات LRIR در مقابل نسبت  $L/d$ .



شکل ۱۰. تغییرات LRIR در مقابل نسبت  $b/d$ .

جدول ۶. تأثیر شکل مقطع شمع بر LRIR (بارها براساس  $y/d=2^\circ$ ).

شکل مقطع شمع	بارجانبی در حالت تسلیح نشده (N)	بارجانبی در حالت تسلیح شده (N)	نسبت باربری جانبی بهبودیافته (LRIR)
دایره‌یی	۳۰۹	۴۳۷	۱٫۴۱۴
مربعی	۳۳۵	۴۷۰	۱٫۴۰۳

#### ۴. نتیجه‌گیری

نتایج ارائه‌شده در این نوشتار را می‌توان به این صورت خلاصه کرد:

۱. کم‌ترین مقدار LRIR در حالت تریشه‌های با نسبت ابعاد ۱ و درصد وزنی ۳/۰ و برابر با ۲۳/۱ و بیشترین مقدار این پارامتر در حالت تریشه‌های با نسبت ابعاد ۳ و درصد وزنی ۵/۱ و برابر با ۴۱۴/۱ به دست آمده است. بنابراین درصد وزنی و نسبت ابعاد بهینه‌ی تریشه‌ها به ترتیب ۳ و ۱٫۵ است.
۲. تسلیح شیب ماسه‌یی با تریشه‌های موکت به شیوه‌ی توزیع تصادفی، اثرات مفید و مناسبی بر افزایش باربری جانبی تک شمع قائم مجاور شیب دارد و به طور کلی این اثرات مفید در پاره‌یی از موارد که به نوعی ضعف بیشتر بوده است، از قبیل تندتر بودن زاویه‌ی شیب، نزدیک‌تر بودن شمع به لبه‌ی تاج شیب، و صاف بودن جداری خارجی شمع، بیشتر نمایان شده است.
۳. افزایش طول مدفون و فاصله‌ی شمع از لبه‌ی تاج شیب، کاهش زاویه و افزایش میزان تراکم شیب، زبر شدن جداری شمع، و در نهایت تغییر شکل مقطع شمع از دایره به مربع در هر دو حالت شیب تسلیح‌نشده و تسلیح‌شده، موجب افزایش باربری جانبی شمع شده است.
۴. با نزدیک‌تر شدن شمع به لبه‌ی تاج شیب اثرات مفید تسلیح بیشتر نمایان شد و بیشترین تأثیر زمانی حاصل شد که شمع درست در لبه‌ی تاج شیب قرار گرفته بود.
۵. زمانی که فاصله‌ی شمع از لبه‌ی تاج شیب بیش از ۷ برابر قطر شمع باشد، تأثیر شیب بر رفتار شمع ناچیز و قابل اغماض است.
۶. میزان بهبود باربری جانبی شمع با استفاده از تریشه‌های موکت به‌عنوان المان تسلیح، به میزان زیادی به چگالی نسبی شیب بستگی دارد، به طوری که برای شیب‌های ماسه‌یی سست، بهبود نسبتاً کم است، اما در حالت شیب متراکم بهبود باربری جانبی شمع به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.

#### ۸.۳. اثرات مقیاس و محدودیت‌ها

به دلیل نیاز به صرف وقت و هزینه‌ی زیاد برای آزمایش بر روی مدل‌های بزرگ مقیاس در محل، آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی مدل‌های کوچک مقیاس، روشی است که به طور وسیعی استفاده می‌شود. در آزمایش‌های انجام‌شده شمع‌های مدل با مقیاس مشخصی کوچک شده‌اند، درحالی که ماسه‌ی به‌کاررفته در مدل کوچک مقیاس آزمایشگاهی همان مصالحی است که در مدل‌های واقعی استفاده می‌شود. بنابراین ممکن است خاک یا شمع، در مدل‌های کوچک مقیاس، همان رفتاری را که در مدل‌های واقعی از آن‌ها دیده می‌شود، نداشته باشد و به تبع آن تأییراتی بر نتایج آزمایش‌ها بگذارند که به منزله‌ی اثرات مقیاس شناخته می‌شوند. قطر شمع (d) مورد استفاده در آزمایش‌ها بیش از ۴۷ برابر قطر متوسط دانه‌ها ( $D_{50}$ ) می‌باشد و از مقدار ۴۰ که معمولاً پیشنهاد می‌شود، بیشتر است.<sup>[۱۸]</sup> به هر حال نمی‌توان با تکیه بر نتایج به دست آمده از آزمایش بر روی مدل‌های کوچک مقیاس، رفتار واقعی در محل را پیش‌بینی کرد، اما به طور کلی مطالعات انجام‌شده در این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش تسلیح شیب با تریشه‌های موکت به شیوه‌ی توزیع تصادفی می‌تواند باربری جانبی شمع‌های قائم مجاور شیب را افزایش دهد و مرجع مناسبی برای پژوهش‌های آینده و انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس، مدل‌های سانتریفیوژ، و مطالعات عددی فراهم آورد.

#### پانوشتها

1. randomly distributed method
2. soil nailing
3. lateral resistance improvement ratio (LRIR)

#### منابع (References)

1. Brinch Hansen, J. "Ultimate resistance of rigid piles against transversal forces", *Danish Geotechnical Institute, Copenhagen, Denmark*, **12**, pp. 5-9 (1961).
2. Broms, B.B. "Lateral resistance of piles in cohesionless soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, **90**(3), pp. 123-156 (1964).
3. Meyerhof, G.; Mathur, S.K. and Valsangkar, A.J. "Lateral resistance and deflection of rigid walls and piles

in layered soils", *Canadian Geotechnical Journal*, **18**(2), pp. 159-170 (1981).

4. Sastry, V.V.R.N. and Meyerhof, G.G. "Behavior of flexible piles in layered sands under eccentric and inclined loads", *Canadian Geotechnical Journal*, **31**(4), pp. 513-520 (1994).
5. Poulos, H.G. "Behavior of laterally loaded piles near a cut or slope", *Australian Geomechanics Journal*, **6**, pp. 6-12 (1976).
6. Schmidt, H.G. "Large diameter bored piles for abutments", *9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 107-112 (1977).
7. Terashi, M.; Kitazume, M.; Maruyama, A. and Yamamoto, Y. "Lateral resistance of a long pils in or near the slope", *Proc., Centrifuge*, **91**, pp. 245-252 (1991).
8. Bouafia, A. and Bouguerra, A. "Centrifuge testing of the behavior of a horizontally loaded flexible pile near to a

- slope”, *Canadian Geotechnical Journal*, **34**, pp. 324-335 (1995).
9. Mezazigh, S. and Levacher, D. “Laterally loaded piles in sand: slope effect on P-Y reaction curves”, *Canadian Geotechnical Journal*, **35**, pp. 433-441 (1998).
  10. Stewart, D.P. “Redouction of undrained lateral pile capacity in clay due to an adjacent slope”, *Australian Geomechanics Journal*, pp. 17-23 (1999).
  11. Chae, K.S.; Ugai, K. and Wakai, A. “Lateral resistance of shor single piles and pile groups Located near slopes”, *International Journal of Geomechanics*, **4**(2), pp. 93-103 (2004).
  12. El-Sawwaf, M. “Lateral resistance of single pile located near geosynthetic reinforced slope”, *Journal of Geotechnical and Ge-oenvironmental Engineering*, **132**(10), pp. 1336-1345 (2006).
  13. El-Sawwaf, M. “Lateral behavior of vertical pile group embedded in stabilized earth slope”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **134**(7), pp. 1015-1020 (2008).
  14. Begum, N.A. and Muthukkumaran, K. “Numerical modeling for laterally loaded piles on a sloping ground”, *The 12th In Ternational Conference of IACMAG*, Goa India, pp. 3368-3375 (2008).
  15. Poulos, H.G. and Davis, E.H., *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley and Sons Inc, New York (1980).
  16. Narasimha Rao, S.; Ramakrishna, V.G.S.T.K. and Babu Rao, M. “Influence of rigidity on laterally loaded pile groups in marine clay”, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**(6), pp. 542-549 (1998).
  17. Terzaghi, K. “Evaluation of coefficients of subgrade reaction”, *Geotechnique*, **5**, pp. 297-326 (1955).
  18. Ovesen, N.K. “The use of physical models in design: The scaling law relationship”, *Proc., 7th European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **4**, pp. 318-323 (1979).