University of Tabriz

Journal of Civil and Environmental Engineering
Volume 55 (2025), Issue 3, 89-98

EXTENDED ABSTRACT

Effect of Deep Soil Mixing Grid on the Reduction Coefficient in the Liquefiable Soil: 3D Nonlinear Modeling

Ali Asgari *

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar 47416-13534, Iran

Received: 14 September 2024; **Reviewed:** 03 August 2025; **Accepted:** 27 September 2025

Keywords:
Liquefaction, Deep soil mixing (DSM) grid, Ground improvement, Reduction factor, Nonlinear behavior.

1. Introduction

The reduction effects of the deep mixing method (DSM) on soil liquefaction have been investigated as case studies physical and laboratory models and numerical methods. In most research, to determine the effectiveness of DSM, the cyclic shear stress ratio (CSR) presented by Seed and Idriss is calculated for the two conditions with and without improvement, and then the ratio is measured. These coefficients are determined from the following relationships:

$$\mathrm{CSR}_U = \frac{\tau_{s,U}}{\sigma'_v} = \left(\frac{a_{max,U}}{g}\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\right) r_{d,U}\,,$$
$$\mathrm{CSR}_I = \frac{\tau_{s,I}}{\sigma'_v} = \left(\frac{a_{max,I}}{g}\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\right) r_{d,I} \tag{1}$$

Where $\tau_s, \acute{\sigma}_v, a_{max}, r_d$, and g are average shear stress, effective stress, total stress at the desired depth, maximum acceleration at the soil surface, shear stress-reducing factor, and gravitational acceleration, respectively. Note that the index *U* is for the free environment mode and the index *I* is for the improved case with DSM.

The ratio of coefficients CSR_I over CSR_U is called cyclic shear stress reduction factor (R_{CSR}), which is determined as follows:

$$\mathrm{R_{CSR}} = \frac{\mathrm{CSR}_I}{\mathrm{CSR}_U} = \frac{\tau_{s,I}}{\tau_{s,U}} = \left(\frac{a_{max,I}}{a_{max,U}}\right)\left(\frac{r_{d,I}}{r_{d,U}}\right) = \mathrm{R}_{a\,max}\mathrm{R}_{rd} \tag{2}$$

2. Numerical Modeling

In this research, 3D fully coupled, effective stress, dynamic nonlinear finite analyses were performed to examine the effective influences of DSM. The DSM and soil parameters have been selected based on the studies of Rayamajhi et al. (2014). The soil was represented as three layers, where the upper and lower layers of dense sand were simulated at heights of 1 and 2m, respectively, and the middle layer of loose sandy soil at a 10m

Publisher: Vice Chancellery for Research & Technology, University of Tabriz
https://doi.org/10.22034/CEEJ.2025.63522.2381
Online ISSN: 2717-4077
* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0002-2359-8696
Tel: 011-35305110
E-mail address: a.asgari@umz.ac.ir (Ali Asgari).

height. DSM thickness for all models is considered constant and equal to 1m. Fig. 1 exhibits the finite element mesh for various numerical models.

In this research, two types of materials have been modeled with the Pressure-Depend-Multi-Yield02 (PDMY02) model available in the OpenSees platform. The symmetry of the model allowed for half of it to be simulated. The soil and DSM domains were represented using BrickUP 8 node elements. Natural frequencies of 1 and 4 Hz and a damping ratio of 2% have been considered for all dynamic analysis.

The framework of analysis and its suppositions, boundary conditions (BCs), and constitutive model for sandy soil were regarded according to Refs.

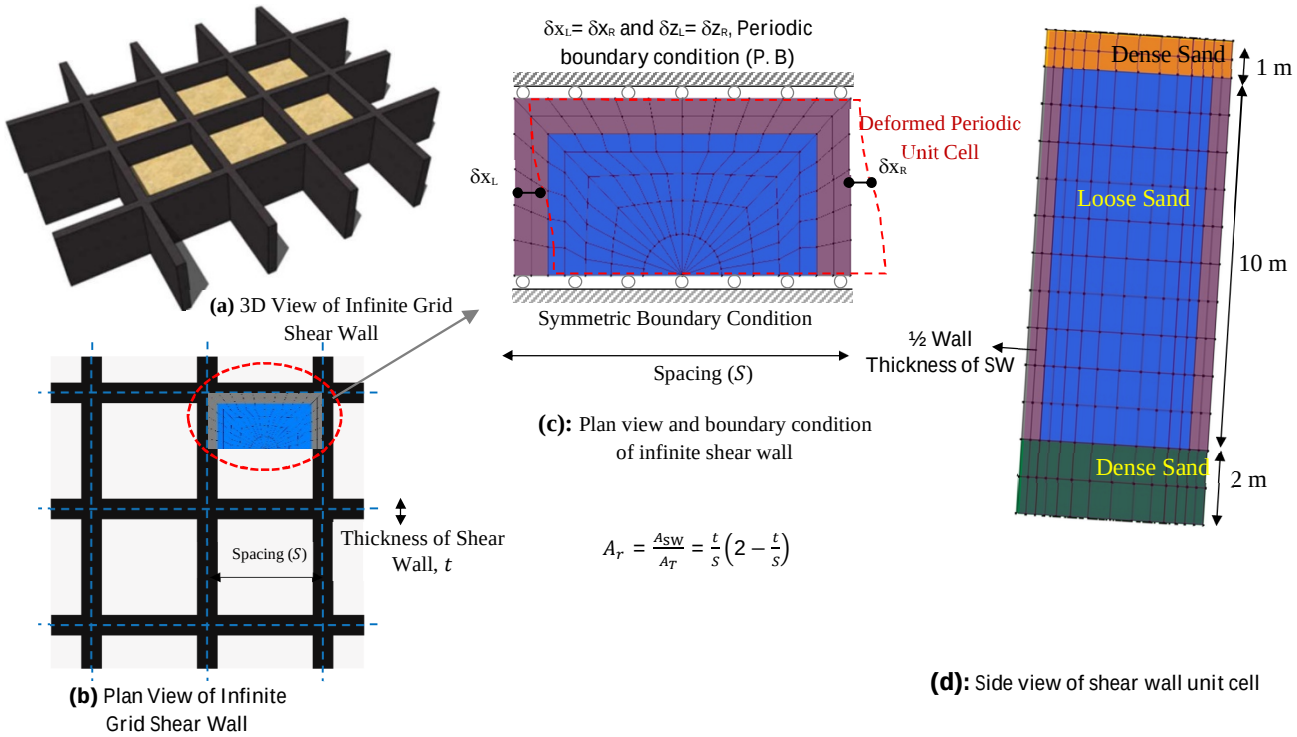


Fig 1. A 3D improved geometric model of liquefiable soil with DSM accompanying its meshing technique

3. Results and Discussions

In this examination, the effects of grid distance and shear modulus ratio on the reduction factor in both linear and non-linear cases of soil are evaluated. The analysis models were subjected to a harmonic load with a frequency of 2Hz and an amplitude of 0.2g. The reduction factor, R_{rd}, is calculated from the 3D back-calculation in two cases with and without DSM. Fig. 2 illustrates the impacts of grid spacing and shear modulus ratio on the reduction factor in linear elastic and non-linear cases. The R_{rd} increases with the spacing of DSM. Considering the nonlinear behavior of soil and DSM reduces the R_{rd} compared to the case of linear elastic behavior. Instead, the R_{amax} increases greatly by considering the nonlinear effect.

The R_{rd} decreases with the shear modulus ratio. This reduction is more pronounced and noticeable in linear models. On the other hand, the reduction factors in the nonlinear models are consistently lower than in the elastic models at intermediate and greater depths.

4. Conclusions

The main conclusions of this study are as follows:

- Decreasing the spacing and increasing the shear modulus ratio in the DSM causes a reduction in the R_{rd}, which is more prominent in linear models.
- Considering the nonlinear behavior of the soil, the DSM causes a decrease in the R_{rd} and an increase in R_{amax} compared to the state of linear elastic behavior.
- The relationships derived from the assumption of shear strain compatibility and incompatibility in the previous research are conservative for estimating the R_{rd}. Still, there is a large difference in the R_{amax} values

due to the lack of consideration of excess pore pressure in the linear elastic model. Finally, the lower R_{CSR} values were estimated, which causes uncertainty.

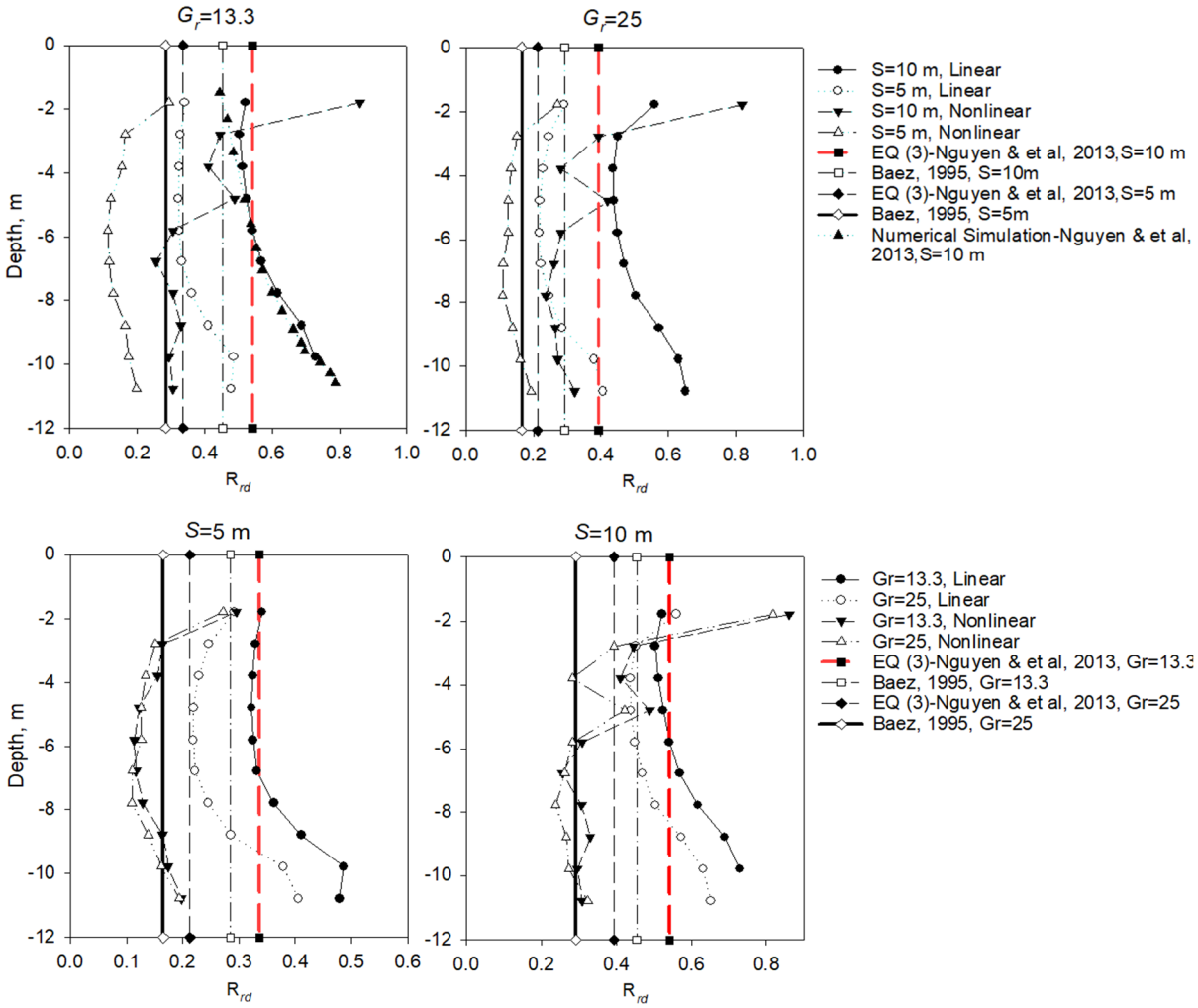


Fig 2. The influences of grid spacing and shear modulus ratio on the reduction factor in linear elastic and non-linear cases

تأثیر اختلاط عمیق شبکه‌ای بر کاهش پتانسیل روانگرایی در خاک ماسه‌ای اشباع: مدل‌سازی سه‌بعدی غیرخطی

علی عسگری*[1]

[1] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر

دریافت: 1403/6/24، بازنگری: 1404/5/12، پذیرش: 1404/7/5، نشر آنلاین: 1404/7/5

چکیده

یکی از پرکاربردترین روش‌های موجود برای بهسازی خاک روانگرا روش اختلاط عمیق شبکه‌ای (DSM) است. اجرای این نوع بهسازی موجب افزایش سختی برشی و به تناسب آن باعث کاهش کرنش‌های بزرگ برشی در خاک و کم شدن پتانسیل رونگرایی خواهد شد. در اکثر پژوهش‌های گذشته برای برآورد میزان اثر کاهندگی پتانسیل روانگرایی R_{CSR}، مدل‌سازی بر مبنای اجزای محدود خطی انجام پذیرفت که در آن اثرات اضافه فشار آب حفره‌ای و روانگرایی لحاظ نشده است. در این پژوهش با مدل‌سازی سه‌بعدی به‌کمک نرم‌افزار متن‌باز OpenSeesSP، برای بالا بردن سرعت پردازش استفاده شده است. رفتارهای خاک و شبکه DSM به‌صورت غیرخطی و با مدل پیشرفته دراکر- پراگر چندسطحی شبیه‌سازی شده است. اثراتی نظیر فاصله بین شبکه (5 و 10 متر) و مدول برشی نسبی خاک و روش اختلاط عمیق شبکه‌ای (13/3 و 25) بر میزان ضریب کاهنده تنش برشی، R_{rd} و ضریب نسبی شتاب R_{amax} تحت بار هارمونیک بررسی و مقایسه شده است. نتایج مدل‌سازی غیرخطی نشان می‌دهد که افزایش فاصله شبکه از 5 متر به 10 متر با هر دو مدول برشی نسبی باعث افزایش تقریباً 300 درصدی R_{rd} می‌شود. همچنین افزایش مدول برشی نسبی از 13/3 به 25 باعث کاهش ناچیزی در مقادیر R_{rd} شد. از طرفی، لحاظ کردن رفتار غیرخطی خاک و روش اختلاط عمیق شبکه‌ای، موجب کاهش مقادیر R_{rd} در فواصل شبکه پایین شده است؛ ولی در عوض مقدار R_{amax} افزایش زیادی یافته و در سطح زمین حدوداً به 2/5 هم رسیده است. این در حالی است که مقدار R_{amax} در حالت خطی، کمتر از یک است. روابط ارائه شده در پژوهش‌های قبلی برای تخمین R_{rd} محافظه‌کارانه است. اما در مقادیر R_{amax} به‌دلیل عدم مدل‌سازی درستی از روانگرایی در مدل خطی اختلاف زیادی دیده می‌شود و درنهایت مقادیر R_{CSR} پایین‌تری تخمین زده شد که در جهت عدم اطمینان است. همچنین، مدل‌های غیرخطی در عمق‌های میانی و پایینی خاک، کاهش قابل‌توجهی در R_{rd} نسبت به حالت خطی نشان دادند. این نتایج نشان می‌دهد که لحاظ کردن رفتار غیرخطی خاک و اضافه فشار آب حفره‌ای در مدل‌سازی، دقت تحلیل را افزایش داده و موجب طراحی محافظه‌کارانه‌تر در پروژه‌های بهسازی خاک می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: روانگرایی، اختلاط عمیق شبکه‌ای، بهسازی خاک، ضریب کاهنده، رفتار غیرخطی.

1- مقدمه

روش‌های مختلفی برای کاهش پتانسیل روانگرایی از قبیل، احداث شمع، ستون سنگی، تراکم دینامیکی و روش اختلاط عمیق وجود دارد (Ahmadtabar Sorkhi و Asgari، 2014؛ Ibsen و همکاران، 2025).

اخیراً روش اختلاط عمیق به‌دلیل سادگی اجرا و اقتصادی بودن به‌ویژه در نواحی شمالی کشور برای کنترل روانگرایی، بسیار مورد توجه است. روش اختلاط عمیق با افزایش رفتار اتساعی سیستم، مانع افزایش شدید اضافه فشار آب حفره‌ای می‌شود. همچنین کرنش‌های برشی ناشی از بارهای جانبی مانند زلزله را حتی در حالت آغاز روانگرایی خاک محصور شده کنترل می‌کند. به‌طور معمول روش اختلاط عمیق به چهار صورت مجزا، نواری، شبکه‌ای و بلوکی اجرا می‌شود که نمونه‌هایی از آن‌ها را می‌توان در شکل (1) مشاهده کرد.

اثرات کاهندگی روش اختلاط عمیق بر روانگرایی خاک به‌صورت مطالعات موردی (Hamada و Wakamatsu، 1997؛ Zhang و همکاران، 2022)، مدل‌های فیزیکی و آزمایشگاهی (Kitazume و Takahashi، 2010؛ Zhang و همکاران، 2022؛

ناشر: معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه تبریز شاپا الکترونیکی: 2717-4077

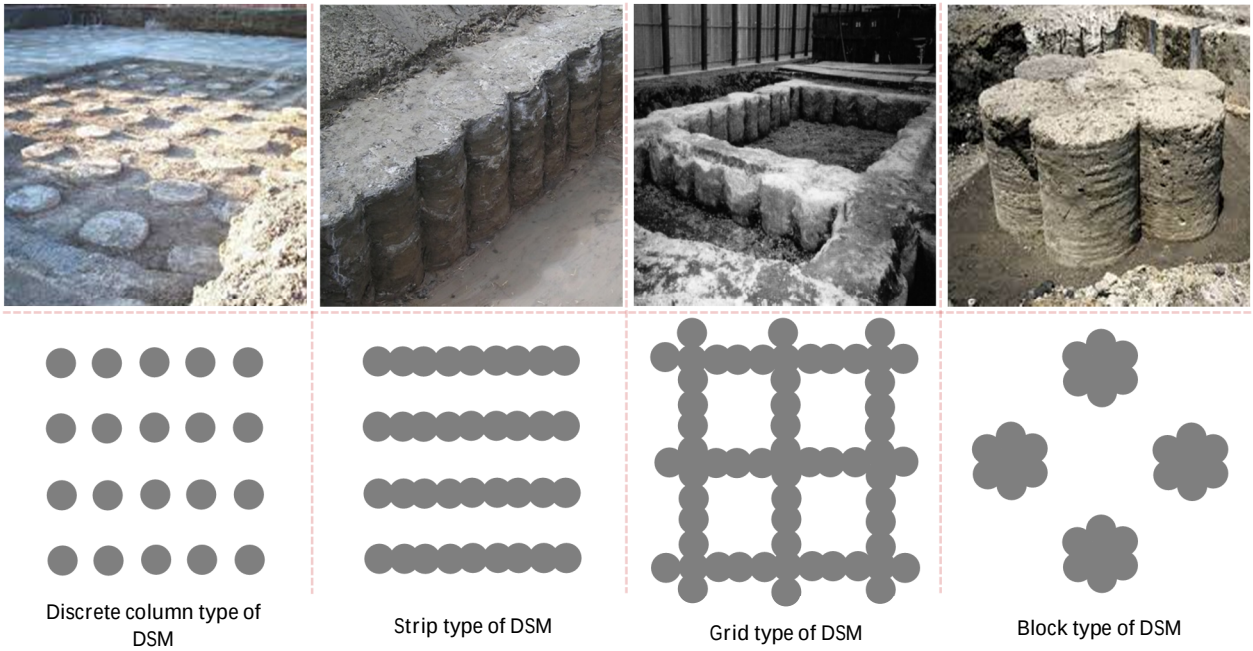
https://doi.org/10.22034/CEEJ.2025.63522.2381

* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: 011-35305110

* Orcid Cod Corresponding Author: 0000-0002-2359-8696

آدرس ایمیل: a.asgari@umz.ac.ir (ع. عسگری).

Dehghanbanadaki و همکاران، 2023) و روش‌های عددی (Shaghaghi و همکاران، 2021؛ Hasheminezhad و Bahadori، 2022؛ Moradi و همکاران، 2023؛ Yin و همکاران، 2023) مورد بررسی قرار گرفته است. به‌عنوان نمونه، Hasheminezhad و Bahadori (2022) به بررسی افزایش ظرفیت باربری پی‌های سطحی تحت تأثیر روانگرایی خاک زیرسطحی با بهره‌گیری از روش اختلاط عمیق خاک پرداختند. نتایج تحلیل‌های عددی سه‌بعدی انجام‌شده با نرم‌افزار FLAC3D نشان داد که کنترل لایه روانگرا به‌کمک ستون‌های DSM به‌طور قابل‌توجهی موجب بهبود ظرفیت باربری استاتیکی و دینامیکی پی‌های سطحی و کاهش فشار آب منفذی اضافی می‌گردد. همچنین، یافته‌ها بیانگر آن است که افزایش قطر و طول ستون‌های DSM اثر مثبتی بر افزایش ظرفیت باربری دارد، هرچند با افزایش عرض پی، میزان کارایی این روش تا حدودی کاهش می‌یابد.



شکل 1- انواع مختلفی از اشکال DSM در اجرا

در اکثر پژوهش‌ها، برای تعیین میزان اثربخشی DSM، ضریب تنش برشی سیکلی[1] که توسط Seed و Idriss (1971) ارائه گردید برای حالت بدون بهسازی و با بهسازی محاسبه می‌گردد و نسبت به‌هم سنجیده می‌شود. این ضرایب از روابط زیر تعیین می‌گردد (Satizabal، 1995؛ Nguyen و همکاران، 2012؛ Rayamajhi و همکاران، 2012؛ Nguyen و همکاران، 2013؛ Rayamajhi و همکاران، 2014):

$$\mathrm{CSR}_U = \frac{\tau_{s,U}}{\sigma'_v} = \left(\frac{a_{max,U}}{g}\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\right) r_{d,U}\,, \qquad \mathrm{CSR}_I = \frac{\tau_{s,I}}{\sigma'_v} = \left(\frac{a_{max,I}}{g}\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\right) r_{d,I} \tag{1}$$

که در آن ترتیب τ_s ، $\acute{\sigma}_v$، a_{max}، r_d و g به تنش برشی متوسط، تنش مؤثر، تنش کل در عمق مورد نظر، شتاب ماکزیمم در سطح خاک، ضریب کاهنده تنش برشی و شتاب ثقل است. توجه شود اندیس U برای حالت محیط آزاد و اندیس I برای حالت بهسازی شده با DSM است. نسبت ضرایب CSR_I بر CSR_U را فاکتور کاهنده تنش برشی سیکلی (R_{CSR}) می‌گویند که به‌صورت زیر تعیین می‌شود:

$$\mathrm{R_{CSR}} = \frac{\mathrm{CSR}_I}{\mathrm{CSR}_U} = \frac{\tau_{s,I}}{\tau_{s,U}} = \left(\frac{a_{max,I}}{a_{max,U}}\right)\left(\frac{r_{d,I}}{r_{d,U}}\right) = \mathrm{R}_{a\,max}\mathrm{R}_{rd} \tag{2}$$

Nguyen و همکاران (2013) با انجام مدل‌سازی‌های سه‌بعدی با نرم‌افزار OpenSeesPL (Lu و همکاران، 2011) رابطه‌ای برای فاکتور کاهنده تنش برشی سیکلی به‌صورت زیر ارائه دادند. این رابطه امروزه برای طراحی DSM شبکه‌ای استفاده می‌شود.

1. Cyclic stress ratio (CSR)

$$R_{rd}=\left(\frac{r_{d,I}}{r_{d,U}}\right)=\frac{1}{G_r\left[A_r C_G \gamma_r+\frac{1}{G_r}(1-A_r)\right]}\le 1,$$

$$C_G=1-0.5\sqrt{1-A_r},\quad A_r=\frac{t}{S}\left(2-\frac{t}{S}\right),\quad G_r=\frac{G_{DSM}}{G_{Soil}} \qquad (3)$$

$$\gamma_r=\left[1-(1-A_r)^{1.3}\left(\frac{G_r-1}{185}\right)^{0.4}\right]\times min\left(\frac{H}{S},1\right)$$

که در آن A_r ، C_G ، t ، S ، H ، G_{Soil} ، G_{DSM} ، G_r و γ_r به‌ترتیب سطح مقطع به‌سازی شده، ضریب فاکتور شکل DSM، ضخامت، فاصله شبکه و ارتفاع DSM، مدول برشی خاک سست، مدول برشی DSM، ضریب نسبی مدل برشی و کرنش برشی نسبی بین خاک و DSM است. نکته قابل ذکر در مورد رابطه (3) این است که اثرات غیرخطی بودن خاک لحاظ نشده است و اضافه آب حفره‌ای مدل‌سازی نشده است. در این پژوهش با مدل‌سازی غیرخطی خاک به‌صورت سه‌بعدی فاکتورکاهنده تحت بار دینامیکی برآورد و با نتایج خطی مقایسه می‌گردد.

بنابراین نوآوری این نوشتار در استفاده از مدل‌سازی سه‌بعدی غیرخطی با نرم‌افزار OpenSeesSP و به‌کارگیری مدل رفتاری پیشرفته PDMY02 برای شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار خاک و روش اختلاط عمیق شبکه‌ای (DSM) است. این پژوهش با لحاظ کردن اثرات اضافه فشار آب حفره‌ای و رفتار غیرخطی خاک، به بررسی تأثیر پارامترهای کلیدی مانند فاصله شبکه‌های DSM و مدول برشی نسبی پرداخته است. این یافته‌ها به طراحی بهینه‌تر برای کاهش روانگرایی در خاک‌های ماسه‌ای کمک می‌کند.

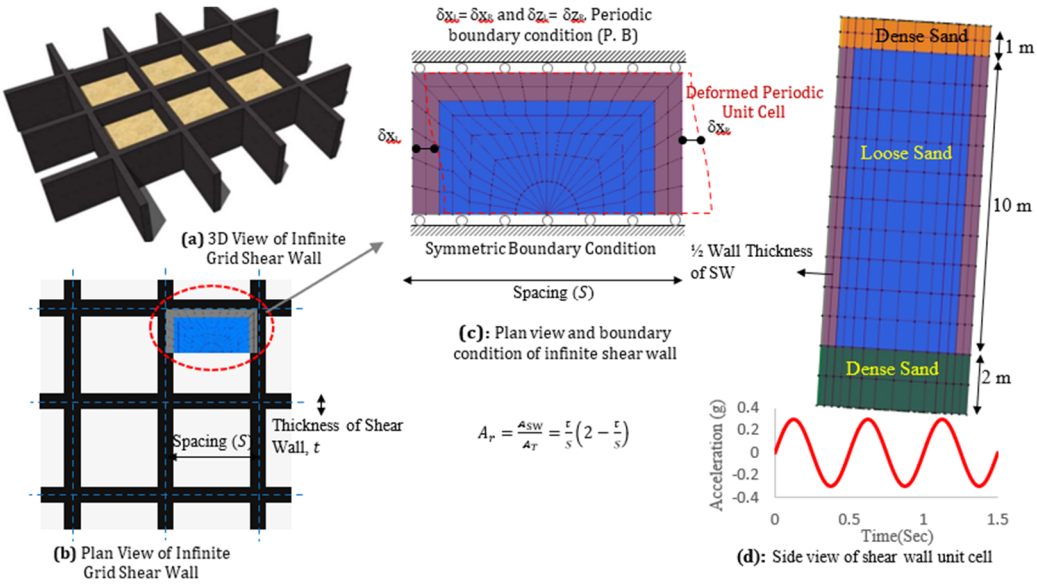
2- مدل‌سازی عددی

2-1- مدل‌سازی خاک و DSM

در این پژوهش، برای بررسی اثرات کاهنده DSM عمده پارامترهای مصالح خاکی به‌کار گرفته شده بر اساس مطالعات Rayamajhi و همکاران (2014) انتخاب شده است. خاک به‌صورت سه‌لایه در نظر گرفته شده که شامل:

- لایه سطحی ماسه متراکم به ارتفاع 1 متر (تراکم نسبی بالا)،
- لایه میانی ماسه سست قابل روانگرا به ارتفاع 10 متر (با تراکم نسبی پایین)،
- لایه زیرین ماسه متراکم به ارتفاع 2 متر می‌باشد.

این تفکیک با هدف بررسی رفتار واقعی خاک‌های متراکم و سست در معرض بار دینامیکی صورت گرفته است. علت انتخاب این مدل، تطابق آن با هدف پژوهش (بررسی دقیق پدیده روانگرایی در شرایط سه‌بعدی) و توصیه‌های مطالعات پیشین ازجمله مرجع (Nguyen و همکاران، 2013) است. ضخامت DSM برای تمامی مدل‌ها ثابت و برابر با یک متر در نظر گرفته شده است. نمونه‌ای از شبیه‌سازی در شکل (2) نمایش داده شده است. برای مدل‌سازی لایه‌های خاکی و DSM در نرم‌افزار OpenSees (McKenna و همکاران، 2011) از مدل رفتاری غیرخطی PDMY02 [2] استفاده شده است. P روابط این مدل در جدول (1) آورده شده است. مدل ذکرشده در فوق، اصلاح‌شده مدل PDMY است که برای مدل‌سازی رفتار الاستوپلاستیک خاک تحت هر شرایط بارگذاری ارائه شده است.



شکل 2- مدل هندسی بهسازی شده خاک قابل روانگرا با DSM و روش مش‌بندی

2. Pressure-Dependent-Multi-yield 02

جدول 1- روابط مدل همبسته چندسطحی (PDMY02) به‌کارگرفته شده برای خاک‌های ماسه‌ای و مصالح اختلاط عمیق

تابع تسلیم:	$f=\frac{3}{2}\left[\boldsymbol{s}-(p'+p'_0)\boldsymbol{\alpha}\right]:\left[\boldsymbol{s}-(p'+p'_0)\boldsymbol{\alpha}\right]-M^2\left(p'+p'_0\right)^2=0,$ $\boldsymbol{s}=\boldsymbol{\sigma}'-p'I,\quad p'=\frac{J_1}{3}=\frac{\sigma'_{11}+\sigma'_{22}+\sigma'_{33}}{3},$	σ': تانسور تنش، s: تانسور تنش اختلافی، α: تانسور واحد مرتبه دوم، J_1: نامتغییر اول تنش، p_0': یک تنش باقی‌مانده بسیار کوچک برابر با 0/01 کیلوپاسکال
اندازه سطح تسلیم، *M*:	$M=\frac{3}{\sqrt{2}}\frac{\tau_{oct}}{p'+p'_0},\ M\left(at\ failure\right)=M_f=\frac{6\sin\varphi_{TXC}}{3-\sin(\varphi_{TXC})}$	τ_{oct}: تنش برشی اکتاهدرال، J_{2D}: نامتغیر دوم تنش اختلافی، M_f: نشان‌دهنده نسبت تنش بیرونی‌ترین سطح تسلیم در هنگام شکست است و از تابع زاویه اصطکاک خاک است (Chen و Mizuno، 1990).
روابط تنش- کرنش:	$\tau_{oct}=\frac{G_{\max,r,oct}\gamma_{oct}}{1+\frac{\gamma_{oct}}{\gamma_r}\left(\frac{p'_r+p'_0}{p'+p'_0}\right)^d},\quad \tau_{oct,r,f}=\frac{2\sqrt{2}\sin\varphi_{TXC}}{3-\sin\varphi_{TXC}}p'_r=\frac{G_{\max,r,oct}\gamma_{\max,r}}{1+\frac{\gamma_{\max,r}}{\gamma_r}\left(\frac{p'_r+p'_0}{p'+p'_0}\right)^d}$ $G_{\max,oct}=G_{\max,oct,r}\left(\frac{p'+p'_0}{p'_r+p'_0}\right)^d,\ B_{\max,oct}=B_{\max,oct,r}\left(\frac{p'+p'_0}{p'_r+p'_0}\right)^d$	γ_{oct}: کرنش برشی اکتاهدرال، J_{2D}: نامتغیر دوم کرنش اختلافی، γ_r: کرنش برشی مرجع، $\gamma_{\max}$: کرنش برشی بیشینه است.
قانون جریان:	$\tilde{Q}=\tilde{Q}'+Q''\tilde{I},\quad \tilde{P}=\tilde{P}'+P''\tilde{I}$ قانون جریان وابسته در رفتار برشی: $\tilde{Q}'=\tilde{P}'$ قانون جریان غیروابسته در رفتار تغییرات حجمی: $Q''\neq P''$ $P''=\begin{cases}\left(1-\frac{\boldsymbol{n}:\boldsymbol{s}}{\lVert\dot{\boldsymbol{s}}\rVert}\frac{\eta}{\eta_{PT}}\right)^2(c_1+\varepsilon_c c_2)\left(\frac{p'+p'_0}{p_{atm}}\right)^{c_3} & \eta>\eta_{PT}\text{ and }\dot{\eta}<0,\ \text{Contractive phase}\\ \left(1-\text{sign}(\dot{\eta})\frac{\eta}{\eta_{PT}}\right)^2\left(d_i+\gamma_d^{d_2}\right)\left(\frac{p'+p'_0}{p_{atm}}\right)^{-d_3} & \eta<\eta_{PT}\text{ and }\dot{\eta}>0,\ \text{Dilative phase}\\ 0 & \eta=\eta_{PT}\end{cases}$ $\eta=\sqrt{\frac{3}{2}\frac{(\boldsymbol{s}:\boldsymbol{s})}{p'+p'_0}},\quad \eta_{PT}=\left.\sqrt{\frac{3}{2}\frac{(\boldsymbol{s}:\boldsymbol{s})}{p'+p'_0}}\right\rvert_{\varphi_{TXC}=\varphi_{PT}}$ $P''=0\ \Rightarrow\ \gamma_y=l_2\cos^3(\frac{\pi p'}{2l_1})$	که در آن $\tilde{Q}'$ و $Q''\tilde{I}$ بردار مؤلفه‌های اختلافی و حجمی نرمال بر سطح تسلیم است. که در آن $\tilde{P}'$ و $P''\tilde{I}$ بردار مؤلفه‌های اختلافی و حجمی نرمال بر تابع پتانسیل پلاستیک است. پارامترهای l_1 و l_2 روانگرایی ناشی از رفتار پلاستیک کامل را کنترل می‌کنند. γ_y: تغییرات کرنش برشی جزء پلاستیک
قانون سینیماتیک سخت‌شوندگی (Parra-Colmenares، 1996؛ Elgamal و همکاران، 2002):	$\mu=[\boldsymbol{s}-(p'-p'_0)\alpha_m]-\frac{M_m}{M_{m+1}}[\boldsymbol{s}-(p'-p'_0)\alpha_{m+1}]$ $G_{oct,m}=\frac{2(\tau_{oct,m+1}-\tau_{oct,m})}{(\gamma_{oct,m+1}-\gamma_{oct,m})},\quad M_m=\frac{3\tau_{oct,m}}{\sqrt{2}(p'_r+p'_0)},\quad m=1,2,....,\text{NYS}$	μ: جهت انتقال، $G_{oct,m}$: مدول برشی مماسی، M_m: اندازه سطوح در هر m، m: تعداد سطح تسلیم از رنج 1 تا NYS (تعداد کل سطح تسلیم).

توجه: برخی از نمادها در جدول (2) تعریف شده است.

این مدل رفتاری خاک قابلیت درنظر گرفتن رفتار انقباضی و انبساطی در شرایط بارگذاری سیکلی را دارد. برای اطلاعات بیشتر به مرجع (Elgamal و همکاران، 2002) رجوع شود.

اندرکنش بین لایه خاک ماسه‌ای و ستون‌های DSM در این پژوهش به‌صورت صریح و دقیق مدل‌سازی شده است. همان‌طورکه اشاره شد، مدل‌سازی خاک و DSM اشاره شده است که از مدل رفتاری غیرخطی PDMY02 برای هر دو مصالح خاک و DSM استفاده شده است.

این ساختار مدل‌سازی اجازه می‌دهد که اندرکنش تنش-کرنش بین خاک سست و DSM در حالت‌های خطی و غیرخطی به‌صورت هم‌زمان و وابسته به بارگذاری دینامیکی لحاظ گردد.

در جدول (2) پارامترهای مربوط به مدل رفتاری خاک و DSM ارائه شده است. شبکه المان محدود به‌کار رفته جهت مدل‌سازی خاک و DSM شامل یک شبکه سه‌بعدی با المان‌های هشت گرهی (BrickUP)، می‌باشد. که هر گره این المان دارای 4 درجه آزادی (سه درجه آزادی مربوط به تغییر مکان و یک درجه آزادی مربوط به فشار آب حفره‌ای) می‌باشد (Law و Lam، 2001؛ Elgamal و همکاران، 2008). مدل رفتاری سیال در این المان بر پایه تئوری بایوت (Biot، 1962) از محیط‌های متخلخل اشباع در شرایط گذرا توسعه یافته است. رفتار سیال به‌صورت الاستیک خطی تراکم‌پذیر در نظر گرفته شده است و مشخصات آن در جدول (2) ارائه شده‌اند.

جدول 2- پارامترهای مکانیکی و هیدرولیکی خاک‌های ماسه‌ای و DSM (Rayamajhi و همکاران، 2014)

نوع پارامتر	نام پارامتر	نماد	واحد	ماسه سست	ماسه متراکم	DSM
مشخصات الاستیک خاک	جرم مخصوص اشباع	ρ	kg/m^3	1920	1920	1600
	سرعت موج برشی مرجع	$V_{s\,\max}$	m/s	150	300	600
	مدول برشی مرجع	$G_{\max}$	MPa	43/2	172/8	576/1
	ضریب پواسون	υ	-	0/4	0/4	0/3
	مدول بالک	B_r	MPa	201/6	806/4	1248/2
مشخصات غیرخطی خاک	ماکزیمم کرنش برشی	$\gamma_{\max,r}$	%	10	10	10
	ضریب فشار جانبی	d	-	0/5	0/5	0/5
	زاویه اصطکاک خاک	φ_{TXC}	Deg	33	44	48
	زاویه فاز انتقال	φ_{PT}	Deg	26	30	30
	پارامترهای اتقباضی	c_1	-	0/067	0/005	0/005
		c_2	-	5	5	5
		c_3	-	0/2	0	0
	پارامترهای اتساعی	d_1	-	0/06	0/4	0/4
		d_2	-	3	3	3
		d_3	-	0/2	0	0
	پارامترهای روانگرایی	liq_1	-	10	0	0
		liq_2	-	0/01	0	0
	تعداد سطح تسلیم	NYS	-	20	20	20
	پارامترهای حالت بحرانی	c_{s1}	-	0/9	0/9	0/9
		c_{s2}	-	0/02	0/02	0/02
		c_{s3}	-	0/7	0/7	0/7
	ضریب تخلخل	e	-	0/76	0/52	0/45
	فشار مرجع	$\acute{p}_r$	kPa	100	100	100
مشخصات هیدرولیکی	جرم مخصوص سیال	ρ_w	kg/m^3	1000	1000	1000
	مدول بالک سیال	B_w	MPa	2200	2200	2200
	ضریب نفوذپذیری	-	m/s	1×10^{-5}	1×10^{-5}	1×10^{-5}

المان BrickUP امکان شبیه‌سازی دقیق اندرکنش بین خاک اشباع و سیال منافذ را فراهم می‌سازد، به‌ویژه در تحلیل پدیده‌هایی مانند روانگرایی، افزایش فشار آب حفره‌ای، زهکشی سطحی محدود و پاسخ دینامیکی خاک. همچنین به‌دلیل تقارن مدل ناشی از شرایط بارگذاری جانبی، تنها نیمی از خاک (برای کاهش زمان تحلیل) شبیه‌سازی شده است. مشابه این روند در مطالعات Elgamal و Lu و Asgari و همکاران انجام شده است (Elgamal و همکاران، 2009؛ Nguyen و همکاران، 2012؛ Asgari و همکاران، 2013) انجام شده است.

2-2- شرایط مرزی و روش تحلیل

خاک مدل شده در این پژوهش با شرایط مرزی زیر در نظر گرفته شده است:

1) کلیه نقاط واقع بر کف مدل $z = -13\,m$ در برابر هرگونه حرکت انتقالی مهار و گره‌های واقع بر مرزهای جانبی ($x = \pm S/2\,,\ y = +S/2$) از حرکت انتقالی در راستاهای x و y منع شده‌اند.

2) شرایط زهکشی به‌صورتی می‌باشد که فقط امکان زهکشی در سطح زمین وجود دارد. و بقیه مرزها کاملاً نفوذناپذیر در نظرگرفته شده‌اند.

3) کلیه نقاط واقع بر صفحه تقارن در برابر جابه‌جایی عمود بر آن صفحه (حرکت در راستای y، دوران حول محور x و دوران حول محور z) مهار شده‌اند ولی برای حرکت روی صفحه تقارن آزادند.

4) تغییرمکان افقی و قائم نقاط راست و چپ مرز مدل که دارای تراز ارتفاعی یکسان می‌باشند، با هم برابر هستند و شرایط مرزی تکرارشونده لحاظ شده است.

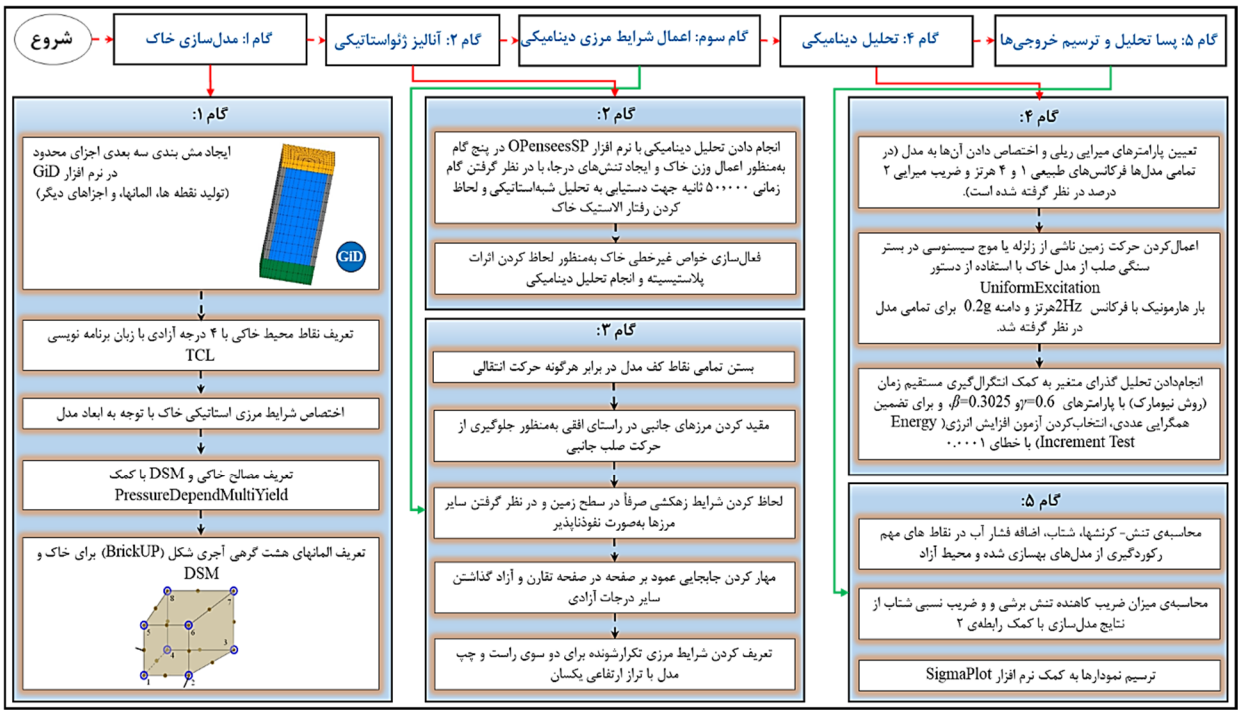
به‌طورکلی جهت تحلیل دینامیکی مدل سه مرحله در نظر گرفته شده است:

مرحله اول) در این مرحله المان‌های خاک تحت بار ژئواستاتیکی قرار داده می‌شود تا شرایط طبیعی زمین به‌وجود آید.

مرحله دوم) در این مرحله رفتار مصالح خاک از حالت خطی به غیرخطی تبدیل می‌شود تا امکان بررسی شرایط پلاستیک در روانگرایی به‌وجود آید.

مرحله سوم) در این مرحله کل مجموعه تحت بار دینامیکی قرار می‌گیرد.

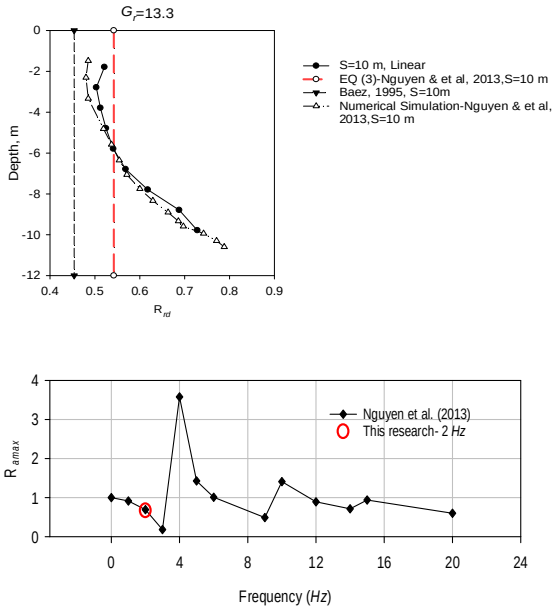
برای تمامی تحلیل دینامیکی و مطابق با مرجع، فرکانس‌های طبیعی 1 و 4 هرتز و ضریب میرایی دو درصد در نظر گرفته شده است (Nguyen و همکاران، 2012). لازم به‌ذکر است که با انجام آنالیزهای حساسیت ار رنج‌های مختلفی از میرایی رایلی توسط Nguyen و همکاران، تأثیری چندانی در پاسخ‌های مدل نداشت. شکل (3) روند نمای مدل‌سازی، انجام دادن روش‌های تحلیل، شرایط مرزی و پردازش کردن داده‌های و پساتحلیل را نمایش می‌دهد.



شکل 3- روندنمای مدل‌سازی، انجام دادن روش‌های تحلیل، پردازش کردن داده‌های و پساتحلیل

3- اعتبارسنجی

در این صحت‌سنجی تحلیل‌ها تحت بار هارمونیک با فرکانس 2Hz هرتز و دامنه 0.2g انجام گرفت. مقادیر فاکتور کاهندگی از آنالیز معکوس سه‌بعدی در دو حالت با وجود DSM و بدون آن محاسبه می‌شود و در ادامه به روابط ارائه شده توسط Nguyen و همکاران در سال (2013) مورد مقایسه قرار می‌گیرد. برای جزئیات مدل‌سازی و مشخصات هندسی و مکانیکی مدل به مرجع رجوع شود. شکل (3)، فاکتور کاهنده (R_{rd}) برحسب عمق را در حالت خطی الاستیک برای مدول برشی نسبی 13/3 نشان می‌دهد. همچنین تغییرات ضریب شتاب نسبی (R_{amax}) را برحسب فرکانس نمایش می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، نتایج این تحلیل برای مقادیر R_{rd} و R_{amax} تطابق بسیار خوبی با نتایج مقاله Nguyen و همکاران (2013) و بیز (Satizabal، 1995) دارد.



شکل 3- مقایسه فاکتور کاهنده (R_{rd}) و ضریب شتاب نسبی (R_{amax}) در حالت خطی الاستیک برای مدول برشی نسبی 13/3 با مقاله Nguyen و همکاران (2013) و بیز (Satizabal، 1995)

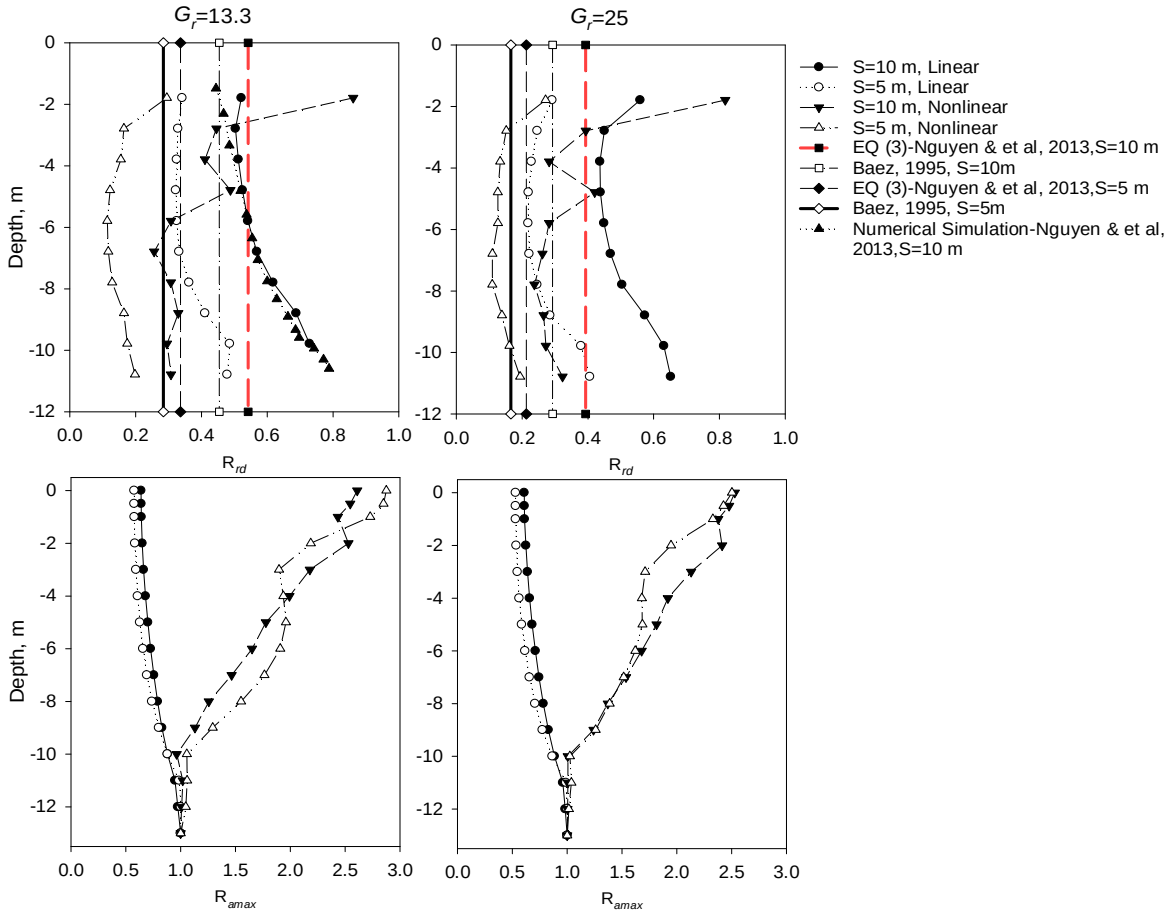
4- بحث و نتایج

در این پژوهش، به اثراتی نظیر فاصله DSM و ضریب مدول برشی نسبی بر میزان فاکتور کاهندگی در دو حالت خطی و غیرخطی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. تحلیل‌ها تحت بار هارمونیک با فرکانس 2Hz هرتز و دامنه 0.2g انجام گرفت. مقادیر فاکتور کاهندگی از آنالیز معکوس سه‌بعدی در دو حالت با وجود DSM و بدون آن محاسبه می‌شود و در ادامه به روابط ارائه شده توسط Nguyen و همکاران (2013) مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

4-1- اثر فاصله بین شبکه DSM

برای بررسی این اثر دو فاصله متفاوت *S=5, 10 m* در نظر گرفته شده است. شکل (4)، اثرات فاصله بر روی فاکتور کاهنده (R_{rd}) بر حسب عمق را در دوحالت خطی الاستیک و غیرخطی برای دو مدول برشی نسبی نشان می‌دهد. همچنین تغییرات ضریب شتاب نسبی (R_{amax}) را برحسب عمق نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش فاصله در شبکه DSM باعث افزایش مقدار R_{rd} می‌شود. در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک و DSM باعث کاهش مقادیر R_{rd} نسبت به‌حالت رفتار الاستیک و خطی است. درعوض مقادیر R_{amax} با لحاظ کردن اثر غیرخطی افزایش زیادی دارد. وقتی مصالح خاک با رفتار غیرخطی مدل می‌شود و اثرات روانگرایی لحاظ می‌گردد، آنگاه خاک قابل روانگرا تحت شتاب بارجانبی، نرم می‌شود و لایه نرم باعث کاهش انتقال شتاب از لایه‌های پایینی به‌سمت بالا خواهد شد. نتایج مشابهی در پژوهش‌های قبلی نیز مشاهده شده است (Elgamal و همکاران، 2009؛ Asgari و همکاران، 2025).

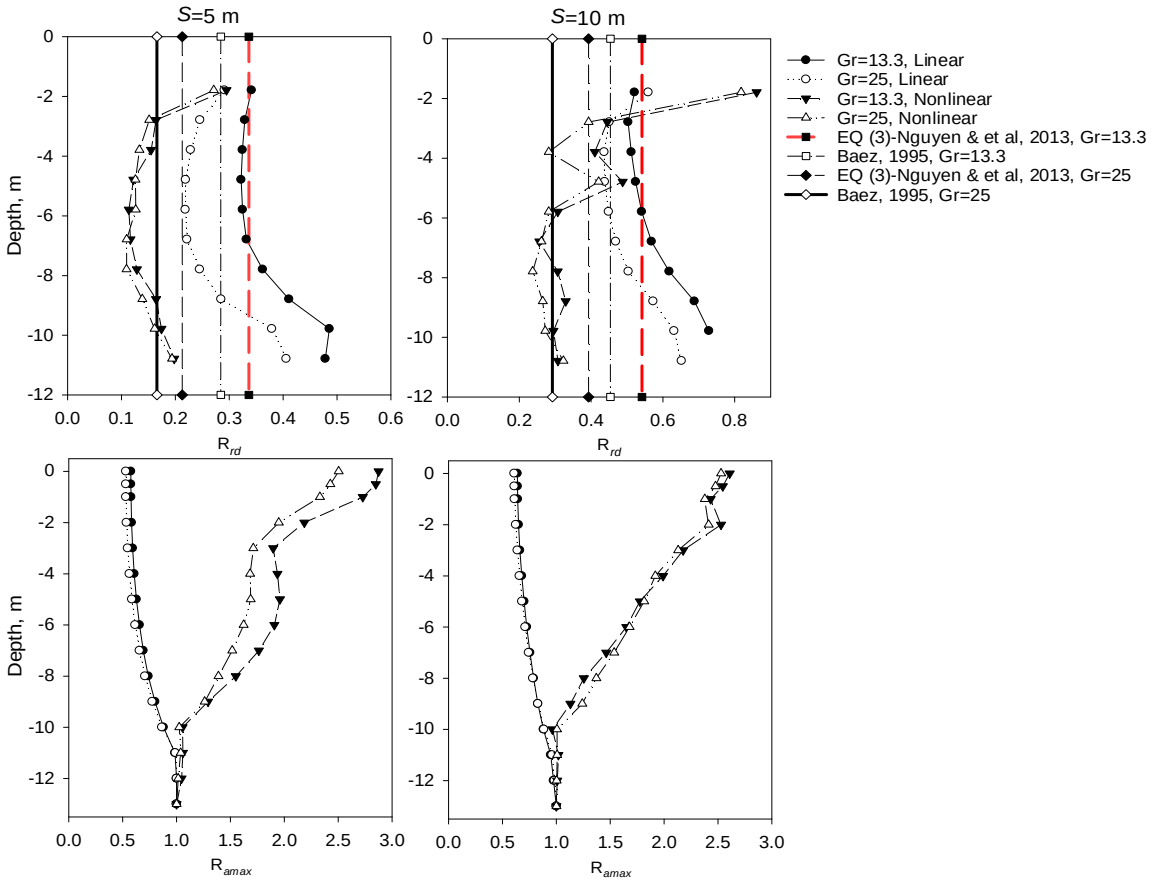
در حالت بهسازی شده با DSM با توجه به این‌که سیستم سخت‌تر می‌شود مانع نرم شدن خاک می‌شود و در پی آن، شرایط انتقال شتاب از سنگ بستر به‌سمت سطح زمین فراهم است. بنابراین مقادیر R_{amax} در سطح زمین در مدل‌های تحلیل شده به 2/5 هم رسیده است این شرایط در حالت الاستیک کاملاً برعکس است یعنی مقادیر کمتر از یک است که بدان معنی است مقادیر شتاب در حالت میدان آزاد بیشتر از سیستم بهسازی شده است.



شکل 4- اثرات فاصله بر روی فاکتور کاهنده (R_{rd}) و ضریب شتاب نسبی (R_{amax}) برحسب عمق در دوحالت خطی الاستیک و غیرخطی برای مدول برشی نسبی مختلف

4-2- اثر ضریب مدول برشی نسبی

برای بررسی این اثر دو ضریب مدول برشی نسبی G_r = 13.3, 50 منظور شده است. شکل (5) اثرات مدول برشی را بر روی فاکتور کاهنده (R_{rd}) و ضریب شتاب نسبی (R_{amax}) برحسب عمق در دوحالت خطی الاستیک و غیرخطی برای فواصل مختلفی از DSM، S، نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش سختی DSM مقدار R_{rd} کاهش می‌یابد. این کاهش در مدل‌های خطی شدیدتر و محسوس‌تر است. از طرفی مقادیر ضریب کاهنده در مدل‌های غیرخطی نسبت به مدل‌های الاستیک در عمق‌های میانی و پایینی همواره کمتر است. در مورد اثرات ضریب مدول برشی نسبی بر روی ضریب شتاب نسبی آنچه در قسمت قبل در مورد اثرات فاصله گفته شد در مورد این اثر نیز صدق می‌کند. به‌عبارت دیگر کاهش فاصله و افزایش ضریب مدول برشی نسبی هر دو باعث افزایش سختی کل سیستم خواهد شد بنابراین دور از انتظار نخواهد بود که نتایج مشابه باشد. نکته قابل ذکر اینست که با افزایش G_r اختلاف R_{amax} در S کوچک‌تر، بیشتر و پررنگ‌تر خواهد شد.



شکل 5- اثرات مدول برشی نسبی بر روی فاکتور کاهنده (R_{rd}) و ضریب شتاب نسبی (R_{amax}) بر حسب عمق در دوحالت خطی الاستیک و غیرخطی برای فواصل مختلف

5- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تحلیل‌های سه‌بعدی دینامیکی خطی و غیرخطی اجزای محدود با کمک نرم‌افزار متن باز OpenSeesSP برای دستیابی اثرات کاهندگی اختلاط عمیق در خاک قابل روانگرا انجام شده است. مهم‌ترین نتایج پژوهش حاضر به‌شرح زیر است:

- افزایش فاصله شبکه از 5 متر به 10 متر در مدل‌سازی غیرخطی، با مدول برشی نسبی ثابت باعث افزایش تقریباً 300 درصدی R_{rd} می‌شود. همچنین افزایش مدول برشی نسبی از 13/3 به 25 باعث کاهش ناچیزی در مقادیر R_{rd} شد. بنابراین تأثیرات فاصله شبکه DSM به نسبت ضریب مدول برشی نسبی بیشتر است. همچنین، مدل‌های غیرخطی در عمق‌های میانی و پایینی خاک، کاهش قابل‌توجهی در R_{rd} نسبت به حالت خطی نشان دادند. این نتایج نشان می‌دهد که لحاظ کردن رفتار غیرخطی خاک و اضافه فشار آب حفره‌ای در مدل‌سازی، دقت تحلیل را افزایش داده و موجب طراحی محافظه‌کارانه‌تر در پروژه‌های بهسازی خاک می‌گردد.

• در نظر گرفتن رفتار غیرخطی خاک و DSM باعث کاهش مقدار R_{rd} در اکثر حالت‌ها و افزایش R_{amax} نسبت به حالت رفتار الاستیک و خطی است. مقادیر R_{amax} در سطح زمین در مدل‌های غیرخطی به 2/5 هم رسیده است این شرایط در حالت الاستیک کاملاً برعکس است یعنی مقادیر کمتر از یک است که بدان معنی است مقادیر شتاب در حالت میدان آزاد بیشتر از سیستم بهسازی شده است.

• پژوهش‌های گذشته برای تخمین R_{rd} محافظه‌کارانه است ولی در مقادیر R_{amax} به‌دلیل عدم مدل‌سازی اضافه فشار آب حفره‌ای در مدل خطی الاستیک اختلاف زیادی دیده می‌شود که در نهایت مقادیر R_{CSR} دست پایین تخمین زده می‌شود. در نظر گرفتن اثرات اضافه فشار آب حفره‌ای حین ارتعاش لرزه‌ای باعث افزایش رفتار نرم‌شوندگی خاک به‌ویژه در شدت بالا لرزه‌ای خواهد شد و در نتیجه انتظار می‌رود که مقادیر R_{amax} افزایش یابد. مدل عددی غیرخطی در این پژوهش قادر است به‌درستی این پدیده را در نظر بگیرد.

6- قدردانی

در ایـن پژوهش از مرکز محاسبات سریع دانشگاه مازندران به‌منظور ارائه خدمات پردازش سریع جهت انجام تحلیل‌های سریع تشکر و قدردانی می‌شود.

7- مراجع

Asgari A, Ahmadtabar Sorkhi SF, “Wind turbine performance under multi-hazard loads: Wave, wind, and earthquake effects on liquefiable soil”, Results in Engineering, 2025, 26, 104647. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104647

Asgari A, Oliaei M, Bagheri M, “Numerical simulation of improvement of a liquefiable soil layer using stone column and pile-pinning techniques”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2013, 51, 77-96. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.04.006

Asgari A, Ranjbar F, Bagheri M, “Seismic resilience of pile groups to lateral spreading in liquefiable soils: 3D parallel finite element modeling”, Structures, 2025, 74, 108578. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108578.

Biot MA, “Mechanics of deformation and acoustic propagation in porous media”, Journal of Applied Physics, 1962, 33 (4), 1482-1498. https://doi.org/10.1063/1.1728759.

Chen W-F, Mizuno E, “Nonlinear analysis in soil mechanics”, Elsevier Amsterdam, 1990.

Dehghanbanadaki A, Rashid ASA, Ahmad K, Yunus NZM, Motamedi S, “Deep soil mixing stabilisation of peat: a review of small-scale and 1g physical modelling test results”, Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82 (5), 175, 1-15. https://doi.org/10.1007/s10064-023-03187-3

Elgamal A, Lu J, Forcellini D, “Mitigation of liquefaction-induced lateral deformation in a sloping stratum: Three-dimensional numerical simulation”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135 (11), 1672-1682. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000137

Elgamal A, Yan L, Yang Z, Conte JP, “Three-dimensional seismic response of Humboldt Bay bridge-foundation-ground system”, Journal of Structural Engineering, 2008, 134 (7), 1165-1176. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:7(1165)

Elgamal A, Yang Z, Parra E, “Computational modeling of cyclic mobility and post-liquefaction site response”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2002, 22 (4), 259-271. https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00022-2.

Elgamal A, Yang Z, Parra E, Ragheb A, “Modeling of cyclic mobility in saturated cohesionless soils”, International Journal of Plasticity, 2003, 19 (6), 883-905. https://doi.org/10.1016/S0749-6419(02)00010-4.

Hamada M, Wakamatsu K, “Ground displacement and strain caused by soil liquefaction during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake”, Post-Earthquake reconstruction strategies: NCEER-INCEDE center-to-Center project, 1997, 75-86.

Hasheminezhad A, Bahadori H, “On the deep soil mixing method in the mitigation of liquefaction-induced bearing capacity degradation of shallow foundations”, Geomechanics and Geoengineering, 2022, 17 (1), 334-346. https://doi.org/10.1080/17486025.2020.1755460

Ibsen LB, Asgari A, Bagheri M, Barari A, “Response of monopiles in sand subjected to one-way and transient cyclic lateral loading”, Advances in Soil Dynamics and Foundation Engineering, 2014, 312-322. https://doi.org/10.1061/9780784413425.032.

Kitazume M, Takahashi H, “Centrifuge model tests on effect of deep mixing wall spacing on liquefaction mitigation”, Proceedings of the 7th International Conference on Urban Earthquake Engineering & 5th International Conference on Earthquake Engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Japan, 2010.

Law HK, Lam IP, “Application of periodic boundary for large pile group”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127 (10), 889-892. https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2001)127:10(889)

Lu J, Elgamal A, Yang Z, “OpenSeesPL: 3D lateral pile-ground interaction user manual (Beta 1.0)”, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego, 2011.

McKenna F, Mazzoni S, Fenves G, “Open system for earthquake engineering simulation (OpenSees) software version 2.2. 0”, University of California, Berkeley, CA. Available from http://opensees. berkeley. edu, 2011.

Moradi P, Khalili HD, Arvin MR, “Deep Soil mixing columns as settlement-reducing elements in sandy Soils: A Numerical Study”, International Journal of Geomechanics, 2023, 23 (4), 04023015. https://doi.org/10.1061/IJGNAI.GMENG-7983

Nguyen T, Rayamajhi D, Boulanger R, Ashford S, Lu J, Elgamal A, Shao L, "Effect of DSM grids on shear stress distribution in liquefiable soil", GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering: 2012, 1948-1957.

Nguyen TV, Rayamajhi D, Boulanger RW, Ashford SA, Lu J, Elgamal A, Shao L, "Design of DSM grids for diquefaction remediation", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2013, 139 (11), 1923-1933. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000921.

Parra-Colmenares EJ, "Numerical modeling of liquefaction and lateral ground deformation including cyclic mobility and dilation response in soil systems", Rensselaer Polytechnic Institute, 1996.

Rayamajhi D, "Shear reinforcement effects of discrete columns in liquefiable soils", 2014.

Rayamajhi D, Nguyen T, Ashford S, Boulanger R, Lu J, Elgamal A, Shao L, "Effect of discrete columns on shear stress distribution in liquefiable soil", GeoCongress 2012: State of the Art and Practice in Geotechnical Engineering: 2012, 1908-1917.

Rayamajhi D, Nguyen TV, Ashford SA, Boulanger RW, Lu J, Elgamal A, Shao L, "Numerical study of shear stress distribution for discrete columns in liquefiable soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2014, 140 (3), 04013034. https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000970.

Satizabal JI Baez, "A design model for the reduction of soil liquefaction by vibro-stone columns", University of Southern California, 1995.

Seed HB, Idriss IM, "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", Journal of the Soil Mechanics and Foundations division, 1971, 97 (9), 1249-1273. https://doi.org/10.1061/JSFEAQ.0001662

Shaghaghi MM, Kani IM, Yousefi H, "The seismic behavior of block type deep soil mixing", Latin American Journal of Solids and Structures, 2021, 18 (6), 1-17. https://doi.org/10.1590/1679-78256439

Yin K, Xiao T, Luo H, Zou H, Zhang L, "Probabilistic modeling of offshore deep cement mixing improved ground", Computers and Geotechnics, 2023, 156, 105266. https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105266

Zhang D, Wang A, Ding X, "Seismic response of pile groups improved with deep cement mixing columns in liquefiable sand: shaking table tests", Canadian Geotechnical Journal, 2022, 59 (6), 994-1006. https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0505

Zhang X, Zhu H, Jiao Z, Cen Z, "Lattice-shaped ground improvement by mixing soil and alkali-activated slag for liquefaction mitigation", Case Studies in Construction Materials, 2022, 17, e01445. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01445