



بررسی رفتار دینامیکی سازه‌های بلند با در نظرگیری اندرکنش سازه و خاک و اثرات $P-\Delta$

مهدی پورشاء، دانشجوی دکترای مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر*

فرامرز خوشنودیان، استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر**

عبدالرضا سروقد مقدم، دانشیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله***

*تلفن: ۰۲۱-۶۴۵۴۳۰۱۹، پست الکترونیکی: khoshnud@aut.ac.ir

**تلفن: ۰۲۱-۸۸۹۶۴۷۱۵، پست الکترونیکی: mehdip@aut.ac.ir

چکیده

باتوجه به اینکه فونداسیون، تکیه‌گاه ساختمان و خاک تکیه‌گاه پی می‌باشد، خاک-فونداسیون و سازه فوقانی، یک سیستم اندرکنشی را تشکیل می‌دهد که تحت بارگذاری دینامیکی، کل مجموعه در ارتعاش خواهد بود. امواج زلزله از اعماق زیر خاک از طریق خاک به سازه منتقل می‌گردد. بنا بر این، بکارگیری شتاب زلزله به عنوان ورودی در سطح زمین به طور مستقیم در محاسبه پاسخ لرزه‌ای سازه، با گیردار فرض کردن پای ساختمان نامعقول می‌باشد. دو دلیل زیر موبد این مطلب است: (۱) لایه‌های متعدد خاک روی بستر سنگی تحت بارگذاری زلزله تغییر شکل می‌دهند. (۲) رکوردهای ثبت شده نشان می‌دهد که مقادیر شتاب در بستر سنگی کمتر از مقادیر نظیر در بستر آزاد می‌باشد که ارتعاش سازه، روی فونداسیون اثر متقابل داشته و مولفه‌های طیف و دامنه حرکت آن را تغییر می‌دهد و قسمتی از انرژی در اثر تغییر شکل خاک و فونداسیون مستهلک شده، که این امر به کاهش انرژی مستهلک شده در طی ارتعاش سازه کمک خواهد کرد. در سازه‌های بلند که مخصوصاً بر روی خاک نرم قرار گرفته باشد پاسخ‌های سازه تحت تأثیر اندرکنش سازه و خاک قرار می‌گیرند. همچنین در ساختمان‌های بلند، اثرات مرتبه دوم مانند $P-\Delta$ بر پاسخ‌های سازه تأثیر می‌گذارند. با توجه به اهمیت موضوع، رفتار دینامیکی سازه‌های بلند با در نظر گرفتن اثر متقابل خاک و سازه و اثرات $P-\Delta$ مورد بررسی قرار می‌گیرند. در این مطالعه ۲ ساختمان ۱۰ و ۲۰ طبقه فولادی با سیستم قاب خمشی که بر روی نرم‌ترین و سخت‌ترین خاک استاندارد زلزله ۲۸۰۰ ایران با عمق‌های خاک مختلف روی بستر سنگی قرار گرفته باشند، با در نظر گرفتن اثرات $P-\Delta$ و بدون در نظر گرفتن آن تحت سه رکورد زلزله متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرند. نتایج نشان می‌دهد که نوع خاک و اثر اندرکنش سازه و خاک در مقایسه با اثرات $P-\Delta$ پاسخ‌های یک سازه بلند را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌دهد.

کلید واژه: اندرکنش سازه و خاک، اثرات $P-\Delta$ ، سازه فولادی قاب خمشی، تحلیل تاریخچه زمانی

۱- مقدمه

محققین مختلفی، اندرکنش سازه و خاک (SSI) را در سازه‌های بلند با در نظر گرفتن اثرات $P-\Delta$ مورد بررسی قرار داده‌اند. Sivakumaran سازه‌های چند طبقه متقارن در یک جهت را که مرکز جرم آن در یک جهت بر مرکز سختی منطبق نباشد، مورد بررسی قرار داد و تغییر شکل‌های سازه را بر حسب تغییر مکان‌های پی با استفاده از ترکیب خطی مودهای ارتعاشی ساختمان روی فونداسیون و با ترکیب روابط نیرو- تغییر مکان با در نظر گرفتن SSI بدست آورد و نتیجه‌گیری کرد که خاک نرم پاسخ‌های سازه را واقعاً تحت تأثیر قرار می‌دهد. [۱] Sivakumaran و balendra پاسخ لرزه ای ساختمانهای چند طبقه را با در نظر گرفتن اندرکنش فونداسیون و اثرات $P-\Delta$ مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه‌گیری کردند که جابجائی‌های حداکثر عموماً "با افزایش سرعت موج برشی افزایش یافته و تغییر شکل‌های سازه روی رس نرم معمولاً" از ماسه بیشتر است. این محققین نشان دادند که شرایط خاک و تحریک، جابجائی‌ها را در تمام طبقات افزایش و یا کاهش می‌دهد و تغییرات برش طبقات بعلاوه اثر $P-\Delta$ آمیخته‌ای از افزایش در بعضی از طبقات و کاهش در برخی دیگر می‌باشد. بنابراین پیش بینی اثر $P-\Delta$ مبنی بر افزایش یا کاهش تغییر شکلها دشوار بوده و باید اثرات $P-\Delta$ با تحلیل منطقی تعیین شود. [۲] عظیمی‌نژاد، سرو قدم مقدم و بهنام‌فر مسأله اندرکنش سازه و خاک را با اثرات $P-\Delta$ در سازه‌های بلند مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که شرایط بستر برای خاک‌های نوع اول، دوم و تا حدودی نوع سوم تأثیر قابل ملاحظه‌ای نداشته و برای خاک نوع IV میزان این تأثیر قابل ملاحظه می‌باشد. آنها همچنین نتیجه گرفتند که پدیده $P-\Delta$ تغییر مکان نسبی طبقات را دچار تغییر می‌نماید. [۶] در این مطالعه ۲ ساختمان ۱۰ و ۲۰ طبقه فولادی با سیستم قاب خمشی که بر روی نرم‌ترین و سخت‌ترین خاک آیین‌نامه زلزله ۲۸۰۰ ایران با عمق‌های مختلف خاک روی بستر سنگی قرار گرفته باشند، با در نظر گرفتن اثرات $P-\Delta$ و بدون آن مورد بررسی قرار می‌گیرند که اثرات $P-\Delta$ در واقع اثر بارهای گرانشی روی سازه تغییر شکل یافته می‌باشد. بدین منظور تحلیل‌های متعددی صورت می‌گیرد تا پاسخ سوالات مربوط را بیابیم که: الف) آیا شرایط خاک نرم بطور قابل توجه پاسخ سازه‌های بلند را تحت تأثیر قرار می‌دهد؟ ب) اثرات $P-\Delta$ در پاسخ سازه‌های بلند چقدر اهمیت دارند؟ ج) و آیا اثرات $P-\Delta$ زمانی که اندرکنش سازه و خاک وجود دارد، مهم است؟

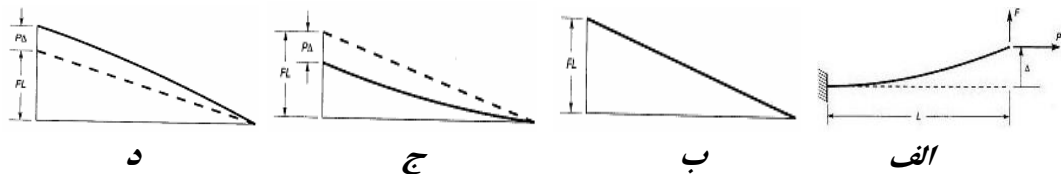
۲- مدل‌سازی اثر اندرکنش سازه و خاک

برای تحلیل دقیق پدیده اندرکنش، سیستم خاک و سازه بصورت یک مجموعه، با هم مورد بررسی قرار می‌گیرد و رکورد زلزله اعمالی در بستر پی سنگی اعمال می‌گردد و در نهایت رکورد اعمالی، به روی لایه خاک یا base سازه منتقل شده (پدیده تفرق) و در نهایت رکورد اصلاح شده به پایه سازه اعمال می‌گردد. خاک در روی بستر سنگی در امتداد قائم و افقی مقید شده و گره‌های کناری خاک فقط در

جهت قائم مقید شده و در جهت افقی آزادی باشد و گره‌های واقع در یک تراز خاک توسط قید، مقید شده و در جهت افقی باهم تغییر مکان می‌دهند. می‌توان بصورت واقعی‌تر در گره‌های کناری خاک، فنر و میراگر تعیبه نمود که مشخصات فنر و میراگر تابعی از فرکانس می‌باشد. به علت دوری از مسأله فنر و میراگر، ابعاد خاک از طرفین سازه آنقدر زیاد شده تا با آنالیز حساسیت پاسخ‌های مختلف سازه تغییر نکند. بدین ترتیب با توجه به وجود خاک کافی در اطراف سازه، امواج حامل از زلزله با توجه به میرایی هندسی (ناشی از حرکت موج در خاک) و میرایی مصالح، مستهلک می‌شوند تا از پدیده تشعشع و انعکاس امواج زلزله به مجموعه دوری گردد.

۳- اثر $P-\Delta$

برای در نظر گرفتن اثر بارهای محوری بزرگ بر روی رفتار خمشی المان‌های قابی (Frame) از تحلیل



شکل ۱- الف: وضعیت تیر طره قبل و بعد از تغییر شکل، ب: لنگر در وضعیت ابتدایی بدون اثر $P-\Delta$ ج: لنگر در صورت اثر $P-\Delta$ تحت بار کششی د: لنگر در صورت اثر $P-\Delta$ تحت بار فشاری P

$P-\Delta$ استفاده می‌شود. اثر $P-\Delta$ به ویژه به اثر غیرخطی تنش‌های مستقیم بزرگ فشاری و یا کششی بر رفتار خمشی و برشی اطلاق می‌گردد. برای روشن شدن مطلب، تیر طره‌ای مطابق شکل ۱-الف در نظر گرفته می‌شود که دارای بار محوری P و بار عرضی F در انتهای آزاد باشد. چنانچه تعادل عضو با توجه به هندسه تغییر شکل نیافته در نظر گرفته شود، مقدار لنگر در راستای طول تیر به صورت خطی تغییر می‌نماید (شکل ۱-ب) چنانچه تعادل عرضی با توجه به هندسه تغییر شکل یافته تیر در نظر گرفته شود، یک لنگر اضافی به علت بار محوری P و تغییر مکان عرضی Δ ایجاد می‌گردد. لذا مقدار این لنگر به صورت خطی در راستای طول تیر تغییر نکرده و تغییرات آن بستگی به هندسه تغییر شکل یافته تیر دارد. در محاسبه لنگر اضافی، تنها تغییر مکان عرضی عضو در نظر گرفته می‌شود و از تغییرات ایجاد شده در مقدار لنگر که بواسطه تغییر طول عضو روی می‌دهد صرف‌نظر می‌گردد. چنانچه تیر تحت کشش باشد، مقدار لنگر ایجاد شده در تکیه‌گاه و در طول عضو کاهش می‌یابد. (شکل ۱-ج) بنابراین تغییر مکان خمشی عرضی، در مقایسه با حالتی که تیر فقط تحت اثر بار عرضی F قرار داشته باشد کاهش یافته و عضو سخت‌تر می‌گردد و اگر تیر تحت فشار باشد، تغییر مکان خمشی عرضی افزایش یافته و عضو نرم‌تر می‌شود. (شکل ۱-د) [۸]

۴- روش‌های تحلیل $P-\Delta$

در روش تکرار $P-\Delta$ ، تغییر شکل‌های مرتبه اول با اضافه نمودن نیروهای برشی $P-\Delta$ به مقدار برش اعمال شده بر طبقه، اصلاح می‌شوند. [۳۰۴] از آنجائیکه اثرات $P-\Delta$ ماهیت تجمعی دارند، بنابراین تصحیح تغییر مکان و تحلیل مجدداً باید تا رسیدن به همگرایی ادامه پیدا کند. روش دوم، روش مستقیم $P-\Delta$ است که روش ساده شده تکرار $P-\Delta$ می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان تغییر مکان‌های نهایی را بر اساس تغییر مکان‌های حاصل از تحلیل مرتبه اول بدست آورد. در این روش فرض می‌شود که رانش طبقه i ام متناسب با نیروی برشی طبقه، $\sum V_i$ ، در همان تراز می‌باشد. روش عضو مهاری منفی که اولین بار توسط نیکسون، بیولیو و آدامز ارائه گردید [۵]، روش مستقیم تخمین اثر $P-\Delta$ از طریق تحلیل مرتبه اول می‌باشد. در این روش به منظور کاهش سختی ناشی از اثر $P-\Delta$ اعضای مهاری فرضی با سطح مقطع منفی در مدل در نظر گرفته می‌شوند. روشهای فوق روشهای تقریبی میباشند. در روش تحلیل دقیق $P-\Delta$ ، ماتریس سختی هندسی تشکیل یافته که اساس روش تحلیل مرتبه دوم می‌باشد، با استفاده از روابط شیب افت و با صرف نظر از تغییر شکل محوری، روابط تعادل برای هندسه تغییر شکل یافته عضو نوشته شده و ماتریس سختی مرتبه دوم حاصل میگردد. تحقیقات گسترده‌ای بر روی فرمول‌بندی ماتریس‌های سختی هندسی و تحلیل پایداری سازه به روش اجزاء محدود انجام شده است. [۸]

۵- معرفی مدل‌ها و فرضیات:

در این مطالعه، ساختمانهای فولادی ۱۰ و ۲۰ طبقه و دارای سیستم قاب خمشی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این ساختمان‌ها بصورت دو بعدی و دارای سه دهانه مساوی ۵ متری باشد. ارتفاع طبقات ۳ متر، بار مرده و زنده بترتیب برابر ۶۵۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مربع و طبقات بصورت کف صلب فرض می‌گردد. در تحلیل لرزه‌ای ساختمان‌های ۱۰ و ۲۰ مطابق استاندارد زلزله ۲۸۰۰ بترتیب از تحلیل استاتیکی معادل و دینامیکی طیفی استفاده شده و طراحی آنها به روش تنش مجاز (ASD) انجام می‌گردد و در ساختمان ۲۰ طبقه برش پایه حاصل از تحلیل طیفی با برش پایه حاصل از تحلیل استاتیکی معادل همپایه می‌شود. [۷] سازه‌های یاد شده با در نظر گرفتن اثرات $P-\Delta$ و اندرکنش سازه و خاک و همچنین بدون اثرات هر کدام ویا یکی از آنها، تحت سه رکورد زلزله ناغان، طبس و ارمستان که مطابق استاندارد زلزله ۲۸۰۰ مقیاس شده باشند، تحلیل و بررسی میشوند. (مجموعاً ۱۳ مدل مختلف) در به مقیاس در آوردن شتاب نگاشت‌ها اثر شتاب مبنا A (۰/۳۵) ضریب اهمیت ساختمان I (۱/۲) و عکس ضریب رفتار $\left(\frac{1}{6}\right)\frac{1}{R}$ با توجه به خطی بودن تحلیل‌ها در نظر گرفته می‌شوند. [۷] خاک در دو حالت نوع I و IV بوده که سرعت موج برشی بترتیب برابر $750m/s$ و $150m/s$ منظور شده و عمق خاک هم، در دو حالت ۳۰ و ۶۰ متر مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای در نظر گرفتن عرض خاک در طرفین سازه با توجه به رفع مساله تشعشع و انعکاس امواج زلزله با انجام تحلیل‌های متعدد، آنالیز حساسیت برای سیستم صورت گرفته و بعد خاک در زیر سازه (B)

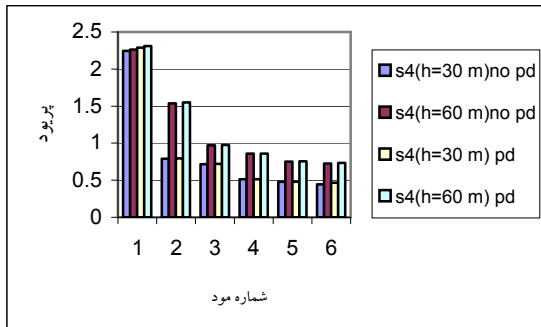
آنقدر تغییر داده می شود که پاسخ های سیستم تغییر نکند. در ساختمان ۱۰ و ۲۰ طبقه، بعد B بترتیب برابر ۱۱۰ و ۱۳۰ متر در نظر گرفته می شود. برای مدلسازی خاک و فونداسیون از المان های shell استفاده شده و در ساختمان ۱۰ و ۲۰ طبقه، عمق فونداسیون بترتیب برابر ۱/۵ و ۲/۵ متر در نظر گرفته می شود و تحلیل های فوق در حالت واقعی و همچنین در حالتی که فونداسیون به صورت صلب فرض شده باشد مورد مطالعه قرار می گیرد. تحلیل های تاریخچه زمانی و آنالیز مودال بترتیب با استفاده از روش انتگرال گیری مستقیم و مقدار ویژه انجام می شود. لازم به ذکر است که با توجه به متفاوت بودن مقدار میرایی در سازه و خاک (بترتیب برابر ۰.۵٪ و ۱.۰٪) در آنالیز های تاریخچه زمانی برای تمام مودهای ارتعاشی از میرایی معادل زیر استفاده می شود. [۹]

$$\xi_e = \left(\frac{f_e}{f_s}\right)^2 \xi_s + \left[1 - \left(\frac{f_e}{f_s}\right)^2\right] \xi_g \quad (1)$$

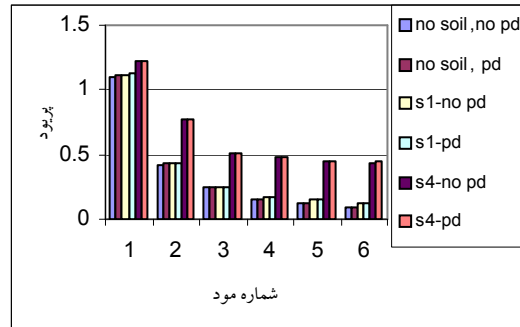
در رابطه فوق f_s, f_e بترتیب فرکانس های طبیعی اول مدل های خاک و سازه (باهم) و سازه پایه ثابت، ξ_s, ξ_g بترتیب میرایی سیستم های خاک و سازه با پای ثابت و ξ_e میرایی معادل سیستم می باشد.

۶- بررسی و تفسیر نتایج حاصل از تحلیل مدل ها

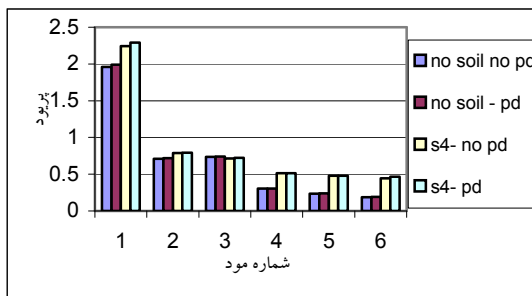
پربودهای ارتعاشی: بر اساس نتایج حاصل و طبق اشکال ۳، ۴ و ۵ می توان گفت که با در نظر گرفتن SSI، پربود مجموعه نسبت به سازه تنها افزایش یافته و این افزایش در حالت خاک نوع IV بیشتر از خاک نوع I می باشد. بنابراین پربود مود معینی از سازه در حالت خاک نوع IV از پربود مود نظیر همان سازه با خاک نوع I بیشتر است و این به علت نرمی خاک نوع IV نسبت به خاک نوع I می باشد. در شکل ۱ و ۵ مشاهده می گردد که در خاک نوع IV میزان درصد افزایش پربود در مودهای بالاتر بیشتر می باشد. در تمام تحلیل های انجام شده پربود سازه تنها یا سازه با خاک با در نظر گرفتن اثرات $P-\Delta$ افزایش یافته و این به علت نرم شدن سازه یا مجموعه سازه و خاک در حالت تأثیر $P-\Delta$ می باشد. همچنین درصد اختلاف پربود غالب سازه در حالت اثر $P-\Delta$ نسبت به حالت عدم اثر $P-\Delta$ در ساختمان ۲۰ طبقه بیشتر از ساختمان ۱۰ طبقه می باشد مثلاً در ساختمان ۲۰ طبقه با خاک نوع I (عمق خاک روی بستر سنگی برابر ۶۰ متر) مقدار این درصد اختلاف برابر ۲/۵ درصد و در ساختمان ۱۰ طبقه با همان مشخصات خاک برابر ۰/۹۴ درصد می باشد. بنابراین در ساختمان های بلندتر (لاغرتر) نسبت به ساختمان های کوتاهتر اثرات $P-\Delta$ شهود بیشتری پیدا می کند. همچنین اثرات $P-\Delta$ در مقایسه با نوع خاک به صورت ناچیزی باعث افزایش پربودهای سیستم می شوند. با توجه شکل ۳ در خاک نوع IV بر خلاف خاک نوع I با افزایش عمق خاک مقادیر پربودها حتی بدون در نظر گرفتن اثرات $P-\Delta$ بالا رفته است. در شکل ۴ پربود ۶ مود اول ارتعاشی سازه ۲۰ طبقه با خاک نوع I نشان داده شده است که در نظر گرفتن



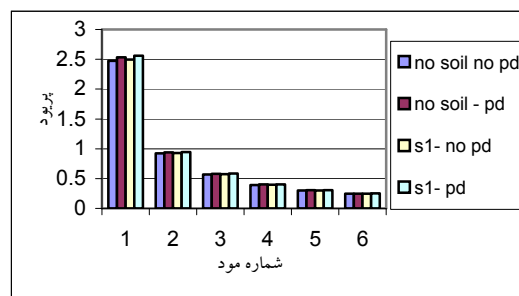
شکل ۳- ساختمان ۲۰ طبقه در خاک نوع ۴



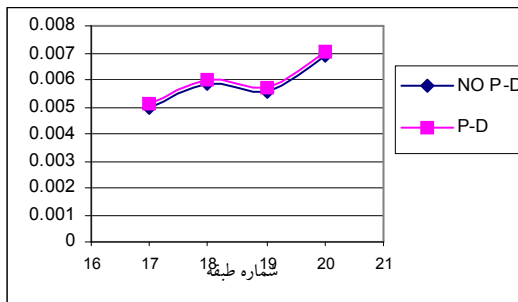
شکل ۲- ساختمان ۱۰ طبقه با عمق خاک ۳۰ متر



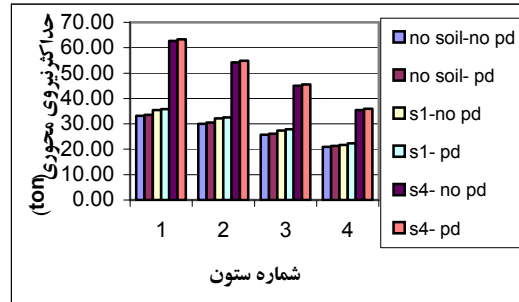
شکل ۵- پیوندهای ساختمان ۲۰ طبقه در خاک نوع ۴



شکل ۴- پیوندهای ساختمان ۲۰ طبقه در خاک نوع ۴



شکل ۷- جابجائی نسبی طبقات ساختمان ۲۰ طبقه



شکل ۶- ساختمان ۲۰ طبقه با خاک نوع ۴

ارتفاع خاک ۳۰ متر) تحت رکورد ارمستان با خاک نوع ۴ و ارتفاع ۳۰ متر تحت رکورد ارمستان خاک نوع I و همچنین اثرات $P-\Delta$ تأثیر چندانی بر پیوندهای سازه نداشته باشد. با توجه به اشکال ۴، ۵ و ۶ اثرات اندر کنش سازه با خاک نرم پیوند سازه را در مقایسه با اثرات $P-\Delta$ بیشتر دستخوش تغییر قرار می‌دهد. در شکل ۵ پیوندهای ساختمان ۲۰ طبقه با خاک نوع IV نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد در صورت در نظر گرفتن خاک نرم با سازه، پیوندهای سازه مخصوصاً در مودهای ارتعاشی بالاتر بصورت درصد قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند. در صورتی که اثرات $P-\Delta$ مقدار پیوندهای سازه را درصد اندکی بالا می‌برد.

نیروی محوری ستون‌ها: با توجه به نتایج مندرج در جدول ۱ و شکل ۶ اثر SSI در خاک نرم نسبت به خاک سخت بیشتر می‌باشد و مقدار نیروی محوری ستون‌ها در خاک نوع IV نسبت به خاک نوع I

بیشتر و آن هم بزرگتر از سازه با پایه ثابت می‌باشد که دلیل افزایش نیروی محوری را در صورت اندرکنش سازه با خاک، بخصوص در خاک نوع IV می‌توان به علت تشدید شتابنگاشت در انتقال از بستر سنگی به روی خاک دانست. (پدیده تفرق) معمولاً در اثر رکوردهای مختلف، نیروی محوری ستون‌ها با در نظر گرفتن اثر SSI در حالت اثر $P-\Delta$ نسبت به حالت عدم اثر $P-\Delta$ افزایش می‌یابد. همچنین در ساختمان ۲۰ طبقه درصد افزایش نیروی محوری نسبت به ساختمان ۱۰ طبقه بیشتر است و در ساختمان‌های بلندتر اثرات $P-\Delta$ نمود بیشتری پیدا می‌کند. بعضاً نیروی محوری ستون‌ها تحت اثر رکوردهای زلزله در حالت اثر $P-\Delta$ نسبت به حالت بدون اثر $P-\Delta$ کاهش می‌یابد که اثر $P-\Delta$ بر رفتار کلی مجموعه تأثیر داشته و پریود طبیعی مجموعه افزایش می‌یابد. همچنین در ساختمان ۱۰ طبقه با خاک نوع I و IV (عمق ۳۰ متر) در صورت در نظرگیری فونداسیون بصورت صلب، نتایج حاصل تغییر مهمی نیافته است. علت این امر را می‌توان صلیبیت کافی پی ۱/۵ متر دانست.

جابجایی نسبی طبقات: جابجایی نسبی طبقات در برخی از طبقات ساختمان با در نظر گرفتن اثرات $P-\Delta$ نسبت به حالت عدم اثر آن طبق شکل ۷ افزایش و در برخی طبقات کاهش می‌یابد و این با نتایج مرجع [۲] مطابقت دارد. همچنین مقدار جابجایی‌های نسبی با در نظر گرفتن SSI نسبت به حالت سازه تنها افزایش می‌یابد و معمولاً مقادیر جابجایی نسبی در اثر SSI در خاک نوع IV از مقادیر نظیر در حالت سازه با خاک نوع I بیشتر می‌باشد. یعنی در خاک نرم اثرات SSI نسبت به خاک سخت بیشتر می‌باشد، ولی در برخی از موارد خلاف مطلب یاد شده اتفاق می‌افتد. که علت این امر را می‌توان در کاهش حساسیت سازه نسبت به محتوای فرکانسی رکورد اعمالی ذکر کرد. ولی SSI بر رفتار کل مجموعه سازه و خاک تأثیر گذاشته و پریود طبیعی مجموعه افزایش پیدا می‌کند. (نتایج مربوطه، بعلمت حجم زیاد نیامده است)

برش پایه: برش پایه حداکثر با در نظر گرفتن اثر $P-\Delta$ نسبت به حالت عدم تأثیر $P-\Delta$ در اکثر موارد کاهش داشته است که بیشترین کاهش در صورت در نظر گرفتن $P-\Delta$ مربوط به ساختمان ۲۰ طبقه با خاک نوع IV تحت اثر رکورد زلزله طیس ۶/۵- درصد می‌باشد. همچنین در ساختمان ۲۰ طبقه با خاک نوع I (عمق خاک، ۶۰ متر) برش پایه حداکثر با در نظر گرفتن اثرات $P-\Delta$ نسبت به حالت عدم تأثیر $P-\Delta$ تحت اثر رکوردهای ناغان و طیس بترتیب ۱/۸۴- و ۲/۲۵- درصد کاهش و تحت اثر رکورد ارمنستان ۴/۳۳ درصد افزایش داشته است. بنابر این می‌توان گفت که افزایش یا کاهش برش پایه با در نظر گرفتن اثرات $P-\Delta$ نسبت به عدم اثر $P-\Delta$ بیشتر به محتوای فرکانسی رکورد اعمالی دارد و در یک مدل تحت اثر یک رکورد، افزایش و تحت اثر رکورد دیگر کاهش نشان می‌دهد و این با نتایج مرجع [۲] مطابقت دارد.

جدول ۱- پاسخهای حداکثر سیستم های متعدد تحت اثر رکوردهای مختلف

پاسخ	نوع سیستم	پاسخ تحت اثر مقیاس شده ناخان			پاسخ تحت اثر مقیاس شده رکورد طبقی			پاسخ تحت اثر مقیاس شده اریتمتان		
		بدون اثر	با اثر	در صد	بدون اثر	با اثر	در صد	بدون اثر	با اثر	در صد
		$P - \Delta$	$P - \Delta$	اختلاف	$P - \Delta$	$P - \Delta$	اختلاف	$P - \Delta$	$P - \Delta$	اختلاف
	B10-no soil	-14.94	-15.1	1.34	33.17	33.58	1.24	-35.11	-35.42	0.88
	B10-s1(30)	-16.86	-17.1	1.36	35.50	35.85	0.99	-36.31	-36.84	1.46
	B10-s1(30)-rigid	-16.74	-17	1.25	35.38	35.54	0.45	-36.06	-36.48	1.16
	B10-s1(60)	-22.38	-22.6	1.07	-39.33	-39.24	-0.23	-47	-46.07	-1.98
	B10-s4(30)	39.27	39.45	0.46	62.63	63.37	1.18	71.79	73.05	1.76
نیروی محوری	B10-s4(30)-rigid	39.59	39.55	-0.10	-70.10	-70.36	0.37	70.78	71.69	1.29
شون کناری	B10-s4(60)	-28.74	-29.3	1.84	-82.55	-83.91	1.65	65.23	65.88	1.00
در طبقه ۱	B20-no soil(in s1)	26.63	25.85	-2.93	41.54	40.73	-1.95	-31.04	-34.69	11.76
	B20-no soil(in s4)	-48.22	-49.3	2.26	-65.10	-65.28	0.28	-28.2	-30.87	9.47
	B20-s1(30)	-23.12	-23.7	2.47	39.87	38.9	-2.43	-28.12	-30.37	8.00
	B20-s1(60)	-29.53	-30.3	2.51	-42.99	-39.77	-7.49	-34.27	-36.77	7.30
	B20-s4(30)	-49.63	-49.9	0.58	-56.38	-57.9	2.70	-41.34	-42.19	2.06
	B20-s4(60)	-97.96	-98.3	0.31	-153.50	-154	0.33	-81.47	-83.9	2.98
	B10-no soil	16.2	16.15	-0.31	29.04	28.66	-1.31	37.65	37.04	-1.62
	B10-s1(30)	28.82	28.64	-0.62	41.61	41.63	0.05	50.72	49.99	-1.44
	B10-s1(30)-rigid	30.5	29.73	-2.52	42.55	42.33	-0.52	52.25	51.09	-2.22
	B10-s1(60)	31.33	30.05	-4.09	40.56	39.61	-2.34	63.99	62.64	-2.11
	B10-s4(30)	24.66	24.55	-0.45	48.65	47.37	-2.63	53.43	52.63	-1.50
برش پایه	B10-s4(30)-rigid	25.13	25.06	-0.3	48.76	47.85	-1.866	54.92	53.5	-2.586
	B10-s4(60)	33.47	33.99	1.55	70.17	69.19	-1.40	52.26	51.52	-1.42
	B20-no soil(in s1)	14.97	13.79	-7.88	22.34	20.56	-7.97	20.39	19.98	-2.01
	B20-no soil(in s4)	28.64	27.99	-2.27	26.41	25.83	-2.20	17.56	17.28	-1.59
	B20-s1(30)	20.99	20.38	-2.91	24.02	23.52	-2.08	23.43	22.54	-3.80
	B20-s1(60)	28.87	28.34	-1.84	37.4	36.56	-2.25	40.14	41.88	4.33
	B20-s4(30)	64.15	61.39	-4.30	47.57	44.48	-6.50	32.37	33.29	2.84
	B20-s4(60)	42.87	42.83	-0.09	55.79	55.19	-1.08	35.25	35.45	0.57

در جدول فوق، علاماتی مثل B10-s1(30)-rigid به معنای ساختمان ۱ طبقه روی خاک نوع ۱ با عمق ۳۰ متر و بی صلب میباشد.
و B20-s4(60) به معنای ساختمان ۲ طبقه روی خاک نوع ۴ با عمق ۶۰ متر میباشد.

همچنین با در نظر گرفتن SSI برش پایه ساختمان تحت اثر رکوردهای مختلف معمولاً در خاک نوع IV بیشتر از نوع I و آن هم بیشتر از سازه پایه ثابت است. یعنی اثرات اندر کنش در خاک نرم در سازه های بلند مشهودتر است. با توجه به اینکه آیین نامه ها در صورت در نظر گرفتن اندر کنش سازه و خاک اظهار می دارند که از مقدار برش پایه کاسته شود ($V = V - \Delta V$) ولی چون رکورد اعمالی زلزله به بستر سنگی در زیر خاک اعمال می گردد، رکورد اعمال شده در انتقال از بستر سنگی به روی خاک (پایه ساختمان) بخصوص در خاک نوع IV تقویت شده و مقدار کاهش یافته در اثر اندر کنش را تحت الشعاع قرار می دهد.

۷- نتیجه گیری

۱- اندرکنش سازه و خاک و اثرات $P-\Delta$ در سازه‌های بلند بر رفتار ارتعاشی سیستم تأثیر گذاشته و سبب افزایش پیروی می‌شود که در ساختمان‌های بلندتر و خاک نرم این اثر مشهودتر بوده و میزان درصد افزایش پیروی در مودهای بالاتر بیشتر می‌باشد. همچنین افزایش عمق خاک باعث افزایش پیروی بخصوص در خاک نرم می‌شود.

۲- مقدار نیروی محوری ستون‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش سازه و خاک معمولاً در خاک نوع IV بیشتر از خاک نوع I می‌باشد و این بدان مفهوم است که اثرات اندرکنش در خاک نرم نسبت به خاک سخت بیشتر می‌باشد (site effect). همچنین نیروی محوری ستون‌ها با در نظر گرفتن اثرات $P-\Delta$ در خاک نوع I و IV افزایش می‌یابد و بیشترین افزایش در صورت اثر $P-\Delta$ نسبت به حالت عدم اثر $P-\Delta$ مربوط به ساختمان ۲۰ طبقه می‌باشد که همه اینها مؤید مشهود بودن اثرات $P-\Delta$ در ساختمان‌های بلند و SSI در خاک نوع IV می‌باشد.

۳- مقدار برش پایه ساختمان با در نظرگیری SSI در خاک نوع IV بیشتر از نوع I و آن هم بیشتر از سازه پایه ثابت می‌باشد و این به معنی نمود بیشتر اندرکنش در خاک نرم در سازه‌های بلند می‌باشد که افزایش برش پایه بعلاوه پدیده تفرق، مقدار کاهشی آیین نامه‌ها در اثر اندرکنش را تحت الشعاع قرار می‌دهد.

۴- تغییر مکان نسبی طبقات (drift) در اثر SSI در خاک نوع IV معمولاً بیشتر از خاک نوع I می‌باشد. ولی بعضاً ممکن است خلاف این امر اتفاق بیفتد و همین نکته برای اثرات $P-\Delta$ برای تغییر مکان نسبی طبقات نیز صادق است که علت آن را شاید بتوان کاهش حساسیت سازه نسبت به رکورد اعمالی ذکر کرد.

۵- اثر اندرکنش سازه و خاک با توجه به نوع خاک، پاسخ‌های سازه را نسبت به اثرات $P-\Delta$ بیشتر دستخوش تغییر قرار می‌دهد و این امر در خاک‌های نرم مشهودتر می‌باشد.

نتایج فوق بر مبنای مدل‌ها و فرضیات یاد شده بوده و پارامترهای زیادی از جمله پیکربندی و لاغری ساختمان، میزان نامنظمی در ساختمان‌های نامنظم سه بعدی و محتوای فرکانسی رکورد اعمالی، می‌تواند در نتایج تأثیرگذار باشند.

۸- مراجع

- 1-K.S. Sivakumaran, 1990, Seismic analysis of mono-symmetric multi-storey buildings including Foundation interaction, J. Computers and Structures, pp 99-107.
- 2- Sivakumaran k.s. and Balendra.T., 1987, "seismic response of multi-storey buildings including foundation interaction and $P-\Delta$ effects, J. engineering structures, vol. 9, pp 277-284
- 3-Lai, S.t. and MacGregor, J.G, 1983, "Geometric nonlinearities in unbraced multistory Frames", J. structural Eng. ASCE, No 109, pp2528-2545.
- 4-MacGregor, J.G and Hage, S.E., 1977, Stability analysis and design of concrete Frames, J. of Structural Div ASCE, No 103, pp 1953-1970.
- 5-Nixon, D., Beaulieu, D. and Adams, P.F., 1975, Simplified second order Frame analysis, can. J. Civil Eng. (2), No 4, pp 602-605.

- ۶- آرمین عظیمی نژاد، عبدالرضا سروقد مقدم، فرهاد بهنام فر، ۱۳۸۰، مطالعه اثر اندرکنش خاک و سازه بر پدیده $P-\Delta$ در سازه‌های بلند، دومین کنفرانس بین‌المللی ساختمان‌های بلند.
- ۷- آیین نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، ویرایش دوم، ۱۳۷۸.
- ۸- اشرف جیب ا...، ادوارد ویلسون، ترجمه سید مهدی داود نبی، سید مهیار لاجوردی، حسین احمدی بیگدلی، ۱۳۸۰، برنامه عمومی تحلیل و طراحی سازه‌ها، SAP2000
- ۹- حسین طالبی، بررسی اندرکنش سازه، شمع و خاک تحت بار زلزله، ۱۳۸۱، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، به راهنمایی دکتر فرامرز خوشنودیان.