نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال سیزدهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۱، (پیاپی ۵۰): صص ۱۳-۱

علمی- پژوهشی

تعیین ستون بحرانی در پدیده فروپاشی پیش‌رونده در قاب خمشی فولادی با ملاحظه اثر اندرکنش خاک و سازه به دو روش مستقیم و غیر مستقیم

محمد امامی کورنده[1]*، سید عظیم حسینی[2]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶

چکیده

پدیده فروپاشی پیش‌رونده در مقوله پدافند غیرعامل اهمیت بسیار بالایی دارد. با توجه به افزایش تهدیدات امنیتی و تروریستی در دهه‌های اخیر و گسترش روز افزون مسائلی از این دست، این پدیده بیش از پیش خود را نشان داده است. اندرکنش خاک و سازه نیز علمی جوان در مهندسی عمران به شمار می‌رود. رفتار سازه تحت اثر اندرکنش خاک و سازه تغییر می‌کند و روش‌های مختلفی نیز برای مدل‌سازی این پدیده در منتشرات سال‌های اخیر ارائه شده است. مسئله اصلی تحقیق حاضر تعیین ستون بحرانی در پدیده فروپاشی پیش‌رونده در قاب خمشی فولادی با ملاحظه اثر اندرکنش خاک و سازه به دو روش مستقیم و غیر مستقیم می‌باشد. پدیده فروپاشی پیش‌رونده در تحقیق حاضر به کمک سناریوی حذف ستون انجام شده است. همچنین اثر اندرکنش خاک و سازه به کمک دو روش مستقیم و غیر مستقیم در دو نرم‌افزار Sap و پلاکسیس مدل‌سازی شده است. قاب‌های فولادی دوبعدی به تعداد طبقات متفاوت به ترتیب ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ طبقه ساخته شده‌اند و به وسیله تحلیل استاتیکی غیر خطی تحلیل شده و با سناریوی حذف ستون گوشه و میانی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پارامترهای مختلفی مانند ضریب رفتار، برش پایه، تغییر مکان نقطه عملکرد و تغییر مکان بالای گره حذف شده و گسترش مفاصل پلاستیک به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی مطرح شدند. نتایج تحقیق حاضر نشان دادند که ستون‌های گوشه وضعیت بحرانی‌تری دارند.

کلید واژه‌ها: قاب فولادی خمشی، فروپاشی پیش‌رونده، تحلیل پوش‌آور، اندرکنش خاک و سازه

[1] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران- (emamiacademic@gmail.com)- نویسنده مسئول

[2] استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب ، تهران، ایران

۱- مقدمه

فروپاشی پیش‌رونده یک واکنش زنجیره‌ای از خرابی است که با از دست دادن فوری یک یا چند عنصر حمل بار ثقلی آغاز می‌شود. هنگامی که عنصر سازه عمودی از کار افتاد، ساختار باید یک مسیر حمل بار دیگر را فعال کند و بارهای حمل شده توسط آن عنصر را به عناصر همسایه منتقل کند. نیروهای داخلی فعال در اعضای مجاور در نتیجه آزاد شدن انرژی داخلی به‌دلیل از دست دادن عضو، افزایش می‌یابد. پس از توزیع مجدد بار در سازه، هر یک از اجزای سازه از بارهای مختلف از جمله نیروهای داخلی اضافی پشتیبانی می‌کند.

در بررسی پدیده خرابی پیش‌رونده باید ابتدا عامل بارگذاری غیر عادی و خرابی‌های جزئی ناشی از آن بررسی گردد و پس از آن با توجه به خرابی‌های پدید آمده، برخی از توانایی‌ها سازه از جمله پیوستگی، شکل پذیری و درجه نامعینی سازه برای جلوگیری از گسترش خرابی، مورد بررسی قرار گیرد.

پدیده خرابی پیش‌رونده در اکثر نقاط جهان یک پدیده نادر می‌باشد، با این وجود در صورتی که این پدیده رخ دهد، می‌تواند نتایج بسیار ناگواری از خود به جای بگذارد. با توجه به افزایش حملات تروریستی به ساختمان‌های مهم در سال های اخیر، مطالعه و بررسی دقیق‌تر این بحث ضروری به نظر می‌رسد. به‌طور مثال در ۱۵ آوریل سال ۱۹۹۵، در بمب گذاری در ساختمان آلفردمورا[1] در شهر اوکلاهما، ۱۶۸ نفر بر اثر خرابی بخشی از سازه و نه در اثر اثرات مستقیم انفجار، جان خود را از دست دادند و بیش از ۸۰۰ نفر زخمی شدند. ضلع شمالی این ساختمان ۹ طبقه بتن مسلح، در اثر انفجار بمب معادل ۴۰۰۰ پوند TNT، نتوانست باز پخش عمودی بار را تحمل کند و سرانجام باعث رخ دادن این فروپاشی شد (شکل ۱).

شکل (۱): خرابی ساختمان آلفردمورا شهر اوکلاهما در سال ۱۹۹۵ [۱]

با توجه به تعداد بسیار زیاد مطالعات عددی و آزمایشگاهی صورت گرفته در رابطه با موضوع اندرکنش، یک تمایل جدی در محققین برای در نظر گرفتن پاسخ غیر الاستیک فونداسیون‌های سطحی در هنگام زلزله به وجود آمده است. برای مثال می‌توان به مطالعات انجام شده توسط Harden و همکارانش در سال ۲۰۰۶، Gajan در سال ۲۰۰۶، Allotey و Naggar در سال ۲۰۰۷، Zhang و Tang در سال ۲۰۰۷ و Apostolou و همکارانش در سال ۲۰۰۷ اشاره کرد.

بخشی‌پور و علی‌نژاد در تحقیقی به معرفی معرفی خرابی پیش‌رونده و بررسی پایداری و تأثیر آن بر انواع سازه‌های فولادی پرداختند [۱]. غلامپور و همکاران در تحقیق خود به تأثیر اثر حذف ستون در خرابی پیش‌رونده بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی دوگانه پرداختند. در این تحقیق ابتدا سه سازه فولادی با سامانه باربر جانبی دوگانه قاب خمشی متوسط و مهاربند هم محور ویژه ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در نرم‌افزار Etabs 2013 طراحی شد، سپس با استفاده از آیین‌نامه GSA2003 و انتخاب روش مسیر جایگزین انتقال بار، سازه‌های مذکور در نرم‌افزار OpenSEES به‌صورت ۳ بعدی مدل‌سازی شده و با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی غیر خطی و دینامیکی غیر خطی به بررسی سازه‌ها در مقابل خرابی پیش‌رونده پرداخته شده است [۲].

بررسی عددی رفتار اتصال نبشی بالا و پایین پیچی و جوشی در خرابی پیش‌رونده سازه‌های فولادی توسط هادیان فرد و همکاران انجام شده است. در این مقاله عملکرد اتصال متداول نبشی بالا و پایین پیچی و جوشی فولادی به‌صورت عددی بررسی شده است. کلیه اجزای اتصالات در نرم‌افزار اجزای محدود مدل شده است. سازه مدل شده تحت جابه‌جایی قائم در محل ستون حذف شده، مورد تحلیل غیر خطی قرار گرفته است و نتایج آن با نتایج آزمایشگاهی صحت سنجی شده است [۳]. کریمیان به ارزیابی لرزه‌ای فروریزش پیش‌رونده در ساختمان‌های کوتاه مرتبه ۳ طبقه بتن مسلح ناشی از حذف ستون میانی پرداخته است [۴]. تخریب پیش‌رونده در سازه‌های قاب خمشی فولادی، مطالعه چند پارامتری تحقیق دیگری است که توسط محمدی و همکاران انجام شده است. در این تحقیق، سناریوهای مختلف حذف تک ستون (۵ مورد) و حذف جفت ستون (۶ مورد) در سازه‌های ۴، ۸ و ۱۲ طبقه دارای قاب خمشی فولادی در نرم‌افزار OpenSees بررسی شد. مدل‌سازی‌ها به‌صورت ماکرو و سه‌بعدی انجام شده است. اثرات غیر خطی مصالح و هندسه در مدل‌ها در نظر گرفته شده است [۵]. ارزیابی خرابی پیش‌رونده در سازه فضا کار با سناریوی حذف هم‌زمان ستون و مهاربند (نمونه موردی: سازه تونل توفان عمودی) تحقیق دیگری است که توسط رضاخانی و همکاران انجام شده است [۶].

Quanwang Li و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی خرابی سازه‌های فولادی با استفاده از سطح عملکرد در برابر زلزله پرداختند. در این مطالعات رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی تحت اثر حرکت زمین ناشی از زلزله مورد بررسی قرار گرفت.

[1] Alfred P. Murrah

مدل‌سازی تحقیق حاضر در قالب نرم‌افزار SAP صورت گرفت و نتایج تحقیق به‌صورت بررسی ضریب رفتار سازه منتشر شد. Cordova و همکاران در سال ۲۰۱۰ با استفاده از ضریب رفتار به بررسی رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی پرداختند. در این مطالعه پتانسیل خرابی سامانه سازه‌ای فولادی تحت زلزله مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین پارامتر مورد بررسی در این تحقیق ضریب رفتار سازه می‌باشد.Mengke Li و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه در رفتار لرزه‌ای سازه‌های بلند مرتبه پرداختند. سازه مورد بررسی در این مطالعه برجی به ارتفاع ۶۳۲ متر در شانگهای بود. نرم‌افزار المان محدود در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت و هدف اصلی این تحقیق بررسی گسیختگی لرزه‌ای برج تحت تأثیر اندرکنش خاک و سازه است. Shehata و همکاران در سال ۲۰۱۵ به بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه بر رفتار لرزه‌ای سازه‌های فولادی پرداخت. در این مطالعه به بررسی انرژی انتقالی از خاک به سازه تحت زلزله پرداخته شده است. اثر اندرکنش خاک و سازه در اتلاف این انرژی و میزان اثر آن بر روی تغییر مکان احتمالی بررسی شده است. مهم‌ترین هدف تحقیق بررسی اثر اندرکنش خاک و سازه بر سازه‌های چند طبقه می‌باشد. بخش اول تحقیق به مقدمه و مطالعات صورت گرفته پرداخته می‌شود و در ادامه ادبیات فنی و تئوری نظری تحقیق قرار گرفته است. در بخش دوم با معرفی روش تحقیق به جمع‌آوری داده‌های تحقیق و روش تحقیق ارائه شده است، در بخش سوم به تجزیه و تحلیل اطلاعات جمع‌آوری شده پرداخته می‌شود و در آخر با جمع‌بندی و نتیجه‌گیری به پایان می‌رسد.

جنبه نوآوری تحقیق حاضر به بحث و بررسی در زمینه دو روش مدل‌سازی اثر اندرکنش خاک و سازه در پدیده تخریب پیش‌رونده می‌پردازد. بر این اساس با مطالعه منتشرات و مقالات موجود مشاهده شده است که روش‌های مستقیم و غیر مستقیم به‌صورت جداگانه پرداخته شده ولی به‌صورت مقایسه‌ای پرداخته نشده است. بنابراین نوآوری اصلی تحقیق حاضر مدل‌سازی و مقایسه دو روش مستقیم و غیر مستقیم در ملاحظه اثر اندرکنش خاک و سازه در تحلیل پدیده تخریب پیش‌رونده است.

۲- فروپاشی پیش‌رونده

خرابی محلی یک عنصر سازه‌ای ممکن است منجر به خرابی عنصر دیگری از همان سازه شود. بنابراین شکست ممکن است در یک قسمت عمده یا کل ساختار پیشرفت کند. معیارهای طراحی برای جلوگیری از چنین پیشرفت فروپاشی بحث شده است. روش‌های تحقیق و استراتژی‌های طراحی برای ایجاد سازه‌های مقاوم در برابر فروپاشی ارائه و مقایسه شده است. علاوه بر رویکردهای شناخته شده‌ای که مقاومت محلی یا مسیرهای متناوب بار را ارائه می‌دهند، رویکردی مبتنی بر جداسازی مقاطع در حال فروپاشی توصیف و بحث می‌شود.

۲-۱- روش‌های کلی بررسی پدیده خرابی پیش‌رونده

عمده استانداردها به سه روش طراحی برای کاهش خرابی پیش‌رونده اشاره می‌کنند.

روش اول، کاهش قرارگیری در معرض صدمات و خسارت‌ها می‌باشد.برای مثال، با اجرا نمودن موانع محافظتی در برابر ضربه وسایل نقلیه یا افزایش فاصله محافظتی در برابر بمب‌های تروریستی، یا ممنوع کردن استفاده از گاز آشپزی در ساختمان‌های آسمان خراش.

روش دوم و سوم، برای تأمین مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده مورد استفاده قرار می‌گیرند که روش غیر مستقیم و روش‌های مستقیم می‌باشند.

۲-۱-۱- روش غیر مستقیم

در این روش مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده با ایجاد پیوستگی، شکل‌پذیری و افزایش مقاومت با ایجاد درجات نامعینی بالاتر در سازه فراهم می‌شود که به وسیله جزئیات مناسب بست و اتصالات، جانمایی صحیح دیوارها و ستون‌ها، صفحات توکار جهت کنترل گسترش خرابی و همچنین در نظر گرفتن جزئیات لرزه‌ای انجام می‌گیرد تا ساختمان به‌صورت یکپارچه عمل کند که در این صورت انسجام کلی سازه افزایش می‌یابد.

۲-۱-۲- روش مستقیم

این روش به میزان زیادی وابسته به روش تحلیل سازه دارد. مقاومت در برابر خرابی پیش‌رونده، از طریق بالا بردن مقاومت اعضای کلیدی سازه‌ای در برابر بارهای ویژه و یا از طریق پل زدن در عرض ناحیه خرابی موضعی فراهم می‌شود.

در این تحقیق از روش سناریوی حذف ستون برای مدل‌سازی پدیده فروپاشی پیش‌رونده استفاده شده است.

۳- اندرکنش خاک و سازه

در بررسی اثرات اندرکنش خاک- سازه دو دیدگاه متفاوت وجود دارد. یکی تعیین پاسخ و حرکت میدان آزاد در اثر تحریک لرزه‌ای و سپس محاسبه پاسخ سازه به حرکت به دست آمده برای فونداسیون است و دیگری تعیین مشخصات دینامیکی سازه و سپس محاسبه پاسخ سازه به حرکت میدان آزاد. هر دو روش نتایج یکسانی خواهند داشت با این تفاوت که به دلیل سادگی روش دوم در مقاصد کاربردی و عملی، آیین‌نامه‌ها بیشتر به استفاده از این روش توصیه کرده‌اند.

تعامل بین ساختار و خاک یک زمینه بین رشته‌ای است که در تقاطع مکانیک خاک و سازه، پویایی خاک و سازه، مهندسی زلزله، ژئوفیزیک و ژئومکانیک، علوم مواد، روش‌های محاسباتی و عددی و سایر رشته‌های مختلف فنی وجود دارد. ریشه‌های آن به اواخر قرن نوزدهم برمی‌گردد، در دهه‌های بعدی و در طی نیمه اول قرن ۲۰ به تدریج تکامل یافته و بالغ می‌شود و در نیمه دوم با تحریک بیشتر به دلیل نیاز به انرژی هسته‌ای و صنایع فراساحل ، به سرعت پیشرفت می‌کند. اولین رایانه‌های قدرتمند و ابزارهای شبیه‌سازی مانند عناصر محدود و نیازهای بهبود ایمنی لرزه‌ای است.

۳-۱- روش‌های تحلیل اندرکنش خاک- سازه

بارهای طراحی زلزله اعمال شده به پی، از نیروهای اینرسی ایجاد شده در روبناها و از تغییر شکل خاک ناشی از عبور امواج لرزه‌ای و تحمیل شده بر پایه‌ها ناشی می‌شود. این دو پدیده در ادبیات فنی به‌عنوان بارگذاری اینرسی و حرکتی شناخته می‌شوند. جهت بررسی این نیروها و همچنین اثرات توأمان خاک و سازه بر یکدیگر روش‌های مختلفی جهت مدل‌سازی اندرکنش خاک و سازه به وجود آمده‌اند.

۳-۱-۱- روش مستقیم

در این روش تمام محیط خاک - پی- سازه با هم مدل شده و در یک مرحله تحت آنالیز قرار می‌گیرند. با توجه به مدل‌سازی هم‌زمان اجباری به اصل جمع آثار نیروها وجود نداشته و تحلیل غیر خطی نیز قابل انجام است. نرم‌افزارهای اجزاء محدود قابلیت مدل‌سازی چنین اثری را دارند، یکی از این نرم‌افزارها پلاکسیس [1] است که در این تحقیق نیز از آن استفاده شده است.

۳-۱-۲- روش زیرسازه (غیر مستقیم)

در روش زیرسازه مجموعه خاک- پی- سازه به‌طورجداگانه و هر کدام به‌عنوان یک زیرسازه مدل شده و مسائل مربوط به آن‌ها با روش مناسب خود تحلیل شده است، نتایج با استفاده از اصل جمع آثار قوا تجمیع می شوند. این روش یک روش خطی محسوب شده و سبب می‌شود برای مجموعه خاک و سازه، رفتار خطی لحاظ گردد. برای لحاظ آثار رفتار غیر خطی، از روش خطی معادل می‌توان استفاده نمود[۱۵]. به بیانی دیگر روش اول شامل اصلاح حرکت میدان آزاد، ارزیابی پاسخ یک سازه مشخص به حرکت اصلاح شده پی و حل هم‌زمان مسئله با استفاده از معادلاتی اضافی که حرکت دو سامانه را تعریف می‌کنند می‌باشد. روش دوم، شامل اصلاح خواص دینامیکی سازه و ارزیابی پاسخ سازه اصلاح شده به حرکت میدان آزاد معین می‌باشد.

۳-۱-۳- فنر وینکلر

یکی از اولین روش‌های مدل‌سازی اثر اندرکنش خاک و سازه استفاده از روش فنر وینکلر است. در مدل وینکلر به دلیل این که فنرها از هم مستقل‌اند، بنابراین فقط در محل اثر بار تغییر شکل و تنش به وجود می‌آید. در صورتی که خاک یک محیط پیوسته بوده و تغییر شکل و تنش در محل اثر بار و مجاور آن نیز به وجود می‌آید. به همین دلیل برخی دیگر از محققین برای رفع این مشکل، محیط خاک را به‌صورت ترکیبی از فنرهای وینکلر با یک عنصر سازه‌ای دیگر مدل نموده‌اند. به این مدل‌ها اصطلاحاً مدل‌های چند پارامتری می‌گویند. از معروفترین این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های فیلوننکو- بوردیچ، هیتنی و پاسترناک اشاره نمود. در مدل فینلوننکو- بورودیچ فنرهای وینکلر ارتباط بین فنرهای وینکلر در حالت دوبعدی به وسیله یک تیر الاستیک و در حالت سه بعدی به وسیله یک صفحه الاستیک انجام می‌گیرد. در مدل پاسترناک این فنرها به وسیله یک لایه برشی به هم مرتبط می‌شوند [۱۶].

یکی از روش‌های رایج برای تحلیل سازه‌های با اندرکنش، تبدیل این سازه‌ها به مدل پایه ثابت معدل می‌باشد. در پایین فرمول‌های پریود و میرایی مؤثر توسط $\tilde{T}$ و $\tilde{\beta}$ نشان داده شده‌اند و از مقادیر اشاره شده در آیین‌نامه‌های آمریکا (ATC3-06/1984; FEMA 450/2300). پریود مؤثر سامانه سازه با اندرکنش توسط معادله زیر داده خواهد شد:

$$\tilde{T} = \sqrt{1 + \frac{K}{K_x}\left(1 + \frac{K_x h^2}{K_\theta}\right)} \qquad (۱)$$

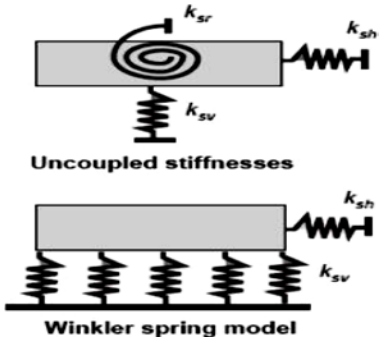
با مرتب کردن معادله بالا، سختی معادل سازه با اندرکنش به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\frac{1}{K_{eq}} = \frac{1}{K} + \frac{1}{K_X} + \frac{h^2}{K_\theta} \qquad (۲)$$

میرایی معادل برای سامانه با اندرکنش به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\tilde{\beta} = \beta_0 + \frac{0.05}{(\frac{\tilde{T}}{T})^3} \qquad (۳)$$

که در آن، $\tilde{\beta}$ باید از روی شکل های موجود در آیین‌نامه‌های آمریکا (ATC3-06/1984; FEMA 450/2300) به‌دست آید.



شکل (۲): مدل وینکلر [۱۰]

[1] Plaxis

۴- معرفی خرابی پیش‌رونده

پدافند غیرعامل، مجموعه‌ای از اقدامات غیر مسلحانه‌ای است که به‌کارگیری آن‌ها، موجب افزایش بازدارندگی، کاهش آسیب‌پذیری، ارتقای پایداری ملی، تداوم فعالیت‌های ضروری و تسهیل مدیریت بحران در برابر تهدیدها و اقدام‌های نظامی دشمن می‌گردد. اجرای طرح‌های پدافند غیرعامل، موجب کاهش آسیب‌پذیری نیروی انسانی و ساختمان‌ها و تجهیزات حیاتی، حساس و مهم کشور در مقابل حملات دشمن (به ویژه تهاجم هوایی) می‌شود. این امر، باعث تداوم اداره کشور و فعالیت‌های ضروری در شرایط بحرانی گردیده و منجر به پایداری ملی می‌شود. در این راستا، ملاحظات معماری، سازه‌ای و تأسیسات مکانیکی و برقی در حوزه ساختمان و برنامه‌ریزی اقتصادی و مالی، به‌صورت میان رشته‌ای، مد نظر قرار می‌گیرد.

بر این اساس بررسی پدیده خرابی پیش‌رونده در سازه‌ها که یکی از دلایل ایجاد چنین پدیده‌ای تهدیدات تروریستی است، می‌تواند از پدیده‌های مهم پدافند غیرعامل باشد. بنابراین در این مقاله به بررسی پدیده خرابی پیش‌رونده در سازه‌های فولادی پرداخته شده است، بدیهی است با افزودن اثر اندرکنش خاک و سازه در این مدل‌سازی جنبه نوآوری تحقیق حاضر افزایش یافته است.

مهم‌ترین روش که در این گروه برای مدل‌سازی وقوع پدیده خرابی پیش‌رونده مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر مبنای روش مسیر جایگزین انتقال بار، حذف یک ستون خارجی در طبقه اول سازه بوده و سازه به گونه‌ای طراحی می‌شود که اگر هر یک از اجزای آن منهدم گردند، مسیرهای جایگزین برای انتقال بار از آن عضو موجود باشند و اعضای باربر اطراف عضو محذوف بدون وقوع فروریزش کلی، ظرفیت اضافی جهت تحمل نیروی آن را داشته باشند. علت حذف ستون خارجی علاوه بر ایجاد حالت عدم تقارن در سازه، مربوط به احتمال بیشتر بروز آسیب‌های عمدی و غیر عمدی در آن‌ها می‌باشد. تحلیل‌های مورد استفاده در این روش شامل تحلیل استاتیکی خطی، استاتیکی غیر خطی، دینامیکی خطی، دینامیکی غیر خطی می‌باشند. استاندارد انجمن مهندسین عمران آمریکا، تنها استاندارد رایجی است که به مسئله گسیختگی پیش‌رونده در جزئیات می‌پردازد. این آیین‌نامه بر شدیدترین حوادثی تأکید می‌کند که می‌توانند منتج به گسیختگی پیش‌رونده شوند، و دو روش طراحی برای مقاومت در برابر گسیختگی پیش‌رونده ارائه می‌دهد: روش طراحی مستقیم و روش طراحی غیر مستقیم. در روش طراحی مستقیم، مقاومت در برابر گسیختگی پیش‌رونده را مستقیماً در طول فرآیند طراحی از دو طریق در نظر می‌گیرند: الف- روش مسیر فرعی ۱ که به دنبال ارائه مسیر فرعی برای بار پس از وقوع خرابی است، به نحوی که جلوی آسیب موضعی گرفته شده و از گسیختگی کلی جلوگیری شود، ب- روش مقاومت موضعی ویژه، که به دنبال ارائه توان کافی برای مقاومت در برابر خرابی در محل‌های بحرانی است. روش طراحی غیر مستقیم به‌طور ضمنی مقاومت در برابر گسیختگی پیش‌رونده را از طریق ضوابط حداقل سطوح توان، پیوستگی و انعطاف پذیری بررسی می‌کند. راهبردهایی را هم برای انسجام کلی سازه و تنش‌ها و انعطاف پذیری اتصالات ارائه می‌کند که می‌توانند در معرض تغییر شکل‌های بزرگ قرار بگیرند و مقادیر زیاد انرژی را در اثر شرایط غیر طبیعی جذب نمایند.

راهبردهایی برای طراحی در برابر گسیختگی پیش‌رونده را می‌توان در اسناد دولتی آمریکا مثل GSA و UFC مشاهده نمود. راهبردهای GSA روشی مستقل برای تعدیل امکان گسیختگی پیش‌رونده سازه‌ها بر اساس روش مسیر فرعی ارائه کرده است. این رهنمود سناریوهایی را تعریف می‌کند که طبق آن یکی از ستون‌های ساختمان برداشته شده و سازه آسیب دیده برای بررسی واکنش‌های سامانه تحلیل می‌گردد. این آیین‌نامه کاربری ساختمان، نوع سکونت، نوع ساختمان، نزدیکی به وسایل نقلیه متحرک یا پارک شده را همانند در نظر گرفتن خصوصیات سازه‌ای در طرح لرزه‌ای، لحاظ می‌نماید تا به طراح برای تصمیم‌گیری در لزوم طراحی در برابر خرابی پیش‌رونده ساختمان کمک کند.

۵- روش مدل‌سازی

تأثیر اندرکنش خاک و سازه بر پاسخ قاب خمشی فولادی تحت اثر تخریب پیش‌رونده در تحلیل استاتیکی غیر خطی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور ۳ قاب خمشی متوسط ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه در دو نرم‌افزار پلاکسیس و SAP مدل شده و سپس مطالعات موردی روی ستون‌های حذف شده عامل انجام می‌شود. هر کدام از این مدل‌ها در SAP یک بار با اثر اندرکنش خاک و سازه و یک بار بدون اعمال اندرکنش خاک سازه مورد تحلیل قرار می‌گیرند. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه نیروی زلزله وارد به سازه را افزایش می‌دهد و باعث تغییر در پاسخ لرزه‌ای سازه می‌شود و در نظر گرفتن این تأثیر بر سازه‌های فولادی و سازه‌های بر روی خاک نرم زیاد بوده و چشم پوشی از آن باعث دور شدن نتایج از واقعیت می‌شود.

همچنین جهت بررسی و ارزیابی مقایسه‌ای از نرم‌افزار المان محدود پلاکسیس جهت مدل‌سازی اثر مستقیم اندرکنش خاک و سازه استفاده شده است. مدل‌سازی اندرکش خاک و سازه از

روش وینکلر به دلیل سادگی این روش و مزیت آن نسبت به اجزاء محدود سبب توصیه‌های آن در آیین‌نامه FEMA جهت لحاظ نمودن اندرکنش خاک و سازه شده است و آیین‌نامه‌هایی که به‌طور تخصصی در مورد تحلیل و طراحی برای مقابله با تخریب پیش‌رونده مطرح می‌شوند GSA2003، UFC و DOD2003 می‌باشد.

۵-۱- مدل‌سازی در Sap

مدل‌سازی در نرم‌افزار Sap با استفاده از قاب دوبعدی انجام شده است. آنالیز پوش‌آور با استفاده از تغییر مکان هدف بر مبنای نشریه ۳۶۰ بر روی قاب‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه انجام شده است. جهت اعمال تحلیل پوش‌آور تغییر مکان هدف مطابق روابط نشریه ۳۶۰ که در ادامه ارائه شده است برای تمامی قاب‌ها محاسبه شده و به آن‌ها اعمال شده است.

در این روش پاسخ حداکثر تغییر مکان سازه با اعمال ضرایبی بر تغییر مکان طیفی ارتجاعی در زمان تناوب طبیعی سازه به‌دست می‌آید. در مورد تغییر مکان هدف مورد نیاز در تحلیل استاتیکی غیر خطی مطابق بند ۳-۳-۳-۱-۲ دستورالعمل بهسازی تغییر مکان هدف باید با در نظر گرفتن رفتار غیر خطی سازه برآورد شود. به‌عنوان یک روش تقریبی که به‌عنوان روش ضرایب تغییر مکان مشهور است طبق دستورالعمل FEMA 356 می‌توان از رابطه زیر تغییر مکان را به‌دست آورد:

$$\delta_t = c_0 c_1 c_2 c_3 \left(\frac{T_e}{2\pi}\right)^2 g \qquad (۴)$$

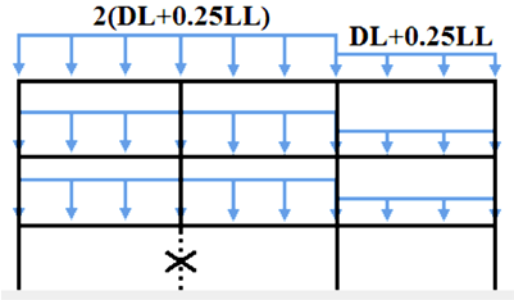
در رابطه فوق، c_0 ضریب اصلاح برای ارتباط دادن جابه‌جایی طیفی سامانه یک درجه آزاد معادل به جابه‌جایی بام ساختمان و c_1 ضریب اصلاح برای ارتباط دادن حداکثر جابه‌جایی غیر الاستیک به تغییر مکان محاسبه شده برای پاسخ الاستیک، c_2 ضریب اصلاحی که اثرات شکل منحنی هیسترزیس و کاهش سختی و مقاومت را بر پاسخ تغییر مکان بیشینه ساختمان بیان می‌کند، c_3 ضریب اصلاحی که افزایش تغییر مکان به علت اثرات استاتیکی پی دلتا را لحاظ می‌کند، s_a شتاب طیفی در پریود اصلی مؤثر و T_e پریود اصلی مؤثر می‌باشند.

پس از اختصاص مفاصل پلاستیک اعضاء به نرم‌افزار و ترکیبات بارگذاری استاتیکی غیر خطی و محاسبه تغییر مکان هدف اولیه، نوبت به انجام تحلیل می‌باشد. پس از انجام تحلیل با استفاده از نمودار پوش‌آور تغییر مکان نقطه هدف اصلی سازه به‌دست آورده می‌شود که در جدول (۱) محاسبه شده است.

جدول (۱): مقادیر ضرایب مؤثر در محاسبات مقدار تغییر مکان هدف

طبقات	C_0	C_1	T_{es}	A	B	$\delta_{t\,(m)}$
پنج	۱/۳۵	۱	۱/۰۱۹	۰/۳۵	۲/۰۱۷	۰/۲۴۱
ده	۱/۴۶	۱	۱/۶۱۸	۰/۳۵	۱/۴۲۱	۰/۴۷۰
پانزده	۱/۵	۱	۲/۳۲	۰/۳۵	۱/۱۱۵	۰/۷۲۸

بر اساس آیین‌نامه GSA، برای انجام تحلیل استاتیکی غیر خطی افزاینده قائم، از ترکیب بار 2(DL+0.25LL) در دهانه‌های مربوط به ستون حذف شده و از ترکیب بار (DL+0.25LL) در بقیه دهانه‌ها استفاده می‌گردد. در شکل (۳) نحوه ترکیبات بارگذاری در دهانه‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل (۳): بارگذاری به‌کار رفته در تحلیل استاتیکی غیر خطی پس از حذف ستون بر اساس آیین‌نامه GSA [۱۱]

در تحلیل استاتیکی غیر خطی پس از حذف ستون مورد نظر و اعمال ترکیبات بارگذاری آیین‌نامه GSA، سازه تحت بارهای افزایشی ثقلی تحت تحلیل قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی غیر خطی افزاینده قائم، منحنی‌های نیرو- تغییر مکان می‌باشند. بر اساس این منحنی‌ها می‌توان مقادیر ظرفیت کلی سازه قبل و بعد از حذف ستون مربوطه را به‌دست آورد.

۵-۱-۱- بارگذاری ثقلی

مقادیر بارهای اعمالی مطابق آیین‌نامه مبحث ششم و محاسبات بار مرده در جداول (۳) و (۴) ارایه شده است.

جدول (۲): مشخصات بارهای اعمالی طبق آیین‌نامه

بار مرده طبقات	600 Kg/m^2
بار زنده طبقات	200 Kg/m^2
بار مرده بام	500 Kg/m^2
بار زنده بام	150 Kg/m^2

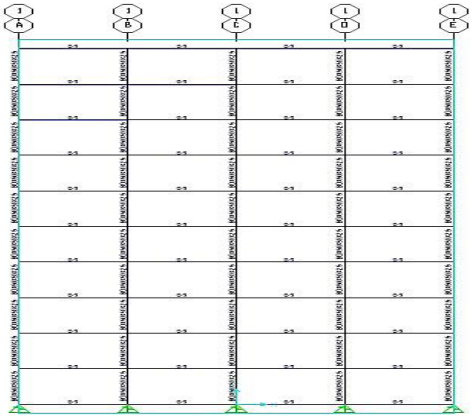
با فرض اینکه طول دهانه در بعد سوم ساختمان ۶ متر باشد، بارگذاری خطی بر روی تیر در مدل ۲ بعدی به‌صورت زیر خواهد بود.

جدول (۳): مشخصات بارهای اعمالی به سازه قاب

بار مرده طبقات	3600 Kg/m
بار زنده طبقات	1200 Kg/m
بار مرده بام	3000 Kg/m
بار زنده بام	9000 Kg/m

در این تحقیق رفتار سه قاب فولادی با سامانه قاب خمشی متوسط به ترتیب با ۵، ۱۰ و ۱۵ طبقه به‌صورت دوبعدی با

شرایط ارائه شده در قسمت‌های پیشین مدل‌سازی شده است. نمونه‌ای از قاب‌های مدل شده با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه در شکل (۴) ارائه شده است. برای تمامی قاب‌ها به ترتیب یک بار برای حالت تکیه‌گاه صلب و یک بار با در نظر گرفتن تکیه‌گاه فنری در نظر گرفته شده است. همچنین یک بار ستون میانی حذف شده و یک بار ستون گوشه حذف شده است. در مجموع ۳ متغیر تعداد طبقه و دو متغیر نوع تکیه‌گاه و ۳ متغیر حالت حذف ستون در مدل‌سازی‌های صورت گرفته لحاظ شده و در مجموع تعداد ۱۸ مدل‌سازی در نرم‌افزار SAP صورت گرفته است. همچنین شرایط مدل‌سازی و تحلیل استاتیکی غیر خطی (پوش‌آور) برای تمامی مدل‌ها انجام شده و شرایط بارگذاری بر روی مدل‌ها کاملاً یکسان لحاظ شده است و سپس جهت بررسی نتایج پارامترهای خروجی بر مبنای طرح تحقیق استخراج شده است.



شکل (۴): نمایی از مدل‌سازی ۱۰ طبقه با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه

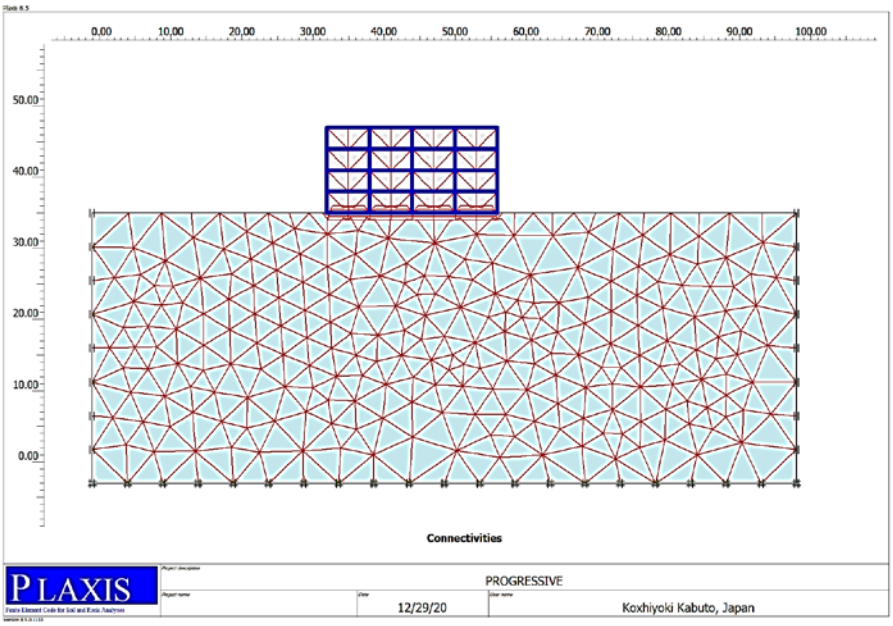
۵-۲- مدل‌سازی در نرم‌افزار پلاکسیس

بر مبنای توضیحات بخش سوم مربوط به روش‌های مدل‌سازی اثر اندرکنش خاک و سازه و همچنین در بخش ۵-۱ و مدل‌سازی مدل فنر وینکلر در این بخش نیاز به مدل‌سازی این اثر در روش مستقیم نیز احساس شد. برای این منظور یکی از پرکاربردترین نرم‌افزارهای مهندسی ژئوتکنیک با عنوان نرم‌افزار اجزاء محدود پلاکسیس جهت مدل‌سازی پدیده مذکور انتخاب شده است. بنابراین یک نمونه قاب فولادی مطابق مشخصات مدل‌سازی شده در نرم‌افزار SAP در این نرم‌افزار مدل‌سازی شد. همچنین پارامترهای خاک نیز متناظر با جدول (۴) برای هر دو مدل‌سازی لحاظ شده است.

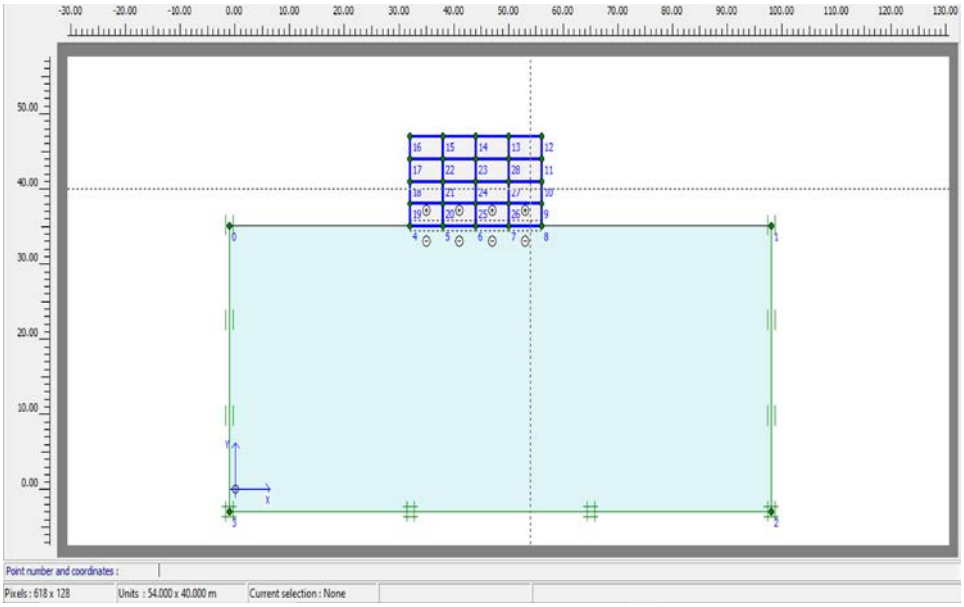
جدول (۴): مشخصات و پارامترهای خاک نوع III

تیپ خاک	C (kPa)	φ (degree)	E (kPa)	Ks (kN/m^3)
III	۲۰	۲۸	۲۰۰۰۰	۵۰۰

شرایط بارگذاری و تحلیل سازه و اندرکنش مشابه نرم‌افزار Sap بوده و شمایی از این مدل‌سازی در شکل (۵) و شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۵): مش‌بندی در نرم‌افزار پلاکسیس



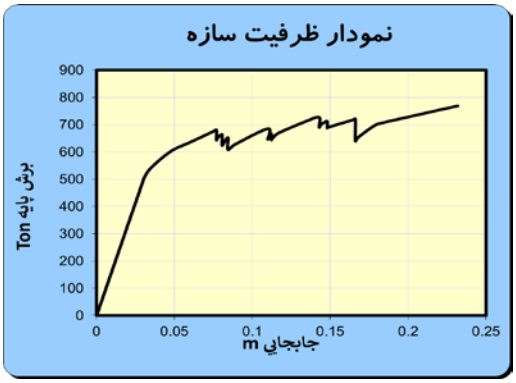
شکل (۶): مدل ساخته شده در نرم‌افزار پلاکسیس

۶- تحلیل و بررسی نتایج

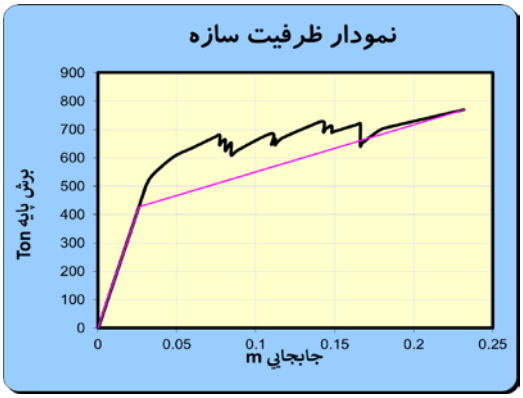
تحلیل و بررسی نتایج با استخراج پارامترهای مؤثر به‌عنوان خروجی هر یک از مدل‌ها انجام شده است. جهت اجرای این فرآیند در هر دو نرم‌افزار مورد استفاده پس از مدل‌سازی نهایی و آنالیز و طراحی مدل نتایج استخراج شده است. سپس این نتایج به نرم‌افزار بسیار قوی اکسل وارد شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

۶-۱- بررسی نتایج در نرم‌افزار Sap

مدل‌سازی‌ها در نرم‌افزار Sap به‌عنوان یک نرم‌افزار سازه‌ای بسیار قوی انجام شده است. کامل‌ترین پارامترهای خروجی در این مدل‌سازی استخراج شده و محاسبات مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. بر این اساس با استفاده از ضوابط موجود در آیین‌نامه معتبر ATC-40 منحنی دو خطی جهت بررسی نتایج مطابق شکل‌های (۷ و ۸) استخراج شده است.



شکل (۷): منحنی پوش‌آور سازه پنج طبقه بدون اندرکنش خاک و سازه

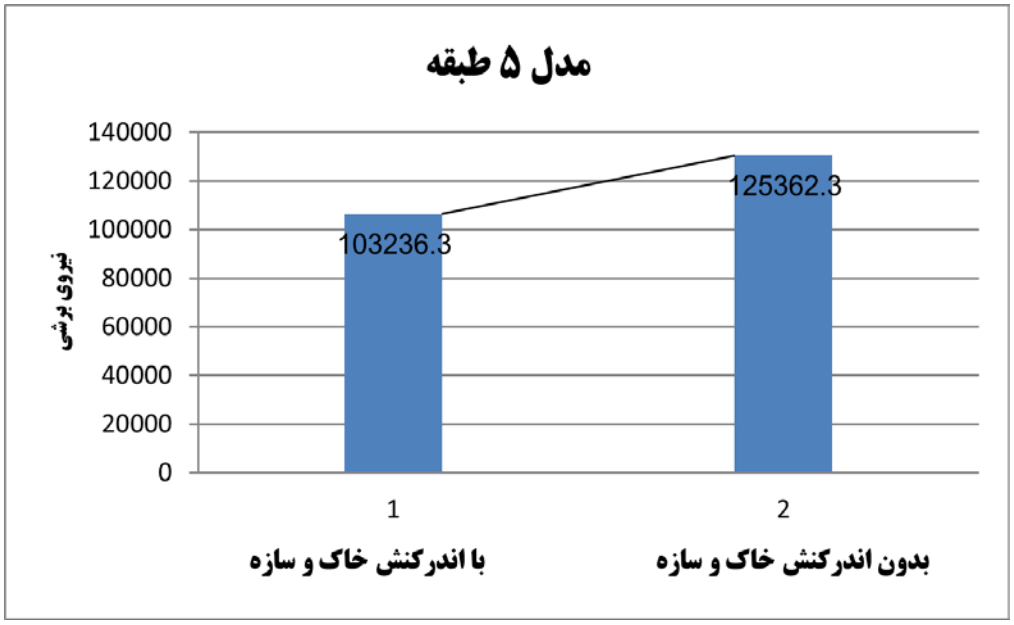


شکل (۸): منحنی پوش‌آور دوخطی سازه پنج طبقه بدون اندرکنش خاک و سازه

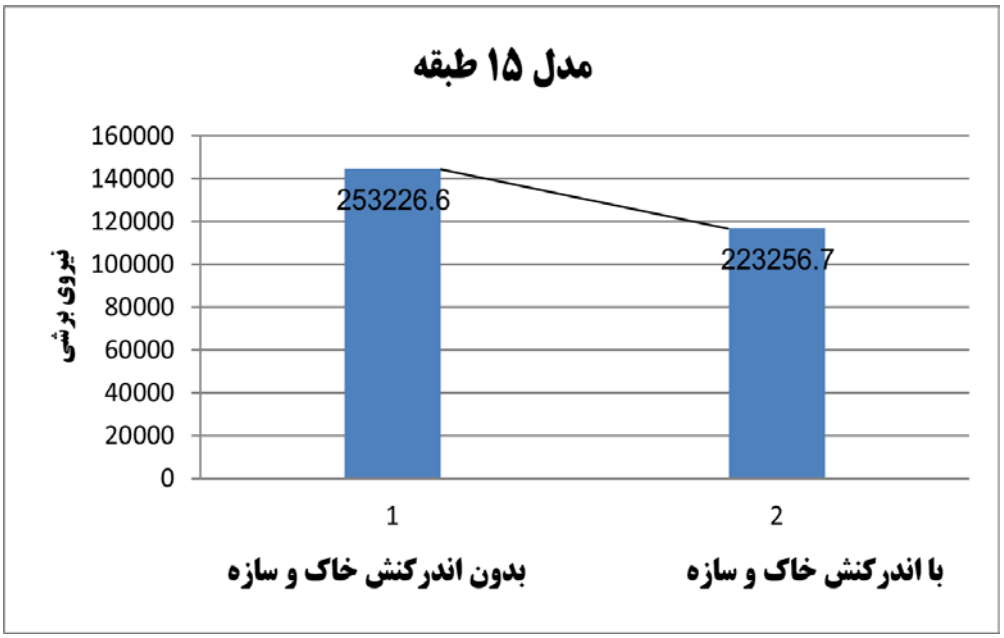
برای تمامی مدل‌های ساخته شده مربوط به نرم‌افزار SAP استخراج منحنی‌های پوشآور و دوخطی انجام شده است. سپس بر اساس این منحنی‌های استخراج شده به بررسی پارامترهای مؤثر در رفتار سازه‌های فولادی پرداخته شده است. پارامترهایی مانند برش پایه، تغییر مکان بیشینه، تغییر مکان بالای گره حذف شده، سختی و ضریب رفتار مورد محاسبه قرار گرفته است.

۶-۲- برش پایه

برش پایه یکی از مهم‌ترین پارامترها در طراحی سازه‌ها و همچنین مقایسه عملکرد سامانه سازه‌ای و نوع تحلیل در انواع تحقیقات مهندسی عمران است. در این تحقیق نیز از این پارامتر به‌عنوان یکی از پارامترهای مورد بررسی استفاده شده است. برای تمامی مدل‌ها در حالت‌های مختلف پس از استخراج نمودار پوش‌آور به بررسی مقادیر بیشینه برش پایه پرداخته شده است. مطابق شکل (۹) و (۱۰) نمودار برش پایه جهت مقایسه حالتهای با و بدون اثر اندرکنش خاک و سازه تشکیل شده است.



شکل (۹): مقایسه نیروی برشی مدل ۵ طبقه



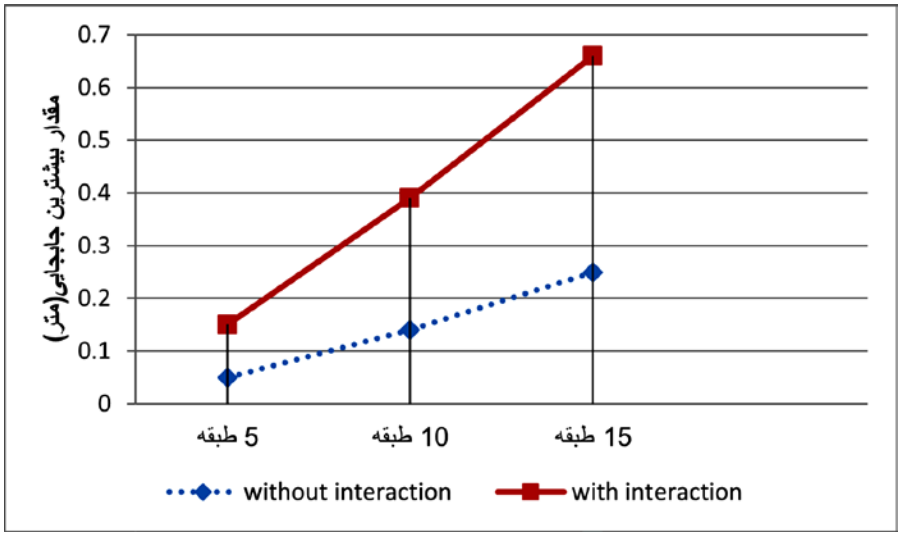
شکل (۱۰): مقایسه نیروی برشی مدل ۱۵ طبقه

۶-۳- تغییر مکان نقطه عملکرد

بر اساس تئوری اندرکنش خاک و سازه پیش‌بینی می‌شد که جابه‌جایی نقطه عملکرد در اثر در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه به علت نرمی فونداسیون سبب افزایش جابه‌جایی در نقطه عملکرد سازه شود. با این وجود جهت بررسی و مقایسه شرایط مدل‌سازی این پارامتر مورد بررسی قرار گرفته است. مطابق جدول (۵) و نمودار شکل (۱۱) نتایج حاصل از این بررسی مشاهده می‌گردد.

جدول (۵): مقادیر جابه‌جایی نقطه عملکرد سازه‌ها با اندرکنش و بدون اندرکنش خاک و سازه

سازه	ATC-40 (cm)		FEMA 356 (cm)	
	با اندرکنش	بدون اندرکنش	با اندرکنش	بدون اندرکنش
۵ طبقه	۶/۷	۳/۱۶	۱۰/۱۹	۲/۱۵
۱۰ طبقه	۲۵/۱۳	۱۲/۶	۲۴/۲۳	۱۸/۱۴
۱۵ طبقه	۳۵/۳	۴۴/۱۸	۳۲/۳	۴۰/۲۱
۲۰ طبقه	–	۵۸/۵۳	–	۵۲/۲



شکل (۱۱): نمودار بیشینه جابه‌جایی نقطه عملکرد در هر دو حالت بدون اندرکنش و با اندرکنش

۶-۴- جابه‌جایی گره بالای ستون حذف شده

جهت بررسی ستون بحرانی در پدیده تخریب پیش‌رونده سازه‌های مدل‌سازی شده پارامتر جابه‌جایی بالای گره حذف شده به‌عنوان یکی از پارامترهای مهم لحاظ شده است. نتایج حاصل در قالب جدول (۶) قابل مشاهده است.

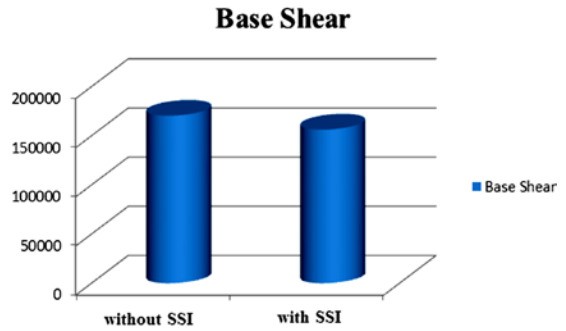
جدول (۶): جابه‌جایی بیشینه گره بالای محل حذف ستون با مقایسه اثر اندرکنش خاک و سازه

مدل	بدون اندرکنش خاک و	مدل	با اندرکنش خاک و سازه
ستون A-۱ در مدل ۵ طبقه	۶	ستون A-۱ در مدل ۵ طبقه	۶/۴۵
ستون C-۱ در مدل ۵ طبقه	۲/۷	ستون C-۱ در مدل ۵ طبقه	۲/۷
ستون A-۱ در مدل ۱۰ طبقه	۵/۷۲	ستون A-۱ در مدل ۱۰ طبقه	۲/۱۴
ستون C-۱ در مدل ۱۰ طبقه	۲/۹۵	ستون C-۱ در مدل ۱۰ طبقه	۲/۹۶
ستون A-۱ در مدل ۱۵ طبقه	۵/۵۲	ستون A-۱ در مدل ۱۵ طبقه	۴/۲
ستون C-۱ در مدل ۱۵ طبقه	۳/۳۱	ستون C-۱ در مدل ۱۵ طبقه	۳/۳۱

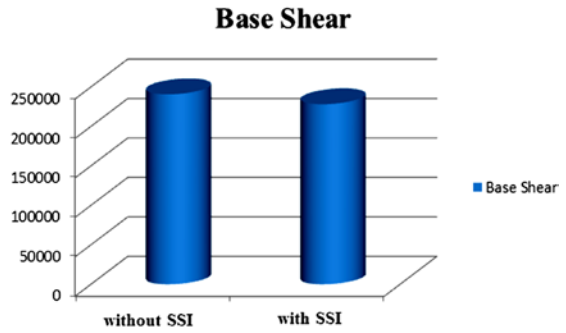
با توجه به جدول (۸) مشاهده می‌شود حالت در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه بر تخریب پیش‌رونده با حذف ستون‌های گوشه تأثیر قابل توجهی دارد و برای ستون‌های میانی تغییری در میزان جابه‌جایی گره بالای حذف ستون نشان نمی‌دهد. پس تأثیر اندرکنش خاک و سازه در تخریب پیش‌رونده فقط برای ستون‌های گوشه تأثیرگذار می‌باشد. همچنین در جدول فوق نشان داده شده است که در حالت بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه، با افزایش ارتفاع میزان جابه‌جایی گره بالای ستون حذف شده در مدل تخریب پیش‌رونده، کاهش می‌یابد که این تغییر در حالت با اثر اندرکنش خاک و سازه در مدل ۵ طبقه تا ۱۰ طبقه کاهش تغییر مکان نسبی گره بالای حذف ستون را نشان می‌دهد و از مدل ۱۰ طبقه تا ۱۵ طبقه با افزایش تغییر مکان مواجه شده است که این بدان معنی می‌باشد که با افزایش مود یا زمان تناوب سازه از صفر تا ۰/۵ ثانیه با کاهش تغییر مکانی نسبی سازه نتیجه‌گیری می‌شود و از ۰/۵ تا پریود اصلی سازه با افزایش تغییر مکان مواجه می‌شود.

۶-۵- برش پایه در سناریوی حذف ستون

جهت بررسی اثر حذف ستون در برش پایه و همچنین اثر اندرکنش خاک و سازه نمودارهای برش پایه برای حالات مختلف حذف ستون استخراج شده است. در شکل‌های (۱۲ و ۱۳) به‌دست آمده از نتایج تحلیل نرم‌افزار SAP نسبت به برش پایه در حالت حذف ستون نسبت به حالت مبنا، اثر اندرکنش خاک و سازه در مدل‌های مورد بررسی باعث کاهش نیروی برشی به‌دست آمده با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه به‌دست آمده است. به عبارتی دیگر اثر اندرکنش در تخریب پیش‌رونده روند کاهشی را در نیروی برشی به‌دست آمده را دربر می‌گیرد.



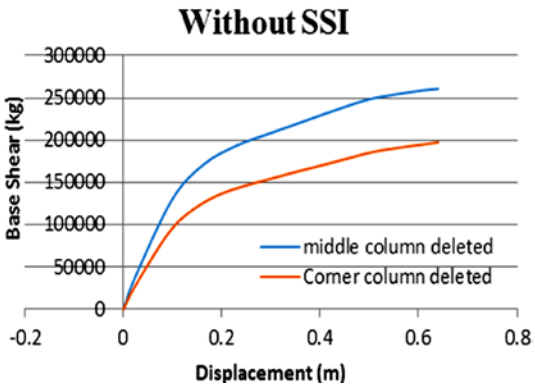
شکل (۱۲): مقایسه نیروی برشی در مدل ۵ طبقه حالت حذف ستون A1



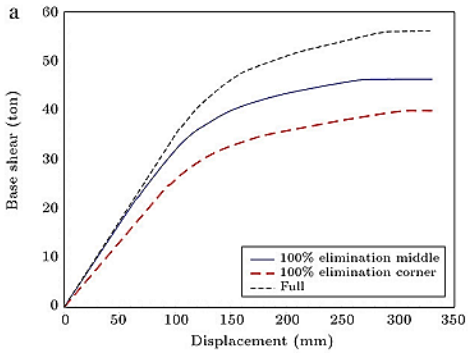
شکل (۱۳): مقایسه نیروی برشی در مدل ۵ طبقه حالت حذف ستون C1

۶-۶- صحت سنجی

جهت صحت سنجی مطالعات انجام شده از مقاله‌ای با عنوان بررسی تخریب پیش‌رونده در سازه‌های فولادی تحت بارگذاری جانبی تالیف توکلی و رشیدی در مجله علمی عمران شریف در سال ۲۰۱۲ استفاده شده است. در این مطالعه پدیده تخریب پیش‌رونده با استفاده از سناریوی حذف ستون مشابه فرآیند تحقیق حاضر انجام شده است. در این تحقیق نیز به این نتیجه رسیده شده که ستون گوشه وضعیت بحرانی‌تری نسبت به ستون میانی دارد. شکل (۱۴) و (۱۵) نمونه‌ای از منحنی‌های حاصل از نتایج این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل (۱۴): منحنی برش حاصل از حذف ستون گوشه و میانی در قاب ۴ طبقه

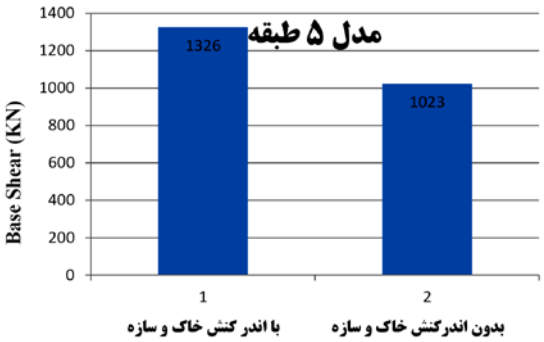


شکل (۱۵): منحنی برش جابه‌جایی حاصل از تحقیق فقیه مالکی و همکاران

همچنین نتایج تحقیق حاضر با مقاله سیروس غلامپور و همکاران تحت عنوان تأثیر اثر حذف ستون در خرابی پیش‌رونده بر عملکرد لرزه‌ای سازه‌های فولادی دارای قاب دوگانه در سال ۱۳۹۷ در مجله مهندسی سازه و ساخت نیز مقایسه شده است. بر اساس نتایج این تحقیق نیز ستون گوشه بحرانی‌ترین ستون در پدیده تخریب پیش‌رونده تعیین شده است.

۶-۷- نتایج تحلیل در روش مستقیم (پلاکسیس)

پس از بررسی نتایج تحلیل در نرم‌افزار Sap به بررسی نتایج تحلیل در روش مستقیم یعنی نرم‌افزار پلاکسیس به‌عنوان یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای مهندسی ژئوتکنیک پرداخته شده است. هدف از این مدل‌سازی امکان مقایسه بین مدل‌سازی به روش مستقیم و غیر مستقیم می‌باشد. تئوری فنر وینکلر با استفاده از سختی فنرهای معادل سختی خاک از روش غیر مستقیم استفاده می‌کند در حالی که در نرم‌افزار پلاکسیس خاک به‌صورت مستقیم در زیر سازه مدل‌سازی شده است. جهت این بررسی نیز از سه پارامتر حداکثر نیروی برشی وارد شده به پای ستون و همچنین جابه‌جایی بالای گره حذف شده و جابه‌جایی بیشینه نقطه عملکرد سازه استفاده شده است. نمودارهای مربوط به آن استخراج شده و نتایج آن در شکل (۱۶) ارائه شده است. همچنین مقادیر تغییرمکانها در جداول (۷) و (۸) ارایه شده است.



شکل (۱۶): میزان کاهش نیروی برشی در حالت با اندرکنش خاک و سازه و تکیه‌گاه صلب در نرم‌افزار پلاکسیس در مدل ۵ طبقه

جدول (۷): جابه‌جایی بیشینه گره بالای محل حذف ستون با مقایسه اثر اندرکنش خاک و سازه (سانتی‌متر) در نرم‌افزار پلاکسیس

مدل	بدون اندرکنش خاک و سازه	مدل	با اندرکنش خاک و سازه
ستون ۱- A در مدل ۵ طبقه	۷/۵	ستون ۱- A در مدل ۵ طبقه	۹/۶
ستون ۱- C در مدل ۵ طبقه	۴/۴	ستون ۱- C در مدل ۵ طبقه	۶/۱

جدول (۸): مقادیر جابه‌جایی نقطه عملکرد سازه‌ها با اندرکنش و بدون اندرکنش خاک و سازه در نرم‌افزار پلاکسیس

سازه	ATC-40 (cm)		FEMA 356 (cm)	
	با اندرکش	بدون اندرکش	با اندرکش	بدون اندرکش
۵ طبقه	۸/۳	۵/۶	۱۱/۴	۶/۵

۷- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نقش اثر اندرکنش خاک و سازه در جلوگیری از خرابی پیش‌رونده بسیار حائز اهمیت است، هنگامی که ستون‌های در گوشه‌های ساختمان در حالت بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه در مدل ۵ طبقه حذف می‌شدند، گسترش مفاصل پلاستیک در اعضای باربر مشاهده گردید که این سبب تغییر مکان گره بالای محل حذف ستون به مقدار بسیار ناچیز شده است، بنابراین موجودیت ساختمان به خطر نمی‌افتد، ولی در مدل‌های ۱۰ و ۱۵ طبقه مقدار قابل ملاحظه‌ای نتیجه‌گیری شد که لحاظ کردن اثر اندرکنش خاک و سازه در خرابی پیش‌رونده ضرورت می‌یابد.

همان‌طور که نتایج تحلیل مدل همچنین قاب خمشی نشان می‌دهد، هر چه محل حذف ستون در نزدیک به گوشه‌های ساختمان باشد، تعداد مفاصل پلاستیک ایجاد شده بیشتر می شود، بنابراین احتمال خرابی سازه در حالت‌های مختلف افزایش پیدا می‌کند.

در مقایسه حالات با و بدون در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه دیده شد که، در دو حالت حذف ستون تغییر مکان گره‌ای بسیار زیاد بود و در حالت حذف ستون میانی در دو حالت حذف ستون این اتفاق افتاده، بنابراین می‌توان اینگونه برداشت کرد که در سازه‌های قاب خمشی بتنی متوسط حتی الامکان با در نظر گرفتن اثر اندرکنش خاک و سازه به گونه‌ای که تعداد بیشتری از از ستون‌ها، در ستون‌های میانی قرار بگیرند حالت بهتری در مقابله با پدیده خرابی پیش‌رونده را ایجاد می‌کند.

همان‌طور که در تحلیل سازه با قاب خمشی در فصل سوم نشان داده شده است، ستون‌های گوشه ساختمان ستون‌های بحرانی هستند بنابراین تدابیر مقاوم سازی اعضای سازه‌ای در گوشه ساختمان می‌تواند مقاومت این ستون‌ها را در برابر پدیده خرابی پیش‌رونده پیشنهاد شود.

اندرکنش خاک سازه همواره باعث افزایش انعطاف‌پذیری سازه و در نتیجه، زمان تناوب اصلی ساختمان می‌گردد، آنچه که در این مطالعه مشاهده گردید این بود که با افزایش تعداد طبقات پریود سازه در مودهای بالاتر با در نظرگیری اندرکنش خاک سازه به پریود بدون اثر اندرکنش خاک سازه نزدیک‌تر می‌گردد.

با در نظرگیری اندرکنش خاک سازه سختی‌های مؤثر سازه کاهش می‌یابد، برش جاری شده سازه کاهش می‌یابد و تغییر مکان هدف سازه افزایش می‌یابد، اما در مورد تغییرات برش و تغییر مکان هدف در ارتفاع ساختمان نمی‌توان نظری داد.

اندرکنش خاک سازه ممکن است اثر مطلوبی بر پارامترهای ارزیابی اعضای سازه داشته و یا نداشته باشد اما آنچه در این مطالعه مشاهده گردید اینست که وضعیت المان‌ها (تیر یا ستون) بهتر می‌گردد.

با توجه به نمودارهای ارائه شده اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش پریود سازه می شود که با توجه به پای گیردار و صلب این افزایش ناچیزتر نسبت به پای فنردار ستون‌ها می‌باشد. همچنین اندرکنش خاک و سازه باعث افزایش میرایی سازه‌ها می‌شود، این افزایش در مدل سازه‌های کوتاه‌تر بیشتر است.

اثر اندرکنش خاک و سازه با توجه به نمودارهای پوش‌آور باعث افزایش جابه‌جایی در مدل‌های ۵ طبقه افزایش می‌یابد که این امر با وارد شدن نیروی کمتری به سازه حاصل می‌شود به عبارتی برش پایه کاهش یافته در حالی که جابه‌جایی افزایش می یابد. این امر در مدل‌های ۱۰ طبقه نیز بدین صورت می‌باشد ولی در مدل ۱۵ طبقه برش پایه تا بیشترین نیرو در ناحیه خطی می‌باشد که از آستانه فرو ریزش می‌باشد.

همچنین جهت بررسی روش ملاحظه اثر اندرکنش خاک و سازه و مقایسه روش مستقیم و غیر مستقیم مدل‌سازی یک قاب در نرم‌افزار پلاکسیس نیز انجام شده است. بر مبنای نتایج ارائه شده مشاهده می‌شود درصد کاهش نیروی برش پایه در روش مستقیم (پلاکسیس) در حدود ۳۰ درصد بوده که نسبته به درصد میانگین ۱۸ درصدی روش غیر مستقیم (Sap) تأثیر بیشتری گذاشته است.

همچنین مقادیر جابه‌جایی‌های مشاهده شده در روش مستقیم (پلاکسیس) بیشتر از روش غیر مستقیم (Sap) به‌دست آمده است. از لحاظ ستون بحرانی نیز در روش مستقیم (پلاکسیس) نیز همانند روش غیر مستقیم (Sap) ستون گوشه وضعیت بحرانی‌تری از خود نشان داده است.

۸- مراجع

[1] A. Bakhshipour Sedaposhte and B. Alinejad, "The Introduction of Progressive Collapse and Its Impact on the Stability of Steel Structures," Road, vol. 26, no. 95, pp. 115-131, 2018 (In Persian).

[2] S. Gholampoor Dahaki, J. Vaseghi Amiri, A. Naseri, and S. Rezayi, "Effect of Eliminating the Column on Progressive Collapse on Seismic Performance in Dual Steel Structures," J. of Structural and Construction Eng., vol. 5, no. 3, pp. 5-27, 2018 (In Persian).

[3] M. Hadianfard and M. Namjoo, "Numerical Investigation of the Behaviour of Bolted and Welded Top and Seat Angle Connection in Progressive Collapse of Steel Structures," J. of Structural and Construction Eng., vol. 6, no. 1, pp. 5-26, 2019 (In Persian).

[4] S. Karimiyan, "Seismic Progressive Collapse Evaluation in 3 Story Reinforced Concrete Buildings due to Inner Column Removal," J. of Structural and Construction Eng., vol. 7, no. 1, 2020 (In Persian).

[5] E. Mohammadi Dehcheshmeh, M. Kamalizad, V. Broujerdian, and G. Ghodrati Amiri, (). "Progressive Collapse in Steel Moment Frame Structures: Multi-Parameter Study," J. of Structural and Construction Eng., vol. 37, no. 4, 2021 (In Persian).

[6] R. Rezakhani and S.Rezaei, "The Evaluation of Progressive Collapse in the Space-Structure with the Scenario of Simultaneous Removal of a Column and Brace (Case Study: Wind Tunnel Retaining Structure)," Passive Defense Quarterly, vol. 12, no. 3, pp. 1-10, 2021.

[7] N. Allotey and H. Naggar, "An Investigation Into the Winkle Rmodeling of the Cyclic Response of Rigid Footings," Soil Dyn. Earthquake Eng., vol. 28, no. 1, pp.44-57, 2008.

[8] S. S. Yasrebi and M. Emami "Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in Prediction and Interpretation of Pressuremeter Test Results," In the 12th Int. Conf. of Int. Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Oct 1, pp. 1634-1638, 2008.

[9] FEMA-356, "Pre-Standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings," Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2000.

[10] A. S. Moghadam, "A Pushover Procedure for Tall Buildings," Proc. of the 12th European Conf. on Earthquake Eng., Paper 315, Elsevier Science Ltd., London, UK, 2002.

[11] GSA, "Progressive Collapse Analysis and Design Guidelines for New Federal Office Buildings and Major Modernization Projects," Washington DC, US, 2003.

[12] K. Khandelwal and S. El-Tawil, "Pushdown Resistance as a Measure of Robustness in Progressive Collapse Analysis," J. of Eng. Structures, vol. 33, pp. 2653-2661, 2011.

[13] S. M. Zahrai and A. R. Ezoddin, "Numerical Study of Progressive Collapse in Intermediate Moment Resisting Reinforced Concrete Frame Due to Column Removal," Civil Eng. Infrastructures J., vol. 47, no. 1, 2014.

[14] H. R. Tavakoli and A. Rashidi, "Evaluation of Progressive Collapse Potential of Multi-Story Moment Resisting Steel Frame Buildings Under Lateral Loading," Scientia Iranica, vol. 20, no. 1, pp. 77-86, 2013.

[15] M. Emami, "Modelling and Prediction of Coarse Grained Alluvium Behavior by Pressuremeter Test Results and Laboratory Chamber, Doctoral Dissertation, Tarbiat Modares University, 2014.

[16] O. A. Mohamed, "Calculation of Load Increase Factors for Assessmentof Progressive Collapse Potential in Framed Steel Structures," Case Studies in Structural Eng., vol. 3, pp. 11-18, 2015.

[17] H. R. Tavakoli and A. Rashidi, "Evaluation of Progressive Collapse Potential of Multi-Story Moment Resisting Steel Frame Buildings Under Lateral Loading," Scientia Iranica, vol. 20, no. 1, pp. 77-86, 2013.

[18] H. R. Tavakoli, A. Rashidi Alashti and G. R. Abdollahzadeh, "3-D Nonlinear Static Progressive Collapse Analysis of Multi-story Steel Braced Buildings,"15 WCEE, LISBOA, 2012.

[19] H. Helmy, H. Salem, and Sh. Mourad, "Progressive Collapse Assessment of Framed Reinforced Concrete Structures According to UFC Guidelines for Alternative Path Method," Eng. Struct., vol. 42, pp. 127-141, 2012.

[20] H. R. Tavakoli and F. Kiakojouri, "Numerical Study of Progressive Collapse in Framed Structures: A New Approach for Dynamic Column Removal," IJE Transactions A: Basics, vol. 26, no.7, pp. 685-692, July 2013.

Determination of the Critical Column in the Phenomenon of Progressive Collapse of the Steel Bending Frame Considering the Effect of Soil-Structure Interactions with both the Direct and Indirect Methods

M. Emami Korandeh*, S. A. Hosseini

Abstract

The phenomenon of progressive collapse is very important in the management of structures as well as the discussions related to passive defense. Due to the increasing terrorist threats in recent decades and the prevalence of such issues, this phenomenon has become more pronounced. The soil-structure interaction is also a new science in civil engineering. The structure behavior changes due to interactions with the soil and the literature review reveals various methods that have been presented for modelling this phenomenon in recent years. The main problem of the present study is to determine the critical column in the phenomenon of progressive collapse in steel flexural frame by considering the effect of soil-structure interactions with both the direct and indirect methods. The phenomenon of progressive collapse in the present study has been done with the help of column deletion scenario. In addition, the effect of soil-structure interactions has been modeled using the two direct and indirect methods in both Sap and Plaxis software. The two-dimensional steel frames are made for 5, 10, 15 and 20 story structures and are analyzed by the nonlinear static analysis and examined by the corner and middle column removal scenario. Various parameters such as the coefficient of behavior, base shear, displacement of the operating point and top of the node displacement are removed and the expansion of plastic joints are proposed as evaluation indicators. The results of the present study shows that the corner columns are in a more critical condition and the effect of soil-structure interactions in the direct method is much more significant.

Key Words: *Bending Steel Frame, Progressive Collapse, Pushover Analysis, Soil-Structure Interactions*

*Assistant Professor; Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.
(emamiacademic@gmail.com) - Writer-in-Charge