

# مطالعه عددی اندرکنش سازه - خاک - سازه مجاور در بستر مستعد روانگرایی

سید حسین خطیبی<sup>۱</sup>، محمد ملکی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده فنی و مهندسی، ژئوتکنیک، دانشگاه بوعلی سینا

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، ژئوتکنیک، دانشگاه بوعلی سینا

Email: Maleki@basu.ac.ir

تاریخ پذیرش ۱۴۰۱/۱۲/۱۰

تاریخ دریافت ۱۴۰۱/۰۵/۱۷

## چکیده

در مناطق شهری ساختمان‌های مسکونی بیشتر در فواصل کمی نسبت به هم قرار دارند. تأثیر متقابل این ساختمان‌ها، بستگی به فاصله بین آن‌ها تحت اثر ارتعاشات ناشی از زلزله از اهمیت زیادی برخوردار بوده که کمتر مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش اندرکنش سازه - خاک - سازه مجاور برای سازه‌های ساختمانی مستقر بر خاک مستعد روانگرایی بررسی شده است. برای این منظور ساختمان‌های مشابه پانزده طبقه بتنی در فواصل مختلف نسبت به هم، به همراه محیط پیوسته بستر خاکی با ویژگی‌های مکانیکی مختلف و به‌کارگیری مدل رفتاری خاک کشسانی خمیری پیشرفته تحت اثر تاریخچه شتاب زلزله اعمال شده در تراز سنگ بستر مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. برای اعتبار نتایج، میزان نشست سازه تحت بار استاتیکی بررسی و با استفاده از نتایج دو مدل آزمایشگاهی روند تحلیل اندرکنش سازه - خاک - سازه و مدل رفتاری خاک راستی آزمایی شده است. براساس نتایج به دست آمده، اندرکنش سازه - خاک - سازه در حالت کلی باعث افزایش جابه‌جایی جانبی سازه نسبت به حالت با بستر صلب شد. آثار اندرکنش بسته به تعداد و فاصله سازه‌ها متفاوت است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه بستگی به موقعیت و ضخامت لایه خاک مستعد روانگرایی خاک دارد به طوری که با افزایش ضخامت لایه روانگرا اضافه فشار آب حفره‌ای بیشتری تولید و در نهایت تغییرشکل‌های ایجاد شده در خاک و سازه شدت بیشتری داشته است.

**واژگان کلیدی:** تحلیل عددی، اندرکنش سازه - خاک - سازه مجاور، زلزله، خاک مستعد روانگرایی.

## ۱- مقدمه

نمایش می‌گذارند، با نام اندرکنش سازه - خاک - سازه<sup>۱</sup> معرفی شده است [1]. پژوهش‌های کمی درباره این موضوع انجام شده است، از این رو بررسی‌های بیشتر و اصولی‌تر آن، در شناسایی هرچه بهتر این پدیده کمک‌کننده خواهد کرد. بنابراین

در دو دهه اخیر، بررسی آثار سازه‌های مجاور بر هم از طریق خاک تحت تأثیر زلزله مورد بحث قرار گرفته است. این آثار که رفتاری متفاوت نسبت به اندرکنش خاک - سازه متعارف را به

به وسیله دو فنر جهت شبیه‌سازی اندرکنش پی - خاک<sup>۳</sup> و اندرکنش بین پی‌ها<sup>۴</sup>، امواج را انتقال می‌دهند. همان‌طور که در شکل مشخص است پی‌های سطحی تحت امواج افقی زلزله سه نوع پاسخ افقی، قائم و دورانی مطابق با درجه آزادی سازه دارند و امواج زلزله از طریق خاک زیر پی‌های مجاور هم به ساختمان‌های همسایه انتقال پیدا می‌کند [3].

شکل ۱. بیان گرافیکی اندرکنش سازه - خاک - سازه [4]

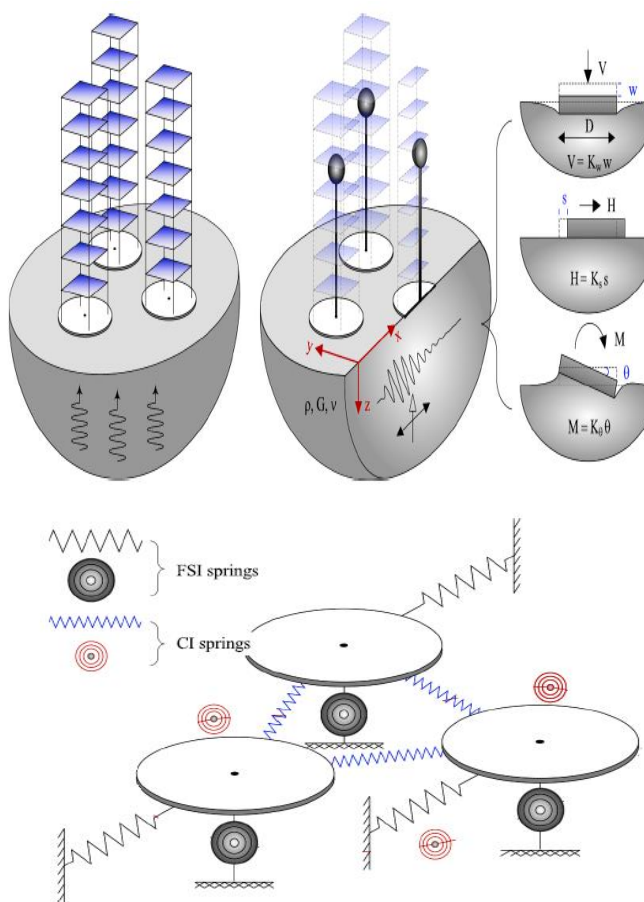


Fig. 1. Graphic expression of structure-soil-structure interaction [4]

از عوامل مؤثر بر اندرکنش سازه - خاک - سازه می‌توان به هندسه و فاصله ساختمان، هندسه لایه‌های زمین و ویژگی‌های مهندسی آن، سیستم سازه‌ای باربر ساختمان، لرزه‌خیزی منطقه و انتخاب زلزله طرح اشاره کرد. پژوهش‌های قبلی صورت

بررسی اندرکنش سازه - خاک - سازه<sup>۲</sup>، امری مهم در شناسایی رفتار سازه و تحلیل و طراحی آن به شمار می‌رود [2].

به طور معمول اندرکنش خاک - سازه زمانی مطرح است که فقط یک سازه مستقر بر خاک حضور داشته باشد، هرچند که اندرکنش سازه - خاک - سازه هنگام ایجاد حداقل دو سازه روی خاک، وارد عمل می‌شود. در حالتی که علاوه بر یک سازه و لایه خاک مورد بحث، سازه‌ی مجاور دیگری به سیستم اضافه شود، پاسخ لایه خاک متأثر از وجود هر دو سازه و پاسخ هر کدام از سازه‌ها نیز متأثر از پاسخ لایه خاک و سازه مجاور خود خواهد بود. پس خاک و هر یک از دو سازه مجاور تأثیر متقابلی بر پاسخ هم خواهند داشت که این پدیده به نام اندرکنش سازه - خاک - سازه معروف است.

با وقوع زلزله، امواج آن از لایه‌های خاک عبور می‌کنند و خود را به پی هر دو سازه می‌رسانند. این امواج باعث شکل‌گیری تغییرشکل‌هایی در پی و المان‌های سازه می‌شوند. از این رو در پی سازه یک نیروی برشی و یک لنگر واژگونی ایجاد می‌شود که نتیجه آن تغییرشکل مجدد پی و سازه است. پس از آن است که ارتعاشات سازه، به خاک منتقل می‌شود، تا این قسمت، پاسخ‌ها و رفتارهای به وجود آمده در این سامانه‌ها (سازه، خاک و پی) مشابه اندرکنش خاک - سازه متعارف است؛ اما تفاوت کمی در انتقال این امواج از سازه به خاک وجود دارد که باعث به وجود آمدن اندرکنش سازه - خاک - سازه می‌شود [2].

در واقع، تفاوت رفتار از آنجا شکل می‌گیرد که پس از اینکه ارتعاشات از سازه به پی و خاک منتقل می‌شود، بخشی از ارتعاشات در اثر عبور از لایه‌های خاک مستهلک می‌شود ولی بخش دیگری از آن‌ها پس از عبور از مسیر کوتاهی از خاک به سازه مجاورش انتقال می‌یابد [2]. این امواج منتقل شده به سازه مجاور، دوباره همان مراحلی که در ابتدا بیان شد را دنبال می‌کند و دوباره به خاک و سازه مجاور منتقل می‌شود. برای درک بهتر موضوع، شکل (۱) این مسئله را بهتر نشان می‌دهد. در این شکل امواج برشی به سازه‌ها اعمال شده و ساختمان‌ها

3 FSI  
4 CI

2 SSSI

ساختمان‌های بلندتر تحت تأثیر فرکانس کوچک‌تری نسبت به سازه‌های کوتاه‌تر هستند.

در طول زلزله‌های قوی سازه‌های مجاور با فاصله کم به هم برخورد داشته و علاوه بر چنین برخوردی اندرکنش سازه - خاک - سازه می‌تواند انرژی ارتعاشی بین ساختمان‌ها را انتقال داده و رفتار پیچیده‌تری را ایجاد کند. معدنی و همکاران [1]، تأثیر هردو پدیده ذکر شده روی پاسخ غیرالاستیک سازه‌های فولادی را بررسی کردند. تعداد طبقات در این بررسی بین ۳ و ۱۲ تغییر کرد و تغییرات فاصله طبق آیین‌نامه‌های لرزه‌ای نیز در نظر گرفته شد. المان‌های برخورد توسط کد اجزا محدود آپنسیس<sup>۶</sup> مدل‌سازی و یک مدل کوپل از فنر و میراگر هم برای اندرکنش خاک - سازه و برای دو خاک نرم استفاده کردند. تغییرشکل نسبی و نیروهای برخورد طبقات، برش طبقات و مفاصل پلاستیک چرخشی نیز برای شرایط مختلف و ماکزیمم پاسخ بین هفت زلزله مقایسه شده است و در نهایت تأثیر آنی برخورد و اندرکنش سازه - خاک - سازه را نیز بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد که انعطاف‌پذیری خاک تأثیر زیادی بر نیروهای ناشی از کوبش به ویژه در فاصله‌های نزدیک دارد.

در بیشتر پژوهش‌های اخیر به بحث اندرکنش خاک - سازه پرداخته شده است و موضوع اندرکنش سازه - خاک - سازه مستقر بر بستر مستعد روانگرایی کمتر مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است. هان و همکاران [11]، تأثیر اندرکنش دینامیکی سازه - خاک - سازه در فواصل مختلف و براساس مطالعه موردی ساختمان کتابخانه میلیکان در میلان را بررسی کردند. نتایج عددی را با استفاده از مدل‌های دوبعدی خارج صفحه و درون‌صفحه با استفاده از روش المان‌مرزی غیرمستقیم<sup>۷</sup> برای هر جهت امواج لرزه‌ای به دست آوردند. آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه ممکن است مخرب یا مفید بوده و پاسخ سازه در مقایسه با سازه‌های منفرد به ترتیب تا ۳۰٪ الی ۴۰٪ در مورد ساختمان کتابخانه میلان ممکن است

گرفته در خصوص بررسی آثار فوق بر اندرکنش سازه - خاک - سازه بر پاسخ دینامیکی ساختمان‌ها در تکمیل و توسعه مطالعات مؤثر است. در دهه ۷۰ میلادی که اندرکنش سازه - خاک - سازه معرفی شده بود [5]، بررسی آثار این پدیده و پاسخ‌های تغییرشکل سازه، بخش مهمی از پژوهش‌های را در بر گرفت [6-7]. ترومبتا و همکاران [8]، سازه کوتاه با قاب ارتجاعی و یک سازه ساخته شده با دیوار برشی و ارتفاع متوسط را برای مطالعه اندرکنش سازه - خاک - سازه، با دستگاه سانتریفیوژ آزمایش کردند. آن‌ها واکنش دو ساختار مجاور به یکدیگر در امتداد برای لرزش زلزله و عمود بر جهت زمین‌لرزه بررسی کردند. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد ظرفیت‌های برشی پایه به طور قابل توجهی متغیر است.

وایرسگارد [9]، اهمیت اندرکنش سازه - خاک - سازه را برای سازه‌های با دو یا تعداد بیشتر فونداسیون بررسی کرد. در مرحله اول تحلیل این فونداسیون‌ها در حوزه فرکانس در محدوده‌ای بین ۰-۵۰ هرتز و با استفاده از تابع گرین و زبان برنامه‌نویسی فرتن برای انتشار امواج در لایه‌های خاک بررسی شد. سختی دینامیکی به صورت تحلیل وابسته به زمان و مستقل از فرکانس و با استفاده از مدل‌های پارامتر متمرکز<sup>۸</sup> بررسی شد. در این مطالعه مدل‌های دینامیکی مختلف اندرکنش سازه - خاک - سازه نیز مطالعه شد و در نهایت به این نتیجه رسید که استفاده از مدل‌های پارامتر متمرکز نتیجه دقیق‌تری برای این مسائل ارائه می‌دهد.

ویسنسیو و همکاران [10]، تأثیر اندرکنش سازه - خاک - سازه بین دو ساختمان را تحت امواج لرزه‌ای و تحت تأثیر پارامترهای مختلف از جمله فاصله ساختمان و نوع خاک بررسی کردند و یک مدل ساده که توانایی بررسی اندرکنش در مدهای بالاتر سازه و سازه‌ها را با ارتفاع زیاد را دارد ارائه دادند. داده‌هایی از حرکت قوی زمین با میدان دور و نزدیک زلزله مطالعه و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که

تشدید شود. پاسخ سازه هم نسبت به پارامترهای ساختمان مجاور حساس است و هم برای مدل‌های دوبعدی خارج صفحه و درون صفحه، ساختمان مشابه یا سنگین تر مجاور تأثیر قابل توجهی دارند. علاوه بر این تغییرات فاصله دو سازه می‌تواند پاسخ لرزه‌ای سازه را برای طراحی پیش‌بینی کند. ویسنسیو و نیکولاس [4]، تأثیر اندرکنش سازه - خاک - سازه بین چندین ساختمان و به صورت آرایش سه‌بعدی و تحت امواج زلزله را بررسی کردند. یک مدل ساده‌شده عددی مرتبه کاهش یافته برای کوتاه کردن زمان اجرای محاسباتی در مورد سازه‌های بسیار بزرگ پیشنهاد کردند. این فرمول برای در نظر گرفتن حضور هر تعداد از ساختمان‌ها با ارتفاع، عرض و فواصل متفاوت بین ساختمان‌ها توسعه داده شده است. سختی چرخشی فنرها در فونداسیون از رابطه تقریبی نیم فضای الاستیک بوسینسک و با استفاده از سیستم معکوس حداقل مربعات یا کاربرد معادلات کرونگر<sup>۸</sup> به دست می‌آید و انعطاف‌پذیری این روش با سایر روش‌های قبلی مقایسه شد، که نتایج نشان داد که اندرکنش سازه - خاک - سازه چند ساختمان سه‌بعدی به طور قابل توجهی پیچیده‌تر از مدل‌های دو بعدی است.

کایچی و آکینار [12]، به مطالعه ارزیابی آثار ضربه بر سازه‌های ساختمانی معمولی با در نظر گرفتن اندرکنش خاک - سازه پرداختند. برای این منظور، چهار ترکیب ساختمان مجاور مختلف با استفاده از مدل‌های ساختمانی ۴، ۸، ۱۲ و ۱۶ طبقه ایجاد شد. تحلیل‌های تاریخچه زمانی غیرخطی برای ۱۵ رکورد حرکت زمین مختلف انجام شد و آثار ساختمان مجاور در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ جابه‌جایی تمایل به کاهش در جهت برخورد و افزایش در جهت آزاد دارد. چرخش‌های پلاستیک بین اعضای ستون و تیر در طول ارتفاع ساختمان و برای همه مدل‌ها مشاهده شده است. نتایج به دست آمده برای رکورد حرکت زمین، پراکنندگی بزرگی را به دلیل ماهیت تحلیل دینامیکی نشان می‌دهد.

آکمیس [13]، به بررسی پاسخ لرزه‌ای نهشته‌های غیر همگن خاک با استفاده از آزمایش‌های مدل مقیاس بزرگ و شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از یک مدل رفتاری پیشرفته خاک‌های روانگرا (یو - بی - سی - سند)<sup>۹</sup> پرداخت. یک برنامه تجربی جامع طراحی شد که در آن در مجموع سه آزمایش میز لرزان روی ماسه یکنواخت و ماسه لایه‌ای با ضخامت‌های مختلف سیلت برای بررسی نشست زمین و توزیع و اتلاف اضافه فشار آب منفذی در طول و بعد از لرزش انجام شد. نتایج آزمون میز لرزان و شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده در ابتدا نشان می‌دهد که ضخامت رگه‌های سیلتی تأثیر قابل توجهی بر مقاومت روانگرایی دارد. نتیجه دوم این مطالعه نشان می‌دهد که ضخامت و ضریب تحکیم سیلت و ماسه روانگرا در زیر لایه سیلت به‌طور قابل توجهی باعث تغییر شکل متفاوتی در سطح زمین می‌شود. در پژوهش حاضر نیز با استفاده از کد سه‌بعدی پلکسیس به بررسی اندرکنش سازه - خاک - سازه بر روی خاک روانگرا پرداخته و نتایج آن با هم مقایسه و بررسی شده است.

## ۲- مشخصات مصالح

پاسخ سازه وابسته به مدل رفتاری تعریف شده در مدل اجزای محدود است، پس تعریف دقیق مشخصات مکانیکی مصالح از جمله تعریف رفتار غیرخطی مصالح و غیرخطی هندسی (متفاوت بودن پرپود نوسانی طبیعی خاک و سازه) می‌تواند به درستی نتایج اعتبار ببخشد. از این رو مدل رفتاری غیرخطی خاک‌های روانگرا برای خاک در نظر گرفته شده است [14-15]. اولین گام برای تحلیل اندرکنش سازه‌های مجاور هم انتخاب ابعاد مناسب برای سازه‌ها از نظر ارتفاع و بعد شالوده است. سازه‌های انتخاب شده طبق مدل حکم‌آبادی مدل‌سازی شده و به صورت سیستم دال مسطح با ستون‌هایی به ابعاد ۴۰×۴۰ سانتی‌متر و مدول الاستیسیته ۱۵۰۰۰ مگاپاسکال و به صورت الاستوپلاستیک، شالوده به صورت الاستیک به ضخامت ۱ متر و مدول الاستیسیته ۲۵۰۰۰ مگاپاسکال، سقف‌های سازه نیز به صورت پلیت به ضخامت ۰/۳ متر و مدول الاستیسیته ۳۰۰۰۰

کرنش سخت‌شوندگی در این مدل استفاده می‌شود. قانون سخت‌شوندگی تحت تأثیر میزان کرنش پلاستیک و به صورت مقاومت برشی بسیج شده تعریف می‌شود. زاویه اصطکاک بسیج شده هم از طریق معیار تسلیم مور-کولمب و به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\sin \varphi_{mob} = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3 - 2c \cot \varphi_p} \quad (3)$$

قانون سخت‌شوندگی هم طبق شکل (۲) ارائه شده است که با توجه به نسبت زاویه اصطکاک بسیج شده به کرنش برشی پلاستیک و به صورت معادلات زیر به دست می‌آید:

$$d\gamma_p = \left(\frac{1}{G^*}\right) dsin\varphi_{mob} \quad (4)$$

$$G^* = K_G^{*P} \left(\frac{p'}{p_{ref}}\right)^{np} \left(1 - \left(\frac{sin\varphi_{mob}}{sin\varphi_p}\right) R_f\right)^2 \quad (5)$$

$$dsin\varphi_{mob} = 1.5k_G^{*P} \left(\frac{p'}{p_{ref}}\right)^{np} \frac{p_{ref}}{p'} (1 - \left(\frac{sin\varphi_{mob}}{sin\varphi_p}\right) R_f)^2 d\lambda \quad (6)$$

$K_G^{*P}$  مدول برشی پلاستیک،  $\varphi_{mob}$  زاویه اصطکاک بسیج شده،  $\varphi_p$  زاویه اصطکاک ماکزیمم و  $R_f$  هم نسبت گسیختگی است.

شکل ۲. نمودار سخت‌شوندگی برای بارگذاری اولیه [14-15-16]

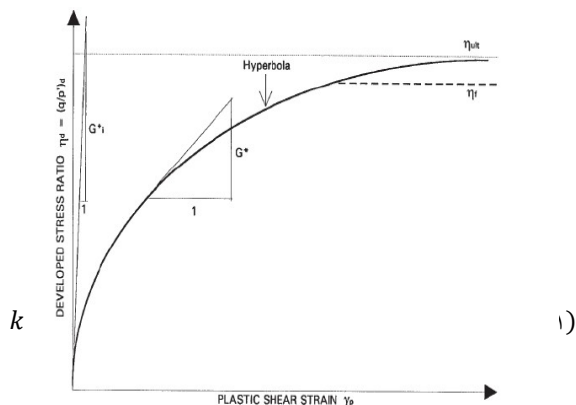


Fig. 2. Hardening diagram for primary loading [14-15-16]

## ۲-۲- تابع تسلیم

در این مدل برای نمایش رفتار پلاستیک از تابع تسلیم مور-کولمب و مطابق شکل (۳) استفاده می‌شود:

$$f_s = R_{mc} \sqrt{3j_2} + \frac{1}{3} I_1 \tan \varphi_m - c = 0 \quad (7)$$

که  $\varphi_m$  زاویه اصطکاک خاک است و  $R_{mc}$  هم صفحه‌ای است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_{mc} = \frac{1}{\sqrt{3} \cos \varphi_m} \sin \left( \theta + \frac{\pi}{3} \right) + 1/3 \cos \left( \theta + \frac{\pi}{3} \right) \tan \varphi_m \quad (8)$$

$$\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{j_3}{j_2^{3/2}} \quad (9)$$

مگا پاسکال و به صورت الاستیک مدل شده‌اند. ابعاد در پلان ۲۰×۲۰ متر و ارتفاع سازه‌ها ۴۵ متر در نظر گرفته شده است. از لحاظ رده‌بندی این ساختمان‌ها در رده ساختمان‌های متوسط تا بلند قرار دارند.

مدل رفتاری خاک یک مدل الاستوپلاستیک است که توانایی شبیه‌سازی رفتار روانگرایی خاک ماسه‌ای و ماسه سیلتی تحت امواج لرزه‌ای را دارد. مدل یو-بی-سی-سند براساس مدل اولیه پائول و همکاران در سال ۱۹۹۷ معرفی شده است. مدل یو-بی-سی-سند شامل سطح تسلیم مور-کولمب دوبعدی است که متفاوت با تابع پتانسیل است. قانون جریان در مدل براساس فرضیه تنش-اتساعی است که رو' در سال ۱۹۶۲ معرفی کرده که به صورت خطی و ساده‌شده مطابق با نظریه انرژی است. در مدل یو-بی-سی-سند شرایط تسلیم در فضای تنش اصلی سه‌بعدی برای بارگذاری اولیه و سطح تسلیم با قانون سخت‌شوندگی ساده شده برای بارگذاری ثانویه انجام می‌گیرد. علاوه بر این تابع پتانسیل پلاستیک براساس معیار دراکر-پراگر است که از سطح تسلیم اولیه استفاده می‌کند [14-15-16].

## ۱-۲- قانون سخت‌شوندگی و رفتار الاستوپلاستیک

مدل یو-بی-سی-سند شامل یک قانون همسان، غیرخطی برای رفتار الاستیک است که شامل مدول حجمی  $k$  و مدول برشی  $G$  است که به صورت معادلات زیر تعریف می‌شوند:

$$G = k_G^{*e} p_{ref} \left( \left( \frac{p'}{p_{ref}} \right)^{ne} \right) \quad (2)$$

که  $k_B^{*e}$  و  $k_G^{*e}$  پارامتر ورودی یو-بی-سی-سند است و به ترتیب نشان‌دهنده مدول برشی و حجمی و  $p_{ref}$  هم، فشار مرجع است. ضرایب  $me$  و  $ne$  هم پارامترهایی که برای تعریف میزان وابستگی سختی حجمی و برشی مرتبط با سطح تنش است. اولین سطح تسلیم از تابع موهر-کولمب و موقعیت و اندازه آن نیز براساس قانون سخت‌شوندگی تعریف می‌شود. به ویژه سخت‌شوندگی پلاستیک براساس قانون

معکوس بارگذاری به باربرداری است و رابطه معکوسی با تعداد سیکل‌ها دارد و با افزایش فشار آب حفره‌ای در طول سیکل بارگذاری زهکشی نشده همراه است. ضریب مدول برشی پلاستیک هم در طول بارگذاری ثانویه به صورت معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$k_{Gsecondary}^{*p} = k_G^{*p} \left( 4 + \frac{n_{rev}}{2} \right) hard f_{dens} \quad (12)$$

که  $k_G^{*p}$  مدول برشی اولیه پلاستیک،  $k_{Gsecondary}^{*p}$  مدول برشی ثانویه،  $n_{rev}$  عدد تنش برشی و  $f_{dens}$  و  $hard$  هم ضریبی است که از پارامترهای ورودی قانون تراکم به دست می‌آید [14-15-16].

برای انجام هر نوع تحلیل تاریخچه زمانی، نیاز به یافتن رکوردهای مناسب زلزله است؛ از این رو برای دست‌یافتن به چنین رکوردهای مناسبی، از پایگاه داده‌های لرزه‌ای پییر<sup>۱۱</sup> استفاده شده است [17].

استفاده از زمین‌لرزه مناسب در تحلیل اندرکنش خاک - سازه بسیار حائز اهمیت است. شتاب‌نگاشت انتخاب شده باید مشخصات موردنظر برای حرکت لرزه‌ای سنگ کف را دارا باشد.

در سامانه خاک و سازه، برای اعمال رکورد زلزله شرایط خاصی وجود دارد. کلیه شتاب‌نگاشت‌های زلزله به صورت پاسخ میدان آزاد هستند. به عبارت دیگر، برای استفاده از این رکوردها در سامانه خاک و سازه باید مقدار این رکوردها در عمق خاک موجود باشد، از این رو باید اصلاحاتی روی رکورد زلزله انجام شود. برای اصلاح مقادیر رکورد برای اعمال به سامانه اندرکنشی خاک و سازه، می‌توان رکوردهای زلزله موجود را به‌عنوان تحریک مدل خاک بدون سازه در سطح خاک در نظر گرفت. پس از تحلیل مدل خاک، پاسخ به دست آمده به‌عنوان رکوردهای جدید استفاده می‌شود. با این عمل، مقادیر رکورد جدید کاهش می‌یابد. در این پژوهش از تاریخچه زمانی و رکورد زلزله کوبه استفاده شده است [17]. سیستم خاک و سازه قبل از بارگذاری و تحلیل دینامیکی ابتدا تحت وزن خود تحلیل استاتیکی می‌شود تا تنش‌های اولیه در خاک به وجود آید.

شکل ۳. نمودار سطح تسلیم [14-15-16]

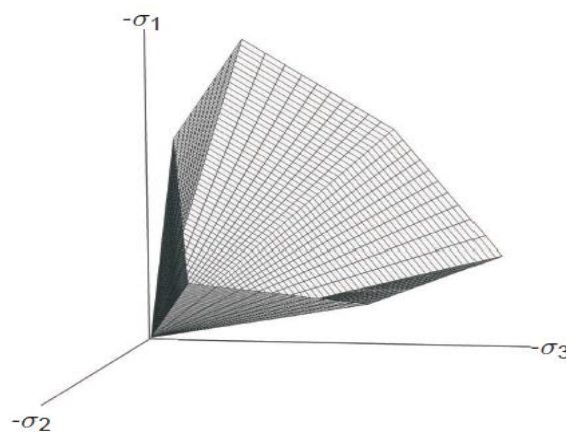


Fig. 3. Yield surface diagram [14-15-16]

### ۲-۳- قانون جریان

تابع پتانسیل پلاستیک مبتنی بر کرنش پلاستیک است و براساس تابع پتانسیل دراگر - پراگر به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$g = q - M(p' + c \cot \varphi_p) \quad (10)$$

$$M = \frac{6 \sin \psi_m}{3 - \sin \psi_m} \quad (11)$$

در مدل یو - بی - سی - سند قانون جریان براساس مدل اولیه در مطالعات پائول، برن و فیلیپ در سال ۱۹۹۷ به دست آمده است.

### ۲-۴- چگونگی بارگذاری در طول روانگرایی

مدل یو - بی - سی - سند دو سطح تسلیم در نظر می‌گیرد که به صورت انتقال از حالت روانگرایی خاک قادر است بین بارگذاری اولیه و ثانویه تمایز ایجاد کند. مدل یو - بی - سی - سند شامل ایجاد سطح تسلیم ثانویه با در نظر گرفتن قانون سخت‌شوندگی سینماتیکی است که دقت ارزیابی اضافه فشار آب حفره‌ای را افزایش می‌دهد. این سطح، تغییرشکل پلاستیک کمتری در مقایسه با سطح تسلیم اولیه ایجاد می‌کند. ضریب مدول برشی نیز در طول بارگذاری شبیه به پارامتر ورودی به وسیله کاربر و طبق قانون سخت‌شوندگی تحت تأثیر سطح تسلیم اولیه استفاده می‌شود. ضریب مدول برشی پلاستیک در طول بارگذاری ثانویه تابعی از تعداد سیکل‌هایی در طول فرآیند بارگذاری است. یک قانون ساده براساس نسبت تنش



مدل یو - بی - سی - سند برای خاک روانگرا و جدول (۲) طبق کار آزمایشگاهی راوی شارما در سال ۲۰۱۱ برای خاک ماسه‌ای سیمانی شده و مدل خاک سخت‌شونده<sup>۱۳</sup> معرفی شده است [19-20-21].

جدول ۲. پارامترهای مدل رفتاری برای خاک ماسه سیمانی شده [19-20-21]

Value	Unit	Parameter	Parameter	Row
78000	kPa	Modulus of elasticity obtained from triaxial test	$E_{50}^{ref}$	1
75000	kPa	Modulus of elasticity obtained from consolidation test	$E_{oed}^{ref}$	2
0.5	-	-	-	-
0.5	-	-	-	-
23400.5	kPa	Coefficient of loading/unloading	$E_{ur}^{ref}$	3
0	10.7	-	-	-
800	g	-	-	-
39	1100 kPa	Cohesion	c	4
48.5	Degree	Friction angle	$\phi$	5
500	e	-	-	-
0.3	-	Poisson's ratio	$\nu$	6
18	32 KN/m <sup>3</sup>	Specific gravity of saturation	$\gamma_{sat}$	7
100	kPa	-	-	-
0.3	-	-	-	-
0.85	-	-	-	-

Table 2. Parameters of cemented sand soil behavior model [19-20-21]

### ۳- هندسه و شرایط مرزی

در تحلیل المان محدود کاهش تعداد المان‌ها سبب افزایش سرعت محاسبات می‌شود. در بیشتر مسائل اندرکنش خاک - سازه مرزهای صلب یا تقریباً صلب مانند بستر سنگی در فاصله قابل ملاحظه‌ای از ناحیه موردنظر قرار دارند، در نتیجه امواج منتشر شده از فصل مشترک خاک و سازه به اندازه کافی میرا می‌شود. در روش المان محدود، چگونگی مدل‌سازی مرزها از اهمیت خاصی برخوردار است. انواع مرزها در تحلیل المان محدود را می‌توان به سه گروه مرزهای ابتدایی، مرزهای محلی و مرزهای سازگار تقسیم‌بندی شده که در شکل (۴) مشخص است. در مدل‌سازی پژوهش موجود هم فاصله و ابعاد سازه طبق جدول (۳) طبقه‌بندی شده است:

بعد از تحلیل استاتیکی و بارگذاری، بار لرزه‌ای در راستای محور افقی به مدل اعمال خواهد شد. کدی که برای تحلیل در این پژوهش در نظر گرفته شده است نرم‌افزار سه‌بعدی پلکسیس است. این نرم‌افزار قدرتمند برای مدل‌سازی سه‌بعدی پروژه‌های پیچیده ژئومهندسی و تحلیل دگرذیسی و پایداری در مهندسی مکانیک سنگ است. نرم‌افزار پلکسیس سه‌بعدی مجموعه‌ای از ابزارها و توابع قدرتمند برای شبیه‌سازی مدل‌های رفتاری مختلف و تجزیه و تحلیل سه‌بعدی آن‌ها ارائه می‌کند.

جدول ۱. پارامترهای مدل رفتاری برای خاک ماسه‌ای نوادا [18]

Value	Unit	Parameter	Parameter	Row
0.5	-	Elastic bulk modulus index	$m_e$	1
0.5	-	Elastic shear modulus index	$n_e$	2
23400.5	kPa	Plastic shear modulus index	$n_p$	3
0	10.7	Standard penetration number	$N_1^{60}$	4
800	g	Coefficient of elastic shear modulus	$K_G^e$	5
39	1100 kPa	Coefficient of elastic volumetric modulus	$K_B^e$	6
48.5	Degree	Plastic shear modulus factor	$K_G^p$	7
500	e	Cohesion	c	8
0.3	-	Rupture friction angle	$\phi_f$	9
18	32 KN/m <sup>3</sup>	Atmospheric pressure	$p_a$	10
100	kPa	Effect of confined stress on CRR	$hfac_1$	11
0.3	-	Shear modulus coefficient to correct the amount of pore water pressure generation	$hfac_2$	12
0.85	-	Expansion response control factor after liquefaction	$hfac_3$	13
1	-	Control coefficient of plastic shear strain after liquefaction	$hfac_4$	14

Table 1. Parameters of Nevada sandy soil behavior model [18]

خاکی که برای مدل‌سازی در این پژوهش استفاده شده است ماسه نوادا<sup>۱۲</sup> است که دانه‌بندی ریز، یکنواختی داشته و طبق منحنی دانه‌بندی در بازه بین ۰/۰۷۵۰ تا ۰/۵۵۰ میلی‌متر قرار دارد و جز ماسه با دانه‌بندی ضعیف طبقه‌بندی می‌شود که ویژگی‌های کلی آن در جدول (۱) آمده است [18]. برای معرفی پارامترهای خاک از جدول (۱) و کار آزمایشگاهی گیردهاران در سال ۲۰۲۰ استفاده شده است که پارامترهای

#### ۴- درستی آزمایشی

در پژوهش حاضر از نتایج مدل‌های آزمایشگاهی حکم‌آبادی [23]، برای بررسی آثار اندرکنش لرزه‌ای خاک - شمع - سازه و مقایسه با نتایج کد پلکسیس بر پاسخ دینامیکی سازه‌ها، با ارتفاع ۴۵ متر روی میز لرزان استفاده شده است. در پژوهش حکم‌آبادی یک محفظه پیشرفته برای محیط خاک طراحی شده که با مدل‌سازی سه‌بعدی عددی برای کاهش آثار مرز و شبیه‌سازی حالت میدان آزاد در هنگام آزمایش‌های میز لرزان و مطابق شکل (۵) استفاده می‌شود.

شکل ۵. مدل حکم‌آبادی و همکاران [23]

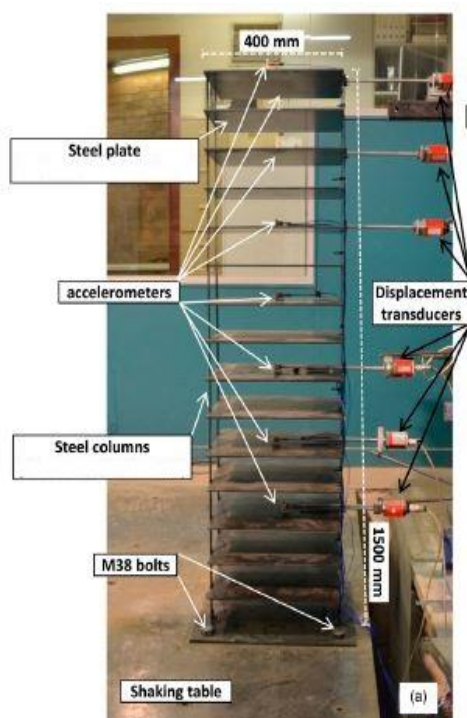


Fig. 5. Hokmabadi et al.'s model [23]

مشخصات خاک و شمع در مدل‌سازی عددی طبق جدول (۴) و (۵) بررسی شده است. نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهند که اندرکنش خاک - شمع - سازه ماکزیمم جابه‌جایی جانبی و دریافت طبقات سازه‌ها را افزایش می‌دهند. مؤلفه گهواره‌ای حرکت نقش مهمی بر افزایش جابه‌جایی‌ها دارد که سطح عملکرد سازه‌ها به سطح گسیختگی نزدیک کرده و در نتیجه در طراحی‌های لرزه‌ای سازه‌های قرارگرفته روی خاک‌های نرم این مؤلفه بایستی در نظر گرفته شود [23].

شکل ۴. شماتیک مدل‌سازی دو سازه

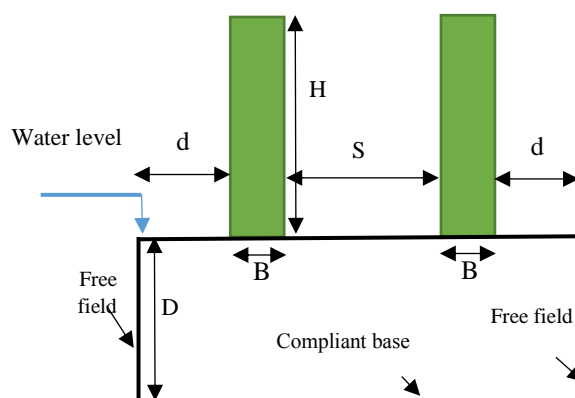


Fig. 4. Schematic modeling of two structures

جدول ۳. مشخصات هندسی مدل‌سازی

$S/B$	$S/B$	$S/B$	$S/B$	$S/B$	The ratio of the distance to the width of the structure
40	20	10	5	0	value

Table 3. Geometric specifications of modeling

در بحث شرایط مرزی از دو نوع المان Free-field و Compliant base در نسخه جدید کد اجزا محدود استفاده می‌شود که طبق فرمول‌های زیر تنش قائم و برشی را جذب می‌کنند:

$$\sigma_n = C_1 \rho V_p (u_x^m - u_x^{ff}) \quad (13)$$

$$\tau = C_2 \rho V_s (u_y^m - u_y^{ff}) \quad (14)$$

که  $\rho$  دانسیته مصالح،  $V_p$  سرعت موج فشاری،  $V_s$  سرعت موج برشی  $u_x^m$  سرعت ذرات در مصالح خاک و  $u_x^{ff}$  سرعت ذرات در المان Free-field است. ضرایب  $C_1$  و  $C_2$  نیز ضرایبی ثابتی هستند که برای جذب امواج در معادله اعمال می‌شوند. معادلات تحت شرایط مرزی Compliant base هم مطابق رابطه‌های زیر بررسی می‌شوند [22].

$$\sigma_n = C_1 \rho V_p (u_x^d - 2u_x^u) \quad (15)$$

$$\tau = C_2 \rho V_s (u_y^d - 2u_y^u) \quad (16)$$

برای شروع مراحل تحلیل، چهار فاز محاسباتی باید در نظر گرفته شود، که در فاز مقدماتی تحلیل استاتیکی خطی شامل تعادل ناشی از تنش‌های ژئواستاتیک و برجا و فشار آب حفره‌ای، تحلیل استاتیکی غیرخطی فاز دوم، فاز سوم ساخت سازه و فونداسیون به صورت استاتیکی و در نهایت در فاز آخر تحلیل دینامیکی ناشی از امواج زلزله انجام شده است.



شکل ۷. راستی آزمایشی مدل عددی با نتایج آزمایشگاهی گیردهاران

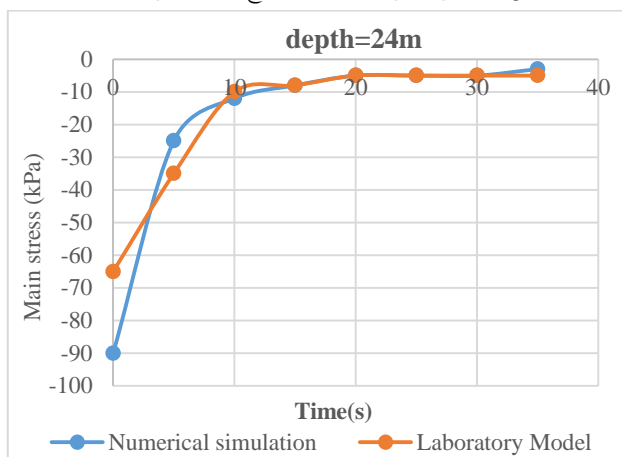


Fig. 7. Validation of the numerical model with Girdharan's laboratory results

کلیات و روند توزیع مقادیر تغییرشکل جانبی و تنش‌های به دست آمده در شکل‌های (۶ و ۷) مشخص است و حداکثر مقادیر به دست آمده در مدل عددی و آزمایشگاهی اختلافی کمی با هم دارند، که این به معنی قابل اعتماد بودن مدل عددی است.

## ۵- نتایج و بحث

### ۵-۱- مقایسه نشست ناشی از بار استاتیکی

نتایج نشست ناشی از تحلیل استاتیکی طبق مبحث هفتم مقررات ملی ایران نشست یکنواخت مجاز پی‌های گسترده روی خاک ماسه ۵۰ میلی‌متر است، که همان‌طور از شکل (۸) پیداست مقادیر نشست پی از مقادیر مجاز نیز کمتر بوده است [24].

### ۵-۲- جابجایی، شتاب و نمودار هیسترسیس

یکی از پارامترهای تأثیرگذار در امر تحلیل و طراحی سازه‌ها، جابه‌جایی جانبی طبقات است. برای بررسی مقادیر نسبت جابه‌جایی جانبی طبقات در حالت اندرکنش سازه - خاک - سازه برای سازه ۱۵ طبقه، فاصله سازه‌ها طبق شکل (۹) تغییر کرده است.

اندرکنش سازه - خاک - سازه جابه‌جایی جانبی سازه را افزایش می‌دهد، که مقدار این افزایش در طبقات بالاتر بیشتر است و افزایش دوره تناوب سازه مجاور باعث افزایش بیشتر

جدول ۴- مشخصات مدل خاک در آزمایش حکم‌آبادی و همکاران [23]

1776	kPa	Maximum shear modulus	$G_{max}$	1
3/1	kPa	Undrained shear strength	$C_u$	2
0	°	Friction angle	$\phi_u$	3
36	m/s	Shear wave speed	$V_s$	4
1450	Kg/m <sup>3</sup>	density	$\rho$	5

Table 4. Characteristics of the soil model in the experiment of Hokmabadi et al. [23]

جدول ۵. مشخصات مدل شمع در آزمایش حکم‌آبادی و همکاران [23]

$1/16 \times 10^3$	MPa	Modulus of elasticity	$E$	1
40	mm	External diameter	$D_{out}$	2
0.4	-	Poisson's ratio	$\nu$	3
$8/33 \times 10^4$	mm <sup>4</sup>	Moment of inertia	$I$	4
955	Kg/m <sup>3</sup>	density	$\rho$	5

Table 5. Specifications of the pile model in the experiment of Hokmabadi et al. [18]

شکل ۶. راستی آزمایشی مدل با نتایج آزمایشگاهی

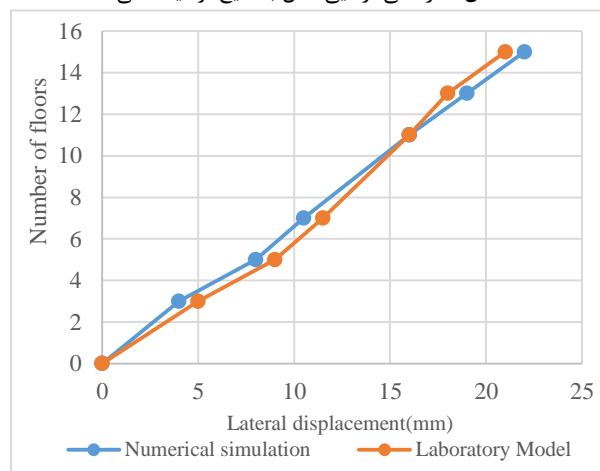


Figure 6 - Validation of the model with laboratory results

در مدل آزمایشگاهی گیردهاران [18]، نیز برای بررسی رفتار روانگرایی خاک مدل‌سازی انجام شده است و رفتار خاک ماسه‌ای اشباع تحت تنش‌های محبوس طبق جدول (۱ و ۲)، و توسط آزمایش میز لرزه انجام شده و خاک تحت شتاب  $0.2g$  در فرکانس  $1/5$  هرتز بررسی شده است.

برای در نظرگیری این پارامتر در روابط اندرکنش، باید آن را به صورت نسبت فاصله سازه‌ها به بُعد پی فرض نمود؛ از این رو پارامتر فاصله سازه‌ها به صورت نسبت فاصله آن‌ها به بُعد پی سازه اصلی ( $\frac{S}{B}$ ) در نظر گرفته می‌شود. انتظار می‌رود با افزایش فاصله سازه‌ها، از شدت تأثیرات اندرکنش سازه - خاک - سازه کاسته شود، ولی همیشه به این صورت نیست.

همان‌طور که از شکل (۹) مشخص است با افزایش نسبت فاصله به عرض، تغییرشکل جانبی افزایش یافته و با افزایش فاصله این نسبت کاهش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر با افزایش فاصله سازه‌ها آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه کمتر می‌شود، این کاهش آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه به شکلی است که باعث بیشترین نسبت دریافت طبقه آخر و کمتر بودن نسبت دریافت سایر طبقه‌ها نسبت به این طبقه شود. در شکل (۹) نیز مشخص است که با افزایش تعداد طبقات در حدود ۲۰ الی ۳۰ درصد به تغییرشکل جانبی طبقات مرتفع‌تر نیز افزوده شده اما تغییرشکل جانبی از مقدار تعیین شده آیین نامه ۲۸۰۰ ( $\Delta \leq 2 * 10^{-2}h$ ) کمتر خواهد شد [25].

پس از بررسی تغییرشکل با وجود دو سازه مجاور هم، اکنون به بررسی پاسخ چند سازه با فواصل مختلف نسبت به هم پرداخته شده و پاسخ جابه‌جایی سطح خاک و میزان طیف شتاب در حالتی که سه و چهار سازه مجاور هم نیز بررسی و مقایسه شده‌اند. همان‌طور که از شکل (۱۰) مشاهده می‌شود با افزایش تعداد سازه ساخته شده زمانی که چهار سازه کنار هم وجود دارند پاسخ جابه‌جایی کمتری در سطح خاک تحمیل خواهد شد. زمانی که تعداد سازه‌ها نزدیک به هم و یا با فاصله کمی نسبت به هم قرار دارند، تغییرشکل جانبی ساختمان در تراز کف پی کمتر و عملکرد سازه نیز مطلوب‌تر خواهد بود.

با توجه به اینکه طراحی سازه‌ها بر اساس بیشترین نیروی وارد بر آن‌ها انجام می‌گیرد، بنابراین هدف مهندسی زلزله، تعیین نیروی حداکثر است. از طرفی طبق قانون دوم نیوتن؛ نیروی وارد بر جسم، با جرم و شتاب آن رابطه مستقیم دارد. بنابراین برای تعیین بیشترین نیرو، نیاز به تعیین شتاب بیشترین سازه است. برای سیستم‌های یک درجه آزادی با پیوندهای مختلف می‌توان، شتاب حداکثر هر سیستم را تحت یک شتاب‌نگاشت

این پاسخ می‌شود. محور افقی بیانگر ارتفاع طبقات است از طرفی با افزایش فاصله سازه‌ها در این حالت، مقادیر پاسخ کاهش می‌یابند. یکی دیگر از پارامترهای تأثیرگذار در پدیده اندرکنش سازه - خاک - سازه، فاصله سازه‌هاست.

شکل ۸. نشست پی ساختمان به دست آمده از تحلیل عددی (متر)

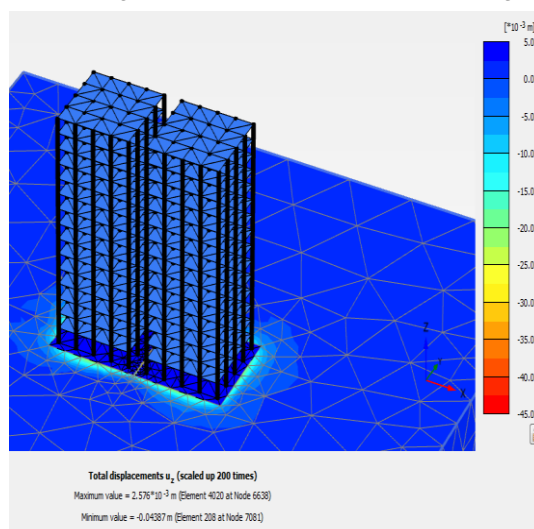


Fig. 8. Settlement of the foundation of the buildings obtained from the numerical analysis (meters)

شکل ۹. بررسی تأثیر فاصله سازه بر روی جابه‌جایی جانبی دو ساختمان پس از تحلیل دینامیکی

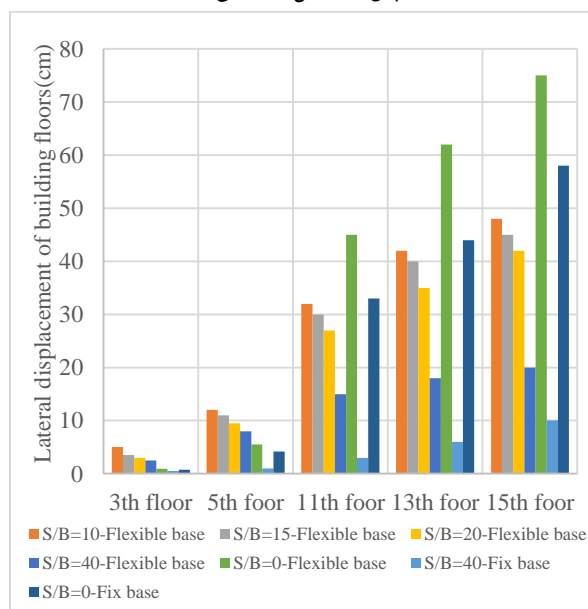
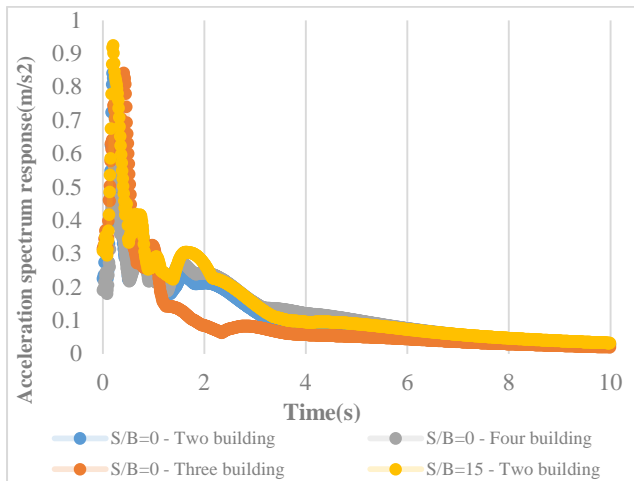


Fig. 9. Investigating the effect of structure distance on lateral movement of two buildings after dynamic analysis

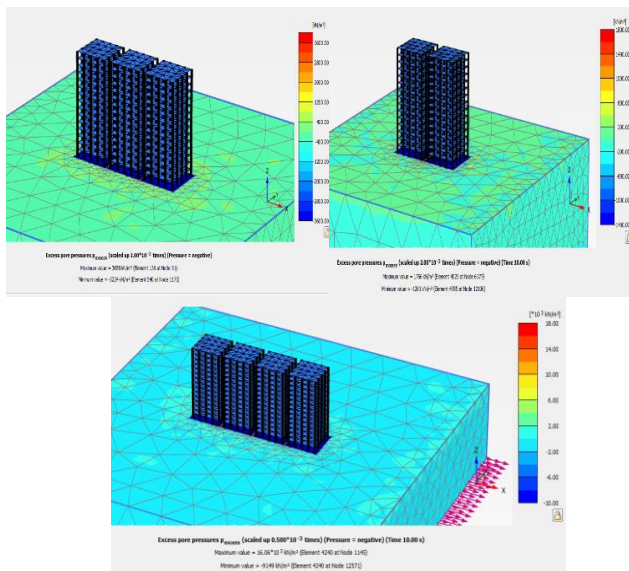
خواهد شد. همان‌گونه که از شکل (۱۲) مشخص است با اضافه شدن سازه‌های مجاور هم میزان فشار آب حفره‌ای تقریباً برای چهار سازه مجاور هم ۱۰ برابر سایر مدل‌ها خواهد شد.

شکل ۱۱. بررسی تأثیر فاصله سازه روی طیف پاسخ شتاب در سطح خاک



**Fig. 11.** Investigating the effect of the distance of the structure on the acceleration response spectrum on the soil surface

شکل ۱۲. بررسی تأثیر تعداد سازه روی فشار آب حفره‌ای لایه خاک

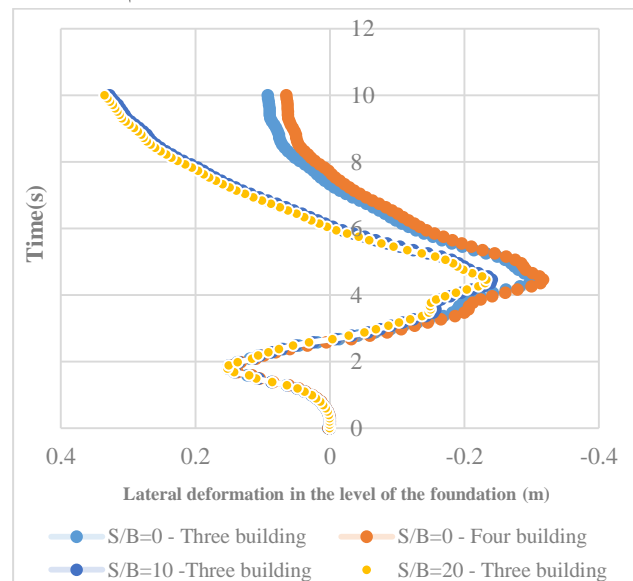


**Fig. 12.** Investigating the effect of the number of structures on the pore water pressure of the liquefaction soil layer

هنگامی که بار وارد بر سازه به صورت رفت و برگشتی است (مثل زلزله) نمودار نیرو- تغییرمکان یا تنش- کرنش عضو، شکل حلزونی به خود می‌گیرد که به آن منحنی هیسترسیس

زلزله محاسبه نمود. در نتیجه در صورتی که محاسبات فوق برای تعداد زیادی سازه یک درجه آزادی از پریود صفر (شتاب زمین) تا پریود معین تکرار می‌شود نموداری برای نشان دادن بیشترین شتاب ایجاد شده در یک سیستم یک درجه آزادی با پریودهای مختلف تحت یک شتاب‌نگاشت زلزله به وجود می‌آید که به آن طیف پاسخ شتاب گفته می‌شود [22].

شکل ۱۰. بررسی تأثیر فاصله سازه روی پاسخ جابه‌جایی جانبی در تراز کف پی در حالت وجود سه و چهار سازه مجاور هم



**Fig. 10.** Investigating the effect of structure distance on the lateral displacement response at the level of the foundation floor in the presence of three and four adjacent structures

همواره حضور سازه مجاور باعث کاهش شتاب اعمالی به پای سازه و با فاصله گرفتن سازه مجاور میزان طیف پاسخ شتاب افزایش خواهد یافت. با بلندتر شدن این سازه، مقادیر شتاب پایه افزایش می‌یابد؛ ولی همچنان مقادیر شتاب اعمالی در این حالت بیشتر از حالت میدان آزاد است، ضمناً با افزایش دوره تناوب سازه اصلی، مقادیر نسبت شتاب پایه افزایش می‌یابد.

همان‌طور که از شکل ۱۱ مشخص است با اضافه شدن سازه مجاور میزان پاسخ طیف شتاب کاهش پیدا خواهد کرد.

با افزایش تعداد سازه‌های مجاور هم روی لایه روانگرا بر میزان تنش روی لایه روانگرا افزوده شده و با افزایش میزان وزن روی خاک، بر میزان افزایش فشار آب حفره‌ای اضافه

ادریس در سال ۱۹۹۱ [26]، پیشنهاد کرد تا برای استفاده از طرح معادل خطی، مدول برشی و میرایی به ترتیب توسط فنر خطی و میراگر مدل‌سازی شوند. پارامترهای فنر و میراگر بر اساس سکانت مدول برشی و ضریب میرایی برای یک سطح معینی از تنش برشی محاسبه می‌شود. روش معادل خطی به‌عنوان یک فرایند تکراری معرفی شده است. در شکل (۱۴) مدل‌سازی دو لایه خاک با ضخامت‌های مختلف، شامل یک لایه خاک روانگرا با مدل رفتاری یو - بی - سی - سند و یک لایه خاک با مدل رفتاری خطی Hs-small و مطابق با پارامترهای جدول ۲ بررسی و مقایسه شده است.

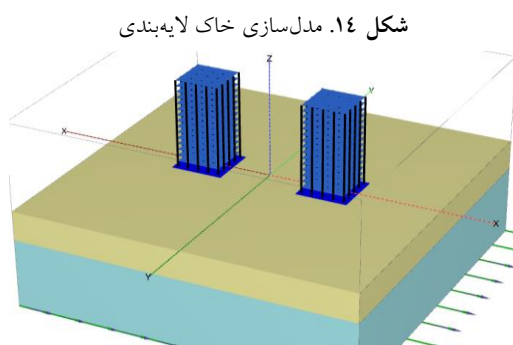


Fig. 14. Layered soil modeling

شکل ۱۵. نشست پی ساختمان به دست آمده از مدل عددی (متر)

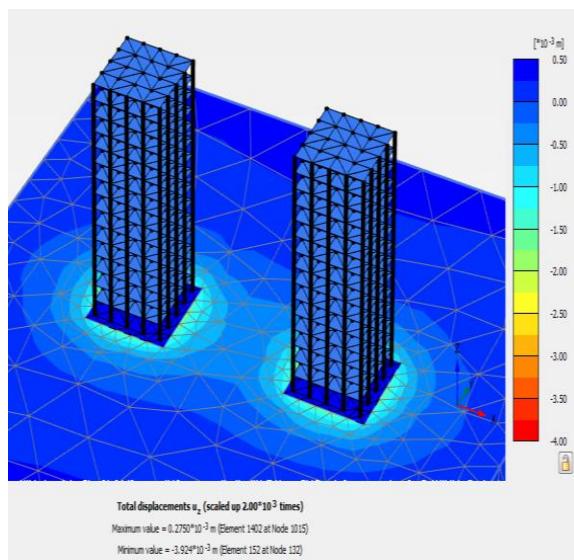


Fig. 15. Settlement of the foundation of the building obtained from the numerical model (meters)

نتایج مدل‌سازی ضخامت لایه روانگرا در شکل‌های زیر ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود میزان نشست سازه تحت تأثیر دولایه خاک با مشخصات متفاوت

می‌گویند. در واقع تکرار بارگذاری منجر به پیوسته شدن نمودار در سیکل‌های متوالی می‌شود که تعداد این سیکل‌ها، بیانگر عملکرد سازه در زلزله است.

شکل ۱۳. بررسی تأثیر تعداد سازه روی نمودار هیستریسیس لایه خاک

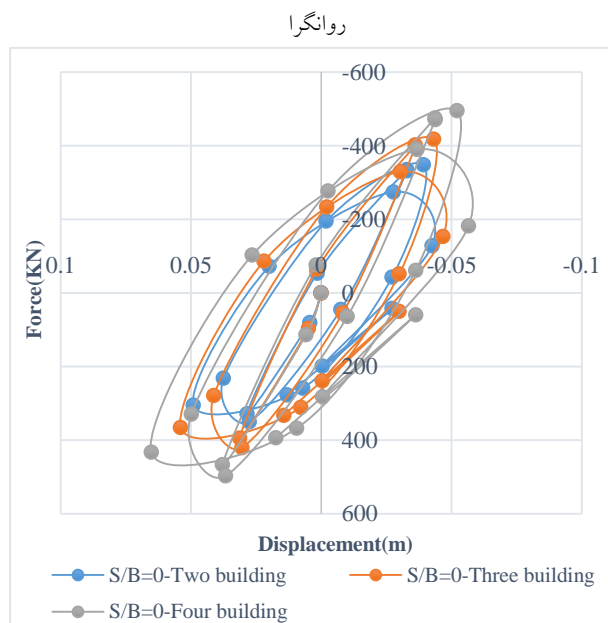


Fig. 13. Investigating the effect of the number of structures on hysteresis diagram of the liquefaction soil layer

نمودار هیستریسیس مطلوب، باید تعداد سیکل و سطح زیر نمودار بیشتری و شکلی متقارن داشته، که این سه ویژگی باعث عملکرد بهتر لرزه‌ای سازه خواهد شد. همان‌طور که از شکل (۱۳) مشخص است با افزایش تعداد سازه‌های مجاور یکدیگر تعداد سیکل‌ها بیشتر و سطح زیر نمودار نیز افزایش یافته و در نهایت عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها مطلوب‌تر خواهد شد.

### ۳-۵- اثر ضخامت لایه خاک مستعد روانگرایی

در سال‌های گذشته مطالعات گسترده‌ای درباره تحلیل پاسخ ساختگاه صورت پذیرفته است و روش‌های مختلفی برای تحلیل پاسخ زمین به وجود آمده است که از جمله می‌توان به روش‌های معادل خطی و غیرخطی نام برد که به صورت‌های یک‌بعدی، دو‌بعدی و سه‌بعدی قابل حل هستند. در روش معادل خطی رفتار واقعی غیرخطی هیستریسیس تنش - کرنش خاک‌های بارگذاری شده به صورت سیکلی را، می‌توان با در نظر گرفتن خواص خطی معادل خاک تعیین نمود. سید و

سطح زمین شده است. همچنین با توجه به اینکه روانگرایی رخ داده است، کاهش زیاد سختی و غیرخطی بودن رفتار خاک نرم از گسترش شتاب‌های ماکزیمم به بزرگی آنچه در سنگ مشاهده می‌شود، جلوگیری کرده است.

شکل ۱۶. بررسی تأثیر ضخامت خاک بر روی طیف پاسخ شتاب در سطح خاک

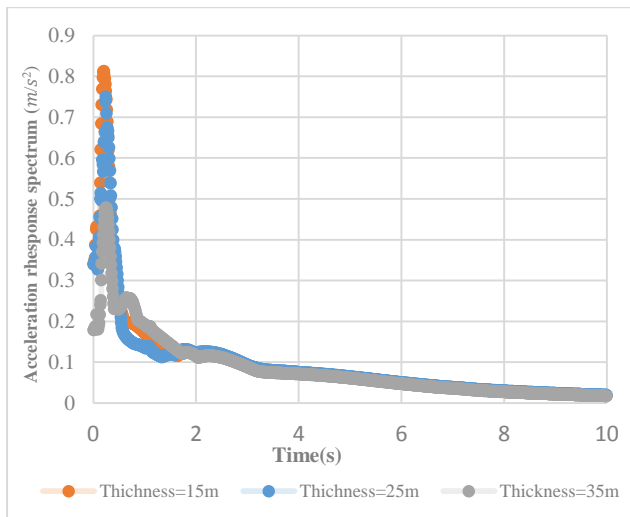


Fig. 16. Investigating the effect of soil thickness on the acceleration response spectrum on the soil surface

شکل ۱۷. بررسی تأثیر ضخامت خاک بر روی اضافه فشار آب حفره‌ای در مرکز لایه خاک روانگرا

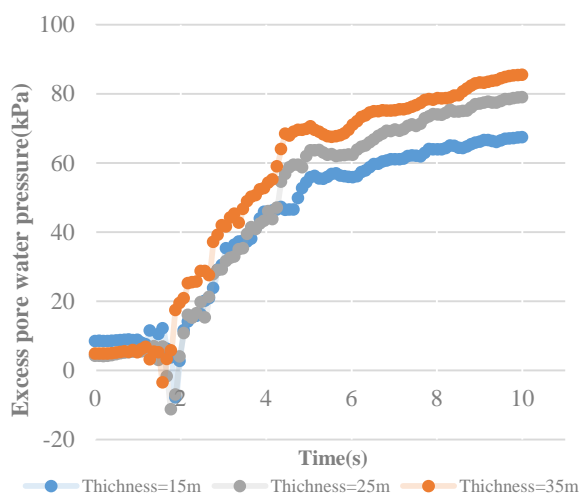


Fig. 17. Investigating the effect of soil thickness on pore water pressure excess in the center of the liquefied soil layer

می‌توان بیان نمود که از بین رفتن سختی و جاری شدن خاک منجر به رفتار غیرخطی خاک در برابر حرکات ورودی شده است که این رفتار غیرخطی بر محتوای فرکانسی و دامنه

کمتر از میزان مجاز آیین‌نامه و مبحث هفتم مقررات ملی ساختمان است، از این رو مدل‌های مختلف پارامتری را با دو لایه مختلف خاک مقایسه و بررسی در عمق مرکزی لایه روانگرا بررسی‌ها انجام شده است.

و همان‌گونه که در شکل‌های (۱۶ و ۱۷) مشاهده می‌شود، فشار آب حفره‌ای در زمان زلزله افزایش می‌یابد. با افزایش تعداد سیکل‌های بارگذاری بر مقدار فشار آب حفره‌ای افزوده می‌شود و از تنش مؤثر به همان میزان کاسته می‌شود. براساس نتایج تحلیل‌ها، کاهش تنش مؤثر و نرم شوندگی خاک نیز مطابق با افزایش فشار آب حفره‌ای صورت پذیرفته است. زلزله بارگذاری پیچیده‌ای با مؤلفه‌های حرکت در یک محدوده وسیعی از فرکانس ایجاد می‌کند. طیف پاسخ، پاسخ ماکزیمم سیستمی با یک درجه آزادی در مقابل یک حرکت ورودی خاص به صورت تابعی از فرکانس طبیعی و ضریب میرایی سیستم را تشریح می‌کند. طیف پاسخ شتاب، اثر حرکت زمین بر سازه‌ها را برای پریودهای طبیعی مختلف مشخص می‌کند. با توجه به اینکه روانگرایی قادر است دامنه و محتوی فرکانسی حرکات سطح زمین را به شدت تغییر دهد، گسترش اضافه فشار آب منفذی حین زلزله موجب کاهش سختی خاک شد. در کرنش‌ها و تغییرشکل‌های بزرگ، اثر غیرخطی و غیرالاستیکی خاک افزایش یافته که موجب کاهش شدید سختی و افزایش میرایی می‌شود. در نتیجه شتاب‌های ماکزیمم مشاهده شده در سطح زمین پایین‌تر از شتاب ماکزیمم در تراز بستر سنگی شد و محتوای فرکانسی نیز متفاوت بود. منشأ اصلی تغییرشکل‌های بسیاری از مناطق به هنگام زلزله روانگرایی لایه‌های ماسه‌ای سست و اشباعی است که بعضاً توسط توده‌هایی از خاک ریزدانه احاطه شده‌اند.

با توجه به شکل (۱۶) که پاسخ طیف شتاب زمین را نشان می‌دهد، شتاب ماکزیمم در سطح زمین پایین‌تر از شتاب ماکزیمم در تراز بستر سنگی است و محتوی فرکانس نیز متفاوت است. اثر مهم آبرفت این است که در محدوده‌ای از فرکانس‌های معین، حرکت لرزه‌ای سنگ‌بستر را تقویت یا میرا می‌کند. در حقیقت نرمی بیش‌ازاندازه خاک مورد مطالعه و کاهش سختی، امواج را میرا کرده و سبب کاهش شتاب در



Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 80, 149-162.

3- Lu, Y., Li, B., Xiong, F., Ge, Q., Zhao, P., Liu, Y., 2020, Simple discrete models for dynamic structure-soil-structure interaction analysis, Engineering Structures, Vol. 206, 110-139.

4- Vicencioa, F., Nicholas, A., 2020, Method to evaluate the dynamic structure-soil-structure interaction of 3-D buildings arrangement due to seismic excitation, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 141, 470-494.

5- Lou, M., Wang, H., Chen, X., and Zhai, Y., (2011). Structure-soil-structure interaction: Literature review. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 31, 1724-1731.

6- Warburton, G. B. Richardson, J. D. and Webster, J. J., 1972, Harmonic Response of Masses on an Elastic Half Space. Journal of Engineering for Industry, Vol. 94, 193-200.

7- Kobori, T. Minal, R. and Kusakabe, K., 1973, Dynamical Characteristics of Soil-Structure Cross-Interaction System, I.

8- Trombetta, N. W., Mason, H. B., Hutchinson, T. C., Zupan, J. D., Bray, J. D., and Kutter, B. L. 2014, Nonlinear Soil-Foundation-Structure and Structure-Soil-Structure Interaction: Centrifuge Test Observations. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 140.

9- Vabbersgaard, A., 2018, Dynamic soil-structure interaction of polypod foundations, polypod foundations, Computers and Structures, <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.07.007>.

10- Vicencioa, F., Nicholas A., 2018, Higher mode seismic structure-soil-structure interaction between adjacent building during earthquakes, Engineering Structures, Vol. 174, 322-337.

11- Han, B., Chen, S., Liang, J., 2020, 2D dynamic structure-soil-structure interaction: A case study of Millikan Library Building, Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol. 113, 346-358.

12- Cayci T, B., Akpinar, M., 2021, Seismic pounding effects on typical building structures considering soil-structure interaction, Structures, Vol. 34, 1858-1871.

13- Ecemis, N., 2021, Experimental and numerical modeling on the liquefaction potential and ground settlement of silt-interlayered stratified sands, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 144, 670-691.

14- Beaty, M.H., Byrne, P.M., 1998. An effective stress model for predicting liquefaction behavior of sand. Geotechnical Earthquake Engineering and solid Dynamics, ASCE Geotechnical special publication, Vol. 75, 766-777.

15- Beaty, M.H., Byrne, P.M., 2011. Ubcсанд constitutive model. Itasca UDM website 904Ar. Documentation Rep., UBCSAND Constitutive Model on Itasca UDM Website.

16- Beaty, M.H., Perlea, .G., 2011. Several observation on advanced analyses with liquefiable material. Thirty

شتاب‌ها اثر گذاشته است. با افزایش ضخامت لایه روانگرا میزان فشار آب حفره‌ای طبق شکل (۱۷) افزایش یافته و در مقابل پاسخ طیف شتاب کاهش می‌یابد.

## ۶- جمع‌بندی

در این پژوهش با توجه به اهمیت اندرکنش سازه - خاک - سازه، روی اثرگذاری آن بر تغییرشکل سازه‌ها با استفاده از مجموعه‌ای از تحلیل‌های عددی و مدل پیشرفته رفتاری خاک یو - بی - سی - سند مدل‌سازی انجام شده است. به طور خلاصه در این مطالعه، آثار سازه‌ها در فواصل مختلف نسبت به هم و ضخامت متفاوت لایه خاک، بررسی شده و آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه تحت پدیده روانگرایی مطالعه شده است. در پژوهش حاضر اثر لایه ماسه سست در یک محیط اشباع و در ارتفاع‌های مختلف، با استفاده از کد پلکسیس مورد ارزیابی قرار گرفت و تنش‌ها، اضافه فشار آب حفره‌ای و تغییرمکان‌ها در لایه ماسه‌ای بررسی شد. با توجه به نتایج حاصل در مورد آثار اندرکنش سازه - خاک - سازه، با افزایش فاصله دو سازه نسبت به هم، تغییرشکل جانبی طبقات به علت فاصله گرفتن و عدم تأثیر ضربه دو سازه مجاور هم، کاهش، اما طیف پاسخ شتاب و تغییرشکل پایه ساختمان (جابه‌جایی خاک) افزایش پیدا می‌کند. وجود سازه‌های مابین دو سازه این تغییرشکل‌های جانبی را کاهش داده و عملکرد سازه را مطلوب‌تر خواهد کرد. همچنین با افزایش ضخامت لایه خاک مستعد روانگرایی، ماکزیمم فشار آب حفره‌ای اضافی ایجاد شده در خاک هم افزایش یافته و با افزایش میزان فشار آب حفره‌ای و رابطه معکوس با پاسخ طیف شتاب، شتاب ورودی به سازه کاهش پیدا خواهد کرد.

## مراجع

- 1- Madani, B., Behnamfar, F., and Tajmir R, H., 2015, Dynamic response of structures subjected to pounding and structure-soil-structure interaction, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 78, 46-60.
- 2- Ghandil, M., Behnamfar, F., and Vafaeian, M., 2016, Dynamic responses of structure-soil-structure systems with an extension of the equivalent linear soil modeling,



- cemented sands during drained triaxial compression, soils and foundation, Vol. 51, 761-771.
- 22-William, B., Joyner and Albert T. F., Chen, 1975, CALCULATION OF NONLINEAR GROUND RESPONSE IN EARTHQUAKES, Bulletin of the Seismological Society of America. Vol. 65, 1315-1336.
- 23-Hokmabadi, A.S., Fatahi, B., and Samali, B., 2014, Physical Modeling of Seismic Soil-Pile-Structure Interaction for Buildings on Soft Soils. International Journal of Geomechanics, Vol. 15(2), 128-140.
- ۲۴- مقررات ملی ساختمان ایران مبحث هفتم پی و پی سازی، سال ۹۲، ویرایش سوم.
- ۲۵- آیین نامه طراحی ساختمانها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰ (ویرایش چهارم).
- 26- Seed, H. B., Idriss, I. M., 1969, Influence of soil conditions on ground motions during Earthquakes. ASCE J Soil Mech Found Div, Vol. 95, 99-137.
- first annual USSD conference on 21<sup>st</sup> century dam design-advances and adaptation, 69-97.
- 17-PEER ground motion database. Available: <http://ngawest2.berkeley.edu/>.
- 18- Giridharan, S., Gowda, S., Dieter, F.E., Moormann, C., 2020, Comparison of UBCSAND and Hypoplastic soil model predictions using the Material Point Method, Soils and Foundations, Vol. 60, 989-1000.
- 19- Sharma, M.S., Christopher, D.P., Hoffmann, W., Moran, K., Vaziri, H., 2011, Characterization of weakly cemented sands using nonlinear failure envelopes, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 48, 146-151.
- 20- Sharma, M.S., Christopher, D.P., Hoffmann, W., Moran, K., Vaziri, H., 2011, Strength of Weakly Cemented Sands from Drained Multistage Triaxial Tests, JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, Vol. 137, 1202-1210.
- 21- Sharma, M.S., Christopher, D.P., Hoffmann, W., Moran, K., Vaziri, H., 2011, Relationship between shear wave velocity and stresses at failure for weakly

# Numerical study of structure – soil - adjacent structure interaction in liquefaction susceptible bed

S.H.Khatibi<sup>1</sup>, M.Maleki<sup>2\*</sup>

1- P. h. d Student, Civil Engineering, Bu Ali Sina University

2- Associate Professor, Civil Engineering, Bu Ali Sina University

Maleki@basu.ac.ir\*

## Abstract

In urban areas, residential buildings are often located at small distances from each other. The mutual influence of these buildings, depending on the distance between them, under the effect of earthquake vibrations, is of great importance, which has been less studied and investigated. Normally, the soil-structure interaction is considered when only one structure is present on the soil, although the structure-soil-structure interaction takes place when at least two structures are placed on the soil. In this case, in addition to the discussed structure and soil layer, another adjacent structure is added to the system, the response of the soil layer will be affected by the presence of both structures and the response of each of the structures will also be affected by the response of the soil layer and its adjacent structure, and therefore the soil and each of the two adjacent structures will have a mutual effect on the response, which is known as structure-soil-structure interaction. In other words, in this type of interaction, the vibration energy of a structure affects its neighboring structures through the soil environment and can change its structural response. The presence of the adjacent structure can increase or decrease the dynamic response of the structure and the amount of damage depending on the dynamic characteristics of the soil and the structure and the frequency content of the incoming earthquake. When an earthquake occurs, its waves pass through the soil layers and reach the foundations of both structures. These waves cause deformations in the foundations and structural elements. Therefore, a shear force and an overturning moment are created in the foundation of the structure, which results in the deformation of the foundation and the structure. After that, the vibrations of the structure are transferred to the soil, until this part, the responses and behaviors in these systems (structure, soil and foundation) are similar to the conventional soil-structure interaction; But there is a slight difference in the transmission of these waves from the structure to the soil, which causes the structure-soil-structure interaction. In this research, the structure-soil-adjacent structure interaction has been investigated for building structures based on soil prone to liquefaction. For this purpose, similar concrete buildings of fifteen storey at different distances from each other, along with the continuous environment of the soil bed with different mechanical properties and the application of the advanced elasto-plastic constitutive model under the effect of the earthquake acceleration history applied at the bedrock level, have been analyzed. In order to validate the results, the amount of settlement of the structure under static load was investigated and using the results of two laboratory models, the structure-soil-structure interaction analysis process and the soil constitutive model were validated. Based on the obtained results, the structure-soil-structure interaction in the general state increases the lateral displacement of the structure compared to the case with a rigid bed. The interaction effects are different depending on the number and distance of the structures. Also, the results show that the effects of structure-soil-structure interaction depend on the position and thickness of the soil layer prone to liquefaction, so that with the increase in the thickness of the liquefaction susceptible layer, more excess of pore water is produced and finally, the deformations created in the soil and the structure are more intense.

**Key words:** Numerical analysis, Structure-soil-adjacent structure interaction, Earthquake, Soil prone to liquefaction.