مهندسی عمران شریف (زمستان ۱۳۹۸)
دوره‌ی ۲ - ۳۵، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۱۴۱-۱۲۸، (یادداشت فنی)

Research Note

مطالعه‌ی عددی تأثیر شرایط مقاومتی بستر و آب زیرزمینی در رفتار دیوار خاک مسلح ژئوسنتتیکی

واحد قیاسی * **(استادیار)**
امین فرزان (کارشناس ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه ملایر

بیشتر طراحی‌های دیوار خاک مسلح ژئوسنتتیکی بستر دیوار خاک مسلح به‌صورت صلب در نظر گرفته می‌شود. با توجه به تفاوت رفتار دیوار خاک مسلح بر روی بستر تراکم‌پذیر و سست نسبت به بستر صلب، بررسی رفتار سیستم ذکر شده بر روی بستر تراکم‌پذیر ضروری به‌نظر می‌رسد. در پژوهش حاضر، رفتار دیوار خاک مسلح ژئوگریدی قرار گرفته بر روی بستر با پارامترهای مقاومتی متفاوت و ترازهای مختلف آب زیرزمینی، با استفاده از روش اجزاء محدود برای بررسی تغییرشکل‌ها و نیروها و روش تعادل حدی برای بررسی پایداری دیوار ارزیابی شده است. همچنین در طی مطالعه، اثر ارتفاع دیوار نیز در دو دسته با ارتفاع ۴ و ۸ متر بررسی شده‌اند. نتایج نشان داد که کاهش پارامترهای مقاومتی بستر دیوار خاک مسلح، منجر به افزایش جابه‌جایی جانبی نمای دیوار و بارکششی ژئوگریدها و نیز کاهش پایداری دیوار می‌شود. همچنین هر قدر سطح تراز آب زیرزمینی به زیر دیوار خاک مسلح نزدیک‌تر باشد، جابه‌جایی جانبی دیوار بیشتر و پایداری کلی دیوار کمتر خواهد بود، و تأثیر آن در رفتار دیوار در فاصله‌ی صفر تا ۱ متری تراز زیر دیوار مقداری قابل توجه است.

واژگان کلیدی: دیوار خاک مسلح، ژئوسنتتیک، شرایط بستر، روش اجزاء محدود، تعادل حدی.

v.ghiasi@malayeru.ac.ir
aminfarzandc@gmail.com

۱. مقدمه

مقاومت کششی پایین خاک، یک محدودیت عمده در سازه‌های خاکی است، در حالی که این محدودیت می‌تواند توسط مسلح‌سازی خاک در سیستم دیوار خاک مسلح بر طرف شود. دیوارهای خاک مسلح در طی دو دهه‌ی گذشته در سراسر جهان به واسطه‌ی مزایای زیادی، نظیر: صرفه‌جویی اقتصادی، تسریع در ساخت، زیبایی ظاهری و انعطاف‌پذیری بیشتر نسبت به دیوارهای حائل مرسوم، نظیر دیوارهای حائل وزنی محبوبیت بسیاری یافته و مورد استفاده‌ی گسترده‌یی قرار گرفته‌اند. از جمله کاربردهای دیوار خاک مسلح ژئوسنتتیکی می‌توان به نگهداری خاکریزها، پایه‌ی پل‌ها و عریض‌سازی و نگهداری جاده‌ها یا ریل‌های راه‌آهن در نقاطی که اختلاف ارتفاع وجود دارد، اشاره کرد.[۱] به طورکلی دیوارهای خاک مسلح از سه جزء خاکریز، نما و مسلح‌کننده تشکیل شده‌اند و ساز و کار دیوار خاک مسلح بر پایه‌ی اندرکنش میان مسلح‌کننده و خاک است، که موجب جلوگیری خاک در مقابل گسیختگی می‌شود. بررسی رفتار دیوار خاک مسلح تحت عملکرد اجزاء سازه‌یی و هندسی دیوار بر روی بستر صلب، تاکنون موردبحث و بررسی زیادی قرار گرفته است.[۲-۱۱] با وجود این به بررسی رفتار دیوار خاک مسلح با در نظرگرفتن اثر بستر در رفتار دیوار کمتر توجه شده است. بیشتر دیوارهای خاک مسلح با این فرض طراحی می‌شوند که در آن‌ها بستر دیوار، صلب است و بستر صلب تأثیری در نیروی کششی به وجود آمده در مسلح‌کننده ندارد و این فرض ممکن است در مورد دیوارهایی که بستر با پارامترهای مقاومتی پایین دارند، صحیح نباشد.

درمطالعه‌ی پارامتریک لینگ و لشچنسکی[۱] (۲۰۰۳)،[۱۲] با روش اجزاء محدود، به بررسی اثر مشخصات خاک بستر در رفتار دیوار خاک مسلح بلوکی قطعه‌یی پرداخته و نتیجه‌گیری شده است که پاسخ دیوار و مسلح‌کننده به تغییر در سختی یک بسترکشسان حساس نیست و تأثیر خاک بستر در ارتباط با جابه‌جایی جانبی نما و بارکششی در مسلح‌کننده‌ها باید با مدل‌های غیرخطی خاک نیز شبیه‌سازی شود. در پژوهش دامیانس[۲] و همکاران (۲۰۱۴)،[۱۳] نیز که به روش دیفرانسیل محدود صورت پذیرفته است، به بررسی اثر تراکم‌پذیری بستر در بارهای ایجاد شده در ژئوسنتتیک‌ها در دیوار خاک مسلح پرداخته و نتیجه‌گیری شد به میزانی که سختی بستر دیوار کاهش می‌یابد، بار مسلح‌کننده‌ها افزایش می‌یابد. در پژوهش اخیر، محیط خاک بستر دیوار، یک محیط کشسان خطی است و با صفر قرار دادن ضریب پوآسون، عملاً پاسخ تغییرشکل بستر معادل با فنر وینکلر و نیز جابه‌جایی بستر دیوار

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۸/۲۹، اصلاحیه ۱۳۹۷/۱/۱۴، پذیرش ۱۳۹۷/۲/۹.
DOI:10.24200/J30.2018.5273.2246

خاک مسلح و پنجه‌ی دیوار، فقط در جهت عمودی در نظر گرفته شده است، که این خود شرایطی محدود شده است. با توجه به دلایل ذکر شده، تأثیر خاک بستر با پارامترهای مقاومتی متفاوت و نیز وجود آب زیرزمینی در بستر دیوار خاک مسلح در ترازهای متفاوت در رفتار دیوار خاک مسلح موضوعی است که نیازمند بررسی و درک بیشتری است و در نوشتار حاضر به آن پرداخته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. مدل‌سازی

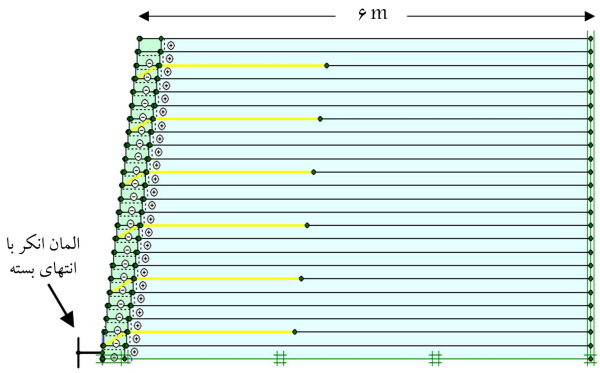
در پژوهش حاضر، مدل‌سازی عددی دیوارهای خاک مسلح ژئوسنتتیکی با استفاده از نرم‌افزار پلکسیس دو بعدی[۳] (ورژن ۸/۶)، که بر پایه‌ی روش اجزاء محدود عمل می‌کند، صورت پذیرفته و همچنین پایداری کلی دیوارها، شامل گوه‌ی گسیختگی و ضرایب اطمینان مدل‌ها توسط نرم‌افزار ژئواسلوپ[۴] (ورژن ۲۰۱۲)، که بر پایه‌ی روش تعادل حدی است و از زیرمجموعه‌های نرم‌افزار ژئواستودیو[۵] است، بررسی شده است. در نرم‌افزار پلکسیس، برای مدل‌سازی از مدل دو بعدی کرنش صفحه‌یی و همچنین از المان‌های مثلثی، که ۱۵ گره و ۱۲ نقطه‌ی تنش دارند، استفاده شده است؛ چرا که المان ۱۵ گره‌یی، المانی دقیق است که نتایج بهتری را برای مسائل مشکل ارائه می‌دهد.[۱۴] مدل‌سازی دیوارها در نرم‌افزار پلکسیس به‌صورت ساخت مرحله‌یی انجام شده است، که در آن لایه‌های خاک به ضخامت ۱۵ سانتی‌متر (به اندازه‌ی ارتفاع یک قطعه بلوک) در مدل صحت‌سنجی و در ضخامت ۲۰ سانتی‌متر در مدل‌های پژوهش به‌صورت متناوب روی هم قرار داده شدند، تا زمانی که دیوار به ارتفاع کامل برسد.

حاتمی و بادرست[۶](۲۰۰۵)، تنش‌های اعمال شده به لایه‌های خاکریز را در اجرا از سوی عمل تراکم توسط غلطک با اعمال یک بار عمودی یکنواخت به میزان ۸ کیلونیوتن بر متر بر روی هر لایه شبیه‌سازی کردند، که روش شبیه‌سازی تنش‌های ناشی از تراکم در تمای مدل‌های پژوهش حاضر نیز بدین صورت انجام شده و در برنامه‌ی محاسبات، در هر فاز، بارهای مذکور در لایه‌ی جدید فعال و در لایه‌ی قبلی غیرفعال شده‌اند. برای شبیه‌سازی رفتار خاک از مدل خاک سخت‌شونده برای مدل صحت‌سنجی و مدل‌های پژوهش استفاده شده است. مدل خاک سخت‌شونده، یک مدل پیشرفته برای شبیه‌سازی رفتار انواع مختلف خاک‌های نرم و سخت است.

۲.۲. صحت‌سنجی

برای صحت‌سنجی مدل استفاده شده در پژوهش حاضر از نتایج کار آزمایشگاهی تمام‌مقیاس (دیوار ۱)، که توسط بادرست و همکاران (۲۰۰۰) در دانشگاه نظامی رویال کانادا شروع شد و جزئیات بیشتر آن در نوشتارهای حاتمی و بادرست (۲۰۰۵ و ۲۰۰۶) منتشر شد، استفاده شده است. شکل ۱، مدل هندسی ساخته شده در نرم‌افزار، که مشابه با مدل تمام مقیاس آزمایشگاهی است، را نشان می‌دهد. دیوار مذکور به ارتفاع ۳/۶ متر با زاویه‌ی نمای ۸ درجه نسبت به راستای قائم است. طول و فاصله‌ی عمودی ژئوگریدهای به‌کار رفته به ترتیب ۲/۵۲ و ۰/۶ متر است. پارامترهای مدل رفتاری خاکریز برای مدل صحت‌سنجی، از پارامترهای به‌کار رفته در پژوهش گولار و همکاران (۲۰۰۷)،[۱۵] اقتباس شده است.

مقدار $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$، مطابق با پیش‌فرض نرم‌افزار پلکسیس،[۱۴] است و مقدار m بر مبنای مقدار پیشنهادی جانبو، که مقدار آن را مساوی ۰/۵ برای ماسه‌های نروژی گزارش کرده، قرار داده شده است.[۱۶] مسلح‌کننده‌های ژئوگریدی به‌عنوان



شکل ۱. هندسه‌ی مدل عددی صحت‌سنجی مشابه با مدل آزمایشگاهی.

مصالح کشسان خطی با در نظر گرفتن اندرکنش کامل با خاک اطراف مدل‌سازی شده‌اند و همچنین نوع مش‌بندی به‌کار برده شده در مدل‌سازی، از نوع مش‌بندی ریز بوده است.

در مدل آزمایشگاهی، عکس‌العمل افقی پنجه‌ی دیوار توسط یک میله‌ی سنجش بار اندازه‌گیری شده است، که برای شبیه‌سازی شرایط پنجه در مدل عددی در جهت افقی از المان انکر با انتهای بسته با سختی محوری ۴۰۰۰ کیلونیوتن بر متر استفاده شد و از جابه‌جایی پنجه‌ی دیوار در جهت عمودی توسط گیرداری عمودی، مطابق با شرایط مدل آزمایشگاهی جلوگیری شد. همچنین مطابق با شرایط بستر دیوار در مدل آزمایشگاهی که به صورت صلب است، در مدل عددی، گیرداری‌های افقی و عمودی در زیر دیوار تعریف شد و نیز در سمت راست مدل، فقط گیرداری افقی برای مجازکردن جابه‌جایی عمودی دیوار تحت اثر وزن خاک و تراکم اعمالی بر لایه‌ها قرار داده شد. سطح مشترک افقی بین بلوک‌های مدولار و سطح مشترک عمودی بین بلوک‌ها و خاکریز تعریف شده است. در مدل فیزیکی، لایه‌های ژئوگرید توسط اتصال مکانیکی به بلوک‌های پوسته متصل شده‌اند، که این امر در مدل‌سازی عددی توسط عبور دادن ژئوگرید از درون بلوک‌های مدولار به‌صورت قطری انجام شده است. در جدول ۱، مقادیر پارامترهای ورودی برای اجزاء مختلف در مدل صحت‌سنجی ارائه شده است.

۳. نتایج صحت‌سنجی

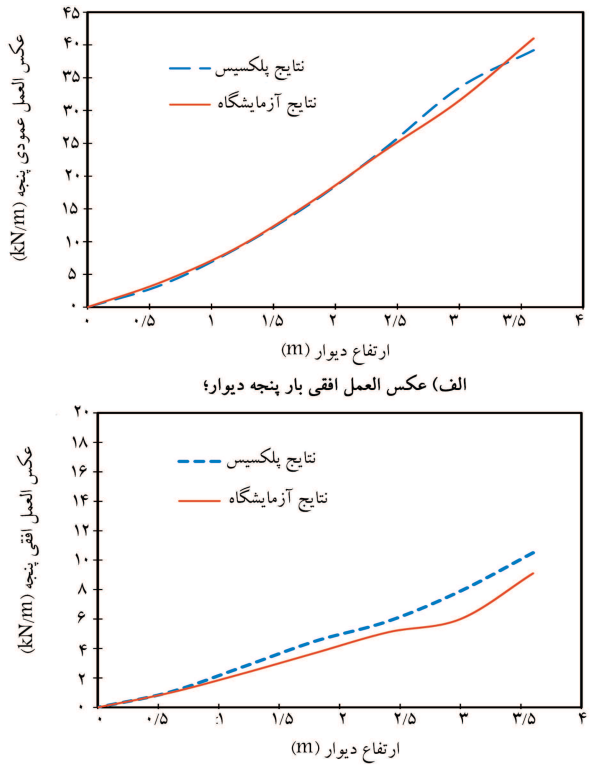
نتایج به دست آمده از مدل صحت‌سنجی در مقایسه با نتایج ارائه شده از مدل‌های آزمایشگاهی توسط حاتمی و بادرست در شکل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است.

شکل ۲، پذیرشی مناسب مابین مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر به دست آمده از عکس‌العمل در جهت افقی و عمودی پنجه‌ی دیوار خاک مسلح را نشان می‌دهد.

مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از مدل فیزیکی و نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی برای جابه‌جایی افقی نمای دیوار در شکل ۳ ـ الف مشاهده می‌شود، که تطبیق خوبی با یکدیگر دارند. این تذکر لازم است که نشانه‌های موجود در نمودارهای شکل ۳ (الف و ب)، نشان‌دهنده‌ی لایه‌های ژئوگرید متناظر در تراز مربوط به هر یک از لایه‌هاست. در شکل ۳ ـ ب، نیز که مقادیر به دست آمده از نتایج مدل فیزیکی و عددی برای بار اتصال مسلح‌کننده‌ها به نمای دیوار با هم مقایسه شده است، در طول نمودار به جز لایه‌ی ۲، تطبیق مناسبی وجود دارد. در مقایسه‌ی نتایج مدل‌سازی دیفرانسیل محدود و دیوار فیزیکی مشابه، که حاتمی و بادرست (۲۰۰۵) انجام دادند، نیز تطبیق مناسبی در نمودار بار اتصال مسلح‌کننده به جز در لایه‌های ۱

جدول ۱. پارامترهای ورودی نرم‌افزار در مدل صحت‌سنجی و مدل‌های پژوهش حاضر.

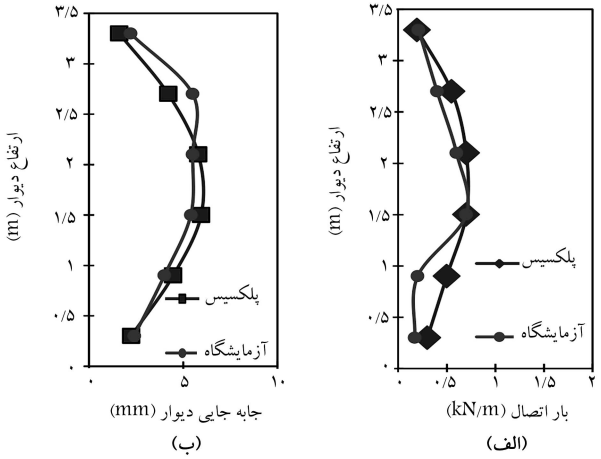
نام پارامتر	مقدار در مدل صحت‌سنجی	مقدار در مدل‌های پژوهش	خاک ضعیف	خاک متراکم
مدل	خاک سخت‌شونده	خاک سخت‌شونده	خاک سخت‌شونده	خاک سخت‌شونده
زاویه اصطکاک Φ (degrees)	۴۴	۵۰	۳۴	۴۱
چسبندگی C (kPa)	۱	۱	۱	۱
زاویه اتساع Ψ (degrees)	۱۱	۰	۰	۱۴
وزن مخصوص γ (KN/m^3)	۱۶٫۸	۲۰	۱۷	۱۷٫۵
E_{50}^{ref}	۵۶۶۶۷	۴۲۵۰۰	۲۰۰۰۰	۳۷۰۰۰
E_{oed}^{ref}	۵۶۶۶۷	۳۱۸۰۰	۱۶۰۰۰	۲۹۶۰۰
E_{ur}^{ref}	۱۷۰۰۰۰	۱۲۷۵۰۰	۶۰۰۰۰	۹۰۰۰۰
توان وابسته به تنش m	۰٫۵	۰٫۵	۰٫۶۵	۰٫۵
ضریب شکست R_f	۰٫۹	۰٫۹	۰٫۹	۰٫۹
ضریب پوآسون ν	۰٫۲۵	۰٫۲	۰٫۲	۰٫۲
بلوک مدولار				
مدل	کشسان خطی	کشسان خطی	-	-
اندازه	۰٫۳ × ۰٫۱۵	۰٫۳ × ۰٫۱۵	-	-
وزن مخصوص γ (KN/m^3)	۲۱٫۸	۲۱٫۸	-	-
مدول سختی E	۱×۱۰^۵	۱×۱۰^۵	-	-
ضریب پوآسون ν	۰٫۱۵	۰٫۱۵	-	-
سختی محوری ژئوگرید	۴۰۰۰	۴۰۰۰	-	-



الف) عکس العمل افقی بار پنجه دیوار؛

ب) عکس العمل عمودی بار پنجه دیوار.

شکل ۲. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی عددی.



شکل ۳. مقایسه‌ی نتایج به دست آمده از نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی عددی.

و ۲ مشاهده می‌شود. به طورکلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل‌سازی صورت گرفته برای صحت‌سنجی در پژوهش حاضر، دقت قابل قبولی دارد.

۴. مدل‌سازی پژوهش

در پژوهش حاضر، با هدف بررسی تأثیر در نظرگرفتن بستر و شرایط مختلف آن در طراحی دیوار خاک مسلح تحت شرایط پایان ساخت و بارگذاری سربار، نوع بستر

دیوار خاک مسلح در ۳ دسته‌ی: بستر صلب (رایج در طراحی‌ها)، خاک ماسه‌یی متراکم و خاک ماسه‌یی ضعیف در نظر گرفته شده است. ضخامت لایه‌ی بستر دیوارها ۵ متر بوده است. همچنین شرایط آب زیرزمینی در ۴ حالت که عبارت بودند از: عدم وجود آب زیرزمینی، تراز آب تا زیر دیوار خاک مسلح (تراز صفر)، تراز آب تا فاصله‌ی ۱ متری از زیر دیوار (تراز ۱) و تراز آب تا فاصله‌ی ۳ متری از زیر دیوار (تراز ۳) تقسیم بندی شده است. این تذکر لازم است که در بررسی اثر وجود آب زیرزمینی در رفتار دیوار، جنس خاک بستر دیوارها، خاک ماسه‌یی ضعیف فرض شده است. همچنین برای در نظرگرفتن اثر ارتفاع، تمامی مدل‌ها در دو ارتفاع ۴ و ۸ متر ایجاد شده‌اند، و نیز در مرحله‌ی بارگذاری سربار، یک بارگسترده‌ی یکنواخت به شدت ۴۰ کیلونیوتن بر متر و طول ۳ متر از پشت بلوک‌های نما بر روی دیوار خاک مسلح اعمال شده است.

پارامترهای به‌کار رفته برای مصالح خاکریز و بستر و بلوک مدولار و همچنین مسلح‌کننده‌ها برای مدل‌های پژوهش در جدول ۱ ارائه شده است. همچنین فاصله‌ی عمودی مسلح‌کننده‌ها ۰٫۸ متر، نسبت طول مسلح‌کننده به ارتفاع دیوار (L/H) در تمامی مدل‌ها ۰٫۷ و زاویه‌ی نمای دیوار با راستای قائم، صفر درجه در نظرگرفته شده است. مابقی موارد رعایت شده در مدل‌سازی دیوار و اجزاء آن، مشابه موارد ذکر شده در بخش ۲ است.

بعد از بررسی مقدار جابه‌جایی‌ها و نیروها در پلکسیس، برای بررسی پایداری دیوار و ضرایب اطمینان، دیوارها در نرم‌افزار ژئواسلوپ مدل‌سازی شدند. برای تحلیل پایداری، تحلیل از نوع مورگنسترن ـ پرایس[۷] استفاده شده است.

۵. نتایج و بحث

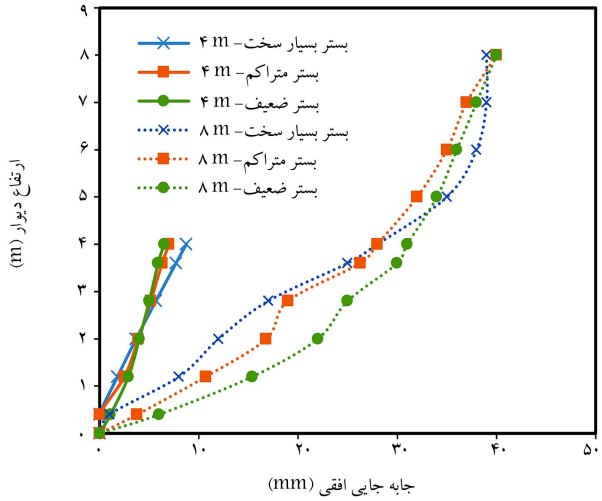
۱.۵. تأثیر مقاومت بستر

در شکل‌های ۴ و ۵، نتایج تحلیل اثر خاک لایه‌ی بستر در جابه‌جایی افقی و بار بیشینه‌ی مسلح‌کننده در شرایط پایان ساخت دیوار و بارگذاری سربار مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۴، دیوارهایی که خاک لایه‌ی بستر در آن‌ها صلب فرض شده است، در هر دو دیوار ۴ و ۸ متری، جابه‌جایی افقی بیشتری را در نیمه‌ی بالایی دیوار از خود نشان داده‌اند و در نیمه‌ی پایینی دیوار، جابه‌جایی کمتری نسبت به مابقی دیوارها، که بستر متراکم و ضعیف دارند، مشاهده می‌شود.

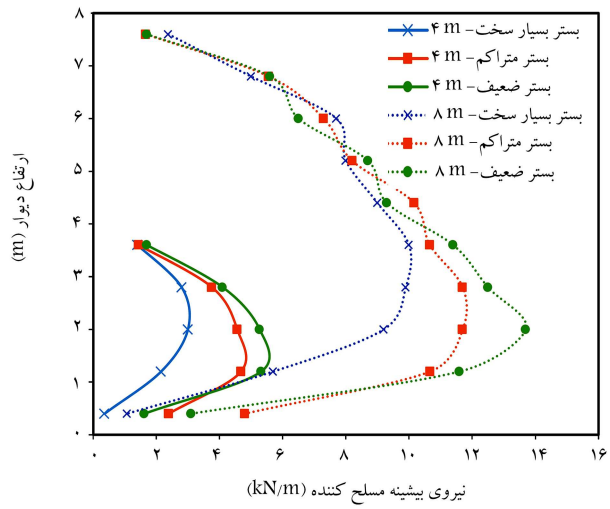
لذا می‌توان گفت هر چه خاک لایه‌ی بستر در دیوارهای خاک مسلح ژئوسنتتیکی با ارتفاع‌های به نسبت بلند و کوتاه، از سختی کمتر و ضعیف بودن به سختی بیشتر سوق یابد، جابه‌جایی افقی پوسته‌ی دیوار در نیمه‌ی پایینی دیوار بیشتر و در نیمه‌ی بالایی دیوار به سمت خاکریز پیش خواهد رفت، که باید به هنگام مواجه با بستر خاک سخت در نیمه‌ی بالایی دیوار از تعداد لایه‌های بیشتر ژئوگرید استفاده کرد، یا به بیانی دیگر هر چه بستر دیوار خاک مسلح ضعیف‌تر باشد، جابه‌جایی نمای دیوار به حالت شکم‌دادگی نزدیک‌تر خواهد شد.

در تمامی دیوارها، با توجه به شکل ۵، بار بیشینه‌ی ژئوگریدها به‌طور تقریبی در ارتفاع $\frac{1}{4}$ از کف دیوار، بیشترین مقدار خود را دارند. با ضعیف شدن لایه‌ی خاک بستر دیوار، بار کششی بیشینه‌ی به وجود آمده در مسلح‌کننده‌های ژئوگریدی قرار گرفته در حدود ارتفاع $\frac{1}{4}$ ابتدایی دیوار بیشتر خواهد شد، اما این تغییر در مقامت لایه‌ها، تأثیر چندانی در بار مسلح‌کننده‌های لایه‌های بالایی دیوار ندارد.

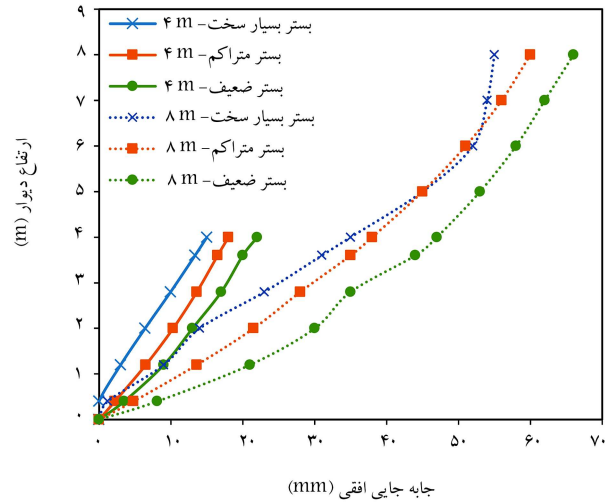
شکل‌های ۶ و ۷، به ترتیب جابه‌جایی افقی نمای دیوار و بارکششی بیشینه در ژئوگریدها را نشان می‌دهند. مطابق شکل ۶ و مقایسه‌ی آن با شکل ۴ می‌توان دریافت



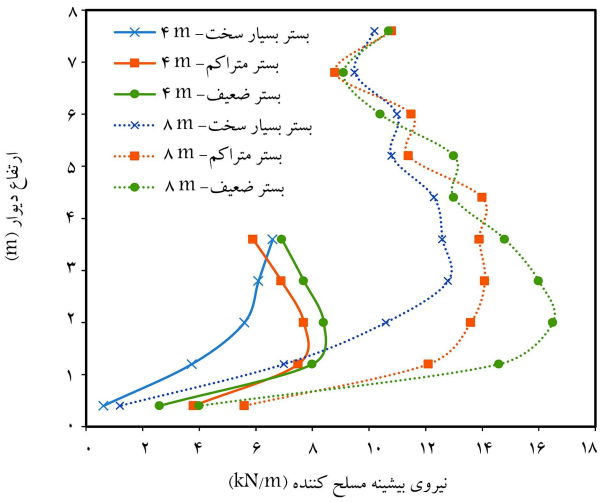
شکل ۴. اثر لایه‌ی بستر در جابه‌جایی افقی نمای دیوار تحت شرایط پایان ساخت (خط‌چین: دیوار با ارتفاع ۸ متر، خط ممتد: دیوار با ارتفاع ۴ متر).



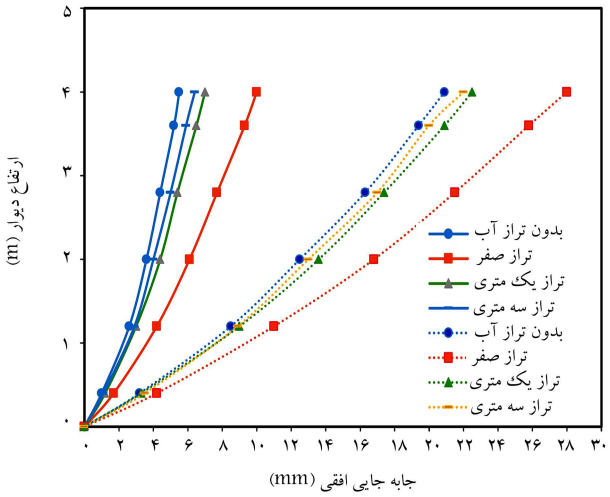
شکل ۵. اثر لایه‌ی بستر در بار بیشینه‌ی مسلح‌کننده‌ها تحت شرایط پایان ساخت دیوار (خط‌چین: دیوار با ارتفاع ۸ متر، خط ممتد: دیوار با ارتفاع ۴ متر).



شکل ۶. اثر لایه‌ی بستر در جابه‌جایی افقی نمای دیوار تحت شرایط سر بار (خط‌چین: دیوار با ارتفاع ۸ متر، خط ممتد: دیوار با ارتفاع ۴ متر).



شکل ۷. اثر لایه‌ی بستر در بار بیشینه‌ی مسلح‌کننده‌ها تحت شرایط سربار (خط‌چین: دیوار با ارتفاع ۸ متر، خط ممتد: دیوار با ارتفاع ۴ متر).



شکل ۸. تأثیر آب زیرزمینی در جابه‌جایی افقی نمای دیوار در بستر ضعیف (خطوط ممتد: پایان ساخت، خطوط نقطه‌چین: بارگذاری سربار).

که تأثیر لایه‌ی بستر در جابه‌جایی افقی دیوار در شرایط بارگذاری، بیشتر از شرایط پایان ساخت است و نمودارها پس از بارگذاری، اختلاف بیشتری در جابه‌جایی‌ها را برای لایه‌های مختلف بستر نشان می‌دهند.

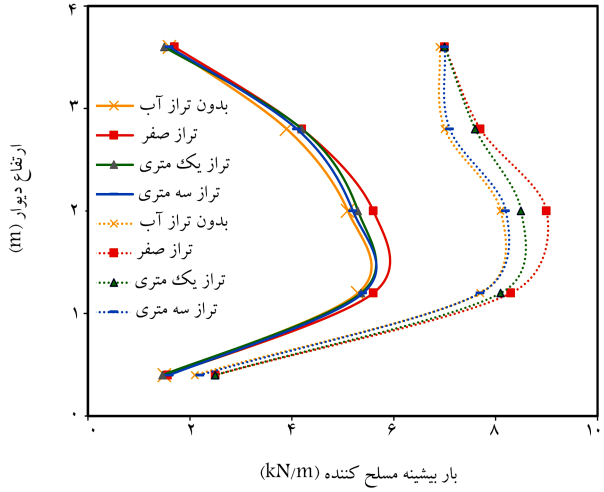
در شکل‌های ۴ و ۶، شکم‌دادگی در تراز بالایی دیوار با بستر صلب، در مقایسه با بسترهای دیگر می‌تواند به این دلیل باشد که دیوار با بستر صلب فقط در راستای افقی جابه‌جایی راحتی خواهد داشت و تقریباً تمام جابه‌جایی خود را در راستای افق انجام می‌دهد؛ در صورتی که دیوارهای با بستر خاک متراکم و ضعیف، در راستای قائم نیز امکان جابه‌جایی دارند و بخشی از جابه‌جایی دیوار در آن راستا صورت می‌پذیرد. بار ژئوگریدها تحت سربار در شکل ۷ در مقایسه با شکل ۵ ارقام بیشتری را نشان می‌دهند، به خصوص در لایه‌های بالایی دیوار، چرا که شدت اثر تنش‌های وارده در خاک از جانب سربار در فواصل نزدیک به سطح زیر سربار، نسبت به سایر نقاط مقدار بیشتری است، اما در لایه‌ی اول در هر دو حالت پایان ساخت و سربار، بارکششی در مسلح‌کننده‌ها یکسان است.

۲.۵. تأثیر آب زیرزمینی

۱.۲.۵. بستر ضعیف

در شکل‌های ۸ و ۹، نتایج بررسی سطح آب زیرزمینی به ترتیب برای جابه‌جایی افقی نمای دیوار و بار بیشینه‌ی به وجود آمده در ژئوگریدها در ۳ تراز متفاوت و مقایسه‌ی آن با بستر خشک، تحت شرایط انتهای ساخت، و بارگذاری سربار برای بستر با خاک ماسه‌یی ضعیف مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۸، در نظر گرفتن آب زیرزمینی در تحلیل رفتار دیوار خاک مسلح نقش به‌سزایی دارد. حالتی که در آن بستر دیوار خاک مسلح عاری از وجود آب باشد، کمترین جابه‌جایی نمای دیوار را در پایان ساخت و سربار خواهد داشت؛ اما به هنگام وجود آب زیرزمینی و با دیوار، افزایش تراز آب به نزدیکی سطح زیرین دیوار خاک مسلح، جابه‌جایی مطابق شکل مذکور افزایش خواهد یافت؛ به‌ویژه در فاصله‌ی بین تراز ۱ متری تا کف دیوار خاک مسلح که جابه‌جایی افقی دیوار به مقدار قابل ملاحظه‌یی نسبت به حالت‌های قبل، در هر دو حالت پایان ساخت دیوار و بارگذاری سربار افزایش نشان می‌دهد.

بار بیشینه‌ی به وجود آمده در مسلح‌کننده‌ها در شکل ۹ نیز در تراز صفر آب

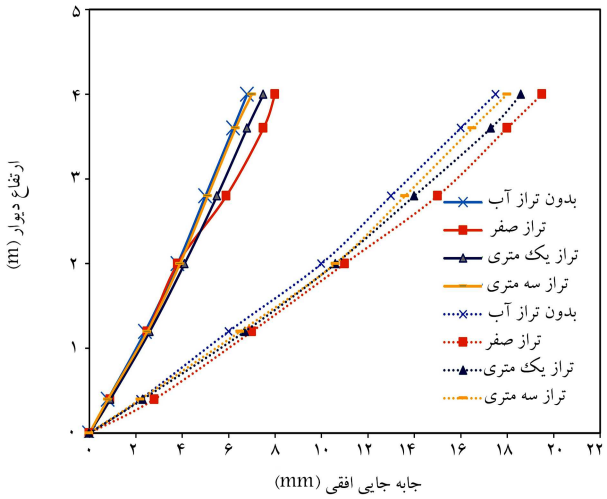


شکل ۹. تأثیر آب زیرزمینی در بار بیشینه‌ی ژئوگرید در بستر ضعیف (خطوط ممتد: پایان ساخت، خطوط نقطه‌چین: بارگذاری سربار).

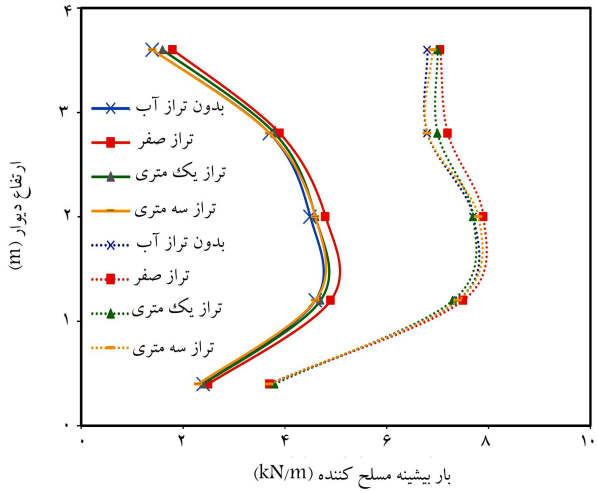
زیرزمینی نسبت به سایر حالت‌ها مقدار بیشتری را در لایه‌های وسط دیوار خاک مسلح در هر دو حالت پایان ساخت و بارگذاری سربار از خود نشان می‌دهند و بعد از آن به ترتیب در مدل‌های با تراز ۱ متر، ۳ متر و بستر خشک، روندی کاهشی دارد. مقدار کم نیروی کششی در اولین لایه‌ی ژئوگرید، در هر دو شرایط پایان ساخت و بارگذاری سربار به علت تحمل بخش عمده‌یی از فشار جانبی خاکریز توسط پنجه‌ی دیوار است، که به‌صورت گیردار است.

۲.۲.۵. بستر متراکم

جابه‌جایی افقی پوسته‌ی دیوار و بار بیشینه‌ی به وجود آمده در ژئوگریدها در ۳ تراز متفاوت و مقایسه‌ی آن با بستر خشک، تحت شرایط پایان ساخت، و بارگذاری سربار برای بستر با خاک ماسه‌یی متراکم در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۱۰، هر چه تراز آب زیرزمینی به سطح زیر دیوار خاک مسلح نزدیک‌تر باشد، جابه‌جایی افقی دیوار در نیمه‌ی بالایی آن افزایش خواهد یافت. از مقایسه‌ی شکل ۱۰، که شامل بستر با خاک ماسه‌یی متراکم است، با شکل ۸ که بستر با خاک ماسه‌یی ضعیف است، می‌توان دریافت که وجود سطح آب زیرزمینی در



شکل ۱۰. تأثیر آب زیرزمینی در جابه‌جایی افقی نمای دیوار در بستر متراکم (خطوط ممتد: پایان ساخت، خطوط نقطه‌چین: بارگذاری سربار).



شکل ۱۱. تأثیر آب زیرزمینی در بار بیشینه‌ی ژئوگرید در بستر متراکم (خطوط ممتد: پایان ساخت، خطوط نقطه‌چین: بارگذاری سربار).

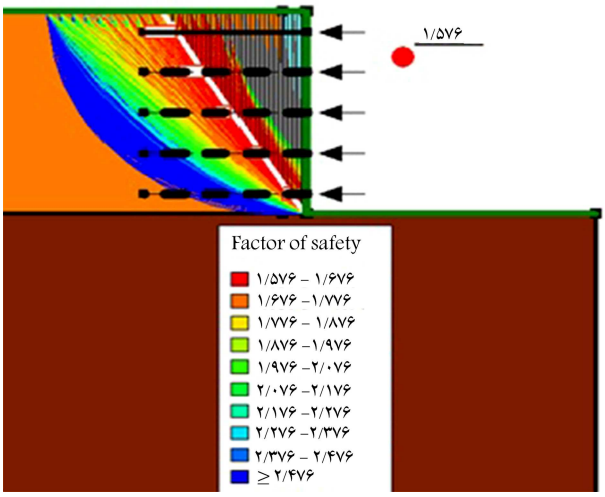
بستر با مشخصات مقاومتی کمتر، تأثیر بیشتری در افزایش جابه‌جایی پوسته‌ی دیوار می‌گذارد.

همچنین شکل ۱۱، افزایش بارکششی ژئوگریدها را با نزدیک شدن تراز آب زیرزمینی به سطح دیوار نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی بستر با خاک ماسه‌یی متراکم و خاک ماسه‌یی ضعیف می‌توان مشاهده کرد که روند افزایش بار ژئوگریدها در هر دو حالت تقریباً به یک شکل است، اما مقادیر افزایش بار ژئوگریدها را در بستر ضعیف نسبت به بستر متراکم نشان می‌دهد.

به طورکلی با توجه به شکل‌های ۸ الی ۱۱، با افزایش سطح آب زیرزمینی از فاصله‌ی ۳ متری زیر دیوار تا تراز زیر سطح دیوار، جابه‌جایی افقی دیوار و بار ژئوگریدها افزایش می‌یابد و این افزایش تا فاصله‌ی ۳ متری زیر دیوار مقدار بیشتری دارد و از فاصله‌ی ۳ متری به بعد از تأثیر آن به شدت کم خواهد شد و تقریباً تأثیر آن با حالت خاک خشک برابری می‌کند، همچنین نتایج نشان دادند که با ضعیف‌تر شدن مقاومت خاک بستر، آب زیرزمینی تأثیر خود را در افزایش جابه‌جایی افقی دیوار، بیشتر نشان خواهد داد.

جدول ۲. ضرایب اطمینان مدل‌ها.

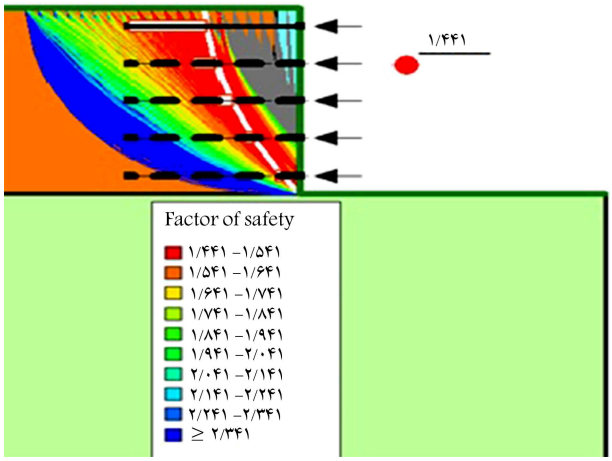
مدل	پایان ساخت	بارگذاری سربار
بستر صلب ـ ۴ متر	۱٫۵۷	۱٫۱۴
بستر صلب ـ ۸ متر	۱٫۱۵	۱٫۰۳
بستر متراکم ـ ۴ متر	۱٫۴۴	۱٫۱۱
بستر متراکم ـ ۸ متر	۱٫۱۲	۱٫۰۱
بستر ضعیف ـ ۴ متر	۱٫۳	۱٫۰۷
بستر ضعیف ـ ۸ متر	۱٫۰۹	۰٫۹۵
بستر متراکم ـ تراز آب صفر	۱٫۴	۱٫۱۸
بستر متراکم ـ تراز آب ۱ متر	۱٫۴۵	۱٫۱۴
بستر متراکم ـ تراز آب ۳ متر	۱٫۴۸	۱٫۱۲
بستر ضعیف ـ تراز آب صفر	۱٫۲۸	۱٫۰۲
بستر ضعیف ـ تراز آب ۱ متر	۱٫۳۲	۱٫۰۵
بستر ضعیف ـ تراز آب ۳ متر	۱٫۴	۱٫۰۸



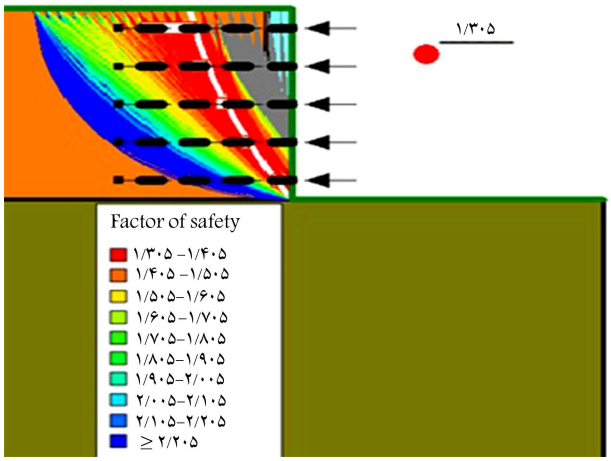
شکل ۱۲. گوه‌ی گسیختگی دیوار با بستر صلب.

۳.۵. بررسی پایداری

نتایج بررسی ضرایب اطمینان دیوارها در شرایط مختلف بستر در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین از میان نتایج گوه‌های گسیختگی تشکیل شده در دیوارها، به‌عنوان نمونه، دیوارهای با ارتفاع ۴ متر تحت شرایط پایان ساخت برای نمایش تغییر در سطوح لغزش خاکریز در اثر تغییر مقاومت بستر در شکل‌های ۱۲ الی ۱۴ قابل مشاهده هستند. مطابق نتایج جدول ۲ مشاهده می‌شود که با ضعیف شدن بستر دیوار خاک مسلح، ضرایب اطمینان نیز در هر دو حالت پایان ساخت و سربارکاهش می‌یابند. همچنین با افزایش تراز آب زیرزمینی به سطح زیر دیوار، ضریب اطمینان دیوار کمتر می‌شود و پایداری دیوار به هنگام وجود آب زیرزمینی در بستر با خاک ماسه‌یی ضعیف، نسبت به بستر با خاک ماسه‌یی متراکم کمتر خواهد بود. آیین‌نامه‌ی FHWA، ضریب اطمینان برای پایداری کلی دیوارهای خاک مسلح را ۱٫۵ در نظر گرفته است، که با توجه به آن فقط مدل دیوار با بستر صلب در حالت اتمام ساخت، پایداری کافی دارد و ضریب اطمینان باقی دیوارها کمتر از ۱٫۵ است. نتیجه‌ی اخیر، تأثیر مهم مقاومت بستر و آب زیرزمینی و نیاز به تغییر در طراحی دیوار برای ارضاء کردن پایداری کافی به هنگام مواجه با بستر غیرصلب و وجود آب زیرزمینی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۳. گوه‌ی گسیختگی دیوار با بستر متراکم.



شکل ۱۴. گوه‌ی گسیختگی دیوار با بستر ضعیف.

۶. نتیجه‌گیری

بسیاری از دیوارهای خاک مسلح با فرض بستر صلب و عدم تأثیر بستر در جابه‌جایی جانبی دیوار و بارهای مسلح‌کننده طراحی می‌شوند. در صورتی که این فرض ممکن است تحت شرایط بستر با مقاومت پایین و یا وجود آب زیرزمینی صادق نباشد. لذا در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر در نظر گرفتن شرایط بستر، شامل مقاومت خاک بستر و وجود آب زیرزمینی در ترازهای متفاوت پرداخته شده و نتایج نشان داده است که در نظر گرفتن مقاومت بستر، تأثیر مهمی در نتایج حاصل از رفتار دیوار که شامل جابه‌جایی افقی نما و نیز بار مسلح‌کننده‌ها می‌شود، دارد. با کاهش مقاومت خاک بستر دیوار از بستر صلب به بستر با خاک ماسه‌یی ضعیف، جابه‌جایی دیوار در نیمه‌ی بالایی دیوار، کاهش و در نیمه‌ی پایینی دیوار، افزایش می‌یابد. همچنین بار مسلح‌کننده‌ها در تمامی مدل‌ها در ارتفاع $\frac{1}{3}$ از کف دیوار برای دیوار ۸ متری و ارتفاع $\frac{1}{2}$ از کف دیوار برای دیوار ۴ متری، بیشترین مقدار را دارد، و با کاهش مقاومت بستر، بار مسلح‌کننده‌ها افزایش می‌یابد.

وجود آب زیرزمینی تأثیر به‌سزایی در جابه‌جایی جانبی دیوار و بار مسلح‌کننده‌ها به‌خصوص در دیوار با بستر ضعیف می‌گذارد. با نزدیک‌تر شدن تراز آب زیرزمینی به سطح زیر دیوار، جابه‌جایی دیوار و بار مسلح‌کننده‌ها افزایش می‌یابد و این افزایش در تراز صفر تا ۱ متر، به ویژه در بستر خاک ماسه‌یی ضعیف، بیشترین مقدار را خواهد داشت و می‌توان گفت که با کاهش سطح تراز آب از تراز ۱ متر به پایین، تأثیر آب زیرزمینی در رفتار دیوار کم کم محو خواهد شد. همچنین با بررسی پایداری دیوارها مشاهده شد که با کاهش مقاومت بستر از حالت صلب به حالت ضعیف، ضریب اطمینان دیوار به مقدار ۲۳٪ کم خواهد شد و سطح گوه‌ی گسیختگی به نمای دیوار نزدیک می‌شود. همین امر برای وجود تراز آب زیرزمینی نیز مشهود است، که در بستر با خاک ماسه‌یی ضعیف، محسوس‌تر است.

پانوشت‌ها

1. leshchinsky
2. Damians
3. Plaxis-2D
4. Geoslope
5. GeoStudio
6. Bathurst
7. morgenstern-price (M-P)

منابع (References)

1. Koerner, R.M. and Soong, T.Y. "Geosynthetic reinforced segmental retaining walls", *Geotextiles and Geomembranes*, **19**(6), pp. 359-386 (2001).
2. Bathurst, R.J. and Rajagopal, K. "Behaviour of geosynthetic reinforced soil retaining wall using finite element method", *Computer And Geotechnics Journal*, **17**(3), pp. 279-299 (1995).
3. Bathurst, R.J., Walters, D., Vlachopoulos, N. and et al. "Full scale testing of geosynthetic reinforced walls", Paper Presented at Geo-Denver, Colorado, USA (2000).
4. Abu-hejleh, T.P.N., Zornberg, J.G. and Wang, T. "Monitored displacements of unique geosynthetis-reinforced soil bridge abutments", *Geosynthetics International*, **9**(4), pp. 71-95 (2002).
5. Huang, B., Bathurst, R.J., Hatami, K. and et al. "Influence of toe restraint on reinforced soil segmental walls", *Canadian Geotechnical Journal*, **135**(10), pp. 1486-1498 (2010).
6. Hatami, K. and Bathurst, R.J. "Development and verification of a numerical model for the analysis of geosynthetic-reinforced soil segmental walls under working stress conditions", *Canadian Geotechnical Journal*, **42**(5), pp. 1066-1085 (2005).

7. Hatami, K. and Bathurst, R.J. "Numerical model for reinforced soil segmental walls under surcharge loading", *Journal of Geotechnical and Geoenviromental Engineering*, **132**(6), pp. 673-684 (2006).

8. Mirmoradi, S.H. and Ehrlich, M. "Evaluation of the effects of facing stiffness and toe resistance on the behavior of GRS walls", *Geotextiles and Geomembranes*, **40**(3), pp. 28-36 (2013).

9. Mirmoradi, S.H. and Ehrlich, M. "Numerical evaluation of the behavior of GRS walls with segmental block facing under working stress conditions", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **142**(4), pp. 82-88 (2015).

10. Mirmoradi, S.H. and Ehrlich, M. "Evaluation of the effect of toe restraint on GRS walls", *Transportation Geotechnics*, **8**(5), pp. 35-44 (2016).

11. Mirmoradi, S.H. and Ehrlich, M. "Effects of facing, reinforcement stiffness, toe resistance, and height on reinforced walls", *Geotextiles and Geomembranes*, **45**(1), pp. 67-76 (2017).

12. Ling, H.I. and Leshchinsky, D. "Finite element parametric study of the behavior of segmental block reinforced-soil retaining walls", *Geosynthtetic International Gournal*, **10**(3), pp. 77-94 (2003).

13. Damians, I.P., Bathurst, R.J., Josa, A. and et al. "Numerical study of the influence of foundation compressibility and reinforcement stiffness on the behaviour of reinforced soil walls", *International Journal of Geotechnical Engineering*, **8**(3), pp. 247-259 (2014).

14. Brinkgreve, R.B.J. and Vermeer, P.A. "PLAXIS: finite element code for soil and rock analyses", Version 8, CRC Press/Balkema, Leiden, Netherlands (2002).

15. Guler, E., Hamderi, M. and Demirkan, M.M. "Numerical analysis of reinforced soil-retaining wall structures with cohesive and granular backfills", *Geosynthetics International*, **14**(6), pp. 330-345 (2007).

16. Janbu, N. "Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial test", *Paper Presented at the European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, **1**, pp. 19-25 (1963).