



Numerical Study of Soft Clay Layer Effects on Steel Sheet Pile Wall Parameters Using Hardening Soil Model

Behrouz Ahmadpour¹, Masoud Amelsakhi², Mohsen Kamalian³

1.Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran. E-mail: ahmadpour.b@qut.ac.ir

2.Corresponding Author, Civil Engineering Dept., Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran. E-mail: amelsakhi@qut.ac.ir

3.Geotechnical Dept., International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, Tehran, Iran, E-mail: kamalian@iiees.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received

2026-06-20

Received in revised form

2026-09-03

Accepted

2026-09-19

Available online

2026-10-01

Keywords:

sheet piling,
excavation,
soft clayey layer,
hardening soil model,
strut

ABSTRACT

Steel sheet pile walls are extensively employed in civil engineering projects as primary excavation support systems. In practice, soil profiles often exhibit nonuniform stratification, and loose or soft layers may occur at various depths. The presence of such layers can substantially influence ground-surface displacements, as well as the internal forces and bending moments mobilized within sheet piles and struts during excavation operations, compared with conditions involving a fully uniform soil profile. These effects must therefore be taken into account in the design of sheet pile systems. In the present study, a deep excavation is analyzed using the finite element method. The soil profile is idealized as three clay layers, one of which consists of soft clay. The soft layer is assigned to three different positions within the profile—upper, middle, and lower—and the corresponding responses are compared with those from a reference case without a soft layer. In addition, a pseudo-static analysis is performed by applying a horizontal acceleration of 0.3g to simulate seismic loading. The results indicate that the presence of an upper soft clay layer exerts negligible influence on the vertical displacements of the ground surface and sheet pile wall. Conversely, when the soft clay layer is located beneath stiffer units, the shear forces, lateral deformations, and bending moments acting on the sheet pile wall increase markedly.

Cite this article: Ahmadpour, Behrouz., Amelsakhi, Masoud., & Kamalian, Mohsen. (2026). Numerical Study of Soft Clay Layer Effects on Steel Sheet Pile Wall Parameters Using Hardening Soil Model. *Advanced Modeling in Civil Engineering*, 3(3), 49-67. DOI: 10.22126/amcen.2026.13166.1048



© The Author(s).

DOI: 10.22126/amcen.2026.13166.1048

Publisher: Razi University

Introduction

Excavation-induced ground movements pose significant risks to adjacent structures and utilities, particularly in urban environments where deep excavations are frequently required for infrastructure development. Retaining systems—such as sheet pile walls supported by struts—are commonly employed to mitigate these risks. However, heterogeneous soil profiles, especially soft clay layers embedded within predominantly stiff clay deposits, can substantially modify the distribution of stresses, forces, and deformations acting on these systems. The presence of soft layers may amplify lateral displacements or alter load-transfer mechanisms, potentially resulting in excessive bending moments, shear forces, and increased axial demand on struts.

This study examines the influence of a single soft clay layer on the performance of sheet pile walls in braced excavations under both static and pseudo-static conditions. Building on prior research (Ahmadpour et al., 2015), which reported increases in strut forces and bending moments when soft layers underlie stiff clays, the present work extends the investigation by incorporating seismic effects through a pseudo-static horizontal acceleration of 0.3g. The objectives of this study are to: (1) quantify variations in soil deformations, sheet pile stresses, and strut forces associated with different soft-layer positions; (2) evaluate system behavior under both saturated and dry conditions; and (3) provide design implications for permanent retaining structures in seismic-prone regions.

Finite element modeling using PLAXIS is employed to simulate realistic soil–structure interaction and to address existing knowledge gaps regarding the role of soft-layer depth in governing the stability and performance of braced excavations.

Method

The numerical simulations were performed using PLAXIS 2D with a plane strain formulation, which is appropriate given the large longitudinal extent of the excavation. The model represents a symmetric half-section of a 10 m wide and 12 m deep excavation, supported by steel sheet piles with a total length of 16 m, extending 4 m below the excavation base. Lateral support is provided by four horizontal struts, spaced at 3 m intervals in the vertical direction, with the uppermost strut positioned 1 m below the ground surface and a longitudinal spacing of 5 m.

The soil profile consists of four layers: three clay layers (each 4 m thick) underlain by a 13 m thick gravel layer. An overburden pressure of 5 kN/m² is applied at the ground surface to represent surcharge loading. Groundwater levels are assigned at 1 m below the ground surface for saturated analyses.

To isolate the influence of the soft clay layer, four numerical models were developed. Model 1 incorporates a soft clay layer at the top of the clay sequence, Model 2 positions the soft layer in the middle, and Model 3 places it at the bottom of the clay stack. Model 4 serves as the reference configuration, consisting entirely of stiff clay layers. In Models 1–3, the soft

clay layer maintains the same 4 m thickness and directly replaces the corresponding stiff clay layer in the stratigraphy.

Results

Horizontal ground displacements—an essential parameter for evaluating the stability of adjacent structures—decrease by approximately 5–9% in Model 1 (soft layer at the top) relative to the reference Model 4, primarily due to the increased confinement provided by the underlying stiff layers. In contrast, deeper placements of the soft layer result in amplified movements: Model 2 exhibits an increase of nearly 10%, whereas Model 3 shows increases exceeding 14%. These trends are consistent with Long's (2001) database of 300 case histories, which indicates that soft layers thicker than 0.6H tend to raise maximum lateral wall deformations ($\delta_{h,max}$) from typical values of 0.05–0.25%H observed in stiff soil deposits.

Normalized lateral deformations of the sheet pile wall (Figure 18) fall within the range of 0.03–0.055%H. The largest deformation—approximately 0.055%H—occurs in Model 3. Notably, Model 2 demonstrates a shift in the depth at which the maximum deformation develops, indicating an altered deflection mechanism associated with the intermediate positioning of the soft layer.

Conclusions

This finite element study demonstrates that a soft clay layer in stiff clay profiles generally induces negligible reductions in shallow deformations and forces when positioned at the top but amplifies risks with depth. Key findings include: (1) reduced overall deformations and moments in surficial soft layers, with changes <10%; (2) 10% shear force escalation in deeper placements; (3) up to 30% bending moment increases at twice-layer-depth, necessitating enhanced section design; (4) elevated mid-strut loads, critical for braced systems; (5) progressive rises in influencing parameters with depth; and (6) heightened lateral soil movements (>14%), vital for protecting adjacent infrastructure.

Design recommendations advocate site-specific geotechnical profiling to locate soft layers, prioritizing reinforced struts and deeper embedment in seismic zones. Future work could incorporate dynamic analyses and multi-layer heterogeneity for refined guidelines. These insights enhance safe excavation practices, reducing urban construction hazards.

Author Contributions

All authors participated in writing and revising the article.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.



بررسی و مطالعه عددی تاثیر وجود لایه رسی نرم بر پارامترهای سپرکوبی با استفاده از مدل رفتاری HS

بهروز احمدپور^۱، مسعود عامل سخی^۲✉، محسن کامالیان^۳

۱. گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران. رایانامه: ahmadpour.b@qut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران. رایانامه: amelsakhi@qut.ac.ir

۳. پژوهشکده ژئوتکنیک، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران. رایانامه: kamalian@iiees.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۹ کلیدواژه ها: سپرکوبی، گودبرداری، لایه رسی نرم، مهاربند، مدل خاک سخت شونده	سپرکوبی به طور گسترده در پروژه های مهندسی عمران به عنوان سازه نگهبان در گودبرداری ها مورد استفاده قرار می گیرند. خاک در عمق معمولاً یکنواخت نیست و ممکن است در ترازهای مختلف، لایه های سست یا رسی نرم وجود داشته باشد. وجود این لایه ها می تواند موجب تغییراتی در جابه جایی سطح زمین، نیروها و لنگرهای وارد بر سپری و مهاربندها در حین فرآیند گودبرداری نسبت به حالتی که خاک در عمق یکنواخت است شود. بنابراین این تفاوت باید در طراحی سپرها و مهاربندها مورد توجه قرار گیرد. در این پژوهش، یک گودبرداری عمیق با استفاده از روش اجزای محدود و مدل رفتاری خاک سخت شونده تحلیل شده است. عمق گود به سه لایه رسی تقسیم شده که یکی از این سه لایه به صورت رسی نرم در نظر گرفته شده و موقعیت آن در سه حالت مختلف شامل بالایی، میانی و پایینی مدل سازی شده است. نتایج به دست آمده نسبت به حالت بدون لایه نرم مقایسه شده اند. همچنین تحلیل شبه استاتیکی با اعمال شتاب افقی $0.3g$ انجام گرفته است. نتایج نشان می دهد که وجود لایه رسی نرم در بخش بالایی، تاثیر قابل توجهی بر جابجایی های قائم سطح زمین و نیز سپر ندارد. با این حال وجود لایه رسی نرم در زیر لایه های سخت تر باعث افزایش نیروهای برشی، تغییر شکل های جانبی و لنگرهای خمشی وارد بر سپر فولادی می شود.

استناد: احمدپور، بهروز؛ عامل سخی، مسعود؛ و کامالیان، محسن. (۱۴۰۵). بررسی و مطالعه عددی تاثیر وجود لایه رسی نرم بر پارامترهای سپرکوبی با استفاده از مدل رفتاری HS. *مجله مدل سازی پیشرفته در مهندسی عمران*، ۳(۳)، ۴۹-۶۷.

DOI: 10.22126/amcen.2026.13166.1048

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه رازی.



۱. مقدمه

گودبرداری های عمیق در پروژه های عمرانی شهری، به ویژه در مناطقی با پروفیل خاک ناهمگن، یکی از چالش های اصلی مهندسی ژئوتکنیک به شمار می رود. این عملیات می تواند منجر به جابه جایی های جانبی خاک و تغییر شکل های نامطلوب شود که به طور مستقیم بر ایمنی ساختمان ها و تاسیسات مجاور تاثیر می گذارد. سیستم های حمایتی مانند دیوارهای سپر، همراه با مهارها، نقش حیاتی در کنترل این حرکات ایفا می کنند، اما وجود لایه های نرم رسی در عمق های مختلف می تواند توزیع نیروها، ممان های خمشی و جابه جایی ها را به طور قابل توجهی تغییر دهد. درک اثرات چنین لایه هایی بر رفتار کلی سازه نگهبان، نه تنها به بهینه سازی طراحی کمک می کند، بلکه خطراتی مانند آسیب به سازه های اطراف و افزایش هزینه های تعمیراتی را کاهش می دهد. این مطالعه بر آن است تا با تمرکز بر موقعیت لایه نرم رسی، جنبه های عملی و ایمنی این پدیده را بررسی کند.

۲. پیشینه ی پژوهش

در روش سپرکوبی، سپرهای فولادی به وسیله ضربه، ارتعاش استاتیکی یا ترکیبی از این دو در خاک کوبیده می شوند و با پیشرفت عملیات گودبرداری، مهاربندهای مورد نیاز در فواصل مناسب نصب می گردند [۱]. تاکنون مطالعات متعددی در خصوص رفتار دیوارهای سپری انجام شده است.

برای دستیابی به یک گودبرداری موفق، رفتار سازه نگهبان و همچنین زمین مجاور باید در مرحله طراحی مورد توجه قرار گیرد. در گودبرداری های عمیق در خاک های نرم، رفتار سازه نگهبان به عوامل متعددی بستگی دارد [۲،۳]. ویژگی های تغییر شکل سازه نگهبان نه تنها به خصوصیات خاک گودبرداری شده، بلکه به لایه های زیرین نیز وابسته است. مطالعات انجام شده بر روی خاک های چندلایه قرار گرفته بر روی سنگ نشان داده اند که میزان تغییر شکل ها نسبتاً اندک است [۴-۶]. مقاومت کم خاک های نگهدارنده و ضخامت لایه های نرم، از مهم ترین عوامل مؤثر در کنترل میزان تغییر شکل ها هستند. همچنین اثر مطلوب سنگ بستر ممکن است در صورت ضخامت زیاد لایه های نرم از بین برود [۷].

رفتار گودبرداری های عمیق با سازه نگهبان معمولاً با استفاده از پارامترهایی نظیر جابجایی دیوارها و توزیع فشار جانبی، حرکت توده خاک اطراف گود، جابجایی سازه های مجاور و نیروهای وارد بر مهاربندها توصیف و تحلیل می شود. پژوهش ها در زمینه ارزیابی این پارامترها معمولاً در سه مسیر اصلی انجام می گیرد:

۱. تحلیل های عددی و تئوری [۸].
۲. آزمایش های مدل فیزیکی در مقیاس کوچک یا متوسط [۹، ۱۰].
۳. جمع آوری داده های عملکردی از پروژه های واقعی گودبرداری های عمیق با ابزار دقیق [۱۱-۱۳، ۴].

ارزیابی ظرفیت باربری قائم سپری ها بر اساس تحلیل های متداول مربوط به شمع ها می باشد [۱۴، ۱۵]. ظرفیت سازه ای سپر نیز معمولاً با در نظر گرفتن ترکیب بارهای محوری و یا برون محوری ناشی از بارهای یکنواخت یا متمرکز دیوار، همراه با لنگرهای خمشی ناشی از فشار جانبی خاک محاسبه می گردد. در تحلیل سازه ای، سپر فولادی به صورت ستونی از جنس فولاد که تحت اثر بار محوری و لنگر خمشی قرار دارد مدل می شود [۱۶].

در برخی پروژه های مهندسی عمران، دیوارهای سپرکوبی مهار شده ممکن است در شیب ها نصب شوند. روش های متداول طراحی این نوع دیوارها معمولاً بر پایه تعادل حدی استوارند و فرآیندهای ساخت را در نظر نمی گیرند. احداث دیوار سپری بر روی شیب ممکن است نیازمند عملیات خاکبرداری و خاکریزی باشد که تغییرات بارگذاری و باربرداری در اطراف دیوار را در پی دارد و سبب رفتار متفاوت آن می شود. نتایج مطالعه بیلگین و ارتن با استفاده از روش اجزای محدود نشان داد که موقعیت دیوار مهاربندی شده بر روی شیب تاثیر چشم گیری بر رفتار آن دارد؛ برای مثال نیروی مهاربندها با جابجایی دیوار از بالای شیب به پایین آن حدود ۳۰ درصد کاهش می یابد [۱۷].

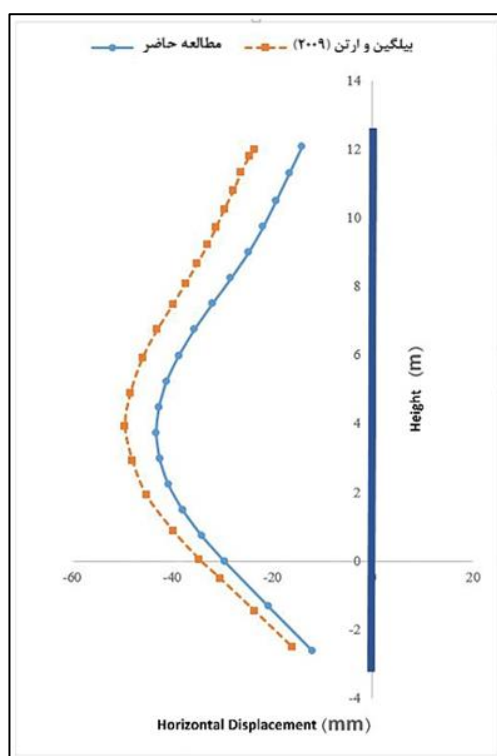
بیلگین (۲۰۱۲) به بررسی فشارهای جانبی زمین وارد بر دیوارهای سپری مهاربندی شده پرداخت. اگرچه تمرکز تنش در محل مهاربندها مشاهده می شود، اما روش های طراحی متداول این تمرکز تنش را در طول ارتفاع دیوار در نظر نمی گیرند و فرض می کنند فشار جانبی زمین به صورت خطی با عمق افزایش می یابد. از آنجا که کل طراحی بر اساس فشارهای جانبی انجام می شود، چنین فرض نادرستی ممکن است به طراحی محافظه کارانه یا حتی نایمن منجر

کمتر به صورت مقایسه‌ای و موقعیت‌محور بررسی شده است. در این پژوهش با استفاده از تحلیل اجزای محدود در ۳ حالت مختلف قرارگیری لایه نرم، نقش عمق این لایه بر عملکرد سازه نگهبان از نوع سپرکوبی بررسی شده که موجب برداشت دقیق‌تری از رفتار گودبرداری و سپری‌ها در نهشته‌های رسی ناهمگن می‌شود.

۳. روش‌شناسی پژوهش

۳-۱. صحت‌سنجی مدل‌سازی

به منظور صحت‌سنجی، مقایسه‌ای بین نتایج تحقیق بیلگین و ارتن [۱۷] و مدل‌سازی نرم‌افزاری PLAXIS انجام شده و نتایج به‌دست‌آمده با یک‌دیگر مقایسه شدند. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب تغییر شکل جانبی و لنگر خمشی وارد بر دیواره سپرکوبی شده را در مدل‌سازی مجدد نشان می‌دهند. مقایسه بین مدل‌سازی مجدد و نتایج محققان گذشته، همخوانی خوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. مقایسه تغییر شکل جانبی سپری در مدل صحت‌سنجی

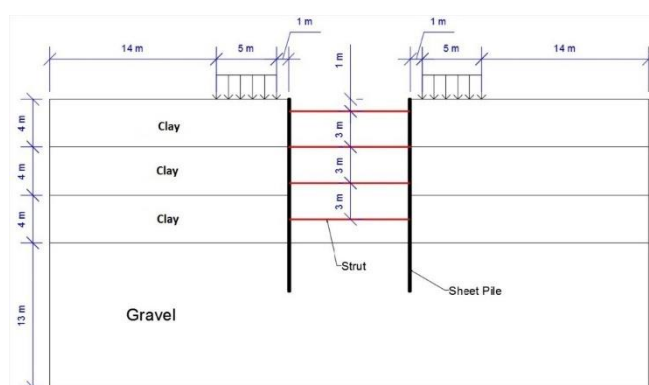
شود. نتایج مطالعه پارامتری مقایسه‌ای بین روش طراحی متداول و تحلیل عددی اجزای محدود نشان داد که فشارهای فعال و مقاوم جانبی با عمق به صورت خطی تغییر نمی‌کنند. همچنین روش طراحی متداول، لنگر خمشی دیوار را حدود ۵۰ درصد بیش از مقدار واقعی (بر اساس تحلیل عددی) برآورد می‌کند، در حالی‌که نیروهای مهاربند در تحلیل عددی حدود ۴۰ درصد بیش‌تر از مقادیر حاصل از طراحی متداول به‌دست آمدند [۱۸].

ساجا (۲۰۱۴) در پژوهشی به تعیین نیروی مهاربندها در دیوار سپری پرداخت. اندازه‌گیری‌ها نشان داد که نیروهای واقعی مهاربندها به‌طور میانگین حدود ۶۸ درصد مقادیر محاسبه‌شده در طراحی بر اساس فرض زهکشی کامل در خاک‌های رسی هستند. در مقابل، محاسبات بر مبنای شرایط تحکیم‌نیافته، نیروهای بسیار کوچک‌تری نسبت به مقادیر واقعی به‌دست می‌دهند و از آنجا که این موضوع از دیدگاه ایمنی نامطلوب است، توصیه می‌شود در مورد خاک‌های رسی سخت و نیمه‌سخت از فرض زهکشی‌نشده استفاده نشود. همچنین مشخص شد که نیروی واقعی مهاربند بیش از آن‌که به بار سطحی طرف نگه داشته شده بستگی داشته باشد، به مقدار نیروی اولیه مهاربند وابسته است [۱۹].

آتاناسوپولوس و همکاران (۲۰۱۱) عملکرد دیوار سپری فولادی را در یک پروژه گودبرداری عمیق در محیط شهری مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که دیوارهای سپری فولادی مهارشده که به روش ارتعاشی نصب می‌شوند، در صورتی‌که ضخامت قابل‌توجهی از لایه‌های شن و ماسه در محل وجود نداشته باشد و لرزش‌های ناشی از کوبش به‌طور سیستماتیک کنترل شوند، می‌توانند به‌صورت ایمن در محیط‌های شهری مورد استفاده قرار گیرند. همچنین در صورت وجود اطلاعات دقیق از شرایط زمین و مراحل ساخت، می‌توان با استفاده از نرم‌افزارهای عددی ژئوتکنیکی متداول رفتار واقعی گودبرداری‌های عمیق را با دقت مناسبی پیش‌بینی کرد [۲۰]. مطالعات متعدد دیگری نیز در خصوص تغییر پارامترهای خاک به‌سازی شده، بررسی در محیط‌های متخلخل نیز وجود دارد [۳۱-۳۲]. نتایج تحلیل گودبرداری در رس نرم نشان‌دهنده برتری روش اجزای محدود با مدل‌های پیشرفته خاک نسبت به مدل‌های ساده است [۲۱-۲۴]. با وجود مطالعات گسترده بر رفتار گودهای مهاربندی‌شده، اثر موقعیت لایه نرم رسی در میان لایه‌های سخت و

مدل سازی شده اند، به طوری که در نهایت، چهار مهار در عمق گودبرداری در نظر گرفته شده است. فاصله مهارها در جهت طولی گودبرداری ۵ متر است. سربار روی سطح زمین 5 kN/m^2 منظور شده است. پروفیل خاک با چهار لایه مدل سازی شده است. ضخامت سه لایه رسی بالایی ۴ متر است. ضخامت لایه چهارم که شنی بوده سپری ها در آن نفوذ می کنند، ۱۳ متر است (شکل ۳). در مواردی که شرایط اشباع بررسی شده، سطح آب زیرزمینی ۱ متر زیر سطح زمین در نظر گرفته شده است. یکی از سه لایه رسی به عنوان رس نرم در نظر گرفته شده که موقعیت آن در مدل های مختلف تغییر می کند و اثرات آن مورد مطالعه قرار می گیرد.

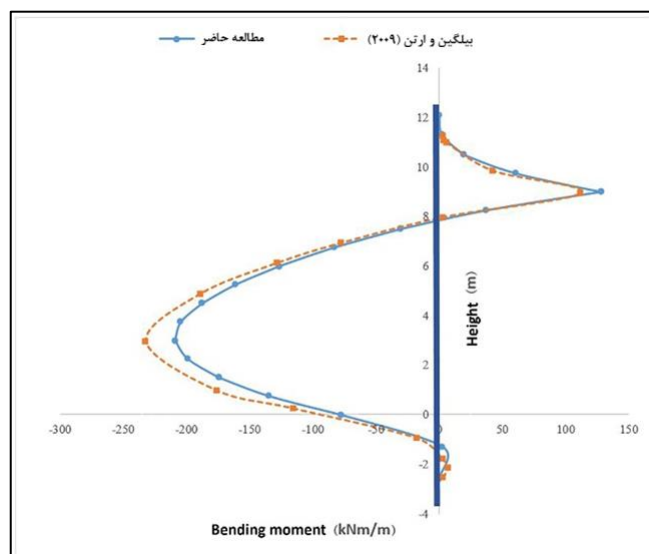
با توجه به تحقیقات پیشین، شرایط مرزی به گونه ای در نظر گرفته شده است که مرزها بر نتایج حاصل اثر ناچیزی داشته باشند. در اطراف مدل، تغییر شکل افقی و در کف مدل هر دو تغییر مکان افقی و قائم محدود شده اند [۱]. همچنین با توجه به تقارن، تنها نیمی از هندسه، مدل سازی شده است.



شکل ۳. مقایسه لنگر خمشی وارد بر سپری در مدل صحت سنجی

۳-۳. مشخصات مصالح

جدول ۱ مشخصات خاک مورد استفاده در این مطالعه را نشان می دهد. مدل رفتاری خاک سخت شونده (HS) در تحلیل ها به کار گرفته شده است. پارامترهای مورد نیاز برای این مدل رفتاری از مطالعات قبلی اقتباس شده اند [۲۸-۳۰]. همچنین مشخصات مورد نیاز برای مدل سازی سپری و مهارها در جدول ۲ آمده است.



شکل ۲. مقایسه لنگر خمشی وارد بر سپری در مدل صحت سنجی

لایه نرم اثرات متفاوتی بر نیروهای وارد بر دیواره سپر و سیستم مهارها دارد. در این مطالعه، یک گودبرداری با سازه نگهدارنده سپری در نظر گرفته شده و با استفاده از نرم افزار اجزای محدود PLAXIS، اثرات لایه رسی نرم بر تغییر شکل خاک و سازه نگهدارنده مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که سپرکوبی ممکن است به عنوان سازه نگهدارنده دائمی مورد استفاده قرار گیرد، عملکرد بلندمدت دیواره سپری در شرایط لرزه ای مورد ارزیابی قرار گرفته و تحلیل شبه استاتیکی با شتاب افقی $0.3g$ انجام شده است. مطالعات قبلی نویسندگان در لایه های رسی با استفاده از مدل های رفتاری ساده تر نشان می دهد که وجود لایه نرم در پایین لایه های سفت، نیروهای محوری مهارها و ممان های خمشی دیواره های سپر را افزایش می دهد [۲۵-۲۷].

۳-۲. هندسه مدل و شرایط مرزی

عرض و عمق گودبرداری مورد نظر به ترتیب ۱۰ و ۱۲ متر است. جهت طولی گودبرداری به قدری طویل است که بتوان حالت کرنش صفحه ای در مدل سازی در نظر گرفت. به دلیل تقارن، نیمی از هندسه پروژه مدل سازی شده است. طول نهایی دیواره سپرکوبی شده فولادی ۱۶ متر است. اولین مهار در عمق یک متری زیر سطح زمین نصب شده و مهارهای بعدی با فاصله ۳ متری از یکدیگر

جدول ۱. مشخصات خاک

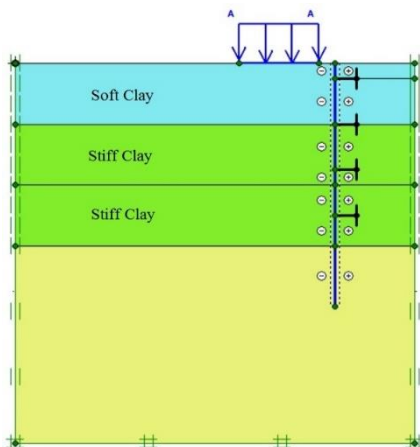
شن	رس سخت	رس نرم	نوع خاک
20.5	17	15	γ (kN/m ³)
21.5	18	16	γ_{sat} (kN/m ³)
40000	9500	4300	E_{50}^{ref} (kN/m ²)
120000	30000	14400	E_{ur}^{ref} (kN/m ²)
40000	12000	1800	E_{oed}^{ref} (kN/m ²)
0.45	0.2	0.2	ν_{ur}
0.5	1	0.9	m
100	100	100	p_{ref}
1	30	15	c (kN/m ²)
35	28	27	ϕ (°)
5	0	0	ψ (°)
0.9	0.9	0.9	R

جدول ۲. مشخصات سپری و مهارها

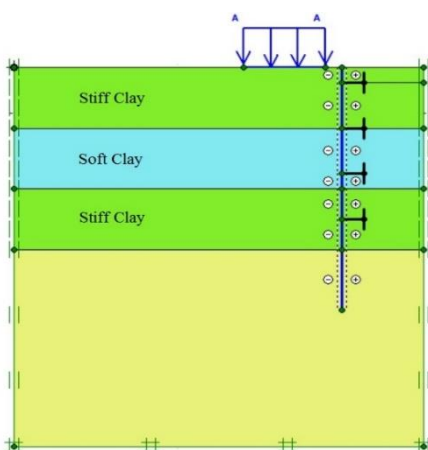
المان	پروفیل	E (kN/m ²)	EA	EI (kNm ² /m)
سپری	PZ40	2×10^8	4.98×10^6 (kN/m)	1.341×10^5
مهار	HP 200×53	2×10^8	1.368×10^6 (kN)	-

۳-۴. مدل سازی عددی

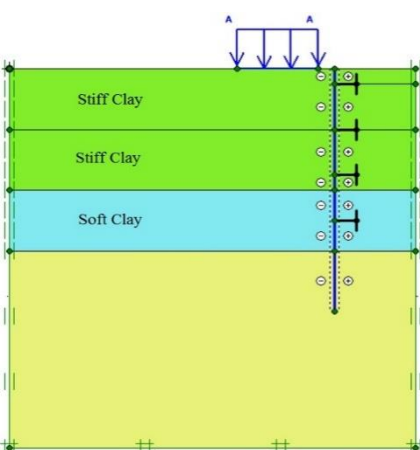
چهار مدل مختلف در نظر گرفته شده است (شکل های ۴ تا ۷). در تحلیل های شبه استاتیکی، شتاب افقی $0.3g$ برای همه مدل ها در نظر گرفته شده است. لایه های خاک با استفاده از المان های مثلثی ۱۵ گره ای مدل سازی شده اند. مش مدل المان محدود معمولی شامل ۱۱۷۰ المان است. در اطراف سپری از مش ریزتر استفاده شده است.



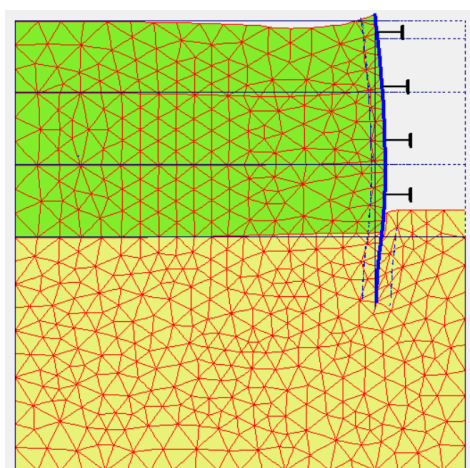
شکل ۴. مدل گودبرداری با لایه رسی سطحی نرم (مدل ۱)



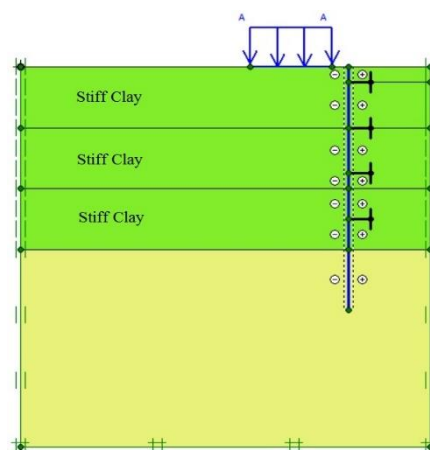
شکل ۵. مدل گودبرداری با لایه رسی میانی نرم (مدل ۲)



شکل ۶. مدل گودبرداری با لایه رسی پایینی نرم (مدل ۳)



شکل ۸. نمای مش تغییر شکل یافته مدل ۴ پس از تحلیل



شکل ۷. مدل گودبرداری بدون لایه رسی نرم (مدل ۴)

۴. نتایج تحلیل

نمای مش تغییر شکل یافته مدل شماره ۴ در شکل ۸ نشان داده شده است. رابطه‌ی (۱) درصد تغییر پارامترهای مختلف به دست آمده در مدل‌های ۱، ۲ و ۳ را در مقایسه با مدل شماره ۴ نشان می‌دهد. که در آن U_i مقدار پارامترهای مربوطه (تنش، جابه‌جایی یا نیرو) در مدل‌های دارای لایه نرم و U_4 مقدار پارامترها در مدل بدون لایه نرم است. نتایج به دست آمده در جداول ۳ تا ۵ ارائه شده‌اند.

$$\Delta U = \frac{U_i - U_4}{U_4} \times 100 \quad (1)$$

نتایج ارائه شده در جدول‌های ۳ و ۴ در شکل‌های ۹ تا ۱۷ ترسیم شده‌اند. شایان ذکر است که St = تحلیل استاتیکی، PS = تحلیل شبه‌استاتیکی، D = وضعیت خشک و S = وضعیت اشباع می‌باشد.

جدول ۳. درصد تغییرات در تنش و تغییر شکل خاک

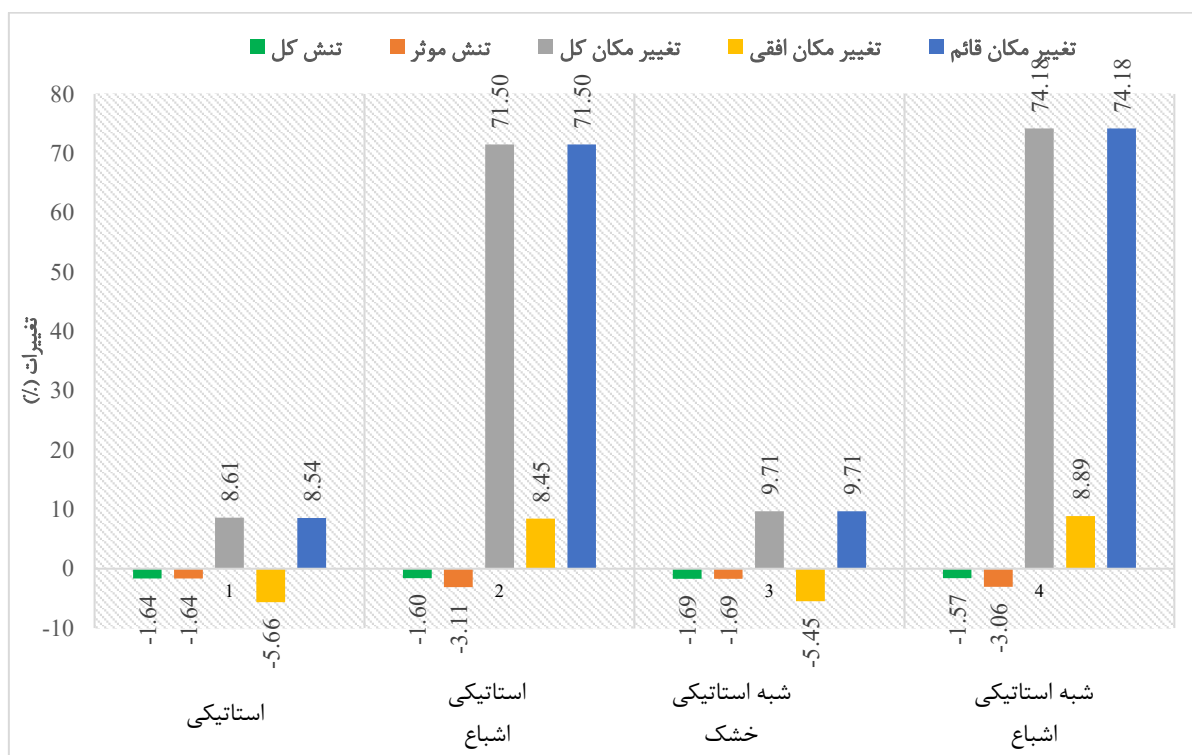
پارامترها	موقعیت لایه رس نرم											
	لایه پایینی (مدل ۳)				لایه میانی (مدل ۲)				لایه سطحی (مدل ۱)			
	نوع تحلیل											
	شبه استاتیک		استاتیک		شبه استاتیک		استاتیک		شبه استاتیک		استاتیک	
	شرایط خاک (Sat = اشباع، Dry = خشک)											
	Dry	Sat	Dry	Sat	Dry	Sat	Dry	Sat	Dry	Sat	Dry	Sat
تنش کل	-1.64	-1.60	-1.69	-1.57	-1.72	-1.63	-1.63	-1.61	-1.60	-1.56	-1.58	-1.53
تنش موثر	-1.64	-3.11	-1.69	-3.06	-1.72	-3.17	-1.63	-3.14	-1.60	-3.04	-1.58	-2.99
تغییر شکل کل	8.61	71.50	9.71	74.18	-3.34	-6.40	-2.86	-5.96	-2.87	-5.70	-1.60	-5.56
تغییر شکل جانبی	-5.66	8.45	-5.45	8.89	8.40	11.99	8.18	11.05	14.24	14.17	14.14	13.75
تغییر شکل قائم	8.54	71.50	9.71	74.18	-3.34	-6.40	-2.86	-5.96	-2.87	-5.70	-1.66	-5.56

جدول ۴. درصد تغییرات در پارامترهای سپری

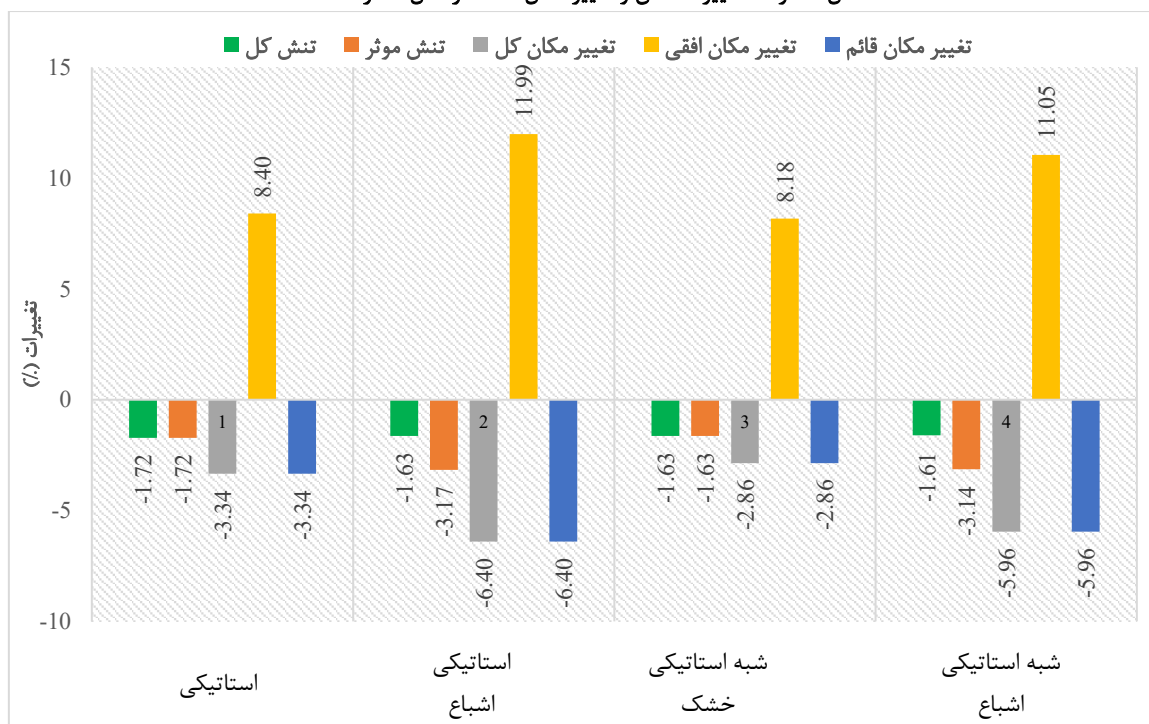
پارامترها	موقعیت لایه رس نرم											
	لایه پایینی (مدل ۳)				لایه میانی (مدل ۲)				لایه سطحی (مدل ۱)			
	نوع تحلیل											
	شبه استاتیک		استاتیک		شبه استاتیک		استاتیک		شبه استاتیک		استاتیک	
	شرایط خاک (Sat = اشباع، Dry = خشک)											
	Dry	Sat	Dry	Sat	Dry	Sat	Dry	Sat	Dry	Sat	Dry	Sat
نیروی محوری	-5.43	-6.18	-4.20	-5.77	-4.31	-3.90	-3.41	-3.64	-15.46	-13.28	-14.74	-12.84
نیروی برشی	-4.31	-8.31	-4.48	-8.14	-9.72	-11.79	-9.78	-10.93	9.28	8.78	9.09	8.68
لنگر خمشی	-4.50	-12.13	-3.46	-8.82	-4.60	14.93	-9.44	17.64	23.69	28.36	17.60	30.17
تغییر شکل جانبی	-5.66	-10.35	-5.45	-10.24	8.40	11.99	8.18	11.05	14.24	14.17	14.14	13.75
جابه‌جایی قائم	-2.54	-8.12	-2.90	-10.44	-3.66	-13.20	-4.06	-15.38	3.10	-8.12	2.61	-6.04

جدول ۵. درصد تغییرات در پارامترهای مهارها

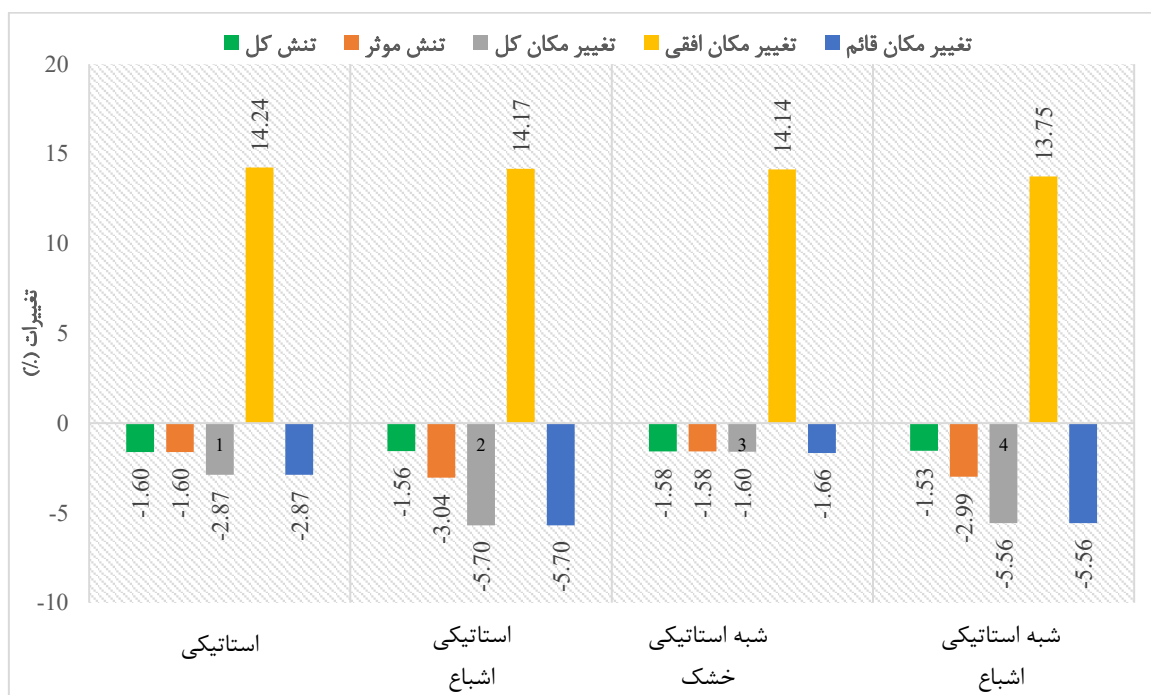
پارامترها	موقعیت لایه رس نرم											
	لایه پایینی (مدل ۳)				لایه میانی (مدل ۲)				لایه سطحی (مدل ۱)			
	نوع تحلیل											
	شبه استاتیک		استاتیک		شبه استاتیک		استاتیک		شبه استاتیک		استاتیک	
	شرایط خاک (Sat = اشباع، Dry = خشک)											
	Dry	Sat	Dry	Sat	Dry	Sat	Dry	Sat	Dry	Sat	Dry	Sat
نیروی محوری	-17.02	-21.51	-18.17	-22.81	25.25	19.95	26.15	17.24	-2.67	-0.92	-3.07	-1.38
نیروی برشی	-9.12	-14.68	-9.46	-14.26	12.78	14.96	12.83	15.03	4.91	6.37	4.75	6.37
لنگر خمشی	-5.69	-10.69	-5.57	-10.32	-3.99	-8.44	-4.04	-8.08	4.84	3.43	4.79	3.22
تغییر شکل جانبی	-5.35	-10.44	-5.02	-9.82	-2.17	-6.34	-1.79	-5.74	-4.22	-6.17	-3.82	-7.26
جابه‌جایی قائم	-17.02	-21.51	-18.17	-22.81	25.25	19.95	26.15	17.24	-2.67	-0.92	-3.07	-1.38



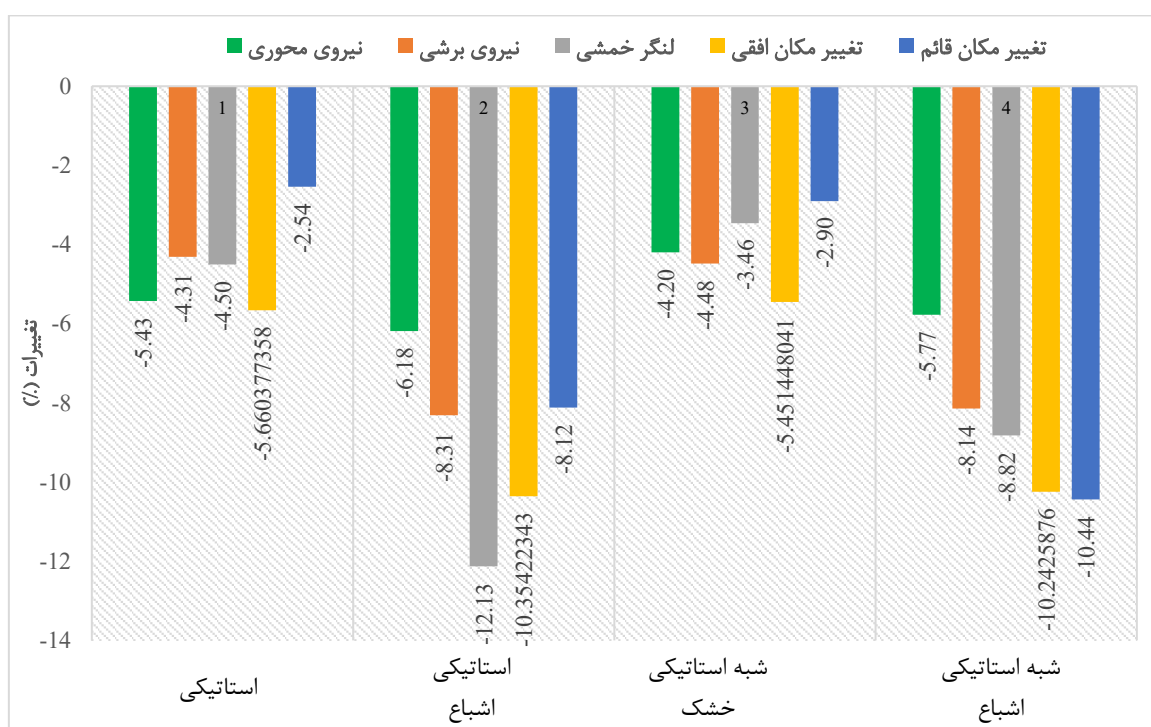
شکل ۹. درصد تغییرات تنش و تغییر شکل خاک در مدل شماره ۱



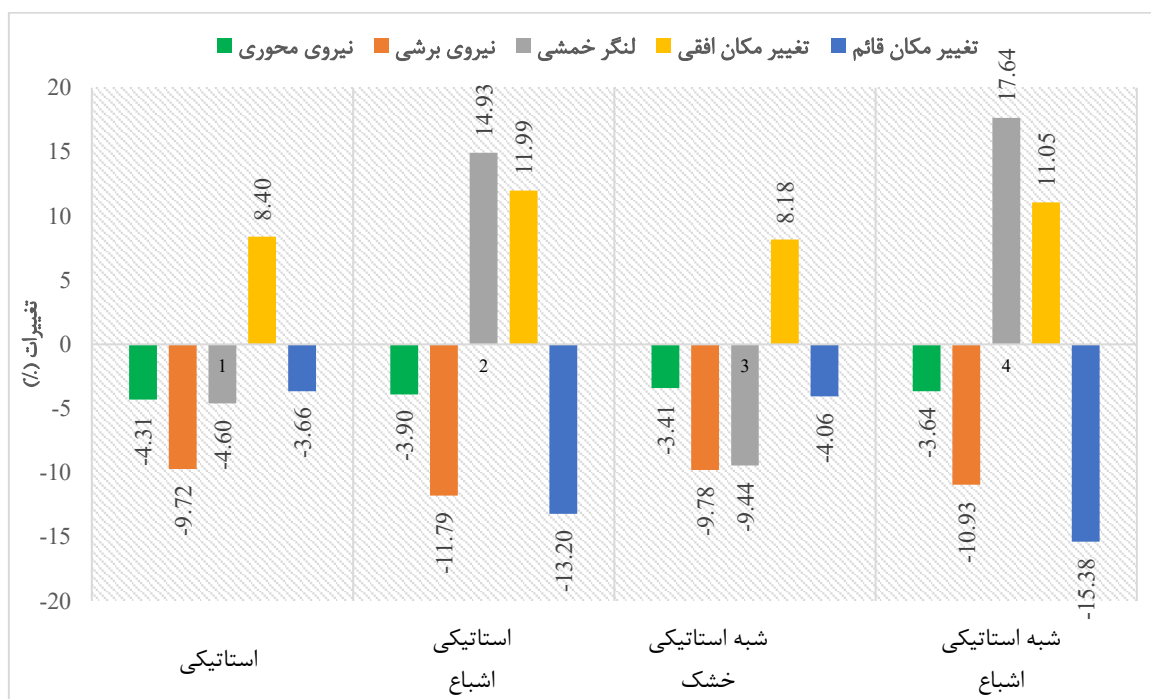
شکل ۱۰. درصد تغییرات تنش و تغییر شکل خاک در مدل شماره ۲



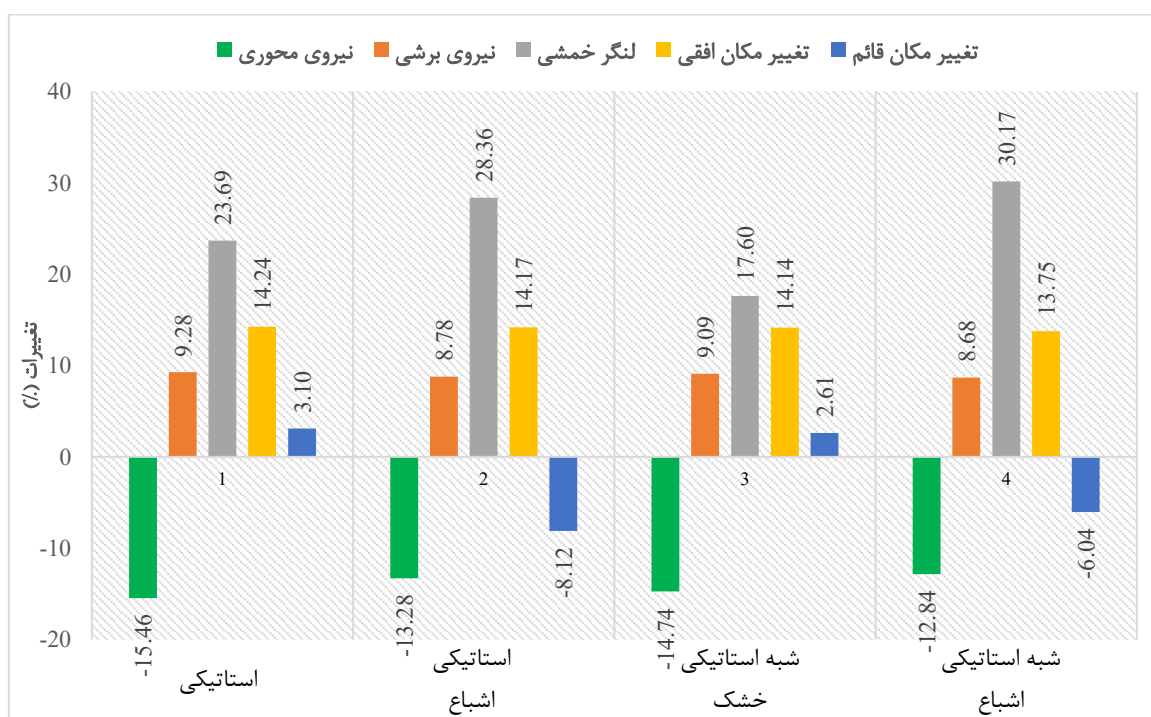
شکل ۱۱. درصد تغییرات تنش و تغییر شکل خاک در مدل شماره ۳



شکل ۱۲. درصد تغییرات پارامترهای سپری در مدل شماره ۱



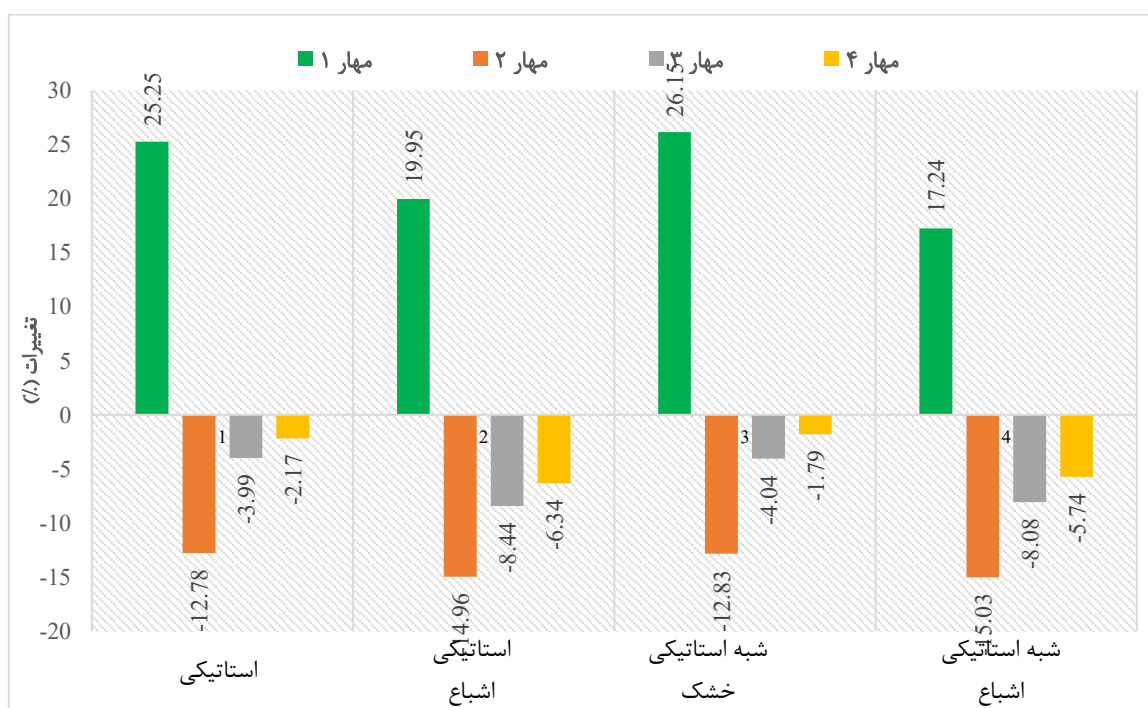
شکل ۱۳. درصد تغییرات پارامترهای سپری در مدل شماره ۲



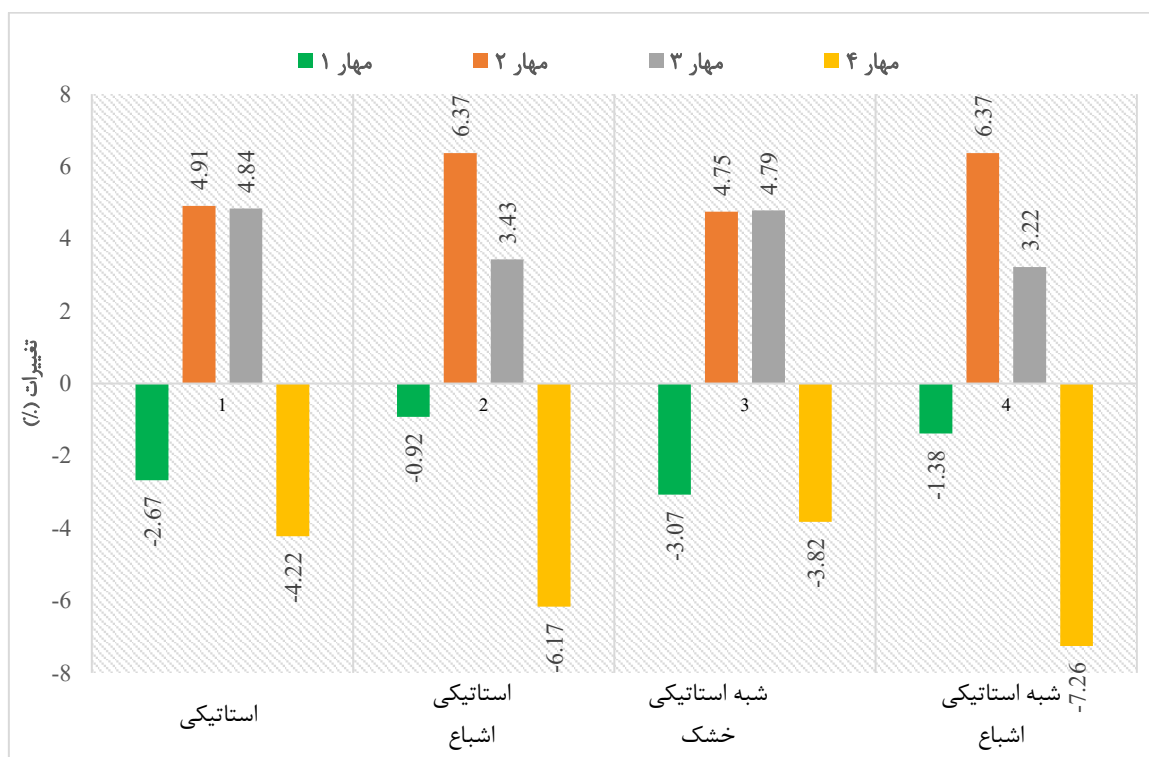
شکل ۱۴. درصد تغییرات پارامترهای سپری در مدل شماره ۳



شکل ۱۵. درصد تغییرات نیروی مهارها در مدل شماره ۱



شکل ۱۶. درصد تغییرات نیروی مهارها در مدل شماره ۲



شکل ۱۷. درصد تغییرات نیروی مهارها در مدل شماره ۳

با توجه جدول ۴ و شکل های ۱۲ تا ۱۴، نیروهای محوری سپری فولادی حدود ۴ تا ۱۶ درصد کاهش است. در مدل شماره ۱ (لایه نرم بالایی)، نیروهای برشی و ممان های خمشی سپری به ترتیب حدود ۴ تا ۸ درصد و ۳/۵ تا ۱۲ کاهش می یابد. در مدل شماره ۲ (لایه نرم میانی) در مقایسه با مدل شماره ۴، نیروهای برشی حدود ۹ تا ۱۲ درصد کاهش می یابد و ممان های خمشی در وضعیت اشباع ۱۵ تا ۱۸ درصد افزایش و در وضعیت خشک حدود ۵ تا ۱۰ درصد کاهش می یابد. در مدل شماره ۳ (لایه نرم پایینی)، نیروی برشی سپری در شرایط مختلف حدود ۱۰٪ افزایش می یابد. لنگر خمشی دیواره سپرکوبی بسته به سطح آب زیرزمینی و شرایط تحلیل، حدود ۱۸ تا ۳۰ درصد افزایش می یابد.

تغییرات در جابه جایی های قائم و افقی سپری فولادی در مدل شماره ۱ به ترتیب حدود ۰ تا ۳ درصد و ۶ تا ۱۰ درصد است. در مدل شماره ۲، جابه جایی های عمودی در وضعیت خشک تغییرات جزئی دارد، اما در وضعیت اشباع مقادیر تغییر حدود ۱۵٪ است.

۵. بحث

نتایج ارائه شده در جدول ۳ و شکل های ۹-۱۱ نشان می دهد که تغییرات در تنش کل کمتر از ۲٪ است. تغییرات در تنش های مؤثر کمتر از ۳٪ و ۲٪ به ترتیب در وضعیت های خشک و اشباع است. این تغییرات ناچیز بوده و افزایش عمق لایه نرم، تغییرات را کاهش می دهد. تغییرات در جابه جایی های کل در مدل های شماره ۲ و ۳ کمتر از ۲ تا ۶ درصد است. اما در وضعیت اشباع در مدل شماره ۱، تغییر حدود ۷۵٪ مشاهده می شود. تغییر شکل افقی عامل کلیدی در طراحی سازه نگهدارنده گودبرداری است. لایه نرم بالایی (مدل شماره ۱) اثر کاهشی (۵-۹٪) بر جابه جایی افقی زمین در مقایسه با مدل شماره ۴ (که لایه نرمی ندارد) دارد. با پایین رفتن لایه نرم، جابه جایی افقی افزایش می یابد. هنگامی که لایه رس نرم زیر دو لایه رس سخت وجود داشته باشد، جابه جایی افقی زمین بیش از ۱۴٪ افزایش می یابد. تغییرات در جابه جایی های قائم در هر سه مدل در مقایسه با مدل شماره ۴ کوچک است، به جز مدل شماره ۱.

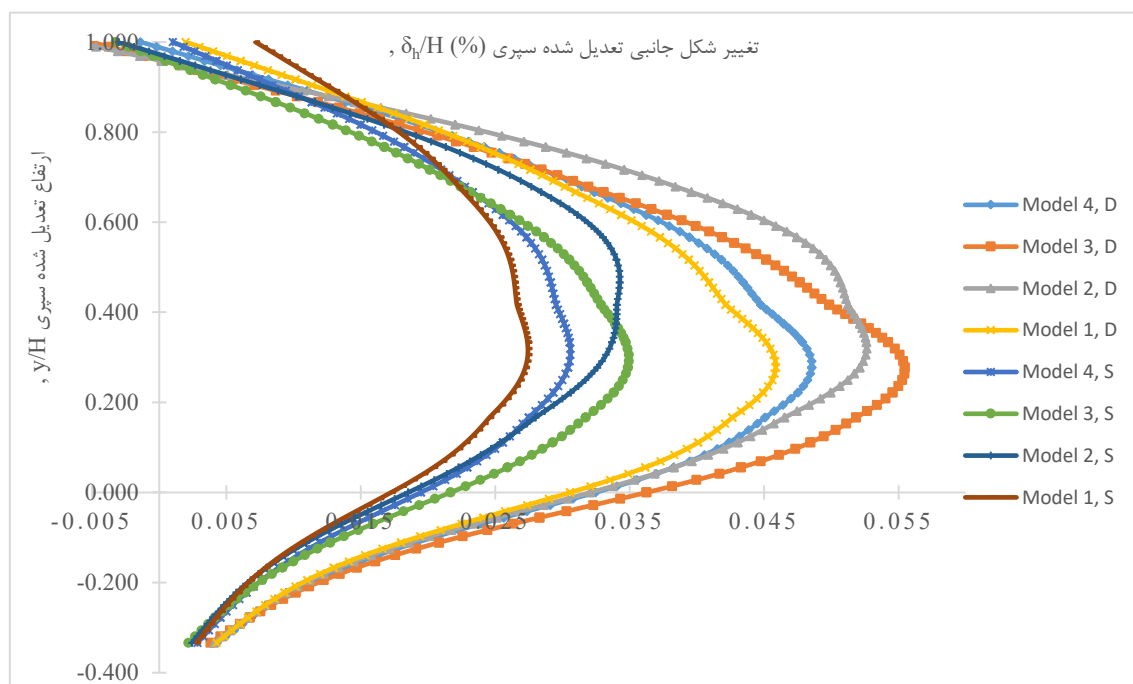
نگهبانی که ضخامت قابل توجهی از مصالح نرم ($>0.6H$) در پشت آن‌ها بوده و جایی که ضریب اطمینان بزرگی در برابر بالازدگی کف وجود دارد، مقادیر δ_{h_max} به طور قابل توجهی نسبت به خاک سفت افزایش می‌یابد.

با توجه به جدول ۵ و شکل‌های ۱۵ تا ۱۷، هنگامی که لایه نرم سطحی وجود دارد، نیروهای محوری مهارها حدود ۹-۱۴٪ کاهش می‌یابد، به جز مهار شماره ۱ که نیروی آن حدود ۱۷-۲۳٪ کاهش می‌یابد. در مدل شماره ۲، تمام نیروهای مهارها روند کاهشی دارند، به جز مهار شماره ۱ که نیروی آن حدود ۲۰-۲۶٪ افزایش می‌یابد. علاوه بر این، شکل ۱۷ نشان می‌دهد که وجود لایه نرم زیر لایه‌های سفت، نیروهای مهارها را در مقایسه با مدل شماره ۴ افزایش می‌دهد، به ویژه در مهارهای میانی. برای مثال، نیروی مهار شماره ۳ در مدل شماره ۳ نسبت به مدل شماره ۴ اندکی افزایش می‌یابد.

همچنین تغییرات جابه‌جایی‌های افقی حدود ۸ تا ۱۲ درصد است. در مدل شماره ۳، جابه‌جایی‌های افقی سپری به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد (حدود ۱۴٪).

تغییر شکل‌های جانبی تعدیل شده (نرمالیزه) دیواره سپرکوبی شده در شکل ۱۸ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که مقادیر حداکثر تغییر شکل جانبی تعدیل شده δ_{h_max} بین $0.03\%H$ تا $0.055\%H$ قرار دارد، که در آن H عمق گودبرداری است. حداکثر مقدار مربوط به مدل شماره ۳ ($\approx 0.055\%H$) است. جدول ۶ محل δ_{h_max} را در همه مدل‌ها نشان می‌دهد. این محل تقریبی در مدل شماره ۲ با سایر مدل‌ها متفاوت است.

مطالعه انجام‌شده توسط لانگ [۴] بر روی تاریخچه کارهای قبلی شامل حدود ۳۰۰ سابقه موردی از جابه‌جایی دیواره گود و زمین ناشی از گودبرداری‌های عمیق، نشان داد که برای دیوارهای حائل در خاک‌های سفت، با ضریب اطمینان بزرگ در برابر بالازدگی کف گودبرداری، مقادیر δ_{h_max} اغلب بین $0.05\%H$ تا $0.25\%H$ قرار دارد، که در آن H عمق گودبرداری است. همچنین برای دیوارهای



شکل ۱۸. تغییر شکل جانبی تعدیل شده سپری (تحلیل استاتیکی)

۵- به طور کلی با افزایش عمق و موقعیت لایه نرم رسی، پارامترهای موثر بر رفتار دیوارهای سپرکوبی شده و مهارها به ویژه لنگر خمشی و تغییر شکل جانبی روند افزایشی دارند.

۶- وجود یک لایه رس نرم زیر لایه سفت، تغییر شکل جانبی خاک را افزایش می دهد. این مسئله در حفاظت از ساختمان های مجاور و تاسیسات عمومی در طول گودبرداری بسیار مهم است.

جدول ۶. محل بیشینه تغییر شکل جانبی

مدل شماره ۴	مدل شماره ۳	مدل شماره ۲	مدل شماره ۱	
0.71 H	0.74 H	0.65 H	0.72 H	δh_{max} موقعیت

۶. نتیجه گیری

در این تحقیق، اثرات وجود لایه رسی نرم بر رفتار دیوار سپرکوبی شده، جابه جایی ها و تنش ها در یک گودبرداری با استفاده از تحلیل اجزای محدود مورد مطالعه قرار گرفته است.

بر اساس نتایج به دست آمده، می توان نتیجه گرفت که:

۱- وجود یک لایه رس نرم سطحی روی دو لایه رس سفت که ضخامت هر سه لایه یکسان است، به طور کلی اثرات کاهشی بر تغییر شکل های خاک و دیواره سپرکوبی شده، نیروها و لنگر خمشی وارد بر سپری دارد. اما این تغییرات ناچیز است.

۲- هنگامی که لایه رس نرم زیر لایه های رس سخت قرار گیرد، نیروهای برشی وارد بر سپری افزایش می یابد. با افزایش عمق لایه نرم، این مقادیر حدود ۱۰٪ افزایش می یابد.

۳- با افزایش عمق لایه نرم، تغییر شکل جانبی و لنگر خمشی وارد بر سپری فولادی به طور قابل توجهی افزایش می یابد. در مطالعه حاضر، در عمقی برابر با دو برابر ضخامت لایه نرم، این پارامترها به مقادیر حداکثری خود می رسند. در این شرایط لنگر خمشی وارد بر سپری حدود ۲۵٪ در مقایسه با شرایطی که تمام پروفیل خاک از رس سخت تشکیل شده، افزایش می یابد. تغییر شکل جانبی سپری حدود ۱۴٪ افزایش می یابد.

۴- وجود یک لایه رس نرم زیر لایه سخت به طور کلی نیروهای محوری مهارهای میانی را تا حدودی افزایش می دهد. این امر باید در طراحی سازه نگهبان سپرکوبی، به ویژه در طراحی مهارهای میانی و پروژه های گودبرداری بسیار مهم و حساس در نظر گرفته شود.

References

- [1] Ou, C. Y. (2006) Deep excavation, theory and practice. Taylor & Francis, London.
- [2] Peck, R. B. (1969). "Deep excavations and tunneling in soft ground". Proc., 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg., State of the Art Volume, 225-290.
- [3] Mana, A.I. and Clough, G.W. (1981). "Prediction of movements for braced cuts in clay." J. Geotech. Engrg. Div., Vol. 107(6): 759-777.
- [4] Long, M. (2001). Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations. Journal of Geotech. and Geoenviron. Eng. 127(3): 203-224.
- [5] Wong, I.H., Poh, T.Y. and Chuah, H.L. (1997). Performance of Excavations for Depressed Expressway in Singapore. Journal of Geotech. and Geoenviron. Eng. 123(7): 617-625.
- [6] Yoo, C.S. (2001), Behavior of braced and anchored walls in soils overlying rock. Journal of Geotech. and Geoenviron. Eng. 127(3): 225-233.
- [7] 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.
- [8] 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.

- [18] Bilgin, Ö. (2012) Lateral Earth Pressure Coefficients for Anchored Sheet Pile Walls. *International Journal of Geomechanics*. 12(5): 584–595.
- [19] Sahajda, K. (2014). Ground Anchor Loads Measured on an Excavation Sheet Pile Wall. *Tunneling and Underground Construction*: pp. 974-983.
- [20] 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*: pp. 3370-3380.
- [21] Kullingsjöhmadpour, A. Effects of deep excavations in soft clay on the immediate surroundings. *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering 2009*: pp. 1923 – 1930.
- [22] Kawa, M., Puta, W. and Truty. A. (2021). Probabilistic analysis of the diaphragm wall using the hardening soil-small (HSs) model. *Journal of Engineering Structures* 232 (2021) 111869, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.111869>.
- [23] Lin, Y., Zhang, Z., Zhou, Y. and Duan. J. Probabilistic analysis of the diaphragm wall using the hardening soil-small (HSs) model. *Journal of Case Studies in Construction Materials*. 21 (2024) e03945, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03945>.
- [24] Zheng, X.; Wang, X.; Shen, K.; Gu, X. Determination of HSS Model Parameters for Soft Clays in Hangzhou: Statistical Analysis and Engineering Validation. *Buildings* 2025, 15, 3886, <https://doi.org/10.3390/buildings15213886>.
- B, Amel Sakhi M, and Kamalian M. Study of Loose
- [25] Ahmadpour B, Amel Sakhi M, and Kamalian M. Study of Loose Soil Layer Effects on Excavations Supported by Steel Sheet Pile Walls-A Numerical
- [9] Son, M. and Cording, E.J. (2005). Estimation of building damage due to excavation induced ground movements. *Journal of Geotech. and Geoenviron. Eng.* 131(2): 162-177.
- [10] 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.
- [11] 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. Istanbul, Turkey, August 2001, Vol.2*, pp.1493-1496.
- [12] 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 Found.* 44(1): 87-98.
- [13] Zekkos, D.P., Athanasopoulos, A.G. and Athanasopoulos, G.A. (2004). Deep supported excavation in difficult ground conditions for the construction of a two-story underground parking garage in the city of Patras, Greece. *Proceedings of Fifth Int. Conf on Case Histories in Geotech. Eng. New York, N.Y. April, 2004*.
- [14] Terzaghi, K. and Peck, R. B., (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, NY.
- [15] USACE (1991). *Design of Pile Foundations*. US Army Corps of Engineers Engineering Manual EM 1110-2-2906.
- [16] Underwood, C., and Greenlee, R. (2010). Steel Sheet Pile Used as Permanent Foundation and Retention Systems-Design and Construction. *Earth Retention Conf 3*: pp. 129-136.
- [17] Bilgin, Ö. and Erten, M. (2009). Anchored Sheet Pile Walls Constructed on Sloping Ground. *Contemporary Topics in Ground Modification Problem Soils and Geo-Support*: pp. 145-152

- Study. Journal of Engineering Geology 2018; 12 (5):31-54. 10.18869/acadpub.jeg.12.5.31
- [26] Ahmadpour B. and Amel Sakhi M. Static and Pseudo Static Study of Loose Clay Layer Effects on Steel Sheet Pile Walls Behaviors. Bulletin of Earthquake Science and Engineering 2016; 3 (2):87-100.
- [27] Ahmadpour B. and Amel Sakhi M. Study of Soft Clay Layer Effects On Steel Sheet Pile Walls Behaviors Using Conventional and Numerical Methods. Journal of Civil Engineering (Sharif) 2016; 35.2 (1.1):13-21. 10.24200/j30.2018.1895.1999
- [28] Benz, T. Numerical Methods in Geotechnical Engineering: (NUMGE 2010), CRC Press, 2010.
- [29] Schanz, T. (2009). Non-Linear Hyperbolic Model & Parameter Selection (Introduction to the Hardening Soil Model). Course on Computational Geotechnics, Bauhaus-Universität Weimar, Germany
- [30] Schweiger, H. (2010). Design of Deep Excavations with FEM-Influence of Constitutive Model and Comparison of EC7 Design Approaches. Earth Retention Conference 3: pp. 804-817.
- [31] Amelsakhi M., and Tehrani E. Using Waste Concrete for Increasing Internal Sand Friction Angle. Advanced Modeling in Civil Engineering 2025; 2 (1):55-65. 10.22126/amcen.2025.12145.1039.
- [32] Asghari Pari, Seyed Amin, Saeedi, Sirus, Shafai Bejestan, Mahmood. (1404). Three-Dimensional porous media as a novel approach for stilling basin optimization: An experimental comparison with solid elements, Advanced Technologies in Water Efficiency pp. 46-67. doi: 10.22126/atwe.2025.12620.1184