

چکیده

با توجه به اینکه فضای شهری دارای ساختمان‌هایی با ارتفاع‌های متفاوت و چیدمان بسیار نزدیک به یکدیگر است، اثرات اندرکنشی محیط مجاور بر پاسخ سازه‌ها تأثیرگذار خواهد بود. در این مقاله به بررسی اثرات اندرکنشی سازه‌های مجاور^۱ بر پاسخ لرزه‌ای یکدیگر پرداخته شده است. بدین منظور روسازه^۲ از نوع قاب خمشی بتنی با سه تپ ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه واقع بر فونداسیون سطحی گسترده و ساختگاه متشکل از خاک نوع III بر اساس روش مستقیم^۳ و با محیط مرزی مناسب به صورت سه‌بعدی مدل شده‌اند. اعضای فصل مشترک جهت شبیه‌سازی تماس اصطکاکی و لغزش احتمالی در اثر تحریک لرزه‌ای با استفاده از نرم‌افزار OpenSees به کار برده شده است. بررسی پاسخ‌های شتاب، جابه‌جایی نسبی و نیروی برشی طبقات نشان داد که اثرات اندرکنش و مجاورت بر پاسخ دینامیکی سازه‌ها به خصوصیات دینامیکی سازه، نوع و محتوای فرکانسی زمین‌لرزه و نحوه مجاورت سازه‌ها از نظر ارتفاعی وابسته است. نتایج نشان داد، شتاب، جابه‌جایی نسبی و نیروی برشی سازه‌های کوتاه (۵ طبقه) در حالت مجاورت با سازه‌های بلندتر (۱۵ طبقه) در مقایسه با حالت سازه منفرد، به ترتیب افزایش ۱۰، ۲۰ و ۴۰ درصدی را تجربه می‌کند. برای سازه‌های متوسط (۱۰ طبقه) مجاورت با سازه‌های کوتاه (۵ طبقه) موجب کاهش پاسخ شتاب تا ۲۴ درصد و در مجاورت با سازه‌های بلندتر (۱۵ طبقه) جابه‌جایی نسبی و برش به ترتیب ۲۰ و ۱۶ درصد افزایش را نشان می‌دهد.

همچنین پاسخ شتاب سازه‌های نسبتاً بلند (۱۵ طبقه) در مجاورت با سازه‌های هم‌ارتفاع به میزان ۱۵ درصد کاهش و جابه‌جایی نسبی در مجاورت با سازه با ارتفاع متوسط (۱۰ طبقه) ۲۳ درصد کاهش را نشان می‌دهد. این در حالی است که این سازه در مجاورت با سازه‌های کوتاه مرتبه (۵ طبقه) افزایش ۳۵ درصدی در برش پایه را تجربه می‌کند. با توجه به نتایج حاصل می‌توان گفت در نظرگیری اثر سازه-خاک-سازه می‌تواند موجب تغییر قابل توجه در پاسخ‌های مختلف سازه‌ای بشود و لازم است در طراحی سازه‌ها این مسئله لحاظ گردد.

واژگان کلیدی: اندرکنش سازه-خاک-سازه^۴، سازه‌های مجاور، تحلیل‌های دینامیکی، OpenSees.

عملکرد لرزه‌ای سازه‌های مجاور هم بالحاظ نمودن اندرکنش خاک-سازه

بهروزه شریفی

دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی
مهندسی، دانشگاه خوارزمی، تهران

غلامرضا نوری (نویسنده مسئول)

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه
خوارزمی، تهران
r.nouri@khu.ac.ir

علی قنبری

استاد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه
خوارزمی، تهران

۱- مقدمه

را نمی‌توان نادیده گرفت؛ هرچند در مطالعات حوزه اندرکنش خاک و سازه، توجه چندانی به اندرکنش سازه‌های مجاور (اندرکنش سازه-خاک-سازه) نشده است. تحت چنین شرایطی اندرکنش دینامیکی^۵ سازه‌ها از طریق انرژی ساطع شده از یک سازه مرتعش به سازه‌ای دیگر اتفاق خواهد افتاد. از این رو

مطالعات گسترده‌ای که طی چندین دهه اخیر در خصوص بحث اندرکنش خاک و سازه انجام شده است، بیانگر اهمیت این موضوع در حوزه مهندسی زلزله است و زمین به عنوان عضوی رابط بین سازه‌های مجاور، مسبب وابستگی ارتعاشی میان آنها می‌شود. لذا اثرات اندرکنشی محیط مجاور بر پاسخ سازه‌ها

اندرکنش به وجود خواهد آمد. این اختلاف، زمانی که سیستم سازه‌ای قاب خمشی واقع بر ساختگاه‌هایی با سرعت موج برشی کمتر از (600 m/s) باشد، چشمگیر خواهد بود [۹-۱۱].

روش‌های متعددی برای حل مسئله اندرکنش دینامیکی خاک و سازه وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به روش‌های حل ساده مهندسی، روش مستقیم، روش مختلط و روش زیر سازه^۷ اشاره کرد [۱۲-۱۵]. در میان روش‌های ذکر شده روش مستقیم دارای اهمیت ویژه‌ای از نظر مهندسی زلزله است که البته نسبت به روش‌های دیگر نیاز به صرف زمان بیشتر و کامپیوترهای با قدرت پردازش بالاست. در این تحقیق با استفاده از روش مستقیم و مدل‌سازی سه‌بعدی به بررسی پاسخ تحلیل‌های دینامیکی صورت گرفته بر سازه‌ها در حالت مجاورت با سازه‌ای دیگر واقع بر بستر انعطاف‌پذیر^۸، پرداخته شده و با پاسخ سازه در حالت منفرد مقایسه شده است.

۲- مدل‌سازی روسازه‌ها

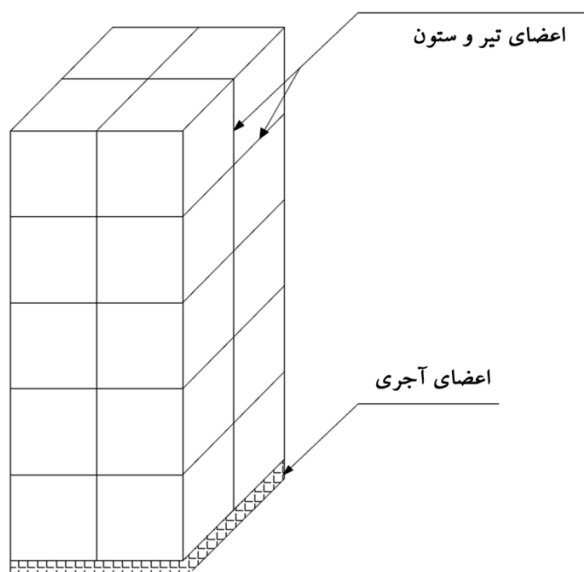
در بسیاری از تحقیقات انجام شده به منظور کاهش حجم محاسبات، ساده‌سازی روسازه به صورت‌های سیستم فنر و جرم متمرکز^۹ و یاقابی شکل انجام گرفته است و توجه کمتری به حالت سه‌بعدی روسازه شده و از اثر وابستگی اعضا که برای سازه‌های پیچیده و حجیم بسیار حائز اهمیت است، چشم‌پوشی شده است. در این مقاله جهت مدل‌سازی سه‌بعدی روسازه‌ها از سه سازه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با سیستم قاب خمشی بتنی، دارای دو دهانه ۵ متری در جهت X و ۴ متری در جهت Z، با فونداسیون سطحی گسترده استفاده شده است. برای تحلیل اولیه و طراحی اعضای روسازه‌ها مطابق با آیین‌نامه بتن ایران و با استفاده از نرم‌افزار ETABS، بارگذاری ثقلی و جانبی به ترتیب با ملاحظه مبحث ششم آیین‌نامه مقررات ملی ساختمان و استاندارد ۲۸۰۰ ایران، با در نظرگیری بار گسترده کف‌ها به مقدار ۶۰۰ و زنده بام و طبقات ۲۰۰ (kg/m^2) انجام شده به علاوه وزن تیرها و ستون‌ها با توجه به وزن مخصوص معرفی شده در برنامه به صورت بار مرده به بارهای

خصوصیات دینامیکی سازه‌ها، مانند مشخصه‌های پاسخ لرزه‌ای سازه به پاسخ لرزه‌ای سازه مجاور وابسته خواهد بود و بنا به طرز قرارگیری آنها در کنار هم، از نظر هندسی [۱] و یا از نظر ارتفاعی [۲-۳]، ممکن است افزایش و یا کاهش پاسخ رخ دهد. مطابق با تحقیقات ژیانگ و یان [۴]، دو ساختمان با فاصله کمتر از ۲/۵ برابر عرض فونداسیون با یکدیگر در اندرکنش خواهند بود و هنگامی که فاصله کمتر از یک برابر عرض فونداسیون باشد، پاسخ سازه‌ها ممکن است افزایش و یا کاهش چشمگیری داشته باشند. همچنین ساختمان‌هایی که مجاور دو همسایه هستند اثر اندرکنشی بزرگ‌تری نسبت به ساختمان‌های مجاور یک همسایه دارند؛ در این موارد با افزایش ارتفاع سازه‌های مجاور پاسخ سازه بیشتر و با کاهش ارتفاع سازه‌های کناری پاسخ کمتری به دست آمده است [۵]. بنابراین اندرکنش بین ساختمان‌های مجاور در تحلیل سازه‌ها باید مد نظر قرار گیرد.

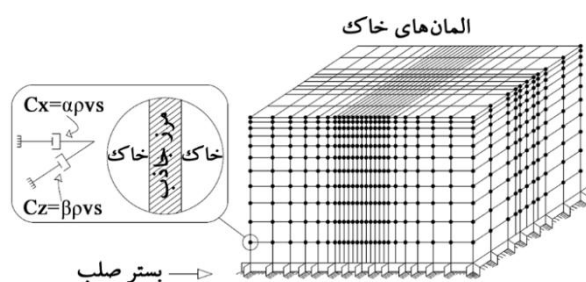
مسئله اندرکنش سازه-خاک-سازه (SSSI)، در دهه‌های اخیر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. لوکو و کانتس در سال ۱۹۷۳ برای اولین بار این بحث را مطرح نمودند و آن را اندرکنش دینامیکی تداخلی^۶ عنوان کردند. در حقیقت اندرکنش سازه-خاک-سازه تأثیر حضور سازه‌های مجاور یکدیگر با در نظرگیری اثر اندرکنش خاک تحت تحریک‌های دینامیکی است. تحریک‌های دینامیکی می‌تواند ناشی از بارهای خارجی و یا امواج لرزه‌ای باشد [۶].

تحقیقات گسترده‌ای که روی اندرکنش خاک-سازه انجام شده است، بیانگر این است که پاسخ سازه تحت اثر اندرکنش دینامیکی به خصوصیات دینامیکی ساختمان، ویژگی فونداسیون و مشخصه تحریک وابسته است [۷]. پی‌یود اصلی و میرایی سازه‌ها با ملاحظه اندرکنش خاک و سازه ممکن است بلندتر به دست آید [۸]. وقتی که در سازه پاسخ مود اول غالب باشد، در اغلب موارد می‌توان از تأثیر اندرکنش خاک و سازه چشم‌پوشی کرد؛ اما وقتی که نتوان از تأثیر موده‌های بالاتر چشم‌پوشید اختلاف بزرگی میان نتایج دو فرض اندرکنش خاک و سازه و بدون

بستر صلب با استفاده از مشخصات شرایط مرزی ثابت و گیردار در پایین‌ترین تراز افقی خاک، تعریف شده است. بر اساس نظریه محققین با قرار دادن میراگر در مرزها و مستهلک کردن انرژی، اثر انتشار امواج به خارج از محیط خاک شبیه‌سازی شده است. بدین منظور از مرز جاذب ویسکوز^{۱۵} که متشکل از المان‌های تک‌بعدی با ماده ویسکوز استفاده شده است



شکل (۱): مدل سازی روسازه‌ها.



شکل (۲): مدل سازی زیرسازه.

جدول (۱): مشخصات دینامیکی خاک (رس با سختی متوسط) مورد استفاده در مدل سازی (Vs=270 m/s) [۱۶].

مشخصات	مقدار	مشخصات	مقدار
$\rho = \text{mass density } (\frac{\text{kg}}{\text{m}^3})$	۱۷۵۹۵	$K = \text{bulk modulus (kpa)}$	$۹/۳۷ \times ۱۰^۴$
$G = \text{shear modulus (kpa)}$	$۱۵/۹ \times ۱۰^۳$	$\nu = \text{Poisson's ratio}$	۰/۴۲
$E = \text{elastic modulus (kpa)}$	$۴/۵ \times ۱۰^۳$	$c = \text{cohesion intercept (kpa)}$	۹۰
$\varphi = \text{friction angle (deg)}$	۲۴	$c_{sb} = \text{interface cohesion (kpa)}$	۵۰
$k_n = \text{normal stiffness } (\frac{\text{kpa}}{\text{m}})$	$۷/۶ \times ۱۰^۴$	$k_s = \text{shear stiffness } (\frac{\text{kpa}}{\text{m}})$	۸×۱۰^۳

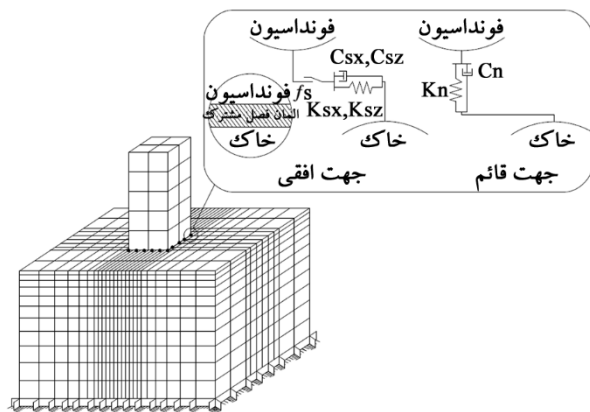
فوق توسط نرم افزار اضافه شده و در نهایت مقاطع سازه مطابق با مبحث نهم مقررات ملی ساختمان طراحی گردیده است. شکل (۱)، نمایی از مدل سازی یکی از روسازه‌ها را نشان می‌دهد که با فرض اعضای سازه‌ای متشکل از المان‌های تیر-ستون غیرخطی^{۱۰} کنترل شونده بر اساس نیرو با پلاستیسیته گسترده در طول عضو که بین نقاط معرفی شده از قبل قرار می‌گیرند، با استفاده از نرم افزار OpenSees مدل سازی شده است. جهت مدل سازی فونداسیون گسترده سطحی، از مجموعه‌ای از المان‌های پیوسته آجری شش وجهی و با فرض رفتار الاستیک ایزوتروپیک در محیط سه بعدی، با کرنش و تنش مسطح^{۱۱} و فیبر صفحه‌ای استفاده شده است.

۳- مدل سازی زیرسازه

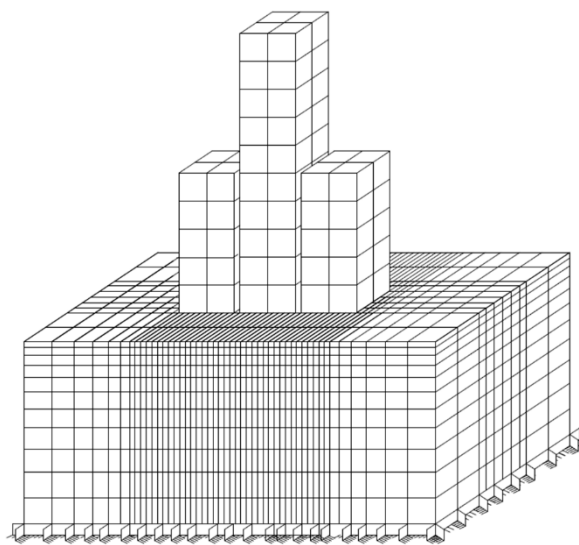
همان‌طور که در شکل (۲) می‌توان دید، زیرسازه از سه بخش اصلی المان خاک^{۱۲}، بستر صلب^{۱۳} و مرز جاذب^{۱۴} تشکیل شده است. مطابق با جدول (۱)، خاک مورد بررسی طبق طبقه بندی آیین نامه ۲۸۰۰ ایران از نوع III با سرعت موج برشی $۲۷۰ \text{ (m/s}^2)$ بوده است [۱۶] و المان‌های خاک در محیط سه بعدی و با استفاده از المان‌های حجمی آجری و با فرض رفتار الاستوپلاستیک که دارای هشت گره با درجات آزادی انتقالی، برای مشخص کردن مرز المان هستند، مدل سازی شده‌اند. به دلیل حجم زیاد المان‌های خاک و وقت گیر بودن محاسبات، المان‌های خاک دارای ابعاد متغیر بوده؛ به طوری که در نزدیکی سازه از المان‌های مکعبی ریز (۱m^3) و در نواحی دورتر از المان‌های درشت‌تر (۵m^3) استفاده شده است.

جابه‌جایی نداشته باشد و تنها در جهات افقی بتواند حرکت کند [۱۷].

در تحقیق حاضر تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی غیر خطی با استفاده از مؤلفه‌های افقی سه داده جابه‌جایی زلزله که همگی مطابق با دستورالعمل آیین نامه زلزله ۲۸۰۰ ایران مقیاس شده‌اند، انجام شده است (جدول ۲ و شکل ۵).



شکل (۳): مدل اندرکنش خاک سازه برای مدل سازه منفرد.



شکل (۴): مدل سازه‌های مجاور.

جدول (۲): مشخصات داده زلزله‌های به کار برده شده در این تحقیق.

نام زلزله	ایستگاه	سال وقوع	سرعت موج برشی (m/s)	بزرگا	فاصله از گسل (Km)	PGD (m)
Iwait	Minse Yuzawa	۲۰۰۸	۶۵۵/۴۵	۶/۹۰	۱۷/۳۴	۰/۰۴۳
Loma Prieta	Gilroy Array#6	۱۹۸۹	۶۶۳/۳۱	۶/۹۳	۱۷/۹۲	۰/۰۵۱
Taiwan SMART1(45)	E02 SMART1	۱۹۸۶	۶۷۱/۵۲	۷/۳۰	۵۱/۳۵	۰/۰۶۷

که دارای رفتار الاستیک غیر خطی بوده و در جهات موازی با سطح در نواحی مرز جانبی خاک قرار گرفته است. فاصله افقی بین مرزهای جانبی خاک پنج برابر بعد سازه و فاصله قائم تا بستر صلب نیز ۳۰ متر فرض شده است [۱۶].

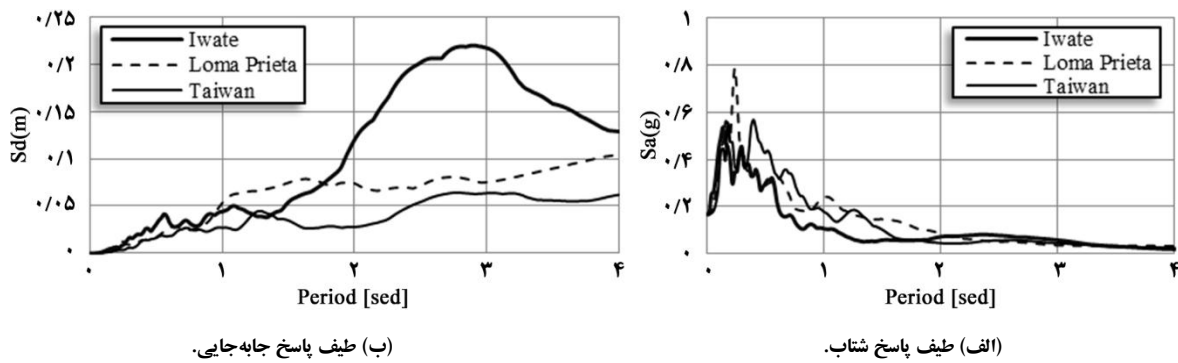
در شکل (۲)، C_x ضریب میرایی میراگر موازی با سطح در جهت x ، C_z ضریب میرایی میراگر موازی با سطح در جهت z ، ρ وزن مخصوص خاک و α و β ضرایب متغیری هستند که به ابعاد المان بستگی دارند.

۴- مدل سازی اعضای فصل مشترک بین سازه و زیرسازه

در شبیه‌سازی اندرکنش خاک و سازه، مرز بین فونداسیون و خاک مجاور آن توسط المان‌های فصل مشترک^{۱۶} مشخص شده است (شکل‌های ۳ و ۴). این اعضا بیانگر سختی برشی و قائم بین دو سطح تماس به یکدیگر هستند و به صورت سیستم‌های خطی^{۱۷}، با مقاومت برشی فصل مشترک که مطابق با معیار گسیختگی موهر-کلمب^{۱۸} تعریف شده‌اند، مدل سازی شده است. حرکت نسبی فصل مشترک با فنر و میراگر در جهات قائم و مماسی کنترل شده است. بر پایه رابطه پیشنهادی گروه مشاورین ایتاسکا^{۱۹}، سختی قائم و مماسی فصل مشترک به کار رفته (در جدول ۱) آمده است [۱۶].

۵- تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی

از آنجایی که در تحلیل‌های استاتیکی، سیستم خاک-سازه، تنها تحت بارگذاری ثقلی بوده؛ لذا مطابق با شکل‌های (۲) و (۳)، مرز پایین سیستم در تمامی جهات گیردار و مرزهای جانبی نیز در جهات افقی گیردار و در جهت قائم باز هستند و در تحلیل‌های دینامیکی، تاریخچه شتاب، جابه‌جایی یا سرعت افقی در سرتاسر سنگ بستر مدل شده، اعمال می‌شود. در این مرحله سیستم خاک-سازه تحت بارگذاری جانبی بوده و شرایط مرزی جانبی به گونه‌ای تعریف می‌شود که سیستم در جهت قائم



شکل (۵): طیف پاسخ داده‌های زلزله استفاده شده در این تحقیق.

به خصوص در مودهای بالاتر، شاهد طولانی‌تر شدن پریود، تا بیش از دو برابر خواهیم بود.

۷- اندرکنش لرزه‌ای سازه- خاک- سازه

برای بررسی اندرکنش لرزه‌ای سازه- خاک- سازه، ابتدا پاسخ لرزه‌ای سازه‌های منفرد (۵، ۱۰، ۱۵ طبقه) واقع بر بستر انعطاف‌پذیر^{۱۹} تعیین و سپس با در نظرگیری فاصله‌ای مناسب بین سازه‌ها، با پاسخ سازه وسطی درحالی‌که در مجاورت دو سازه کناری قرار دارد، مقایسه شده است. از آنجایی‌که در این تحقیق اثر ضربه ساختمان‌های مجاور مد نظر نخواهد بود، فاصله بین سازه‌ها طوری انتخاب شده است که اولاً نظر آیین‌نامه ۲۸۰۰ را تأمین کند و ثانیاً با در نظرگیری بیشینه جابه‌جایی بام، هیچ برخوردی بین سازه‌های مجاور صورت نگیرد.

چیدمان سازه‌های مجاور طوری انتخاب شده است که اثر پاسخ لرزه‌ای سازه‌های مجاور هم ارتفاع، بلندتر و کوتاه‌تر، در حالت‌های مختلف، با یکدیگر مقایسه شود. در این خصوص با بررسی مقدار بیشینه مقادیر حاصله از سه زوج شتاب‌نگاشت معرفی شده در بخش قبل نظیر شتاب نسبی افقی، جابه‌جایی نسبی و نیروی برشی طبقات در سازه‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه درحالی‌که به صورت منفرد بر روی خاک با عمق سنگ بستر ۳۰ متر قرار دارند، باحالتی‌که در مجاورت سازه‌های هم‌ارتفاع، بلندتر یا کوتاه‌تر می‌باشند، با یکدیگر مقایسه شده است. مدل‌های مورد بررسی تحت تحریکات زلزله‌های معرفی شده در بخش قبل در دو جهت افقی واقع در پلان قرار گرفته‌اند.

دلیل انتخاب داده‌های زلزله‌های آی ویت (۲۰۰۸)، لوماپریتا (۱۹۸۹) و تایوان (۱۹۸۶) در ایستگاه‌های معرفی شده (در جدول ۲)، به دلیل صلیب بالای خاک در این ایستگاه‌هاست که با صلیب خاک نوع I (سنگ بستر در مدل سازی) و ویژگی‌هایی که از نظر آیین‌نامه استاندارد ۲۸۰۰ شرایط زلزله طرح از قبیل بزرگ، فاصله از گسل، سازوکار چشمه لرزه‌زا و مدت زمان حرکت شدید زمین را ارضا کنند، مطابقت دارد. همچنین بیشینه جابه‌جایی آنها در محدوده‌ای مناسب قرار گرفته است که این امر باعث عدم پراکندگی پاسخ‌ها خواهد بود. حرکت جنبش شدید زمین به دو صورت به مدل وارد شده است. در هر دو صورت سازه منفرد با پایه انعطاف‌پذیر (مدل خاک- سازه) و سازه در حالت مجاورت (مدل سازه- خاک- سازه)، سنگ‌بستر تحت جابه‌جایی پایه قرار گرفته است. در همه موارد بیشینه مقادیر نظیر شتاب نسبی افقی، جابه‌جایی، جابه‌جایی نسبی و نیروی برشی طبقات بررسی شده است.

۶- ویژگی‌های ارتعاش طبیعی سازه‌ها

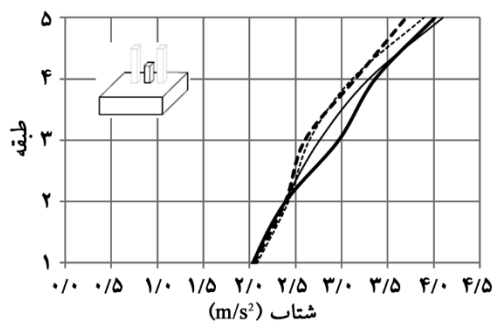
جهت بررسی اندرکنش سازه- خاک- سازه و خاک- سازه، مقایسه پریود ارتعاش طبیعی سازه‌ها با سازه متکی بر پایه صلب، با فرض میرایی ۵٪ (در چهار مود اول در دو جهت واقع در پلان) انجام شده است:

همان‌طور که از جدول (۳) می‌توان ملاحظه نمود؛ با در نظرگیری اثر ساختگاه، پریود طبیعی بلندتر خواهد شد.

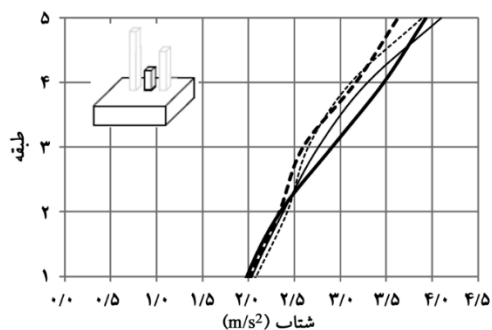
جدول (۳): پریود ارتعاش طبیعی سازه‌ها در ۴ مود اول در حالت پایه صلب و انعطاف پذیر.

پریود ارتعاش طبیعی (۴ مود اول)								مدل سازه‌ای	
۴		۳		۲		۱			
Tz	Tx	Tz	Tx	Tz	Tx	Tz	Tx	Fixed base	۵ طبقه
۰/۰۶	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۱۷	۰/۱۷	۰/۵۱	۰/۵۲	SSI	
—	—	—	—	۰/۳۰	۰/۳۴	۰/۶۶	۰/۶۸	Fixed base	۱۰ طبقه
۰/۱۲	۰/۱۳	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۳۲	۰/۳۳	۰/۸۷	۰/۸۹	SSI	
—	—	۰/۶	۰/۶	۰/۶۵	۰/۶۵	۱/۳۶	۱/۳۰	Fixed base	۱۵ طبقه
۰/۱۷	۰/۱۸	۰/۲۶	۰/۲۷	۰/۴۴	۰/۴۵	۱/۱۸	۱/۱۸	SSI	
۰/۷	۰/۷	۰/۸۰	۰/۸۰	۱/۰۵	۰/۸۰	۲/۲۲	۱/۸۸	—	

سازه‌های هم‌ارتفاع (شکل ۶-الف) در جهت X در طبقات پایین افزایش و در طبقات بالایی کاهش داشته است. در جهت Z نیز در طبقات بالایی کاهش و در طبقات پایینی تغییر خاصی نداشته است. در شکل‌های (۶-ب) تا (۶-د) ملاحظه می‌شود که مجاورت با سازه‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه باعث افزایش پاسخ تا ۱۰ درصد در جهت X در طبقه سوم شده است و در جهت Z تغییر چندانی دیده نمی‌شود. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت وجود سازه بلندتر منجر به افزایش پاسخ شتاب در طبقات سازه، نسبت به حالت منفرد شده است.



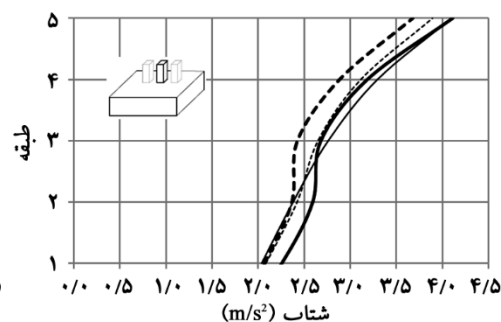
(ب) بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۰ طبقه کناری و ساختمان ۵ طبقه منفرد.



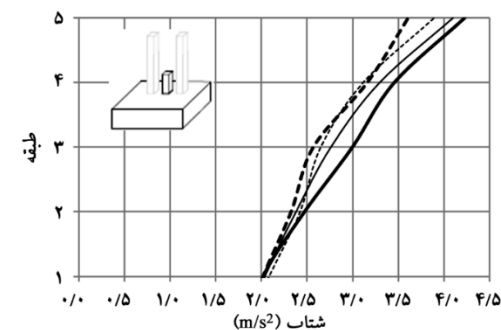
(د) بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ و ۱۰ طبقه کناری و ساختمان ۵ طبقه منفرد.

۷-۱- بیشینه شتاب نسبی افقی نسبت به سطح زمین طبقات سازه ۵ طبقه در حالت مجاورت و سازه منفرد

توزیع بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی نسبت به سطح زمین ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه کناری واقع بر بستر انعطاف پذیر در امتداد سازه در دو جهت X و Z در پلان، در مقابل پاسخ سازه منفرد در شکل (۶) نشان داده شده است. تغییرات شتاب در ارتفاع سازه ۵ طبقه منفرد دارای شیب ملایم و افزایشی در هر دو جهت بوده، به طوری که در حالت مجاورت با



(الف) بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۵ طبقه کناری و ساختمان ۵ طبقه منفرد.



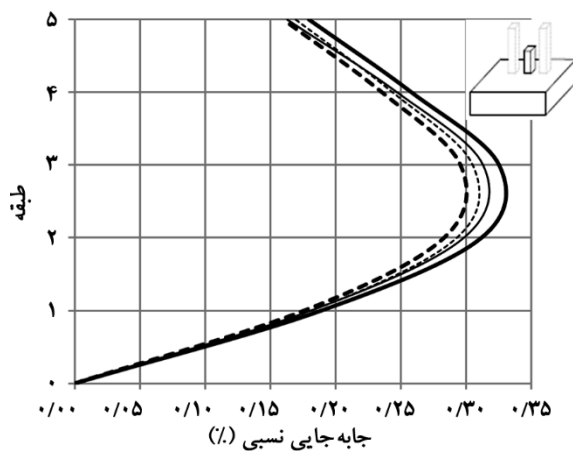
(ج) بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ طبقه کناری و ساختمان ۵ طبقه منفرد.

شکل (۶): مقایسه بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات در ساختمان ۵ طبقه به صورت منفرد و مجاور (— جهت X در حالت مجاورت، --- جهت Z در حالت مجاورت، ——— جهت X در حالت منفرد و ----- جهت Z در حالت منفرد).

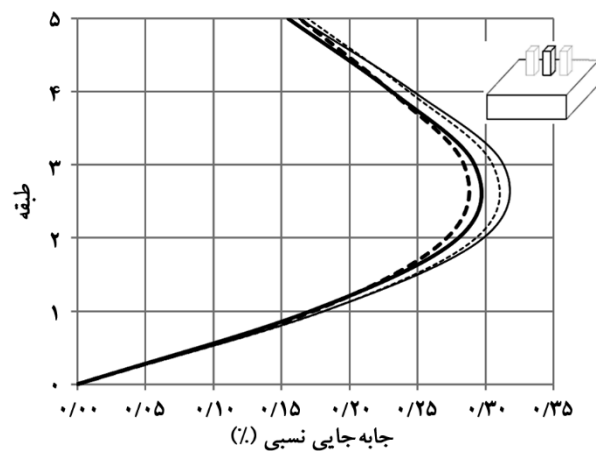
مجاور، پاسخ سازه در جهت X ، افزایش و در جهت Z با وجود کاهش نسبت به حالت منفرد ولی نسبت به حالت الف، افزایش داشته است. در حالت مجاورت با سازه‌های ۱۰ طبقه بیشترین پاسخ در جهت X و به میزان ۴ درصد و در حالت مجاورت با سازه‌های ۱۵ طبقه نیز بیشترین پاسخ در جهت X ولی به میزان ۲۰ درصد افزایش داشته است. در شکل (۷-د)، با وجود دو سازه مجاور غیر هم‌ارتفاع ۱۰ و ۱۵ طبقه پاسخ سازه بین دو حالت (ب) و (ج)، و به میزان ۱۴ درصد افزایش مشاهده شده است.

۷-۲- پیشینه پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات سازه ۵ طبقه در حالت مجاورت و سازه منفرد

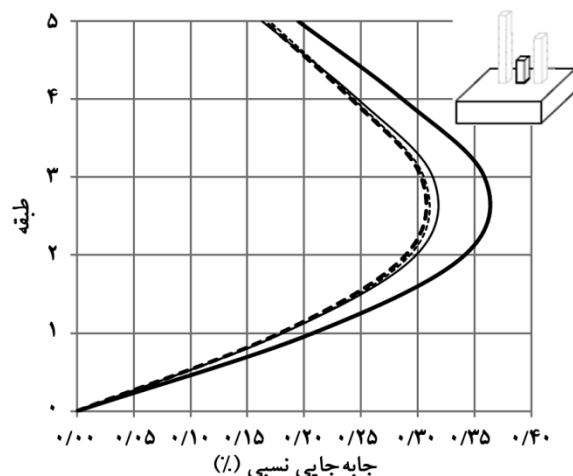
پاسخ‌های جابه‌جایی نسبی ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت در مقایسه با حالت منفرد، مطابق با شکل (۷) نشان داده است که در حالت مجاورت با سازه‌های هم‌ارتفاع (شکل ۷-الف) پاسخ شتاب در هر دو جهت تا میزان ۷ درصد کاهش یافته، به طوری که بیشترین کاهش در طبقات دوم و سوم مشاهده شده است. در شکل‌های (۷-ب) و (۷-ج)، با افزایش ارتفاع طبقات



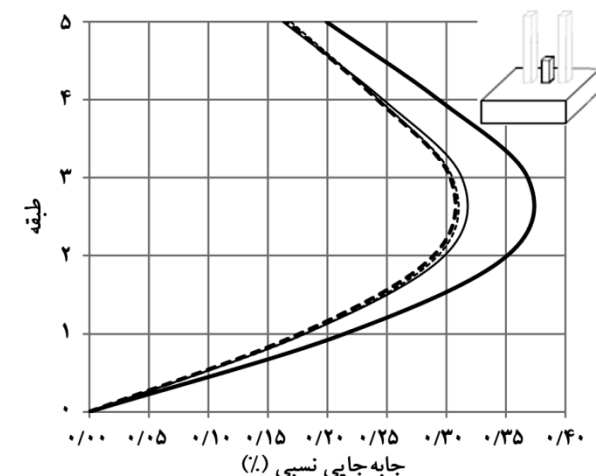
(ب) پیشینه پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۰ طبقه کناری و ساختمان ۵ طبقه منفرد.



(الف) پیشینه پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۵ طبقه کناری و ساختمان ۵ طبقه منفرد.



(د) پیشینه پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ و ۱۰ طبقه کناری و ساختمان ۵ طبقه منفرد.



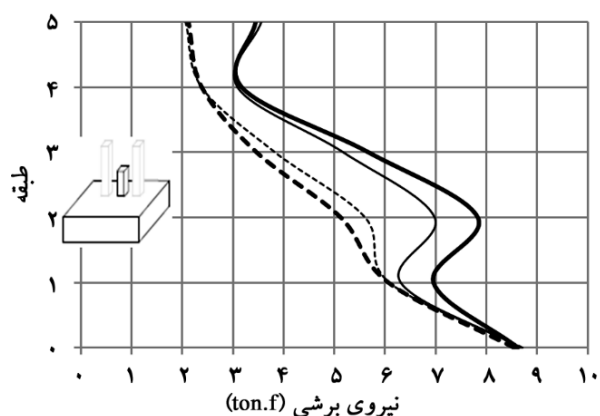
(ج) پیشینه پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ طبقه کناری و ساختمان ۵ طبقه منفرد.

شکل (۷): مقایسه پیشینه پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات در ساختمان ۵ طبقه به صورت منفرد و مجاور (—) جهت X در حالت مجاورت، --- جهت Z در حالت مجاورت، — جهت X در حالت منفرد و ----- جهت Z در حالت منفرد.

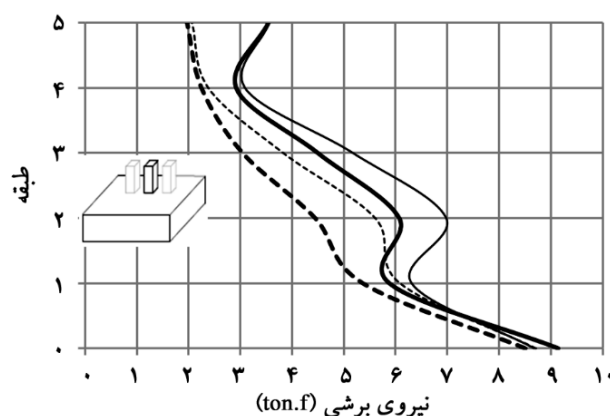
به حالت الف، افزایش دارد. در شکل (۸-د)، با قرارگیری دو سازه مجاور غیر هم ارتفاع ۱۰ و ۱۵ طبقه، پاسخ سازه بین دو حالت ب و ج به دست آمده و به میزان ۲۵ درصد افزایش داشته است. به طور کلی در عملکرد لرزه‌ای ساختمان ۵ طبقه می‌توان گفت که با وجود سازه‌های ۵ طبقه کناری پاسخ سازه نسبت به حالت منفرد کاهش یافته ولی با افزایش طبقات ساختمان مجاور، پاسخ سازه افزایش می‌یابد.

۳-۷- بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات سازه ۵ طبقه در حالت مجاورت و سازه منفرد

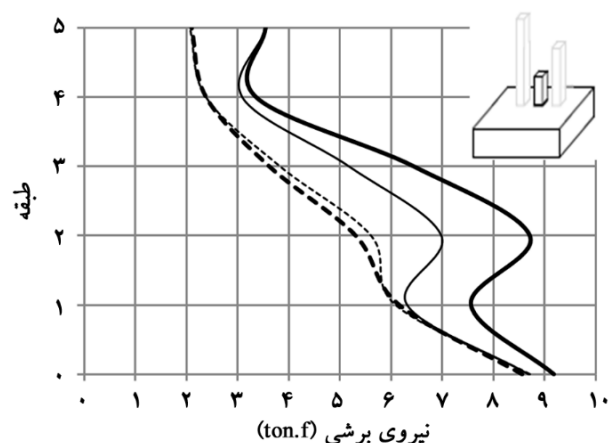
بر اساس نتایج نشان داده شده در شکل (۸)، بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با سازه‌های هم ارتفاع (شکل ۸-الف) نسبت به حالت منفرد در هر دو جهت تا ۲۰ درصد کاهش داشته است. در حالی که با افزایش ارتفاع طبقات مجاور (شکل‌های ۸-ب و ۸-ج)، پاسخ سازه در جهت X، تا ۴۰ درصد افزایش و در جهت Z با وجود کاهش نسبت به حالت منفرد ولی نسبت



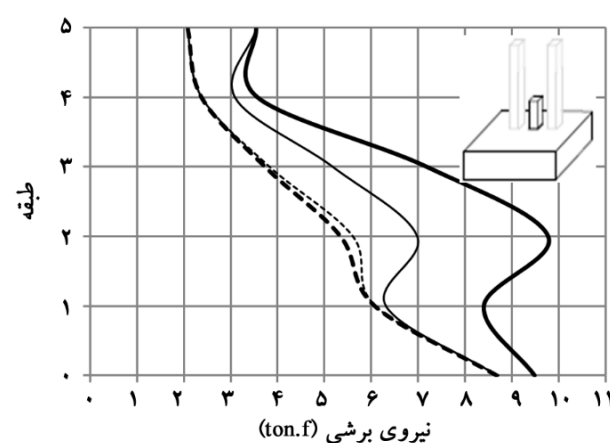
(ب) بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۰ طبقه کناری و ساختمان ۵ طبقه منفرد.



(الف) بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۵ طبقه کناری و ساختمان ۵ طبقه منفرد.



(د) بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه کناری و ساختمان ۵ طبقه منفرد.



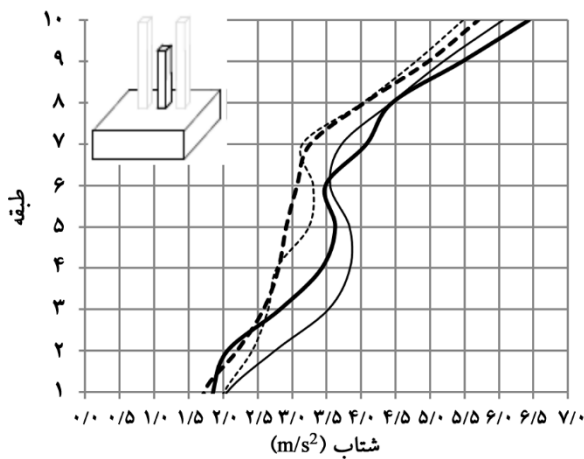
(ج) بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات ساختمان ۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ طبقه کناری و ساختمان ۵ طبقه منفرد.

شکل (۸): مقایسه بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات در ساختمان ۵ طبقه به صورت منفرد و مجاور (جهت X در حالت مجاورت، --- جهت Z در حالت مجاورت، — جهت X در حالت منفرد و ----- جهت Z در حالت منفرد).

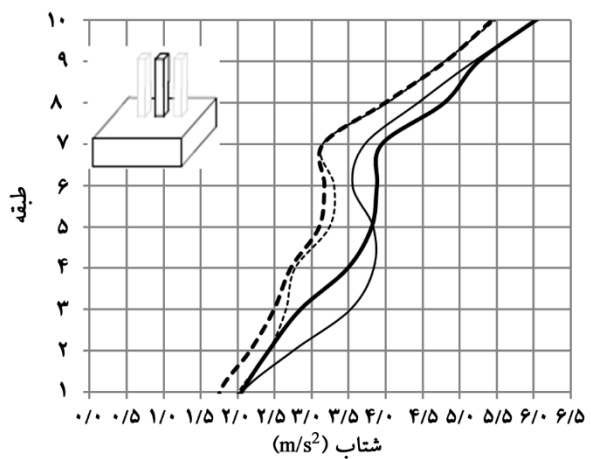
در شکل (۹-ب) در حالت مجاورت با سازه‌های بلندتر باعث افزایش پاسخ در طبقه آخر در هر دو جهت شده است. در شکل (۹-ج) در صورت مجاورت با سازه‌های کوتاه‌تر شکل پاسخ بسیار شبیه به شکل آن در حالت منفرد ولی با اندک جابه‌جایی در مقادیر بیشینه بوده؛ و در شکل (۹-د)، با قرار گرفتن ساختمان ۱۰ طبقه بین دو ساختمان ۵ و ۱۵ طبقه پاسخ سازه نیز بین پاسخ‌های حالتی است که بین دو سازه مجاور ۱۰ و ۱۵ طبقه هم‌ارتفاع قرار دارد.

۴-۷- بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات سازه ۱۰ طبقه در حالت مجاورت و سازه منفرد

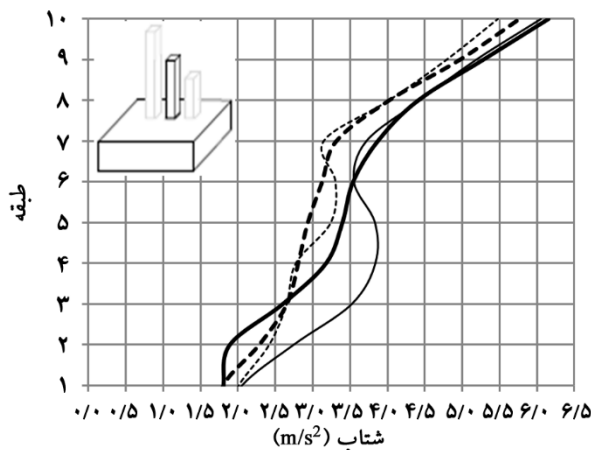
همان‌طور که در شکل (۹) ملاحظه می‌شود، نمودار تغییرات پاسخ شتاب در سازه ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با سازه‌های هم‌ارتفاع نسبت به حالت منفرد (شکل ۹-الف)، بیانگر کاهش پاسخ در طبقات پایین به میزان ۲۴ درصد و افزایش پاسخ در طبقات بالایی در جهت X بوده است. در جهت Z نیز در طبقات پایینی کاهش کم و در طبقات بالایی تغییر خاصی مشاهده نمی‌شود.



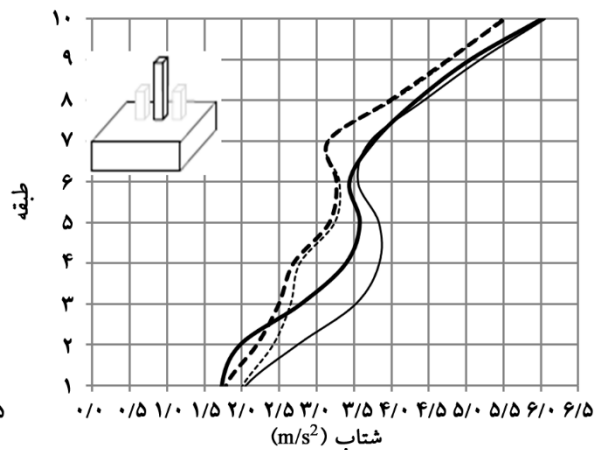
(ب) بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات ساختمان ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۰ طبقه منفرد.



(الف) بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات ساختمان ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۰ طبقه کناری و ساختمان ۱۰ طبقه منفرد.



(د) بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات ساختمان ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ و ۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۰ طبقه منفرد.



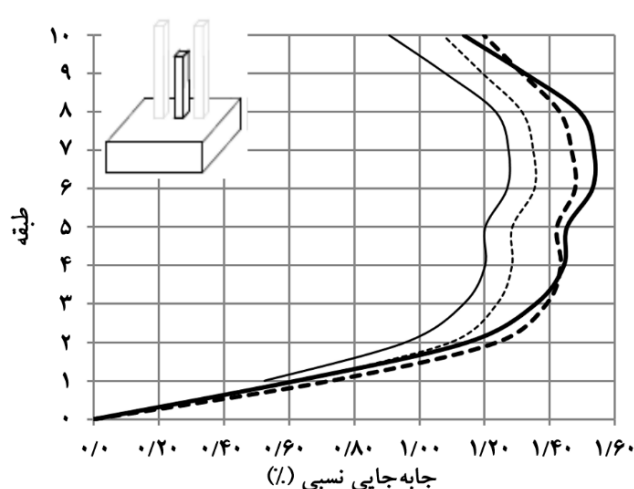
(ج) بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات ساختمان ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۰ طبقه منفرد.

شکل (۹): مقایسه بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات در ساختمان ۱۰ طبقه به صورت منفرد و مجاور (— جهت X در حالت مجاورت --- جهت Z در حالت مجاورت، — جهت X در حالت منفرد و ----- جهت Z در حالت منفرد).

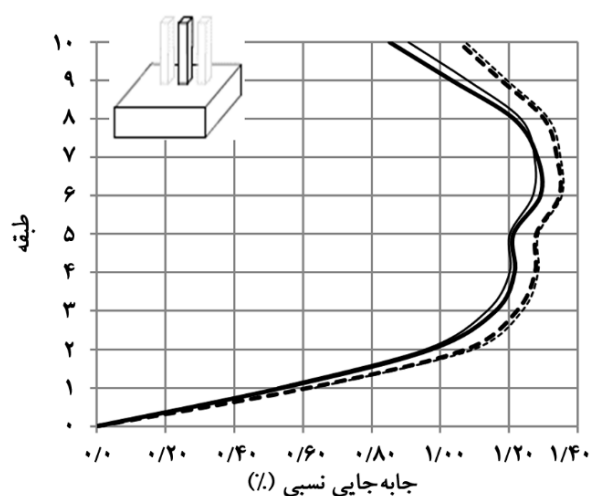
شکل (۱۰-ب)، وجود سازه‌های مجاور بلندتر پاسخ سازه را نسبت به حالت منفرد، تا ۲۰ درصد افزایش داده است. در شکل (۱۰-د) نیز حضور سازه بلند و کوتاه باعث افزایش پاسخ تا ۱۸ درصد شده است. به طور کلی پاسخ جابه‌جایی نسبی در سازه ۱۰ طبقه نسبت به سازه‌های مجاور بلندتر حساس بوده و تا حد قابل توجهی افزایشی است.

۵-۷- بیشینه پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات سازه ۱۰ طبقه در حالت مجاورت و سازه منفرد

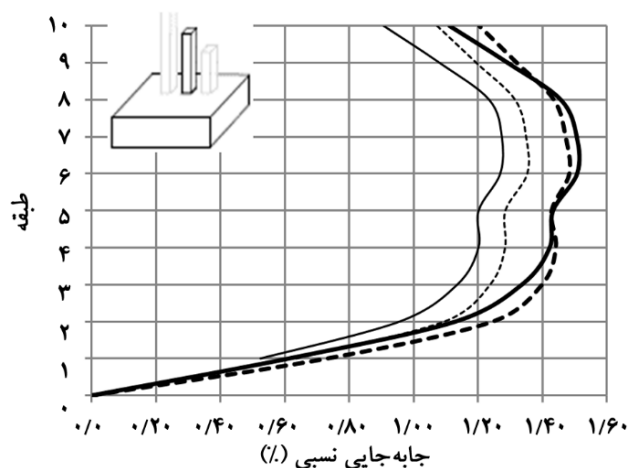
تغییرات پاسخ جابه‌جایی نسبی ساختمان ۱۰ طبقه، مطابق با شکل (۱۰) در حالت مجاورت با سازه‌های هم‌ارتفاع و کوتاه‌تر (شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ج) دارای اختلاف فراوانی در هر دو جهت نبوده و پاسخ آن مشابه حالت منفرد بوده است. ولی در



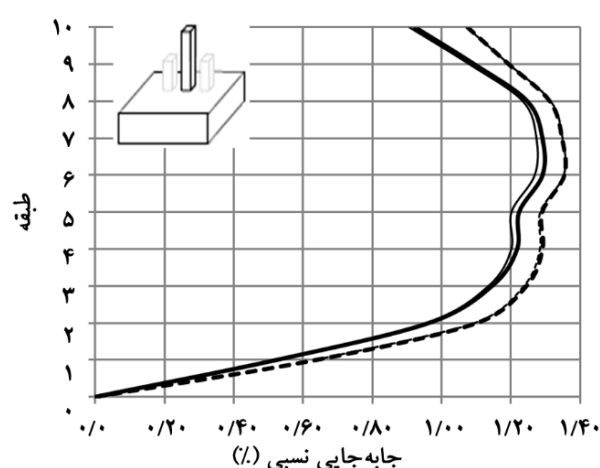
(ب) بیشینه پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۰ طبقه منفرد.



(الف) بیشینه پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۰ طبقه کناری و ساختمان ۱۰ طبقه منفرد.



(د) بیشینه پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ و ۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۰ طبقه منفرد.



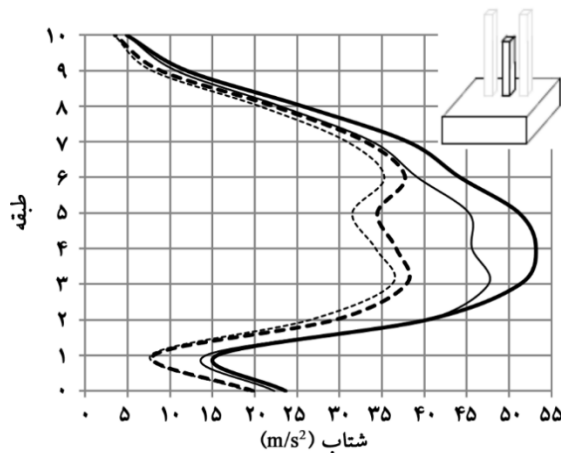
(ج) بیشینه پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات ساختمان ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۰ طبقه منفرد.

شکل (۱۰): مقایسه بیشینه پاسخ جابه‌جایی نسبی طبقات در ساختمان ۱۰ طبقه به صورت منفرد و مجاور (— جهت x در حالت مجاورت، --- جهت z در حالت مجاورت، — جهت x در حالت منفرد و ----- جهت z در حالت منفرد).

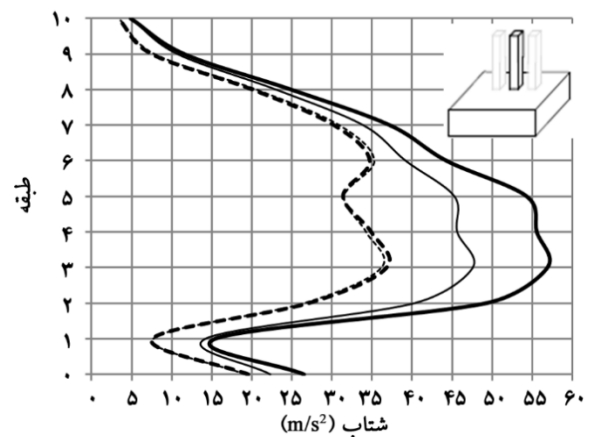
که نسبت به حالت قبل در جهت X افزایش کمتر ولی در جهت Z افزایش محسوس تری داشته است. بر اساس شکل (۱۱-ج)، ملاحظه می‌شود که وجود سازه‌های کوتاه‌تر پاسخ سازه، بسیار شبیه به پاسخ سازه منفرد است. سازه‌های مجاور غیر هم‌ارتفاع بلندتر و کوتاه‌تر از سازه مورد نظر، باعث افزایش پاسخ سازه بوده ولی به میزان کمتر از حالتی که دو سازه مجاور بلندتر می‌باشند (شکل ۱۱-د). به طور کلی در عملکرد لرزه‌ای ساختمان ۱۰ طبقه می‌توان گفت که سازه مجاور بلندتر پاسخ سازه را افزایش و سازه مجاور کوتاه‌تر پاسخ سازه را کاهش داده است و همچنین سازه کوتاه‌تر پاسخ را به سمت حالت سازه منفرد سوق می‌دهد.

۶-۷- بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات سازه ۱۰ طبقه در حالت مجاورت و سازه منفرد

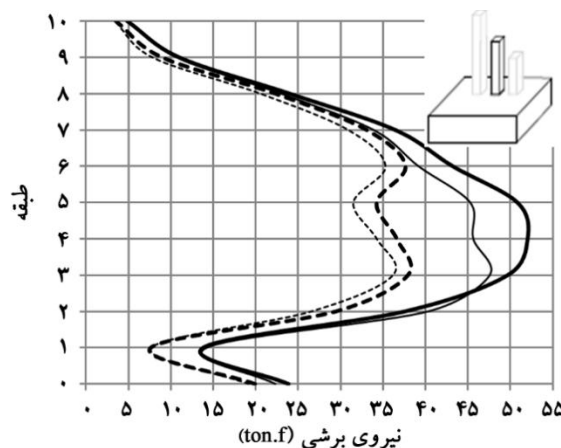
در شکل (۱۱) توزیع بیشینه پاسخ نیروی برشی ساختمان ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه کناری در امتداد سازه در دو جهت X و Z در پلان، در مقابل پاسخ سازه منفرد، نشان داده شده است. در حالت مجاورت با سازه‌های هم‌ارتفاع پاسخ در جهت X ، تا ۱۹ درصد افزایش داشته ولی در جهت Z تغییر محسوسی مشاهده نشده است (شکل ۱۱-الف). با افزایش ارتفاع طبقات مجاور، پاسخ سازه در جهت X ، تا ۱۶ درصد و در جهت Z تا ۹ درصد افزایش داشته است (شکل ۱۱-ب).



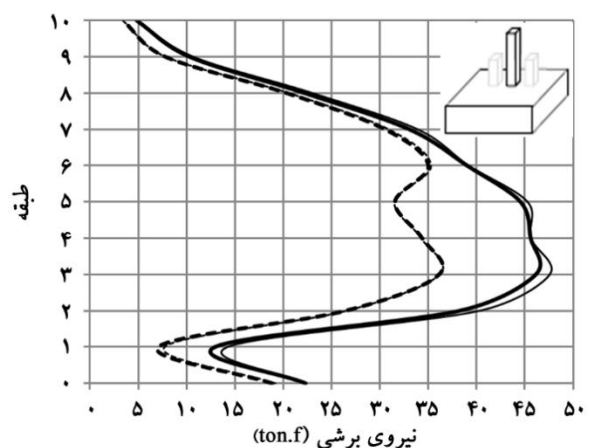
(ب) بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات ساختمان ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۰ طبقه منفرد.



(الف) بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات ساختمان ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۰ طبقه کناری و ساختمان ۱۰ طبقه منفرد.



(د) بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات ساختمان ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ و ۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۰ طبقه منفرد.



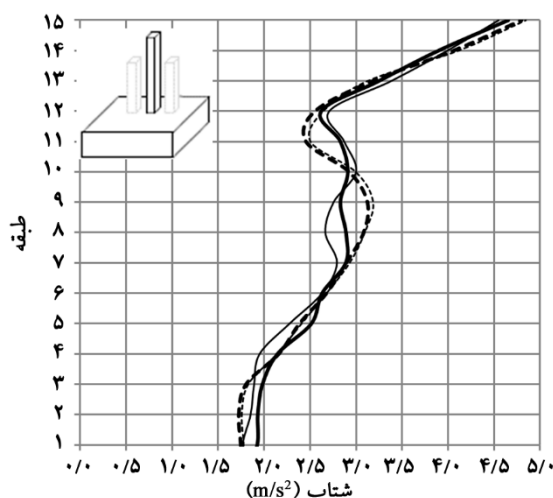
(ج) بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات ساختمان ۱۰ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۰ طبقه منفرد.

شکل (۱۱): مقایسه بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات در ساختمان ۱۰ طبقه به صورت منفرد و مجاور (— جهت X در حالت مجاورت، --- جهت Z در حالت مجاورت، — جهت X در حالت منفرد و - - - - جهت Z در حالت منفرد).

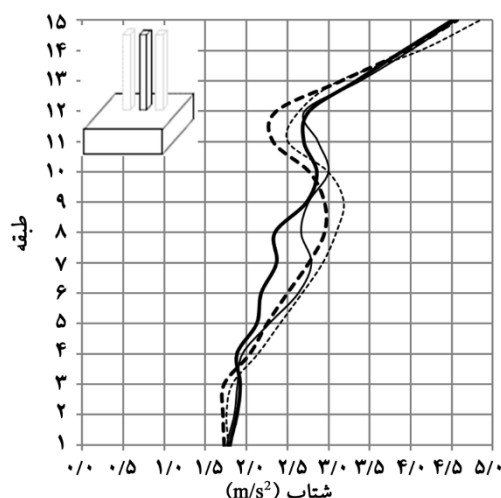
کوتاه‌تر شکل‌های (۱۲-ب) و (۱۲-ج)، به پاسخ حالت منفرد نزدیک شده و پاسخ کمی بیشتر از حالت الف بوده و در شکل (۱۲-ج)، در اکثر طبقات منطبق بر حالت منفرد است. در شکل (۱۲-د) نیز پاسخ بین دو حالت ب و ج قرار دارد. به طور کلی پاسخ شتاب در سازه ۱۵ طبقه در مجاورت با سازه‌های کوتاه‌تر به سمت پاسخ سازه منفرد گرایش داشته؛ به عبارتی عملکرد لرزه‌ای شتاب سازه ۱۵ طبقه مجاور، به پاسخ سازه‌های کوتاه‌تر، حساس نبوده است.

۷-۷- بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات سازه ۱۵ طبقه در حالت مجاورت و سازه منفرد

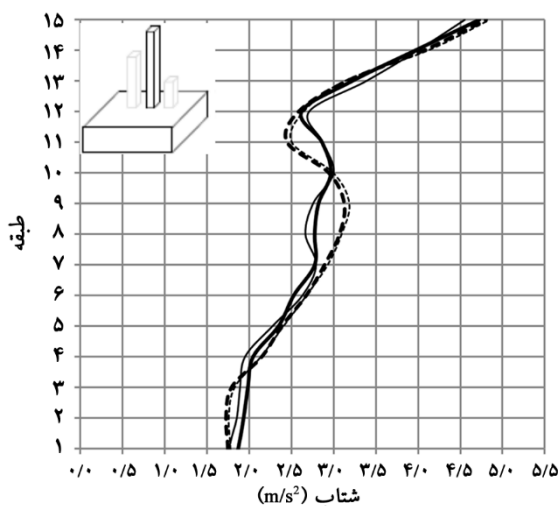
شکل (۱۲)، توزیع بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی ساختمان ۱۵ طبقه، در امتداد سازه در مقابل پاسخ سازه منفرد، نشان داده شده است. پاسخ شتاب در حالت مجاورت با سازه‌های هم‌ارتفاع (شکل ۱۲-الف)، دارای قله‌های متعددی بوده و در اکثر طبقات، کمتر از حالت منفرد (تا ۱۵ درصد کاهش) مشاهده شده است. در صورتی که در حالت مجاورت با سازه‌های



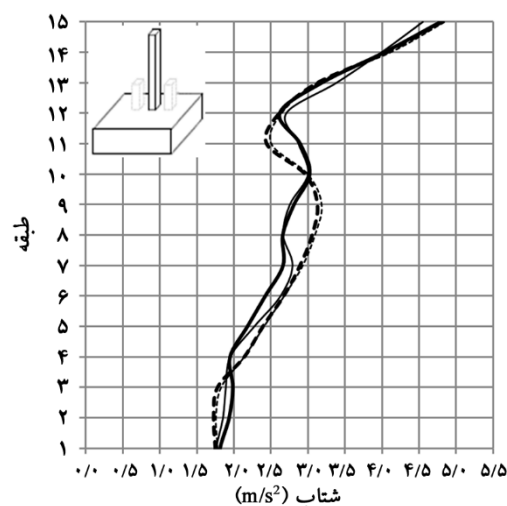
(ب) بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات ساختمان ۱۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۰ طبقه کناری و ساختمان ۱۵ طبقه منفرد.



(الف) بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات ساختمان ۱۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۵ طبقه منفرد.



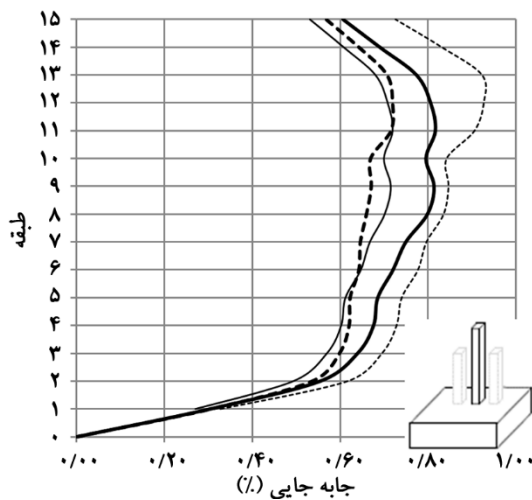
(د) بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات ساختمان ۱۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۵ و ۱۰ طبقه کناری و ساختمان ۱۵ طبقه منفرد.



(ج) بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات ساختمان ۱۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۵ طبقه منفرد.

شکل (۱۲): مقایسه بیشینه پاسخ شتاب نسبی افقی طبقات در ساختمان ۱۵ طبقه به صورت منفرد و مجاور (جهت x در حالت مجاورت، --- جهت z در حالت مجاورت، — جهت x در حالت منفرد و ----- جهت z در حالت منفرد).

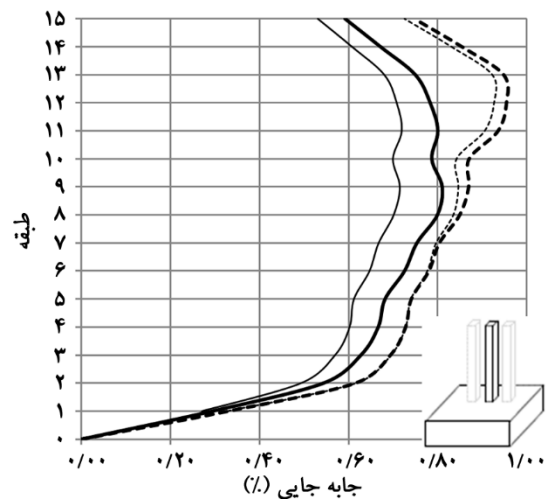
۱۳-ب). نتایج نشان داد که با کاهش ارتفاع طبقات سازه مجاور به ۵ طبقه، پاسخ سازه در جهت Z، به پاسخ منفرد نزدیک شده و در بسیاری از طبقات بر آن منطبق می‌شود. ولی در جهت Z همچنان بیشتر از پاسخ سازه منفرد است به طوری که در این حالت نیز با کاهش ارتفاع طبقات، پاسخ سازه نسبت به حالت‌های الف و ب افزایش داشته است (افزایش ۱۸ درصدی نسبت به حالت منفرد). با قرار گرفتن سازه ۱۵ طبقه بین دو سازه ۵ و ۱۰ طبقه، پاسخ بین دو حالت ب و ج مشاهده شده است (شکل ۱۳-د).



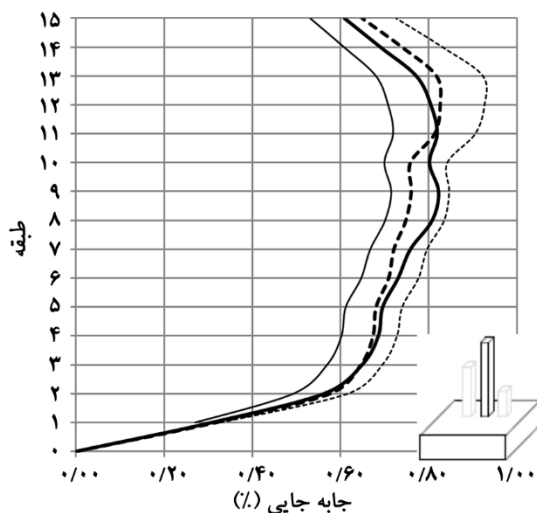
(ب) بیشینه پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات ساختمان ۱۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۰ طبقه کناری و ساختمان ۱۵ طبقه منفرد.

۷-۸- بیشینه پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات سازه ۱۵ طبقه در حالت مجاورت و سازه منفرد

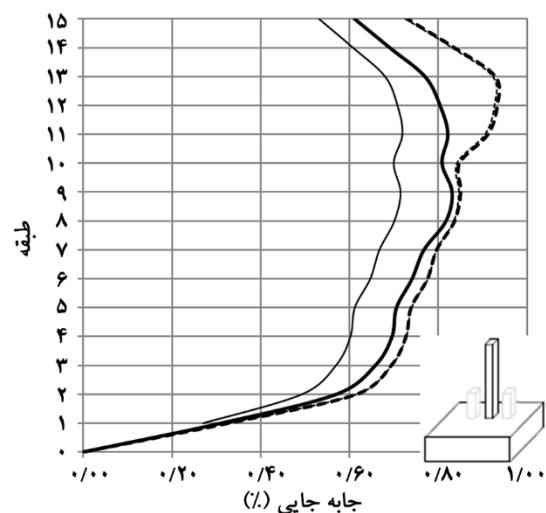
مطابق با شکل (۱۳)، پاسخ تغییر مکان نسبی سازه ۱۵ طبقه در حالت مجاورت با سازه‌های هم ارتفاع، تا ۱۳ درصد نسبت به حالت منفرد، افزایش داشته است (شکل ۱۳-الف). با کاهش ارتفاع طبقات به ۱۰ طبقه پاسخ سازه در جهت X، نسبت به حالت (الف) افزایش کمتر و نسبت به حالت منفرد، ۱۴ درصد افزایش داشته است، در حالی که در جهت Z، ۲۳ درصد کاهش مشاهده شده است (شکل



(الف) بیشینه پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات ساختمان ۱۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۵ طبقه منفرد.



(د) بیشینه پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات ساختمان ۱۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۰ و ۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۵ طبقه منفرد.



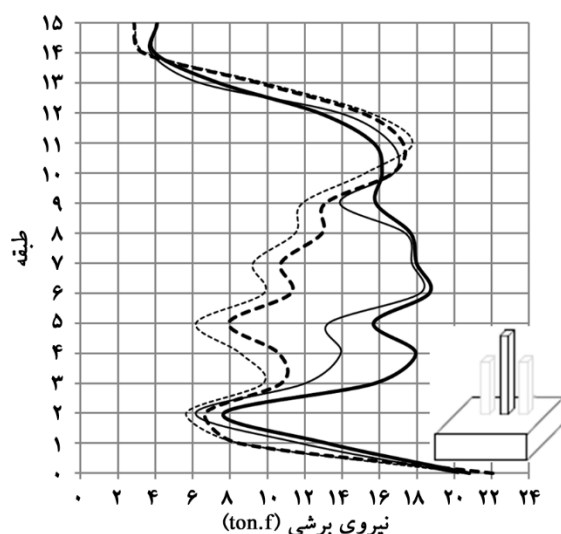
(ج) بیشینه پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات ساختمان ۱۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۵ طبقه منفرد.

شکل (۱۳): مقایسه بیشینه پاسخ تغییر مکان نسبی طبقات در ساختمان ۱۵ طبقه به صورت منفرد و مجاور (— جهت X در حالت مجاورت، --- جهت Z در حالت مجاورت، — جهت X در حالت منفرد و ----- جهت Z در حالت منفرد).

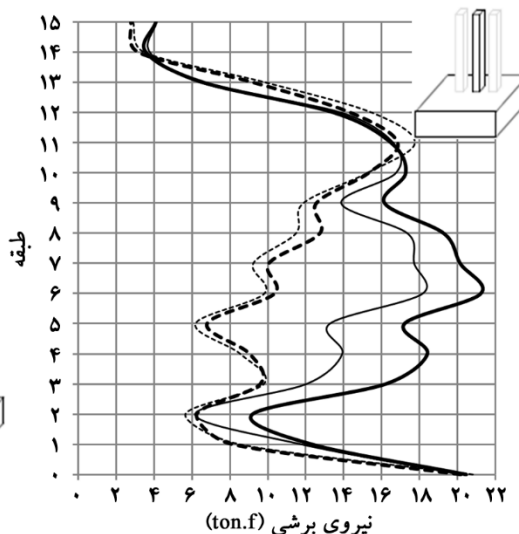
جهت Z، کاهش داشته است. در شکل (۱۴-د) با قرار گرفتن سازه ۱۵ طبقه بین دو سازه ۵ و ۱۰ طبقه، پاسخ (با ۳۳ درصد افزایش نسبت به حالت منفرد)، بین دو حالت ب و ج مشاهده شده است. به طور کلی در عملکرد لرزه‌ای ساختمان ۱۵ طبقه می‌توان گفت که وجود سازه مجاور، پاسخ سازه را افزایش داده است و همچنین در حالت‌های مجاورت سازه ۱۵ طبقه با سازه‌های کوتاه‌تر با کاهش ارتفاع، افزایش پاسخ سازه‌ای مشاهده شده است.

۹-۷- بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات سازه ۱۵ طبقه در حالت مجاورت و سازه منفرد

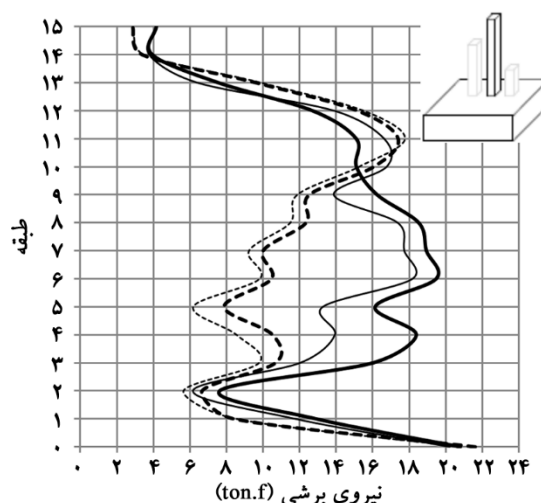
بر اساس نمودار شکل (۱۴-الف) در حالت مجاورت با سازه‌های هم‌ارتفاع پاسخ نیروی برشی ساختمان ۱۵ طبقه تا ۳۲ درصد نسبت به حالت منفرد افزایش داشته است. در شکل‌های (۱۴-ب) و (۱۴-ج)، با کاهش ارتفاع طبقات سازه‌های مجاور به ۱۰ و ۱۵ طبقه، پاسخ سازه در جهت X، افزایش (۳۵ درصد در حالت ج) و در



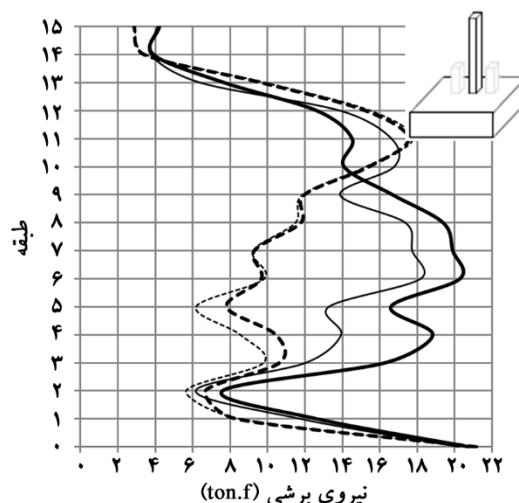
(ب) بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات ساختمان ۱۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۰ طبقه کناری و ساختمان ۱۵ طبقه منفرد.



(الف) بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات ساختمان ۱۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۱۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۵ طبقه منفرد.



(د) بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات ساختمان ۱۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۵ و ۱۰ طبقه کناری و ساختمان ۱۵ طبقه منفرد.



(ج) بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات ساختمان ۱۵ طبقه در حالت مجاورت با ساختمان‌های ۵ طبقه کناری و ساختمان ۱۵ طبقه منفرد.

شکل (۱۴): مقایسه بیشینه پاسخ نیروی برشی طبقات در ساختمان ۱۵ طبقه به صورت منفرد و مجاور (— جهت X در حالت مجاورت، --- جهت Z در حالت مجاورت، — جهت X در حالت منفرد و - - - - - جهت Z در حالت منفرد).

- heights. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **34**, 1-20.
- Alexander, N.A., Ibraim, E., and Aldaikh, H. (2013) A simple discrete model for interaction of adjacent buildings during earthquakes. *Computers and Structures*, **124**, 1-10.
 - Jiang, X. and Yan, Z. (1998) Earthquake response analysis of building-foundation-building interaction system. *Journal of Vibration Engineering*, **11**(1), 7-31.
 - Aldaikh, H., Alexander, N.A., Ibraim, E., and Oddbjornsson, O. (2015) Two-dimensional numerical and experimental models for study of structure-soil-structure interaction involving three buildings. *Computers and Structures*, **150**, 79-91.
 - Lou, M., Wang, H., Chen X., and Zhai, Y. (2011) Structure-soil-structure interaction: Literature review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **31**(12), 1724-1731.
 - Balendra, T. and Heidebrecht, A.C. (1986) Influence of different sites on seismic base shear of buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **14**, 623-642.
 - Renzi, S., Madiari, C. and Vannucchi, G. (2013) A simplified empirical method for assessing seismic soil-structure interaction effects on ordinary shear-type buildings. *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*, **55**, 100-107.
 - Yue, M.G. and Wang, Y.Y. (2009) Soil-structure interaction of high-rise building resting on soft soil. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering (EJGE)*, **13**.
 - Tabatabaiefar, H.R., Fatahi, B. and Samali, B. (2011) Effects of soil dynamic properties and bedrock depth on seismic response of building frames incorporation soil-structure interaction. *Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils Theory and Practice*, 597-603.
 - Wen, Z.P., Hu, Y.X., and Chau, K.T. (2002) Site effect on vulnerability of high-rise shear wall buildings under near and far field earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **22**, 1175-1182.

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر لرزه‌ای سازه‌های مجاور بر پاسخ ساختمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه با در نظرگیری اندرکنش خاک و سازه پرداخته شد و با حالت سازه منفرد واقع بر بستر انعطاف پذیر مقایسه گردید. نتایج حاصله بیانگر افزایش پاسخ لرزه‌ای در حالت مجاورت سازه‌ها نسبت به حالت منفرد بوده است. در سازه ۵ طبقه مشاهده شد که با افزایش طبقات سازه‌های مجاور، پاسخ سازه تا ۴۰ درصد افزایش داشته است؛ از آنجایی که در این تحقیق سازه کوتاه‌تر از ۵ طبقه مد نظر نبوده است لذا سازه ۵ طبقه با سازه‌های بلندتر مقایسه شده است. در سازه ۱۰ طبقه با وجود سازه‌های ۱۵ و ۵ طبقه، بررسی پاسخ‌ها با در نظرگیری مجاورت سازه‌های کوتاه‌تر و بلندتر انجام شده است؛ به طوری که ملاحظه شد در مجاورت با سازه‌های بلندتر پاسخ سازه تا ۲۰ درصد افزایش داشته، در حالی که مجاورت با سازه‌های کوتاه‌تر، پاسخ را تا ۲۴ درصد کاهش داده است. در سازه ۱۵ طبقه نتایج کمی با نتایج به دست آمده از قبل متفاوت بوده؛ با توجه به اینکه مجاورت پاسخ را نسبت به حالت منفرد، تحت تأثیر قرار داده است ولی سازه‌های مجاور کوتاه‌تر نیز باعث افزایش پاسخ تا ۳۵ درصد و کاهش پاسخ تا ۱۵ درصد شده است. به طور خلاصه می‌توان گفت که سازه‌های مجاور در پاسخ لرزه‌ای می‌توانند تأثیر ده‌ها درصدی داشته و در سازه‌های کوتاه و نسبتاً کوتاه با افزایش ارتفاع سازه مجاور پاسخ را افزایش و با کاهش ارتفاع، پاسخ را کاهش دهند؛ در حالی که در سازه‌های نسبتاً بلند با کاهش ارتفاع سازه مجاور پاسخ سازه افزایش داشته است.

مراجع

- Metin, M., Kose, M., and Abacioglu, A. (2008) Dynamic interactions of adjacent structures in different geometries. *KSU Journal of Science and Engineering*, **11**, 45-51.
- Karayannis, C.G. and Favvata, M.J. (2005) Earthquake-induced interaction between adjacent reinforced concrete structures with non-equal

- | | | |
|-------------------------|--------------------------|--|
| Plane Stress | ۱۱- تنش مسطح | 12. Getmiri, B. and Haeri, S.M. (1996) Guidance of dynamic soil-structure interaction analysis and its effects on structural dynamic response. Center of studies of coping with Iran natural disasters, Tehran (in Persian). |
| Soil Element | ۱۲- المان خاک | 13. Stewart, P.S., Seed, R.B. and Fenves, G.L. (1998) <i>Empirical Evaluation of Inertial Soil-Structure Interaction Effects</i> . Pacific Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California, Berkeley. |
| Fixed Base | ۱۳- بستر صلب | 14. Chin, C.C. (1998) <i>Substructure Subtraction Method and Dynamic Analysis of Pile Foundations</i> . Ph.D. Dissertation, University of California, Berkeley. |
| Absorbent Boundary | ۱۴- مرز جاذب | 15. Wolf, J.P. (1985) <i>Dynamic Soil-Structure Interaction</i> . Prentice-Hall Inc. |
| Viscous Boundaries | ۱۵- مرز جاذب ویسکوز | 16. Rayhan, M.H. and El Naggar, M.H. (2008) Numerical modeling of seismic response of rigid foundation on soft soil. <i>International Journal of Geomechanics</i> , 8 (6) 336-346. |
| Interface Elements | ۱۶- المان‌های فصل مشترک | 17. Asgari, A., Golshani, A., and Bagheri, M. (2014) Numerical evaluation of seismic response of shallow foundation on loose silt and silty sand. <i>Journal of Earth System Science</i> , 123 (2), 365-379. |
| Spring-Slider | ۱۷- سیستم‌های خطی | |
| Mohr-Columb | ۱۸- موهر-کلمب | |
| Itasca Consulting Group | ۱۹- گروه مشاورین ایتاسکا | |
| Flexible Base | ۲۰- بستر انعطاف پذیر | |

واژه‌نامه

- | | |
|---|---------------------------------|
| Adjacent Structures | ۱- سازه‌های مجاور |
| Super Structure | ۲- روسازه |
| Direct Method | ۳- روش مستقیم |
| Structure-Soil-Structure Interaction (SSSI) | ۴- اندرکنش سازه- خاک- سازه |
| Dynamic Interaction | ۵- اندرکنش دینامیکی |
| Dynamic Cross Interaction | ۶- اندرکنش دینامیکی تداخلی |
| Sub Structure Method | ۷- روش زیر سازه |
| Flexible Base | ۸- بستر انعطاف پذیر |
| Lumped Mass | ۹- جرم متمرکز |
| Nonlinear Beam-Column Element | ۱۰- المان‌های تیر- ستون غیر خطی |

Seismic Behavior of Adjacent Structures with Soil-Structure Interaction

Behroozeh Sharifi¹, Gholam Reza Nouri^{2*} and Ali Ghanbari³

1. M.Sc. Student, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

2. Assistant Professor, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran,

*Corresponding Author, e-mail: r.nouri@khu.ac.ir

3. Professor, Faculty of Engineering, Kharazmi University, Tehran, Iran

During the recent decades, many studies on the seismic response and damage of buildings show the importance of Soil-Structure Interaction effects.

On the other side, with urbanization, city blocks contain clusters of closely spaced buildings. Under such circumstances, the dynamic interaction of adjacent structures should not be ignored. However, available evidences show that in the field of soil-structure interaction, little attention has been paid to adjacent structures. In addition, the vast majority of studies are subjected to consider two-dimensional models with plain strain behavior assumptions. Such simplifying assumptions lead to obtain not so accurate and reliable achievements.

In this paper, the effects of soil structure interaction and adjacent structures interaction on the seismic response of structures through considering three-dimensional models by using OpenSees software were studied. In this regard, structures are divided in to two major groups, fixed base structures (structures resting on the rigid base) and flexible base structures (superstructures resting on the flexible base), whereas flexible base structures contains Soil-Structures and Structure-Soil-Structure systems. As respects, the common dynamic analysis focus on the fixed base assumptions; therefore, in this study, the evaluations and comparisons between results of flexible base structures and fixed base structures analysis have been paid attention to. Due to the modeling of superstructures for analysis and design processes, three reinforced concrete moment resisting frame, 5, 10 and 15 stories, two spans, resting on shallow foundations with different structural neighborhoods are selected in conjunction with a soil type III (according to ground type classification of Iranian building code), based on the direct method, considering of appropriate lateral boundaries and interface elements to simulate frictional contact and probable slip due to seismic excitation. Besides, for the design and analysis of superstructures according to the Iranian concrete code, gravity and lateral loads with considering Iranian national building code part 6 and Iranian seismic code 2800, respectively, is conducted by using ETABS software, then structural sections are designed according to Iranian national building code part 9.

Nonlinear dynamic analysis using OpenSees software under influence of three different earthquake records is conducted. The study of the response of acceleration, drift and shear force in the stories indicates that effects of soil-structure and structure-soil-structure interaction depend on dynamic characteristics of buildings, frequency content of seismic data and the height of adjacent structures. The results show that considering adjacent structures with common distance lead to increase or decrease about tens of percent of dynamic responses.

The results indicate that when a short building (5-story) has two adjacent close tall buildings (15-story), maximum responses of acceleration, drift and shear force increase up to 10, 20 and 40 percent, respectively. Results show that a 10-story building with two adjacent 5-story buildings, up to 24% decreases in acceleration response; while with two adjacent 15-story buildings increase in responses of drift and shear force, 20 and 16 percent, respectively. In tall buildings (15-story in this study) with the same height adjacent structures, the acceleration up to 15% and drift up to 23% decrease with two 10-story adjacent structures and shear force increases up to 35% with two 5-story adjacent structures. On the other hand accepting the results of common structural dynamic analysis lead to unsafely design for tall buildings, and for short structures are not affordable.

Keywords: Structure-Soil-Structure interaction, Adjacent Structures, Dynamic Analysis, OpenSees.