

تحلیل عددی و کاربردی رفتار برکنش مهار صفحه‌ای در خاک مسلح: بهینه‌سازی ظرفیت

باربری

سیدشهاب‌الدین شریعتی^۱، دانیال معظمی^۱، عبدالله تبرئی^{۲*}، آرش محمودی^۳

^۱ گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، واحد مشهد، دانشگاه آزاد اسلامی، مشهد، ایران

^۲ گروه مهندسی عمران، موسسه آموزش عالی اشراق، بجنورد، ایران

^۳ دپارتمان مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

* a.tabaroei@eshragh.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، اثر به کارگیری ژئوسل و ژئوگرید بر ظرفیت باربری خاک تحت نیروی برکنش مهار صفحه‌ای با مدل‌سازی سه‌بعدی در ABAQUS بررسی و سناریوهای مختلف شامل تعداد و فاصله لایه‌های ژئوسل، موقعیت ژئوگرید، ارتفاع پاکت ژئوسل، تعداد نواحی بارگذاری و خروج از مرکز ژئوسل ارزیابی شد. بدین منظور ابتدا دو مدل عددی ساخته شده در حالت‌های غیرمسلح و مسلح به ژئوسل که در نرم افزار ABAQUS ساخته شده بودند با نتایج به‌دست آمده از مدل‌سازی فیزیکی مقایسه و صحت‌سنجی شدند و در ادامه مطالعه پارامتریکی بر روی پارامترهای مهم طراحی صورت گرفت. نتایج نشان داد افزودن دو لایه ژئوسل ظرفیت را تا ۳۰٪ افزایش می‌دهد، در حالی که افزایش فاصله بین آن‌ها موجب کاهش ظرفیت می‌شود. ترکیب ژئوگرید در موقعیت بهینه زیر ژئوسل ظرفیت را تا ۳۹٪ بهبود داد. تغییر ارتفاع پاکت ژئوسل نیز حدود ۱۳٪ $\pm$ بر ظرفیت مؤثر بود. افزایش تعداد نواحی اعمال بار از یک به دو، بهبود چشم‌گیر حدود ۲۰۰٪ ایجاد و افزایش خروج از مرکز ژئوسل ظرفیت را تا حدود ۲۸٪ بیشتر کرد. در مجموع، انتخاب مناسب آرایش و ابعاد ژئوسل و ژئوگرید می‌تواند عملکرد مهار صفحه‌ای را به‌طور قابل توجهی ارتقا دهد و به‌عنوان رویکردی مؤثر در طراحی‌های ژئوتکنیکی به‌کار رود. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند زوایای پنهان موجود در طراحی سیستم‌های خاک مسلح را روشن نماید.

کلمات کلیدی

خاک مسلح، ژئوسل، ژئوگرید، نیروی برکنش، ظرفیت باربری

خاک، همواره نقش بسیار مهمی در پیشرفت عمران و آبادانی داشته است؛ بار سازه‌ها در نهایت به زمین منتقل شده و خاک در بررسی عملکرد سازه‌ها در شرایط محیطی مختلف نقش داشته است. یکی از کلیدی‌ترین یافته‌ها و اکتشافات ساخته بشر در علم مهندسی ژئوتکنیک، ساخت و استفاده از انواع مسلح‌کننده‌ها جهت بهبود پارامترهای مقاومتی و پوشش نسبی ضعف خاک در کشش، در چند دهه اخیر است. امروزه از ژئوسنتتیک‌ها که عمدتاً از مواد پلیمری تهیه می‌شوند، در طراحی و اجرا پی ساختمان‌ها، خاکریزها، سازه‌های نگهدارنده، روسازی راه، زهکشی و موارد مشابه استفاده می‌شود. با گذشت زمان و پژوهش‌ها و بررسی‌های مختلف بر ژئوسنتتیک‌ها، شکل‌های مختلفی از این نوع محصولات به بازار عرضه شده است. ژئوسل یک نوع از انواع ژئوسنتتیک‌ها است که امروزه مطالعات وسیعی روی آن در حال انجام است. یکی از موارد مهم استفاده از ژئوسنتتیک‌ها در پروژه‌های عمرانی، استفاده به‌عنوان مسلح‌کننده جهت افزایش ظرفیت باربری پی‌ها است.

مهار^۱ سیستم پی باریکی است که به‌منظور مقاومت در برابر هر نوع نیروی بیرون‌کشی یا گشتاور واژگونی که در سازه قرار گرفته است، طراحی و برای انتقال نیروهای مختلف از سازه به خاک از آن کمک گرفته می‌شود [۱]. مهارها سازه‌هایی هستند که برای مقاومت در برابر نیروهای کششی رو به بالا^۲ در پی‌ها و فونداسیون‌ها نیز به‌کار می‌روند. کاربرد مهارهای صفحه‌ای افقی در مهندسی ژئوتکنیک بسیار رایج است؛ از جمله در پایه دکل‌های انتقال نیرو، سازه‌های بلندمرتبه، مهار کابل‌های کششی پل‌ها و سازه‌های دریایی که در معرض نیروهای برکنشی قرار دارند. ظرفیت باربری برکنشی یک مهار صفحه‌ای به عوامل متعددی وابسته است که از آن جمله می‌توان به دانسیته خاک اطراف مهار، عمق مدفون شدن، ابعاد و شکل مهار اشاره کرد [۲]. مسلح‌سازی خاک با ژئوسنتتیک به دلیل سهولت اجرا، هزینه مناسب و عملکرد مؤثر، امروزه به‌عنوان یک روش پرکاربرد در بهبود ویژگی‌های مکانیکی خاک مورد توجه قرار گرفته است. هدف از پژوهش کنونی، بررسی تأثیر حضور ژئوسل و ژئوگرید بر افزایش ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای مدفون در ماسه و نقش ارتفاع لایه ژئوسل در بهبود نسبت ظرفیت باربری و پیامدهای ناشی از خروج از مرکزیت این لایه در کارایی سیستم و تمرکز تغییرشکل‌ها به‌روش عددی است [۳].

پژوهش‌های متعددی در چند دهه اخیر، روش‌های افزایش مقاومت برکنش مهارهای صفحه‌ای در خاک را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که استفاده از مسلح‌کننده‌های ژئوسنتتیکی می‌تواند ظرفیت برکنش مهار صفحه‌ای را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. دلیل این امر، بهبود اندرکنش بین مهار و خاک پیرامون به کمک المان‌های تقویت‌کننده است که منجر به گسترش سطح گسیختگی و افزایش مقاومت اصطکاکی می‌شود که در واقع به‌جای افزایش عمق دفن یا ابعاد مهار که از نظر اقتصادی و اجرایی همواره ممکن نیست، می‌توان با به‌کارگیری ژئوسنتتیک‌ها در محدوده مهار، ظرفیت برکنش را به‌صرفه‌تر ارتقا داد [۴].

وجه تمایز این پژوهش در استفاده هم‌زمان از تسلیح ژئوسل و ژئوگرید در سامانه مهار صفحه‌ای افقی تحت نیروی برکنش، همراه با مدل‌سازی سه‌بعدی دقیق و تحلیل نظام‌مند متغیرهای مؤثر بر ظرفیت نهایی برکنش است. به‌این ترتیب که رفتار مرکب خاک مسلح‌شده با ترکیب ژئوسل و ژئوگرید و نحوه هم‌افزایی آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین، به‌جای تمرکز محدود بر ابعاد یا ارتفاع ژئوسل، مجموعه‌ای از پارامترهای کمتر بررسی‌شده شامل فاصله میان لایه‌های ژئوسل، موقعیت نسبی ژئوگرید (در بالا و یا پایین ژئوسل)، بارگذاری در دو ناحیه مجزا و اثر خروج از مرکز جانمایی مسلح‌کننده، در قالب یک مطالعه پارامتریک چندمتغیره تحلیل شده‌اند. به‌علاوه، با بهره‌گیری از نتایج سه‌بعدی شامل کانتورهای تنش و جابجایی، مکانیزم گسیختگی، نواحی فعال تنش و نحوه گسترش سطح شکست در حضور ترکیب ژئوسل-ژئوگرید شناسایی شده و براساس آن، روابطی برای پیشنهاد فاصله بهینه لایه‌ها، عمق مناسب ژئوگرید و اثر خروج از مرکز بر ظرفیت برکنش ارائه شده است که می‌تواند مبنای اولیه‌ای برای طراحی مهارهای صفحه‌ای مسلح‌شده در خاک‌های دانه‌ای محسوب شود.

مسلح‌سازی سه‌بعدی خاک به‌وسیله ژئوسل، در سال‌های اخیر به‌عنوان راهکاری کارآمد جهت بهبود عملکرد مهارهای صفحه‌ای در برابر برکنش مورد توجه قرار گرفته است که کاربرد ویژه‌ای در اجرای فونداسیون‌ها، خاکریزها و تثبیت بستر راه دارند. چوداری و دش

¹ Anchor

² Uplift Forces

[۲] و مقدس‌تفرشی و همکاران [۵] اثرات ژئوسل بر افزایش ظرفیت کششی مهارها و شمع‌های پافیلی^۱ را بررسی نمودند که هر دو نشان‌دهنده بهبود قابل‌توجهی در حضور این نوع مسلح‌کننده‌ها بودند [۴]. همچنین ظرفیت برکنشی انکر صفحه‌ای در ماسه با چهار نسبت عمق مدفون‌شدگی مختلف (۴ و ۳ و ۲ و ۱، L/D) و تراکم‌های متفاوت ماسه بررسی شد و عملکرد انواع تسلیح از جمله ژئوگرید تک‌لایه، ژئوگرید دولایه، ژئوسل و ژئوسل همراه با ژئوگرید پایه مقایسه شد. استفاده از ژئوسل، به‌ویژه در بالای انکر، بیشترین بهبود ظرفیت برکنشی را ایجاد کرد و سبب گسترش ناحیه گسیختگی مخروطی‌شکل شد. همچنین رابطه هیپربولیک تنش-کرنش توانست رفتار بار-جابجایی را با دقت مناسبی پیش‌بینی کند [۶]. دس و چوداری [۷] در آزمایش‌های خود روی مهارهای صفحه‌ای عمودی نشان داد که افزودن یک لایه ژئوسل در اطراف مهار می‌تواند جابجایی‌های بزرگی معادل ۶۰ تا ۷۰ درصد ارتفاع خود را تحمل کند؛ در حالی که ظرفیت باربری آن نسبت به حالت بدون تسلیح چهار برابر شده بود. این پژوهش همچنین ابعاد بهینه ژئوسل را جهت به‌دست آوردن بیشترین بهره‌وری مشخص کرد (طول، عرض و ارتفاع ژئوسل به‌ترتیب حدود ۵، ۳ و ۲/۸ برابر ارتفاع مهار) و نشان داد که برای عملکرد مطلوب، اندازه چشمه‌های ژئوسل باید هم‌مقیاس با ابعاد مهار انتخاب شود. در پژوهش دیگری با استفاده از تحلیل عددی سه‌بعدی مشاهده شد که استفاده از ژئوسل می‌تواند ظرفیت برکنش مهار صفحه‌ای افقی را براساس هندسه و عمق مدفون‌شدگی تا چندین برابر حالت غیرمسلح افزایش دهد. همچنین افزایش ارتفاع پاکت ژئوسل و کاهش فاصله آن از مهار، بیشترین تأثیر را در تقویت سازوکار مقاومتی خاک داشت [۸]. به‌طور مشابه، در پژوهش دیگری از طریق آزمایش در مقیاس تقریباً کامل و تحلیل المان محدود گزارش شد که قرارگیری ژئوسل در بالای مهار سبب افزایش مقاومت برکنش می‌شود. همچنین نشان داده شد که قرار دادن لایه ژئوسل مستقیماً روی مهار، سبب افزایش ۳۰ تا ۵۵ درصدی نیروی برکنش نسبت به حالت بدون تسلیح می‌شود؛ هرچند که با بزرگ‌تر شدن ابعاد مهار یا افزایش عمق دفن، میزان بهره‌مندی از ژئوسل تا حدودی کاهش می‌یابد [۴]. در مطالعه سه‌بعدی عددی، رفتار مهار صفحه‌ای افقی در ماسه مسلح‌شده با ژئوسل تحلیل و مشخص شد که تحت شرایط هندسی بهینه، ژئوسل می‌تواند ظرفیت برکنش را بیش از ۵۰٪ افزایش دهد. بیشترین کارایی زمانی مشاهده شد که ژئوسل دقیقاً در بالای مهار قرار گیرد و افزایش عرض ژئوسل (بیش از ۳/۴۶ برابر عرض مهار) تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت نداشت. همچنین افزایش ارتفاع ژئوسل ظرفیت را به‌صورت خطی افزایش داد، در حالی که سختی ژئوسل بیشتر بر کنترل کرنش موثر بود تا مقاومت نهایی [۹]. در مطالعه‌ای که مهارهای مسلح به ژئوسل تحت بارگذاری سیکلی بررسی شدند، مشاهده شد که حضور ژئوسل علاوه بر افزایش ظرفیت برکنش استاتیکی، از وقوع گسیختگی پیش‌رونده ناگهانی تحت بارگذاری‌های متناوب جلوگیری می‌کند و پایداری مهار پس از چرخه‌های بارگذاری را نیز افزایش می‌دهد [۱۰]. در طی انجام آزمایش‌های مقیاس کوچک برای ارزیابی اثرات نسبت جای‌گیری مهار، نسبت عرض و ارتفاع ژئوسل و شکل هندسی مهارها بر رفتار برکنش مهارهای صفحه‌ای افقی کم‌عمق مسلح‌شده در خاک غیرچسبنده، نشان داده شد که استفاده از ژئوسل در اطراف مهار کم‌عمق، سبب افزایش ظرفیت برکنش می‌شود [۱۱]. نتایج آزمایشگاهی و عددی نشان داد که تقویت انکر قائم با ژئوسل سبب افزایش قابل‌توجه ظرفیت باربری برکنشی می‌شود و سطح گسیختگی از لبه تحتانی ژئوسل به‌صورت منحنی تا سطح خاک گسترش می‌یابد. همچنین مشخص شد که ابعاد ژئوسل (طول، عرض و ارتفاع مناسب) و اندازه پاکت، نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری سطح گسیختگی و افزایش ظرفیت باربری دارند و بیش از حد بزرگ بودن پاکت موجب کاهش کارایی در کنترل گسیختگی می‌شود [۱۲]. بنابراین، به‌کارگیری ژئوسل (با ابعاد و موقعیت بهینه‌شده) می‌تواند به‌عنوان راهکاری مؤثر جهت بهبود عملکرد مهارهای صفحه‌ای در پروژه‌های ژئوتکنیکی مورد استفاده قرار گیرد.

نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد استفاده توأمان از ژئوسل و انواع دیگر ژئوسنتتیک، سبب بهبود ظرفیت برکنش مهارهای صفحه‌ای می‌شوند. به‌عنوان مثال در یک پژوهش آزمایشگاهی، رفتار انکر صفحه‌ای افقی کم‌عمق در شرایط مختلف شامل تغییر عمق مدفون‌شدگی، قطر صفحه، نوع خاک و استفاده از ژئوسل و ژئوتکستایل بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش عمق و قطر صفحه، ظرفیت برکنش را به‌طور محسوسی افزایش می‌دهد و حضور ژئوسل و ژئوتکستایل موجب تغییر کامل شکل منحنی بار-جابجایی و افزایش قابل‌توجه مقاومت برکنشی می‌شود. همچنین ترکیب همزمان ژئوسل و ژئوتکستایل بیشترین بهبود عملکرد را ایجاد کرد [۱۳]. در پژوهش آزمایشگاهی، برای کنترل برکنش لوله، استفاده از ژئوسل و ترکیب ژئوسل با ژئوتکستایل بررسی شد. نتایج نشان داد ژئوسل

¹ Belled Piles

ظرفیت مقاومتی را در لحظه پیک بیش از ۱/۵ برابر و در جابجایی بزرگ تا ۳ برابر نسبت به حالت غیرمسلح افزایش می‌دهد. همچنین ترکیب ژئوسل و ژئوتکستایل و افزایش تعداد لایه‌ها در اطراف لوله، کاراترین حالت تقویت و بیشترین مقاومت برکنشی را ایجاد نمود [۱۴].

همچنین نتایج نشان داده‌اند که تسلیح خاک با ژئوگرید نیز به‌طور مؤثری ظرفیت برکنش مهارهای صفحه‌ای را افزایش می‌دهد. همچنین طی آزمایش‌های مدل فیزیکی و شبیه‌سازی عددی، گزارش شد که افزودن لایه ژئوگرید موجب افزایش قابل توجه ظرفیت برکنش مهار صفحه‌ای در ماسه می‌شود و مقدار آن به عمق دفن مهار و دانسیته نسبی خاک وابسته است [۱۵]. تأثیر شکل هندسی مهار، زاویه اعمال بار و موقعیت ژئوگرید بر عملکرد مهارهای صفحه‌ای مایل در ماسه در یک پژوهش آزمایشگاهی-عددی بررسی شده است. نتایج نشان داد که استفاده از ژئوگرید در بالای مهار مایل، ظرفیت برکنش را به‌طور قابل توجهی افزایش داده و افزایش زاویه مهار (۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) موجب بهبود عملکرد شده و مشخص شد که عمق مدفون‌شدگی مهار و دانسیته نسبی ماسه بیشترین تأثیر را بر ظرفیت برکنش دارند. تحلیل عددی با نرم‌افزار FLAC 3D و مقایسه رفتار فونداسیون‌های مهار و شمعی برای یک دکل انتقال نیرو نشان داد که مهارهای مایل مسلح‌شده با ژئوگرید می‌توانند در عمق کم، عملکردی مشابه یا حتی بهتر از شمعه‌ها در مقاومت در برابر نیروهای برکنش ارائه دهند. [۱۶]. در یک پژوهش آزمایشگاهی، با استفاده از دستگاه کشش مایل در مقیاس بزرگ روی ژئوسنتتیک ورقه‌ای (ساخته شده از نوارهای ژئوگرید) و ژئوگرید تعبیه شده در مهارهای خارج از محور I-شکل و L-شکل، استنباط شد که نوع مسلح‌کننده (صفحه‌ای در برابر شبکه‌ای) و جای‌گذاری آن، نقش تعیین‌کننده‌ای در مکانیزم گسیختگی و ظرفیت کششی مهار دارند و هم در ژئوسنتتیک ورقه‌ای و هم در ژئوگرید، مهار I-شکل تقریباً ۵۰٪ و مهار L-شکل تقریباً ۹۰٪ نیروی کشش بیشتری نسبت به مهار خارج از محور ایجاد می‌کند. با افزایش شیب نیروی کشش از صفر درجه به ۳۰ درجه برای ژئوسنتتیک ورقه‌ای و ژئوگرید، حداکثر نیروی کشش بیش از ۲۰٪ افزایش می‌یابد [۱۷]. در یک پژوهش سانتریفیوژی و عددی، ظرفیت برکنشی انکر نواری در ماسه مسلح‌شده با ژئوگرید در آرایش‌های مختلف بررسی و مشخص شد که قرارگیری یک لایه ژئوگرید با زاویه ۴۵ درجه در بالای مهار، تا حدود ۹۸٪ ظرفیت برکنش را نسبت به حالت غیرمسلح افزایش می‌دهد که کاراتر از آرایش‌های افقی و عمودی است. پژوهشگران در ادامه با هدف ارائه روشی اقتصادی و بدون افزایش عمق مدفون‌شدگی، نشان دادند که بهترین نحوه جای‌گذاری ژئوگرید، قرارگیری آن مستقیماً در بالای مهار و با زاویه شیب ۴۵ درجه است؛ به‌طوری‌که نه‌تنها موجب بهبود قابل توجه ظرفیت برکنشی می‌شود، بلکه نقش مؤثری در کاهش هزینه‌های اجرایی نسبت به سایر آرایش‌های تسلیح نیز دارد [۱۸]. در پژوهشی با بهره‌گیری از آزمون‌های برکنش همراه با تکنیک PIV^۱ و OFDR^۲ با وضوح بالا، نتیجه شد که دو عامل نسبت عمق دفن مهار و مکان قرارگیری ژئوگرید، بیشترین تأثیر را بر مقاومت برکنش دارند؛ در حالی‌که افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید تأثیر زیادی ندارد. افزایش عمق دفن در حضور ژئوگرید سبب افزایش چشم‌گیر ظرفیت نهایی برکنش و بهبود اندرکنش خاک-ژئوگرید می‌شود و شکل سطح گسیختگی از حالت تقریباً عمودی به شکل حبابی تغییر می‌نماید [۱۹]. در پژوهش عددی سه‌بعدی، رفتار انکر صفحه‌ای افقی بزرگ‌مقیاس در ماسه مسلح با ژئوگرید بررسی و مشخص شد که بیشترین کارایی ژئوگرید زمانی حاصل می‌شود که عرض آن تقریباً سه برابر عرض انکر باشد. همچنین کارایی تقویت با افزایش عرض انکر و افزایش عمق مدفون‌شدگی کاهش می‌یابد و ژئوگرید برای انکرهای کم‌عمق در ماسه سست مؤثرتر است [۲۰]. به‌طور کلی، پژوهش‌های اخیر همگی مؤید آن هستند که استفاده از ژئوگرید (با طراحی بهینه تعداد، طول و موقعیت لایه‌ها) روشی مؤثر برای افزایش مقاومت برکنش مهار صفحه‌ای در خاک‌های دانه‌ای است.

¹ Particle Image Velocimetry

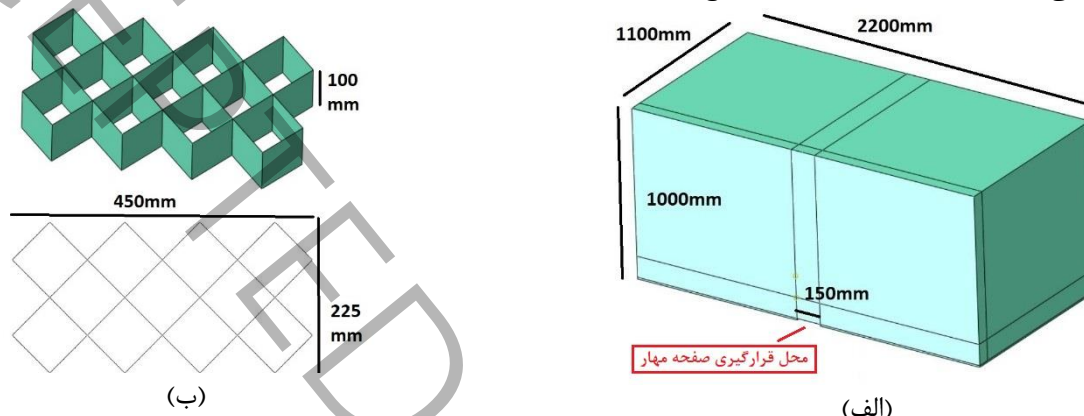
² Optical Frequency Domain Reflectometry

۲- مصالح و روش‌ها

۲-۱- روش‌شناسی مدل‌سازی عددی

۲-۱-۱- هندسه مدل

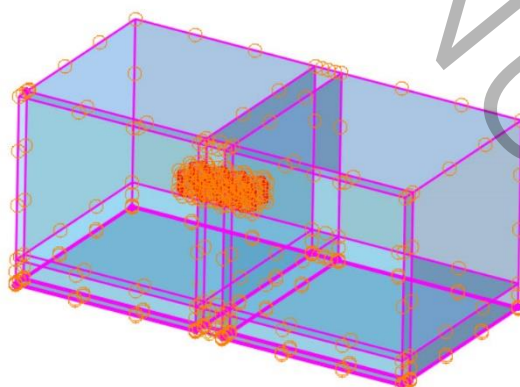
در این پژوهش جهت مدل‌سازی عددی سه‌بعدی از نرم‌افزار ABAQUS 6.14 استفاده شد که این مدل‌سازی شامل یک مهار صفحه‌ای افقی مدفون در مرکز یک توده خاک ماسه‌ای، به همراه تسلیح ژئوسنتتیک (ژئوسل و ژئوگرید) در پیکربندی‌های مختلف بود. شکل کلی مدل و نحوه قرارگیری عناصر مسلح‌کننده به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- هندسه مدل منطبق بر پژوهش مرجع ([۴]) جهت صحت‌سنجی در نرم‌افزار ABAQUS: الف) هندسه توده خاک؛ ب) هندسه لایه ژئوسل

Figure 1- Model geometry according to reference research ([4]) for validation in ABAQUS software: a) Soil mass geometry; b) Geocell layer geometry

سیستم خاک-مهار-ژئوسنتتیک مدل شده در پژوهش کنونی، براساس پژوهش رحیمی و همکاران [۴]، مدل‌سازی و بازطراحی شده است که از آن تحت عنوان پژوهش مرجع یاد خواهد شد. طبق پژوهش مرجع [۴]، ابعاد توده خاک $2200 \times 2200 \times 1000$ میلی‌متر، مهار صفحه‌ای به ابعاد 150×150 و به ضخامت $25/4$ میلی‌متر در عمق 900 میلی‌متری از سطح خاک و یک لایه ژئوسل با ابعاد پاکت‌های $110 \times 110 \times 100$ میلی‌متر بود.

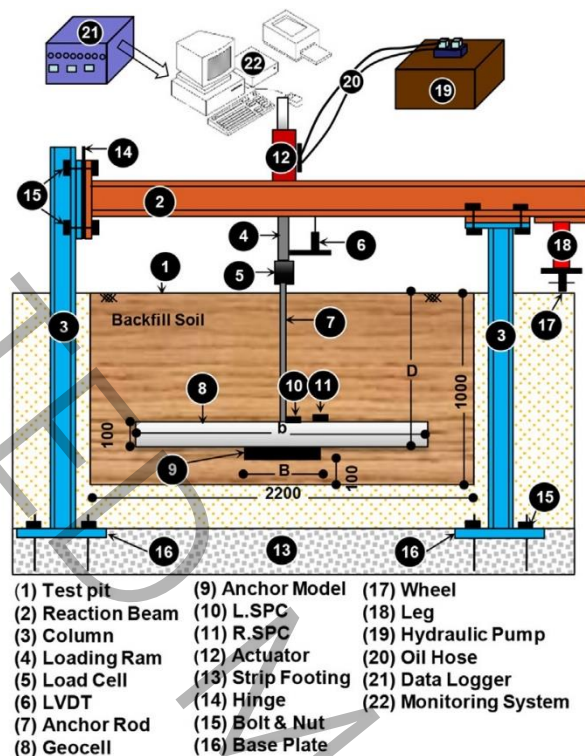


شکل ۲- استفاده از قید Embedded Region در مدل عددی برای تعریف ژئوسل در درون توده خاک

Figure 2- Using the Embedded Region constraint in the numerical model to define the geocell within the soil mass

در پژوهش مرجع، ابعاد مهار صفحه‌ای B ، عرض لایه ژئوسل b و فاصله ژئوسل از سطح خاک برابر D در نظر گرفته شده و به‌ازای نسبت‌های مختلف D/B ، آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده است؛ به‌طوری‌که نسبت b/B همواره ثابت و برابر ۳ و آزمایش‌ها به‌ازای 900 و 675 ، $b=450$ میلی‌متر انجام شد. در پژوهش کنونی، مدل با نسبت‌های $D/B=2$ و $b/B=3$ ، در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی

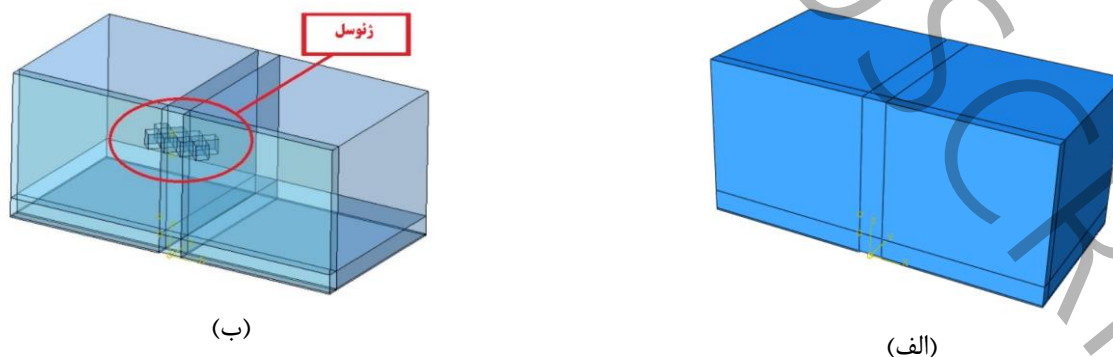
شد. به عبارت دیگر، فاصله ژئوسل از سطح خاک $D=300$ و عرض کل لایه ژئوسل $b=450$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین به دلیل تقارن، نیمی از مدل آزمایشگاهی در نرم‌افزار ABAQUS شبیه‌سازی و از قیود تقارنی برای شبیه‌سازی نیمه دیگر مدل استفاده و ژئوسل به صورت قید Embedded Region مدل شد (شکل ۲). شماتیکی از مدل ارائه شده در پژوهش مرجع، در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳- شماتیک مدل آزمایشگاهی پژوهش مرجع (۴)

Figure 3- Schematic of the reference research laboratory model (4)

در پژوهش کنونی تنها خاک و ژئوسل شبیه‌سازی و انکر حذف و به جای آن اثر مهار صفحه‌ای و محل قرارگیری آن روی خاک ایجاد و جابجایی ناشی از آن بر مدل اعمال شد. مدل‌های شبیه‌سازی برای دو حالت غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل در شکل ۴ نشان شده است؛ در حالت غیرمسلح تنها خاک شبیه‌سازی شده و در حالت مسلح، ژئوسل در فاصله ۳۰۰ میلی‌متری از سطح خاک قرار گرفته است.



(ب)

(الف)

شکل ۴- الگوی مدل برای: (الف) حالت غیرمسلح؛ (ب) حالت مسلح شده با ژئوسل
Figure 4- Model schematic for: a) unreinforced; b) reinforced with geocell

۲-۱-۲- خواص مکانیکی مصالح

خاک مدل شده، ماسه یکنواخت با مدل رفتاری الاستوپلاستیک با معیار گسیختگی موهر-کولمب انتخاب شد. پارامترهای ماسه و ژئوسل که براساس پژوهش مرجع انتخاب شده، در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. نکته‌های حائز اهمیت آن است که اولاً زاویه اصطکاک داخلی خاک براساس ماسه نسبتاً متراکم پژوهش مرجع [۴] ($\phi=40/5^\circ$) فرض شده است که در نتیجه، مقادیر مطلق ظرفیت برکنشی گزارش شده، برای خاک‌هایی با زاویه اصطکاک کمتر یا شرایط تراکم متفاوت نیازمند تحلیل مجدد با پارامترهای متناظر آن خاک است؛ هرچند می‌توان از روندهای نسبی و الگوهای مشاهده شده در پژوهش کنونی، به‌عنوان راهنمایی اولیه برای طراحی در سایر شرایط نیز بهره گرفت و ثانیاً ژئوسل مورد استفاده در آزمایش پژوهش مرجع، از نوعی ژئوتکستایل پلیمری نبافته ساخته شده که برای ساخت یک ژئوسل بدون سوراخ، با روش حرارتی جوش داده شده بود. طبق گفته سازنده (TDP Limited)، مقاومت کششی و سختی اتصال ژئوسل، بیشتر یا مشابه با ماده دیوار ژئوسل (یعنی ژئوتکستایل) است که از پارگی درز جلوگیری می‌کند [۲۱]. همچنین خاک ماسه‌ای به صورت یکنواخت و همگن در نظر گرفته شده است که این فرض براساس شرایط آزمایشگاهی پژوهش مرجع [۴] و کنترل تراکم ($R_d \approx 92\%$) اتخاذ شده است. در شرایط طبیعی و میدانی، ماسه ممکن است از نظر تراکم، رطوبت و دانه‌بندی کاملاً یکنواخت نبوده و این موضوع می‌تواند بر رفتار سیستم و ظرفیت برکنشی تأثیرگذار باشد.

جدول ۲- مشخصات مهندسی ژئوتکستایل ([۴])
Table 2- Geotextile engineering properties ([4])

پارامتر	مقدار
نوع ژئوتکستایل	بافته نشده
جنس ژئوتکستایل	پلی پروپیلن
وزن واحد سطح (g/cm^2)	۱۹۰
ضخامت تحت بار ۲ کیلوپاسکال (mm)	۰/۵۷
ضخامت تحت بار ۲۰۰ کیلوپاسکال (mm)	۰/۴۷
مقاومت کششی (kN/m)	۱۳/۱
مقاومت در کرنش ۵٪ (kN/m)	۵/۷
اندازه بازشدگی مؤثر (mm)	۰/۰۸

جدول ۱- ویژگی‌های مکانیکی توده خاک مورد استفاده در تحلیل عددی ([۴])
Table 1- Mechanical properties of soil mass used in numerical analysis ([4])

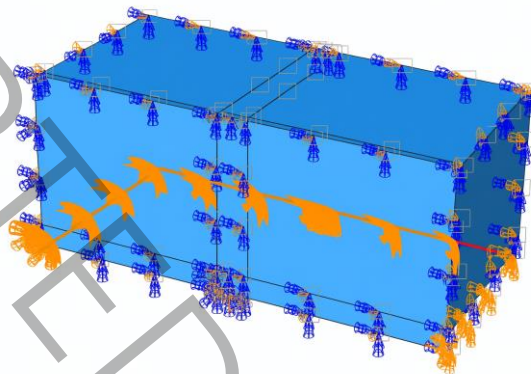
پارامتر	مقدار
زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	$40/5^\circ$
زاویه اتساع (ψ)	10°
مدول الاستیسیته (E_s)	۷۰ (MPa)
نسبت پواسون (ν)	۰/۳
وزن مخصوص خاک (γ)	$19/72 \text{ (kN/m}^3\text{)}$

۲-۱-۳- مهار صفحه‌ای

مهار صفحه‌ای به صورت یک صفحه صلب مربعی شکل با عرض B (بعد افقی مهار) مدل‌سازی شد. ضخامت مهار نسبت به ابعاد آن ناچیز فرض شد؛ به‌طوری‌که مهار عملاً به‌صورت یک المان صلب دو بعدی (صفحه‌ای) عمل می‌کند. در بیشتر تحلیل‌ها، عمق مدفون شدن مهار، دو برابر عرض مهار ($D/B=2$) در نظر گرفته شده است که یک عمق مدفون متوسط محسوب می‌شود. این مقدار عمق طوری انتخاب شد که مهار کاملاً در داخل لایه ماسه قرار گرفته تا از تأثیر سطحی صرف اجتناب شود. دلیل مدل‌سازی مهار صفحه‌ای به‌صورت یک صفحه صلب، تحلیل رفتار خاک و مکانیزم برکنشی در حضور تسلیحات ژئوسنتتیک است و صفحه صرفاً نقش انتقال‌دهنده نیرو را دارد و ظرفیت برکنشی عملاً توسط رفتار خاک کنترل می‌شود. همچنین نتایج پژوهش‌ها نشان می‌دهد که در تحلیل ظرفیت برکنشی، رفتار انکر نسبت به خاک تقریباً صلب است و مدل‌سازی حجمی یا سازه‌ای آن، تأثیر معنی‌داری بر مکانیزم گسیختگی خاک ندارد [۴، ۲۲].

۲-۱-۴- شرایط مرزی

ابعاد حوزه مدل عددی به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شد تا اثر مرزی ناخواسته به حداقل برسد. به طور مشخص، دامنه خاک به صورت مکعبی با ابعاد جانبی بیش از ۵ برابر عرض مهار (5B) در هر سمت تعریف و شرایط مرزی شامل گیردار کردن کف مدل (عدم حرکت در تمامی جهتها) و مهار جانبی اطراف مدل (در جهت‌های x و y) اعمال شد که این شرایط مرزی مانع خروج یا جابجایی خاک در اطراف محیط مدل شده و شرایطی شبیه به محیط نیمه‌بی‌نهایت خاک ایجاد می‌کند (شکل ۵). همچنین جابجایی ۲۰ میلی‌متری ناشی از جابجایی صفحه مهار در راستای z که در مدل آزمایشگاهی توسط جک به مهار صفحه‌ای منتقل شده، به محل قرارگیری آن اعمال شده است.

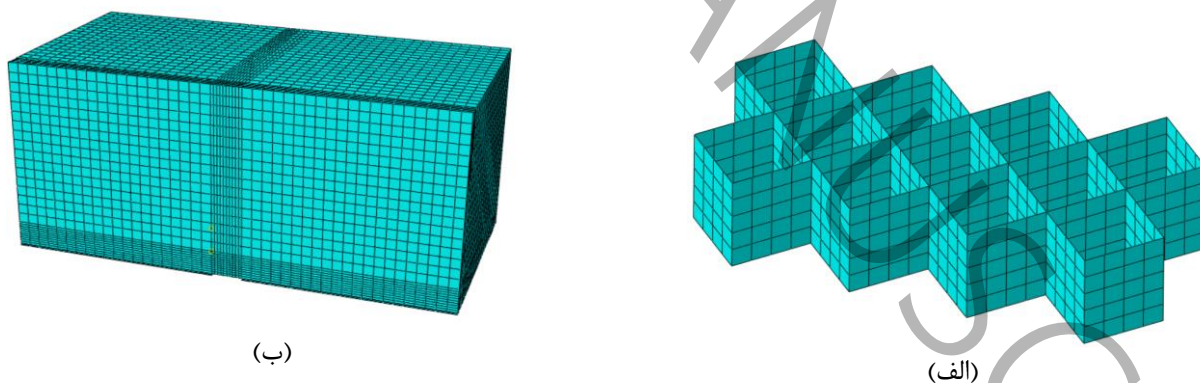


شکل ۵- مقید نمودن کف و مهار جانبی اطراف مدل

Figure 5- Floor binding and lateral constraint around the model

۲-۱-۵- مش‌بندی

نوع مش‌بندی استفاده شده برای ژئوسل، مش S4R است که یک مش پوسته‌ای چهار گرهی با اندازه ۲۰ میلی‌متر و مش به کار رفته برای خاک، مش C3D8P بوده که یک المان سه‌بعدی هشت گرهی مخصوص خاک و با اندازه ۵ میلی‌متر است که اندازه آن در محل نزدیک به صفحه مهار، ریزتر شده و به مقدار ۱ میلی‌متر رسیده است. شماتیکی از مدل‌های مش‌بندی در شکل ۶ ارائه شده است.



شکل ۶- مش‌بندی مدل: (الف) مش‌بندی لایه ژئوسل با مش نوع S4R؛ (ب) مش‌بندی توده خاک با مش نوع C3D8P

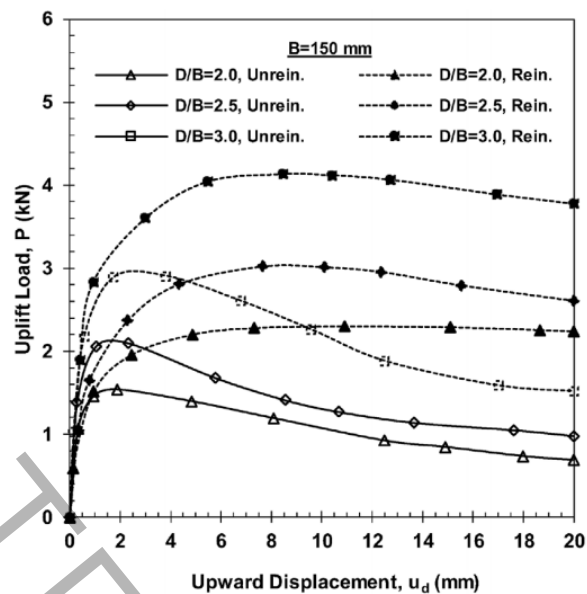
Figure 6- Model meshing: a) Geocell layer meshing with S4R mesh type; b) Soil mass meshing with C3D8P mesh type

۲-۱-۶- صحت‌سنجی مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

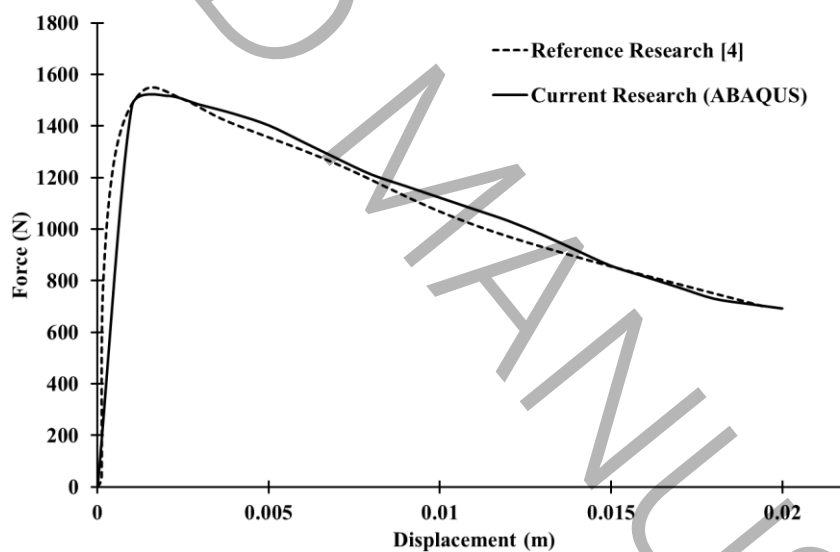
در ابتدا مدل‌ها با نسبت‌های $D/B=2$ و $b/B=3$ در دو حالت غیرمسلح و مسلح شده با ژئوسل جهت صحت‌سنجی مدل عددی با پژوهش مرجع تحلیل شد که فازهای این تحلیل عددی به این صورت است:

۱- حالت غیرمسلح

نتایج مربوط به نمودار بار-جابجایی با نسبت‌های مختلف D/B در پژوهش مرجع در شکل ۷ و مقایسه آن با نمودار بار-جابجایی به‌دست آمده از تحلیل عددی نرم‌افزار ABAQUS در حالت غیرمسلح در شکل ۸ نشان شده است.



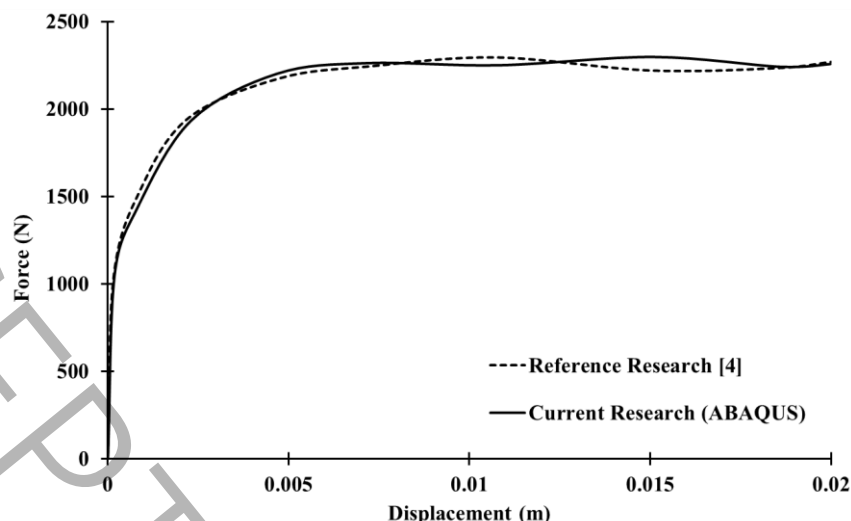
شکل ۷- نمودار نتایج بار-جابجایی در پژوهش مرجع برای حالت‌های مختلف D/B ([۴])
 Figure 7- Load-displacement results diagram in the reference study for different D/B ([4])



شکل ۸- مقایسه نتایج بار-جابجایی برای حالت غیرمسلح با $D/b=2$ و $b/B=3$
 Figure 8- Comparison of load-displacement results for the unreinforced state at $D/b=2$ and $b/B=3$

۲- حالت مسلح

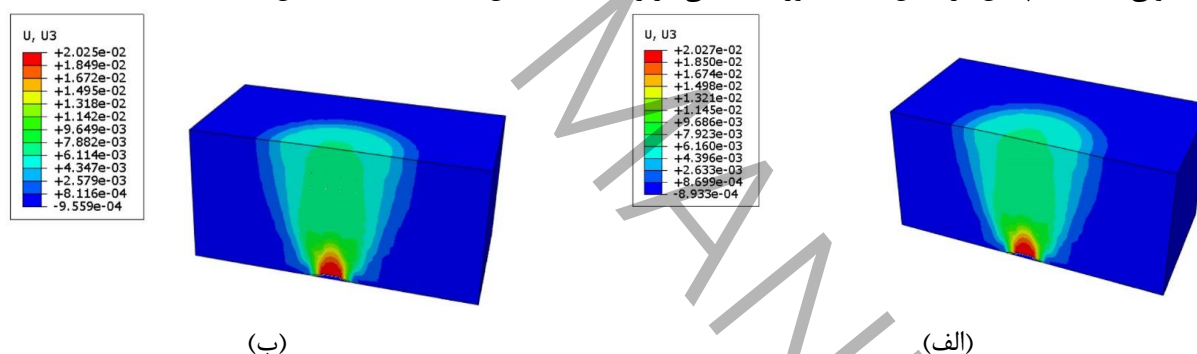
نمودار بار-جابجایی پژوهش مرجع و مقایسه آن با نمودارهای بار-جابجایی به دست آمده از تحلیل عددی نرم‌افزار ABAQUS در حالت مسلح نیز در شکل ۹ نمایش داده شده است.



شکل ۹- مقایسه نتایج بار-جابجایی برای حالت مسلح شده با ژئوسل با نسبت‌های $D/b=2$ و $b/B=3$

Figure 9- Comparison of load-displacement results for the reinforced state with geocells at ratios $D/b=2$ and $b/B=3$

همان‌طور که در اشکال ۸ و ۹ مشاهده می‌شود، نتایج تحلیل عددی ABAQUS تطابق بسیار خوبی با نتایج به‌دست آمده در پژوهش مرجع دارد و اختلاف اندک بین نتایج را می‌توان ناشی از خطای مش‌بندی دانست که بیانگر دقت بالای مدل عددی سه‌بعدی پژوهش کنونی است. همچنین در شکل ۱۰، کانتور جابه‌جایی در راستای (z) مدل عددی سه‌بعدی نشان داده شده است.



شکل ۱۰- کانتور جابه‌جایی قائم به‌دست آمده از نرم افزار ABAQUS: (الف) حالت غیرمسلح؛ (ب) حالت مسلح شده با ژئوسل

Figure 10- Vertical displacement contour obtained from ABAQUS software: a) Unreinforced state; b) Geocell reinforced state

۲-۲- سناریوهای مدل‌سازی

در ادامه مدل‌سازی و بعد از اطمینان از دقت مدل عددی سه‌بعدی، مطالعه پارامتریک عددی گسترده انجام شد که برنامه آن در جدول ۳ ارائه شده است. مدل‌های عددی شامل ۲۲ مدل است که در پنج گروه اصلی تقسیم‌بندی شده‌اند. پارامترهای خاک، ژئوسل و شرایط مرزی، مشابه مدل عددی پایه (مدل صحت‌سنجی شده) بوده و هدف از این مدل‌ها، بررسی عوامل مؤثر بر رفتار مهار صفحه‌ای در حالت مسلح و ظرفیت باربری مهارهای صفحه‌ای است. پنج گروه اصلی به‌این شرح است:

گروه اول: بررسی اثر فاصله دو ژئوسل نسبت به یکدیگر؛

گروه دوم: بررسی اثر فاصله ژئوگرید جانمایی شده در بالا و پایین ژئوسل؛

گروه سوم: بررسی اثر تغییر ارتفاع پاکت‌های ژئوسل؛

گروه چهارم: بررسی تغییر محل بارگذاری از یک ناحیه به دو ناحیه؛

گروه پنجم: بررسی اثر خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به ناحیه اعمال بار برکنش.

بارگذاری مهار به صورت نیروی کششی استاتیکی اعمال شد. به این منظور، جابجایی کنترل شده‌ای به صورت حرکت رو به بالا به مرکز مهار اعمال و واکنش نیرویی متناظر در گره‌های مهار ثبت شد. نرخ جابجایی بارگذاری به اندازه کافی کند انتخاب شد تا حالت شبه‌استاتیک (زهکشی کامل در خاک ماسه‌ای) برقرار باشد. منحنی نیرو-جابجایی مهار تا رسیدن به ظرفیت نهایی برکنش (P_u) ادامه یافت؛ به طوری که در این پژوهش معیار تعیین ظرفیت نهایی برکنش، رسیدن به جابجایی بزرگ حدود ۲۰ میلی‌متر (کمی بیشتر از ۱۰٪ عرض مهار) است. پس از هر تحلیل، شکل توزیع تغییرمکان و ناحیه تسلیم خاک استخراج و بررسی شد تا مکانیسم گسیختگی مشخص شود.

جدول ۳- برنامه مدل‌سازی‌های عددی انجام شده در پژوهش کنونی

Table 3- Numerical modeling program performed in the current research

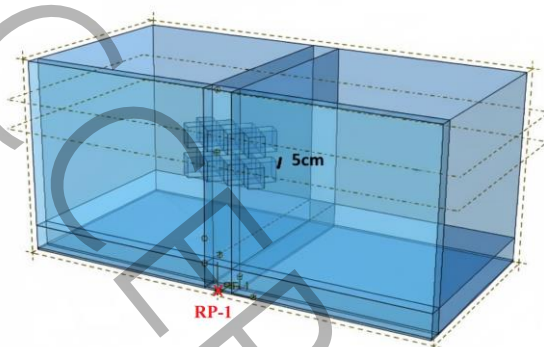
شماره گروه تحلیل	پارامتر مورد بررسی	مقادیر در نظر گرفته شده	تعداد تحلیل‌های عددی
۱	فاصله دو لایه ژئوسل (سانتی‌متر)	۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵	۵
۲	فاصله ژئوگرید جانمایی شده در بالا و پایین ژئوسل	ژئوگرید چسبیده به پایین ژئوسل	۹
		ژئوگرید در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از پایین ژئوسل	
		ژئوگرید در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از پایین ژئوسل	
		ژئوگرید در فاصله ۳۰ سانتی‌متری از پایین ژئوسل	
		ژئوگرید در فاصله ۴۰ سانتی‌متری از پایین ژئوسل	
		بدون ژئوگرید (مدل پایه)	
		ژئوگرید چسبیده به بالای ژئوسل	
		ژئوگرید در فاصله ۵ سانتی‌متری از بالای ژئوسل	
		ژئوگرید در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از بالای ژئوسل	
		ژئوگرید در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از بالای ژئوسل	
۳	ارتفاع پاکت‌های ژئوسل (سانتی‌متر)	۵، ۱۰ (مدل پایه) و ۱۵	۲
۴	تعداد مهار صفحه	۱ (مدل پایه) و ۲	۱
۵	خروج از مرکزیت لایه ژئوسل (سانتی‌متر)	صفر (مدل پایه)، ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵	۵

۳- نتایج و تفسیر

۳-۱- آنالیز گروه اول

در گروه اول، یک لایه ژئوسل دیگر در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر در زیر ژئوسل مدل پایه قرار گرفت. برای نمونه، هندسه مدل عددی با دو لایه ژئوسل که در فاصله ۵ سانتی‌متری از یکدیگر قرار گرفته‌اند و نحوه موقعیت قرارگیری این دو لایه نسبت به یکدیگر در مدل عددی، به ترتیب در اشکال ۱۱ و ۱۲ نمایش داده شده است. با افزودن یک لایه ژئوسل در فواصل مشخص از یکدیگر، ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای نسبت به مدل پایه که ظرفیت باربری آن برابر با ۲۳۰۰ نیوتن است، افزایش می‌یابد. تغییرات ظرفیت باربری مهار با فاصله ژئوسل‌ها نسبت به یکدیگر که در جدول ۴ شرح داده

شده است، نسبت عکس دارد. شکل ۱۳ نشان می‌دهد با افزایش فاصله ژئوسل‌ها، مقادیر منحنی بار-جابجایی مدل‌ها تقریباً با یک روند منظم و مشخص کاهش پیدا می‌کند. نمونه‌ای از کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) در شکل ۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۱۲- هندسه مدل عددی با دو لایه ژئوسل به فاصله ۵ سانتی متر

Figure 12- Numerical model geometry with two geocell layers 5 cm apart



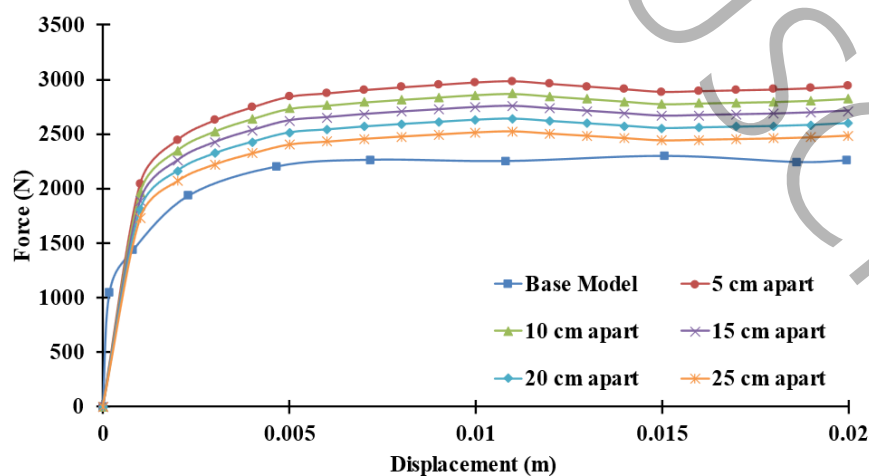
شکل ۱۱- موقعیت دو ژئوسل نسبت به یکدیگر

Figure 11- The position of two geocells relative to each other

جدول ۴- نتایج گروه اول: بررسی اثر فاصله دو ژئوسل نسبت به یکدیگر

Table 4- Results of the first group: Effect of the distance between two geocells relative to each other

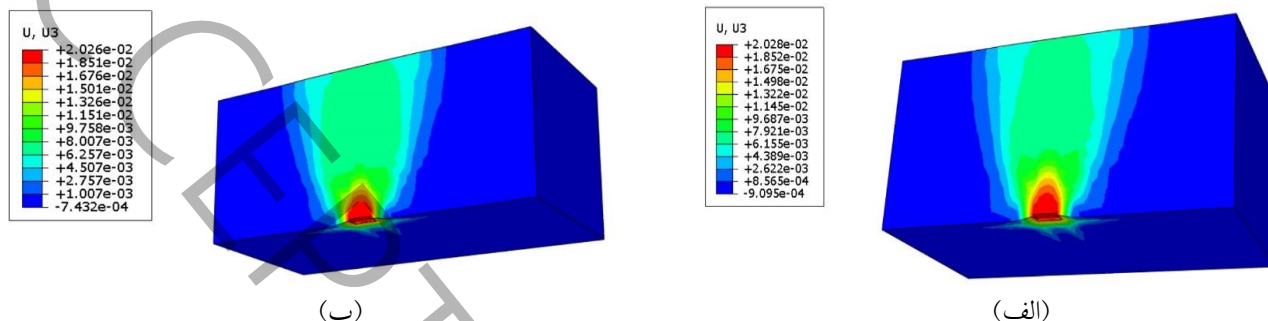
فاصله دو ژئوسل (سانتی‌متر)	ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای (نیوتن)	درصد افزایش نسبت به مدل پایه (%)
یک لایه ژئوسل (مدل پایه)	۲۳۰۰	۰
۵	۳۰۰۰	۳۰/۴
۱۰	۲۸۵۰	۲۳/۹
۱۵	۲۷۰۰	۱۷/۴
۲۰	۲۶۰۰	۱۳/۰
۲۵	۲۵۰۰	۸/۷



شکل ۱۳- نمودار بار-جابجایی گروه اول: بررسی اثر فاصله دو ژئوسل نسبت به یکدیگر

Figure 13- Load-displacement diagram of the first group: Effect of the distance between two geocells relative to each other

در واقع قرارگیری دو لایه ژئوسل در فاصله نزدیک، بیشترین کارایی را دارد. با افزایش فاصله، کارایی به‌طور یکنواخت کاهش پیدا می‌کند و هرچه فاصله بین لایه‌های ژئوسل بیشتر شود، مزیت حضور دو ژئوسل به حداقل می‌رسد. همچنین با توجه به شکل ۱۴، سطح گسیختگی مدل از حالت نسبتاً عمودی، حبابی شکل شده است.



شکل ۱۴- نمونه کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) گروه اول: الف) دو لایه ژئوسل با فاصله ۱۰ سانتی‌متر؛ ب) دو لایه ژئوسل با فاصله ۲۵ سانتی‌متر

Figure 14- Example of displacement distribution contours in the direction of load application (z) of the first group: a) Two layers of geocell with a distance of 10 cm; b) Two layers of geocell with a distance of 25 cm

۳-۲- آنالیز گروه دوم

در این گروه، یک لایه ژئوگرید با مشخصات مطابق با جدول ۵ به مدل پایه اضافه شد که به‌ترتیب در بالا و پایین ژئوسل و در فواصل مختلف قرار گرفته است. در این گروه نه مدل تحلیل و نتایج آن در جدول ۶ ارائه شده است. نمایی از ژئوگرید قرار گرفته روی ژئوسل در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

جدول ۵- مشخصات مصالح ژئوگرید در راستای محور ضعیف

Table 5- Geogrid material properties along the weak axis

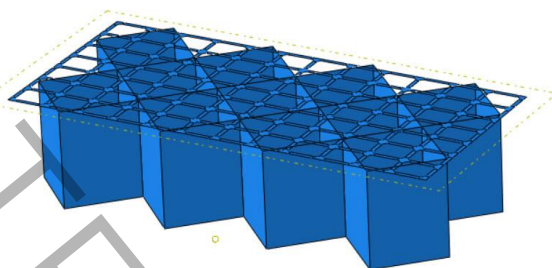
جهت	سایز چشمه (mm)	ابعاد نمونه (mm)		تعداد نوارها		مقاومت کششی نهایی (kN/m)	جرم واحد سطح (g/m ²)	سختی در کرنش ۲٪ (kN/m)
		عرض	طول	نوار طولی	نوار عرضی			
MD	۲۹	۷۸	۱۴۹	۳	۶	۱۲	۲۱۵	۲۰۴

جدول ۶- نتایج گروه دوم: بررسی اثر فاصله ژئوگرید جانمایی شده در بالا و پایین ژئوسل

Table 6- Results of the second group: Effect of the distance of the geogrid placed above and below the geocell

موقعیت ژئوگرید	ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای (نیوتن)	درصد افزایش نسبت به مدل پایه (%)
ژئوگرید چسبیده به پایین ژئوسل	۲۷۵۰	۱۹/۶
ژئوگرید در فاصله ۱۰ سانتی‌متری پایین ژئوسل	۲۸۰۰	۲۱/۷
ژئوگرید در فاصله ۲۰ سانتی‌متری پایین ژئوسل	۳۰۰۰	۳۰/۴
ژئوگرید در فاصله ۳۰ سانتی‌متری پایین ژئوسل	۳۱۰۰	۳۴/۸
ژئوگرید در فاصله ۴۰ سانتی‌متری پایین ژئوسل	۳۲۰۰	۳۹/۱
بدون ژئوگرید (مدل پایه)	۲۳۰۰	.

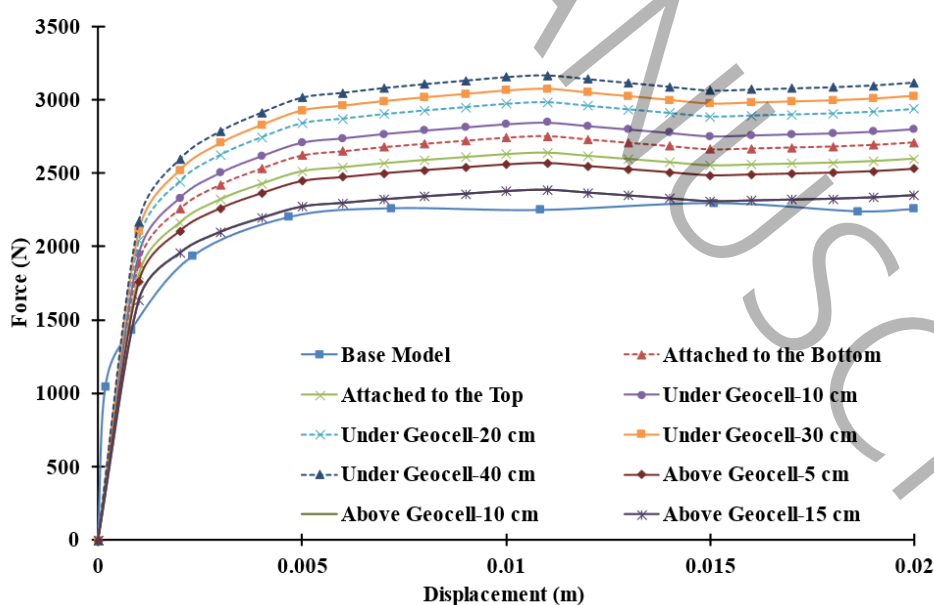
۱۳/۰	۲۶۰۰	ژئوگرید چسبیده به بالای ژئوسل
۸/۷	۲۵۰۰	ژئوگرید در فاصله ۵ سانتی متری بالای ژئوسل
۶/۵	۲۴۵۰	ژئوگرید در فاصله ۱۰ سانتی متری بالای ژئوسل
۲/۲	۲۳۵۰	ژئوگرید در فاصله ۱۵ سانتی متری بالای ژئوسل



شکل ۱۵- نمایی از ژئوگرید قرار گرفته بر روی ژئوسل در مدل

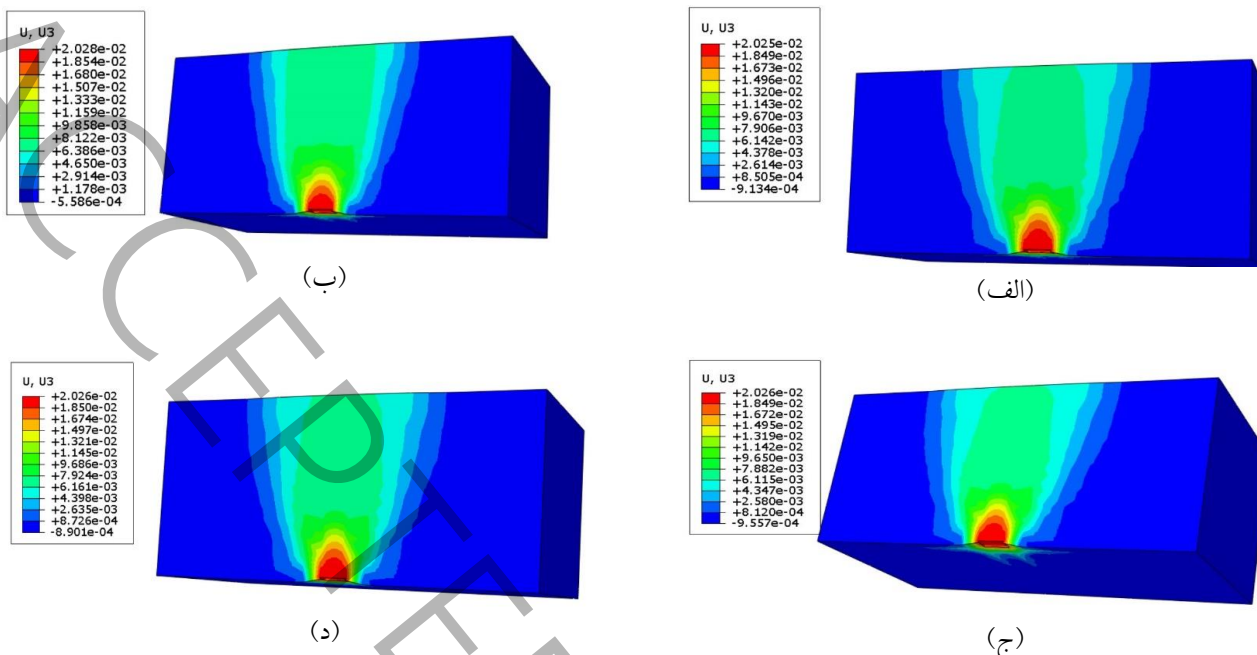
Figure 15- A view of the geogrid placed on the geocell in the model

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۶ مشاهده می شود علیرغم آن که هر چه ژئوگرید در عمق پایین تر نسبت به ژئوسل قرار گیرد، روند تغییرات ظرفیت باربری آن صعودی و از ۱۹/۵٪ تا ۳۹/۱٪ می رسد؛ با افزایش فاصله ژئوگرید از ژئوسل به سمت بالا، روند تغییرات ظرفیت باربری کاهشی است؛ به طوری که در فاصله ۱۵ سانتی متری ژئوگرید از بالای ژئوسل، تنها ۲/۲٪ افزایش ظرفیت باربری مشاهده می شود. نمودار بار-جابجایی فاصله های مختلف ژئوگرید نسبت به ژئوسل در بالا و پایین آن، در شکل ۱۶ و ۴ مورد از کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) در شکل ۱۷ ارائه شده است.



شکل ۱۶- نمودار بار-جابجایی گروه دوم: بررسی اثر فاصله ژئوگرید جانمایی شده در بالا و پایین ژئوسل

Figure 16- Load-displacement diagram of the second group: Effect of the distance of the geogrid placed above and below the geocell



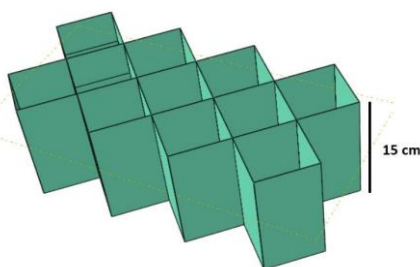
شکل ۱۷- نمونه کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) گروه دوم: (الف) ژئوگرید پایین ژئوسل در فاصله ۱۰ سانتی متر؛ (ب) ژئوگرید پایین ژئوسل در فاصله ۴۰ سانتی متر؛ (ج) ژئوگرید چسبیده به بالای ژئوسل؛ (د) ژئوگرید بالای ژئوسل در فاصله ۱۵ سانتی متر

Figure 17- Sample displacement distribution contours in the direction of load application (z) of the second group: a) geogrid below the geocell at a distance of 10 cm; b) geogrid below the geocell at a distance of 40 cm; c) geogrid attached to the top of the geocell; d) geogrid above the geocell at a distance of 15 cm

۳-۳- آنالیز گروه سوم

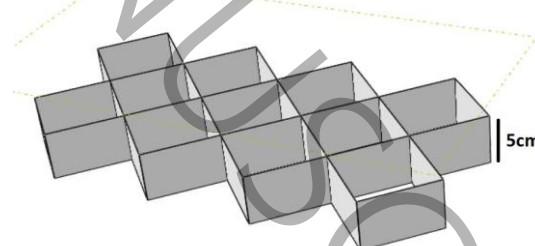
در مدل پایه، ارتفاع پاکت ژئوسل برابر ۱۰ سانتی متر است. در گروه سوم، ارتفاع پاکت های ۵ و ۱۵ سانتی متری مورد بررسی قرار گرفتند (اشکال ۱۸ و ۱۹). نتایج نشان دادند، افزایش ارتفاع پاکت منجر به افزایش ظرفیت باربری مهار صفحه ای می شود. نتایج در جدول ۷ ارائه شده است.

نمودار بار-جابجایی برای مقادیر مختلف ارتفاع پاکت ژئوسل در شکل ۲۰ و کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) گروه سوم در شکل ۲۱ ارائه شده است.



شکل ۱۹- نمایی از ژئوسل با ارتفاع ۱۵ سانتی متر

Figure 19- View of a 15 cm-high geocell



شکل ۱۸- نمایی از ژئوسل با ارتفاع ۵ سانتی متر

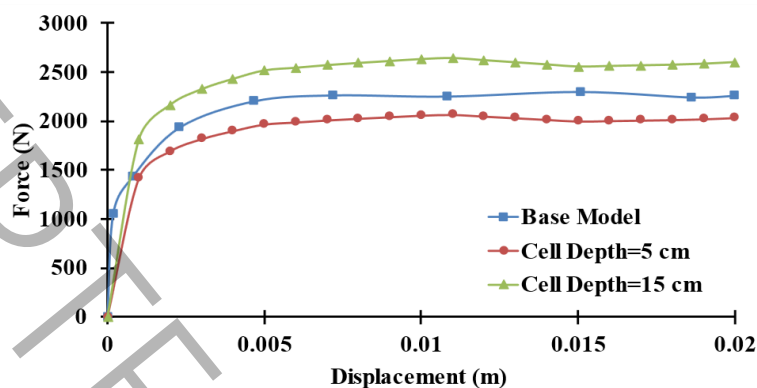
Figure 18- View of a 5 cm-high geocell

جدول ۷- نتایج گروه سوم: بررسی اثر تغییر ارتفاع پاکت های ژئوسل

Table 7- Results of the third group: Effect of changing the height of geocell pockets

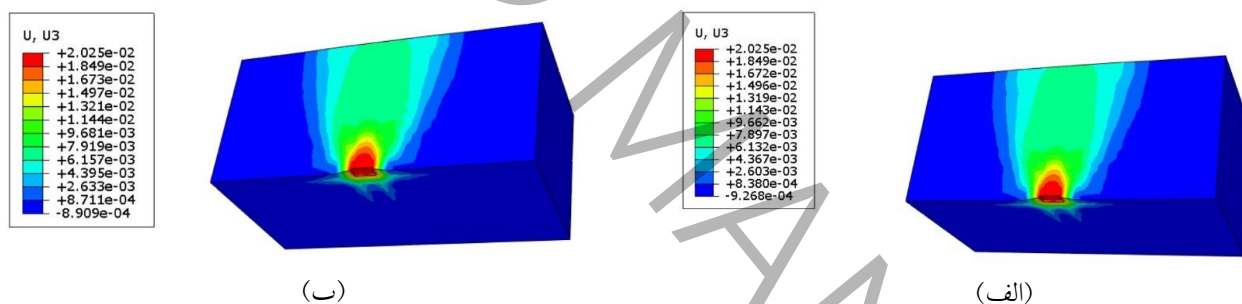
ارتفاع پاکت ژئوسل (سانتی متر) ظرفیت باربری مهار صفحه ای (نیوتن) درصد تغییر نسبت به مدل پایه (%)

-۱۳/۰	۲۰۰۰	۵
۰	۲۳۰۰	۱۰ (مدل پایه)
+۱۳/۰	۲۶۰۰	۱۵



شکل ۲۰- نمودار بار-جابجایی گروه سوم: بررسی اثر تغییر ارتفاع پاکت‌های ژئوسل

Figure 20- Load-displacement diagram of the third group: Effect of changing the height of geocell pockets

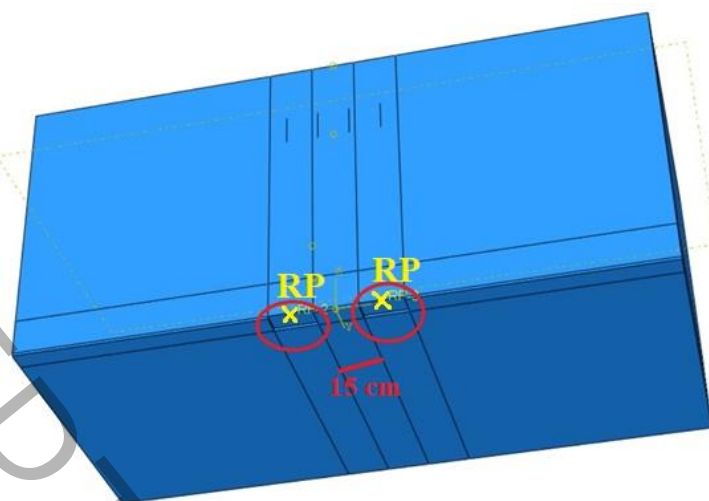


شکل ۲۱- کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) گروه سوم: الف) ارتفاع پاکت ژئوسل ۵ سانتی‌متر؛ ب) ارتفاع پاکت ژئوسل ۱۵ سانتی‌متر

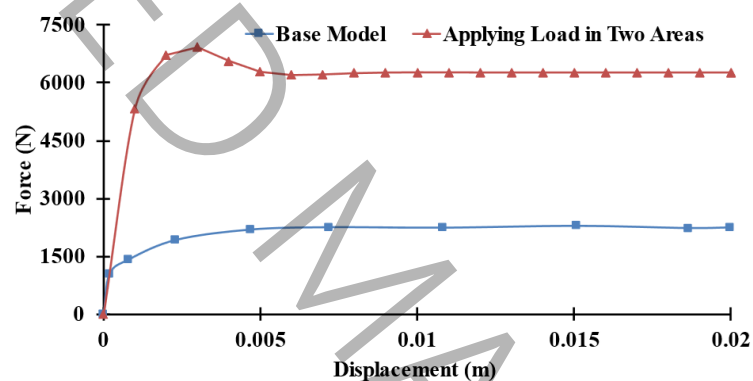
Figure 21- Displacement distribution contours in the direction of load application (z) of the third group: a) Geocell pocket height 5 cm; b) Geocell pocket height 15 cm

۳-۴- آنالیز گروه چهارم

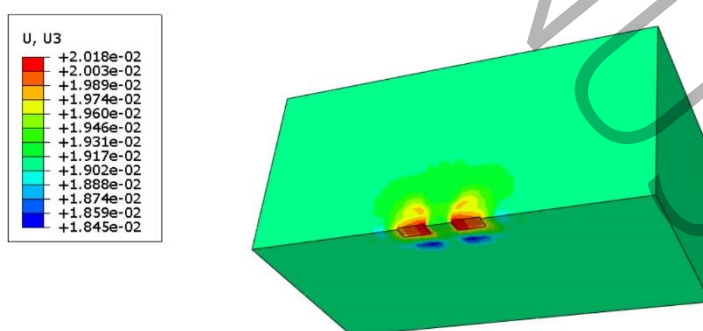
در گروه چهارم، ناحیه بارگذاری از یک مهار صفحه‌ای با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر به دو صفحه مهار با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر و فاصله ۱۵۰ میلی‌متر تغییر داده شد (شکل ۲۲). بررسی عددی این حالت نشان داد مقدار ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای از ۲۳۰۰ نیوتن در مدل پایه به ۷۰۰۰ نیوتن رسیده که نشان‌دهنده افزایش بیش از ۲۰۴ درصدی ظرفیت باربری است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت افزایش تعداد نواحی اعمال بار برکنش سبب افزایش ظرفیت باربری مهارهای صفحه‌ای می‌شود (اشکال ۲۳ و ۲۴).



شکل ۲۲- نمایی از ژئوسل مدل با اعمال بار به دو مهار صفحه‌ای
Figure 22- View of the model geocell with load applied to two anchors



شکل ۲۳- نمودار بار-جابجایی گروه چهارم: بررسی اثر تغییر محل بارگذاری از یک ناحیه به دو ناحیه با فاصله ۱۵ سانتی‌متر
Figure 23- Load-displacement diagram of the fourth group: Effect of changing the loading location from one area to two areas with a distance of 15 cm



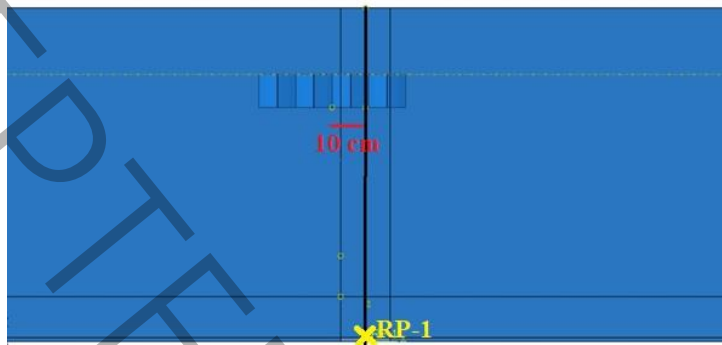
شکل ۲۴- کانتور توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) گروه چهارم
Figure 24- Displacement distribution contour in the direction of load application (z) of the fourth group

۵-۳- آنالیز گروه پنجم

در گروه پنجم، خروج از مرکزیت لایه ژئوسل در فواصل ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ سانتی‌متر نسبت به مرکز توده خاک که محل اعمال بار برکنش است، مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت که نتایج در

جدول ۸ ارائه شده است.

خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به محل بارگذاری، تأثیر مثبتی بر ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای دارد. هرچه خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به محل اعمال بار برکنش بیشتر می‌شود، کارایی نیز افزایش پیدا می‌کند؛ به طوری که ظرفیت باربری در خروج از مرکزیت ۲۵ سانتی‌متر، حدود ۳۰٪ نسبت به مدل پایه افزایش یافته است. نمایی از خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به مرکز توده خاک در شکل ۲۵ و نمودار بار-جابجایی خروج از مرکزیت ژئوسل برای فواصل مختلف نسبت به ناحیه اعمال بار برکنش، در شکل ۲۶ و نمونه کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) گروه پنجم در شکل ۲۷ ارائه شده است.



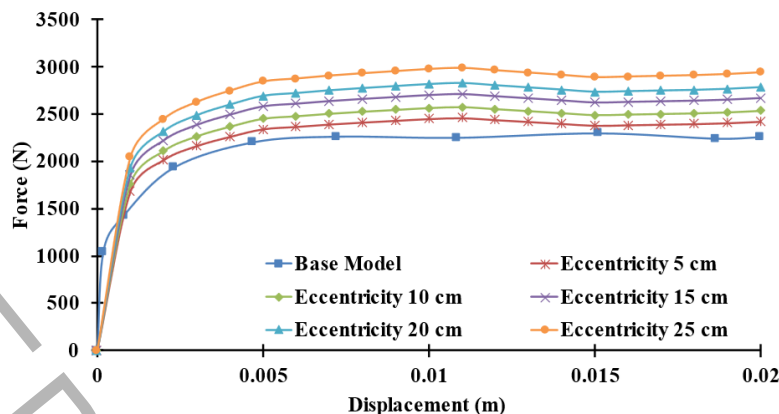
شکل ۲۵- نمایی از هندسه مدل با خروج ژئوسل از مرکز به فاصله ۱۰ سانتی‌متر

Figure 25- View of the model geometry with the geocell 10 cm eccentricity

جدول ۸- نتایج گروه پنجم: بررسی اثر خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به ناحیه اعمال بار برکنش

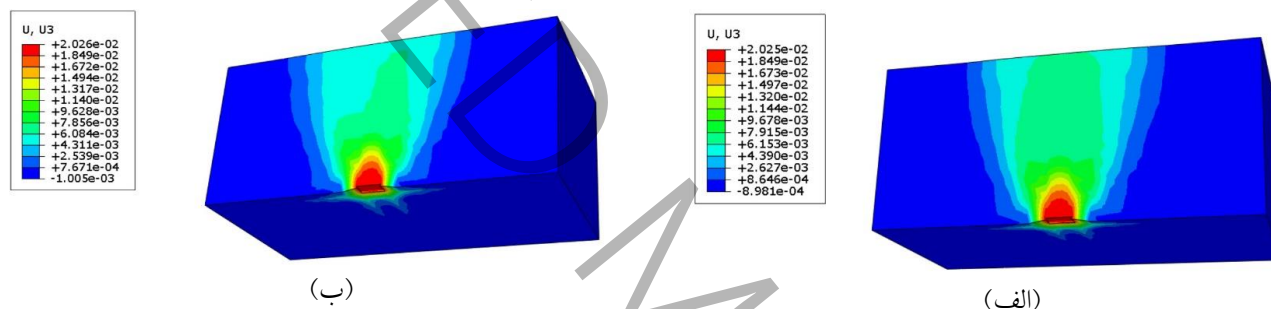
Table 8- Results of the fifth group: Effect of geocell eccentricity relative to the area of application of uplift load

خروج از مرکزیت (سانتی‌متر)	ظرفیت باربری مهار صفحه‌ای (نیوتن)	درصد تغییر نسبت به مدل پایه (%)
صفر (مدل پایه)	۲۳۰۰	۰
۵	۲۴۵۰	۶/۵
۱۰	۲۵۵۰	۱۰/۹
۱۵	۲۶۵۰	۱۵/۲
۲۰	۲۸۰۰	۲۱/۷
۲۵	۲۹۵۰	۲۸/۳



شکل ۲۶- نمودار بار-جابجایی گروه پنجم: بررسی اثر خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به ناحیه اعمال بار برکنش

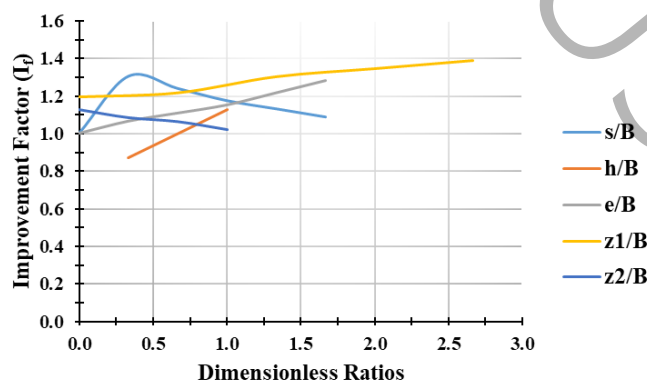
Figure 26- Load-displacement diagram of the fifth group: Effect of geocell eccentricity relative to the area of application of the uplift load



شکل ۲۷- نمونه کانتورهای توزیع جابجایی در راستای اعمال بار (z) گروه پنجم: الف) خروج از مرکزیت ۵ سانتی متر؛ ب) خروج از مرکزیت ۲۰ سانتی متر

Figure 27- Example of displacement distribution contours in the direction of load application (z) of the fifth group: a) 5 cm eccentricity; b) 20 cm eccentricity

در شکل ۲۸، نتایج به دست آمده از تحلیل‌های عددی برحسب نسبت بهبود ظرفیت باربری (نسبت ظرفیت باربری مدل مورد بررسی به ظرفیت باربری مدل پایه) صفحه بارگذاری در برابر پارامترهای نرمالیزه و بی بعد شده نسبت به عرض مهار در پژوهش کنونی ارائه شده و همان طور که نتیجه می‌شود، در بیشتر موارد پارامترهای مورد بررسی سبب افزایش ظرفیت باربری صفحه شده است.



شکل ۲۸- نمودار نسبت بهبود ظرفیت باربری در برابر پارامترهای نرمالیزه شده

Figure 28- Diagram of bearing capacity improvement ratio against normalized parameters

در شکل ۲۸، s/B نسبت فاصله دو ژئوسل به عرض مهار، h/B نسبت ارتفاع پاکت به عرض مهار، e/B نسبت فاصله خروج از مرکزیت به عرض مهار، $z1/B$ نسبت فاصله عمودی موقعیت ژئوگرید در پایین ژئوسل به عرض مهار و $z2/B$ نسبت فاصله عمودی موقعیت ژئوگرید در بالای ژئوسل به عرض مهار است.

۴- بحث

نتایج به دست آمده از مدل سازی عددی سه بعدی در نرم افزار ABAQUS نشان دهنده تأثیر قابل توجه ژئوسل و ژئوگرید بر بهبود ظرفیت باربری برکنشی مهارهای صفحه ای در خاک ماسه ای است.

در گروه اول، افزودن لایه دوم ژئوسل در فاصله نزدیک (۵ سانتی متر) منجر به افزایش $30/4\%$ ظرفیت باربری نسبت به مدل پایه شد که این بهبود با افزایش فاصله بین لایه ها به تدریج کاهش یافت و در فاصله ۲۵ سانتی متر، به تنها $8/7\%$ رسید. این روند معکوس را می توان به کاهش هم افزایی محصورشدگی سه بعدی خاک نسبت داد؛ جایی که توده خاک نزدیک تر به ژئوسل، با ایجاد یک سیستم یکپارچه تر، مقاومت برشی و اصطکاک دانه های خاک اطراف مهار را به طور مؤثرتری افزایش می دهند. در واقع با کاهش فاصله بین دو لایه ژئوسل، منطقه تداخل افزایش یافته و خاک میان دو لایه در یک ناحیه قفل شدگی سه بعدی قرار می گیرد. در این حالت، مسیر گسیختگی به صورت حبابی شکل توسعه یافته و نیروی برکنش به صورت گسترده تری در توده خاک توزیع شده که منجر به بهبود عملکرد صفحه مهار می شود؛ اما با افزایش فاصله لایه ها، نواحی مقاومتی کاملاً مستقل از هم رفتار نموده و مکانیزم یکپارچه محصورشدگی از بین می رود؛ در نتیجه ظرفیت به صورت غیرخطی کاهش می یابد. این یافته با نتایج مطالعات پیشین مانند پژوهش مرجع [۴] که گزارش نمودند ژئوسل تک لایه ای می تواند مقاومت برکنشی را افزایش دهد همخوانی دارد؛ اما افزودن لایه دوم در فواصل بهینه، می تواند بهره روری را دوچندان نماید. به علاوه، مقایسه با پژوهش دس و چوداری [۷] نشان می دهد که در مهارهای عمودی، ژئوسل چندلایه ای، جابجایی های بزرگ (تا ۷۰ درصد ارتفاع) را تحمل می کند که مکانیزم مشابهی در مدل افقی این پژوهش مشاهده و منجر به گسترش سطح گسیختگی و کاهش تغییر شکل های موضعی شد. این رفتار نشان می دهد که بهره گیری از دو لایه ژئوسل زمانی مؤثر است که فاصله قرارگیری آن ها کمتر از عمق مؤثر توزیع تنش باشد و یک کانال تنش پیوسته و مشترک بین دو لایه ایجاد شود. در واقع قرارگیری دو لایه ژئوسل در فاصله نزدیک، بیشترین کارایی را دارد و با افزایش فاصله، کارایی به طور یکنواخت کاهش پیدا می کند و هر چه فاصله بین لایه های ژئوسل بیشتر شود، مزیت حضور دو ژئوسل به حداقل می رسد.

در گروه دوم، ترکیب ژئوسل با ژئوگرید، به ویژه در موقعیت پایین ژئوسل (فاصله ۴۰ سانتی متر)، ظرفیت باربری را تا میزان $39/1\%$ افزایش داد؛ در حالی که قرارگیری ژئوگرید در بالای ژئوسل، بهبود کمتری (حداکثر تا $13/$) به همراه داشت. این تفاوت را می توان به نقش ژئوگرید در تقویت لایه های زیرین خاک نسبت داد؛ جایی که با افزایش عمق، فشارهای سربار بیشتر شده و ژئوگرید با توزیع تنش های کششی، اندرکنش خاک-مهار را بهبود می دهد. این نتیجه با یافته های کسکین [۱۵] که ژئوگرید چندلایه ای ظرفیت برکنشی را در ماسه تا حد قابل توجهی افزایش می دهد، مطابقت دارد. همچنین، با استفاده از تکنیک های PIV و OFDR نشان داده شده که موقعیت بهینه ژئوگرید (نزدیک مهار) شکل سطح گسیختگی را از عمودی به حبابی تغییر می دهد [۱۹]، که در پژوهش کنونی نیز کانتورهای جابجایی این تغییر را تأیید می نمایند. با این حال، کاهش کارایی ژئوگرید در موقعیت بالای ژئوسل ممکن است به دلیل تداخل کمتر با ناحیه تنش های برکنشی باشد، که پیشنهاد می شود در طراحی ها، اولویت به لایه های زیرین داده شود. در واقع، ژئوگرید زمانی بیشترین عملکرد را دارد که در ناحیه فعال تنش قرار گرفته و بتواند با ایجاد مکانیزم عملکرد غشائی، مانع گسترش جانبی خاک و توسعه گسیختگی شود؛ امری که در موقعیت بالای ژئوسل کمتر اتفاق می افتد.

گروه سوم نشان داد که تغییر ارتفاع پاکت ژئوسل به ۵ و ۱۵ سانتی متر، ظرفیت باربری را از کاهش ۱۳ درصدی به افزایش ۱۳ درصدی نسبت به مدل پایه با ارتفاع پاکت ۱۰ سانتی متر، تغییر می دهد. این بهبود مستقیماً به افزایش حجم محصورشدگی سه بعدی خاک نسبت داده می شود که مقاومت برشی را تقویت نموده و تغییر شکل ها را کاهش می دهد. این یافته با پژوهش مقدس تفرشی و همکاران [۱۰] هم راستا است که تحت بارگذاری سیکلی، ارتفاع بیشتر ژئوسل را عامل جلوگیری از گسیختگی پیش رونده معرفی نمودند. در مقایسه با یونکول و گوربوز [۱۱]، که نسبت ارتفاع ژئوسل به مهار را عامل کلیدی در افزایش ظرفیت برکنش دانستند، مدل پژوهش کنونی نیز نشان می دهد که افزایش ارتفاع پاکت ژئوسل منجر به افزایش ظرفیت برکنشی می شود که مهم ترین علت آن،

اندرکنش بیشتر دانه‌های خاک با دیواره پاکت‌های ژئوسل است؛ اما ممکن است بهره‌وری اقتصادی را کاهش دهد؛ زیرا حجم ژئوسل مصرفی در پروژه، افزایش چشم‌گیری پیدا می‌کند. به‌علاوه، تحلیل کانتورهای تنش نشان داد که ژئوسل با ارتفاع بیشتر، مسیر گسیختگی را به سمت عمق هدایت نموده و مقاومت مؤثر خاک را از حالت سطحی به حالت حجمی تبدیل می‌کند که این موضوع، مکانیسم تقویت عملکرد را به‌خوبی توجیه می‌نماید.

در گروه چهارم، تغییر از یک ناحیه بارگذاری به دو ناحیه با فاصله ۱۵ سانتی‌متر، ظرفیت را بیش از ۲۰۴٪ افزایش داد که این بهبود قابل توجه را می‌توان به توزیع گسترده‌تر تنش‌ها و درگیر شدن حجم بیشتری از توده خاک مسلح نسبت داد. این نتیجه با پژوهش بوهومیک و همکاران [۱۷] همخوانی دارد، که مهارهای I-شکل و L-شکل با توزیع بار چندنقطه‌ای، مقاومت کششی را تا ۹۰ درصد افزایش دادند. بارگذاری دوگانه سبب همپوشانی دو ناحیه مقاومتی شده و منطقه تأثیر بزرگ‌تری ایجاد می‌کند که موجب توسعه یک حباب گسیختگی مشترک و افزایش محسوس ظرفیت مهار می‌شود؛ رفتاری که در حالت تک‌بارگذاری مشاهده نمی‌شود. سرانجام، گروه پنجم نشان داد که خروج از مرکزیت ژئوسل تا ۲۵ سانتی‌متر، ظرفیت را تا ۲/۲۸ درصد افزایش داد، که این امر به جبران عدم تقارن تنش‌ها و گسترش ناحیه مقاومتی نسبت داده می‌شود. این نتیجه با یافته‌های موکورجی و همکاران [۱۶] که زوایای مختلف بارگذاری را عامل بهبود ظرفیت دانستند، انطباق دارد. تحلیل‌ها نشان داد که در خروج از مرکز کنترل شده، ناحیه فعال مقاومتی گسترده‌تر شده و موجب انتقال تنش به بخش‌های مقاوم‌تر توده خاک می‌شود؛ ولی در خروج از مرکز بیش از حد، تعادل تنش‌ها برهم خورده و کارایی کاهش می‌یابد.

۵- نتیجه‌گیری

یافته‌های اصلی نشان‌دهنده افزایش ظرفیت تا ۳۰٪ با دو لایه ژئوسل نزدیک به یکدیگر، تا ۳۹٪ با ترکیب ژئوگرید در موقعیت قرارگیری پایین ژئوسل، ۱۳٪ با افزایش ارتفاع پاکت، ۲۰۴٪ با بارگذاری دو ناحیه‌ای و تا ۲۸٪ با خروج از مرکزیت ژئوسل است. این بهبودها عمدتاً ناشی از محصورشدگی سه‌بعدی، توزیع تنش و گسترش سطح گسیختگی است که کارایی ژئوسنتتیک‌ها را به‌عنوان راهکاری اقتصادی در پروژه‌های ژئوتکنیکی تأیید می‌نماید.

۱- نقش ژئوسنتتیک‌های متنوع: نه تنها تسلیح خاک با لایه ژئوسل به‌طور معنی‌دار ظرفیت کششی مهار صفحه‌ای را افزایش می‌دهد؛ بلکه افزودن یک لایه ژئوسل اضافی نیز سبب افزایش بسیار قابل توجه در ظرفیت باربری مهار می‌شود. استفاده توأم از ژئوسل و ژئوگرید نیز بهتر از به‌کارگیری هر یک از این نوع ژئوسنتتیک‌ها به‌تنهایی است؛ به‌طوری‌که چنانچه ژئوگرید زیر ژئوسل قرار گیرد، بیشترین تأثیر را در محدودسازی تغییرشکل‌های جانبی و افزایش ظرفیت باربری خواهد داشت؛

۲- اثر نحوه جانمایی لایه مسلح‌کننده: موقعیت قرارگیری ژئوگرید در سیستم خاک-مهار-ژئوسنتتیک اهمیت دارد. نتایج نشان دادند که ژئوگرید تماس‌دار با لایه ژئوسل و یا نزدیک‌تر به آن چنانچه در پایین لایه ژئوسل قرار گیرند، کارایی به‌مراتب بیشتری نسبت به زمانی که در بالای لایه ژئوسل جانمایی می‌شوند، دارد؛

۳- ابعاد و خروج از مرکزیت: ژئوسل‌هایی با ارتفاع پاکت‌های بلندتر، به دلیل افزایش حجم توده خاک درگیر تسلیم و اندرکنش بیشتر بین خاک و ژئوسل، ظرفیت باربری را افزایش می‌دهند. همچنین، خروج از مرکزیت ژئوسل نسبت به ناحیه اعمال بار برکنش و استفاده از دو ناحیه اعمال بار، سبب افزایش ظرفیت باربری می‌شود.

در نهایت، نتایج تأکید می‌کنند که انتخاب بهینه آرایش، ابعاد و موقعیت ژئوسنتتیک‌ها می‌تواند عملکرد مهارهای صفحه‌ای را به طور قابل توجهی ارتقا دهد و پیشنهاد می‌شود در طراحی، اولویت به ترکیب ژئوسل-ژئوگرید در لایه‌های زیرین و با خروج از مرکزیت مناسب داده شود.

محدودیت‌ها و پیشنهادها

با وجود این یافته‌ها، پژوهش کنونی محدودیت‌هایی دارد:

۱- مدل عددی بر پایه فرضیات الاستوپلاستیک موهر-کولمب استوار است که ممکن است رفتار واقعی خاک‌های ناهمگن یا تحت بارگذاری دینامیکی را به‌طور کامل بازتاب ندهد؛

۲- مقیاس مدل نسبت به مقیاس پروژه‌های واقعی و اجرایی کوچک است که می‌تواند منجر به بیش‌برآورد ظرفیت شود؛

- ۳- عدم در نظر گرفتن عوامل محیطی مانند رطوبت یا فرسایش ژئوسنتتیک‌ها، کاربرد نتایج را محدود می‌کند. به‌علاوه، تمرکز بر خاک ماسه‌ای با دانسیته متوسط، تعمیم‌پذیری به خاک‌های چسبنده یا ریزدانه را کاهش می‌دهد؛
- ۴- نتایج این پژوهش جایگزین تحلیل و طراحی برای سیستم‌های دیگر پی نیست، بلکه رویکردی برای بهبود عملکرد مهارهای صفحه‌ای در خاک ماسه‌ای ارائه می‌کند. به‌کارگیری این نتایج در پروژه‌های واقعی مستلزم در نظر گرفتن شرایط ژئوتکنیکی محل، نوع بارگذاری، محدودیت‌های اجرایی و ملاحظات اقتصادی است. بنابراین می‌توان از یافته‌های این پژوهش به‌عنوان ابزاری کمکی جهت بهینه‌سازی آرایش و ابعاد سیستم‌های مهار خاک استفاده نمود.
- پژوهش‌های آتی می‌تواند بر بارگذاری‌های سیکلی، خاک‌های متنوع و مدل‌های هیبریدی متمرکز شوند تا کاربردهای گسترده‌تری در مهندسی ژئوتکنیک فراهم آید. به‌همین منظور جهت انجام پژوهش‌های آتی، پیشنهادها زیر ارائه می‌شوند:
- ۱- گسترش پارامترها: بررسی اثر انواع متفاوت ژئوگرید (مانند همسان و ناهمسان) و تنوع در ویژگی‌های مکانیکی خاک (بررسی انواع خاک) در تحلیل‌های عددی، بارگذاری‌های سیکلی یا دینامیکی و شرایط مرزی متفاوت؛
- ۲- تحلیل‌های پیچیده‌تر: توسعه مدل‌های عددی سه‌بعدی با مصالح غیرخطی‌تر (مدل‌های کشسان-خمیری) و در نظر گرفتن اثر هم‌زمان تغییر شکل‌های بزرگ و بررسی حساسیت نتایج نسبت به پارامترهای مختلف؛
- ۳- ترکیب رویکردها: مطالعه تجربی-عددی مشترک، مانند بهره‌گیری از سنسورهای ثبت کرنش یا تصویرنگاری جهت ردیابی فرآیند شکست که می‌تواند موجب بهینه‌سازی طرح تسلیح (انتخاب دقیق‌تر نوع، ابعاد و نحوه قرارگیری لایه ژئوسنتتیک) شود؛
- ۴- شبیه‌سازی شرایط نزدیک به واقعیت: مدل‌سازی کامل پی و در نظر گرفتن اندرکنش خاک-سازه در شرایط واقعی.

منابع

- [1] M.E. Mahmudi Mehrizi, Y. Daghighi, J. Nazari Afshar, A review of types of anchors and their roles in geotechnical engineering, in: International Conference on Civil Engineering, Architecture and Urban Infrastructure, Tabriz, Iran, 2015. (In Persian)
- [2] A.K. Choudhary, S.K. Dash, Uplift behaviour of horizontal plate anchors embedded in geocell-reinforced sand, in: Proceedings of Indian Geotechnical Conference, Roorkee, India, 2013.
- [3] S.S. Shariati, Numerical study of the uplift behaviour of plate anchor in reinforced soil, Master of science thesis, Islamic Azad University, Mashhad, Iran, 2022. (In Persian)
- [4] M. Rahimi, S.N. Moghaddas Tafreshi, B. Leshchinsky, A.R. Dawson, Experimental and numerical investigation of the uplift capacity of plate anchors in geocell-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 46(6) (2018) 801–816.
- [5] S.N. Moghaddas Tafreshi, S. Javadi, A.R. Dawson, Influence of geocell reinforcement on uplift response of belled piles, *Acta Geotechnica*, 9(3) (2014) 513–528.
- [6] V. Kishor Kumar, K. Ilamparuthi, Performance of anchor in sand with different forms of geosynthetic reinforcement, *Geosynthetics International*, 27(5) (2020) 503–522.
- [7] S.K. Dash, A.K. Choudhary, Geocell reinforcement for performance improvement of vertical plate anchors in sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 46(2) (2018) 214–225.
- [8] K. Yünkül, Ö.F. Usluoğulları, A. Gürbüz, Numerical Analysis of Geocell Reinforced Square Shallow Horizontal Plate Anchor, *Geotechnical and Geological Engineering*, 39(4) (2021) 3081–3099.
- [9] Y. Zhao, Z. Lu, H. Venkateswarlu, A. Tabaroei, B. Ateş, C. Tang, Y. Feng, H. Yao, Three-dimensional numerical analysis of uplift capacity for horizontal plate anchors in geocell-reinforced sandy soil, *Computers and Geotechnics*, 191 (2026).
- [10] S.N. Moghaddas Tafreshi, M. Rahimi, A.R. Dawson, B. Leshchinsky, Cyclic and post-cycling anchor response in geocell-reinforced sand, *Canadian Geotechnical Journal*, 56(11) (2019) 1700–1718.
- [11] K. Yünkül, A. Gürbüz, Uplift behavior of shallow horizontal plate anchors reinforced with geocells in cohesionless soil, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(4) (2022) 1243–1266.
- [12] A.K. Choudhary, S.K. Dash, Failure mechanism of geocell-reinforced vertical plate anchors subjected to lateral loading, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 23(2) (2023) 58–76.
- [13] M. Aliasgharzadeh, M. Yosefzadeh, M. Atrchian, M. Bayat, Laboratory Investigation of the Pull-out Capacity of Circular Plate Anchor Buried at a Shallow Depth in Granular Soils Improved with Geocell and Geotextile, *Quarterly Journal of Transportation Engineering*, 15(3) (2024) 3785–3798. (In Persian)
- [14] T. Nagatani, Y. Sawada, Y. Inoue, S. Ito, H.I. Ling, T. Kawabata, New geocell utilisation as a pipe uplifting countermeasure and its validation using model experiments, *Geotextiles and Geomembranes*, 52(3) (2024) 319–331.
- [15] M.S. Keskin, Model studies of uplift capacity behavior of square plate anchors in geogrid-reinforced sand, *Geomechanics and Engineering*, 8(4) (2015) 595–613.

- [16] S. Mukherjee, L. Kumar, A.K. Choudhary, G.L.S. Babu, Pullout resistance of inclined anchors embedded in geogrid reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5) (2021) 1368–1379.
- [17] R. Bhowmik, J.T. Shahu, M. Datta, Experimental studies on inclined pullout behaviour of geosynthetic sheet Vis-À-Vis geogrid - Effect of type of anchor and sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 47(6) (2019) 767–779.
- [18] S. Bildik, E.A. Dickin, M.S. Keskin, K. Ilamparuthi, M. Laman, Centrifuge Model Tests and Numerical Analysis of Uplift Capacity of Strip Anchors in Geogrid-Reinforced Sand, *Applied Sciences*, 13(7) (2023).
- [19] Y.-X. Gao, H.-H. Zhu, Y.-F. Ni, C. Wei, B. Shi, Experimental study on uplift behavior of shallow anchor plates in geogrid-reinforced soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 50(5) (2022) 994–1003.
- [20] S. Mukherjee, G.L.S. Babu, Three-dimensional numerical analysis of large-scale horizontal square anchors in geogrid-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 52(4) (2024) 790–799.
- [21] S.N. Moghaddas Tafreshi, A.R. Dawson, A comparison of static and cyclic loading responses of foundations on geocell-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 32 (2012) 55–68.
- [22] C. Yoo, S. Kim, Performance of a two-tier geosynthetic reinforced segmental retaining wall under a surcharge load: Full-scale load test and 3D finite element analysis, *Geotextiles and Geomembranes*, 26(6) (2008) 460–472.