

# Analysis of PM4Sand Constitutive Model by Comparing Geotechnical Methods for Stabilization of Sheet Pile Quay Walls in Liquefiable Soil

Mohammad Hosein Bakhshae<sup>1</sup>, Freidon Khosravi<sup>\*2</sup>

1. MSc in Marine Structures, Faculty of Civil Engineering, Imam Hosein University (AS), Tehran, Iran.
2. Prof., Faculty of Civil Engineering, Imam Hosein University (AS), Tehran, Iran. (Corresponding Author)  
[mhbakhshae76@gmail.com](mailto:mhbakhshae76@gmail.com)



<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.1.5.3>

Original Paper

The vast expanse of coasts in Iran is affected by many faults and has a high seismic potential. Most of coastal lands consist of very loose soils with the risk of liquefaction. In the present study, the seismic behavior of the anchored sheet pile quay wall, which regardless of the risk of liquefaction, is buried in the loose liquefiable layer, has been numerically analyzed using PLAXIS software and the PM4Sand constitutive model. The soil in front of the root of the sheet pile (sea side) is the most prone area for liquefaction due to the low initial vertical effective stress level. The presence of a loose layer around the root of the sheet pile, due to the liquefaction of the soil in front of the root and the lateral pressure of the soil behind the sheet pile, leads to the rupture of the buried part. Soil-cement is one of the methods of improving loose coastal soils, which increases adhesion and reduces the liquefaction potential of saturated loose soils. Improving the soil around the root of the sheet pile on the sea side using the soil-cement method greatly reduces the proportion of excess pore water pressure, displacement and bending anchor of the sheet pile. The comparison made with the corresponding past research shows that soil-cement improvement with less time and volume of execution than the compaction method has a better performance in stabilizing anchored sheet pile quay wall affected by the loose liquifiable layer.

#### Keywords:

Anchored Sheet Pile Quay Wall, Seismic Stability, Numerical Analysis, Liquefaction, Soil-Cement Improvement Method.



Received: Oct. 2, 2024

Revised: Jan. 10, 2025

Accepted: Jan. 29, 2025

#### To cite this article:

Bakhshae, M. H., Khosravi, F. 2025. Analysis of PM4Sand Constitutive Model by Comparing Geotechnical Methods for Stabilization of Sheet Pile Quay Walls in Liquefiable Soil, *Emergency Management*, 14(1), 111-128.  
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.1.5.3>.



Use your device to scan and read the article online



# تحلیل مدل رفتاری PM4Sand با مقایسه روش‌های ژئوتکنیکی برای پایدارسازی دیوارهای ساحلی سپری در خاک روانگرا

محمدحسین بخشائی<sup>۱</sup>، فریدون خسروی<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد سازه‌های دریایی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران  
۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران (نویسنده مسئول) [mhbakhshace76@gmail.com](mailto:mhbakhshace76@gmail.com)



<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.1.5.3>

مقاله پژوهشی

## چکیده

واژه‌های کلیدی:  
اسکله سپری مهارشده،  
پایداری لرزه‌ای، تحلیل  
عددی، روانگرایی، روش  
بهبودی خاک سیمان

گستره وسیع سواحل ایران متأثر از گسل‌های متعددی بوده و پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی دارند. اکثر زمین‌های ساحلی متشکل از خاک‌های بسیار سست با خطر وقوع روانگرایی می‌باشند. در پژوهش حاضر رفتار لرزه‌ای اسکله سپری مهارشده‌ای که بدون توجه به خطر روانگرایی، بخش مدفون آن در لایه سست روانگرا قرار گرفته است به صورت عددی با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS و مدل رفتاری PM4Sand تحلیل شده است. خاک جلوی ریشه سپر (سمت دریا) به علت پایین بودن تراز تنش مؤثر قائم اولیه، مستعدترین ناحیه برای وقوع روانگرایی است. وجود لایه سست روانگرا در اطراف ریشه سپر، به علت روانگرا شدن خاک جلوی ریشه و فشار جانبی خاک پشت سپر، به گسیختگی بخش مدفون منجر می‌شود. خاک-سیمان از جمله روش‌های بهسازی خاک‌های سست ساحلی است که باعث افزایش چسبندگی و کاهش پتانسیل روانگرایی خاک‌های سست اشباع می‌شود. بهسازی خاک اطراف ریشه سپر در سمت دریا به روش خاک-سیمان باعث کاهش زیاد نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای، تغییر مکان و لنگر خمشی سپر می‌شود. مقایسه صورت گرفته با تحقیقات متناظر گذشته نشان می‌دهد که بهسازی به روش خاک-سیمان با صرف زمان و حجم عملیات اجرایی کمتر نسبت به روش تراکم، عملکرد بهتری در پایدارسازی اسکله‌های سپری مهارشده متأثر از لایه سست روانگرا دارد.

دریافت: ۱۴۰۳/۷/۱۱

اصلاح: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱

پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۰



از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله  
به صورت آنلاین استفاده کنید

برای ارجاع به این مقاله به صورت زیر اقدام فرمایید:

بخشائی، م. ح.، خسروی، ف.، ۱۴۰۴، تحلیل مدل رفتاری PM4Sand با مقایسه روش‌های ژئوتکنیکی برای

پایدارسازی دیوارهای ساحلی سپری در خاک روانگرا. مدیریت بحران، ۱۴(۱)، ۱۲۸-۱۱۱

<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23453915.1404.14.1.5.3>



© The Author(s).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

بنادر از جمله شریان‌های حیاتی صنعت حمل‌ونقل می‌باشند که نقش بسزایی در فعالیت‌های تجاری و اقتصادی کشورها ایفا می‌کنند. اسکله‌ها، سازه‌های زیربنایی بنادر می‌باشند، از این رو آسیب جدی به این سازه‌ها و اختلال در کارکرد آنها می‌تواند منجر به خسارات سنگین جانی و اقتصادی شود. اسکله‌ها در طول عمر خود ممکن است در معرض حوادث مختلفی نظیر زلزله، طوفان، آتش‌سوزی و انفجار قرار گیرند و متحمل آسیب‌هایی شوند. جلوگیری از وقوع مخاطرات طبیعی نظیر زلزله امکان‌پذیر نیست اما می‌توان با برنامه‌ریزی و مجموعه‌ای از اقدامات مؤثر در قالب مدیریت بحران، میزان خسارات را کاهش داد و اثرات مخرب آن را کنترل کرد [۱،۲،۳].

زلزله مهم‌ترین و مخرب‌ترین حادثه قابل وقوع در اسکله‌ها است. گستره وسیع سواحل ایران متأثر از گسل‌های متعددی بوده و پتانسیل لرزه‌خیزی بالایی دارند. همچنین اغلب نقاط ساحلی ایران از زمین‌های بسیار سست تشکیل شده است که باعث دشوارتر شدن احداث اسکله می‌شود. اسکله‌های سپری مهارشده از رایج‌ترین نوع اسکله‌های بسته می‌باشند که عموماً به‌عنوان سازه حائل در طول خط ساحلی به کار می‌روند [۴].

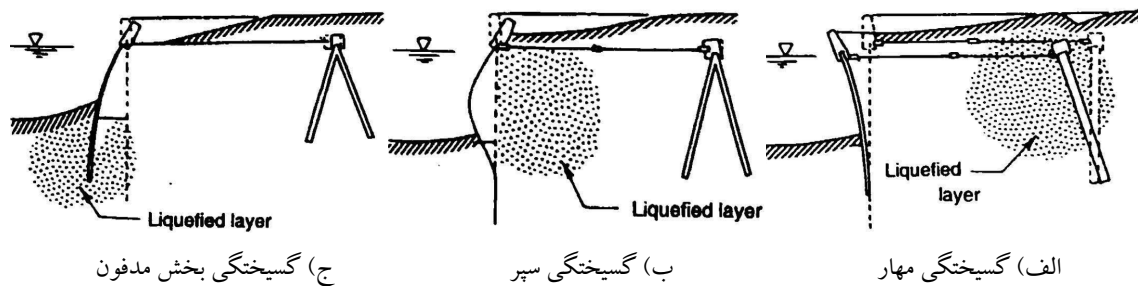
این نوع اسکله‌ها از سه بخش دیوار اصلی (سپر)، دیوار مهار و کابل مهار تشکیل می‌شوند [۵]. خرابی‌های ناشی از زلزله‌های گذشته نشان داده است که اسکله‌های سپری مهارشده در برابر زلزله آسیب‌پذیر بوده و اکثر خسارات وارده به دلیل مشکلات ژئوتکنیکی، به‌ویژه وقوع روانگرایی در نواحی اطراف سپر است [۶]؛ بنابراین پرداختن به روش‌های بهسازی خاک‌های ساحلی برای پایدارسازی سازه‌های مجاور دریا خصوصاً اسکله‌ها در برابر اثرات پدیده روانگرایی، حائز اهمیت است.

اصولاً هدف از بهسازی خاک‌های ساحلی، کنترل نشست و ممانعت از روانگرا شدن آن است. روش‌های ژئوتکنیکی کارآمد در کنترل و کاهش مخاطرات روانگرایی شامل تراکم دینامیکی، تراکم ارتعاشی، ستون شنی، دوغاب ریزی تحت فشار و اختلاط عمیق خاک هستند [۸]. سازوکار روش‌های یادشده بر پایه بهبود عملکرد اسکلت خاک و افزایش سرعت زایل شدن اضافه فشار آب حفره‌ای است [۹].

## ۲- تاریخچه موضوع

مقاومت خاک‌های سست ساحلی در برابر روانگرایی با افزودن حدوداً ۵ درصد سیمان، چهار برابر افزایش می‌یابد [۱۰]؛ بنابراین روش خاک سیمان از جمله مؤثرترین راهکارها برای کاهش پتانسیل روانگرایی خاک‌های سست اشباع است. طبق تعریف نشریه ۵۴ کمیته بین‌المللی سدهای بزرگ، خاک-سیمان مخلوطی از سیمان پرتلند، خاک و آب است که به‌واسطه دوغاب سیمان، اجزاء آن به هم چسبیده و ترکیبی متراکم، بادوام و نفوذپذیری کم می‌شود. در روش خاک-سیمان با افزودن درصد کمی از سیمان منجر به بهبود خواص مکانیکی خاک ماسه‌ای از جمله تراکم [۱۱]، مقاومت برشی [۱۲]، مقاومت کششی [۱۳]، مقاومت فشاری محدود نشده [۱۴]، دوام [۱۵]، رفتار سه محوری زهکشی شده و زهکشی نشده [۱۶،۱۷،۱۸،۱۹،۲۰]، در برابر بارهای مکانیکی و دینامیکی می‌شود. مهم‌ترین اثر سیمان در خاک‌های درشت‌دانه، ایجاد یا افزایش چسبندگی است.

سیمانتاسیون تأثیر محسوسی در زاویه اصطکاک داخلی خاک ندارد [۲۱]. روش‌های اختلاط عمیق و تزریق پرفشار (جت گروتینگ) از جمله روش‌های اجرایی بهسازی به شیوه خاک-سیمان می‌باشند که به‌طور گسترده‌ای در پروژه‌های ژئوتکنیکی ساحلی و فراساحلی



شکل (۱): حالت‌های محتمل گسیختگی مربوط به لایه روانگرا [۷]

زاویه اصطکاک داخلی خاک بر میزان فشار جانبی محرک و مقاوم خاک وارد بر سپر و عمق مدفون آن، لنگر خمشی بیشینه ایجاد شده در سپر و نیروی کششی میله مهار را به روش تحلیلی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که با افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک اطراف سپر، به طور چشم‌گیری فشار جانبی وارد بر سپر، عمق مدفون آن، لنگر خمشی حداکثر و نیروی ایجاد شده در میل مهار کاهش می‌یابد [۲۵].

Towhata و Islam (1987) در پژوهشی به بررسی عددی تأثیر زاویه اصطکاک داخلی خاک بر جابه‌جایی جانبی اسکله سپری مهار شده ناشی از زلزله (نیگاتا ۱۹۶۴) با در نظر گرفتن تأثیر اضافه فشار آب منفذی در خاک‌ریز پرداختند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که افزایش زاویه اصطکاک خاک، مقدار بحرانی ضریب شتاب افقی زلزله ( $k_{CF}$ ) را افزایش داده و جابه‌جایی سپر را کاهش می‌دهد [۲۶].

تراکم و خاک-سیمان از دیگر روش‌های ژئوتکنیکی مؤثر در بهبود پایداری لرزه‌ای اسکله‌های سپری مهار شده می‌باشند. ذکری و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی به وسیله میز لرزه در محیط  $g_1$ ، رفتار لرزه‌ای اسکله سپری مهار شده‌ای که بخش مدفون آن در لایه مستعد روانگرایی قرار گرفته است را مورد مطالعه قرار دادند. همچنین تأثیر بهسازی خاک به روش تراکم در نواحی اطراف بخش مدفون نیز مورد

استفاده شده‌اند [۱۲، ۲۲].

در ادامه به بررسی مطالعات انجام شده توسط پژوهشگران مختلف در زمینه بهبود پایداری لرزه‌ای اسکله‌های سپری مهار شده پرداخته شده است.

Ton و همکاران (۲۰۱۸) در پژوهشی به دلیل بهسازی به روش سازه‌ای، اثر سکوی شمع‌های کمکی بر رفتار اسکله سپری مهار شده در طول مراحل ساخت (خاک‌ریزی پشت سپر، لایروبی سمت دریا و ساخت روبنا) را با انجام آزمایش میدانی و همچنین تحلیل عددی مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد وجود سکوی شمع‌های کمکی در پشت سپر به طور قابل توجهی بارهای وارد بر سپر و تغییر شکل جانبی سپر را کاهش می‌دهد [۲۳].

تقویت سیستم مهاربندی از دیگر روش‌های سازه‌ای برای بهبود عملکرد اسکله سپری مهار شده تحت بارگذاری دینامیکی است که Hung و همکاران (۲۰۲۲) با انجام آزمایش سانتریفیوژ به آن پرداختند. نتایج پژوهش نشان می‌دهند که افزایش تعداد مهارهای سپر، به طور قابل توجهی می‌تواند حداکثر گشتاور خمشی و تغییر مکان جانبی سپر را کاهش دهد [۲۴].

افزایش زاویه اصطکاک داخلی خاک از جمله روش‌های ژئوتکنیکی برای بهبود پایداری اسکله سپری مهار شده تحت بارگذاری لرزه‌ای است. جهانگیر و مقدس تفرشی (۱۳۹۰) با توسعه روابط فشارهای جانبی محرک و مقاوم کولمب، تأثیر

بررسی قرار گرفته است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که ناحیه جلوی بخش مدفون از نظر روانگرایی بیشترین آسیب‌پذیری را دارد. همچنین با تراکم کردن نواحی اطراف بخش مدفون (سمت دریا و سمت خشکی) در طول کافی، از بروز روانگرایی جلوگیری شده و باعث کاهش چشم‌گیر در تغییر مکان جانبی سپر می‌شود [۵].

درخشانی و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر بهسازی خاک ریز اسکله به روش ستون اختلاط عمیق خاک و الگوی چیدمان آن بر رفتار لرزه‌ای اسکله سپری مهارشده را به‌وسیله میز لرزه در محیط  $g_1$  مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که تغییر مکان جانبی سپر در چیدمان نامنظم ستون اختلاط عمیق خاک کمتر از چیدمان منظم است [۲۷].

(Khan 2008, 2009) و (Nguyen, 2023) اثر بهسازی خاک سمت دریا به روش اختلاط عمیق سیمانی بر رفتار دینامیکی اسکله سپری مهارشده را به ترتیب به‌صورت آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج پژوهش‌های یادشده نشان می‌دهد که بهسازی خاک به روش خاک-خمشی و جابجایی سپر شده است [۲۸، ۲۹، ۳۰].

Chen و همکاران (۲۰۲۳) در پژوهشی به بررسی آزمایشگاهی اثر بهسازی خاک ریز اسکله به روش اختلاط عمیق سیمانی بر رفتار دینامیکی اسکله سپری مهارشده بر رفتار و پایداری اسکله سپری مهارشده واقع در بستر رس نرم پرداختند. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که بهسازی به روش خاک-سیمان به‌طور قابل ملاحظه‌ای باعث بهبود پایداری اسکله سپری مهارشده می‌شود به‌گونه‌ای که جابه‌جایی جانبی و لنگر خمشی وارد بر سپر کاهش می‌یابد [۳۱].

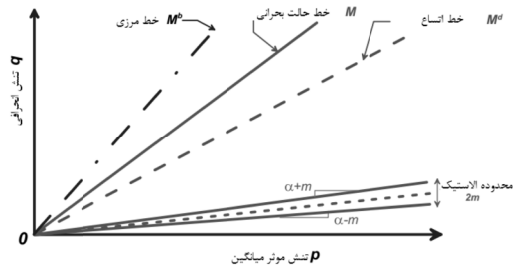
در پژوهش حاضر، تأثیر روش خاک-سیمان بر پایداری لرزه‌ای اسکله سپری مهارشده‌ای که بدون توجه به خطر روانگرایی، در ساختگاه

مستعد روانگرایی احداث شده است، با مدل‌سازی عددی به روش اجزا محدود در نرم‌افزار ۲ D PLAXIS بررسی شده و نتایج به‌دست آمده با نتایج آزمایشگاهی و تحقیقات متناظر مقایسه می‌شود.

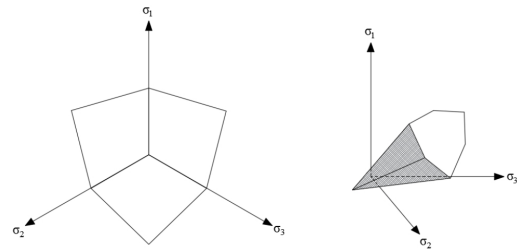
### ۳- شبیه‌سازی عددی

مدل عددی هر مسئله ژئوتکنیکی باید با دقت و با علم کامل به الگوریتم نرم‌افزار و روش عددی متناظر آن ساخته شود. روش المان محدود یکی از روش‌های عددی است که از آن می‌توان برای حل تقریبی معادلات دیفرانسیل حاکم بر پدیده‌های فیزیکی استفاده کرد. نرم‌افزار PLAXIS یک برنامه کامپیوتری مبتنی بر روش اجزا محدود بوده که برای تجزیه و تحلیل دوبعدی تغییر شکل و پایداری مسائل مربوط به مهندسی ژئوتکنیک توسعه یافته است. در نرم‌افزار PLAXIS 2D معادله تعادل دینامیکی به روش انتگرال‌گیری مستقیم (Time Integration Technique) از نوع روش ضمنی (Implicit Method)، حل می‌شود [۳۲].

رفتار مصالح در شبیه‌سازی عددی با استفاده از مدل‌های رفتاری تحت ارتباط بین تنش و کرنش تعریف و مشخص می‌شوند. خاک در طبیعت رفتار بسیار پیچیده‌ای دارد و در شرایط مختلف رفتارهای متفاوتی را از خود نشان می‌دهد. مدل‌های رفتاری (رابطه تنش-کرنش) غیرخطی تطابق بیشتری با رفتار خاک در واقعیت دارند. مدل مور-کولومب (الاستوپلاستیک کامل) از جمله پرکاربردترین مدل‌های رفتاری غیرخطی خاک است. در این مدل رفتاری، رفتار مصالح در ابتدا الاستیک خطی بوده و پس از رسیدن به نقطه تسلیم، رفتاری کاملاً پلاستیک از خود نشان می‌دهند [۳۳]. در پژوهش حاضر، از مدل رفتاری موهر-کولومب در مراحل تحلیل استاتیکی استفاده شده است.



شکل (۳): شماتیک خطوط مرزی، اتساع و بحرانی در فضای  $q - p$  در مدل PM4Sand



شکل (۲): سطح گسیختگی مدل مور-کولومب (مخروط شش وجهی) در فضای تنش های اصلی و

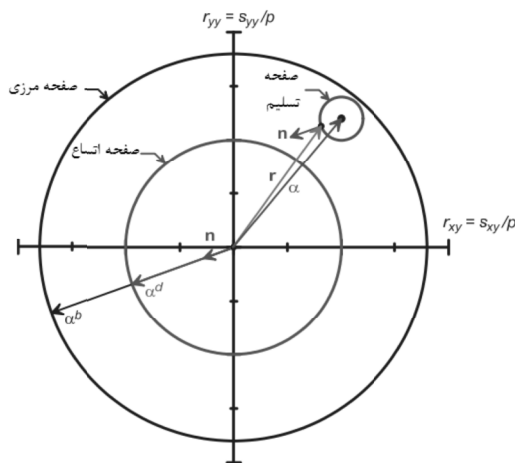
صفحه  $\pi$

در صورتی که مدل به حالت بحرانی نزدیک شود ( $\xi_R = 0$ )، مقادیر  $b$  و  $M$  هر دو برابر  $M$  می شوند.

در این مدل رفتاری، سطح تسلیم یک مخروط کوچک در فضای تنش است که به وسیله رابطه (۶) بیان می شود.

$$f = \sqrt{(r - \alpha)(r + \alpha)} - \sqrt{\frac{1}{2}}m = 0 \quad (6)$$

تانسور نسبت تنش پیشین ( $\alpha$ ) و پارامتر  $m$  ب، مرکز سطح تسلیم و شعاع مخروط به صورت تابعی از نسبت تنش را تعریف می کنند. تابع تسلیم را می توان به صورت فاصله میان نسبت تنش ( $r$ ) و نسبت تنش پیشین ( $\alpha$ ) به صورت شکل (۴) نشان داد.



شکل (۴): شماتیک سطوح مرزی، اتساع و تسلیم در صفحه نسبت تنش در مدل PM4Sand

مطابق راهنمای نرم افزار Plaxis، مدل رفتاری PM4Sand قادر به مدل سازی رفتار خاک ماسه ای در بارگذاری لرزه ای است. این مدل رفتاری از شرایط مرزی و سطح بحرانی مدل دافالیاس-منظری (۲۰۰۴) استفاده کرده است. فرمولاسیون مدل رفتاری PM4Sand بر اساس پلاستیسیته سطح مرزی در فضای نسبت تنش انحرافی و در چارچوب مکانیک خاک حالت بحرانی است [۳۴].

سطوح مرزی، اتساع و بحرانی در مدل رفتاری PM4Sand، به ترتیب با استفاده از روابط زیر تعیین می شوند

$$M^b = M \cdot \exp(-n^b \cdot \xi_R) \quad (1)$$

$$M^d = M \cdot \exp(n^d \cdot \xi_R) \quad (2)$$

$$M = 2 \cdot \sin(\phi_{cv}) \quad (3)$$

$$\xi_R = D_{R,CS} - D_R \quad (4)$$

$$D_{R,CS} = \frac{R}{Q - \ln(100 \frac{p}{p_a})} \quad (5)$$



سطح مرزی  $\alpha^b$  و سطح اتساع  $\alpha^d$  به ترتیب به صورت زیر بیان می‌شوند.

$$\alpha^b = \sqrt{\frac{1}{2}} [M^b - m]n \quad (7)$$

$$\alpha^d = \sqrt{\frac{1}{2}} [M^d - m]n \quad (8)$$

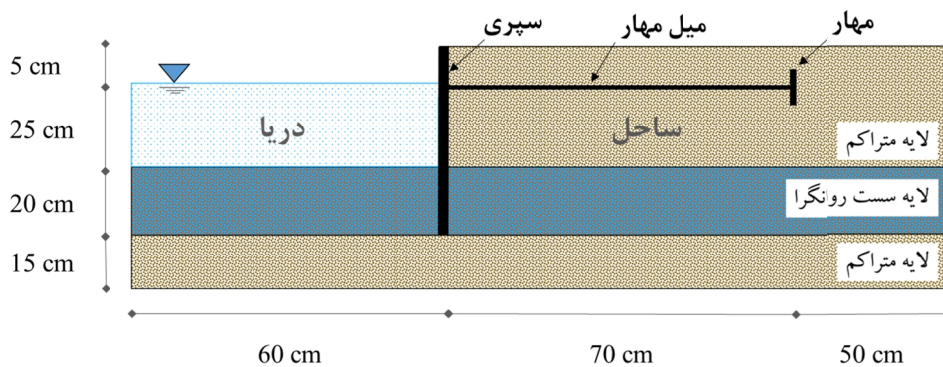
تانسور  $n = \frac{r-\alpha}{\sqrt{\frac{1}{2}m}}$  عمود بر سطح تسلیم است.

تراکم نسبی ( $D_{r0}$ )، ضریب مدول برشی ( $G_0$ )، پارامتر نرخ تراکم ( $h_0$ ) و فشار اتمسفر ( $P_a$ )، پارامترهای ورودی مدل رفتاری PM4Sand می‌باشند.

مشخصات اجزای سازه‌ای مدل بر اساس جدول (۱) است.

با توجه به کاربرد ماسه فیروزکوه شماره ۱۶۱ در پژوهش آزمایشگاهی، طی مطالعات عددی نیز از مصالح خاکی مشابه استفاده شده است. پارامترهای مدل رفتاری PM4Sand با مدل‌سازی عددی شرایط نمونه ماسه فیروزکوه در آزمایش برش ساده تناوبی مطابق پژوهش احمدی (۲۰۱۱) و مقایسه هم‌زمان اضافه فشار آب حفره‌ای و کرنش برشی با مقادیر اندازه‌گیری شده، به روش سعی و خطا تعیین شدند. نتایج حاصل از مدل عددی برای این نمونه‌ها با مقادیر آزمایشگاهی [۳۵] در شکل ۶ مقایسه شده‌اند. پارامترهای مورد استفاده برای تحلیل در جدول (۲) ارائه شده‌اند.

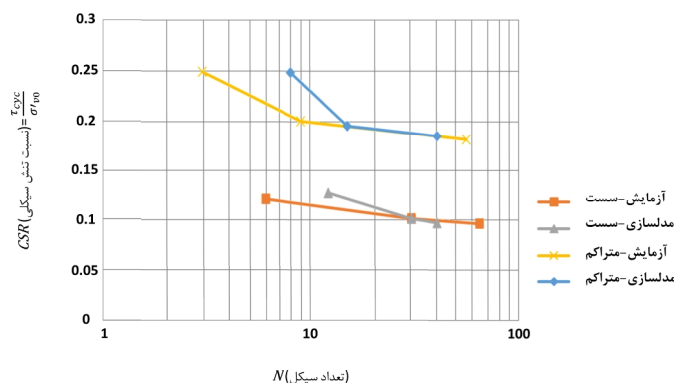
#### ۴- مشخصات مدل مورد مطالعه



شکل (۵): مشخصات مدل مورد مطالعه

جدول (۱): مشخصات اجزای سازه‌ای مدل

پارامتر	شکل المان	ارتفاع (cm)	طول بال (cm)	عرض بال (cm)	ضخامت بال (cm)	طول جان (cm)	عرض جان/عرض (cm)	ضخامت جان/ضخامت (cm)	مدول الاستیسیته (GPa)
سپر	T	۵۰	۴	۱	۱	۳	۱	۱	۲/۹۸۶
دیوار مهاری	مستطیل	۲۳	-	-	-	-	۳	۱/۲	۲/۹۸۶



شکل (۶): مقایسه مقاومت ماسه فیروزکوه در برابر روانگرایی در مدل عددی و آزمایشگاهی

جدول (۲): مشخصات مصالح خاکی مدل

پارامتر	تراکم نسبی	ضریب مدول برشی	پارامتر نرخ تراکم	فشار اتمسفر ( $\text{KN/m}^2$ )
لایه میانی	٪۲۵	۳۸۷	۰/۲۷	۱۰/۱۳
لایه فوقانی و تحتانی	٪۸۵	۹۹۸	۰/۵۶	۱۰/۱۳

## ۵- صحت سنجی

به به منظور حصول اطمینان از عملکرد نرم افزار Plaxis 2D در مدل سازی، محاسبات و خروجی ها، مدل بهسازی نشده آزمایشگاهی پژوهش ذکری و همکاران (۲۰۱۵)، در نرم افزار مدل سازی شد. پس از انجام محاسبات نرم افزاری، مقایسه ای بین نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از پژوهش یاد شده صورت گرفت. به منظور حفظ ارتباط مدل عددی با مدل آزمایشگاهی برای انجام مقایسه های لازم، در این بخش از مشخصات هندسی و خصوصیات مصالح اجزای سازه ای و خاکی مشابه با مدل آزمایشگاهی استفاده شده است.

مدل آزمایشگاهی از اسکله بندر شهید رجایی الهام گرفته است. در مدل آزمایشگاهی، با توجه به روابط تشابه (ضریب مقیاس برابر با ۲۵)، از جنس پلکسی گلاس برای ساخت سپرهای T شکل و دیوار مهاریه استفاده شده است (در محدوده رفتار الاستیک خطی). در پژوهش حاضر،

مدل سازی به روش المان محدود دوبعدی و به صورت مدل کرنش صفحه ای انجام شده است. همچنین برای اجزا سازه ای (سپر و دیوار مهاریه) و مصالح خاکی به ترتیب از المان صفحه و المان مثلثی ۶ گره ای استفاده شده است.

به منظور جلوگیری از خطاهای عددی، ابعاد بزرگ ترین المان، با توجه به فرکانس شتاب پایه و طول موج در سست ترین مصالح انتخاب شد. با توجه به مراحل اجرایی احداث اسکله سپری مهار شده و به دلیل محاسبه تنش های اولیه، روش تحلیل مرحله ای به کار گرفته شده است؛ بنابراین مدل عددی در ابتدا با انجام تحلیل استاتیکی به وضعیت پایدار خود می رسد، سپس تحلیل دینامیکی انجام می شود.

گام اول) زمین مسطح، تحت بار وزن تحلیل شده است.

گام دوم) با فعال کردن المان های سپر و مهار، مجموعه به تعادل رسانده شده است.

گام سوم و چهارم) خاک جلوی دیوار تا تراز میله مهاریه برداشته شده و پس از برقراری

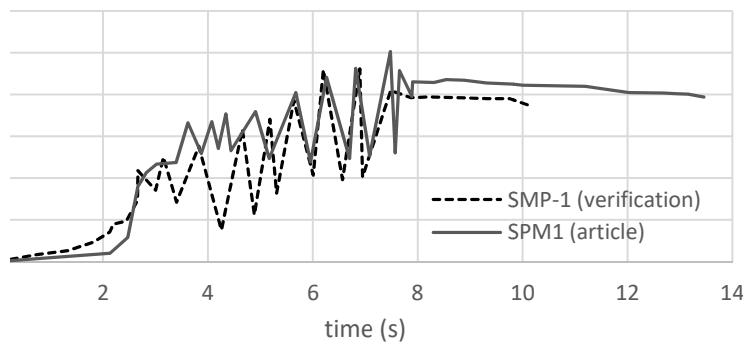
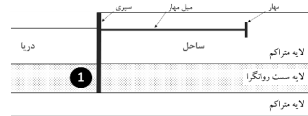
وضعیت تعادل، المان‌های انکر و میل مهاری میله مهاری فعال شده است.

گام پنجم) خاک جلوی دیوار تا رسیدن به خط لایروبی برداشته شده است. تحلیل‌های انجام شده تا این مرحله از نوع استاتیکی است. در مراحل تحلیل استاتیکی از مدل رفتاری موهر-کولمب و شرایط زهکشی شده استفاده شده است. گام ششم) تنش‌های مرحله پنجم به‌عنوان تنش‌های اولیه به مرحله تحلیل دینامیکی منتقل شدند. در ابتدای مرحله تحلیل دینامیکی شرایط به شرایط زهکشی نشده و مدل رفتاری به مدل رفتاری PM4Sand تغییر داده شده است. بار دینامیکی مشابه با پژوهش آزمایشگاهی،

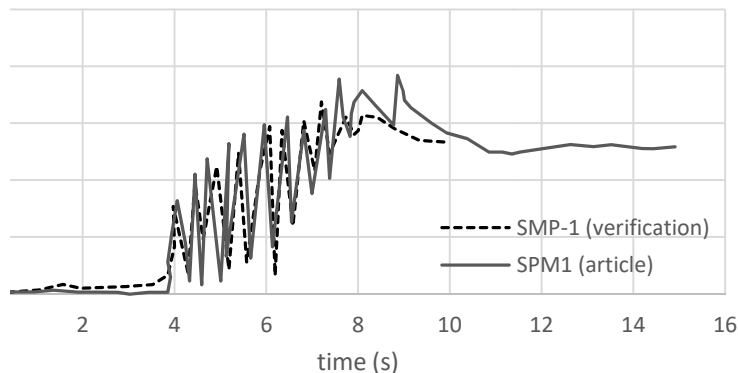
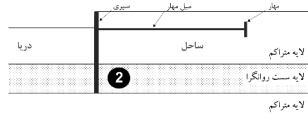
به‌صورت حرکت سینوسی با حداکثر دامنه  $0.25g$  و فرکانس  $3\text{ Hz}$  به مدت  $10$  ثانیه و با گام‌های زمانی  $0.1/0$  ثانیه به کف مدل وارد شده است. به‌منظور حذف اثر انعکاس امواج از مرزهای کناری به داخل مدل، از مرز میدان آزاد (Free field) در کناره‌های مدل استفاده شده است.

در این قسمت به مقایسه نتایج مدل بهسازی نشده (SPM1) در پژوهش آزمایشگاهی ذکر و همکاران (۲۰۱۵) و شبیه‌سازی عددی انجام شده در این پژوهش پرداخته شده است.

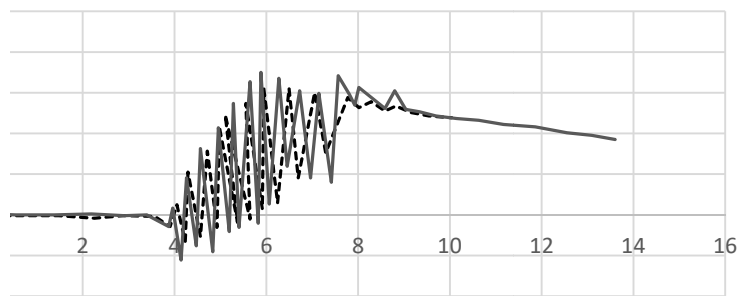
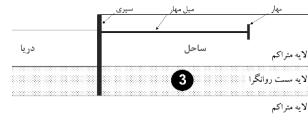
مطابق شکل‌های (۷) تا (۱۰)، نتایج مدل بهسازی نشده (SPM1) در مدل آزمایشگاهی موردنظر و مدل عددی انجام شده، روند یکسانی



شکل (۷): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در نقطه ۱ مدل عددی با مدل آزمایشگاهی

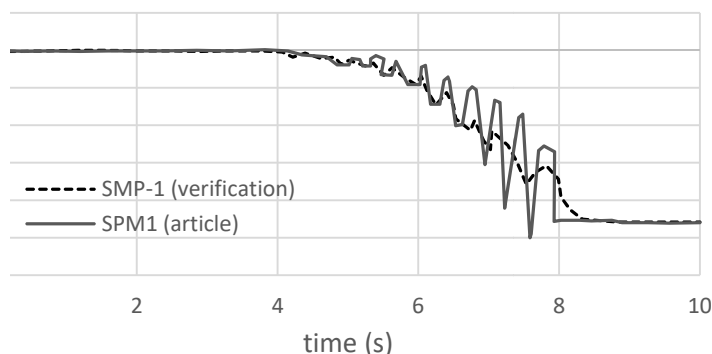
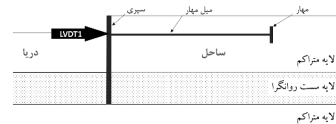


شکل (۸): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در نقطه ۲ مدل عددی با مدل آزمایشگاهی



----- SMP-1 (verification) time (s)  
 ——— SPM1 (article)

شکل (۹): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در نقطه ۳ مدل عددی با مدل آزمایشگاهی



----- LVDT1 (verification)  
 ——— SPM1 (article)

شکل (۱۰): مقایسه تاریخچه زمانی جابه‌جایی افقی سپر در تراز میل مهر (LVDT1)

روش بهسازی خاک-سیمان، نتایج مدل‌های عددی بهسازی شده و بهسازی باهم مقایسه می‌شوند. سپس به منظور شناسایی روش بهسازی مطلوب، نتایج مدل بهسازی شده به روش خاک-سیمان (مدل عددی) با مدل بهسازی شده به روش تراکم (آزمایشگاهی) مقایسه می‌شوند.

#### ۶-۱- مقایسه نتایج مدل بهسازی نشده و بهسازی شده (روش خاک-سیمان) عددی

مطابق بررسی‌های انجام شده، خاک اطراف ریشه سپر در سمت دریا روانگرا می‌شود ( $R_u > 1$ )؛ بنابراین با روش خاک-سیمان، بخشی از این ناحیه را بهسازی کرده و برای بررسی عملکرد روش بهسازی اتخاذ شده، نتایج مدل بهسازی شده

داشته و از تطابق نسبتاً خوبی برخوردار است. همان‌طور که در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) مشخص است، با گذشت چند چرخه از بار هارمونیک، در نقطه ۱ (که در جلوی سپر قرار دارد)، نسبت اضافه فشار آب منفذی به  $r_{u1} = 2/5$  رسیده است. این به معنای وقوع روانگرایی در این ناحیه بوده و نیاز به بهسازی آن است. در سایر نقاط نسبت اضافه فشار آب منفذی کمتر از ۱ بوده که نیاز به بهسازی آنها نیست.

#### ۶- تحلیل و بررسی

در این بخش به تجزیه و تحلیل نتایج عددی به همراه مقایسه با نتایج آزمایشگاهی متناظر پرداخته می‌شود؛ بنابراین برای بررسی عملکرد

را با مدل بهسازی نشده مقایسه می‌نماییم.

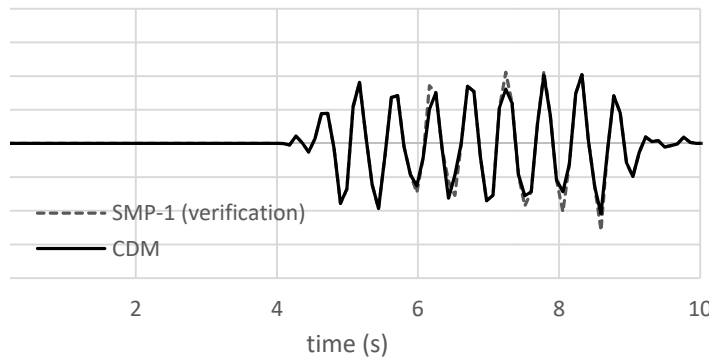
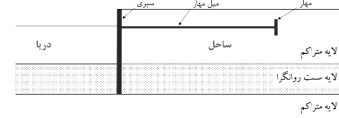
مشخصات ناحیه بهسازی شده به روش خاک-سیمان مطابق پژوهش Chen و همکاران (۲۰۲۳) در نظر گرفته شده است. مطابق پژوهش‌های متناظر، از مدل رفتاری مور-کولمب برای این ناحیه استفاده شده است [۳۶]. در ادامه به مقایسه نتایج مدل بهسازی شده و بهسازی عددی پرداخته شده است.

### ۶-۱-۱- مقایسه تاریخچه زمانی شتاب

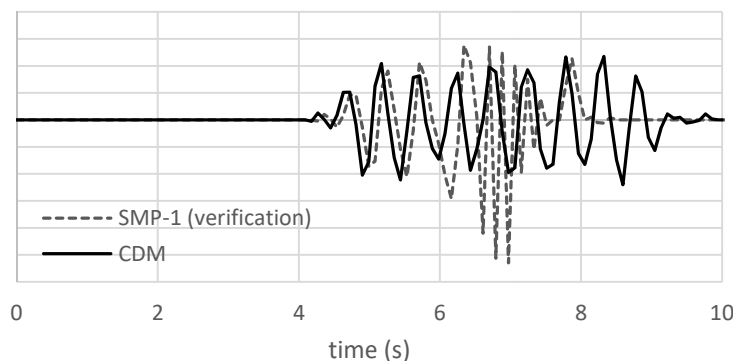
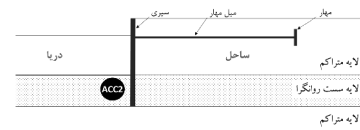
همان‌طور که در شکل‌های (۱۱) تا (۱۴) مشخص است، با بهسازی خاک اطراف ریشه سپر در سمت دریا به روش خاک-سیمان، روند تاریخچه زمانی شتاب به‌ویژه در نقاط ۲ و ۴ که در لحظاتی تغییرات شدیدی داشته و بیشتر از شتاب پایه اعمالی بوده، بهبود یافته و روند یکنواختی پیدا می‌کند.

جدول (۳): مشخصات ناحیه بهسازی شده به روش خاک-سیمان [۳۱]

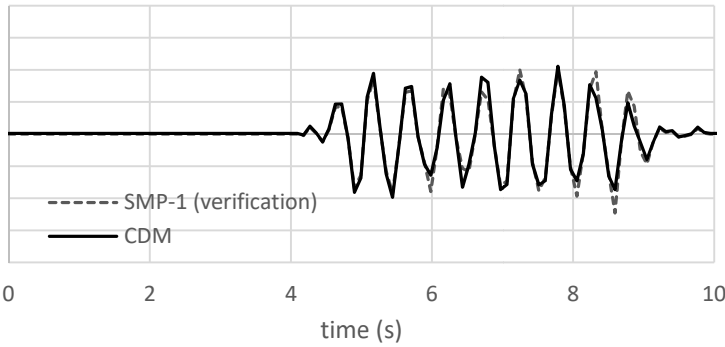
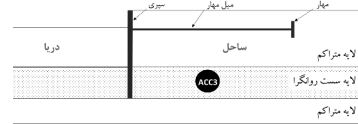
پارامتر	E (MPa)	$\theta$	c (KPa)	$\phi$ (°)	$\psi$ (°)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_c$ (KPa)	ابعاد (cm)
مقدار	۲۰	۰/۳۳	۲۱	۳۰	۰	۱۸۰۰	۳۲	۱۵×۲۰



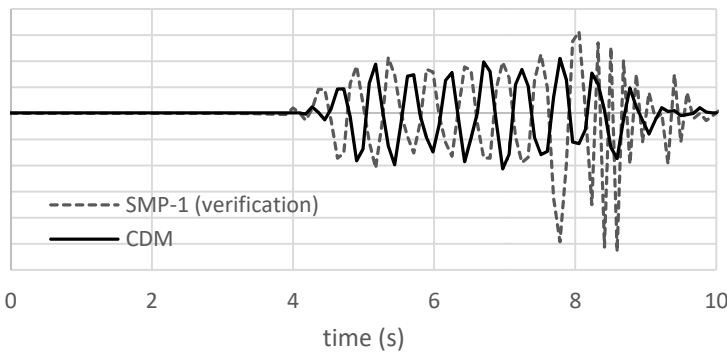
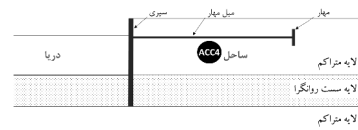
شکل (۱۱): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی شتاب افقی مدل بهسازی شده و بهسازی نشده عددی در ACC1



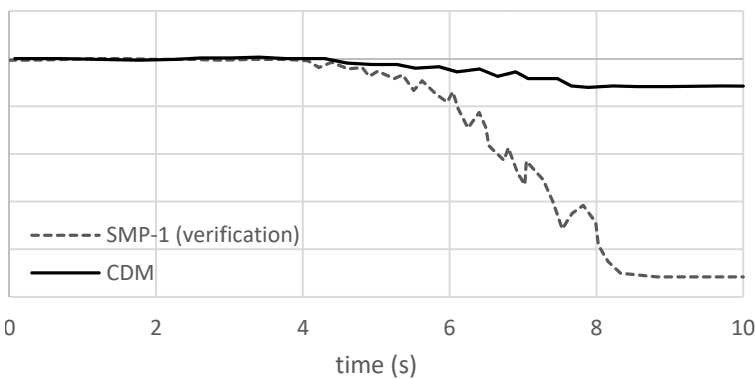
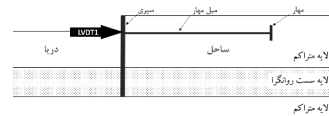
شکل (۱۲): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی شتاب افقی مدل بهسازی شده و بهسازی نشده عددی در ACC2



شکل (۱۳): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی شتاب افقی مدل بهسازی شده و بهسازی نشده عددی در ACC3



شکل (۱۴): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی شتاب افقی مدل بهسازی شده و بهسازی نشده عددی در ACC4



شکل (۱۵): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی جابه‌جایی افقی سپر در تراز LVDT1 مدل بهسازی شده و بهسازی نشده عددی

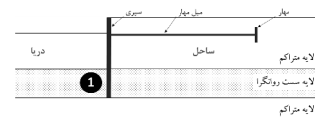
خاک اطراف سپر در سمت دریا به روش خاک-سیمان، جابه‌جایی افقی سپر در تراز LVDT1 تا حدود ۹۰٪ کاهش می‌یابد.

۱-۲-۶- مقایسه تاریخچه زمانی جابه‌جایی افقی سپر در تراز میل مهار (LVDT1) در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود که با بهسازی

### ۳-۱-۶- مقایسه تاریخچه زمانی نسبت اضافه

#### فشار آب حفره‌ای

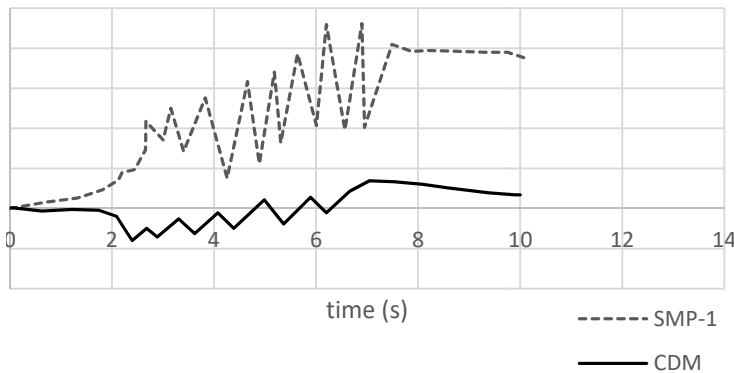
مطابق شکل‌های (۱۶) تا (۱۸) با بهسازی خاک اطراف سپر در سمت دریا به روش خاک-سیمان، نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در همه نقاط کاهش زیادی داشته است. در مدل بهسازی نشده، خاک اطراف سپر در سمت دریا (نقطه ۱) روانگرا شده است ( $r_u \cong 2/5$ ) اما با بهسازی



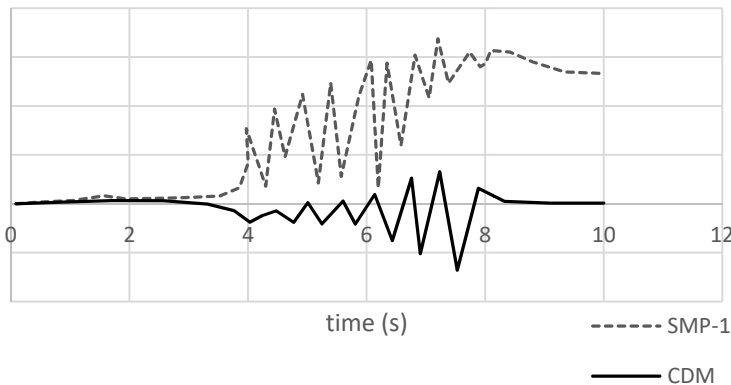
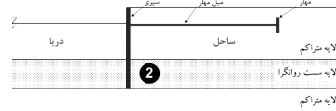
صورت گرفته، روانگرایی در ناحیه رخ نمی‌دهد ( $r_u \cong 0$ ).

### ۴-۱-۶- مقایسه لنگر خمشی سپر

حداکثر لنگر خمشی سپر در مدل بهسازی نشده برابر  $0.141 \text{ KN.m}$  در حالی که در مدل بهسازی شده این مقدار به  $0.085 \text{ KN.m}$  کاهش می‌یابد.



شکل (۱۶): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در نقطه ۱ مدل بهسازی شده و بهسازی نشده عددی



شکل (۱۷): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در نقطه ۲ مدل بهسازی شده و بهسازی نشده عددی

۱۳۳

شماره ۲۹

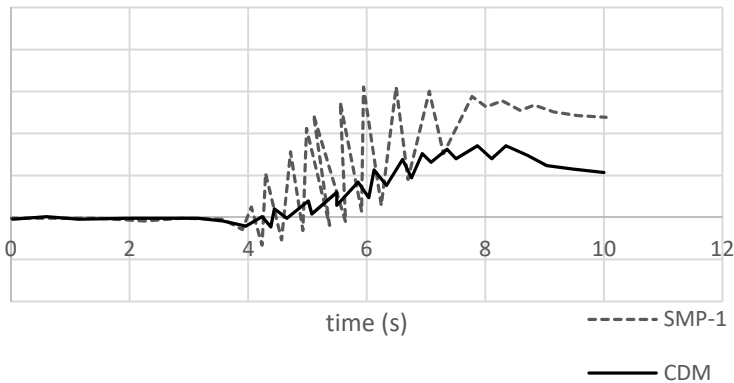
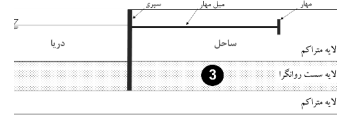
بهار ۱۴۰۴

فصلنامه علمی

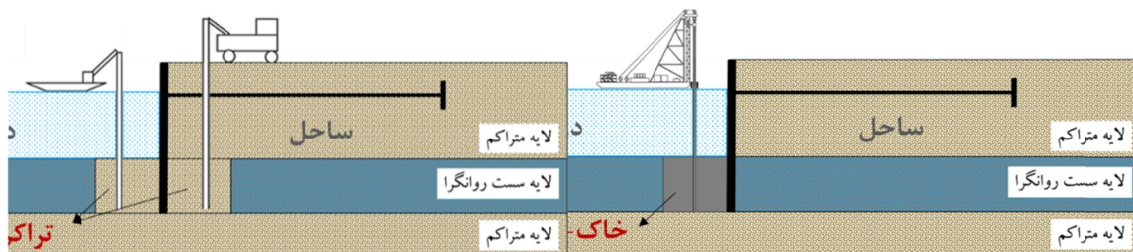
و پژوهشی



تحلیل مدل رفتاری PM4Sand با مقایسه روش‌های ژئوتکنیکی برای پایداری سازه‌های دیوارهای ساحلی سبزی در خاک روانگرا / محمدحسین پخشانی، فریدون خسروی



شکل (۱۸): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در نقطه ۳ مدل بهسازی شده و بهسازی نشده عددی



الف) مدل بهسازی شده به روش خاک-سیمان (عددی)      ب) مدل بهسازی شده به روش تراکم (آزمایشگاهی)

شکل (۱۹): روش‌های پایدارسازی اسکله سپری مهارشده واقع در بستر روانگرا

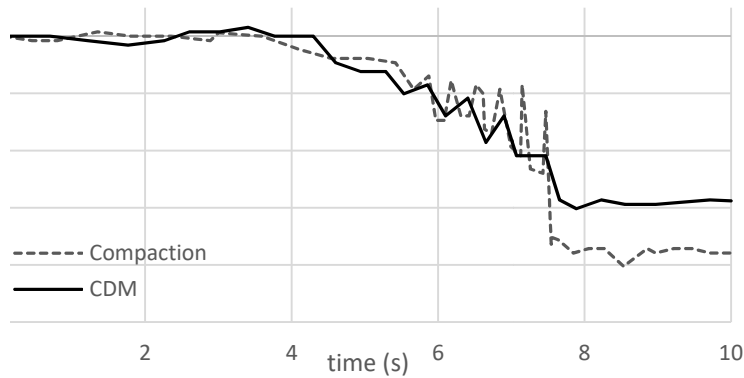
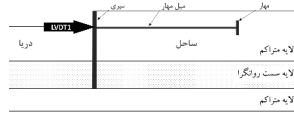
درحالی‌که بهسازی به روش خاک-سیمان فقط در سمت دریا با ابعاد ۲۰ در ۱۵ سانتی‌متر انجام شده است.

۶-۲-۱- مقایسه تاریخچه زمانی جابه‌جایی افقی سپر در تراز میل مهار (LVDT1) مطابق شکل (۲۰)، روش بهسازی خاک-سیمان نسبت به روش تراکم، جابه‌جایی افقی سپر در تراز LVDT1 را چشم‌گیرانه‌تر کاهش داده است.

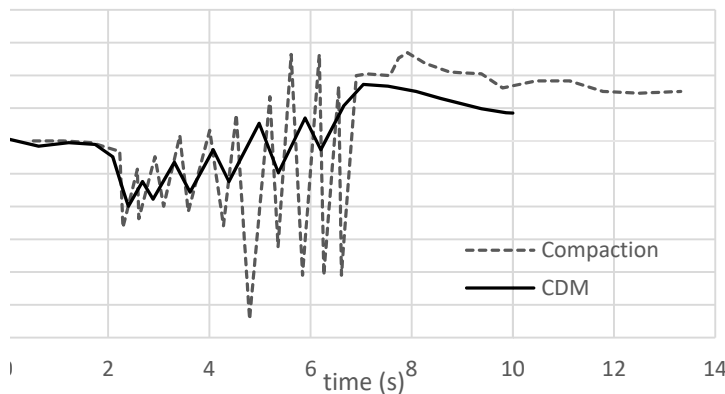
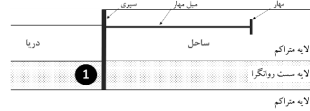
۶-۲-۲- مقایسه تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای همان‌طور که در شکل‌های (۲۱) تا (۲۳) مشخص است، نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در روش بهسازی خاک-سیمان در مقایسه با روش تراکم، کاهش چشم‌گیرانه‌تری داشته است. این در حالی

۶-۱-۵- مقایسه تغییر مکان سپر حداکثر تغییر مکان افقی سپر در مدل بهسازی نشده برابر  $0.057\text{ m}$  درحالی‌که در مدل بهسازی شده این مقدار به  $7.935 \times 10^{-3}\text{ m}$  کاهش می‌یابد. حداکثر تغییر مکان قائم سپر در مدل بهسازی نشده برابر  $0.45\text{ m}$  درحالی‌که در مدل بهسازی شده این مقدار به  $3.950 \times 10^{-3}\text{ m}$  کاهش می‌یابد.

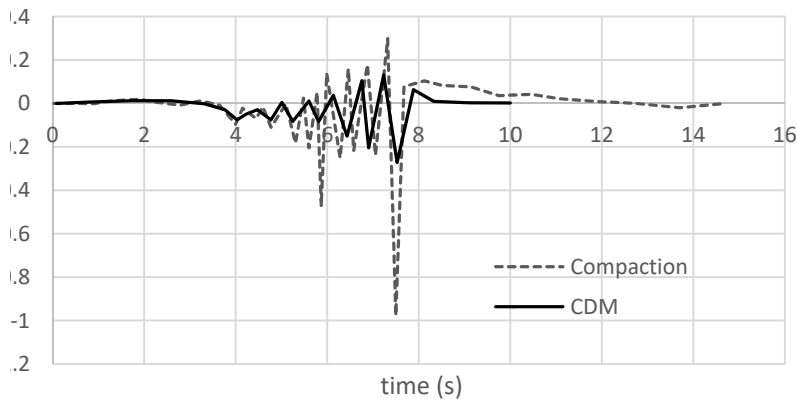
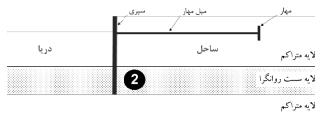
۶-۲- مقایسه نتایج مدل بهسازی شده (روش خاک-سیمان) عددی و مدل بهسازی شده (روش تراکم) آزمایشگاهی مطابق شکل (۱۹)، بهسازی به روش تراکم در دو طرف خاک اطراف سپر با ابعاد ۲۰ در ۲۰ سانتی‌متر و تراکم ۸۵٪ صورت گرفته است



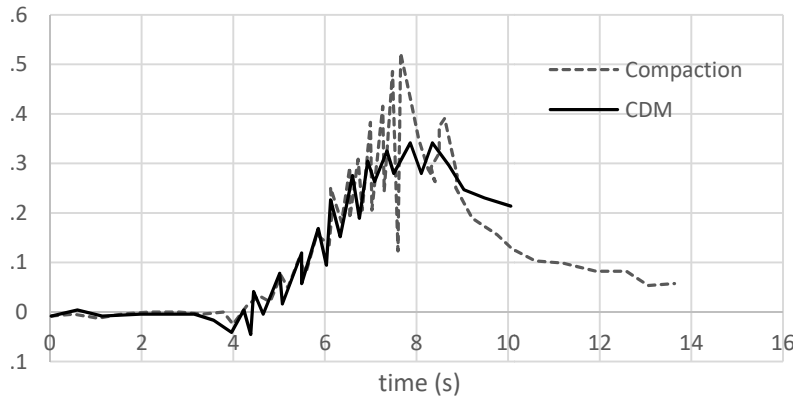
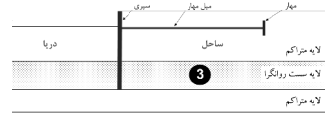
شکل (۲۰): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی جابه‌جایی افقی سپر در تراز LVDT1 در بهسازی به روش خاک-سیمان و تراکم



شکل (۲۱): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در نقطه ۱ بهسازی به روش خاک-سیمان و تراکم



شکل (۲۲): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در نقطه ۲ بهسازی به روش خاک-سیمان و تراکم



شکل (۲۳): مقایسه نتایج تاریخچه زمانی نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در نقطه ۳ بهسازی به روش خاک-سیمان و تراکم

۲) نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای به‌ویژه در ناحیه مستعد روانگرایی (خاک سمت دریا)، تغییر مکان و لنگر خمشی وارد بر سپر با بهسازی خاک اطراف ریشه سپر در سمت دریا به روش خاک-سیمان، به‌شدت کاهش می‌یابد.

۳) به دلیل پایدارسازی اسکله سپری مهارشده واقع بر بستر روانگرا، بهسازی به روش خاک-سیمان با صرف زمان و حجم عملیات اجرایی کمتر نتیجه بهتری نسبت به روش تراکم می‌دهد.

است که در روش تراکم، خاک هر دو سمت ریشه سپر (سمت خاک‌ریز و دریا) بهسازی شده اما در روش خاک-سیمان فقط یک سمت ریشه سپر (سمت دریا)، بهسازی صورت گرفته است.

در روش تراکم با وجود بهسازی خاک هر دو سمت ریشه سپر (سمت خاک‌ریز و دریا)، نسبت اضافه فشار آب حفره‌ای در نواحی بهسازی شده (نقاط ۱ و ۲) به مقدار  $\eta_u = 1$  کاهش یافته است، و همچنان امکان وقوع روانگرایی محتمل است، لذا روش تراکم عملکرد مناسبی برای جلوگیری از روانگرا شدن نواحی مستعد ندارد.

## ۸- منابع

- ۱- مجیدی نیک، مهیار و بیگلری، سعدی. (۱۴۰۱). ارزیابی و پهنه‌بندی خطر زلزله در استان بوشهر. مدیریت بحران، ۱۱ (ویژه‌نامه پدافند)، ۱۱-۲۴.
- ۲- زارع مهرجردی، یحیی، کریمی، شهرام، اولیا، محمد صالح و صادقیه، احمد. (۱۴۰۱). ارائه مدلی برای لجستیک امداد با رویکرد سیستم‌های دینامیکی. مدیریت بحران، ۱۱ (۲)، ۱-۱۷.
- ۳- مشهدی، حسن و امینی ورکی، سعید. (۱۳۹۴). تدوین و ارائه الگوی ارزیابی تهدیدات، آسیب‌پذیری و تحلیل خطرپذیری زیرساخت‌های حیاتی با تأکید بر پدافند غیرعامل. مدیریت بحران، ۴ (ویژه‌نامه هفته پدافند غیرعامل)، ۶۹-۸۵.
4. U.S. Army Corps of Engineers (USACE).

## ۷- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر عملکرد بهسازی به روش خاک-سیمان بر رفتار لرزه‌ای اسکله سپری مهارشده‌ای که بدون توجه به خطر روانگرایی، بخش مدفون آن در لایه سست روانگرا قرار گرفته است با استفاده از مدل رفتاری PM4Sand به روش اجزا محدود تحلیل عددی شده است. نتایج پژوهش عبارت‌اند از:

- ۱) مدل رفتاری PM4Sand عملکرد مناسبی برای مدل‌سازی رفتار خاک سست ماسه-ای در بارگذاری لرزه‌ای دارد.

- on the durability of sand-cement blends. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 171(2), 96-102, <https://doi.org/10.1680/jgrim.17.00034>.
16. Airey, D. W. (1993). Triaxial testing of naturally cemented carbonate soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119, 1379-1398, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1993\)119:9\(1379\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1993)119:9(1379)).
17. Amini, Y., & Hamidi, A. (2014). Triaxial shear behavior of a cement-treated sand-gravel mixture. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 6, 455-465, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2014.07.006>.
18. Consoli, N. C., Rotta, G. V., & Prietto, P. D. M. (2000). Influence of curing under stress on the triaxial response of cemented soils. *Geotechnique*, 50, 99-105, <https://doi.org/10.1680/geot.2000.50.1.99>.
19. MolaAbasi, H., Semsani, S. N., Saberian, M., Khajeh, A., Li, J., & Harandi, M. (2020). Evaluation of the longterm performance of stabilized sandy soil using binary mixtures: A micro-and macro-level approach. *Journal of Cleaner Production*, 267, 122209, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122209>.
20. MolaAbasi, H., Khajeh, A., & Jamshidi Chenari, R. (2021). Use of GMDH-type neural network to model the mechanical behavior of a cement-treated sand. *Neural Computing and Applications*, 33(22), 15305-15318, <https://doi.org/10.1007/s00521-021-06157-6>.
21. Clough, G. W., Sitar, N., Bachus, R. C., & Rad, N. S. (1981). Cemented sands under static loading. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(6), 799-817, <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0001152>.
22. Liu, Y., Jiang, Y. J., Xiao, H., & Lee, F. H. (2017). Determination of representative strength of deep cement-mixed clay from core strength data. *Géotechnique*, 67(4), 350-364, <https://doi.org/10.1680/jgeot.16.P.105>.
23. Tan, H., Jiao, Z., & Chen, J. (2018). Field testing and numerical analysis on performance of anchored sheet pile quay wall with separate pile-supported platform. *Marine Structures*, 58, 382-398, <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2017.12.006>.
24. Hung, W., Tran, M., & Bui, V. (2022). Seismic response of anchored sheet pile walls by centrifuge modelling tests. *International Journal of Civil Engineering* (20), 1041-1065, <https://doi.org/10.1007/s40999-022-00710-7>.
25. Jahangir, M., & Moghaddas Tafreshi, S. (2012). Seismic analysis of anchor sheet pile with a granular soil using pseudo-static approach. *Sharif journal of civil engineering*, Volume 2-28(3), 39-46.
26. Towhata, I., & Islam, M. (1987). Prediction (1996). *Engineering and Design: Design of Sheet Pile Walls*. Technical Engineering and Design Guides as Adapted from the US Army Corps of Engineers, No. 15. ASCE Press.
5. Zekri, A., Ghalandarzadeh, A., Ghasemi, P., & Aminfar, M. H. (2015). Experimental study of remediation measures of anchored sheet pile quay walls using soil compaction. *Ocean Engineering*, 93, 45-63, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.11.002>.
6. PIANC (2001). *Seismic Design Guidelines for Port Structures*. A.A. Balkema, Rotterdam.
7. Lai, S. (1998). Rigid and flexible retaining walls during Kobe earthquake. *Fourth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*.
8. Towhata, I. (2008). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Springer, Berlin. Chapter: Mitigation of liquefaction-induced damage, pp. 588-642, [https://doi.org/10.1007/978-3-540-35783-4\\_26](https://doi.org/10.1007/978-3-540-35783-4_26).
9. Iai, S. (2005). Remediation of liquefiable soils for port structures in Japan—analysis, design and performance. *Journal of earthquake engineering*, 9(spec01), 77-103, <https://doi.org/10.1080/13632460509350580>.
10. Zen, K., Yamazaki, H., & Sato, Y. (1990). Strength and deformation characteristics of cement treated sands used for premixing method. *Report of the Port and Harbour Research Institute*, 29(2).
11. Kenai, S., Bahar, R., & Benazzoug, M. (2006). Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil. *Journal of Materials Science*, 41, 6956-6964, <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0226-1>.
12. Fan, J., Wang, D., & Qian, D. (2018). Soil-cement mixture properties and design considerations for reinforced excavation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(4), 791-797, <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.03.004>.
13. Consoli, N. C., Cruz, R. C., Floss, M. F., & Festugato, L. (2010). Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136, 759-763, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000278](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000278).
14. Cardoso, R., Ribeiro, D., & Néri, R. (2017). Bonding effect on the evolution with curing time of compressive and tensile strength of sand-cement mixtures. *Soils and Foundations*, 57, 655-668, <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2017.04.006>.
15. Consoli, N. C., & Tomasi, L. F. (2018). The impact of dry unit weight and cement content

of lateral displacement of anchored bulkheads induced by seismic liquefaction. *Soils and Foundations*, 27(4), 137-147, [https://doi.org/10.3208/sandf1972.27.4\\_137](https://doi.org/10.3208/sandf1972.27.4_137).

27. Derakhshani, A., Takahashi, N., Bahmanpour, A., Yamada, S., & Towhata, I. (2011). Experimental study on effects of underground columnar improvement on seismic behaviour of quay wall subjected to liquefaction. In Pan-Am CGS Geotechnical Conference.

28. Khan, M. R. A., Hayano, K., & Kitazume, M. (2008). Investigation on static stability of sheet pile quay wall improved by cement treated sea-side ground from centrifuge model tests. *Soils and foundations*, 48(4), 563-575, <https://doi.org/10.3208/sandf.48.563>.

29. Khan, M. R. A., Hayano, K., & Kitazume, M. (2009). Behavior of sheet pile quay wall stabilized by sea-side ground improvement in dynamic centrifuge tests. *Soils and foundations*, 49(2), 193-206, <https://doi.org/10.3208/sandf.49.193>.

30. Nguyen, A. D., Nguyen, V. T., & Kim, Y. S. (2023). Finite element analysis on dynamic behavior of sheet pile quay wall dredged and improved seaside subsoil using cement deep mixing. *International Journal of Geo-Engineering*, 14(1), 9, <https://doi.org/10.1186/s40703-023-00186-x>.

31. Chen, S., Guan, Y., & Dai, J. (2023). Investigation on behavior of anchored sheet pile quay wall improved by cement-soil: Centrifuge and numerical modelling. *Ocean Engineering*, 279, 114467, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.114467>

32. Patil, H., Deshmukh, R., & Salunke, P. J. (2023). Analysis of sheet pile in dense and loose soil using finite element method. *Materials Today: Proceedings*, 77, 654-661, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.285>.

33. PLAXIS (2023). PLAXIS 2D Material Models Manual. Bentley.

34. PLAXIS (2022). User Defined Soil Models - PM4Sand: A Sand Plasticity model for Earthquake Engineering. Bentley.

35. Ahmadi, M., & Shirasb, A. (2011). Liquefaction resistance of Firoozkuh sand using cyclic simple shear test", 6th National Congress on Civil Engineering, Semnan, Iran.

36. Bozkurt, S., Abed, A., & Karstunen, M. (2023). Finite element analysis for a deep excavation in soft clay supported by lime-cement columns. *Computers and Geotechnics*, 162, 105687, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105687>.