بررسی عملکرد دیوارهای حائل تسلیم‌ناپذیر در مجاورت فونداسیون نواری

مجید یزدان دوست[۱*]، مازیار مومنیان[۲]، محسن صابر ماهانی[۳]

۱- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه قم

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی-واحد علوم و تحقیقات

۳- دانشیار، دانشکدهٔ مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- M.Yazdandoust@Qom.ac.ir

۲- maziyar.momeniyan@aol.com

۳- msabermahani@iust.ac.ir

چکیده:

استفاده از لایه‌های ژئوسنتتیک در زیر فونداسیون به عنوان یک راه حل موثر در بهبود عملکرد آن شناخته می‌شود. با این حال، بدون شناخت تأثیر این لایه‌ها بر عملکرد فونداسیون‌های واقع بر دیوارهای حائل، این راه حل را نمی‌توان به این فونداسیون‌ها تعمیم داد. از این رو، در پژوهش حاضر تلاش شد تا با استفاده از مدلسازی فیزیکی، تأثیر نصب دو نوع لایهٔ ژئوسنتتیکی مختلف با عرض و چیدمان متفاوت در زیر فونداسیون نواری واقع بر دیوارهای حائل تسلیم‌ناپذیر مورد بررسی قرار گیرد. بهبود رفتار فشار-نشست فونداسیون و تبدیلِ بیشتر فشار آن به فشار جانبی وارد بر دیوار به ترتیب به عنوان یکی از مزایا و معایب نصب لایه ژئوسل در زیر فونداسیون‌های واقع بر دیوارهای حائل تسلیم‌ناپذیر شناسایی شد. همچنین، مشخص گردید که $3B_f$ می‌تواند به عنوان یک عرض بهینه برای لایه ژئوسل در زیر فونداسیون نواری واقع بر دیوارهای حائل تسلیم‌ناپذیر جهت کاهش نشست، افزایش ظرفیت باربری و تعدیل فشار افقی وارد بر دیوار در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، مشخص شد که استفاده از یک ورق ژئوگرید در زیر لایه ژئوسل می‌تواند جایگزین مناسبی برای استفاده از لایه دوگانه ژئوسل باشد.

واژگان کلیدی:

دیوار حائل تسلیم‌ناپذیر، ژئوسل، ژئوگرید، فونداسیون نواری، مدل فیزیکی.

* مجید یزدان دوست، استادیار گروه مهندسی عمران-دانشکده فنی و مهندسی- دانشگاه قم.

ایمیل: M.Yazdandoust@Qom.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

ویراستاری نشده

Investigating the performance of non-yielding retaining walls adjacent to strip footing

M. Yazdandoust [*۱], M. Momenian [۲], M. Sabermahani [۳]

۱- Assistant Prof., Department of Civil Engineering, University of Qom, Qom, Iran (corresponding author)

۲- Master's Graduate, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

۳- Associate Prof., School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

Abstract:

Existence of shallow foundations adjacent to retaining walls (RWs) is one of the challenges faced in construction projects such as bridge abutments, urban constructions, development of intra-urban highways. In this situation, it is expected that retaining walls are affected by the adjacent foundations and an additional lateral pressure is applied to them. This additional pressure, like the lateral pressure due to the backfill, is affected by the wall deformability. Therefore, its amount should be determined according to the possibility or impossibility of lateral movement occurrence in RWs. Based on this concept, the retaining walls are classified into two categories: yielding retaining wall (YRW) and non-yielding retaining walls (N-YRWs). A comparison between these two types of retaining walls shows that although the lateral earth pressure acting on YRWs is far less than N-YRWs, more significant lateral displacements should be expected in YRWs. This may disrupt the serviceability of the wall as well as its adjacent foundation. Therefore, in addition to using YRWs as a solution to mitigate the lateral pressure mobilized behind RWs, reinforcing the backfill is another solution whose effectiveness in mitigating the backfill pressure on YRWs has been reported in several studies. The effectiveness of this solution in N-YRWs is still unknown, while the use of reinforcement elements such as geocell and geogrid below foundations is known as an efficient method in improving their behavior. Hence, an experimental study was conducted on the non-yielding retaining walls (N-YRWs) including different arrangements of geosynthetic layers below the strip footing adjacent to them. For this purpose, thirteen reduced-scale N-YRWs were constructed with different arrangements of geocell and geocell-geogrid layers, and then vertically loaded using monotonic loading. Converting more footing pressure into lateral pressure and improving the pressure-settlement behavior of footing were found to be the disadvantage and advantage of installing geocell layer under footing located on N-YRWs, respectively. Moreover, the response of wall models to vertical loading showed that $۳B_f$ can be considered as an optimal width for the geocell layer in non-yielding retaining walls to minimize settlement, maximize bearing capacity, improve subgrade modulus, and prevent excess horizontal pressure on the wall.

Keywords: Non-yielding retaining wall; Geocell; Geogrid; Strip footing; Physical modeling.

۱. مقدمه

براساس دیدگاهِ روش طراحی برمبنای عملکرد، دیوارهای حائل بر حسب امکان و یا عدم امکان وقوع جابجایی به ترتیب به دوگروه دیوارهای‌تسلیم‌پذیر[۱] و تسلیم‌ناپذیر[۲] تقسیم بندی می‌شوند [۱]. در دیوارهای تسلیم ناپذیر به علت عدم امکانِ وقوع جابجایی‌های لازم، مقاومت برشی در تودهٔ خاکریز جهت تشکیل فشارهای مقاوم[۳] و محرک[۴] بطور کافی بسیج نشده و تا حدودی شرایط حالت سکون[۵] در تودهٔ خاک حاکم می‌گردد. این در حالیست که در دیوارهای تسلیم پذیر بعلت امکانِ وقوع جابجایی‌های لازم، فشارهای محرک و مقاوم به ترتیب در پشت و جلوی دیوار بسیج شده و در شرایط محدود توسعه می‌یابند. لذا با توجه به تأثیر متقابلِ نحوهٔ توزیع فشار بر دیوارهای حائل و میزان جابجای‌های بوجود آمده در این دیوارها، رفتار دیوارهای حائل از دیدگاهِ روش طراحی بر مبنای عملکرد بسیار پیچیده خواهد بود.

مقایسه بین این دو نوع دیوار حائل نشان می‌دهد که اگر چه فشار جانبی خاک بر روی دیوارهای تسلیم‌پذیر بسیار کمتر از دیوارهای تسلیم‌ناپذیر است، اما جابجایی‌های جانبی قابل توجه‌تری را در دیوارهای تسلیم‌پذیر باید انتظار داشت. این امر ممکن است قابلیت سرویس‌دهی دیوار و همچنین فونداسیون مجاور آن را مختل نماید. بنابراین، علاوه بر استفاده از دیوارهای تسلیم‌پذیر به عنوان راه حلی برای کاهش فشار جانبی بسیج شده در پشت دیوارهای حائل [۲و۳]، از راه حل‌های دیگری نیز در شرایطی که جابجایی دیوار مجاز نیست استفاده می‌شود، مانند استفاده از مصالح پرکننده سبک در پشت دیوار [۴و۵]، استفاده از کیسه‌های خاک [۶] و نصب ژئوفوم بین دیوار و خاکریز [۷-۹]. تسلیح خاکریز یکی دیگر از این راه‌حل‌ها است که اثربخشی آن در کاهش فشار خاکریز بر روی دیوارهای تسلیم‌پذیر در مطالعات متعددی گزارش شده است [۱۰-۱۳]. در حالی که استفاده از عناصر تسلیح مانند ژئوسل و ژئوگرید در زیر فونداسیون‌ها به عنوان روشی کارآمد در بهبود رفتار آنها شناخته شده است [۱۴-۱۶]، اثربخشی این راه‌حل در مورد فونداسیون‌های مجاور دیوارهای تسلیم‌ناپذیر هنوز ناشناخته است و مطالعات بر روی این دیوارها بدون در نظر گرفتن اثر تسلیح خاکریز صورت گرفته است. مطالعات انجام شده توسط الامام و توقان[۶] [۱۷] و همچنین الامام و همکاران [۱۸] جزء معدود مطالعاتی است که در آن رفتار فونداسیون-های مجاور دیوارهای‌تسلیم‌پذیر مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعات که بدون در نظر گرفتن اثر تسلیح خاکریز صورت گرفته است، مشخص شد که ظرفیت باربری پی و نشست آن با افزایش فاصله پی از دیوار بترتیب افزایش و کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که افزایش زاویه اصطکاک خاک، نقش چشمگیری در کاهش نیروهای جانبی القا شده بر دیوار ایفا می کند.

از آنجا که نقش تسلیحِ خاکریز دیوارهای تسلیم‌ناپذیر و استفاده از مصالح ژئوسنتتیک در زیر فونداسیون‌های مجاور آن بر عملکرد این دیوارها تاکنون مورد مطالعه قرار نگرفته است، در این تحقیق کوشش شد تا با بررسی این نقش، گامی موثر در روشن شدن ابعاد این موضوع برداشته شود. بدین منظور، با بهره‌گیری از مدلِ فیزیکیِ یک دیوار حائل تسلیم‌ناپذیر به همراه یک فونداسیون نواری واقع بر آن، به بررسی تأثیر مسلح سازی خاک زیر فونداسیون مذکور بر عملکرد دیوار حائل پرداخته شد. در این راستا، با استفاده از مدلسازی فیزیکی در شرایط ۱g، تأثیر نوع و چیدمانِ مسلح‌سازی خاک بر عملکرد دیوار حائل تسلیم‌ناپذیر در قالب توزیع فشارهای جانبی وارد بر دیوار و ظرفیت باربری فونداسیون مورد بررسی قرار گرفت.

۲. مدلسازی فیزیکی

۲. ۱. دستگاه بارگذاری سطحی

برای انجام آزمایشات بر روی مدل‌های فیزیکی، از یک دستگاه بارگذاری سطحی با ظرفیت ۴۰ کیلونیوتن استفاده شد. این دستگاه شامل یک جعبه آزمایش به ابعاد ۱/۲ متر (طول) × ۰/۹ متر (ارتفاع) × ۰/۶ متر (عرض) برای ساخت مدل، یک اکچویتور الکترومکانیک جهت اعمال بار قائم و یک قاب صلب برای بارگذاری در نقاط مختلف جعبه می‌باشد. جهت دستیابی به شرایط کرنش صفحه‌ای در مدلها، اصطکاک بین دیواره‌های جانبی جعبه و بدنه مدل با قرار دادن ورقه‌های نازکِ پوشیده شده با گریس به حداقل رسانده می‌شد. علاوه

[۱] Yielding retaining wall (YRW)
[۲] Non-yielding retaining wall (N-YRW)
[۳] Passive
[۴] Active
[۵] At-rest
[۶] El-Emam and Touqan

بر این، برای کاهش تغییر شکل جانبی جعبه آزمایش از دو مهار جانبی متحرک استفاده می‌شد که در طول ساخت مدل و بارگذاری بر روی جعبه نصب و پس از آن برداشته می‌شد. تصویری شماتیک از دستگاه بارگذاری سطحی در شکل ۱ ارائه شده است.

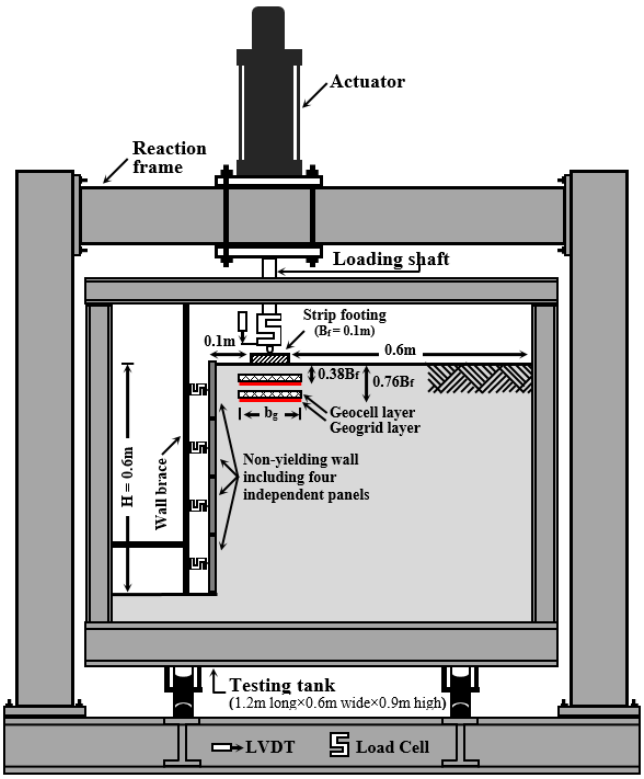
۲. ۲. ضریب مقیاس و هندسه مدل

انتخاب ضریب مقیاس اولین گام در یک مدلسازی فیزیکی می‌باشد که بر اساس ویژگی‌های دستگاه مدلسازی فیزیکی انجام می‌شود. در این تحقیق نیز با توجه به ابعاد دستگاه مدلسازی فیزیکی مورد استفاده و ظرفیت بارگذاری اکچویتور آن، ۱:۱۰ به عنوان ضریب مقیاس جهت شبیه‌سازی مدل‌ها انتخاب شد.

هندسه دیوار (ارتفاع) یکی از پارامتر تأثیرگذار بر عملکرد دیوارهای حائل می‌باشد. بررسی پروژهای راهسازی نشان می‌دهد که با توجه به کاربرد دیوارهای حائل، ارتفاع آن‌ها بین ۴ تا ۸ متر متغیر می‌باشد. لذا یک دیوار به ارتفاع ۶ متر می تواند نمایندهٔ مناسبی برای دیوارهای حائل تسلیم‌ناپذیر باشد. بر اساس این ارتفاع و ضریب مقیاس انتخاب شده، ارتفاع مدلها برابر با ۰/۶ متر انتخاب شد. عرض فونداسیون و فاصله قرارگیری آن تا تاج دیوار، دو ثابت دیگری است که در این پژوهش برابر با ۱۰ سانتیمتر درنظر گرفته شد. با انتخاب این دو ثابت، فاصله بوجود آمده بین لبهٔ فونداسیون و مرزهای صلب جعبه آزمایش، معیار ارائه شده توسط دش و بورا[۱] جهت کاهش اثرات مرزهای صلب بر رفتار فونداسیون را ارضاء نمود [۱۹]. در این معیار، حداقل فاصله بین لبهٔ فونداسیون و مرزهای صلب جهت کاهش اثرات مرزی ۲ تا ۲/۵ برابر عرض فونداسیون توصیه شده است.

۲. ۳. اجزاء مدل

انتخاب اجزاء مدلِ یک سازه اولین و مهمترین گام در مدلسازیِ فیزیکیِ آن بشمار می‌رود. این گام که در مدل‌های آزمایشگاهیِ کوچک مقیاس که با فرایند کوچک سازیِ[۲] اجزاء نیز همراه می‌باشد، نقش چشمگیری در کیفیت مدلسازی بازی می‌نماید بگونه‌ای که می‌توان آن را عاملِ اصلیِ توانایی مدل‌های آزمایشگاهی در پیش بینی رفتار مدل‌های واقعی دانست [۲۰]. بنابراین ضروری است که این گام بطور ویژه مورد توجه قرار گیرد.



شکل ۱: شکل شماتیک از دستگاه بارگذاری سطحی، مدل دیوار، چیدمان لایه‌های تسلیح و ابزارگذاری‌ها

Fig. ۱: Schematic view of the loading apparatus, wall model, arrangement of reinforcement layers and instrumentations.

بمنظور انجام هر چه بهتر این گام، شناختِ رفتارِ اجزاء مدل واقعی بمنظور انتخاب پارامترهای تأثیرگذار بر رفتارِ اجزاء به عنوان معیارهای انتخابِ اجزاء مدل آزمایشگاهی الزامی است [۲۰]. این امر با انجام یکسری آزمایش هدفمند بر روی اجزاء مدل واقعی و مدل آزمایشگاهی تحقق می‌یابد. در خصوص مدل‌های کوچک مقیاس، قوانین تشابه[۳] پل ارتباطی بین اجزاء مدل واقعی و مدل آزمایشگاهی می‌باشند. به بیان دیگر، اجزاء یک مدل آزمایشگاهیِ کوچک مقیاس می‌بایستی بگونه‌ای انتخاب شوند که رفتاری مشابه با آنچه قوانین تشابه بر اساس رفتار اجزاء مدلِ واقعی پیش بینی می‌نماید، از خود نشان دهند[۲۰]. از آنجا که در خلال این فرایند، رفتار اجزاء مدل واقعی نمی‌تواند بطور کامل شبیه‌سازی شود، معیارهای به عنوان نماینده انتخاب می‌شوند. در خصوص المان‌های تسلیح در مدل‌های

[۱] Dash and Bora

[۲] Scale down

[۳] similitude rules

خاک مسلح، مقاومت بیرون کشیدگی[۱] و سختی کششی[۲] به عنوان دو معیار جهت انتخاب المان تسلیح در مدلهای آزمایشگاهی معرفی شده‌اند [۲۱و۲۲]. علاوه بر این دو معیار، یوشیدا و تاتسوکا[۳] نشان دادند که برای المان‌های ژئوگرید، نسبت ابعاد چشمه ژئوگرید به اندازه متوسط دانه‌های خاک (D_{50}) نیز می‌تواند به عنوان یک معیار مجزا جهت انتخاب هندسهٔ ژئوگرید در مدلهای کوچک مقیاس در نظر گرفته شود [۲۳]. در مورد انتخاب مصالح خاکی نیز، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی به عنوان معیارهای اصلی و مدول سکانتی به عنوان معیار فرعی توسط وود[۴] معرفی شدند [۲۰]. مطالعات نشان داده است که در نظر گرفتن این ۵ معیار به همراه روابط تشابه حاکم بر آنها و انجام آزمایش‌های مرتبط با آنها بر روی اجزاء مدل واقعی و کوچک مقیاس می‌تواند منجر به یک فرایند تشابه مناسب گردد [۲۴-۲۷].

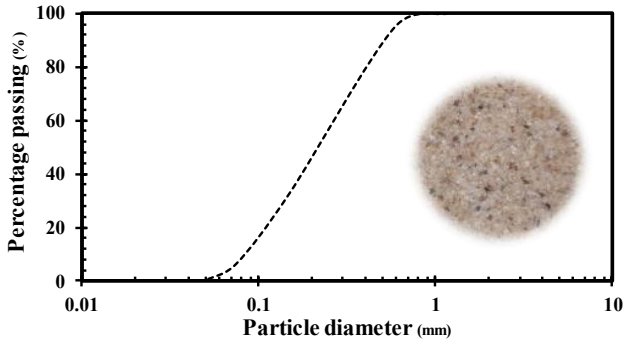
۲.۳.۱. مصالح خاکی

با توجه به توصیهٔ دستورالعمل FHWA مبنی بر استفاده از خاک دانه‌ای در خاکریز دیوارهای حائل و همچنین عدم استفاده از خاک با دانسیته بالا هنگام استفاده از ژئوسل، از ماسه فیروزکوه با چگالی ذارت ۲/۶۶ و دانسیته نسبی ۶۵ درصد به عنوان مصالح خاکی جهت ساخت خاکریز مدلها استفاده شد و کوشش شد تا با انجام یکسری آزمایش سه محوری، پارامترهای مقاومتی آن در این دانسیته تعیین گردد. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی و منحنی دانه بندی این خاک بترتیب در جدول ۱ و شکل ۲ ارائه شده است.

جدول۱: مشخصات خاک مورد استفاده در مدلهای فیزیکی

Table ۱. Properties of soil used in physical models

Physical parameters	Value	Shear strength	Value
Maximum void ratio, [-]	۰,۷۸۶	Cohesion, [kPa]	٤
Minimum void ratio, [-]	۰,۵۷۱	Peak friction angle, [°]	٤۱-
Medium grain size, [mm]	۰,۲۱۳	Ulti. friction angle, [°]	۳۷-
Uniformity Coefficient, [-]	۲,٦٥٥	Dilation angle, [°]	٥-۷
Curvature Coefficient, [-]	۱,۱٤۷	Secant modulus [MPa]	۱,۰-



شکل ۲: منحنی دانه بندی خاک

Fig. ۲: The grain size distribution of soil.

۲.۳.۲. المانهای تسلیح

از ژئوسل و ژئوگرید جهت تسلیح مدلها استفاده شد. بمنظور شبیه سازیِ این دو المان تسلیح در مقیاس ۱:۱۰، در وهلهٔ اول، سختی کششی و ظرفیت بیرون کشیدگیِ یک ژئوگرید واقعی با استفاده از آزمایشات مربوطه تعیین شد. در ادامه تلاش شده تا با انجام این آزمایشات بر روی المانهای کوچک مقیاس با جنس، سطح ظاهری و هندسهٔ مختلف، المانی انتخاب شود که سختی و ظرفیت بیرون کشیدگی آن معیارهایِ تشابه را ارضاء نماید. در این راستا، یک مش از جنس پلی‌پروپیلن با ابعاد چشمهٔ ۷/۵×۷/۵ میلیمتر توانست هم معیار سختی کششی و هم ظرفیت بیرون کشیدگی را ارضاء نماید. در انتخاب ابعاد چشمهٔ ژئوگریدِ مدل، معیار یوشیدا و تاتسوکا نیز در نظر گرفته شد. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی ژئوگرید در مقیاس واقعی و مدل در جدول ۲ ارائه شده است.

بمنظور انتخاب المان ژئوسل در مقیاس ۱:۱۰، ابعاد چشمه، مقاومت کششی نوارها و همچنین مقاومت اتصال نوارها به یکدیگر به معنوان ۳ معیار اصلی انتخاب شد. از اینرو، ابتدا با انجام یکسری آزمایش کشش بر روی ژئوسل واقعی و سپس بر روی نوارهایی با جنس مختلف تلاش شد تا نوارهایی جهت ساخت مدل ژئوسل انتخاب شود که معیار مقاومت کششی را بر اساس روابط مقیاس موجود ارضاء نمایند. پس از انتخاب نوار مناسب جهت ساخت ژئوسل کوچک مقیاس، با انجام یکسری آزمایش کشش بر روی اتصال نوارهای ژئوسل واقعی، تلاش شد تا نحوه اتصال نوارها در ژئوسل مدل بگونه‌ای انتخاب شوند که روابط مقیاس مربوطه را ارضاء نمایند. نتایج آزمایش‌های

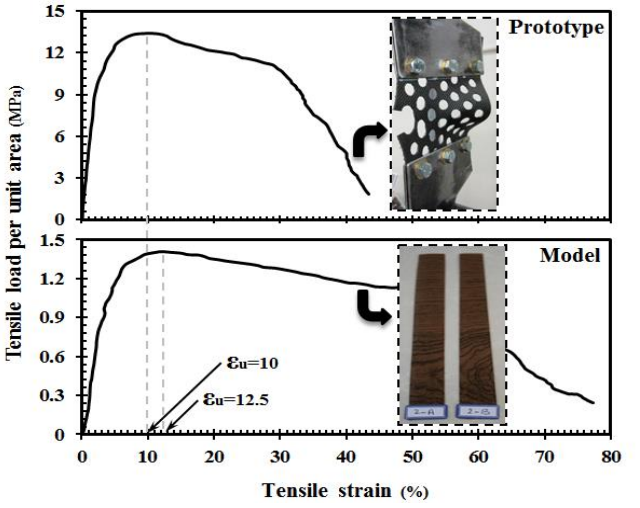
[۱] Pull-out resistance
[۲] Tensile stiffness
[۳] Yoshida and Tatsuoka
[۴] Wood

کشش نشان داد که نوارهای پلاستیکی به عرض ۱۲/۵ و ضخامت ۰/۳ میلی‌متر که بوسیله نخ پلی‌استر با گامهای ۰/۵ میلی‌متر به هم دوخته شوند می‌توانند جهت شبیه‌سازی دیوارها و اتصالات در ژئوسل‌های مدل در مقیاس ۱:۱۰ استفاده شوند. نتایج مربوط به آزمایش کشش بر روی نوار و اتصال بین نوارها در ژئوسل واقعی و مدل کوچک مقیاس بترتیب در اشکال ۳ و ۴ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. پارامترهای ژئوگرید در مقیاس واقعی و مدل

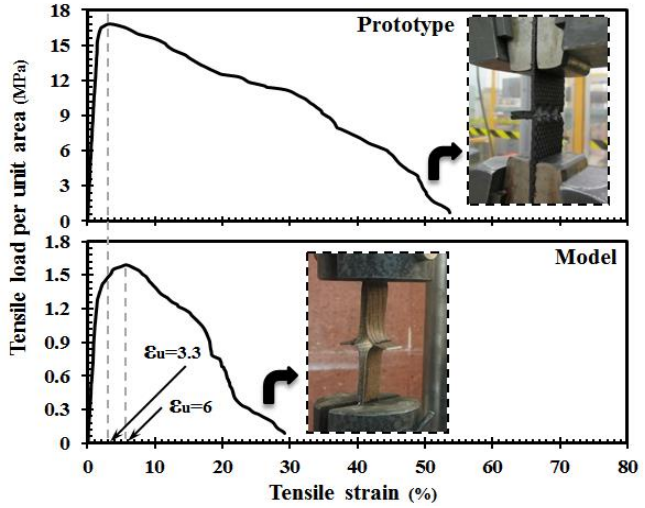
Table ۲. Properties of reinforcement element

Index properties	Real scale	Reduced scale
Material	PVC coated polyester	Polypropylene
Thickness [mm]	۲,۰۰	۰,۹۰
Longitudinal and transverse rib width, b_l, b_t [mm]	۱۱, ۲,۵	۰,۹۰, ۰,۶
Longitudinal and transverse opening size, $s_l \times s_t$ [mm]	۲۵×۳۵	۷,۵×۷,۵
Elongation at ultimate tensile load, ε_u [%]	۶,۰۸	۶,۲۸
Secant tensile stiffness per unit wall width at ε_u, J [kN/m]	۲۰۱۸,۱	۱۹,۵۶
Pullout resistance under, P_R [kN/m/m]	۱۵۵,۸۵	۱۴,۷۵



شکل ۳: نتایج آزمایشات کشش نوارهای ژئوسل در مقیاس واقعی و مدل

Fig. ۳: The results of tensile tests on real and reduced-scale geocell wall



شکل ۴: نتایج آزمایشات کشش اتصال نوارهای ژئوسل در مقیاس واقعی و مدل

Fig. ٤: The results of tensile tests on real and reduced-scale geocell junction

۲. ۳. ۳. دیوار تسلیم‌ناپذیر

به منظور شبیه سازی یک دیوار تسلیم‌ناپذیر، از یک دیوار ۰/۶ متری که شامل چهار پانل افقی مستقل بود استفاده می شود. همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، هر یک از این چهار پنل بواسطه یک جفت نیرو سنج به یک ستون صلب متصل و ستون نیز بوسیله یک تیر صلب به جعبه آزمایش متصل می‌شدند. با این روش، علاوه بر تأمین صلبیت دیوار، امکان اندازه گیری فشار جانبی بر دیوار در ارتفاع‌های ۰ تا ۱۵ سانتیمتر، ۱۵ تا ۳۰ سانتیمتر، ۳۰ تا ۴۵ سانتیمتر و ۴۵ تا ۶۰ سانتیمتر فراهم می‌شد.

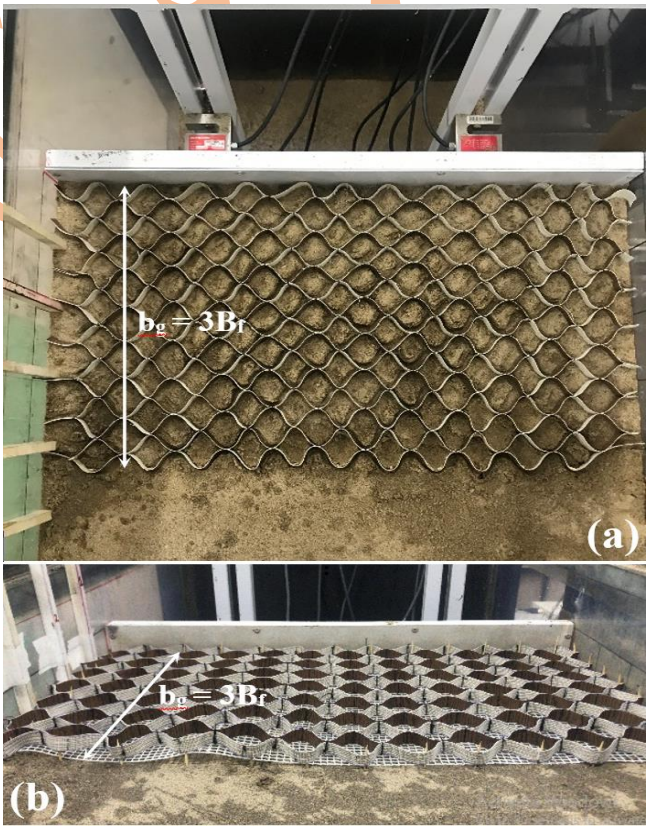
شکل ۵: نمای داخلی و بیرونی از دیوار تسلیم‌ناپذیر کوچک مقیاس

Fig. ٥: Interior and exterior view of a small-scale non-yielding wall

۲. ۴. چیدمان المان‌های تسلیح

عرض (b_g)، ارتفاع (H_g)، تعداد (N_g) و فاصله عمودی بین لایه‌های ژئوسل (h) و همچنین عمق قرارگیری اولین لایهٔ ژئوسل

(u)، پنج پارامتر اصلی در انتخاب چیدمان لایه‌های ژئوسل می‌باشند [۲۸و۲۹] که بر اساس درجه اهمیت این پارامترها، b_g و N_g به عنوان متغیر و H_g، h و u به عنوان ثوابت در مطالعه حاضر انتخاب شدند. با توجه به محدوده توصیه شده توسط دَش[۱] به عنوان عرض بهینه لایهٔ ژئوسل ($B_f<b_g<3B_f$) و همچنین تأثیر ناچیز استفاده از بیش از دو لایه ژئوسل در بهبود رفتار پایه [۳۰و۳۱]، شش چیدمان مختلف ژئوسل برای تقویت خاکریز استفاده شد. این چیدمان‌ها شامل ۳ عرض مختلف ژئوسل در ردیف‌های ۱ لایه‌ای و ۲ لایه‌ای بود. همچنین، عمق قرارگیری لایه اول ژئوسل و فاصله عمودی بین لایه‌ها که جزء ثوابت تحقیق بود، بر اساس توصیه دَش برابر با $0.23B_f$ انتخاب شد (مطابق شکل ۱) [۳۰]. تصویری از لایه ژئوسل فوقانی در مدلی با دو لایه ژئوسل به عرضی برابر با $3B_f$ در شکل ۶-الف نشان داده شده است.



شکل ۶: نمای از: الف) لایه ژئوسل؛ ب) لایه ژئوسل-ژئوگرید

Fig. ٦: View of: a) Geocell layer; b) Geocell-geogrid layer

[۱] Dash

بمنظور بررسی تأثیر استفادهٔ ترکیبیِ ژئوسل و ژئوگرید، از یک ورق ژئوگرید در زیر لایه ژئوسل استفاده شد. این ترکیب ژئوسل-ژئوگرید نیز در ۶ چیدمان مشابه چیدمان‌های ژئوسل در مدلهای دیوار استفاده شد. تصویری از لایه ژئوسل-ژئوگرید به عرضی برابر با $3B_f$ در شکل ۶-ب نشان داده شده است. علاوه بر این دوازده مدل، از یک مدل دیوار بدون هیچ گونه المان تسلیح نیز به عنوان مدل مرجع استفاده شد. مشخصات مدل‌های دیوار در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات مدل‌های دیوار

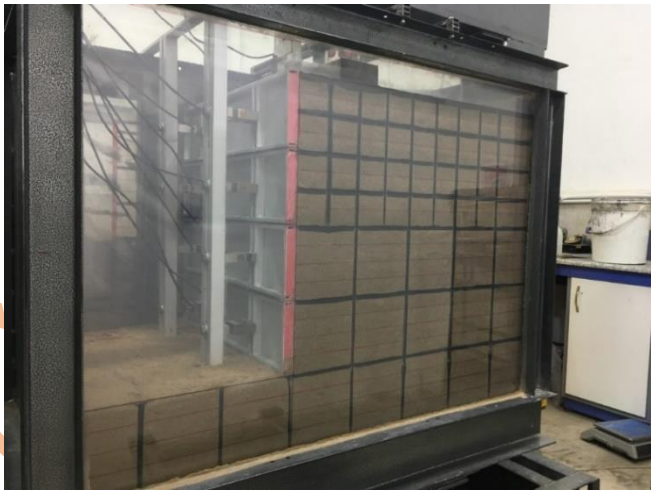
Table ٣. Summary of model configurations.

Model	Type of reinforcement layer	Number of reinforcement layer (Ng)	Wide of reinforcement layer (bg)
Unreinforced	----	----	----
G-١L-Bf	Geocell	١	Bf
G-١L-٢Bf	Geocell	١	٢Bf
G-١L-٣Bf	Geocell	١	٣Bf
G+G-١L-Bf	Geocell+Geogrid	١	Bf
G+G-١L-٢Bf	Geocell+Geogrid	١	٢Bf
G+G-١L-٣Bf	Geocell+Geogrid	١	٣Bf
G-٢L-Bf	Geocell	٢	Bf
G-٢L-٢Bf	Geocell	٢	٢Bf
G-٢L-٣Bf	Geocell	٢	٣Bf
G+G-٢L-Bf	Geocell+Geogrid	٢	Bf
G+G-٢L-٢Bf	Geocell+Geogrid	٢	٢Bf
G+G-٢L-٣Bf	Geocell+Geogrid	٢	٣Bf

۲. ۵. ساخت مدل و بارگذاری

فرایند ساخت هر مدل با اجرای یک پی به ضخامت ۱۵ سانتیمتر به روش کوبش مرطوب و کنترل حجم آغاز می‌شد. ضخامت این ناحیه، که امکان وقوع نشستهای احتمالی را مانند واقعیت برای مدلها فراهم می‌نمود، با ساخت یک مدل عددی در نرم‌افزار Plaxis ٢D و انجام یک سری آنالیز حساسیت تعیین شد. پس از اتمام ساخت پیِ مدل، فرایند ساخت بدنه مدل بصورت لایه لایه آغاز و تا رسیدن به تراز لایهٔ تسلیح ادامه می‌یافت. پس از رسیدن به تراز مورد نظر و نصب لایهٔ المان تسلیح، فرایند ساخت بدنه مدل تا تکمیل آن ادامه

می‌یافت. همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، فرایند نصب لایه‌های ژئوگرید و ژئوسل در مدلها مطابق با پروسهٔ نصب آنها در مقیاس واقعی دنبال شد. این پروسه متشکل از گستردن لایه‌های ژئوگرید و ژئوسل بر روی خاک در تراز ارتفاعی مورد نظر، ثابت نمودن آنها با میله های چوبی کوچک و تراکم خاک بر روی لایه‌ها بود. نمایی از یک مدل تکمیل شده در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۷: نمایی از یک مدل تکمیل شده

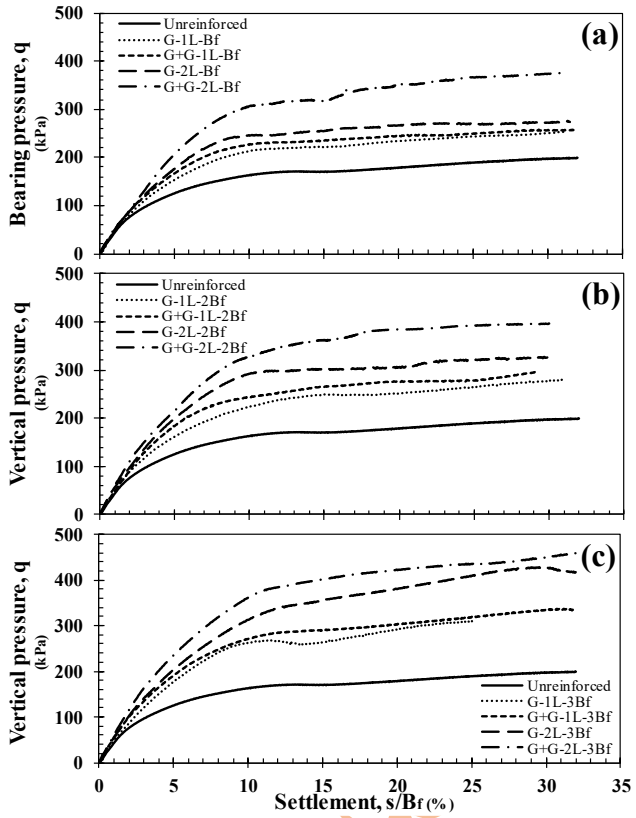
Fig. ۷: View of a completed model

پس از تکمیل فرایند ساخت مدلها، بارگذاری مدلها با قرار دادن یک نوار فلزی به عرض ۱۰ سانتیمتر و ضخامت ۵ سانتیمتر بر روی خاکریز به فاصل ۱۰ سانتیمتر از تاج دیوار انجام می‌شد. بار قائم از طریق این نوار فلزی که معادل یک فونداسیون صلب واقعی به عرض ۱ متر بود، با نرخ ۶ mm/min تا رسیدن به گسیختگی به مدلها اعمال و پاسخ آنها در قالب رفتار فشار-نشست فونداسیون و توزیع فشار جانبی روی دیوار ثبت شد. این سرعت به عنوان یک سرعت متداول جهت بارگذاری مونوتونیک در خاکهای دانه‌ای غیر اشباع مطرح می‌باشد [۱۸]. از آنجا که در مدلهای کرنش مسطح[۱]، بارگذاری می‌بایستی در امتداد صفحهٔ اول و دوم و در وسط عرض مدل صورت گیرد تا از تغییر شکل و دوران در بعد سوم (عرض مدل) اجتناب گردد، تلاش شد تا با تعیین دقیق مرکز فونداسیون جهت بارگذاری و مقایسهٔ نشست‌های مرکز و لبه‌های آن حین بارگذاری، این اصل مهم رعایت گردد. بمنظور ثبت جابجایی قائم فونداسیون، از یک جابجایی سنج مطابق شکل ۱ در وسط عرض مدل فونداسیون استفاده می‌شد.

۳. نتایج و بحث

۳. ۱. رفتار فشار-نشست

بمنظور بررسی تأثیر نوع و چیدمان اِلمان‌های تسلیح بر رفتار فشار-نشست فونداسیون نواری واقع بر دیوار حائل تسلیم‌ناپذیر، نمودارهای فشار-نشست بدست آمده در شکل ۸ ارائه شده‌اند.



شکل ۸: نمودار فشار-نشست مدلها

Fig. ۸: Pressure-settlement curve of models

همانطور که در منحنی‌های $q\text{-}s/B_f$ مشاهده می‌شود، استفاده از لایه تسلیح در زیر فونداسیون نواری باعث بهبود رفتار فشار-نشست می‌شود. این بهبود که به صورت کاهش مقادیر نشست در یک سطح فشار اعمال شدهٔ معین نمایان بود، به سه عامل عرض، تعداد و نوع لایه تسلیح بستگی داشت. به منظور تعیین دقیق تأثیر این عوامل، بهبود مدول تغییر شکل مدل ها از طریق یک پارامتر بی بعد (موسوم به فاکتور بهبود مدول (IM) به شرح زیر تعیین شد:

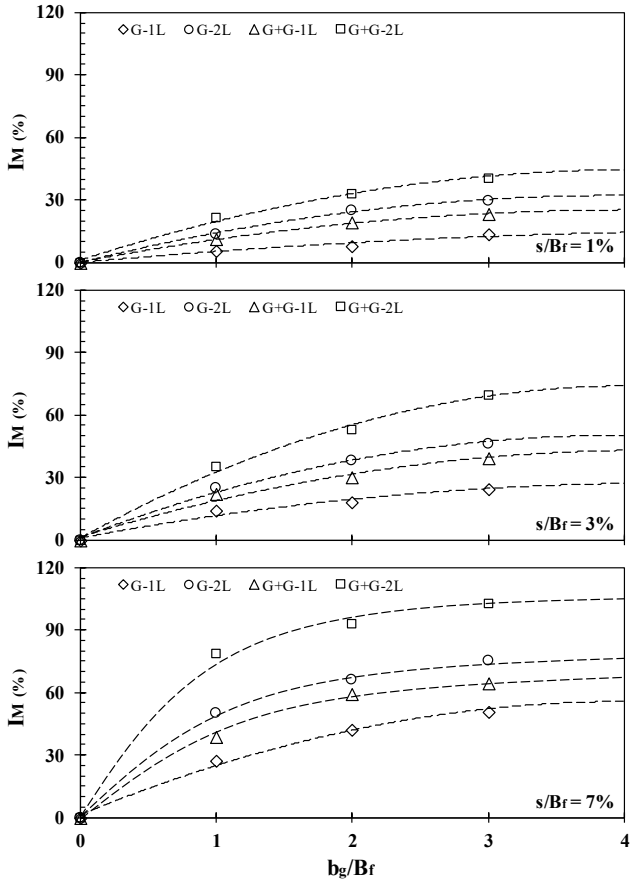
[۱] plane strain

$$IM = \frac{M_{S(\text{Reinforced model})} - M_{S(\text{Unreinforced model})}}{M_{S(\text{Unreinforced model})}} \times 100 \qquad (۱)$$

که در آن M_S مدول بستر در سطح نشست معین است و با تقسیم فشار فونداسیون بر نشست معادل آن محاسبه می شود. با توجه به معادله ۱، مقادیر IM در سه نشست مختلف برای مدل‌های دیوار مسلح‌شده محاسبه شد و روند تغییرات آنها در برابر عرض لایه تسلیح (b_g) در شکل ۹ ارائه شده است. وابستگی بهبود مدول بستر به سطح نشست و بهبود ناچیز آن در نشست های کم اولین نکته ای است که در شکل ۹ توجه را به خود جلب می‌نماید. این موضوع که به دلیل نیاز به حرکت نسبی ذرات خاک در داخل پاکت های ژئوسل برای تشکیل فشار محدود کننده اضافی و افزایش مقاومت برشی است، نشان دهنده مشارکت ناچیز لایه ژئوسل در بهبود ظرفیت باربری در محدوده نشست های مجاز است و می‌تواند به عنوان نقطه ضعف ژئوسل ها در نظر گرفته شود. همچنین مشاهده شد که افزایش عرض و تعداد لایه ژئوسل و همچنین استفاده از ژئوگرید در زیر لایه ژئوسل می تواند مشارکت ژئوسل را در بهبود ظرفیت باربری افزایش داده و این ضعف را جبران نماید. همانطور که برای نشست ۱٪ مشاهده شد، افزایش عرض لایه ژئوسل از B_f به $3B_f$ و افزایش تعداد لایه ها از ۱ به ۲ منجر به یک افزایش ۱۲۰ درصدی در مدول بستر شد، در حالی که استفاده از ورق ژئوگرید در زیر یک و دو لایه ژئوسل به ترتیب باعث افزایش ۹۵ و ۲۸۰ درصدی در IM شد. این روند، که همچنان در نشست‌های بیشتر نیز صادق بود، به این معنی است که افزایش عرض لایه ژئوسل راه‌حل مؤثرتری نسبت به افزودن ورق ژئوگرید هنگام استفاده از یک لایه تقویت‌کننده است. همچنین به این معنی است که افزایش تعداد لایه ژئوسل موثرتر از استفاده از یک لایه ژئوسل-ژئوگرید است. بنابراین توجه به اثر تقریباً یکسان افزایش عرض و تعداد لایه ها بر بهبود مدول بستر و همچنین حجم کمتر ژئوسل مورد نیاز هنگام استفاده از دو لایه با عرض B_f نسبت به یک لایه با عرض $3B_f$، می توان نتیجه گرفت که افزایش تعداد لایه ژئوسل تا ۲ لایه راه حل مقرون به صرفه تری است.

کاهش نرخ رشد فاکتور بهبود مدول در مقابل عرض لایه ژئوسل و رسیدن به یک مقدار ثابت در b_g/B_f بزرگتر از ۳ در تمام آرایش‌های المانهای تسلیح، نکته دیگری بود که در شکل ۹ مشاهده می شود.

این روند که توسط دَش و همکاران نیز گزارش شده است [۳۰]، به این معنی است که استفاده از لایه‌های ژئوسل عریض تر از سه برابر عرض پی در کاهش نشست فونداسیون واقع بر دیوارهای حائل تسلیم‌ناپذیر ناکارآمد خواهد بود. بنابراین، $3B_f$ را می‌توان به عنوان یک عرض بهینه برای لایه های ژئوسل در دیوارهای حائل تسلیم‌ناپذیر تحت بار ناشی از فونداسیون نواری برای به حداقل رساندن نشست معرفی نمود.

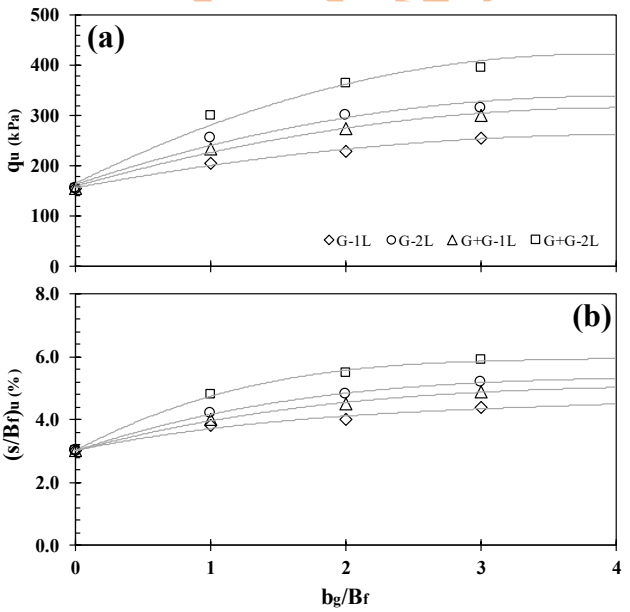


شکل ۹: تغییرات مدول بهبود بستر در مقابل عرض لایه تسلیح در سه نشست مختلف

Fig. ۹: Variation of modulus improvement factor versus reinforcement layer width in different settlements.

همانطور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، علیرغم استفاده از یک خاک با دانسیته نسبی متوسط در خاکریز دیوارها، رفتار فشار-نشست فونداسیون‌های نواری واقع بر دیوارهای مسلح نشده از رفتار سخت‌شونده تبعیت می‌کنند. این رفتار را می‌توان به تغییرشکل ناپذیری دیوار و ایجاد شرایط غیرفعال در ناحیه بین لبه فونداسیون و

تاج دیوار نسبت داد. در این نوع رفتار که در تمامی مدل‌های دیوار تقویت‌شده نیز مشاهده شد، فشار بسیج شده در زیر فونداسیون به صورت غیرخطی با نشست افزایش یافت و سپس کاهشی در نرخ رشد آن در محدوده‌ای از نشست ظاهر شد و پس از آن نرخ رشد ثابت ماند. بنابراین برای این نوع رفتار، ظرفیت باربری نهایی (q_u) مشخصی قابل تعریف نیست. در این شرایط مقدار q_u را می‌توان از تقاطع دو خط مماس ترسیم شده در امتداد بخش اولیه و آخر منحنی تعیین نمود [۳۲و۳۳]. بر اساس این روش، مقدار q_u و نشست معادل آن $(s/B_f)_u$ برای همه مدل‌های دیوار تعیین شد و تغییرات آنها در برابر عرض لایه ژئوسل در شکل ۱۰ ارائه شده است.



شکل ۱۰: تغییرات ظرفیت باربری و نشست نظیر آن در مقابل عرض لایه تسلیح

Fig. ۱۰: Variation of modulus improvement factor versus reinforcement layer width in different settlements.

با مقایسه q_u-b_g/B_f و $(s/B_f)_u$-b_g/B_f مدل‌ها با آرایش‌های مختلف المان تسلیح، مشخص شد که هنگام افزایش عرض لایه ژئوسل، تعداد لایه و استفاده از ورق ژئوگرید زیر لایه ژئوسل، علاوه بر افزایش مقدار q_u، مقدار $(s/B_f)_u$ نیز افزایش می یابد. اگر چه افزایش مقدار q_u یک مزیت است، اما افزایش نشست مورد نیاز برای رسیدن به آن می‌تواند یک نقطه ضعف باشد زیرا در صورتی که $(s/B_f)_u$ خارج از محدوده نشست‌های مجاز باشد، ظرفیت باربری نهایی در طراحی فونداسیون مجاز نیست. این نکته باید در هنگام انتخاب آرایش و عرض المانهای تسلیح در دیوارهای حائل تسلیم-ناپذیر مورد توجه قرار گیرد. این موضوع با توجه به نرخ رشد بالاتر $(s/B_f)_u$ در مقایسه با q_u باید در مدل‌های دارای دو لایه ژئوسل بیشتر مورد توجه قرار گیرد. با توجه به افزایش نرخ رشد $(s/B_f)_u$ در مقابل عرض لایه ژئوسل هنگام افزایش تعداد لایه ژئوسل، ظرفیت باربری نهایی و نشست متناظر آن در دیوارهای حائل تسلیم‌ناپذیر با بیش از یک لایه ژئوسل باید به طور همزمان در نظر گرفته شود. از سوی دیگر، کاهش نرخ رشد q_u و $(s/B_f)_u$ در مقابل عرض لایه ژئوسل و رسیدن به یک مقدار ثابت در عرض بزرگتر از ۳ برابرِ عرض فونداسیون در تمام آرایش‌های المان‌های تسلیح، نشان می دهد که $3B_f$ می تواند به عنوان عرض بهینه برای لایه‌های ژئوسل جهت به حداکثر رساندن ظرفیت باربری در دیوارهای حائل تسلیم‌ناپذیر در نظر گرفته شود.

۳. ۲. توزیع فشار جانبی بر روی دیوار

تعیین توزیع فشار جانبی بر روی دیوارهای حائل مجاور فونداسیون، گام اصلی در طراحی این سازه ها می باشد. وابستگی توزیع فشار جانبی به عوامل متعددی از جمله هندسه و انعطاف پذیری دیوار، نوع و محل فونداسیون، ویژگی های ژئوتکنیکی و زمین شناسی خاکریز و ...، مانع از ارائه یک معادله جامع برای برآورد آن شده است. در حال حاضر معادلاتی وجود دارد که با در نظر گرفتن برخی از این عوامل پیشنهاد شده است. اکثر این معادلات بر اساس راه حل های کلاسیک بوسینسک و با فرض رفتار الاستیک خطی خاک توسعه یافته اند. معادله جارکیو[۱] یکی از رایج ترین این معادلات به شرح زیر است [۳۴]:

$$(\Delta\sigma_h)=\frac{q}{\pi}[\beta-\sin\beta.\cos(2\alpha)] \qquad (۲)$$

که در آن q نیز فشار قائم فونداسیون می‌باشد. همچنین، همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است، α و β نیز زوایایی هستند که بر اساس موقعیت فونداسیون نسبت به دیوار تعیین می شوند. پس از ارائه نظریه فشار فعال رانکین، معادلات فشار جانبی ناشی از فونداسیون نیز توسعه یافت و نسل جدیدی از معادلات با فرض رفتار

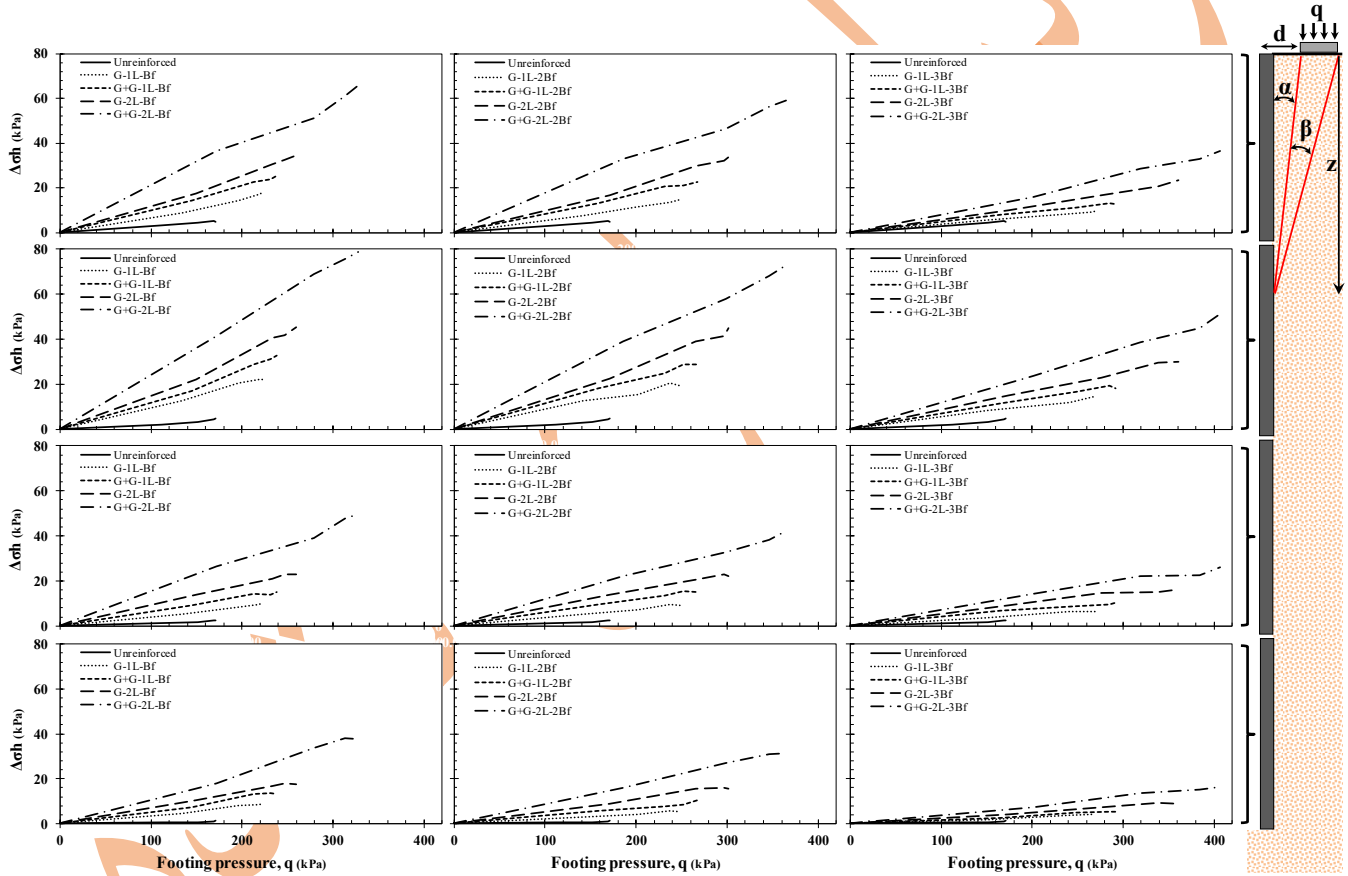
[۱] Jarquio

پلاستیک کامل خاک ارائه شد. معادله ارائه شده توسط FHWA یکی از رایج ترین این معادلات است که به شرح زیر تعریف می‌شود [۴۶]:

$$(\Delta\sigma_h)_z = \frac{k_a q B_f}{D_1}; \begin{cases} D_1 = B_f + z; z \le z' \\ D_1 = \frac{B_f + z}{2} + d; z > z' \end{cases}; z' = 2(d - \frac{B_f}{2}) \quad (۳)$$

که در آن d فاصله تاج دیوار تا لبه فونداسیون و k_a ضریب فشار جانبی فعال خاک است. علیرغم آنکه استفاده از عناصر تسلیح در زیر فونداسیون که معمولاً برای بهبود عملکرد آن استفاده می شود، می‌تواند از عوامل مؤثر بر فشار جانبی باشد، تاثیر آن در معادلات موجود تأثیر آن در نظر گرفته نشده است. بنابراین ارزیابی تاثیر این عامل بر فشار جانبی القا شده بر دیوارهای حائل تسلیم‌ناپذیر و همچنین سنجش اثربخشی معادلات موجود در این زمینه ضروری است.

به منظور بررسی پاسخ فشار جانبی به بارگذاری فونداسیون، تغییر $\Delta\sigma_h$ در مقابل q در چهار ردهٔ ارتفاعی مختلف مدل‌های دیوار در شکل ۱۱ ارائه شده است.



شکل ۱۱: تغییرات فشار افقی در مقابل فشار فونداسیون در ارتفاعات مختلف دیوار.

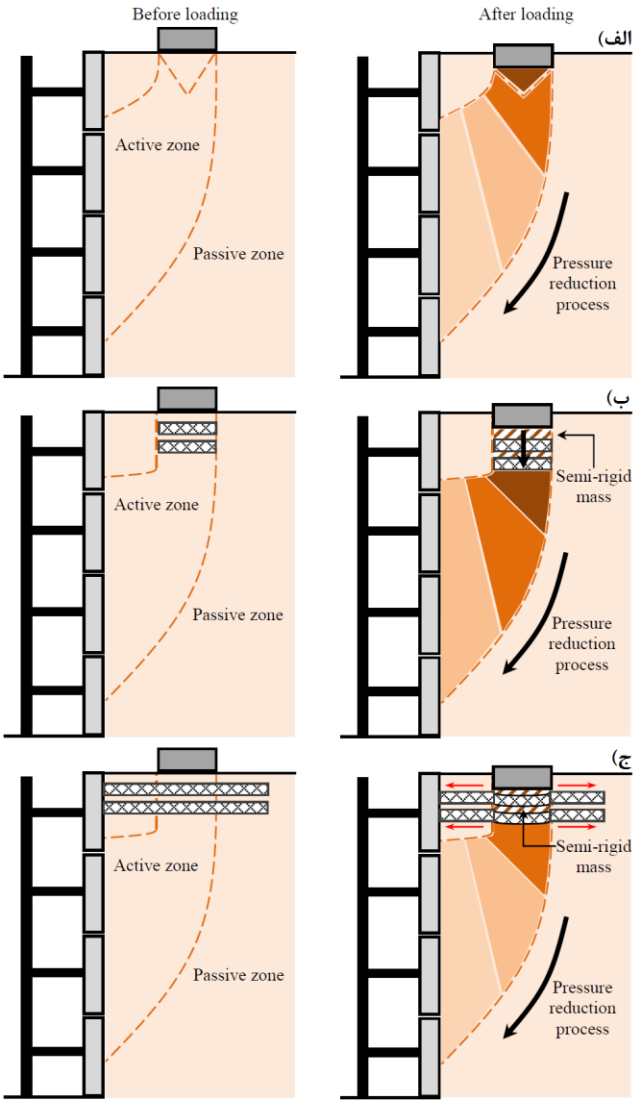
Fig. ۱۱: Variation of excess horizontal pressure versus footing pressure at different wall elevations.

اولین و مهم‌ترین یافته بدست آمده از نمودارهای $\Delta\sigma_h$–q، که می توان آن را از معایب اساسی تسلیح خاک در نظر گرفت، افزایش فشار جانبی به دلیل استفاده از عناصر تسلیح در زیر فونداسیون است. این افزایش که با افزایش تعداد لایه ژئوسل و افزودن ورق ژئوگرید در زیر ژئوسل برجسته‌تر نیز شد، می‌تواند به توزیع فشار فونداسیون در یک منطقه وسیع‌تر هنگام نصب لایه تقویت‌کننده زیر آن نسبت داده شود. با توجه به تراکم متوسط خاکریز در مدل دیوار غیرمسلح، فشار فونداسیون در ناحیه کوچکی زیر فونداسیون پخش شد و بخش عمده آن صرف حرکت ذرات خاک و انجام کارهای پلاستیک شد. بنابراین، همانطور که در شکل ۱۲-الف نشان داده شده است، اثر کوچکتری از

فشار فونداسیون به شکل فشار افقی به دیوار رسید. با تعبیه عرض محدود ژئوسل در زیر فونداسیون ($b_g=B_f$)، تمایل ذرات خاک در این ناحیه به حرکت کاهش یافته و فشار کمتری به کار پلاستیک تبدیل می‌شود. این باعث توزیع گسترده تر تنش عمودی و رسیدن بخش بزرگتری از آن به دیوار شد. افزایش تعداد لایه های ژئوسل و افزودن ورقه ژئوگرید این مکانیسم را تشدید کرد زیرا باعث جلوگیری بیشتر از جابجایی ذرات خاک و در نتیجه تبدیل کمتر فشار فونداسیون به کار پلاستیک شد. در این وضعیت، توده تقویت شده توسط فشار فونداسیون مشابه یک توده نیمه صلب به پایین رانده و باعث اعمال فشار به دیوار شد (شکل ۱۱-ب). همانطور که در شکل ۱۲-ج نشان داده شده است، با افزایش عرض لایه ژئوسل، بخش‌هایی از آن که در ناحیه غیرفعال قرار گرفتند در برابر رانده شدن توده نیمه صلب به پایین مقاومت کرده و انتقال فشار به دیوار را کاهش دادند. افزایش ظرفیت خمشی لایه ژئوسل به دلیل افزودن ورقه ژئوگرید در زیر آن، مقاومت در برابر رانده شدنِ توده نیمه صلب به سمت پایین را افزایش داد و انتقال فشار فونداسیون را به فرم فشار افقی به دیوار کاهش داد. این موضوع در شکل ۱۱ بوضوح دیده می شود.

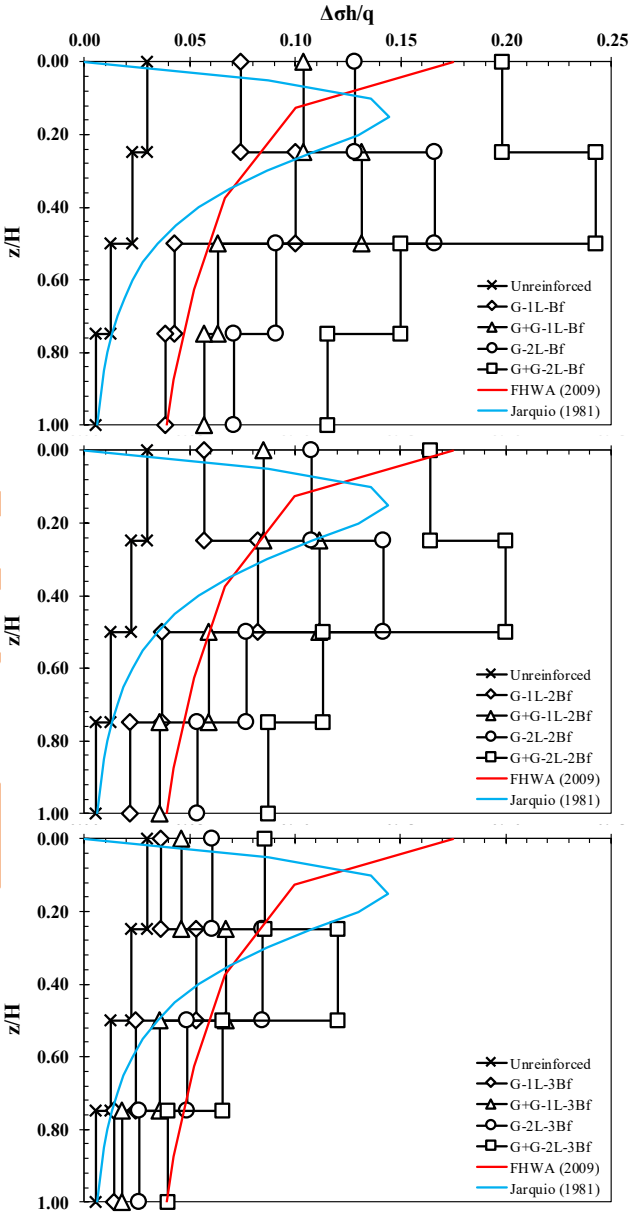
نمودارهای $\Delta\sigma_h$–q در شکل ۱۱ نشان می‌دهند که یک رابطه خطی بین فشار جانبی و فشار فونداسیون شکل گرفته است. شیب این رابطه خطی که به ضریب فشار جانبی (k_q) معروف است و در مدل دیوار غیر مسلح کمتر بود، با افزایش تعداد لایه ژئوسل و همچنین افزودن یک ورق ژئوگرید در زیر لایه ژئوسل افزایش یافت. این بدان معنی است که با تسلیح ضخامت بیشتری از بستر، قسمت بیشتری از فشار فونداسیون نیز به فشار جانبی تبدیل می شود، به ویژه توسط اِلمان‌های تسلیحی که سختی خمشی بیشتری دارند (ژئوسل-ژئوگرید). تبدیل بیشتر فونداسیون فشار به فشار جانبی در دیوارهای حائل تسلیم‌ناپذیر مطلوب نیست زیرا علاوه بر کاهش پایداری کلی دیوار، می تواند باعث ناپایداری سازه‌ای مانند شکست خمشی دیوار نیز شود. از آنجا که تقویت بستر فونداسیون در برخی شرایط اجتناب ناپذیر است، افزایش عرض ژئوسل را می‌توان به عنوان راه حلی برای جلوگیری از ناپایداری های فوق در نظر گرفت. برای درک بهتر این موضوع، پروفیل های ضریب فشار جانبی در شکل ۱۳ برای همه حالت های چیدمان ژئوسل ارائه شده است.

کاهشِ ارتفاع شکل‌گیری حداکثر فشار جانبی در اثر تسلیح بستر اولین نکته ای است که در شکل ۱۳ توجه را به خود جلب می‌نماید. این تغییر، که موجب کاهش ارتفاع نقطه اثر نیروی برایند (R) شد، می‌تواند به عنوان یک مزیت در راستای کاهش احتمال واژگونی دیوار در نظر گرفته شود. علاوه بر آن، این کاهش می‌تواند تا حدی اثر افزایش فشار جانبی ناشی از تقویت بستر را تعدیل نماید. با توجه به اهمیت مکان نقطه اثر نیروی برایند و وابستگی آن به آرایش اِلمان‌های تسلیح، مقادیر R از پروفیل های k_q محاسبه و تغییرات آنها در برابر عرض ژئوسل در شکل ۱۴ ارائه شده است.



شکل ۱۲: توصیف شماتیک مکانیسم انتقال فشار به دیوار: (الف) مدل دیوار تقویت نشده (ب) مدل G-۲l-B_f و (ج) مدل G-۲l-۳B_f

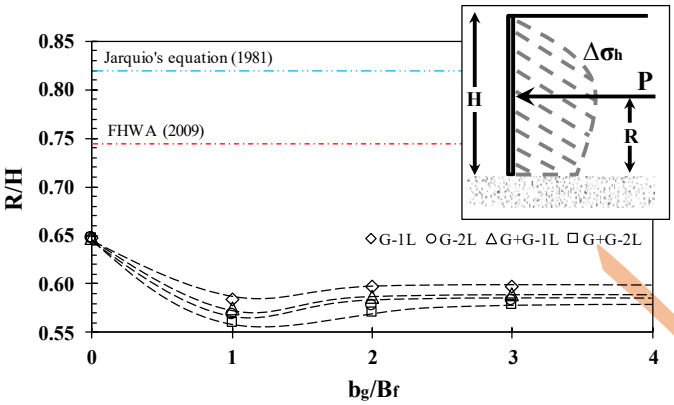
Fig. ۱۲. Schematic description of pressure transfer mechanism to the wall: (a) unreinforced wall model (b) G-۲l-B_f, and (c) G-۲l-۳B_f



شکل ۱۳: پروفایل های ضریب فشار جانبی

Fig. ۱۳. Profiles of lateral pressure coefficient

همانطور که مشاهده می شود، اگرچه افزایش تعداد لایه ژئوسل و افزودن ورق ژئوگرید دو عاملی بود که ارتفاع نقطه اثر نیروی برایند را کاهش داد، اما با افزایش عرض لایه این امر جبران شد حدود ۲۳٪. با این حال، حتی در عرض های ژئوسل بزرگ، هنوز تفاوت معنی داری بین مقادیر R در مدل های دیوار تقویت شده و غیر مسلح وجود داشت. از سوی دیگر، تفاوت مقادیر R با مقادیر محاسبه‌شده از رابطه FHWA و به‌ویژه روش جارکیو به حدی بود که می‌توان این دو روش را برای محاسبه مکان نقطه اثر نیروی برایند در دیوارهای حائل تسلیم‌ناپذیر ناکارآمد دانست. این اختلاف که در روش جارکیو به یک چهارم ارتفاع دیوار می‌رسید، می تواند منجر به یک طراحی دست بالا در برابر واژگونی شود.



شکل ۱۴: تغییرات نقطه اثر نیروی برایند در برابر عرض ژئوسل

Fig. ۱۴. Variation of application point of resultant force versus geocell width

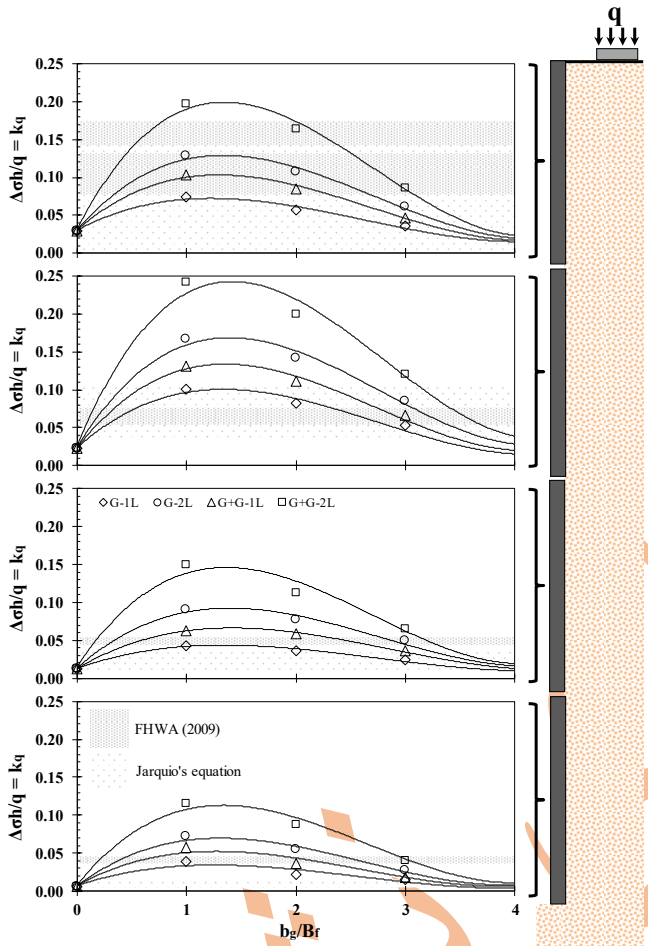
جهت ارزیابی دقیق‌تر اثر چیدمان ژئوسل بر ضریب فشار جانبی و مقایسه مقادیر آن با مقادیر به‌دست‌آمده از روابط رایج، تغییر k_q در مقابل b_g/B_f برای ارتفاعات مختلف در شکل ۱۵ ارائه شده است. افزایش ناگهانی مقدار k_q و کاهش تدریجی آن در خلال افزایش عرض ژئوسل نشان دهنده تأثیر منفی استفاده از لایه ژئوسل با عرض کم می‌باشد. این روند نشان می دهد که در صورت لزوم استفاده از لایه ژئوسل زیر فونداسیون، عرض آن باید به اندازه‌ای باشد که اثر منفی وجود آن خنثی شود. همانطور که در شکل ۱۵ مشاهده می شود، این اثر منفی هنگامی می‌تواند به طور کامل خنثی شود و مقادیر k_q به مقدار اولیه خود قبل از حضور ژئوسل برگردد که عرض لایه ژئوسل از سه برابر عرض فونداسیون فراتر رود. با توجه به این روند، ۳B_f به عنوان حداقل عرض لایه ژئوسل برای جلوگیری از فشار افقی اضافی به دیوارهای تسلیم‌ناپذیر در هنگام تقویت خاکریز آنها با ژئوسل توصیه می‌شود. نقش برجسته‌تر افزایش تعداد لایه ژئوسل نسبت به افزودن ورق ژئوگرید در زیر فونداسیون در افزایش ضریب فشار جانبی نکته قابل توجه دیگری است که از منحنی‌های k_q-b_g/B_f

قابل استنباط است. این منحنی‌ها نشان می دهند که افزایش مقدار k_q به دلیل افزایش تعداد لایه ژئوسل، ۷۵ تا ۱۵۰ درصد بیشتر از افزودن یک ورق ژئوگرید در زیر آن بوده است. با توجه به این موضوع و نزدیک بودن رفتار فونداسیون واقع در مدل های G-۲L و G+G-۱ که در بخش ۱-۳ نیز مشاهده شد، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ورق ژئوگرید در زیر لایه ژئوسل گزینه مناسب تری نسبت به افزایش تعداد لایه ژئوسل است زیرا از القای فشار جانبی بیشتر بر روی دیوارهای تسلیم‌ناپذیر بدون تغییر قابل توجهی در رفتار فونداسیون واقع بر روی آنها جلوگیری می‌نماید.

مقایسه مقادیر k_q با مقادیر محاسبه‌شده با روش‌های FHWA و جارکیو که برای ارزیابی دقت این روش‌ها در تخمین فشار جانبی القا شده در دیوارهای تسلیم‌ناپذیر تحت بارگذاری ناشی از فونداسیون انجام شد، نشان داد که روش FHWA را می‌توان به عنوان یک مرز پایین برای k_q در سه چهارم پایین دیوارهای تسلیم‌ناپذیر با لایه ژئوسل تا عرض $2B_f$ در نظر گرفت. با افزایش عرض لایه ژئوسل، مقادیر k_q بین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط این دو روش قرار گرفت، به طوری که روش‌های FHWA و جارکیو را می‌توان به ترتیب به عنوان مرزهای بالایی و پایینی برای دیوارهای تسلیم‌ناپذیر با ژئوسل‌های عریض‌تر از $3B_f$ در نظر گرفت. در ربع بالایی دیوارها، همپوشانی مناسبی بین محدوده پیش‌بینی‌شده با روش FHWA و نتایج به‌دست‌آمده برای دیوارهای با $b_g/B_f \leq 2$ مشاهده شد، در حالی که این روش به تدریج در دیوارهای تسلیم‌ناپذیر با لایه ژئوسل عریض‌تر از $3B_f$ به یک مرز بالا تبدیل شد. از سوی دیگر، مقایسه ضرایب فشار جانبی برای مدل دیوار تقویت‌نشده با ضرایب پیش‌بینی‌شده توسط روش‌های FHWA و جارکیو نشان داد که برخلاف روش FHWA که ضریب فشار جانبی را در سراسر دیوار تسلیم‌ناپذیر مسلح‌نشده دست بالا تخمین می‌زد، روش جارکیو این ضریب را فقط در نیمه بالایی دیوار دست بالا تخمین می‌زد. این امر را می‌توان به این واقعیت نسبت داد که این دو روش رفتار واقعی خاک و وقوع قوس‌زدگی در خاکریز را در نظر نمی‌گیرند.این را می توان به این دلیل نسبت داد که این دو روش رفتار واقعی خاک و وقوع قوس زدگی را در خاکریز در نظر نمی‌گیرند.

۴. نتیجه گیری

بر اساس نتایج بدست آمده از این تحقیق، موارد زیر را می‌توان به عنوان یافته‌های اصلی این تحقیق ارائه نمود:



شکل ۱۵: تغییرات ضریب فشار جانبی در مقابل عرض ژئوسل در ارتفاعات مختلف دیوار

Fig. ۱۵. Variation of lateral pressure coefficient versus geocell width at different wall elevations

۱- رشد ۱۲۰ درصدیِ فاکتور بهبود مدول به ازاء افزایش ۳ برابری عرض ژئوسل و افزایش تعداد لایهٔ ژئوسل با عرض کم از ۱ به ۲ لایه و همچنین رشد ۹۵ درصدی IM به ازاء اضافه کردن یک ورق ژئوگرید در زیر ژئوسل نشان داد که استفاده از ژئوسل با عرض کم در لایه‌های دوتایی، راه حل مقرون به صرفه‌تری برای بهبود مدول بستر نسبت به افزایش عرض ژئوسل و استفاده از ژئوگرید می‌باشد.

۲- $3B_f$ به عنوان عرض بهینه برای لایه ژئوسل در دیوارهای حائل گسیختگی ناپذیر تحت بارگذاری قائم برای به حداقل رساندن

نشستِ معادل ظرفیت باربری نهایی، به حداکثر رساندن ظرفیت باربری، بهبود مدول بستر و جلوگیری از فشار افقی اضافی تعیین شد.

۳- افزایش ۳۱-۲۴ درصدیِ ظرفیت باربری نهایی و ۲۴-۱۵ درصدیِ نشست معادل آن هنگام افزایش عرض و تعداد لایه ژئوسل و همچنین اضافه کردن یک ورق ژئوگرید در زیر آن، به ترتیب به عنوان یک مزیت و یک عیب برای فونداسیون‌های واقع بر روی دیوارهای حائل گسیختگی ناپذیر شناسایی شد.

۴- نزدیکی عملکرد مدل‌های G+G-۱L به مدل‌های G-۲L نشان داد که استفاده از یک ورق ژئوگرید در زیر لایه ژئوسل جایگزین مناسبی برای استفاده از یک لایه دوگانه ژئوسل است.

۵- تبدیل فشار بیشترِ فونداسیون به فشار جانبی به عنوان یکی از معایب نصب لایه ژئوسل در زیر فونداسیون واقع بر دیوارهای حائل گسیختگی ناپذیر شناخته شد. این افزایش که هنگام نصب یک لایه ژئوسل به عرضی برابر با عرض فونداسیون حدود ۱۴۰ تا ۵۸۱ درصد بود، با استفاده از ژئوسل‌های عریض‌تر از $3B_f$ بسیار کمرنگ شد و به حدود ۲۱ تا ۱۵۳ درصد رسید.

۶- مقایسه ضرایب فشار جانبی برای مدل دیوار تقویت‌نشده با ضرایب پیش‌بینی‌شده توسط روش‌های FHWA و جارکیو نشان داد که برخلاف روش FHWA که ضریب فشار جانبی را در سراسر دیوار تسلیم‌ناپذیر مسلح‌نشده دست بالا تخمین می‌زد، روش جارکیو این ضریب را فقط در نیمه بالایی دیوار دست بالا تخمین می‌زد.

۵. محدودیتهای تحقیق

علیرغم تلاش‌های انجام شده در این تحقیق جهت لحاظ نمودن تمامی جزئیات در فرآیندِ شبیه‌سازی اجزای مدل و ساخت مدل‌ها، نتایجِ کمیِ بدست آمده به دلیل عدم ایجاد شرایط تنش واقعی در مدل‌های کوچک مقیاس نمی‌توانند مطابقت دقیق با مدلهای واقعی داشته باشند. این نقصان می‌تواند با ارائه نتایج در قالب پارامترهای همسنج شده تا حد قابل قبولی مرتفع گردد. با تکیه بر این رویکرد، تفسیر نتایج بدست آمده در این تحقیق بر پایهٔ پارامترهای همسنج شده نظیر IM، $\Delta\sigma_h/q$، k_q و R/H انجام شد. شکل‌گیری اصطکاک بین بدنهٔ مدلها با دیوارهٔ جعبهٔ آزمایش یکی دیگر از عواملی است که می‌تواند به عدم تطابق بین نتایج مدلهای آزمایشگاهی با مدلهای واقعی دامن بزند. در این تحقیق تلاش شد تا این اصطکاک ناخواسته با استفاده از یک لایه نازک پارافین بین بدنه مدل و جعبهٔ آزمایش به حداقل رسانده شود. از سوی دیگر، بدلیل آنکه فاصله فونداسیون تا تاج دیوار به عنوان یکی از ثوابت تحقیق درنظر گرفته شده است، نتایج این تحقیق قابل تعمیم به تمامی موقعیت‌های فونداسیون نمی‌باشد. این محدودیت می‌تواند با مطالعه بر روی این موضوع در تحقیقات آتی مرتفع گردد.

مراجع

۱. Sherif, M.A., Fang, Y.-S. and Sherif, R.I., ۱۹۸٤. K_A and K. behind rotating and non-yielding walls. *J. of Geotechnical Engineering 110*(۱): ٤۱–٥٦. https://doi.org/۱۰,۱۰٦۱/(ASCE)۰۷۳۳-۹٤۱۰(۱۹۸٤)۱۱۰:۱(٤۱)

۲. Mei, G., Chen, Q. and Song, L., ۲۰۰۹. Model for predicting displacement dependent lateral earth pressure. *Can. Geotech. J. 46(8)*, pp. ۹٦۹–۹۷٥. https://doi.org/۱۰,۱۱۳۹/T۰۹-۰٤۰

۳. Tang, Y., Li, J.P. and Ma, Y., ۲۰۱۷. Lateral Earth Pressure Considering the Displacement of a Rigid Retaining Wall. *Int. J. Geomech. 18(11)*, pp. ۰٦۰۱۸۰۳۱. https://doi/۱۰,۱۰٦۱/(ASCE)۲۹GM.۱۹٤۳-٥٦۲۲,۰۰۰۱۲۸٤

٤. Lee, J.H., Salgado, R., Bernal, A. and Lovell, C.W., ۱۹۹۹. Shredded tires and rubber-sand as lightweight backfill. *J Geotech Geoenviron Engrg (ASCE)125(2)*, pp.۱۳۲–٤۱. https://doi.org/۱۰,۱۰٦۱/(ASCE)۱۰۹۰-۰۲٤۱(۱۹۹۹)۱۲٥:۲(۱۳۲)

٥. Abichou, T., Tawfiq, K., Edil, T.B. and Benson, C.H., ۲۰۰٤. Behavior of a soil-tire shreds backfill for modular block-wall. *ASCE Geotechnical Special Publication No. 127*, pp. ۱٦۲–۱۷۲. https://doi.org/۱۰,۱۰٦۱/٤۰۷٥٦(۱٤۹)۱۱

٦. Wang, L.J., Liu, S.H. and Zhou, B., ۲۰۱٥. Experimental study on the inclusion of soilbags in retaining walls constructed in expansive soils. Geotext. Geomembr. ٤۳(۱), pp. ۸۹–۹٦. https://doi.org/۱۰,۱۰۱٦/j.geotexmem.۲۰۱٤,۱۱,۰۰۲

۷. AbdelSalam, S.S. and Azzam, S.A., ۲۰۱٦. Reduction of lateral pressures on retaining walls using geofoam inclusion. *Geosynthetics International 23(6)*, pp. ۳۹٥-٤۰۷. https://doi.org/۱۰,۱٦۸۰/jgein.۱٦,۰۰۰۰٥

۸. Kim, H., Witthoeft, A.F. and Kim, D., ۲۰۱۸. Numerical study of earth pressure reduction on rigid walls using EPS geofoam inclusions. *Geosynthetics International ۲٥(۲)*, pp. ۱۸۰-۱۹۹. https://doi.org/۱۰,۱٦۸۰/jgein.۱۸,۰۰۰۰۱

۹. Fan, K., Zou, W., Zhang, P., Wang, X. and Shen, Y., ۲۰۲٤. Laboratory investigation and theoretical analysis of lateral pressure exerted by expansive soils on retaining

walls with expanded polystyrene geofoam block upon water infiltration. *Geotextiles and Geomembranes, ٥٢(٣)*, pp. ٣٣٢-٣٤١. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.geotexmem.٢٠٢٣,١١,٠٠٥

١٠. Tsukamoto, Y., Ishihara, K., Higuchi, T. and Aoki, H., ١٩٩٩. Influence of geogrid reinforcement on lateral earth pressure against model retaining walls. *Geosynthetics International 6(3)*, pp. ١٩٥-٢١٨. https://doi.org/١٠,١٦٨٠/gein.٦,٠١٥٠

١١. Mittal, S., Garg, K.G. and Saran, S., ٢٠٠٦. Analysis and design of retaining wall having reinforced cohesive frictional backfill. *Geotech Geol Eng 24*, pp. ٤٩٩–٥٢٢. https://doi.org/١٠,١٠٠٧/s١٠٧٠٦-٠٠٤-٥١٥٣-٩

١٢. Hazra, S. and Patra, N.R., ٢٠٠٨. Performance of counterfort walls with reinforced granular and fly ash backfills: Experimental investigation. *Int. J. Geotech. Geol. Eng., 26(3)*, pp. ٢٥٩–٢٦٧. https://doi.org/١٠,١٠٠٧/s١٠٧٠٦-٠٠٧-٩١٦٢-٣

١٣. Kim, U.J. and Kim, D.S., ٢٠٢٠. Load sharing characteristics of rigid facing walls with geogrid reinforced railway subgrade during and after construction. *Geotextiles and Geomembranes, 48(6)*, pp. ٩٤٠-٩٤٩. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.geotexmem.٢٠٢٠,٠٨,٠٠٢

١٤. Biabani, M.M., Indraratna, B. and Ngo, N.T., ٢٠١٦. Modelling of geocell-reinforced subballast subjected to cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes, 44(4)*, pp. ٤٨٩-٥٠٣. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.geotexmem.٢٠١٦,٠٢,٠٠١

١٥. Demirdogen, S., Gurbuz, A. and Yunkul, K., ٢٠٢٤. Parameters affecting performance of fully instrumented model testing of strip footings on geocell-reinforced soils. *Geotextiles and Geomembranes, 52(6)*, pp. ١١٩١-١٢٠٦. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.geotexmem.٢٠٢٤,٠٨,٠٠٢

١٦. Lei, H., Ma, T., Feng, S. and Wang, L., ٢٠٢٤. Confinement effect of geocell on the mechanical characteristics of reinforced sand subgrade. *Transportation Geotechnics, 48*, pp. ١٠١٣٣٦. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.trgeo.٢٠٢٤,١٠١٣٣٦

١٧. El-Emam, M. and Touqan, M., ٢٠٢٠. Experimental modeling of strip footing adjacent to non-yielding retaining wall. *Innovative Infrastructure Solutions 5*(٢), pp. ١-١٧. https://doi.org/١٠,١٠٠٧/s٤١٠٦٢-٠٢٠-٠٠٢٨٨-w

١٨. El-Emam, M., Mabrouk, A.B. and Bigdeli, A., ٢٠٢٥. Static Response of Non-Yielding Basement Walls with Different Material Properties. *Indian Geotechnical Journal, 55*(١), pp. ٤٦-٦١. https://doi.org/١٠,١٠٠٧/s٤٠٠٩٨-٠٢٤-٠٠٩٠٨-٧

١٩. Dash, S.K., Bora, M.C., ٢٠١٣. Improved performance of soft clay foundations using stone columns. *Geotextiles and Geomembranes, 41*, pp. ٢٦-٣٥. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.geotexmem.٢٠١٣,٠٩,٠٠١

٢٠. Wood DM. Geotechnical modeling. Version ٢,٢. London: Taylor & Francis Group, ٢٠٠٤.

٢١. Yazdandoust, M. and Daftari, F., ٢٠٢٤. Behavior of back-to-back mechanically stabilized earth walls as railway embankments. *Geosynthetics International, 31*(٥), pp. ٧٨٥-٨٠٥. https://doi.org/١٠,١٦٨٠/jgein.٢٣,٠٠١٢٦

٢٢. Viswanadham, B.V.S. and Mahajan, R.R., ٢٠٠٧. Centrifuge model tests on geotextile-reinforced slopes. *Geosynthetics International, 14(6)*, pp. ٣٦٥–٣٧٩. https://doi.org/١٠,١٦٨٠/gein.٢٠٠٧,١٤,٦,٣٦٥

٢٣. Yoshida, T. and Tatsuoka., F., ١٩٩٠. Deformation property of zhear band in sand subjected to plane strain compression and its relation to particle characteristics. *In Vol. 1 of Proc., 12th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. ٢٣٧–٢٤٠. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema.

٢٤. Yazdandoust, M., Jamnani, A.R. and Sabermahani, M., ٢٠٢٤. Dynamic evaluation of tiered geogrid mechanically stabilized earth (MSE) walls using shake table test. *Acta Geotechnica, 19*(٦), ٤١٣٩-٤١٦٥. https://doi.org/١٠,١٠٠٧/s١١٤٤٠-٠٢٣-٠٢١٧١-١

٢٥. Skejic, A., Medic, S. and Dolarevic, S., ٢٠١٨. Influence of wire mesh characteristics on reinforced soil model wall failure mechanisms–physical and numerical modeling. *Geotextiles and Geomembranes, 46*, pp. ٧٢٦–٧٣٨. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.geotexmem.٢٠١٨,٠٧,٠٠٤

٢٦. Xu, C., Luo, M., Shen, P., Han, J. and Ren, F., ٢٠٢٠. Seismic performance of a whole geosynthetic reinforced soil–integrated bridge system (GRS-IBS) in shaking table test. *Geotextiles and Geomembranes, 48(3)*, pp. ٣١٥–٣٣٠. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.geotexmem.٢٠١٩,١٢,٠٠٤

٢٧. Samee, A.A., Yazdandoust, M. and Ghalandarzadeh, A., ٢٠٢١. Performance of back-to-back MSE walls reinforced with steel strips under seismic conditions. *Transportation Geotechnics, 30*, pp. ١٠٠٥٤٠. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.trgeo.٢٠٢١,١٠٠٥٤٠

٢٨. Feng, L.X., Neto, J.A. and Zornberg, J.G., ٢٠٢٤. Evaluation of the elastic modulus improvement in geocell-reinforced unbound aggregates: Full-scale experimental sections on a highway. *Transportation Geotechnics, 49*, pp. ١٠١٤٤٤. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.trgeo.٢٠٢٤,١٠١٤٤٤

٢٩. Parsa, M., Bagheripour, M. H., Nasrollahi, S. M. and Presti, D.L., ٢٠٢٤. Reinforcement mechanism and the stress-strain behaviors of geocells made by non-woven geotextile. *Transportation Geotechnics*, pp. ١٠١٢٧٥. https://doi.org/١٠,١٠١٦/j.trgeo.٢٠٢٤,١٠١٢٧٥

٣٠. Dash, S.K., Rajagopal, K., Krishnaswamy, N.R., ٢٠٠٧. Behaviour of geocell reinforced sand beds under strip

loading. *Canadian Geotechnical Journal 44(7)*, pp. ۹۰۵-۹۱۶. https://doi.org/۱۰,۱۱۳۹/t۰۷-۰۳۵

۳۱. Moghaddas Tafreshi, S. N., Khalaj, O. and Dawson, A.R., ۲۰۱۳. Pilot-scale load tests of a combined multilayered geocell and rubber-reinforced foundation. *Geosynthetics International, 20(3)*, pp. ۱۴۳-۱۶۱. https://doi.org/۱۰,۱۶۸۰/gein.۱۳,۰۰۰۰۸

۳۲. Consoli, N.C., Rossi, J.G., Festugato, L., Ruver, C.A., Scheuermann Filho, H.C., Foppa, D. ... and Leon, H.B., ۲۰۱۹. Circular-plate load tests on bounded cemented layers above weak cohesive-frictional soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 145(10)*, pp. ۰۶۰۱۹۰۱۱. https://doi.org/۱۰,۱۰۶۱/(ASCE)GT.۱۹۴۳-۵۶۰۶,۰۰۰۲۱۴۴

۳۳. Xu, Y., Yan, G., Williams, D.J., Serati, M., Scheuermann, A. and Vangsness, T., ۲۰۲۰. Experimental and numerical studies of a strip footing on geosynthetic-reinforced sand. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 20(5)*, pp. ۲۶۷-۲۸۰. https://doi.org/۱۰,۱۶۸۰/jphmg.۱۸,۰۰۰۲۱

۳۴. Jarquio, R., ۱۹۸۱. Total lateral surcharge pressure due to strip load. *J Geotech Geo-Environ Eng ASCE 107(10)*, pp.۱۴۲۴–۱۴۲۸. https://doi.org/۱۰,۱۰۶۱/AJGEB۶,۰۰۰۱۱۹۷

ویرایش نشده