

بررسی باربری جانبی تک شمع قائم مجاور شیب خاکی تسلیح شده با ژئوگرید

سیده محمدعلی زهردیان* (استادیار)

دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه شیراز

حمید صادقی (کارشناس ارشد)

دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان

مهندسی عمران: شریف
دوری ۲-۲۸، شماره ۲، ص. ۹۸-۸۹

در این نوشتار، با مطالعه روی مدل‌های کوچک مقیاس آزمایشگاهی، تأثیر تسلیح یک شیب ماسه‌یی بر باربری جانبی تک شمع قائم مجاور شیب با ژئوگرید بررسی شده است. برنامه‌ی مطالعات آزمایشگاهی شامل بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر نحوه‌ی آرایش عناصر تسلیح ژئوگریدی، فاصله‌ی شمع از لبه‌ی تاج شیب، میزان تراکم و زاویه‌ی شیب، طول مدفون، وضعیت اصطکاک جدار، و شکل مقطع شمع بر باربری جانبی تک شمع قائم مجاور شیب است. براساس نتایج، مقدار ظرفیت باربری جانبی بهبودیافته‌ی شمع تا حد زیادی به نحوه‌ی آرایش قرارگیری عناصر تسلیح وابسته است. مقادیر بهینه‌ی ۳۱d و ۲۴/۶d (d: قطر شمع) به ترتیب برای طول و عرض لایه‌های ژئوگرید و ۲/۸۲d و ۱/۶۴d برای عمق مدفون شدگی بالاترین لایه و فاصله‌ی بین لایه‌های ژئوگرید پیشنهاد می‌شود.

mzomorod@shirazu.ac.ir
hamid_sadeghi@yahoo.com

واژگان کلیدی: شمع، بارجانبی، ماسه، شیب مسلح، ژئوگرید.

۱. مقدمه

القاء گسیختگی در شیب (به‌خصوص در لایه‌های سطحی‌تر) شوند، بلکه ممکن است ظرفیت باربری جانبی خود شمع‌ها نیز در اثر مجاورت با شیب تا حد زیادی کاهش یابد. از موارد عملی وجود چنین موقعیت‌هایی می‌توان به دکل‌های ارتباطی و انتقال برق، پایه‌های پل‌ها، ساختمان‌های ساخته‌شده در مناطق تپه‌یی و کوهستانی، سازه‌های ساحلی و اسکله‌ها اشاره کرد. مطالعات عددی و آزمایشگاهی محدودی بر روی اثرات شیب‌دار بودن سطح زمین بر ظرفیت باربری جانبی شمع‌های قائم مجاور شیب گزارش شده است.^[۱۵-۶]

با این حال از بین تحقیقات ذکرشده به جز در مطالعات محدودی^[۱۳، ۱۴] بر روی تک شمع و گروه شمع مجاور شیب ماسه‌یی مسلح‌شده با ژئوگرید، تاکنون اثرات استفاده از فن تسلیح شیب بر رفتار شمع‌های قائم تحت بار جانبی مجاور شیب‌های تسلیح‌شده، چندان مورد مطالعه و بررسی قرار نگرفته است و به دلیل کمبود مطالعات انجام‌شده در این زمینه، هنوز شناخت دقیق و کاملی از رفتار واقعی شمع‌ها در این حالت و اثراتی که مسلح‌کردن خاک بر باربری جانبی شمع‌های مجاور شیب می‌گذارد وجود ندارد. بنابراین، هدف اصلی این تحقیق بررسی میزان تأثیر استفاده از ژئوگریدها به‌عنوان المان تسلیح بر رفتار جانبی تک شمع قائم مجاور شیب ماسه‌یی و همچنین ارزیابی امکان استفاده از یک طرح مسلح‌سازی مناسب به‌صورت عملی در این زمینه است. برای نیل به این هدف مجموعه‌یی از آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی مدل‌های فیزیکی شمع‌های مدفون‌شده در مجاورت شیب‌های ماسه‌یی تسلیح‌شده با لایه‌های ژئوگرید انجام شده است و نتایج به‌دست‌آمده بحث و بررسی شده است.

استفاده از روش تثبیت و تسلیح شیب‌های خاکی به‌منزله‌ی یکی از روش‌های ممکن برای افزایش پایداری شیب‌ها و به‌دنبال آن بهبود رفتار سازه‌ها و پی‌های واقع بر آن‌ها از موضوعات مورد توجه برای انجام تحقیقات علمی بوده است. پایداری شیب‌های خاکی را می‌توان به روش‌های مختلفی افزایش داد که نمونه‌های رایج آن شامل: اصلاح هندسه شیب، تزریق شیمیایی، میخکوبی خاک، تسلیح با لایه‌های ژئوگرید، و نصب شمع‌ها و سپرهاست. درگذشته مطالعات عددی و آزمایشگاهی مختلفی بر روی اثرات استفاده از روش تسلیح شیب به‌منظور بهبود ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی واقع بر شیب‌های خاکی انجام شده است.^[۱-۵] نتایج این مطالعات نشان‌دهنده‌ی آن است که تسلیح شیب‌های خاکی اثرات مفید و مناسبی بر بهبود پایداری شیب و همچنین افزایش ظرفیت باربری شالوده‌های سطحی واقع در مجاورت شیب‌های خاکی مسلح‌شده دارد، به‌طوری‌که با استفاده از روش تسلیح شیب، نه فقط می‌توان پایداری خود شیب را افزایش داد، بلکه ظرفیت باربری و خواص نشست‌پذیری پی‌های مجاور شیب نیز تا حد زیادی بهبود می‌یابد.

رفتار سازه‌ها و پی‌های شمعی مربوط به آن‌ها زمانی که در مجاورت شیب‌ها و بریدگی‌های طبیعی یا مصنوعی قرار گرفته‌اند با رفتارشان وقتی که در زمین‌های صاف و مسطح واقع شده‌اند متفاوت است، زیرا شمع‌ها نه تنها ممکن است باعث

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۱۲/۱۷، اصلاحیه ۱۳۸۹/۸/۱۵، پذیرش ۱۳۸۹/۱۰/۲۷.

۲. مواد و روش‌ها

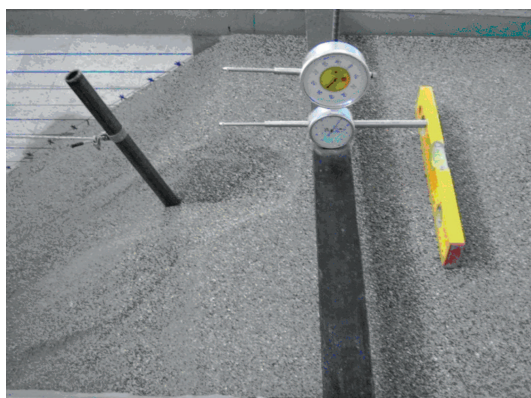
۱.۲. جعبه‌ی آزمایش

طبق مطالعات انجام‌شده، در بحث باربری جانبی شمع‌ها، حضور مرزهای صلب قرارگرفته در فواصل بزرگ‌تر از 10° برابر قطر شمع (فاصله از مرکز شمع) تأثیری بر پاسخ سیستم ندارد، زیرا ناحیه‌ی تحت تنش مؤثر توده‌ی خاک در حدود 10° برابر قطر شمع در جهت اعمال بار جانبی به شمع گزارش شده است. [۱۷، ۱۶]

با توجه به مطالب ذکرشده، تخمین‌های اولیه‌ی به‌منظور انتخاب ابعاد جعبه‌ی آزمایش در نظر گرفته شد، اما برای اطمینان بیشتر از مناسب بودن ابعاد تخمینی برای جعبه‌ی آزمایش، یک سری مطالعات آنالیز ابعادی هم با نرم‌افزار PLAXIS 3D Foundation با در نظر گرفتن اهداف اصلی تحقیق انجام شد که نمونه‌ی از نتایج به‌دست‌آمده از آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. میزان جابجایی‌های ایجادشده در اعماق مختلف شیب در اثر بارگذاری مدل شمع و همچنین در نزدیکی جداره‌های قائم مدل (از نظر تأثیر مرزهای صلب) و نیز جابجایی‌های ایجادشده در محدوده‌ی اطراف شمع، ناشی از اعمال بار جانبی به آن، از پارامترهای اصلی در تجزیه و تحلیل ابعادی انجام‌شده است.

براساس کلیه‌ی بررسی‌های انجام‌شده و نیز با توجه به اهداف اصلی تحقیق و همچنین فضای موجود در آزمایشگاه، در نهایت ابعاد $1/8m \times 0/7m$ در پلان و $0/8m$ در ارتفاع برای جعبه‌ی آزمایش برای مطالعه بر روی اثرات فن تسلیح بر باربری جانبی شمع مجاور شیب خاکی انتخاب شد. در عمل نیز نحوه‌ی گسیختگی و الگوهای جابجایی مشاهده‌شده در حین انجام آزمایش‌ها هم کفایت و هم تناسب ابعاد انتخاب‌شده برای جعبه‌ی آزمایش را تأیید کردند (شکل ۲).

آزمون‌های مدل فیزیکی در یک جعبه‌ی آزمایش فولادی انجام و برای اجتناب از اثرات مرزهای مدل، علاوه بر این که ابعاد جعبه‌ی آزمایش به اندازه‌ی کافی بزرگ انتخاب شد، برای جعبه‌ی آزمایش از جداره‌های صاف و صیقلی نیز استفاده شد.



شکل ۲. تصویری از نحوه‌ی گسیختگی و الگوهای جابجایی مشاهده‌شده در حین انجام آزمایش (بدون مقیاس).

جداره‌های طولی دو طرف جعبه‌ی آزمایش از شیشه‌ی سکوریت با ضخامت 10° میلی‌متر که به پشت بندهای فولادی محکمی متکی بودند، ساخته شد. وجوه شیشه‌ی جعبه‌ی آزمایش امکان مشاهده‌ی بصری مراحل آماده‌سازی نمونه (به کمک الگوی هندسی ترسیم‌شده از شیب و لایه‌های خاک) و همچنین جابجایی‌های ایجادشده در توده‌ی خاک، طی مراحل مختلف آزمایش را فراهم می‌کند.

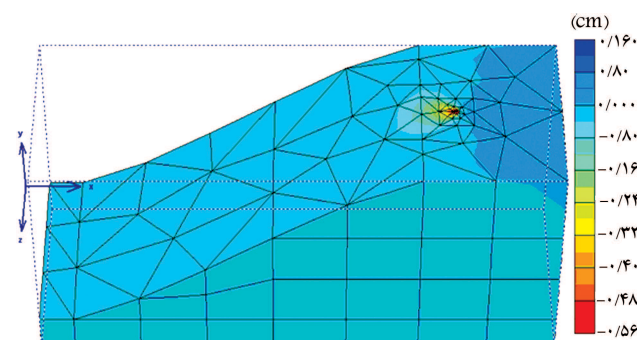
۲.۲. مشخصات شمع‌های مورد استفاده

مدل‌های شمع به‌کاررفته در این تحقیق از لوله‌های فولادی به قطر خارجی $21/3$ و قطر داخلی $16/1$ میلی‌متر (شمع دایره‌یی) و قوطی‌های فولادی به بُعد خارجی 20° و بُعد داخلی 17 میلی‌متر (شمع مربعی) هستند. در بحث باربری جانبی شمع‌های واقع در خاک‌های غیرچسبنده، ضریب سختی (T) با استفاده از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود:

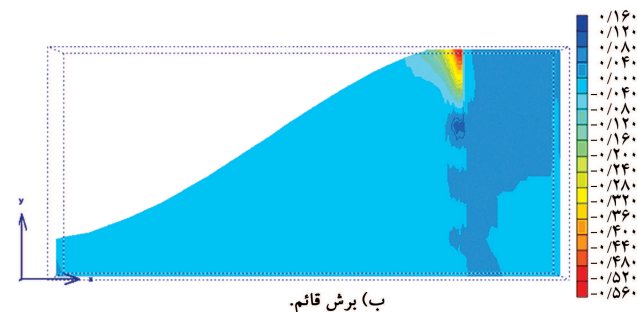
$$T = \sqrt[5]{\frac{E_P I_P}{n_h}} \quad (1)$$

در این رابطه، $E_P I_P$ سختی خمشی شمع (برابر با 1361 N.m^2 در تحقیق حاضر) و n_h مدول ثابت عکس‌العمل افقی بستر است که برای ماسه‌های سست، نیمه‌متراکم و متراکم، به ترتیب 1900 ، 6000 و $13500 \text{ (kN/m}^2\text{)}$ در نظر گرفته شده است. [۱۸] همچنین، در تحقیقی دیگر طول مدفون یک شمع سرآزاد برای اینکه رفتاری مشابه با یک شمع صلب کوتاه داشته باشد، باید کوچک‌تر یا مساوی $2T$ و برای حالتی که رفتاری مشابه یک شمع طویل انعطاف‌پذیر داشته باشد، باید بزرگ‌تر یا مساوی $4T$ باشد؛ بنابراین از شمع‌های مدل با طول مدفون 30 سانتی‌متر ($L/d=14/1$)، کوچک‌تر از $2T$ ، $38/5$ سانتی‌متر ($L/d=18/1$)، بین $2T$ و $4T$ و $64/5$ سانتی‌متر ($L/d=30/3$) بزرگ‌تر از $4T$ استفاده شد. [۱۹]

در طی مراحل انجام آزمایش، شمع‌های مدل با استفاده از یک سیستم «سیم و قرقره‌یی»^۱ تحت بارگذاری جانبی قرار گرفتند. اجزاء این سیستم بارگذاری شامل یک سیم فولادی سخت و محکم به ضخامت 3 میلی‌متر است که از یک طرف با یک بست فلزی به سر شمع اتصال یافته و از طرف دیگر با عبور از روی یک قرقره به صورت قائم به صفحه‌ی آویز بار متصل شده است. بارگذاری به صورت گام به گام و با اضافه کردن وزنه به صفحه‌ی آویز بار انجام شد. برای هرگام بارگذاری، جابجایی‌های افقی ایجادشده در سر شمع با گیج‌های صفحه‌ی ساعتی قرائت شد. نمایی شماتیک از جعبه‌ی آزمایش، سیستم بارگذاری، و معرفی پارامترهای مختلف در شکل ۳ ارائه شده است.

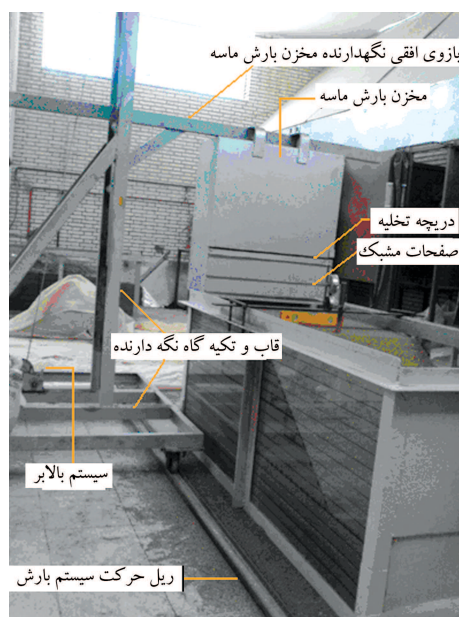


الف) نمای سه بعدی؛



ب) برش قائم.

شکل ۱. نمونه‌ی از منحنی‌های هم‌تراز جابجایی‌های افقی ایجادشده.

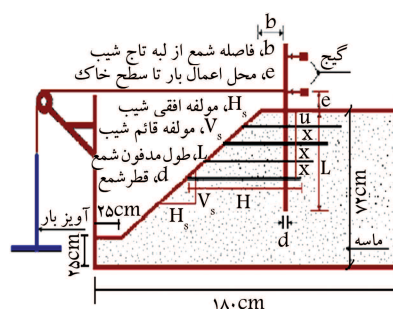


شکل ۵. تصویری از سیستم بارش ماسه‌ی طراحی و ساخته‌شده (بدون مقیاس).

در آزمایش‌ها از ژئوگریدهای دو محوره‌ی مدل Fortrac با بالاترین مقاومت کششی 35 kN/m به‌منزله‌ی عناصر مسلح‌کننده‌ی شیب استفاده شد. این ژئوگریدها از پلیمرهای با چگالی بالا ساخته شده‌اند و اندازه‌ی چشمه‌های مربعی شکل آن‌ها 20×20 میلی‌متر است.

۴.۲. روش انجام آزمایش

ساخت مدل‌های شیب، با بارش ماسه از ارتفاعی مشخص (با توجه به چگالی موردنیاز) و در لایه‌هایی به ضخامت 40 میلی‌متر، به‌صورت لایه لایه تا رسیدن به تراز لایه‌ی آخر انجام شد. در حالی‌که به‌طور هم‌زمان روند ساخت شیب از طریق جداره‌های شیشه‌یی جعبه‌ی آزمایش مشاهده و کنترل می‌شد. در سری آزمایش‌هایی که در حالت شیب مسلح‌شده انجام گرفت، لایه‌های ژئوگرید در طی مراحل آماده‌سازی شیب در محل‌های از پیش تعیین‌شده‌ی خودشان در توده‌ی ماسه‌یی شیب، نصب و اجرا شدند. شیب‌های مدل ساخته‌شده به ارتفاع 720 میلی‌متر برای به حداقل رساندن اثرات کف جعبه‌ی آزمایش بر روی یک پایه‌ی ماسه‌یی به ضخامت 250 میلی‌متر قرار گرفتند. جداره‌های شیشه‌یی جعبه‌ی آزمایش در فواصل یکسان 40 میلی‌متر به قرارگیری بیشتری صورت پذیرد. به‌هنگام رسیدن به تراز قرارگیری نوک شمع در جعبه‌ی آزمایش، شمع مدل با یک گیره به‌صورت قائم در محل خودش نگه داشته شد و لایه‌های بعدی ماسه در جعبه‌ی آزمایش بارش داده شد. با رسیدن به تراز که باید لایه‌ی ژئوگرید اجرا شود، یک لایه‌ی ژئوگرید در توده‌ی ماسه‌یی شیب‌دار نصب و سپس لایه‌ی بعدی ماسه به دقت و با کنترل بارش داده شد. درنهایت پس از خارج‌کردن خاک اضافی، ظاهر شیب، با خطکش‌های چوبی خاصی و به کمک الگوی ترسیم‌شده از هندسه‌ی شیب بر روی جداره‌های شیشه‌یی جعبه‌ی

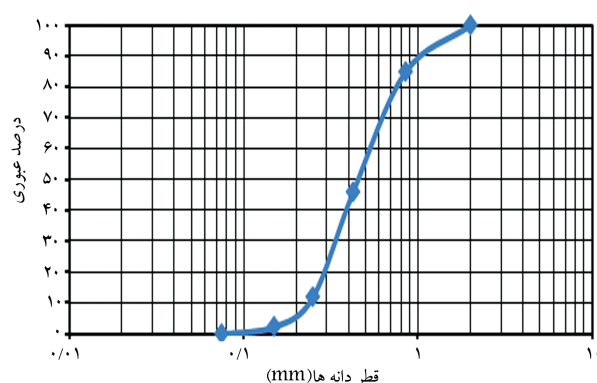


شکل ۳. نمایی شماتیک ازجعبه‌ی آزمایش.

۳.۲. خاک و المان تسلیح

ساخت مدل‌های شیب خاکی با به‌کارگیری روش بارش ماسه از طریق یک دستگاه مکانیزه و کالیبره شد و با استفاده از نوعی ماسه‌ی رودخانه‌یی یکنواخت - که برای انجام آزمایش، شسته و خشک شد و براساس سیستم طبقه‌بندی متحد جزء ماسه‌های بد دانه‌بندی شده (SP) قرار می‌گیرد - انجام شد. منحنی دانه‌بندی ماسه مطابق شکل ۴ است. سایر مشخصات ماسه‌ی مورد آزمایش در جدول ۱ ارائه شده است.

بارش ماسه از طریق یک سری صفحات مشبک متصل به انتهای قیف بارش کالیبره‌شده‌یی که می‌تواند از طریق یک قرقره و قاب و بازوی نگهدارنده به بالا و پایین حرکت کند، انجام شد (شکل ۵). این سیستم امکان تنظیم ارتفاع بارش و حرکت افقی قیف بارش در امتداد طول مخزن آزمایش را به‌راحتی فراهم می‌کند. بارش ماسه با یک دبی خروجی مشخص و از یک ارتفاع معین، برای رسیدن به چگالی موردنظر انجام شد. ارتفاع بارش ذرات ماسه برای رسیدن به چگالی موردنظر، قبل از شروع آزمایش‌های اصلی، با انجام چندین آزمایش سعی و خطا تعیین شد. استفاده از روش بارش ماسه، یک توده‌ی ماسه‌یی خیلی همگن را ایجاد می‌کند؛ به‌طوری‌که تغییرات چگالی نسبی در جعبه‌ی آزمایش کمتر از 1% تعیین شد. در طی مراحل انجام آزمایش، با قراردادن ظرف‌های استوانه‌یی‌شکل کوچکی در محل‌های مختلف از جعبه‌ی آزمایش، ثابت و یکنواخت بودن تراکم شیب خاکی ساخته‌شده بررسی شد.



شکل ۴. منحنی دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده‌شده در تحقیق.

جدول ۱. مشخصات ماسه‌ی موردآزمایش.

$\gamma_d(\max)$ (kN/m^3)	$\gamma_d(\min)$ (kN/m^3)	G_s	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_c
۱۶/۸۷	۱۳/۵۹	۲/۶۶	۰/۲۴	۰/۳۳	۰/۴۳	۰/۵۲	۲/۱۷	۰/۸۷

آزمایش، به دقت شکل داده شد. پس از تکمیل مراحل ساخت شیب، بار جانبی به صورت تدریجی و گام به گام تا رسیدن به حالت گسیختگی، به شمع اعمال شد و جابجایی‌های افقی ایجادشده در سر شمع با گیج‌های صفحه‌ای ساعتی قرائت شد.

۵.۲. برنامه‌ی آزمایش‌ها

آزمایش‌های انجام‌شده در این تحقیق را می‌توان در سه بخش مجزا طبقه‌بندی کرد. در بخش اول، آزمایش‌هایی در حالت شیب تسلیم‌نشده و به منظور بررسی تأثیر پارامترهای مختلفی از قبیل طول مدفون، اصطکاک جدار، شکل مقطع و فاصله‌ی شمع از لبه‌ی تاج شیب و نیز زاویه و تراکم شیب انجام شد. در بخش دوم آزمایش‌هایی در حالت شیب تسلیم‌شده با آرایش‌های مختلف قرارگیری لایه‌های ژئوگرید (شامل عمق مدفون‌شدگی بالاترین لایه‌ی ژئوگرید، فاصله‌ی قائم بین لایه‌های ژئوگرید، طول، عرض و تعداد لایه‌های ژئوگرید)، به منظور تعیین آرایش بهینه‌ی قرارگیری لایه‌های ژئوگرید انجام شد، و در نهایت در بخش سوم، پس از مشخص شدن آرایش بهینه‌ی قرارگیری لایه‌های ژئوگرید، آزمایش‌های انجام‌شده در بخش اول، این بار در حالت شیب تسلیم‌شده با آرایش بهینه‌ی قرارگیری لایه‌های ژئوگرید تکرار شد. برنامه‌ی آزمایش‌ها به صورت خلاصه، به همراه پارامترهای ثابت و متغیر دخیل در آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. به غیر از موارد مربوط به شمع مربعی و شیب با زاویه‌ی ۱ قائم؛ ۲ افقی (در هر دو حالت تسلیم‌نشده و تسلیم‌شده)، مابقی آزمایش‌های

جدول ۲ بر روی شمع‌های دایره‌ی مجاور شیب با زاویه‌ی ۱ قائم؛ ۱/۵ افقی انجام شده‌اند.

۳. نتایج و بحث‌ها

برای آگاهی از پارامترهای ثابت و متغیر دخیل در آزمایش‌هایی که نتایج آن‌ها در ادامه ارائه خواهد شد، می‌توان به جدول ۲ مراجعه کرد. در این نوشتار، بهبود باربری جانبی شمع ناشی از اثرات تسلیم شیب، به صورت کمیت بی‌بعد «نسبت باربری جانبی بهبودیافته (LRIR)»^۲، معرفی شده است. این کمیت به صورت نسبت بار جانبی یک شمع مشخص مجاور شیب تسلیم‌شده، به بار جانبی همان شمع اما مجاور شیب تسلیم‌نشده و در یک جابجایی جانبی خاص، تعریف می‌شود. جابجایی افقی سرشمع (y) نیز به صورت پارامتر بی‌بعد «نسبت جابجایی»^۳ y/d (قطرشمع) و برحسب درصد، معرفی شده است. با توجه به مطالعات موجود،^{[۱۲] و [۱۳]} باربری جانبی شمع از منحنی‌های «بار جانبی - نسبت جابجایی» و به صورت بار جانبی متناظر با نسبت جابجایی جانبی $y/d = 20\%$ تعیین شده است.

همچنین به منظور انجام مقایسه، نمونه‌ی از منحنی‌های «بار جانبی - نسبت جابجایی» در شکل ۶ ارائه شده است. این منحنی نمونه، مربوط به اثرات عمق مدفون‌شدگی بالاترین لایه‌ی ژئوگرید بر باربری جانبی شمع مجاور شیب ماسه‌ی متراکم است. همچنین مقادیر نسبت باربری جانبی بهبودیافته‌ی شمع (LRIR)

جدول ۲. برنامه‌ی آزمایش‌های انجام‌شده.

سری آزمایش	پارامترهای ثابت	پارامترهای متغیر
سری یک (بدون تسلیم)	$(D_r) = 80\%$ ، چگالی نسبی، $L/d = 18/1$	$b/d = 0, 2, 6, 12$
	$(D_r) = 80\%$ ، چگالی نسبی، $b/d = 2$	$L/d = 14/1, 18/1, 30/3$
	$b/d = 2, L/d = 18/1$	چگالی نسبی $(D_r) = 30, 55, 80\%$
	$(D_r) = 80\%$ ، چگالی نسبی، $b/d = 2, L/d = 18/1$	زبری جداره‌ی شمع
	$(D_r) = 80\%$ ، چگالی نسبی، $b/d = 2, L/d = 18/1$	شکل مقطع شمع (مربعی)
	$(D_r) = 80\%$ ، چگالی نسبی، $b/d = 2, L/d = 18/1$	زاویه‌ی شیب (۱ قائم؛ ۲ افقی یا ۲۶/۶ درجه)
سری دو (تسلیم‌شده با آرایش مختلف قرارگیری لایه‌های ژئوگرید)	$(D_r) = 80\%$ ، $L/d = 18/1, b/d = 2, H/d = 25/5, W/d = 24/6, N = 1$	$u/d = 1/88, 2/82, 5/16, 9/39$
	$(D_r) = 80\%$ ، $L/d = 18/1, b/d = 2, u/d = 2/82, H/d = 25/5, W/d = 24/6, N = 4$	$x/d = 0/94, 1/64, 2/82, 3/99$
	$(D_r) = 80\%$ ، $L/d = 18/1, b/d = 2, u/d = 2/82, H/d = 25/5, N = 4$	$W/d = 8, 16/3, 24/6, 29/1$
	$(D_r) = 80\%$ ، $L/d = 18/1, b/d = 2, u/d = 2/82, x/d = 1/64, W/d = 24/6, N = 4$	$H/d = 9/5, 18, 25/5, 31/36$
	$(D_r) = 80\%$ ، $L/d = 18/1, b/d = 2, u/d = 2/82, x/d = 1/64, W/d = 24/6, H/d = 31$	$N = 1, 7, 20$
	$(D_r) = 80\%$ ، چگالی نسبی، $L/d = 18/1$	$b/d = 0, 2, 6, 12$
سری سه (تسلیم‌شده با آرایش بهینه‌ی قرارگیری لایه‌های ژئوگرید)	$(D_r) = 80\%$ ، چگالی نسبی، $b/d = 2$	$L/d = 14/1, 18/1, 30/3$
	$b/d = 2, L/d = 18/1$	چگالی نسبی $(D_r) = 30, 55, 80\%$
	$(D_r) = 80\%$ ، چگالی نسبی، $b/d = 2, L/d = 18/1$	زبری جداره‌ی شمع
	$(D_r) = 80\%$ ، چگالی نسبی، $b/d = 2, L/d = 18/1$	شکل مقطع شمع (مربعی)
	$(D_r) = 80\%$ ، چگالی نسبی، $b/d = 2, L/d = 18/1$	زاویه‌ی شیب (۱ قائم؛ ۲ افقی یا ۲۶/۶ درجه)
	$(D_r) = 80\%$ ، چگالی نسبی، $b/d = 2, L/d = 18/1$	

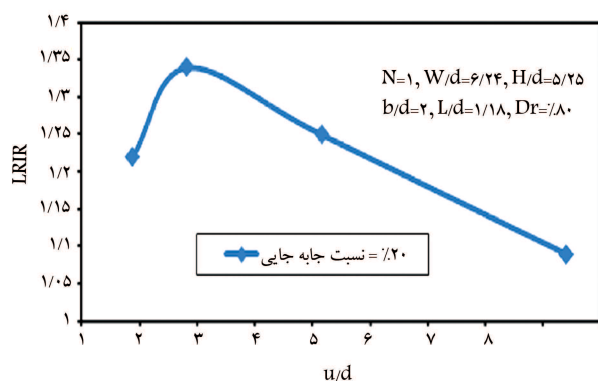
جدول ۳. نسبت باربری جانبی بهبودیافته (LRIR) برای پارامترهای مختلف مرتبط با آرایش قرارگیری لایه‌های ژئوگرید.

LRIR	N	LRIR	H/d	LRIR	W/d	LRIR	x/d	LRIR	u/d
۱٫۵۰	۱	۱٫۲۰	۹٫۵	۲٫۲۲	۸	۲٫۴۷	۰٫۹۴	۱٫۲۲	۱٫۸۸
۲٫۱۰	۲	۱٫۸۹	۱۸	۲٫۵۵	۱۶٫۳	۲٫۷۹	۱٫۶۴	۱٫۳۴	۲٫۸۲
۲٫۵۷	۳	۲٫۷۹	۲۵٫۵	۲٫۷۹	۲۴٫۶	۲٫۵۷	۲٫۸۲	۱٫۲۵	۵٫۱۶
۲٫۹۳	۴	۲٫۹۳	۳۱	۲٫۸۱	۲۹٫۱	۲٫۲۲	۳٫۹۹	۱٫۰۹	۹٫۳۹
۳٫۱۱	۵	۲٫۹۵	۳۶						
۳٫۲۰	۶								
۳٫۲۲	۷								

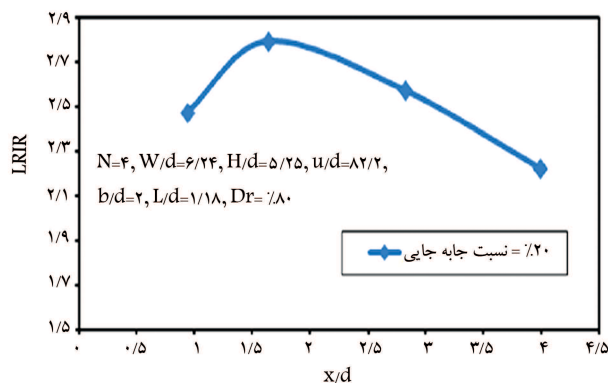
خاک قرار گیرد، امکان ایجاد گسیختگی‌های برشی سطحی در ناحیه‌ی بزرگ تسلیح نشده‌ی بالای لایه‌ی ژئوگرید تا سطح خاک وجود دارد. بنابراین، یک عمق مدفون‌شدگی بهینه برای لایه‌های ژئوگرید وجود دارد که بیشترین راندمان استفاده از عناصر تسلیح را به دنبال داشته و بیشترین بهبود را در باربری جانبی شمع ایجاد می‌کند.

۲.۳. اثرات فاصله‌ی قائم بین لایه‌های ژئوگرید (x)

در شکل ۸، تغییرات نسبت باربری جانبی بهبودیافته‌ی شمع (LRIR) با فاصله‌ی قائم نرمالیزه‌شده بین لایه‌های ژئوگرید (۳٫۹۹ و ۲٫۸۲ و ۱٫۶۴ و ۰٫۹۴) در نسبت جابجایی $y/d = 20\%$ ارائه شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود



شکل ۷. تغییرات LRIR در مقابل نسبت u/d.

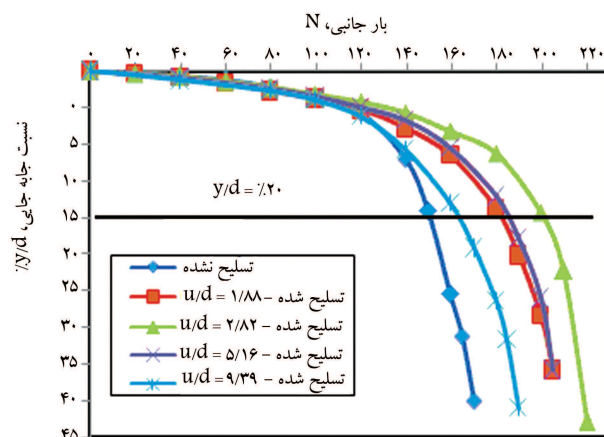


شکل ۸. تغییرات LRIR در مقابل نسبت x/d.

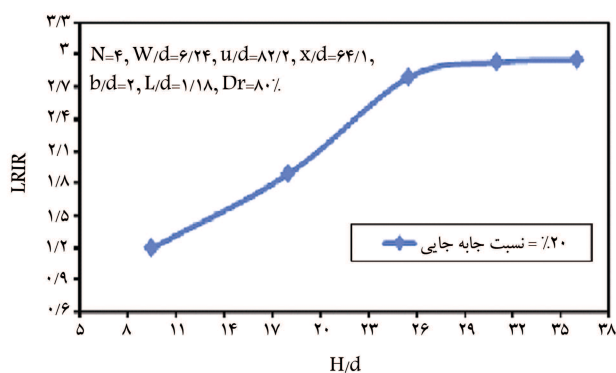
ناشی از اثرات مسلح کردن شیب، برای پارامترهای مختلف مرتبط با آرایش قرارگیری لایه‌های ژئوگریدی در جدول ۳ ارائه شده است.

۱.۳. اثرات عمق مدفون‌شدگی بالاترین لایه‌ی ژئوگرید (u)

عمق مدفون‌شدگی بالاترین لایه‌ی ژئوگرید نسبت به سطح خاک با نسبت بی‌بعد u/d معرفی می‌شود. اثرات این عمق مدفون‌شدگی بر باربری جانبی شمع، با بررسی مدلی از شیب متراکم مسلح‌شده با یک لایه‌ی ژئوگرید بررسی شد. در شکل ۷، تغییرات نسبت باربری جانبی بهبودیافته‌ی شمع (LRIR) با عمق مدفون نرمالیزه‌شده‌ی بالاترین لایه‌ی ژئوگرید (۳٫۹۹ و ۲٫۸۲ و ۱٫۶۴ و ۰٫۹۴) در نسبت جابجایی $y/d = 20\%$ ارائه شده است. مطابق شکل با افزایش عمق مدفون‌شدگی لایه‌ی ژئوگرید، LRIR تا رسیدن به یک مقدار بیشینه‌ی افزایش می‌یابد و پس از آن با افزایش بیشتر u/d کاهش پیدا می‌کند. حداکثر بهبود در نسبت عمق مدفون‌شدگی برابر با $u/d = 2.82$ مشاهده می‌شود. براساس نتایج به دست آمده می‌توان اظهار داشت، زمانی که لایه‌ی بالایی ژئوگرید خیلی نزدیک به سطح زمین باشد، اثرات تسلیح‌کنندگی ژئوگرید به دلیل عدم وجود شرایط محصورشدگی کافی و عدم رعایت محدودی مورد نیاز نمی‌تواند کاملاً بسیج شود و فشار سربار خاکی بر لایه‌ی ژئوگرید برای بسیج شدن تمام مقاومت مهاری لایه‌ی تسلیح در مقابل نیروهای برون‌گشی، ناکافی و نامناسب است. از طرفی هم اگر لایه‌ی ژئوگرید در اعماق زیادی از



شکل ۶. منحنی بار جانبی - نسبت جابجایی مربوط به اثرات عمق مدفون‌شدگی بالاترین لایه‌ی ژئوگرید.

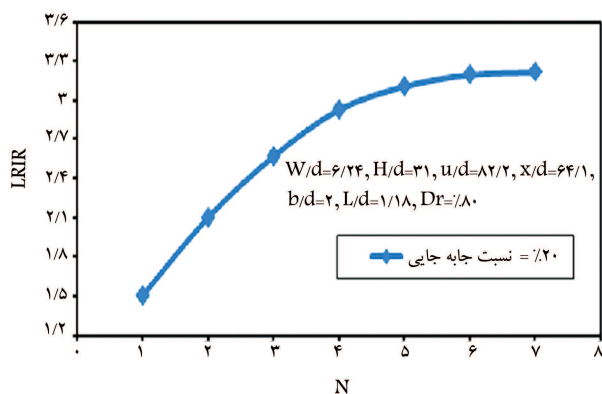


شکل ۱۰. تغییرات LRIR در مقابل نسبت H/d.

ژئوگرید تغییر قابل توجهی در باربری جانبی شمع ایجاد نمی‌کند. نتایج به دست آمده، نشان دهنده آن است که باید یک طول مهار کافی در بخش پشت شمع برای لایه‌های ژئوگرید تأمین شود تا بتوانیم به بیشترین اثرات تسلیح‌کنندگی که بیشترین ظرفیت برون‌کشی عناصر تسلیح و توان انتقال تنش‌های برشی را به همراه دارد دسترسی پیدا کنیم. با به کار بردن لایه‌های کوتاه، طول مهار ژئوگرید در توده‌ی خاک کافی نیست و مقاومت جانبی بسیج شده توسط مکانیزم‌های چسبندگی، اصطکاک، و قفل‌شوندگی در بخش پشت شمع کمتر از تنش‌های برشی افقی منتقل شده به توده‌ی خاک است و لایه‌های ژئوگرید با حرکت و جابجایی‌های شمع به حرکت درمی‌آیند.

۵.۳. اثرات تعداد لایه‌های ژئوگرید (N)

تغییرات نسبت باربری جانبی بهبودیافته‌ی شمع (LRIR) با تعداد لایه‌های ژئوگرید ($N=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11$) در نسبت جابجایی $y/d=20\%$ ، در شکل ۱۱ ارائه شده است. با توجه به شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که LRIR با افزودن تعداد لایه‌های ژئوگرید افزایش می‌یابد. افزایش نسبت باربری جانبی بهبودیافته‌ی شمع تا رسیدن به تعداد $N=6$ لایه‌ی ژئوگرید قابل توجه است و بعد از آن افزودن بیشتر تعداد لایه‌های ژئوگرید چندان مؤثر نیست. روند افزایش نسبت باربری جانبی بهبودیافته‌ی شمع با افزودن تعداد لایه‌های ژئوگرید را می‌توان ناشی از گسترش بلوک تسلیح دانست که به واسطه‌ی آن مسئله‌ی انتقال تنش‌های برشی ایجاد شده در توده‌ی خاک اطراف شمع به نواحی مسلح نشده‌ی پشت شمع بهتر صورت می‌گیرد. با این حال تأثیرات مفید افزودن تعداد لایه‌ی ژئوگرید نیز تا حد مشخصی قابل توجه است، زیرا به کار بردن لایه‌های ژئوگرید



شکل ۱۱. تغییرات LRIR در مقابل N.

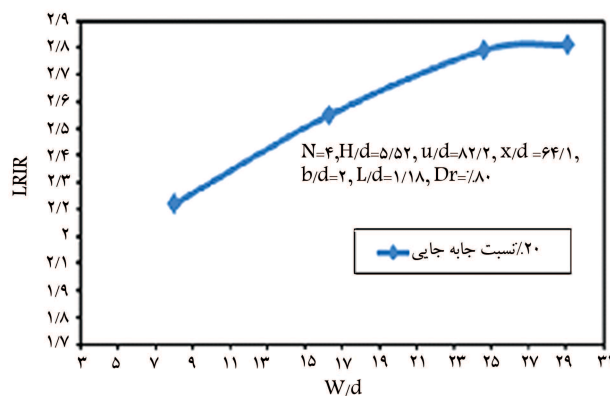
که LRIR با افزایش نسبت x/d تا رسیدن به مقدار بهینه $x/d=1.64$ افزایش می‌یابد و پس از آن کاهش پیدا می‌کند. براساس نتایج به دست آمده می‌توان گفت، به کار بردن لایه‌های ژئوگرید با فواصل قائم نزدیک به هم، راندمان بیشتری را برای بلوک تسلیح ایجاد می‌کند و موجب افزایش سختی خاک اطراف شمع و به دنبال آن افزایش باربری جانبی شمع می‌شود. با این حال نزدیک شدن بیش از حد لایه‌های ژئوگرید به یکدیگر نیز به دلیل عدم رعایت محدوده‌ی مورد نیاز که شرایط محصورشدگی کافی را ایجاد کند، مناسب به نظر نمی‌رسد. از طرفی دور شدن لایه‌ها از یکدیگر هم باعث می‌شود که نواحی غیرمسلح بزرگی که مستعد وقوع گسیختگی‌های برشی هستند بین لایه‌های ژئوگرید به وجود آید و راندمان تسلیح تحت تأثیر قرار گرفته و کاهش یابد.

۳.۳. اثرات عرض لایه‌های ژئوگرید (W)

در شکل ۹، تغییرات نسبت باربری جانبی بهبودیافته‌ی شمع (LRIR) با عرض نرمالیزه‌شده‌ی لایه‌های ژئوگرید ($W/d=8, 16/3, 24/6, 29/1$) در نسبت جابجایی $y/d=20\%$ ارائه شده است. با توجه به شکل مشاهده می‌شود که افزایش عرض لایه‌های ژئوگرید موجب بهبود باربری جانبی شمع می‌شود. با این حال، بهبود باربری جانبی شمع با افزایش عرض لایه‌های ژئوگرید، تا رسیدن به مقدار بهینه $W/d=24/6$ قابل توجه بوده است و از آن به بعد، افزایش بیشتر عرض لایه‌های ژئوگرید تأثیر چندان زیادی بر افزایش LRIR ندارد. از آنجا که در بخش اطراف شمع یک ناحیه‌ی مشخص و محدود مستعد جابجایی‌های برشی وجود دارد، می‌توان گفت فقط بخشی از لایه‌های تسلیح که در این محدوده قرار می‌گیرند، مقاومت کششی آن‌ها به طور مؤثری بسیج می‌شود و راندمان مناسبی به همراه دارند. بنابراین، افزودن عرض لایه‌های ژئوگرید بیش از یک مقدار مشخص نمی‌تواند تأثیر چندان زیادی بر بهبود باربری جانبی شمع بگذارد.

۴.۳. اثرات طول لایه‌های ژئوگرید (H)

به منظور تعیین طول مهار کافی و مناسب برای لایه‌های ژئوگرید، با انجام آزمایش‌هایی، تغییرات نسبت باربری جانبی بهبودیافته‌ی شمع (LRIR) با طول نرمالیزه‌شده‌ی لایه‌های ژئوگرید ($H/d=9.5, 18, 25.5, 31, 36$) بررسی شد. نتایج به دست آمده در شکل ۱۰ ارائه شده است. مطابق شکل مشاهده می‌شود که LRIR با افزایش طول لایه‌های ژئوگرید افزایش می‌یابد. این افزایش در باربری جانبی شمع تا رسیدن به مقدار $H/d=31$ قابل توجه است و با عبور از این مقدار، افزایش بیشتر طول لایه‌های



شکل ۹. تغییرات LRIR در مقابل نسبت W/d.

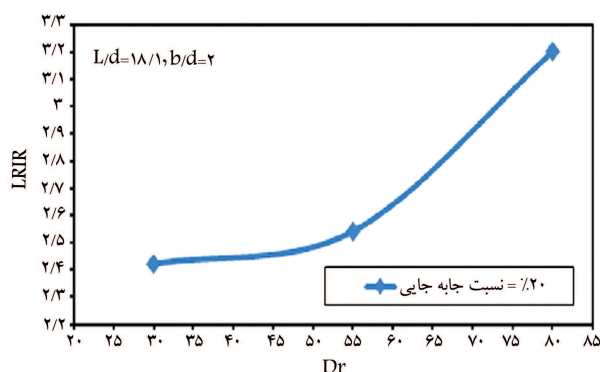
یکدیگر، با لایه‌های ژئوگرید و با شمع می‌شود و بلوک مسلحی را به وجود می‌آورد که در کل مقاومت و باربری بیشتری را به همراه دارد.

۸.۳. اثرات طول مدفون شمع (L)

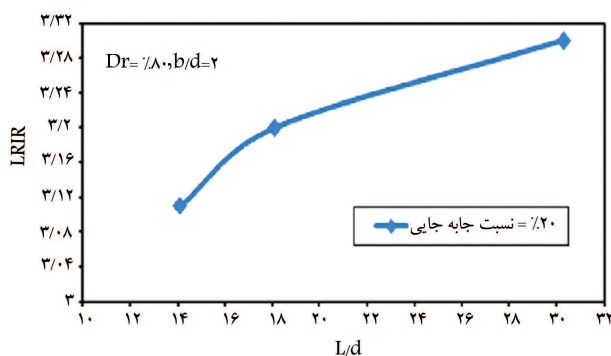
به منظور بررسی اثرات طول مدفون شمع بر باربری و جابجایی تک شمع تحت بار جانبی مجاور شیب، آزمایش‌هایی با به کار بردن مدل‌های شمع قائم با سه طول مدفون نرمالیزه شده $3/30$ و $1/18$ و $1/14$ در هر دو حالت شیب تسلیح نشده و تسلیح شده با آرایش بهینه‌ی قرارگیری لایه‌های ژئوگرید انجام شد. در شکل ۱۴ تغییرات نسبت باربری جانبی بهبود یافته (LRIR)، در مقابل طول مدفون نرمالیزه شده‌ی شمع (L/d) در نسبت جابجایی $y/d = 20\%$ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۴ مشاهده می‌شود که افزایش طول مدفون شمع، موجب بهبود باربری جانبی شمع مجاور شیب شده است. بهبود باربری جانبی با افزایش طول مدفون شمع را می‌توان با افزایش مقاومت خاک اطراف شمع و به تبع آن کاهش جابجایی خاک که با بیشتر شدن عمق اتفاق می‌افتد، مرتبط دانست؛ زیرا 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 است. در حالی که با بیشتر شدن عمق، جابجایی‌های خاک به دلیل مقاومت بیشتر خاک محصورکننده‌ی اطراف کاهش می‌یابد.

۹.۳. اثرات زاویه‌ی شیب

به منظور بررسی اثرات زاویه‌ی شیب بر باربری و جابجایی تک شمع تحت بار جانبی مجاور شیب، آزمایش‌هایی بر روی دو شیب ماسه‌یی با زاویه‌ی ۱ قائم: $1/5$ فقی ($33/7^\circ$) و ۱ قائم: ۲ افقی ($26/6^\circ$) در هر دو حالت تسلیح نشده و



شکل ۱۳. تغییرات LRIR در مقابل چگالی نسبی شیب ماسه‌یی.



شکل ۱۴. تغییرات LRIR در مقابل نسبت L/d.

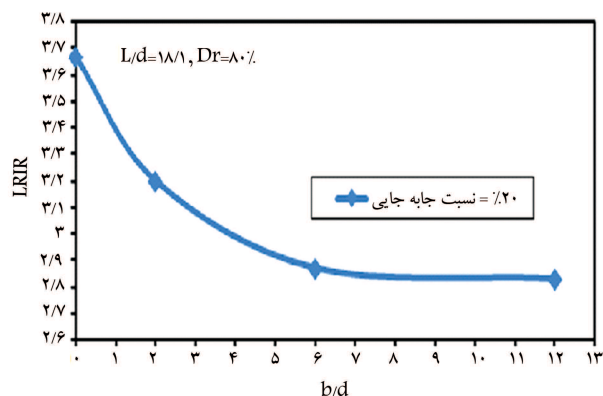
در اعماق زیادتر خاک که جابجایی‌ها کمتر و فشار مقاوم محصورکننده‌ی اطراف بیشتر است، چندان مفید و مناسب به نظر نمی‌رسد.

۶.۳. اثرات فاصله‌ی قرارگیری شمع از لبه‌ی تاج شیب (b)

به منظور بررسی اثرات محل قرارگیری شمع نسبت به لبه‌ی تاج شیب بر باربری و جابجایی تک شمع تحت بار جانبی مجاور شیب، آزمایش‌هایی با قراردادن مدل‌های شمع در فواصل نرمالیزه شده‌ی ۱۲ و ۶ و ۲، $b/d = 0$ از لبه‌ی تاج شیب، در هر دو حالت تسلیح نشده و تسلیح شده با آرایش بهینه‌ی قرارگیری لایه‌های ژئوگرید انجام شد. براساس نتایج به دست آمده از بررسی تأثیر فاصله‌ی نرمالیزه شده‌ی قرارگیری شمع از لبه‌ی تاج شیب (b/d) بر پارامتر نسبت باربری جانبی بهبود یافته‌ی شمع (LRIR) در نسبت جابجایی $y/d = 20\%$ (شکل ۱۲) مشاهده می‌شود که با دور شدن شمع از لبه‌ی تاج شیب، مقدار نسبت باربری جانبی بهبود یافته‌ی شمع کاهش می‌یابد، هر چند باربری جانبی شمع مجاور شیب افزایش می‌یابد. زمانی که شمع در فاصله‌ی بیش از ۷d از لبه‌ی تاج شیب قرار می‌گیرد، تغییرات LRIR را می‌توان ثابت فرض کرد و بر این اساس مقدار $b/d = 7$ را حد تأثیر شیب بر شمع معرفی کرد. همچنین نتایج به دست آمده نشان‌دهنده‌ی آن است که فواید مسلح کردن شیب، هر چه شمع به لبه‌ی تاج شیب نزدیک‌تر باشد قابل توجه‌تر است، به طوری که بیشترین بهبود باربری جانبی مربوط به حالتی است که شمع دقیقاً در لبه‌ی تاج شیب ($b/d = 0$) قرار گرفته است.

۷.۳. اثرات چگالی نسبی (D_r)

به منظور بررسی اثرات میزان تراکم شیب، آزمایش‌هایی با سه چگالی نسبی مختلف 30 ، 55 و 80 درصد به ترتیب متناظر با شیب سست، نیمه متراکم، و متراکم در هر دو حالت تسلیح نشده و تسلیح شده با آرایش بهینه‌ی قرارگیری لایه‌های ژئوگرید انجام شد. براساس نتایج به دست آمده از بررسی تأثیر چگالی نسبی شیب ($D_r = 30$ ، 55 و 80%) بر پارامتر نسبت باربری جانبی بهبود یافته‌ی شمع (LRIR) در نسبت جابجایی $y/d = 20\%$ (شکل ۱۳) می‌توان گفت، عناصر تسلیح ژئوگریدی زمانی که در شیب‌های خاکی متراکم به کار برده می‌شوند، نسبت به حالتی که در شیب‌های خاکی سست استفاده می‌شوند، راندمان بیشتری از خود نشان می‌دهند. به نظر می‌رسد بهبود باربری جانبی شمع با افزایش چگالی نسبی شیب مسلح شده‌ی ناشی از اندرکنش‌های موجود بین «ماسه - ژئوگرید - شمع» باشد، زیرا افزایش تراکم شیب موجب بهبود مکانیزم‌های اتصال، چسبندگی و قفل شونده‌ی دانه‌های خاک با



شکل ۱۲. تغییرات LRIR در مقابل نسبت b/d.

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

زاویه‌ی شیب	بار جانبی درحالت تسلیم نشده (N)	بار جانبی درحالت تسلیم شده (N)	نسبت باربری جانبی بهبودیافته (LRIR)
۱ قائم: ۱/۵ افقی (۳۳/۷ درجه)	۱۵۰	۴۸۰	۳/۲
۱ قائم: ۲ افقی (۲۶/۶ درجه)	۱۶۸	۴۹۱	۲/۹۲

جدول ۶. تأثیر شکل مقطع شمع بر LRIR (بارها براساس $y/d=20\%$).

شکل مقطع شمع	بار جانبی درحالت تسلیم نشده (N)	بار جانبی درحالت تسلیم شده (N)	نسبت باربری جانبی بهبودیافته (LRIR)
دایره‌یی	۱۵۰	۴۸۰	۳/۲
مربعی	۱۵۶	۴۸۹	۳/۱۳

۴. اثرات مقیاس و محدودیت‌ها

استفاده از مدل‌های کوچک مقیاس آزمایشگاهی (مدل‌های فیزیکی) به دلیل مشکلاتی که به لحاظ انجام آزمایش‌های بزرگ مقیاس در محل وجود دارد (از جمله صرف وقت و هزینه‌ی زیاد)، به‌منزله‌ی روشی مناسب مطرح شده است و به‌طور وسیعی به‌کار برده می‌شود. شمع‌های مدل به‌کاررفته در این نوشتار با مقیاس مشخصی کوچک شده‌اند، در حالی‌که خاک ماسه‌یی به‌کاررفته در مدل‌های کوچک مقیاس آزمایشگاهی همان مصالحی است که در طبیعت وجود دارد و در مدل‌های واقعی دیده می‌شود. بنابراین ممکن است خاک یا شمع به‌کاررفته در مدل‌های کوچک مقیاس، همان رفتاری را که در مدل‌های واقعی از آن‌ها دیده می‌شود، نداشته باشند و به‌تبع آن تأییراتی را بر نتایج آزمایش‌ها بگذارند، که به‌منزله‌ی «اثرات مقیاس»^۳ شناخته می‌شود. در این نوشتار برای اجتناب از اثرات مقیاس، قطر شمع (d) بیش از ۴۹ برابر قطر متوسط دانه‌های ماسه (D_{50}) در نظر گرفته شد و از مقدار ۴۰ که معمولاً پیشنهاد می‌شود بیشتر است.^[۲۰]

هر چند که نمی‌توان فقط با تکیه بر نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش بر روی مدل‌های کوچک مقیاس، رفتار واقعی در محل را به‌دقت و با جزئیات کامل پیش‌بینی کرد، اما به‌طور کلی نتایج مطالعات انجام‌شده در این نوشتار نشان می‌دهد که با استفاده از روش تسلیم شیب با لایه‌های ژئوگرید می‌توان باربری جانبی شمع‌های قائم مجاور شیب را افزایش داد و رفتار آن‌ها را بهبود بخشید و بنابراین، مرجع مناسبی برای انجام تحقیقات آینده با استفاده از آزمایش‌های بزرگ مقیاس، مدل‌های سانتریفیوژ و مطالعات عددی فراهم می‌کند تا به درک بیشتر و بهتری از رفتار واقعی مسئله در جهت انجام طراحی‌های صحیح‌تر دسترسی پیدا کنیم.

۵. نتیجه‌گیری

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

۱. میزان بهبود باربری جانبی شمع‌های مجاور شیب در اثر استفاده از شیوه‌ی تسلیم شیب با ژئوگرید، تا حد زیادی به‌نحوه‌ی آرایش قرارگیری لایه‌های ژئوگرید وابسته است.

تسلیم‌شده با آرایش بهینه‌ی قرارگیری لایه‌های ژئوگرید انجام شد. نتایج این آزمون‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. براساس نتایج به‌دست‌آمده می‌توان گفت، هر چه زاویه‌ی شیب کمتر باشد، باربری جانبی شمع مجاور شیب در هر دو حالت تسلیم‌شده و تسلیم‌نشده بیشتر، ولی نسبت باربری جانبی بهبودیافته‌ی شمع کمتر است. به‌نظر می‌رسد با افزایش زاویه‌ی شیب، فشار مقاوم توده‌ی ماسه در بخش جلویی شمع کاهش یافته و به‌تبع آن باربری جانبی شمع نیز کمتر شده است.

۱۰.۳. اثرات اصطکاک جداری شمع

به‌منظور بررسی اثرات اصطکاک جداری بر باربری و جابجایی تک شمع تحت بار جانبی مجاور شیب، آزمایش‌هایی بر روی مدل‌های شمع با جداری صاف و زبر (زبری جداری خارجی شمع با چسباندن کاغذ سمباده‌ی ضد آب شماره‌ی ۶۰ تأمین شده است) در هر دو حالت شیب تسلیم‌نشده و تسلیم‌شده با آرایش بهینه‌ی قرارگیری لایه‌های ژئوگرید انجام شد. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۵ ملاحظه می‌شود که با افزایش اصطکاک جداری شمع، باربری جانبی در هر دو حالت شیب تسلیم‌نشده و تسلیم‌شده، تا حدودی افزایش و نسبت باربری جانبی بهبودیافته اندکی کاهش یافته است.

۱۱.۳. اثرات شکل مقطع شمع

به‌منظور بررسی اثرات شکل مقطع بر باربری و جابجایی تک شمع تحت بار جانبی مجاور شیب، آزمایش‌هایی بر روی مدل‌های شمع با مقطع دایره‌یی و مربعی در هر دو حالت شیب تسلیم‌نشده و تسلیم‌شده با آرایش بهینه‌ی قرارگیری لایه‌های ژئوگرید انجام شد. شمع‌های دایره‌یی و مربعی با توجه به مقاطع موجود در بازار انتخاب شدند و مساحت مقطع عرضی و ممان اینرسی شمع دایره‌یی به‌ترتیب ۱/۳۷ و ۱/۰۶ برابر شمع مربعی است. با توجه به نتایج ارائه‌شده در جدول ۶ ملاحظه می‌شود که با تغییر مقطع شمع از دایره به مربع، باربری جانبی شمع در هر دو حالت شیب تسلیم‌نشده و تسلیم‌شده، به میزان کمی افزایش یافته است، اما نسبت باربری جانبی بهبودیافته در هر دو حالت تقریباً یکسان است.

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

وضعیت جداری شمع	بار جانبی درحالت تسلیم نشده (N)	بار جانبی درحالت تسلیم شده (N)	نسبت باربری جانبی بهبودیافته (LRIR)
جداری صاف	۱۵۰	۴۸۰	۳/۲
جداری زبر	۱۶۱	۴۹۱	۳/۰۵

۵. با نزدیک تر شدن شمع به لبه ی تاج شیب، اثرات مفید استفاده از شیوه ی تسلیح شیب بیشتر نمایان می شود، به طوری که بیشترین تأثیر مربوط به حالتی است که شمع درست در لبه ی تاج شیب قرار گرفته است.
۶. زمانی که فاصله ی شمع از لبه ی تاج شیب بیش از ۷ برابر قطر شمع باشد، تأثیر شیب بر رفتار شمع ناچیز و قابل اغماض است.
۷. تسلیح شیب ماسه یی با لایه های ژئوگرید، اثرات مفید و مناسبی بر افزایش باربری جانبی تک شمع قائم مجاور شیب داشته و به طور کلی این اثرات مفید در پاره یی از موارد که به نوعی ضعف بیشتر بوده است، از قبیل تندتر بودن زاویه ی شیب، نزدیک تر بودن شمع به لبه ی تاج شیب و صاف بودن جداری خارجی شمع، بیشتر نمایان شده است.
۸. میزان بهبود باربری جانبی شمع با استفاده از لایه های ژئوگرید به منزله ی المان تسلیح، تا حد زیادی به میزان چگالی نسبی شیب وابسته است، به طوری که برای شیب های ماسه یی نسبت، بهبود نسبتاً کمتر و برای شیب های ماسه یی متراکم، بهبود قابل توجهی مشاهده شد.

۲. به کار بردن لایه های ژئوگرید در اعماق سطحی خاک و با فواصل قائم نزدیک به هم، موجب افزایش قابل توجه سختی بلوک تسلیح و به دنبال آن افزایش باربری جانبی شمع می شود. بنابراین برای دسترسی به بیشترین مزایای استفاده از لایه های ژئوگرید به منزله ی المان مسلح کننده ی شیب در بالابردن کارایی شمع، به کار بردن لایه های با عمق مدفون شدگی $u/d=2/82$ و فاصله ی قائم $x/d=1/64$ پیشنهاد می شود.

۳. برای دسترسی به بیشترین ظرفیت عناصر تسلیح ژئوگریدی و تأمین مقاومت مهار ی مورد نیاز، باید از لایه هایی با طول و عرض کافی در محدوده ی اطراف شمع استفاده کرد. بنابراین، براساس نتایج به دست آمده، مقادیر بهینه ی $H/d=31$ برای طول و $W/d=24/6$ برای عرض لایه های ژئوگرید پیشنهاد می شود.

۴. افزایش طول مدفون و فاصله ی شمع از لبه ی تاج شیب، کاهش زاویه و افزایش میزان تراکم شیب و در نهایت زبر شدن جداری شمع در هر دو حالت شیب تسلیح نشده و تسلیح شده، موجب افزایش باربری جانبی شمع شده است.

پانویس

1. rope and pulley system
2. lateral resistance improvement ratio (LRIR)
3. scale effect

منابع (References)

1. Huang, C.; Tatsuoka, F. and Sato, Y. "Failure mechanisms of reinforced sand slopes loaded with a footing", *Soils and Foundations*, **34**(2), pp. 27-40 (1994).
2. Lee, K.M. and Manjunath, V.R. "Experimental and numerical studies of geosynthetic-reinforced sand slopes loaded with a footing", *Canadian Geotechnical Journal*, **37**, (4) pp. 828-842 (2000).
3. Yoo, C. "Laboratory investigation of bearing capacity behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand slope", *Geotextiles and Geomembranes*, **19**, pp. 279-298 (2001).
4. El-Sawwaf, M. "Strip footing behavior on pile and sheet pile stabilized sand slope", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(6), pp. 705-715 (2005).
5. El-Sawwaf, M. "Behavior of strip footing on geogrid-reinforced sand over a soft clay slope", *Geotextiles and Geomembranes*, **25**, pp. 50-60 (2007).
6. Poulos, H.G. "Behavior of laterally loaded piles near a cut or slope", *Australian Geomechanics Journal*, **6**, pp. 6-12 (1976).
7. Schmidt, H.G., *Large Diameter Bored Piles for Abutments*, 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 107-112 (1977).
8. Terashi, M.; Kitazume, M.; Maruyama, A. and Yamamoto, Y. "Lateral resistance of a long pile in or near the slope", *Proc., Centrifuge*, **91**, pp. 245-252 (1991).
9. Bouafia, A. and Bouguerra, A. "Centrifuge testing of the behavior of a horizontally loaded flexible pile near to a slope", *Canadian Geotechnical Journal*, **32**, (2) pp. 324-335 (1995).
10. Mezazigh, S. and Levacher, D. "Laterally loaded piles in sand: Slope effect on P-Y reaction curves", *Canadian Geotechnical Journal*, **35**, (3) pp. 433-441 (1998).
11. Stewart, D.P. "Reduction of undrained lateral pile capacity in clay due to an adjacent slope", *Australian Geomechanics Journal*, **34**, (4) pp. 17-23 (1999).
12. Chae, K.S.; Ugai, K. and Wakai, A. "Lateral resistance of short single piles and pile groups located near slopes", *International Journal of Geomechanics*, **4**(2), pp. 93-103 (2004).
13. El-Sawwaf, M. "Lateral resistance of single pile located near geosynthetic reinforced slope", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **132**(10), pp. 1336-1345 (2006).
14. 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).
15. Begum, N.A. and Muthukkumaran, K., *Numerical Modeling for Laterally Loaded Piles on a Sloping Ground*, The 12th International Conference of IACMAG, Goa India, pp. 3368-3375 (2008).
16. Poulos, H.G. and Davis E.H., *Pile Foundation Analysis and Design*, John Wiley & Sons Inc., New York (1980).

17. Narasimha Rao, S.; Ramakrishna, V.G.S.T.K. and Babu Rao, M. "Influence of rigidity on laterally loaded pile groups in marine clay", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **124**(6), pp. 542-549 (1998).
18. Terzaghi, K. "Evaluation of coefficients of subgrade reaction" *Geotechnique*, **5**, (4) pp. 297-326 (1955).
19. Broms, B.B. "Lateral resistance of piles in cohesionless soils", *Journal Soil Mech. Found. Div.*, **90**(3), pp. 123-156 (1964).
20. 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).

INVESTIGATION OF LATERAL RESISTANCE OF SINGLE PILE LOCATED NEAR GEOGRID REINFORCED SLOPE

S.M.Ali Zomorodian*

mzomorod@shirazu.ac.ir

School of Agricultural

Shiraz University

H. Sadeghi

hamid.sadeghi@yahoo.com

Islamic Azad University, Estahban Branc

Sharif Civil Engineering Journal

Volume 28, Issue 2, Page 89-98, Original Article

© Sharif University of Technology

Abstract

It is sometimes possible for a structure resting on vertical piles to be placed near natural or human-made slopes. The behavior of pile foundations that are located near slopes is different from their behavior when they are located at ground level, as piles not only may induce failure in the slope (especially at shallow depths) but also the lateral bearing capacity of the piles themselves may decrease to a great extent due to the nearby slope. There have been many numerical and experimental studies on single or group piles subjected to lateral loads and founded on flat horizontal ground. Whereas there are many studies on single and group piles near

sandy slopes reinforced by geogrids, the effect of using slope reinforcement techniques on the behavior of vertical piles subjected to lateral loads near reinforced slopes has not yet been investigated. Consequently, the lack of study in this field, concerning the real behavior of piles in such situations and the effects of soil reinforcement on the lateral resistance of piles near slopes still exists.

The main purpose of this investigation is to examine the effect of reinforcing elements on the lateral behavior of a single vertical pile near a sandy slope, and also how to use an appropriate reinforcing layout in a practical way. Therefore, a broad series of conditions, including unreinforced cases, were tested by varying parameters such as: arrangement of geogrid reinforcements, pile distance from the slope crest, relative density of sand, angle of slope, embedded length, shaft roughness and cross section of pile. The results indicate that an improvement in the lateral resistance of the pile intensively depends on the arrangement of geogrid reinforcements. The optimum length and width values of geogrid layers (i.e. the one leading maximum lateral resistance of a single pile) were $31d$ and $24.6d$ (d =pile diameter) and $2.82d$, $1.64d$ for the depth of the first layer and spacing between geogrid layers, respectively.

Key Words: pile, lateral load, sand, reinforced slope, geogrid.

* corresponding author

Received 08 March 2010; received in revised form 06 November 2010; accepted 17 January 2011