

چکیده

سپری‌های فلزی به‌طور گسترده در پروژه‌های مهندسی عمران به‌عنوان سازه نگهبان مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشخصات پروفیل خاک در عمق متفاوت بوده و در برخی مواقع ممکن است لایه‌ی سست در عمق‌ها و موقعیت‌های مختلف وجود داشته باشد. این مسئله می‌تواند اثرات متفاوتی را در طی عملیات گودبرداری بر تغییر شکل سطح زمین، نیروها و لنگرهای وارد بر سپرهای فولادی و مهارها نسبت به حالتی که خاک نسبتاً یکنواخت است داشته باشد که در طراحی سپری‌ها و مهارها بایستی در نظر گرفته شود. در این تحقیق یک گود عمیق تعریف و مدل‌سازی شده و با استفاده از روش اجزای محدود مورد تحلیل قرار گرفته است. عمق گود به سه لایه‌ی رسی تقسیم شده است. یکی از این سه لایه، لایه‌ی سست رسی می‌باشد که موقعیت آن در لایه‌ی بالا، وسط و پایین در مدل‌هایی به‌طور جداگانه تغییر می‌کند. نتایج حاصل از تحلیل با نتایج مدلی که فاقد لایه‌ی سست می‌باشد مقایسه می‌شود. از آنجاکه سازه نگهبان ممکن است دائمی باشد، پایداری بلندمدت آن نیز بایستی مد نظر قرار گیرد. از این رو در نظر گرفتن نیروهای لرزه‌ای ضروری است. بدین منظور در این تحقیق از تحلیل شبه استاتیکی با شتاب $0.3g$ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که وجود لایه‌ی سست فوقانی بر تغییر شکل‌های سطح زمین و سپری اثرات کاهنده دارد. همچنین وجود لایه‌ی سست رسی زیر لایه‌های سخت خاک رس سبب افزایش لنگر خمشی و نیروهای وارد بر سپری می‌شود.

کلمات کلیدی: سپر کوبی، تغییر شکل، مهار، تحلیل شبه‌استاتیکی

یادداشت تحقیقی

مطالعه‌ی استاتیکی و شبه‌استاتیکی اثر وجود لایه‌ی سست رسی بر رفتار سپری‌های فلزی

بهرروز احمدپور

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه صنعتی قم

مسعود عامل‌سخی (نویسنده مسئول)

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی قم
amelsakhi@qut.ac.ir

۱- مقدمه

است. برخی از این تحقیقات مباحث تئوری را دنبال کرده و برخی دیگر هم مباحث کاربردی و اجرایی را مطرح می‌کنند. شائو و ماکاری [۲] کاربرد ابزار دقیق و تحلیل بازگشتی را مورد بررسی قرار دادند. آندروود و گرینلی [۳] بر روی استفاده از سپری‌های فلزی به‌عنوان سازه نگهبان دائمی در چهار پروژه‌ی واقعی در آمریکا مطالعه کردند که در آن تغییر شکل سپری در دو حالت مختلف در حین احداث سازه و پس از اتمام سازه مورد بررسی قرار گرفت. برای افزایش عمر سپری‌ها در بلندمدت به‌خصوص در مناطقی که سطح آب بالاست و سپری به‌عنوان سازه نگهبان دائمی مورد استفاده قرار می‌گیرد، حفاظت کاتدی می‌تواند مورد توجه قرار گیرد [۴]. در بررسی مقاومت هیدرولیکی درزها و قفل و بست

گودبرداری شاخه‌ی مهمی از مهندسی پی می‌باشد، در ساخت فونداسیون و یا زیرزمین ساختمان‌های بلندمرتبه، مخازن ذخیره، مترو و سیستم‌های حمل‌ونقل و به‌طور کلی در ساخت هر سازه‌ای زیر تراز سطح زمین نیاز به گودبرداری می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی بر مقوله‌ی گودبرداری‌های عمیق در مناطق شهری متمرکز شده است. سیستم‌های معمول که به‌عنوان سازه‌ی نگهبان مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل دیواره‌ی دیافراگمی، سپر کوبی و ... می‌باشد. در روش سپر کوبی، سپری‌های فلزی^۱ در زمین کوبیده شده و با پیشرفت عملیات گودبرداری مهارهای لازم نیز نصب می‌گردد [۱]. تاکنون بر روی سپری‌های فلزی تحقیقات مختلفی انجام شده

هم به خاک ریزی نیاز باشد. تنوع در مقاطع خاک ریزی و خاک برداری سبب بارگذاری و باربرداری متفاوت خاک‌های اطراف سپرها و در نتیجه رفتار متفاوت دیواره‌ی سپرکوبی شده می‌شود. نتایج بررسی با استفاده از روش اجزای محدود نشان داد که موقعیت دیواره‌ی سپرکوبی شده در امتداد شیب بسیار حائز اهمیت و تأثیرگذار است. برای نمونه نیروی مهارها وقتی دیواره از بالای شیب به پای شیب جابه‌جا می‌شود تا ۳۰ درصد کاهش می‌یابد [۱۱]. همچنین یکی از مسائلی که بایستی در نظر گرفته شود خزش خاک با گذشت زمان است. خاک‌های رسی و چسبنده رفتار خزشی از خود نشان می‌دهند که تغییر شکل‌ها تحت بار ثابت در طی زمان افزایش می‌یابد. اثرات خزش موجب می‌شود که نیروهای مهارها کاهش یابد و لنگرهای خمشی وارد بر قسمت بالایی دیوار افزایش یابد [۱۲]. هو و همکاران [۱۳] بر روی سپری‌های دارای پلتفرم^۲ که نوع جدیدی از سازه‌های نگهدارنده است، مطالعه کردند. این روش بر نقاط وضعی مانند تمرکز تنش فائق می‌آید و در برابر زمین لغزش مقاوم بوده که انتخاب خوبی برای شیب‌های تند است. گرچه، تنش و تغییر شکل سپری در این حالت به سبب وجود پلتفرم، پیچیده‌تر از سازه‌های متعارف بوده و تعیین آن مشکل‌تر است. هو و همکاران مدل عددی ساده شده‌ای را برای محاسبه‌ی تغییر شکل سپری دارای پلتفرم توسعه بخشیدند. نتایج محاسبات به‌خوبی با نتایج مدل‌سازی و پایش میدانی همخوانی داشت.

رفتار سازه نگهدارنده یک گود عمیق با تعدادی کمیت نظیر: (۱) تغییر مکان المان‌های سازه نگهدارنده و توزیع فشار خاک، (۲) حرکت توده‌ی خاک اطراف گود، (۳) حرکت سازه‌های مجاور موجود و (۴) نیروهای وارد بر المان‌های سازه نگهدارنده بیان و تحلیل می‌گردد. تلاش‌های تحقیقاتی برای ارزیابی کمیت‌های فوق عموماً در سه دسته‌ی کلی می‌باشد: (۱) عملکرد تحلیل‌های عددی (و تئوری) [۱۴]، (۲) آزمایش مدل‌های فیزیکی در مقیاس کوچک و متوسط [۱۵-۱۶] و (۳) جمع‌آوری داده‌های عملکرد از ابزار دقیق پروژه‌های بزرگ گودبرداری عمیق [۱۷-۲۰].

برای یک گودبرداری عمیق موفقیت‌آمیز، رفتار دیوار حائل و خاک مجاور گود بایستی در طراحی در نظر گرفته شود. این

سپری‌ها به‌صورت آزمایشگاهی مشخص شد که با توجه به نوع مصالح قرار گرفته پشت دیواره‌ی سپرکوبی شده و فشار وارده رفتار متفاوتی اتفاق می‌افتد. آزمایش‌ها وجود متغیرهای وابسته به زمان و وابسته به درزه را نشان داد [۵]. همچنین دیواره‌ی سپرکوبی شده دوبل برای سازه‌های دائمی نظیر دیواره‌ی اسکله‌های بزرگ و دیوار حائل برای انباشت ضایعات صنعتی مناسب می‌باشد. برای طراحی سپری‌های دوبل به روش‌های ویژه‌ای نیاز است تا رفتار واقعی سازه را تعیین کند [۶]. ارزیابی ظرفیت باربری قائم سپری‌ها بر اساس تحلیل‌های معمول شمع‌هاست [۷-۸]. ظرفیت سازه‌ی سپری ترکیب بار محوری و یا بار برون‌محور یکنواخت و متمرکز به همراه لنگرهای خمشی وارده در اثر فشار جانبی خاک می‌باشد. تحلیل سازه‌ی به این صورت است که سپری مانند یک ستون در معرض بارهای محوری و لنگرهای خمشی در نظر گرفته می‌شود [۳].

لی و همکاران [۹] بر پیش‌بینی نرخ نفوذ سپری در ماسه توسط چکش ارتعاشی مطالعه نمودند. نتایج مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی نشان داد که با مقایسه‌ی نیروی وارد بر بالای سپر با و بدون در نظر گرفتن اصطکاک قلاب، اصطکاک قلاب بر دامنه‌ی نیروهای حداکثر تأثیرگذار است. گوپال مادابوشی و چاند راسکاران [۱۰]، چرخش سپرهای طره‌ای را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق روش جدیدی بر مبنای کمینه کردن نسبت لنگر به‌منظور تعیین نقطه‌ی چرخش سپری‌ها به کار گرفته شد. این روش برای هر دو خاک ریز چسبنده و غیر چسبنده قابل استفاده است. این روش حل مستقیم بوده و نیازی به فرآیند تکرار ندارد. محل نقطه‌ی دوران حاصل از کمینه کردن نسبت لنگر با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد. بررسی‌ها نشان داد که روش کمینه کردن نسبت لنگرها نتایج رضایت‌بخشی را به دست می‌دهد که با محل دوران به‌دست آمده‌ی تجربی مطابقت دارد.

در برخی پروژه‌های مهندسی عمران نیاز است تا دیواره‌ی سپرکوبی شده در زمین شیب‌دار اجرا گردد. روش‌های معمول مورد استفاده در طراحی سپرهای مهارشده بر اساس روش تعادل حدی بوده و فرآیندهای حین ساخت را در نظر نمی‌گیرد. در اجرای سپرکوبی در زمین‌های شیب‌دار ممکن است هم به خاک برداری و

می‌یابد. از آنجاکه کل طراحی سپر وابسته به فشار جانبی خاک است، طراحی بر اساس توزیع فشار نادرست موجب این می‌شود که طرح محافظه کارانه و یا در بعد پر اهمیت تر، غیر ایمن باشد. در این مطالعه‌ی پارامتریک، از روش معمول طراحی و همچنین روش اجزای محدود برای بررسی فشار جانبی خاک، لنگرهای خمشی و نیروی مهارها در خاک غیر چسبنده، استفاده شد. با توجه به نتایج به دست آمده، برخلاف آنچه در روش‌های معمول طراحی فرض می‌شود؛ با افزایش عمق هیچ یک از فشارهای محرک یا مقاوم به طور خطی افزایش نمی‌یابد. همچنین لنگر خمشی وارد بر سپر در روش معمول طراحی بیشتر از مدل‌سازی عددی به دست آمد؛ اما نیروی مهارها حدود ۴۰٪ کم تر به دست آمد. ساهاجدا [۲۷] تعیین نیروی مهارها را مورد توجه قرار داد. در این تحقیق نیروی مهارها در یک پروژه‌ی گودبرداری که از سپر کوبی به عنوان سازه نگهدارنده در خاک رسی - ماسه‌ای استفاده شده بود اندازه‌گیری شد. نیروهای اندازه‌گیری شده به طور متوسط ۶۸٪ مقادیر محاسبه شده در فرآیند طراحی با فرض شرایط کاملاً زهکشی شده برای خاک رسی بودند. در فرض طراحی در شرایط زهکشی نشده نیروهای محاسباتی به طور قابل ملاحظه‌ای کوچک تر از مقادیر اندازه‌گیری شده بودند. از آنجاکه این حالت در جهت اطمینان نیست، فرض شرایط زهکشی نشده در خاک رسی سخت برای مقاصد طراحی پیشنهاد نمی‌شود. مقادیر بارهای واقعی مهارها به بار سطحی وارد بر طرفین گود بسیار وابسته است.

آتاناسوپولس [۲۸] و همکاران عملکرد دیواره‌ی سپر کوبی شده را به عنوان سازه نگهدارنده در مناطق شهری مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه داده‌های مربوط به یک سازه نگهدارنده موقت در یک گود عمیق در یونان مورد توجه قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که سازه نگهدارنده از نوع سپر کوبی که به صورت ارتعاشی نصب شده است، می‌تواند به صورت ایمن به عنوان سازه نگهدارنده در مناطق شهری حساس مورد استفاده قرار گیرد به شرطی که پروفیل خاک دارای لایه‌های ضخیم ماسه - شن نباشد و پایش ارتعاش ایجاد شده در خاک حین عمل کوبش انجام شود. اگر مشخصات خاک محل و جزئیات مراحل اجرایی

رفتارها در خاک‌های نرم به عوامل مختلفی وابسته است. برآورد این رفتارها عموماً ترکیبی از روش‌های تحلیلی و تجربی به همراه قضاوت مهندسی و تجربه است. نحوه‌ی تغییر شکل سیستم حائل تنها به خصوصیات خاک محل گودبرداری وابسته نبوده بلکه به مشخصات لایه‌های خاک زیرین نیز مرتبط است. مطالعات بر روی خاک‌های چند لایه با لایه‌های زیرین سنگی، حاکی از این است که مقدار تغییر شکل‌ها بسیار کم است [۱۷، ۲۱، ۲۲]. مقاومت کم خاک نگه داشته شده پشت دیواره‌ی سپر کوبی شده و ضخامت لایه‌های خاک نرم، عوامل بارزی در کنترل تغییر شکل‌ها می‌باشد. تأثیر سودمند سنگ بستر ممکن است در اثر مقاومت کم خاک‌ها به شرطی که به اندازه‌ی کافی ضخیم باشند، تحت الشعاع قرار گیرد [۲۳].

در سال‌های اخیر با پیشرفت فناوری‌های محاسباتی، استفاده از مدل‌های عددی در تحلیل و طراحی دیواره‌های سپر کوبی شده افزایش پیدا کرده است. همچنین به طور عمده روش اجزای محدود توسط محققین برای مطالعه‌ی رفتار دیواره‌های سپر کوبی شده استفاده می‌شود. برخی از تحقیقات صورت گرفته توسط این روش در ادامه بیان می‌شود. فینو و کالولو [۲۴] مثال‌هایی از تحلیل‌های عددی در گودبرداری‌های عمیق را ارائه داده‌اند. در مطالعات دی و پاتس [۲۵] مدل‌سازی اجزای محدود دیواره‌های سپر کوبی شده مورد بررسی گرفت. در این مطالعات المان تیر به عنوان روشی مناسب برای مدل‌سازی دو بعدی دیواره‌ی سپر کوبی شده در تحلیل اجزای محدود مورد توجه قرار گرفت. ضخامت دیوار تأثیر به‌سزایی در پایداری و ماکزیمم لنگر خمشی وارد بر دیوار دارد. از آنجاکه خیز متأثر از توزیع لنگر خمشی است، ضخامت دیوار بر خیز نیز تأثیر گذار است. المان - های تیر راه‌حلی را برای مسائل مدل‌سازی مقاطع نازک دیواره‌ی سپر کوبی شده فراهم می‌کند.

بیلگین [۲۶] فشار جانبی خاک وارد بر سپرهای مهار شده را مورد توجه قرار داد. با وجود تمرکز تنش در مهارها، روش‌های معمول طراحی تمرکز تنش در ارتفاع سپری را در نظر نمی‌گیرد؛ و فرض می‌شود که فشار خاک در عمق به‌طور خطی افزایش

ضخامت لایه‌ی نرم کم است، افزایش پیدا می‌کند [۱۷].

۲- صحت سنجی نرم افزار

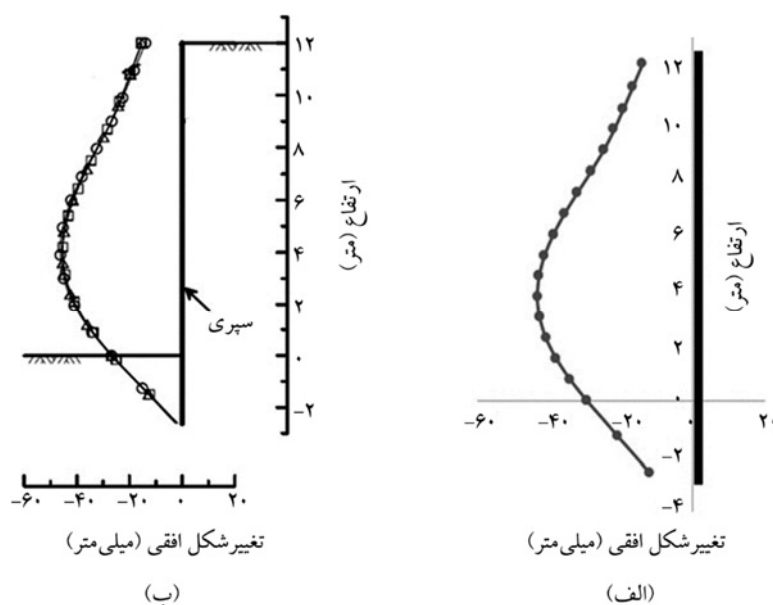
جهت اطمینان از نحوه‌ی عملکرد نرم‌افزار و همچنین صحت مدل‌سازی و نتایج حاصل از آن، یکی از مدل‌سازی‌هایی که در مقاله‌ای دیگر [۱۱] توسط نرم‌افزار انجام شده و صحت آن مورد تأیید است مجدداً مدل‌سازی شده و نتایج حاصل با نتایج مورد اشاره در مقاله مقایسه گردید. نتیجه‌ی مقایسه در شکل‌های (۱) و (۲)، در مورد تغییر شکل جانبی دیواره‌ی سپر کوبی شده و همچنین لنگرهای خمشی وارد بر آن آورده شده که انطباق خوبی را نشان می‌دهد.

۳- مشخصات خاک و مدل مورد مطالعه

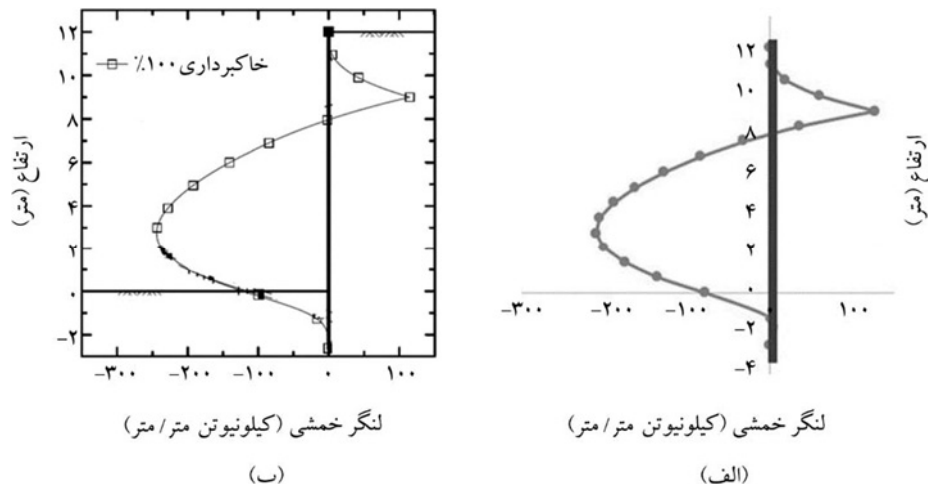
عرض و عمق گود مورد مطالعه به ترتیب ۱۰ و ۱۲ متر می‌باشد. طول گود به مقدار کافی زیاد فرض شده و در نتیجه مسئله را می‌توان در حالت کرنش صفحه‌ای در نظر گرفت. با توجه به تقارن موجود، نیمی از مسئله مدل‌سازی شده است. طول نهایی سپرهای فلزی ۱۶ متر می‌باشد. اولین مهار پس از یک متر گودبرداری و مهارهای دیگر با پیشرفت عملیات گودبرداری به فاصله‌ی ۳ متر از یکدیگر نصب می‌گردد که در پایان گودبرداری چهار مهار خواهیم داشت.

در دسترس باشد پیش‌بینی رفتار سازه نگهبان با استفاده از تحلیل‌های عددی و نرم‌افزارهای ژئوتکنیکی تجاری امکان‌پذیر است. وجود لایه‌ی سست در عمق گودبرداری ممکن است اثرات متفاوتی را بر نیروهای وارد بر سپرهای و مهارها داشته باشد. ضمن اینکه در مواقعی که از سپر کوبی برای بلندمدت استفاده می‌شود برآورد عملکرد آن‌ها در شرایط لرزه‌ای اهمیت بیشتری پیدا می‌کند، چون تخریب سازه‌ی نگهبان ممکن است خسارت‌های مالی و جانی جبران‌ناپذیری بر جای بگذارد که این امر تاکنون به صورت جامع در تحقیقات مرتبط با سپرهای مورد توجه قرار نگرفته است. در این تحقیق یک گود مهارشده با استفاده از روش سپر کوبی تعریف شده و با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS اثرات وجود لایه‌ی سست رسی در عمق خاک بر تغییر شکل خاک و سپرها و همچنین نیروهای وارده، به صورت استاتیکی و شبه استاتیکی (با در نظر گرفتن شتاب افقی $0.3g$) مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌سازی‌ها و بررسی‌ها در دو حالت خشک و اشباع (وجود آب زیرزمینی) انجام شده است.

بررسی برخی مطالعات قبلی نشان می‌دهد که در سازه نگهبان‌هایی که ضخامت قابل توجهی از مصالح نرم را نگه می‌دارند مقادیر بیشینه‌ی تغییر شکل جانبی دیواره‌ی نگهبان و نشست خاک مجاور به طور قابل ملاحظه‌ای نسبت به حالتی که



شکل (۱): نمودار تغییر شکل افقی سپری: (الف) نمودار حاصل از مدل‌سازی و (ب) نمودار ارائه‌شده در مرجع [۱۱]



شکل (۲): نمودار لنگر خمشی وارد بر سپری: (الف) نمودار حاصل از مدل‌سازی و (ب) نمودار ارائه شده در مرجع [۱۱]

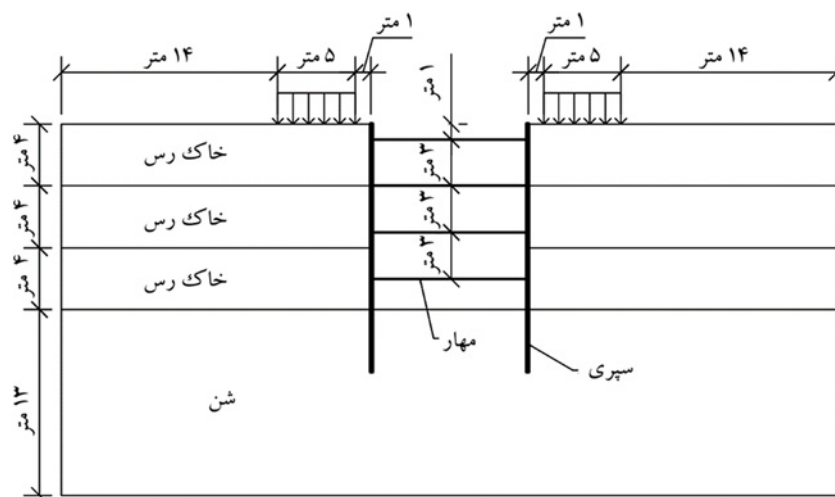
به شرح جدول‌های (۱) و (۲) می‌باشد. در این تحقیق از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است.

جدول (۱): مشخصات مصالح [۲۹]

نوع خاک	شخصیات مصالح		
	ش	رس سخت	رس سست
γ (kN/m ³)	۱۸	۱۷	۱۲
γ_{sat} (kN/m ³)	۲۲	۱۹	۱۷
E (kN/m ²)	۹۰۰۰۰	۱۲۰۰۰	۳۰۰۰
ν	۰/۴۵	۰/۴	۰/۲
c (kN/m ²)	۱	۷۰	۱۰
ϕ (°)	۴۰	۲۵	۱۰
R	۱	۰/۵	۰/۵

فاصله‌ی مهارها در جهت طول گود ۵ متر در نظر گرفته شده است. سربار روی سطح زمین 5 kN/m^2 می‌باشد. پروفیل خاک به صورت ۴ لایه مدل‌سازی شده است. ضخامت ۳ لایه‌ی بالایی ۴ متر و رسی می‌باشد. لایه‌ی چهارم که انتهای سپری در آن نفوذ می‌کند دارای ضخامت ۱۳ متر و شنی می‌باشد. یکی از سه لایه‌ی بالایی به صورت لایه‌ی سست در نظر گرفته می‌شود که محل آن در مدل‌های مختلف تغییر می‌کند و اثرات آن نسبت به مدلی که لایه‌ی سست رسی وجود ندارد مورد بررسی و مطالعه قرار می‌گیرد. سطح آب در مدل‌های مربوطه در یک متری سطح زمین می‌باشد. شکل (۳) هندسه‌ی کلی مدل را نشان می‌دهد.

در ادامه مشخصات تمام مصالح مورد استفاده در این تحقیق



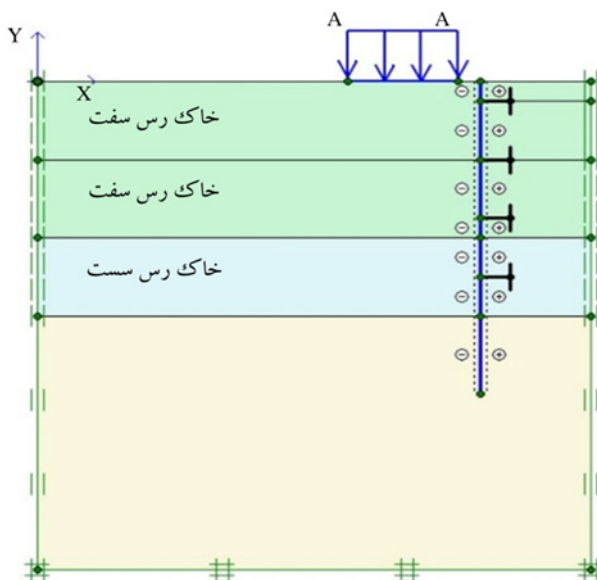
شکل (۳): هندسه‌ی مدل گودبرداری مورد مطالعه

جدول (۲): مشخصات سپری‌های فلزی و مهارها

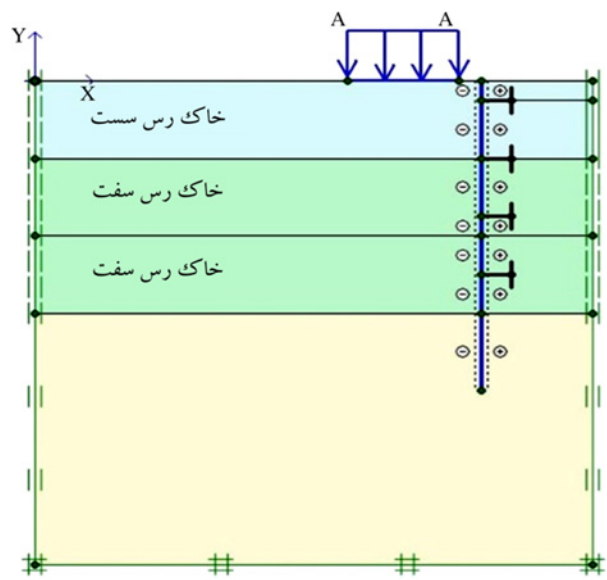
المان	مقطع استاندارد	E (kN/m ²)	EA	EI (kNm ² /m)
سپری	PZ40	2×10^4	$4/89 \times 10^6$ (kN/m)	$1/341 \times 10^5$
مهار	HP ۵۳ × ۲۰۰	2×10^4	$1/368 \times 10^6$ (kN)	-

شماره‌ی ۴ مدلی می‌باشد که فاقد لایه‌ی سست بوده و نتایج سه مورد دیگر نسبت به آن مقایسه می‌گردد. در این تحقیق لایه‌های خاک با استفاده از المان‌های ۱۵ گره‌ای مثلثی مدل شد که در مجموع مش‌بندی اجزای محدود دارای حدود ۱۱۶۸ المان است.

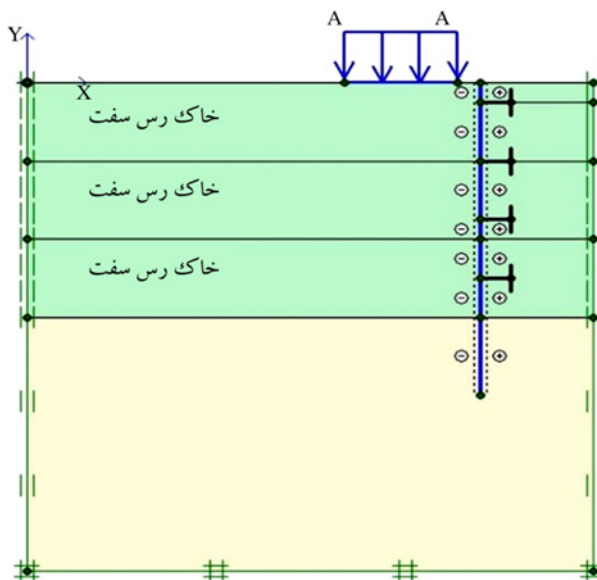
با توجه به شکل‌های (۴-۷) چهار مدل مختلف در نظر گرفته شده است. در مدل شماره‌ی ۱ لایه‌ی سست رسی در لایه‌ی اول (سطحی)، در مدل شماره‌ی ۲ لایه‌ی میانی و در مدل شماره‌ی ۳ در لایه‌ی تحتانی (لایه‌ی سوم) در نظر گرفته شده است. مدل



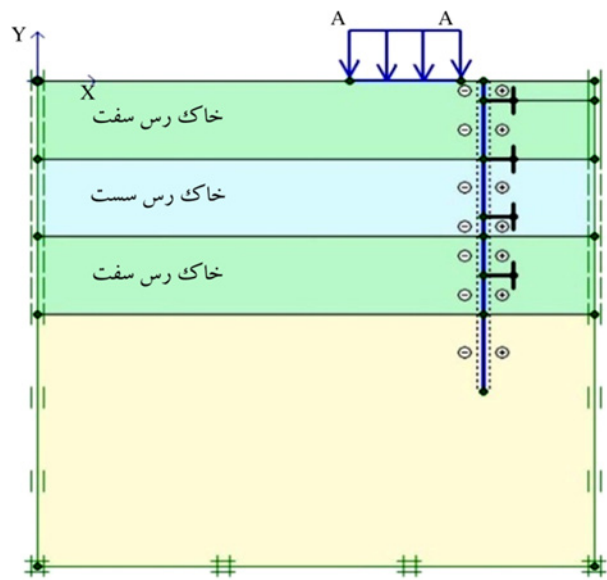
شکل (۶): مدل سازی گود با لایه‌ی پایینی سست (مدل شماره‌ی ۳)



شکل (۴): مدل سازی گود با لایه‌ی بالایی سست (مدل شماره‌ی ۱)



شکل (۷): مدل سازی گود بدون لایه‌ی سست (مدل شماره‌ی ۴)



شکل (۵): مدل سازی گود با لایه‌ی میانی سست (مدل شماره‌ی ۲)

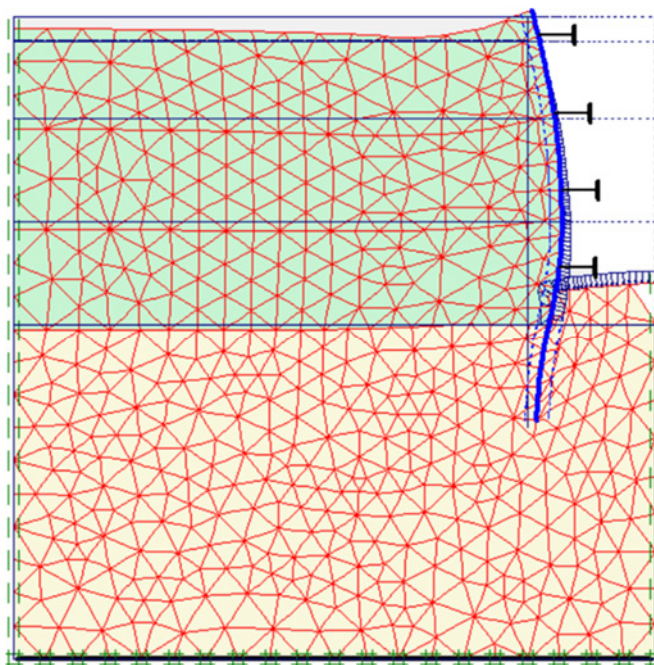
۴- نتایج عددی

نیرو) در مدل‌های دارای لایه‌ی سست و U_1 مقدار پارامترها در مدل‌های بدون لایه‌ی سست می‌باشد. نتایج حاصل شده به تفکیک در جدول‌های (۳) تا (۵) آورده شده است. جهت مقایسه و بررسی بهتر نتایج به دست آمده، نتایج جدول‌های (۳) تا (۵) در قالب نمودارهای شکل‌های (۹) تا (۱۷) آورده شده است. جهت مقایسه و بررسی بهتر نتایج به دست آمده، نتایج جدول‌های ذیل در قالب شکل‌های (۹) تا (۱۷) آورده شده است.

نمای تغییر شکل یافته‌ی یکی از مدل‌ها پس از تحلیل شبه-استاتیکی در شکل (۸) نشان داده شده است. با استفاده از رابطه‌ی (۱) درصد تغییر مقادیر پارامترهای مختلف در مدل‌های دارای لایه‌ی سست نسبت به مدل فاقد لایه‌ی سست محاسبه می‌گردد:

$$\frac{U_i - U_1}{U_1} \times 100 \quad (1)$$

که در این رابطه U_i مقدار پارامتر مربوطه (تنش، تغییر شکل یا



شکل (۸): نمای تغییر شکل یافته لایه‌های خاک و سپری در مدل ۴ پس از تحلیل شبه‌استاتیکی

جدول (۳): درصد تغییرات در پارامترهای مختلف خاک

موقعیت لایه‌ی سست												پارامترها
لایه‌ی بالایی (مدل ۱)				لایه‌ی میانی (مدل ۲)				لایه‌ی پایینی (مدل ۳)				
نوع تحلیل												
شبه‌استاتیکی		استاتیکی		شبه‌استاتیکی		استاتیکی		شبه‌استاتیکی		استاتیکی		
وضعیت رطوبت خاک (آب زیرزمینی)												
خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	
-۴/۵۲	-۲/۱۲	-۴/۵۲	-۲/۰۹	-۴/۵۱	-۱/۵۰	-۴/۷۵	-۱/۴۶	-۴/۰۲	-۱/۲۵	-۴/۰۳	-۱/۲۵	تنش کل
-۴/۵۲	-۴/۰۳	-۴/۵۲	-۳/۹۵	-۴/۵۱	-۲/۸۴	-۴/۵۱	-۲/۷۷	-۴/۰۲	-۲/۳۹	-۴/۰۳	-۲/۳۸	تنش مؤثر
-۱۰/۹۷	۵/۹۲	-۱۰/۹۶	۶/۶۴	-۸/۸۹	-۳/۲۱	-۸/۹۵	-۳/۵۷	۷/۵۷	۵/۵۵	۷/۵۶	۵/۲۹	تغییر مکان کل
-۱۷/۰۰	-۱۴/۵۴	-۱۶/۹۸	-۱۴/۳۷	۱۶/۴۶	۱۳/۶۶	۱۶/۳۵	۱۳/۴۹	۳۴/۵۴	۲۲/۳۲	۳۴/۶۰	۲۲/۲۹	تغییر مکان افقی
-۱۰/۹۷	۲/۱۰	-۱۰/۹۶	۲/۷۱	-۱۰/۱۴	-۷/۲۷	-۱۰/۲۰	-۷/۱۳	-۷/۵۰	-۵/۱۸	-۷/۴۹	-۵/۵۱	تغییر مکان قائم

جدول (۴): درصد تغییرات در پارامترهای مختلف سپری فولادی

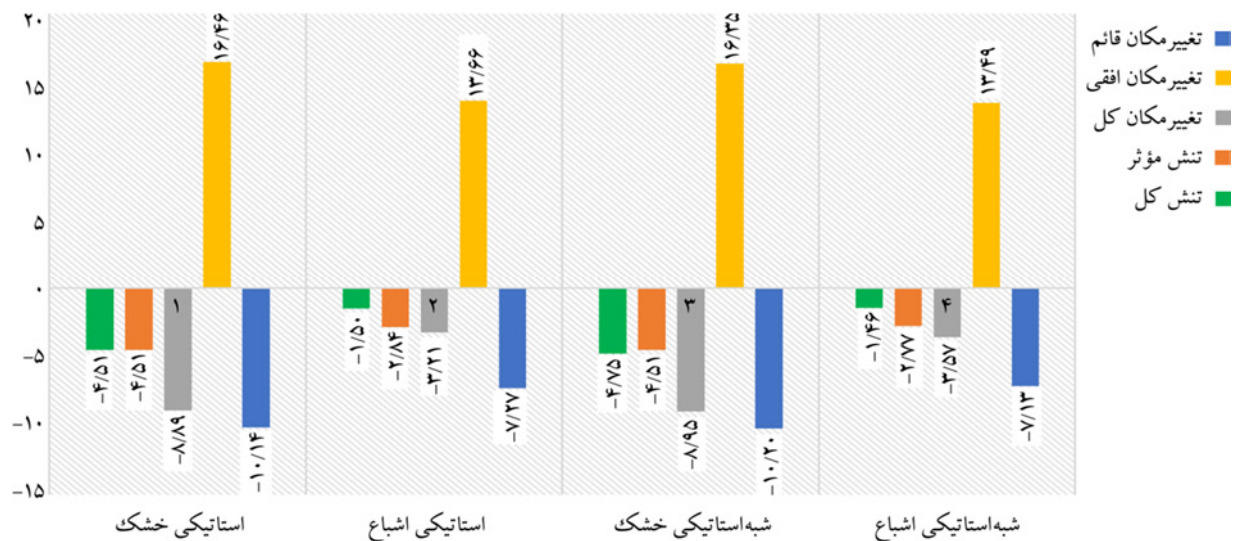
موقعیت لایه‌ی سست												پارامترها
لایه‌ی بالایی (مدل ۱)				لایه‌ی میانی (مدل ۲)				لایه‌ی پایینی (مدل ۳)				
نوع تحلیل												
استاتیکی			شبه استاتیکی			استاتیکی			شبه استاتیکی			
وضعیت رطوبت خاک (آب زیرزمینی)												
خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	
-۱۱/۱۷	-۸/۸۸	-۱۰/۷۹	-۶/۸۶	-۱۰/۸۳	-۸/۴۲	-۱۱/۱۵	-۷/۸۸	-۳۹/۰۴	-۳۰/۲۵	-۳۸/۹۴	-۳۰/۸۲	نیروی محوری
-۸/۴۰	-۷/۴۶	-۸/۳۷	-۷/۳۴	۶/۸۹	۱۷/۲۵	۷/۰۰	۱۷/۶۸	۶۲/۲۶	۵۳/۳۲	۶۲/۲۵	۵۳/۵۱	نیروی برشی
-۱۷/۴۳	-۱۷/۴۲	-۱۷/۲۹	-۱۸/۱۹	۲۷/۳۲	۳۰/۱۳	۲۷/۶۹	۳۰/۸۰	۸۲/۷۰	۶۷/۶۴	۸۲/۹۶	۶۹/۰۷	لنگر خمشی
-۱۷/۰۰	-۱۴/۵۴	-۱۶/۸۹	-۱۴/۳۷	۱۶/۴۶	۱۳/۶۶	۱۶/۳۵	۱۳/۴۹	۳۴/۵۴	۲۲/۳۲	۳۴/۶۰	۲۲/۲۹	تغییر مکان افقی
-۹/۴۴	-۵/۸۰	-۹/۱۵	-۸/۸۶	-۸/۰۴	-۲/۱۷	-۸/۱۰	-۳/۷۳	۵۱/۴۰	۴۳/۴۸	۵۱/۷۶	۴۷/۰۱	تغییر مکان قائم

جدول (۵): درصد تغییرات در نیروی مهارها

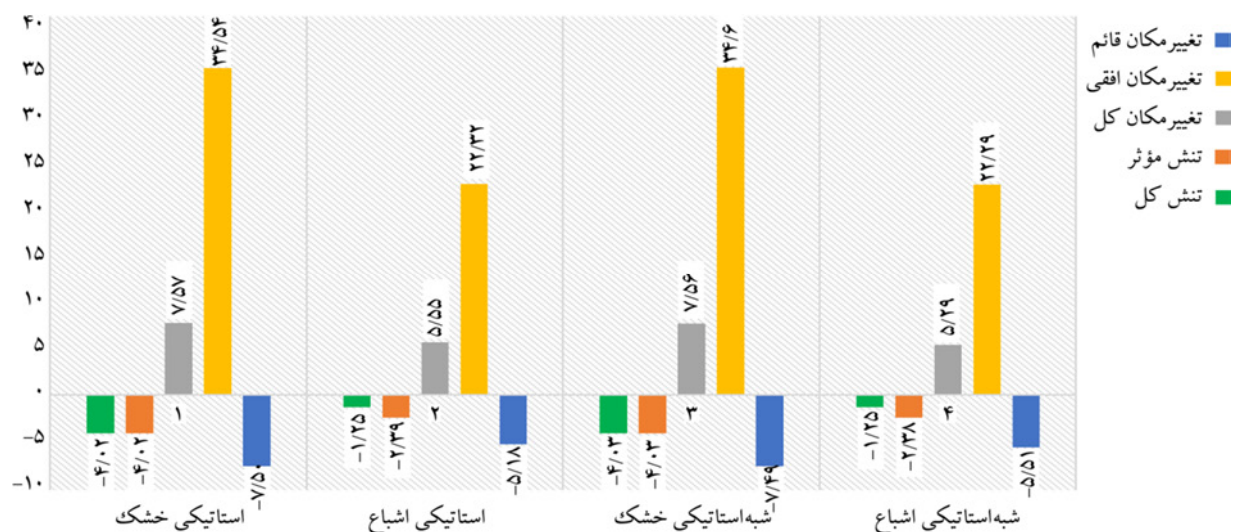
موقعیت لایه‌ی سست												پارامترها
لایه‌ی بالایی (مدل ۱)				لایه‌ی میانی (مدل ۲)				لایه‌ی پایینی (مدل ۳)				
نوع تحلیل												
استاتیکی			شبه استاتیکی			استاتیکی			شبه استاتیکی			
وضعیت رطوبت خاک (آب زیرزمینی)												
خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	خشک	اشباع	
-۵/۳۷	۰/۹۵	-۵/۵۳	۰/۸۷	۵۱/۹۹	۳۲/۲۶	۵۱/۸۲	۳۲/۲۱	-۲۸/۲۱	-۲۱/۸۵	-۲۸/۲۳	-۲۲/۲۷	مهار ۱ (-1 m)
-۱۶/۷۰	-۱۲/۸۲	-۱۶/۷۱	-۱۲/۴۵	۱۰/۰۱	۲۶/۵۰	۹/۹۶	۲۶/۳۰	۲۹/۲۶	۳۶/۵۶	۲۹/۲۱	۳۶/۶۴	مهار ۲ (-4 m)
-۹/۳۶	-۷/۹۹	-۹/۳۸	-۷/۵۷	۱۳/۱۹	۲۳/۰۹	۱۳/۱۵	۲۳/۱۲	۳۷/۶۵	۲۹/۰۹	۳۷/۵۹	۲۹/۱۱	مهار ۳ (-7 m)
-۱۱/۸۴	-۱۲/۷۲	-۱۲/۰۷	-۱۰/۹۸	۰/۶۷	-۰/۱۹	۰/۵۵	۰/۷۷	۴۳/۸۱	۶۸/۷۸	۴۳/۵۳	۶۵/۹۸	مهار ۴ (-10 m)



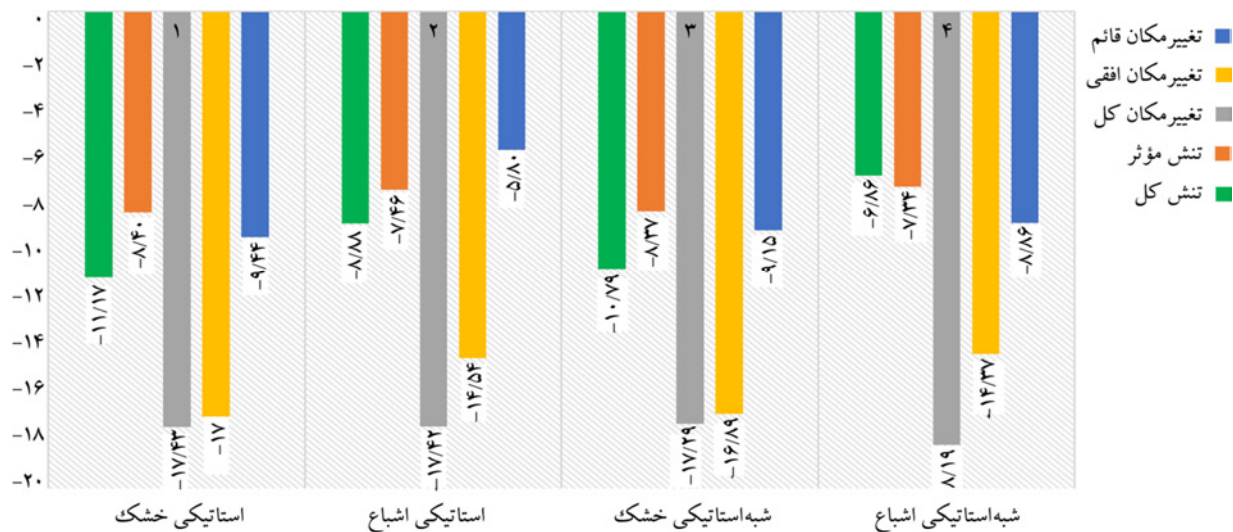
شکل (۹): نمودار تغییر پارامترهای خاک در مدل شماره ۱ نسبت به مدل شماره ۴



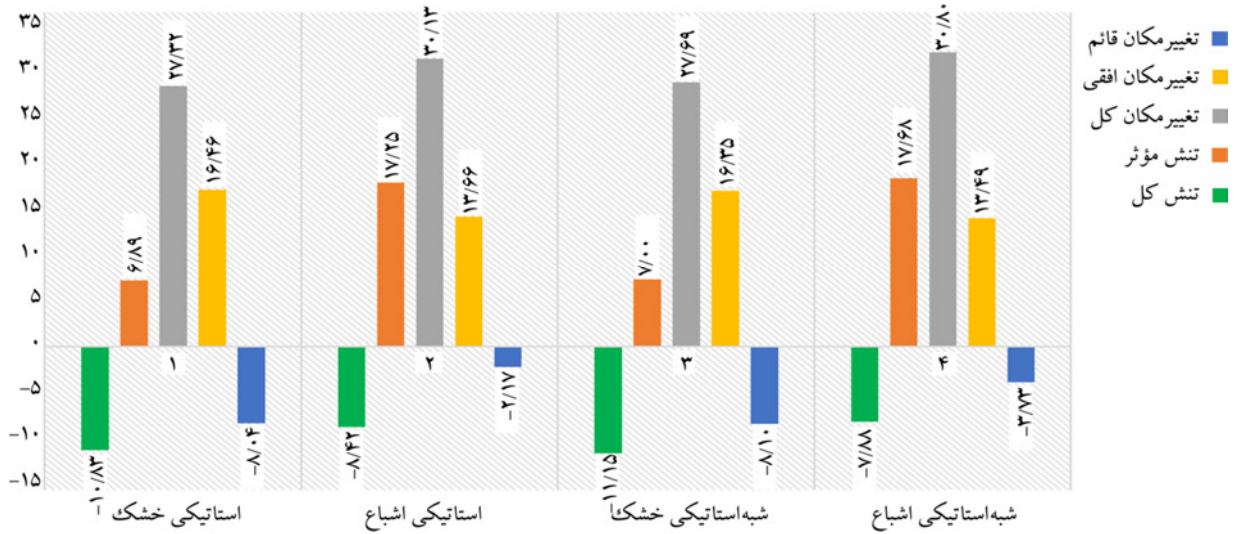
شکل (۱۰): نمودار تغییر پارامترهای خاک در مدل شماره ۲ نسبت به مدل شماره ۴



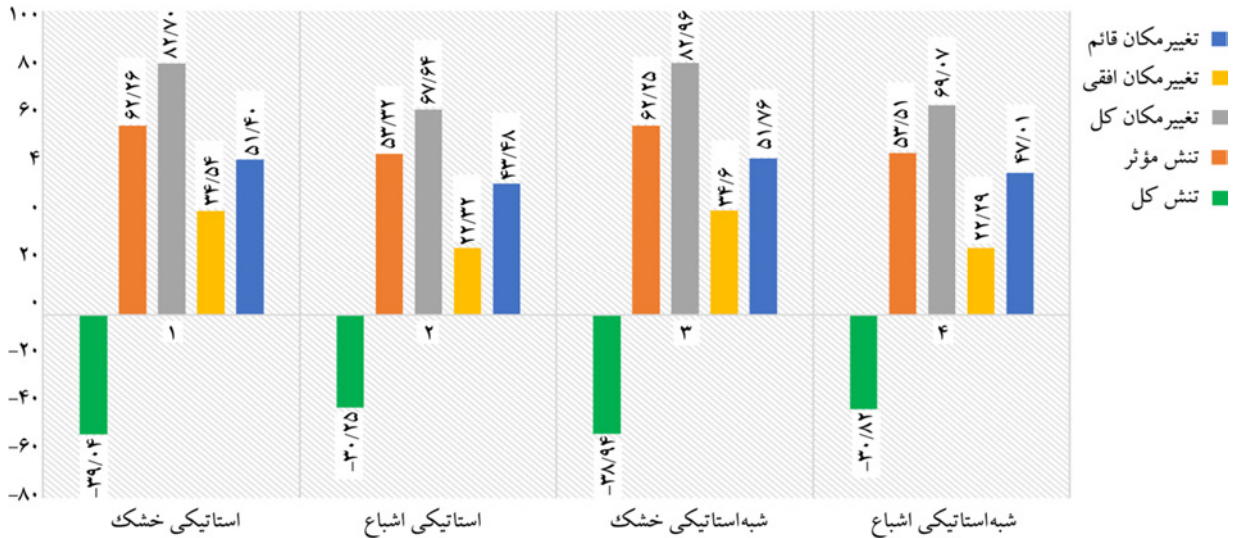
شکل (۱۱): نمودار تغییر پارامترهای خاک در مدل شماره ۳ نسبت به مدل شماره ۴



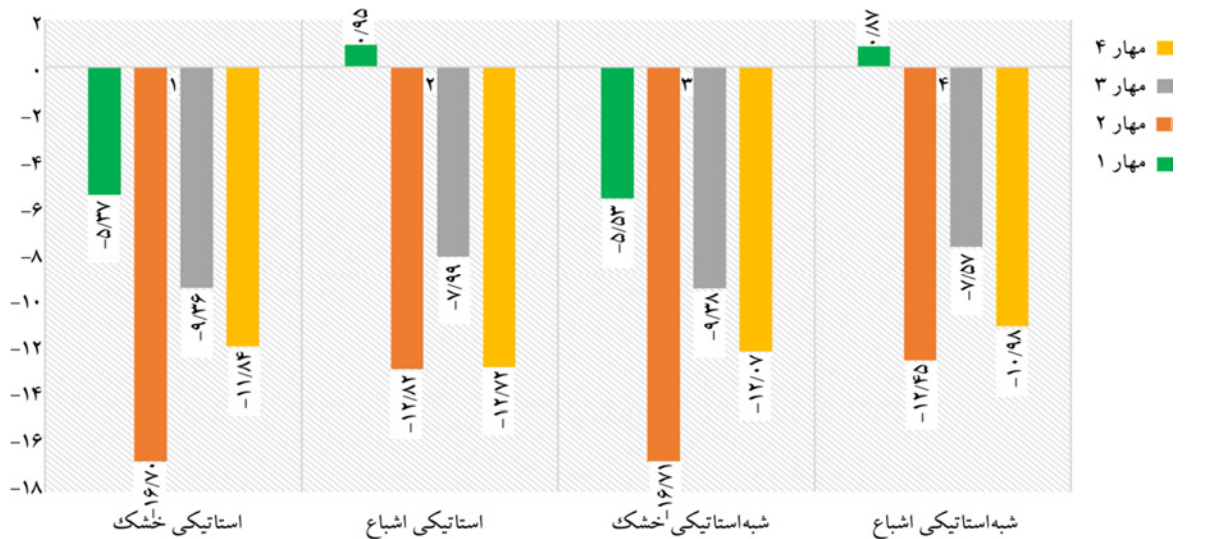
شکل (۱۲): نمودار تغییر پارامترهای سپری در مدل شماره ۱ نسبت به مدل شماره ۴



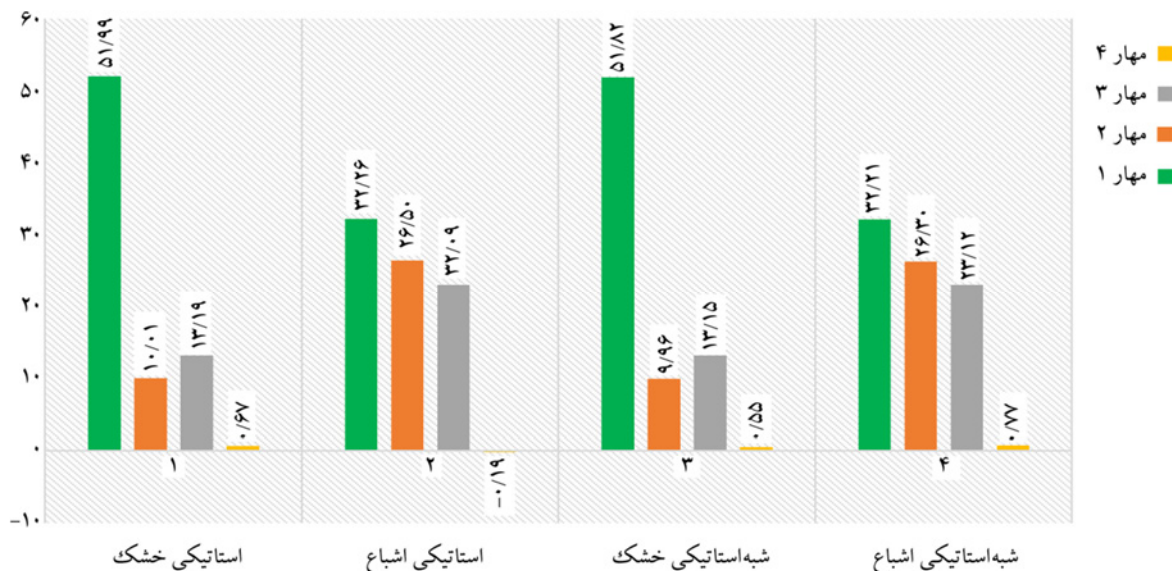
شکل (۱۳): نمودار تغییر پارامترهای سپری در مدل شماره ۲ نسبت به مدل شماره ۴



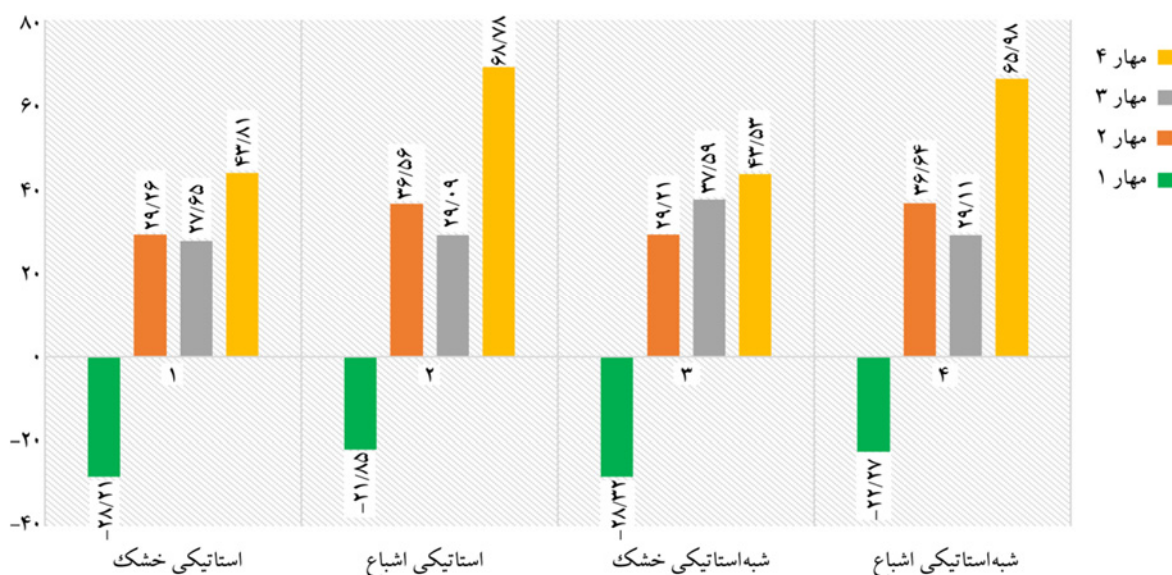
شکل (۱۴): نمودار تغییر پارامترهای سپری در مدل شماره ۳ نسبت به مدل شماره ۴



شکل (۱۵): نمودار تغییر نیروی مهارها در مدل شماره ۱ نسبت به مدل شماره ۴



شکل (۱۶): نمودار تغییر نیروی مهارها در مدل شماره ۲ نسبت به مدل شماره ۴



شکل (۱۷): نمودار تغییر نیروی مهارها در مدل شماره ۳ نسبت به مدل شماره ۴

۵- بحث و بررسی و تحلیل نتایج

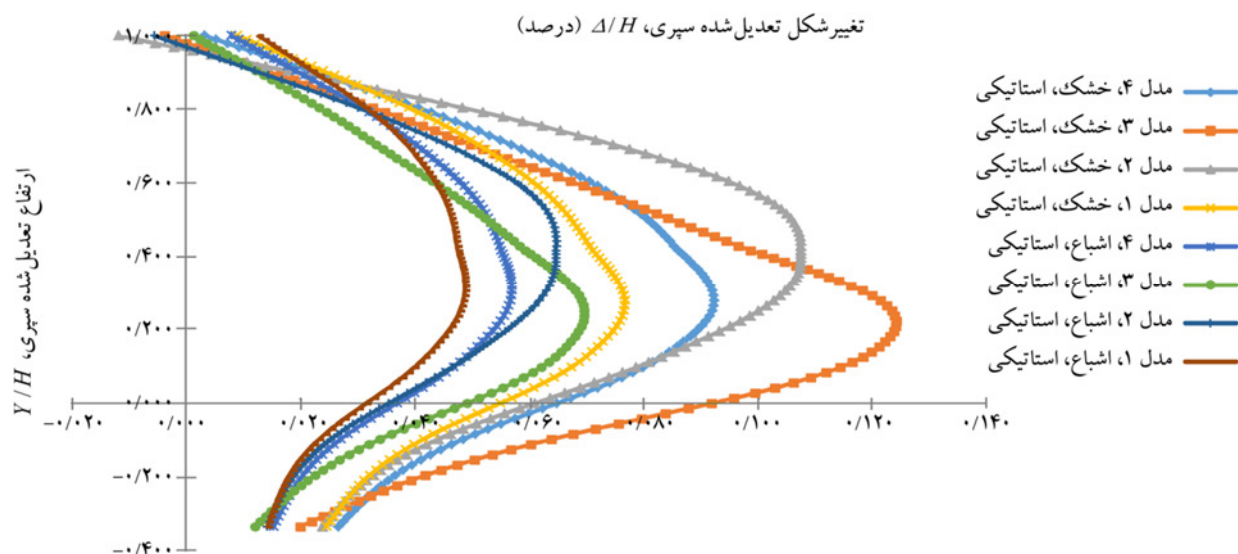
در حالت خشک تا ۱۰٪ کمتر شده و زمانی که عمق لایه‌ی سست بیشتر می‌شود (مدل ۳) مقادیر در حالت خشک حدود ۷/۵٪ و در حالت اشباع حدود ۵/۵٪ روند افزایشی می‌یابد. تغییر مکان افقی خاک به سمت گود در حالت وجود لایه‌ی سطحی سست (مدل ۱) در حدود ۱۴ تا ۱۷ درصد روند کاهشی دارد. در مدل‌های ۲ و ۳ که عمق لایه‌ی سست افزایش می‌یابد تغییرات تغییر مکان افقی خاک نیز روند افزایشی به خود می‌گیرد و از حدود ۱۳ تا ۳۵ درصد افزایش می‌یابد. در حالت اشباع مقدار تغییرات از حالت

با توجه به جدول (۳) و شکل‌های (۹) تا (۱۱)، تغییرات در مدل‌های دارای لایه‌ی سست در تنش کل خاک در حالت خشک در حدود ۵٪ و در حالت اشباع حدود ۱ الی ۲ درصد و کاهشی بوده که ناچیز است. تغییرات در تنش مؤثر خاک در حدود ۴ تا ۴/۵ درصد در حالت خشک و حدود ۲ تا ۴ درصد در حالت اشباع بوده که در این حالت با افزایش عمق لایه‌ی سست درصد تغییرات کمتر می‌شود. تغییر مکان کل خاک در مدل‌های ۱ و ۲

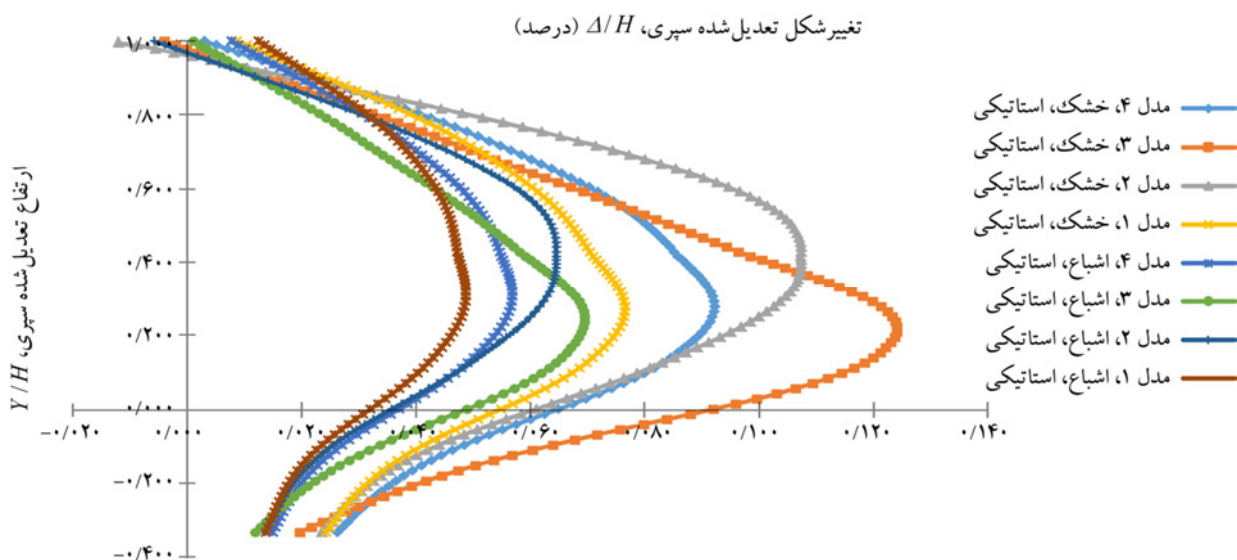
درصد نیروی برشی و همچنین ۲۲ تا ۳۵ درصد لنگر خمشی وارد بر سپری افزایش یافته است. تغییر شکل افقی و قائم سپری با وجود لایه‌ی سست سطحی (مدل ۱) به ترتیب تا ۱۷ و ۹ درصد کاهش یافته است. در مدل‌های ۲ و ۳ که لایه‌ی سست رسی زیر لایه‌ی سخت رسی قرار گرفته است، تغییر شکل افقی سپرهای فلزی به ترتیب تا ۱۷ و ۳۵ درصد افزایش یافته است که در حالت اشباع نسبت به حالت خشک مقادیر کمتر است. در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) نمودار تعدیل شده (نرمالیزه) تغییر شکل جانبی سپری نسبت به عمق گود آورده شده است.

خشک کمتر است. تغییر مکان قائم خاک نیز در اکثر مدل‌ها از حدود ۵ تا ۷ درصد کاهش می‌یابد.

با توجه به جدول (۴) و شکل‌های (۱۲) تا (۱۴)، روند تغییر نیروی محوری سپرهای فولادی از ۷ تا ۴۰ درصد و کاهش است. در مدل ۱ نیروی برشی وارد بر سپری تا حدود ۸/۵٪ و لنگر خمشی تا حدود ۱۸٪ کاهش می‌یابد. در مدل ۲ (لایه‌ی میانی سست) نیروی برشی ۶ تا ۱۸ درصد و لنگر خمشی ۲۷ تا ۳۰ درصد افزایش می‌یابد. در مدل ۳ که لایه‌ی تحتانی سست وجود دارد نسبت به مدلی که فاقد لایه‌ی سست است ۵۳ تا ۶۳



شکل (۱۸): نمودار تعدیل شده (نرمالیزه) تغییر شکل جانبی سپری فولادی در تحلیل استاتیکی



شکل (۱۹): نمودار تعدیل شده (نرمالیزه) تغییر شکل جانبی سپری فولادی در تحلیل شبه استاتیکی

در طراحی به‌ویژه در مورد مهارهای میانی لحاظ گردد.

۵- در حالت کلی می‌توان گفت با افزایش عمق و موقعیت لایه‌ی سست رسی، پارامترهای مؤثر بر رفتار سپری‌ها و مهارها روند افزایشی دارند.

۶- وجود لایه‌ی سست رسی زیر لایه‌ی سخت، تغییر مکان افقی خاک را افزایش می‌دهد که بایستی مورد توجه قرار گیرد.

۷- اشباع بودن خاک به‌ویژه در شرایط لرزه‌ای بر افزایش نیروی محوری مهارهای میانی مؤثر است.

مراجع

1. Ou, C.Y. (2006) *Deep Excavation, Theory and Practice*. Taylor & Francis, London.
2. Shao, Y. and Macari, E.J. (2008) Information feedback analysis in deep excavations. *International Journal of Geomechanics*, **8**(1), 91-103.
3. Underwood, C. and Greenlee, R. (2010) Steel sheet pile used as permanent foundation and retention systems-design and construction. *Earth Retention Conf.*, **3**, 129-136.
4. Ramsden, M. and Griffiths, T. (2010) Steel sheet pile wall wale rehabilitation. *Ports 2010*, 193-202.
5. Sellmeijer, J., Cools, J., Decker, J., and Post, W. (1995) Hydraulic resistance of steel sheet pile joints. *Journal of Geotechnical Engineering*, **121**(2), 105-110.
6. Ohori, K., Takahashi, K., Kawai, Y., and Shiota, K. (1988) Static analysis model for double sheet-pile wall structures, *Journal of Geotechnical Engineering*, **114**(7), 810-825.
7. Terzaghi, K. and Peck, R.B. (1996) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.
8. USACE (1991) *Design of Pile Foundations*. US Army Corps of Engineers Engineering Manual EM 1110-2-2906.
9. Lee, S.H., Kim, B.I., and Han, J.T. (2012) Prediction of penetration rate of sheet pile installed in sand by vibratory pile driver. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **16**(3), 316-324.

با توجه به جدول (۵) و شکل‌های (۱۵) تا (۱۷)، نیروی تمام مهارها در حالتی که لایه‌ی سست روی لایه‌ی سخت قرار گرفته (مدل ۱) کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش مربوط به مهار ۲ با حدود ۱۷ درصد و در حالت خشک و تحلیل استاتیکی می‌باشد. در مدل ۲، نیروی تمام مهارها روند افزایشی دارد اما مقادیر افزایش در مهارهای نزدیک به سطح زمین (مهار ۱ و ۲) نمود بیشتری دارد. در مدل ۳، نیروی مهار ۱، بین ۲۱ تا ۲۸ درصد کاهش یافته است و در مورد مهارهای دیگر روند افزایشی بوده که در مورد مهار ۴ در حالت اشباع به حدود ۶۹ درصد می‌رسد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اثرات وجود لایه‌ی سست رسی بر رفتار توده‌ی خاک و سپرهای فولادی که به‌عنوان سازه نگهدارنده مورد استفاده قرار می‌گیرند مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج به‌دست آمده و تفسیرهای صورت گرفته می‌توان گفت که:

- ۱- وجود لایه‌ی سطحی سست رسی روی لایه‌ی سخت خاک رس به‌طور کلی اثرات کاهنده‌ای بر تغییر شکل‌های خاک، نیروی مهارها و همچنین تغییر شکل و نیروهای وارد بر سپری‌های فولادی دارد.
- ۲- زمانی که لایه‌ی سست رسی زیر لایه‌ی سخت قرار می‌گیرد نیروی برشی وارد بر دیواره‌ی سپرکوبی افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که با افزایش عمق لایه سست این مقدار تا بیش از ۵۰ درصد افزایش پیدا می‌کند.
- ۳- با افزایش عمق لایه‌ی سست تغییر شکل جانبی، نیروی برشی و لنگر خمشی وارد بر سپری‌های فولادی افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در این تحقیق در عمقی مساوی ۲ برابر ضخامت لایه‌ی سست این پارامترها به بیش‌ترین مقدار خود می‌رسند و در حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد شاهد افزایش لنگر خمشی وارد بر دیواره‌ی سپرکوبی شده هستیم. در واقع تغییر شکل افقی بیش‌تر سبب بیش‌تر شدن لنگر خمشی می‌شود.
- ۴- قرار گرفتن لایه‌ی سست رسی زیر لایه‌ی سخت، عموماً موجب افزایش نیروی وارد بر مهارهای افقی می‌شود که این امر بایستی

- construction of a two-story underground parking garage in the city of Patras, Greece. *Proceedings of Fifth Int. Conf. on Case Histories in Geotech. Engineering*, New York, N.Y.
21. Wong, I.H., Poh, T.Y., and Chuah, H.L. (1997) Performance of excavations for depressed expressway in Singapore. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **123**(7), 617-625.
 22. Yoo, C.S. (2001) Behavior of braced and anchored walls in soils overlying rock. *Journal of Geotech. and Geoenviron. Engineering*, **127**(3), 225-233.
 23. Ma, J., Berggren, B., Stille, H., and Hintze, S. (2010) Deformation of anchor-sheet pile wall retaining system at deep excavations in soft soils overlying bedrock. *Deep and Underground Excavations*, 126-131.
 24. Finno, R.J. and Callvello, M. (2005) Supported excavations: the observational method and inverse modeling. *Journal of Geotech. and Geoenviron. Eng.*, **131**(7), 826-836.
 25. Day, R.A., and Potts, D.M. (1993) Modelling sheet pile retaining walls. *Journal of Computers and Geotechnics*, **15**(3), 125-143.
 26. Bilgin, Ö. (2012) Lateral earth pressure coefficients for anchored sheet pile walls. *International Journal of Geomechanics*, **12**(5), 584-595.
 27. Sahajda, K. (2014) Ground anchor loads measured on an excavation sheet pile wall. *Tunneling and Underground Construction*, 974-983.
 28. Athanasopoulos, G., Vlachakis, V., and Pelekis, P. (2011) Installation and performance of a steel sheet pile wall for supporting an excavation in urban environment. *Geo-Frontiers 2011*, 3370-3380.
 29. Das, B.M. and Sobhan, Kh. (2013) *Principles of Geotechnical Engineering*. Eighth Edition, CENGAGE Learning, Stamford, USA.
 10. Gopal Madabhushi, S., and Chandrasekaran, V. (2005) Rotation of Cantilever Sheet Pile Walls. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(2), 202-212.
 11. Bilgin, Ö. and Erten, M. (2009) Anchored sheet pile walls constructed on sloping ground. *Contemporary Topics in Ground Modification Problem Soils and Geo-Support*, 145-152.
 12. Gurinsky, M. (2001) Long-term strength of sheet pile bulkheads with ground anchors. *Ports '01*, 1-8.
 13. Hu, Y., Liu, G., and Zhao, Y. (2013) Calculation method of deformation and inner force of a sheet pile wall with relieving platform. *ICTE 2013*, 168-174.
 14. Zdravkovic, L., Potts, D.M., and St John, H.D. (2005) Modelling of a 3D excavation in finite element analysis. *Geotechnique*, **55**(7), 497-513.
 15. Laefer, D.F., Ceribasi, S., Long, J.H. and Cording, E.J. (2009) Predicting RC frame response to excavation-induced settlement. *Journal of Geotech. and Geoenviron. Eng.*, **135**(11), 1605-1619.
 16. Son, M. and Cording, E.J. (2005) Estimation of building damage due to excavation induced ground movements. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **131**(2), 162-177.
 17. Long, M. (2001) Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **127**(3), 203-224.
 18. Leonidou, E.A., Athanasopoulos, G.A., and Pelekis, P.C. (2001) Deep supported excavation for the underground parking of the Hellenic Parliament: measured vs. predicted behavior. *Proceedings of the 15th Int. Conf. on Soil Mech. and Geotech. Eng.*, Instanblul, Turkey, **2**, 1493-1496.
 19. Moorman, C. (2004) Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database. *Journal of Soils and Foundations*, **44**(1), 87-98.
 20. Zekkos, D.P., Athanasopoulos, A.G., and Athanasopoulos, G.A. (2004) Deep supported excavation in difficult ground conditions for the

اصطلاحات فنی

Sheet Pile

۱- سپری

Sheet Pile Wall with
Relieving Platform

۲- سپری‌های دارای پلتفرم