ارزیابی اثرات اندرکنش خاک –سازه بر روی پاسخ لرزه‌ای سازه‌های فولادی مهاربندی‌شده

علیرضا گرکانی نژاد
دانشجوی دکتری، پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
a.garakani@iiees.ac.ir

آران ناصرپور
دانشجوی کارشناسی ارشد، پژوهشکده سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران
aran.naserpour@gmail.com

کلید واژه‌ها: *اندرکنش خاک - سازه، قاب مهاربندی‌شده، روش تحلیل مستقیم، تحلیل تاریخچه زمانی*

چکیده

این پژوهش به ارزیابی اثر اندرکنش خاک-سازه بر روی سازه‌های مهاربندی‌شده پرداخته است. در این تحقیق دو سازه ۳ و ۱۵ طبقه به صورت سه‌بعدی تحلیل و طراحی‌شده و سپس اثر اندرکنش بر روی پاسخ لرزه‌ای سازه‌ها با در نظر گرفتن دو رده خاک نوع II و III ، مطابق با استاندارد ۲۸۰۰، که سرعت متوسط موج برشی هر یک از آن‌ها به ترتیب ۴۵۰m/s و ۲۵۰ m/s است، مورد بررسی قرار گرفته است. خاک به صورت مستقیم مدل‌سازی شده است و از تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برای ارزیابی اثرات اندرکنش بهره گرفته شده است. با توجه به نتایج، به نظر می‌رسد عدم لحاظ اثر اندرکنش در راستای محافظه کارانه نیست. اثر اندرکنش برای سازه کوتاه ۳ طبقه نسبت به سازه بلند ۱۵ طبقه قابل‌ملاحظه بوده و علاوه بر آن اثر اندرکنش بر پاسخ سازه در طبقات پایین بیشتر از سایر طبقات است. همچنین پاسخ تحلیل سازه با لحاظ خاک نوع سه که دارای سرعت برشی متوسط کمتری نسبت به خاک نوع دوم است، تغییر بیشتری در نتایج را نشان می‌دهد. درنتیجه می‌توان گفت اثرات اندرکنش خاک-سازه می‌تواند تأثیر زیادی در پاسخ سازه در برابر نیروی لرزه‌ای داشته باشد و نتیجه‌گیری در مورد چگونگی اثرات آن، نیاز به ارزیابی‌های گسترده‌تر دارد.

مقدمه

لزوم در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک-سازه و اهمیت طبیعت خاک زیر سازه بر پاسخ سازه‌ها طی بسیاری از زلزله‌ها اثبات شده است. در تجربیات زلزله‌هایی مانند زلزله مکزیک در سال ۱۹۸۵ (Gazetas and Mylonakis 1998) و کریستچرچ-نیوزیلند (۲۰۱۱) (Bray and Dashti 2012) تأثیر خاک بر رفتار سازه به‌وضوح مشاهده شده است. تأثیر اندرکنش خاک-سازه برای سازه‌های انعطاف‌پذیر که بر روی بستر سنگی ساخته‌شده‌اند، کم‌اهمیت و قابل صرفنظرکردن است، چون در این حالت سازه انرژی کمی را به خاک منتقل می‌کند. هنگام وقوع زلزله یک لنگر واژگونی و یک نیروی برش پایه به وجود می‌آید، حال اگر بستر سنگی محکم باشد، هر دو تنش حاصل از این نیروها منجر به تغییر شکل اضافی در پایه نخواهند شد. بنابراین هیچ حرکت پیچشی در پایه ایجاد نخواهد شد و پاسخ دینامیکی تنها به خواص سازه بستگی پیدا می‌کند. اما اگر یک سازه سخت و سنگین روی یک لایه عمیق خاک نرم ساخته شود انرژی قابل ملاحظه‌ای از سازه به خاک منتقل خواهد شد و حرکت پایه به دلیل درگیر شدن سیستم خاک-سازه از شرایط میدان آزاد بسیار متفاوت خواهد شد.

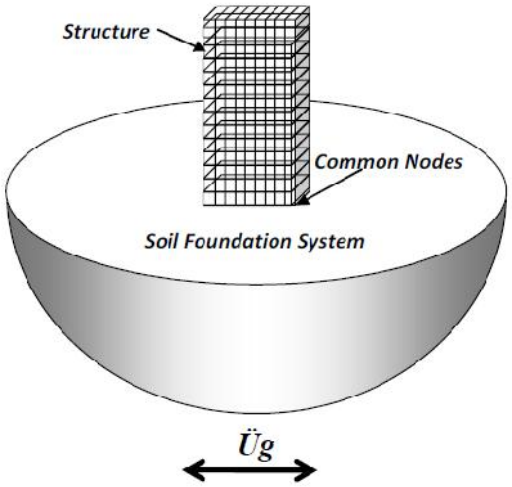
اندرکنش خاک-سازه می‌تواند اثرات متفاوتی ازجمله نرمی سیستم و افزایش پریود سازه، افزایش و یا کاهش نیروهای اعضا به علت رفتار غیرخطی و هیسترتیک و همچنین انعطاف‌پذیری فونداسیون می‌تواند تغییر در زلزله وارده به سیستم سازه‌ای را به دنبال داشته باشد. با این وجود طراحان سازه به طور معمول با فرض اینکه عدم لحاظ اندرکنش محافظه‌کارانه است، این اثرات را نادیده می‌گیرند. برای سازه‌هایی که پریود آن‌ها زیاد است معمولا این اثرات ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن می‌باشند. اما سازه‌های به نسبت سخت‌تر مانند سازه‌های دیوار برشی و یا مهاربندی‌شده با ارتفاع متوسط، اندرکنش خاک-سازه می‌تواند منجر به تخمین نادرست نیروهای وارد به اعضای سازه گردد (Raychowdhury 2011-2009) . در این تحقیق اثر اندرکنش خاک-سازه بر روی سازه‌های مهاربندی مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور دو سازه ۳ و ۱۵ طبقه طراحی و مدل-سازی خاک به صورت مستقیم انجام شده است. بررسی این اثر برای دو نوع خاک با سرعت‌های متوسط برشی متفاوت انجام شده است.

تحلیل دینامیکی غیرخطی سیستم خاک–سازه:

مدل دینامیکی سیستم خاک- سازه که در شکل ۱ نشان داده‌شده است، شامل سازه، گره‌های اتصال سازه به فونداسیون، سیستم فونداسیون-خاک و شتاب‌نگاشت وارده بر تراز سنگ‌بستر است. معادله دینامیکی حاکم بر سیستم خاک-سازه عبارت است از:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = Mm\ddot{u}_g + f_v \qquad (۱)$$

در این معادله M، C و K به ترتیب عبارت‌اند از ماتریس جرم، میرایی و سختی و f_v، نیروی وارد بر سطح ویسکوز است. این بردار تنها در حالتی که اختلافی بین حرکت نقاط نزدیک مرز فرضی و حرکت در نقاط موجود سطح آزاد باشد، غیر صفر است (Wolf 1998).



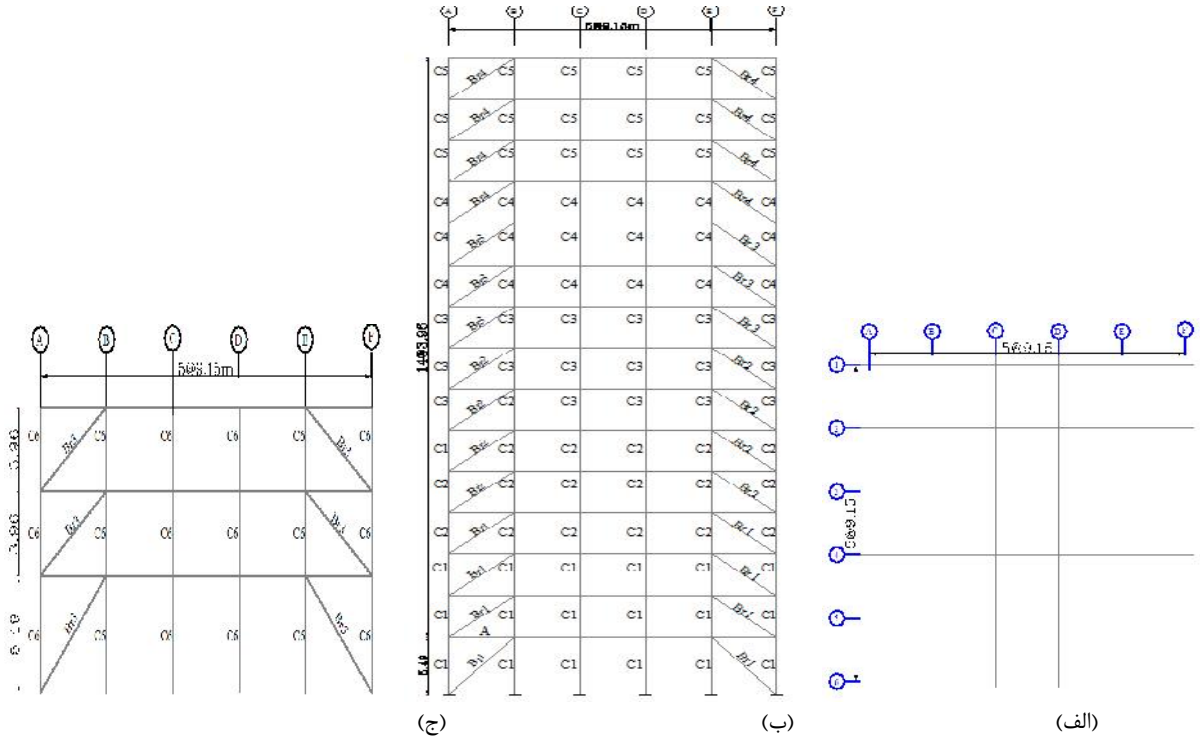
شکل ۱: سیستم خاک-سازه

در سال‌های اخیر تلاش‌های بسیاری درزمینه توسعه روش‌های حل معادله دینامیکی حاکم و تعیین پاسخ سازه تحت بارهای لرزه‌ای انجام شده است. به طور کلی دو روش تحلیل خطی معادل و تحلیل دینامیکی غیرخطی برای آنالیز دینامیکی سیستم خاک-سازه تحت بار لرزه‌ای وجود دارد. بایرن و همکاران (Byrne, Naesgaard et al. 2006) و بیتی و بایرن (Beaty and Byrne 2001) به بررسی مزایا و معایب دو روش مذکور پرداختند آن‌ها با بررسی مثال‌های متعدد کاربرد و مزایای روش تحلیل دینامیکی غیرخطی را برای سیستم اندرکنش خاک-سازه نشان دادند. با توجه به اینکه در روش تحلیل خطی معادل رفتار غیرخطی هیچ‌کدام از مصالح به صورت مستقیم مدل‌سازی نمی‌شود و رفتار سازه در حین پروسه حل معادله، خطی فرض می‌شود، برای تحلیل دینامیکی اثر اندرکنش خاک-سازه مناسب نیست. در این تحقیق آنالیز دینامیکی سیستم با استفاده از روش دینامیکی غیرخطی استفاده شده است. در این روش کلیه رفتارهای غیرخطی المان‌های سازه‌ای و خاک به صورت مدل‌سازی می‌شوند.

مدل‌سازی سیستم خاک–سازه

در این تحقیق برای مقایسه اثر لحاظ اندرکنش خاک-سازه بر روی سیستم‌های سازه‌ای مهاربندی دو ساختمان ۳ و ۱۵ طبقه، که مدل‌سازی آن‌ها با نرم‌افزار OpenSees انجام‌شده، در نظر گرفته شده است. این دو سازه سه بعدی و بر مبنای استاندارد ۲۸۰۰ و مبحث دهم مقررات ملی ساختمان مدل‌سازی و طراحی شده‌اند. پلان آن‌ها یکسان و به ابعاد ۴۵/۷۵ × ۴۵/۷۵ متر، دارای پنج دهانه ۹/۱۵ متری، با توزیع جرم یکنواخت در ارتفاع و سختی متفاوت در ارتفاع می‌باشند. ارتفاع طبقه اول ۵/۴۹ متر و ارتفاع سایر طبقات ۳/۹۶ متر، بنابراین ارتفاع سازه ۳ و ۱۵ طبقه به ترتیب ۱۷/۳۷ و ۶۰/۹۶ متر است. در مدل‌سازی سازه از المان‌های غیرخطی با خاصیت غیرخطی گسترده و سخت شدگی مصالح سه درصد لحاظ شده است. پلان و قاب نمونه هریک از دو سازه در شکل ۲ قابل مشاهده است. مقاطع تخصیص‌یافته به المان‌های سازه در جدول ۱ ارائه شده‌اند. روش مستقیم جهت مدل‌سازی اندرکنش خاک-سازه به کار گرفته شده است. در این روش خاک، سازه و پی با المان‌های مناسب مدل‌سازی شده‌اند. در بسیاری از تحقیق‌های انجام‌شده در زمینه تأثیرات اندرکنش، مشاهده شده است که معمولا در صورتی میانگین سرعت موج برشی خاک کمتر از ۶۰۰ m/s باشد، اثرات اندرکنش خاک-سازه بر پاسخ سازه قابل ملاحظه است. (Galal and Naimi 2008, N.A. and Nateghi 2004)

در این تحقیق دو رده خاک نوع II و III ، مطابق با استاندارد ۲۸۰۰، که سرعت متوسط موج برشی هر یک از آن‌ها به ترتیب ۴۵۰m/s و ۲۵۰ m/s می باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. چگالی خاک مورد نظر برابر ۲۰۰۰ kg/m^3 لحاظ شده است.



شکل ۲: سازه طراحی شده:(الف) پلان، (ب)نمای قاب و مقاطع سازه ۱۵ طبقه و (ج) قاب و مقاطع سازه ۳ طبقه

جدول ۱: ابعاد مقاطع قاب‌های فولادی ۳ و ۱۵ طبقه طراحی‌شده

Name of section	section
C1	W14x500
C2	W14x445
C3	W14x370
C4	W14x283
C5	W14x257
C6	W14x311
Br1	Box 100x10
Br2	Box 80x8
Br3	Box 80x6
Br4	Box 60x6

شتاب‌نگاشت‌های استفاده شده در این پژوهش بر مبنای روش آیین نامه ۲۸۰۰ و با توجه به طیف‌های خاک نوع دو و سه با خطر پذیری زیاد مقیاس شده اند.

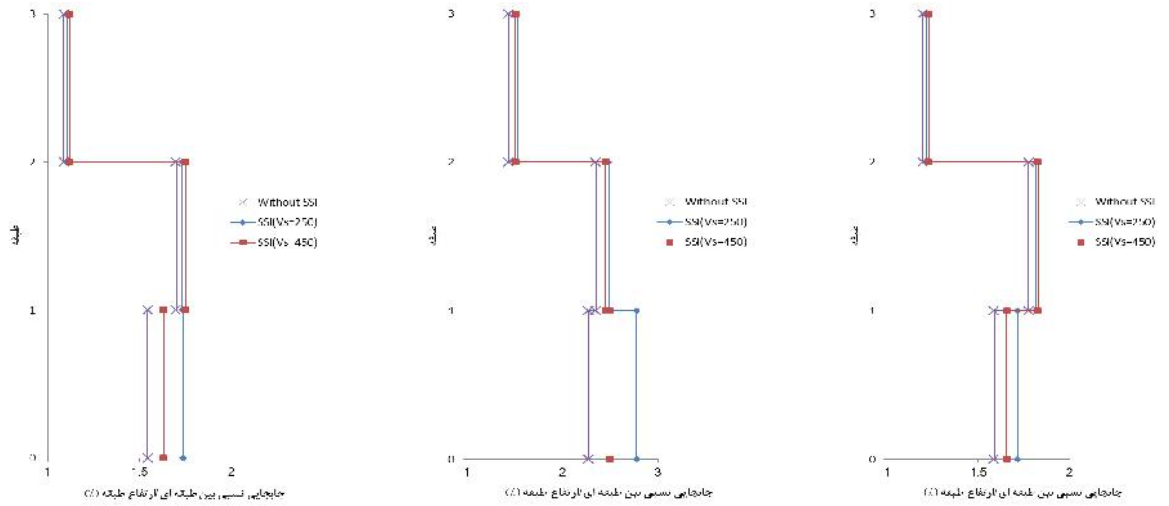
نتایج عددی

به منظور تحقیق اثر اندرکنش خاک- سازه، تحلیل خطی مودال و تحلیل دینامیکی غیرخطی انجام شد و نتایج آن در این بخش بررسی شده است. مقادیر ویژه و پریودهای طبیعی آن در تخمین درست بار ناشی از زلزله بسیار مهم است. در این بخش نسبت پریودها در دو حالت با و بدون لحاظ اثر اندرکنش به منظور بررسی تأثیر آن بر پاسخ خطی سازه ارائه شده است. این نسبت برای سه پریود اول سازه سه‌طبقه در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تأثیر اندرکنش بر روی پریود اول قابل ملاحظه درحالی‌که اثر چندانی بر سایر پریودها ندارد.

جدول ۲: مقایسه پریودها در دو حالت با و بدون اثر اندرکنش

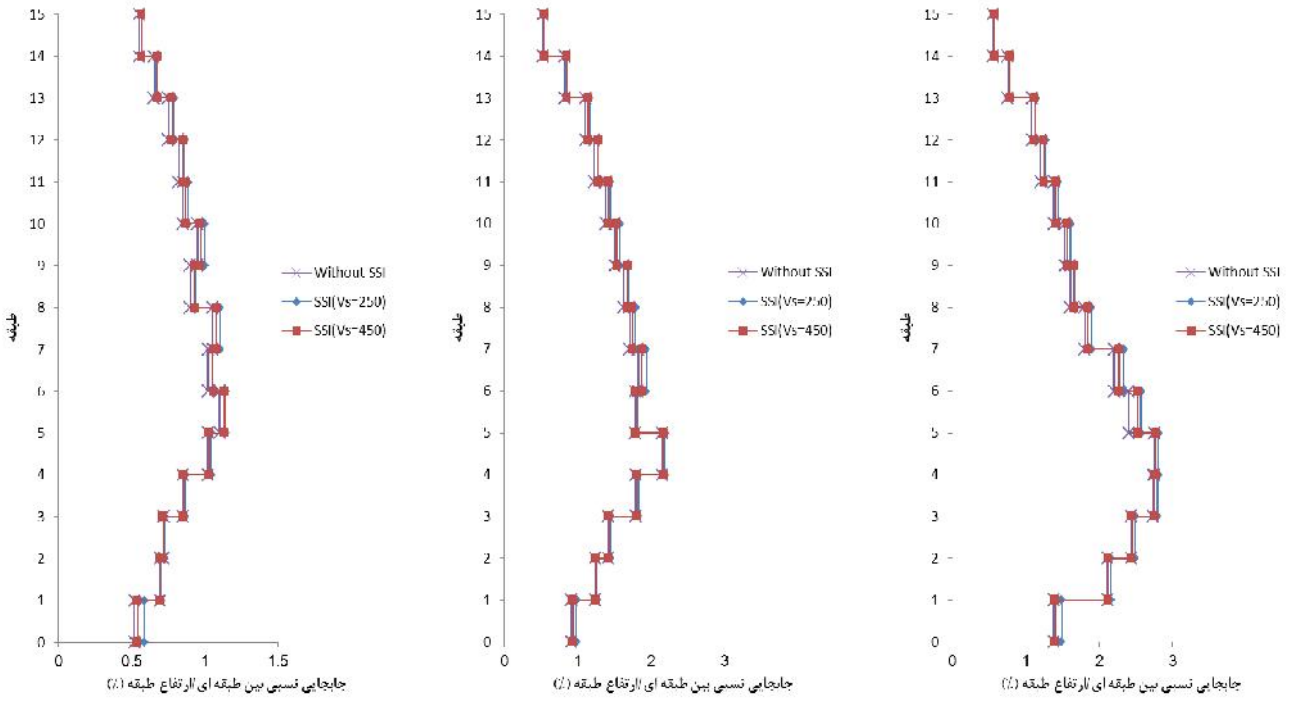
Mode	Fixed Base	V_s=250		V_s=450	
		T′	T′/T	T′	T′/T
1	0.51	0.57	1.12	0.56	1.1
2	0.46	0.48	1.05	0.47	1.03
3	0.28	0.29	1.03	0.29	1.03

در ادامه تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شده است. در این تحلیل از روش انتگرال‌گیری مستقیم و از روش شتاب میانگین نیومارک استفاده شده است. نتایج تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیرخطی در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود اثر اندرکنش برای سازه ۳ طبقه قابل‌ملاحظه و این در حالی است که این اثر برای سازه ۱۵ طبقه به نسبت کمتر است. بررسی سازه سه‌طبقه نشان می‌دهد تأثیر اندرکنش بر دریفت طبقه اول به نسبت سایر طبقات بیشتر است به‌طوری‌که نسبت دریفت طبقه اول مدل تحلیل‌شده با شتاب‌نگاشت زلزله کوبه در دو حالت با و بدون لحاظ آن (برای خاک نوع سه) برابر ۱/۲۲ است. تأثیر اندرکنش در طبقات دوم و سوم کاهش می‌یابد و نسبت مذکور در طبقه دوم و سوم به ترتیب برابر ۱/۰۶ و ۱/۰۵ است (شکل ۳-(ب)). بررسی تأثیر سرعت موج برشی در پاسخ‌ها نشان می‌دهد هر چه سرعت کمتر باشد تأثیر اندرکنش خاک-سازه بر پاسخ‌ها بیشتر است به‌طوری‌که، نسبت دریفت طبقه اول سازه سه‌طبقه و تحلیل‌شده با شتاب‌نگاشت کوبه در دو حالت خاک نوع سه و دو برابر ۱/۱۱ است (شکل ۳-(ب)). نتایج مربوط به سازه ۱۵ طبقه نشان می‌دهد که اثر اندرکنش نسبت به سازه ۳ طبقه کمتر است. دریفت طبقات پایین سازه ۱۵ طبقه نسبت به طبقات فوقانی، بیشتر تحت تأثیر اثر اندرکنش قرارگرفته‌اند (شکل ۴). نسبت دریفت طبقه اول این سازه و تحلیل با شتاب‌نگاشت زلزله کوبه در دو حالت با و بدون لحاظ اثر اندرکنش (خاک نوع سه) برابر ۱/۰۷ است (شکل ۴-(ب)). نسبت دریفت طبقه اول این سازه برای خاک نوع سه به دو برابر ۱/۰۴ است.



(ج) (ب) (الف)

شکل ۳: دریفت نسبی طبقات سازه ۳ طبقه تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت شتاب‌نگاشت (الف) کوکائیلی، (ب) کوبه و (ج) امپریال



(ج) (ب) (الف)

شکل ۴: دریفت نسبی طبقات سازه ۱۵ طبقه تحت تحلیل دینامیکی غیرخطی تحت شتاب‌نگاشت (الف) کوکائیلی، (ب) کوبه و (ج) امپریال

نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر اندرکنش خاک-سازه برای سازه‌های مهاربندی‌شده پرداخته شده است. اندرکنش خاک-سازه می‌تواند تأثیر قابل ملاحظه‌ای در پاسخ سازه در برابر نیروی لرزه‌ای داشته باشد. در این تحقیق دو سازه ۳ و ۱۵ طبقه به‌صورت سه‌بعدی تحلیل و طراحی گردید و سپس اثر اندرکنش با در نظر گرفتن دو نوع خاک نوع دو و سه با توجه به دسته بندی استاندارد ۲۸۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل‌سازی خاک به صورت مستقیم و تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی انجام شد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که عدم لحاظ اثر اندرکنش محافظه کارانه نیست. اثر اندرکنش برای سازه کوتاه ۳ طبقه نسبت به سازه بلند ۱۵ طبقه قابل ملاحظه بوده و علاوه بر آن اثر اندرکنش بر پاسخ سازه در طبقات پایین بیشتر از سایر طبقات است. همچنین پاسخ تحلیل سازه با لحاظ خاک نوع سه که دارای سرعت برشی متوسط کمتری نسبت به خاک نوع دوم است، تغییر بیشتری در نتایج به دنبال دارد.

مراجع

معاونت امور مسکن و ساختمان، وزارت مسکن و شهرسازی، مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ایران (۱۳۸۷) طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی. نشر توسعه ایران

موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، آیین‌نامه طراحی ساختمان در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰(ویرایش چهارم

Beaty MH and PM Byrne (2001) Observations on the San Fernando Dams. *In Proceedings of 4th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*,, San Diego, California

Bray JD and Dashti S (2012) Liquefaction-Induced Building Movements. *2nd International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*. Taormina, Italy

Byrne PM., et al (2006) Analysis and Design of Earth Structures to Resist Seismic Soil Liquefaction. *59th Canadian Geotechnical Conference & 7th Joint CGS/IAH-CNC Groundwater Specialty Conference.* Vancouver ,Canada,**:** 1-24

Galal K and Naimi M (2008)Effect of conditions on the Response of Reinforced Concrete Tall Structures to Near Fault Earthquakes. *The Structural Design of Tall and Special Buildings* **17**(5): 541-562

Gazetas G and Mylonakis G (1998) Seismic Soil-Structure Interaction: New Evidence and Emerging Issues. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III*, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, **75**: 1119-1174

NA H and Nateghi F (2004) Shake table study of soil structure interaction effects on seismic response of single and adjacent buildings. *Proceedings of the13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada

OpenSees—Open system for earthquake engineering simulation. Pacific earthquake engineering research center. PEER. Richmond (CA, USA)

Raychowdhury P (2009) Effect of soil parameter uncertainty on seismic demand of low-rise steel buildings on dense silty sand. *Soil Dyn Earthq Eng* 29: 1367–1378

Raychowdhury P (2011) Seismic response of low-rise steel moment-resisting frame (SMRF) buildings incorporating nonlinear soil–structure interaction) SSI). *Engineering Structures* 33: 958–967

Wolf J (1998) Soil-Structure Interaction Analysis in Time Domain. New Jersey., Prentice Hall Co